

УДК 621.7

## ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ВАКУУМНЫЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

**В. В. БУДИЛОВ**

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

Проводится анализ вакуумных ионных, электронных и плазменных методов обработки, применяемых в машиностроении при разработке интегрированных технологий. Предложена методология создания новых технологий, основанная на принципе физической, технологической и экономической структуризации методов обработки. Рассмотрены результаты расчетов, выполненных на разработанной модели синтеза интегрированной технологии обработки лопаток компрессора и турбины ГТД

*Вакуумные ионно-плазменные методы обработки; интегрированные технологии*

### ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие принципиально новых технологий обработки конструкционных материалов — вакуумных ионно-плазменных интегрированных технологий (ВИП-ИТ) — обусловлено целым рядом объективных факторов. Под интегрированной вакуумной ионно-плазменной технологией понимается совокупность методов обработки, объединенных в едином операционном пространстве (вакуумной среде), каждый из которых обеспечивает получение своего подмножества комплекса заданных свойств деталей.

Интегрированные вакуумные ионно-плазменные технологии удовлетворяют практически всем критериям прогрессивности технологического процесса:

- универсальность, т.е. возможность создания поверхностных слоев любого назначения (коррозионно-стойкие, жаростойкие, эрозионно-стойкие, износостойкие) для большинства деталей ГТД с помощью идентичных технологических приемов;

- высокая воспроизводимость параметров на каждой операции и практически 100 %-ый выход годных изделий;

- возможность быстро перестраивать оборудование для изготовления новых изделий без существенных затрат;

- практически полное отсутствие экологических проблем, гигиеничность и комфорт производства.

В настоящее время интегрированные вакуумные ионно-плазменные технологии позволяют решать следующие актуальные задачи производства ГТД:

- изменение химического состава поверхностного слоя детали (ионное легирование, изменение стехиометрии поверхности сложного состава и т.д.);

- удаление поверхностных слоев с деталей практически любой конфигурации (очистка поверхности тлеющим разрядом, ионным и электронным пучками) перед нанесением покрытия;

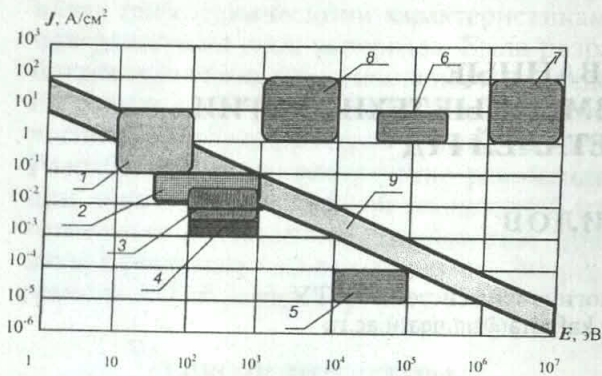
- нанесение защитных покрытий любого заданного состава и толщины (нанесение многокомпонентных сплавов, карбидов и нитридов металлов, химических соединений);

- создание новых методов прецизионной обработки труднообрабатываемых материалов (ионное полирование, ионное травление).

### 1. МЕТОДЫ ВАКУУМНОЙ ИОННОЙ, ЭЛЕКТРОННОЙ И ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Приведем краткий анализ вакуумных ионных, электронных и плазменных методов обработки, применяемых или возможных к применению в настоящее время в машинострое-

нии на основе диаграммы «энергия частиц – плотность потока» (рис. 1).



**Рис. 1.** Диаграмма «энергия частиц – плотность потока»: 1 – несамостоятельные сильноточные диффузионные разряды; 2 – разряды на основе вакуумной дуги с интегрально-холодным катодом; 3 – магнетронные разряды; 4 – тлеющие разряды; 5 – ионные пучки; 6 – мощные импульсные ионные пучки; 7 – мощные импульсные электронные пучки; 8 – мощные импульсные плазменные потоки; 9 – зона плавления и испарения обрабатываемых материалов

Область 1 – область несамостоятельных сильноточных диффузионных разрядов, характеризуемая низким (10–100 В) напряжением и высокой плотностью тока (0,2–2 А/см<sup>2</sup>). Давление в вакуумной камере  $P = 1-10^{-1}$  Па. Эта область может быть, например, использована для электронного нагрева перед нанесением покрытий, термической обработки в вакууме, ионной имплантации с одновременным электронным нагревом [1–3].

Область 2 – область вакуумных дуговых разрядов с холодным катодом, генерирующих плотные (концентрация плазмы  $n \sim 10^{18}$  м<sup>-3</sup>) потоки плазмы с энергией частиц  $E \sim 100$  эВ из твердых токопроводящих материалов. Генерация плазмы материала катода осуществляется подвижными катодными микропятнами вакуумной дуги, плотность мощности в которых достигает значений  $10^7-10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. При таких плотностях мощности имеет место испарение материала катода и генерация двухфазного потока плазмы, содержащего, наряду с плазмой и нейтральной компонентой, микрокапельную фазу. Состав продуктов эрозии катода определяется процессами в катодных микропятнах и зависит от рода испаряемого материала и от теплового состояния катода. Характерные режимы обработки: напряжение на обрабатываемой поверхности 50–200 В и плотность ионного тока 10–50 мА/см<sup>2</sup>. Давление в вакуумной камере

$P = 10^{-1}-10^{-2}$  Па. Эта область используется для нанесения покрытий, ионной очистки [4–6].

Область 3 – область магнетронных разрядов. Характерные режимы обработки: напряжение на распыляемой или обрабатываемой поверхности 400–800 В и плотность ионного тока 1–10 мА/см<sup>2</sup>. Давление в вакуумной камере  $P = 10^{-1}-10^{-2}$  Па. Эта область используется для нанесения покрытий, ионной очистки [7, 8].

Область 4 – область тлеющих разрядов, характеризуемая высоким напряжением (500–5000 В) и низкой плотностью тока (0,1–1 мА/см<sup>2</sup>). Давление в вакуумной камере  $P = 10^{-1}-10^{-2}$  Па. Эта область используется для химико-термической обработки в вакууме [9, 10].

Область 5 – область ионной имплантации. Характерные режимы обработки: энергия ионов  $E = 10^4-10^5$  эВ, плотность ионного тока 10–100 мкА/см<sup>2</sup>. Давление в вакуумной камере  $P \sim 10^{-3}$  Па. Эта область используется для ионной модификации обрабатываемой поверхности. Преимущества ионного легирования – возможность получения практически любого химического состава сплава независимо от коэффициентов диффузии, управляемость распределением и концентрацией легирующих элементов, высокая воспроизводимость свойств изделий. Недостаток этого метода – относительно малая глубина проникновения ионов не превышающая 1 мкм. Доза внедренных ионов находится в пределах от  $5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> до  $10^{19}$  ион/см<sup>2</sup>. При низких плотностях тока поверхность мишеней обогащается труднораспыляемыми (Mo, W, Cr и др.) и обедняется легкораспыляемыми (Al и др.) элементами. Ионное легирование тяжёлыми ионами (La, Yb) приводит к интенсивному травлению поверхностных слоев при крайне низких концентрациях внедренного иона, причем с увеличением дозы эти эффекты проявляются в большей степени [11–13].

Области 6, 7, 8 применяются для обработки мощными импульсными ионными, электронными и плазменными пучками [14, 15]. При этом достигаются большие градиенты температуры и высокие скорости нагрева до  $10^9 \div 10^{11}$  К/с. Средняя плотность выделения энергии на обрабатываемой поверхности при наносекундном импульсе составляет  $10^6 \div 10^8$  Дж/кг. В результате быстрого нагрева и охлаждения поверхностного слоя материала со скоростью больше, чем  $10^6$  К/с, про-

исходят существенные фазовые и структурные преобразования, включающие формирование новых фаз, фрагментацию фаз и зерна, увеличение количества структурных дефектов.

Область 6 применяется для обработки мощными импульсными ионными пучками (МИИП). Использование МИИП приводит к ионному легированию и оплавлению поверхностного слоя материала толщиной до десятков нанометров. Режимы обработки: энергия ионов от 50 до 500 кэВ при токе пучка от 5 до 150 А/см<sup>2</sup> и длительностью импульса в пределах от 50 до 100 нс. Высокая плотность энергии ионного потока до (10<sup>9</sup> Вт/см<sup>2</sup>) приводит к гидродинамическому перемешиванию расплава, структурно-фазовым превращениям в сталях и сплавах, формированию перенасыщенных твердых растворов. Так, при воздействии МИИП на жаропрочные сплавы в приповерхностных слоях последних при различных режимах облучения протекают следующие процессы: фазообразование ( $h \sim 0,2$  мкм) с формированием тонкодисперсных карбидов или оксикарбидов; плавление ( $h \sim 2$  мкм); сублимация и плазмообразование ( $h \sim 0,4$  мкм); дефектообразование ( $h \sim 10$  мкм); высокоскоростная кристаллизация; распад и дробление упрочняющих фаз (карбиды,  $\beta$ -фаза в титановых сплавах,  $\gamma'$ -фаза в никелевых сплавах); кратерообразование; формирование и рост поверхностных и подповерхностных трещин [16, 17].

Область 7 применяется для обработки мощными импульсными электронными пучками (МИЭП). Преимущества МИЭП — возможность модифицировать материалы на относительно большую глубину (до 1 мм), высокий коэффициент поглощения электронного пучка металлами, простота сканирования электронного пучка, высокий коэффициент эффективности (КПД) электронного источника (до 70 ÷ 80%). Обработка МИЭП приводит к нагреву и плавлению поверхностного слоя материала со скоростями нагревания и охлаждения до 10<sup>9</sup> К/с. Режимы обработки материалов: энергия электронов 1–10 мэВ; плотность мощности 10<sup>6</sup> ÷ 10<sup>9</sup> Вт/см<sup>2</sup> (нагрев и плавление поверхностного слоя), больше, чем 10<sup>9</sup> Вт/см<sup>2</sup> (парообразование). МИЭП технологии используются для упрочнения поверхностных слоев за счет формирования перенасыщенных твердых растворов, увеличения плотности дислокаций и других дефектов [18–20].

Область 8 применяется для обработки плазменными пучками. Преимущества обра-

ботки мощными импульсными плазменными пучками (МИПП) — возможность обработать относительно большие площади поверхностей в течение короткого периода времени, достаточно высокая однородность структуры обработанной поверхности. МИПП используется при необходимости быстро нагреть и охладить поверхностный слой на небольшую глубину 20 ... 40 нм со скоростями нагревания и охлаждения до 10<sup>6</sup> К/с. При этом модифицированный слой начинается с поверхности. Высокая энергия частиц (до 5 ÷ 10 кэВ) при концентрации ионов (1 ÷ 3) × 10<sup>17</sup> ион/см<sup>2</sup>, энергетическая плотность до 100 Дж/см<sup>2</sup> и длительность импульса 2 ÷ 10 нс позволяют использовать МИПП для обработки различных материалов. МИПП позволяют интегрировать в одном технологическом цикле высокие скорости охлаждения (до 10<sup>8</sup> К/с), насыщение поверхности (N, C и другими), сплавление жидкой фазы поверхностного слоя с легирующими элементами (например, Cr). В последнем случае перед обработкой необходимо на поверхность материала нанести покрытия с толщиной от сотни нм до нескольких мкм [21, 22].

## 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИТД НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ МЕТОДОВ

При проектировании вакуумных ионно-плазменных интегрированных технологий необходимо обеспечить рациональное сочетание методов воздействия и оборудования, позволяющих достичь минимальной технологической себестоимости. Такую задачу можно решить при использовании модели синтеза интегрированной технологии. Общее концептуальное решение задачи проектирования ВИП-ИТ основано на следующих гипотезах и постулатах [23]:

- интегрированная технология базируется на объединении в едином операционном пространстве (вакуумной среде) методов обработки, каждый из которых обеспечивает получения своего подмножества комплекса заданных свойств деталей;
- комбинация ВИП-методов и интеграция ВИП-методов в одном операционном пространстве ИТ обеспечивает получение одинаковых свойств поверхностей обрабатываемой детали при идентичности состава и последовательности методов и режимов обработки;
- каждый элементарный цикл ИТ, связанный с единомоментным воздействием одно-



Рис. 2. Структурно-информационная модель проектирования интегрированных технологий

го из методов обработки, можно с допустимой погрешностью представить как отдельный технологический процесс в части используемого метода обработки, применяемого оборудования и режимов его работы;

- при проектировании интегрированной технологии можно использовать часть технических и технологических решений, применяемых для проектирования традиционной ВИП-обработки;

- для ВИП-ИТ справедлив принцип суммирования свойств комплекса «покрытие-подложка», заключающийся в том, что эксплуатационные свойства комплекса «покрытие-подложка» определяются суммой эксплуатационных свойств подложки и эксплуатационных свойств покрытия;

- действует принцип технологической наследственности, заключающийся в том, что обеспечиваемые ВИП-ИТ физико-химические свойства определяются не только режимами обработки, но и свойствами самой подложки (т.е. видом предварительной механической или специальной упрочняющей обработки);

- проектирование режимов ВИП-обработки должно основываться на принципе оптимальности толщины покрытия, заключающемся в том, что для определенных условий эксплуатации и вида покрытий существует такая его толщина, которая обеспечивает наивысшие эксплуатационные характеристики;

- декомпозиция ВИП-ИТ основана на следующих элементарных объектах проектиро-

вания (ЭОП), образующих функционально-логическую структуру (рис. 2):

- метод обработки (МО), обеспечивающий формирование заданных свойств;

- источник частиц (ИЧ), реализующий МО;

- источник энергопитания (ИЭП), обеспечивающий энергоснабжение ИЧ;

- базовая установка (БУ), объединяющая вакуумную камеру и оборудование, множество ИЧ и ИЭП;

- технологические режимы (ТР), содержащие описание режимов и параметров работы ИЧ и ИЭП, обеспечивающих формирование заданных свойств изделия;

- функционально-логическая структура отражает общее направление проектирования, при этом решение проектной задачи очередного уровня обеспечивает формирование постановки задачи следующего уровня в части моделей ТЗ и условий проектирования;

- достоверная технико-экономическая оценка проектного решения ВИП-ИТ не может быть получена по совокупности оценок частных элементарных ОП (МО, ИЧ, ИЭП, БУ, ТР), а должна базироваться на общей интегральной оценке данной ВИП-ИТ;

- с учетом предыдущего фактора рациональным является получение ограниченного множества приемлемых решений, их ранжирование на основе процедуры технико-экономического анализа и выбор проектировщиком наиболее предпочтительного, по совокуп-

ности явно заданных и косвенных критериев оценки, варианта ВИП-ИТ.

Модель, позволяющая синтезировать интегрированный технологический процесс и компоновать оборудование для реализации ИТ, в общем случае предполагает иметь экспертную систему, базы данных (БД) и базы знаний (БЗ) по методам воздействия, источникам и установкам. При этом на каждом этапе выбора метода обработки, источника и установки возникает необходимость принятия рационального решения, реализуемая экспертной системой. Структурно-информационная модель проектирования интегрированных технологий представлена на рис. 2.

Проектирование организовано таким образом, что все прямо или косвенно установленные в сеансах экспертизы факты сохраняются в общей области и являются доступными для последующих сеансов или экономических расчетов.

Рассмотрим результаты расчетов, выполненных по разработанной модели синтеза интегрированной технологии, на примерах.

Для разработки интегрированной технологии обработки лопатки компрессора в систему проектирования вводятся исходные данные.

После обработки полученных данных система проектирования выдает информацию о рекомендуемых методах обработки: ионная имплантация, диффузионный отжиг и нанесение защитного покрытия.

Системой предложено два варианта обработки:

- вариант 1: каждый метод обработки проводится на установке, предназначенной для данного вида обработки;

- вариант 2: обработка осуществляется на модернизированной установке.

Для реализации первого варианта технологии выбраны следующие установки:

- установка «ВИТА» (ионная имплантация);
- вакуумная печь СЭВ 5.5/11.5 (отжиг);
- установка «ННВ-6,6-И1» (нанесение покрытия).

Для реализации варианта интегрированной технологии выбрана модернизированная установка «ННВ-6,6-И1», оснащенная источником «ДРАКОН».

Результаты расчетов приведены на рис. 3 и в табл. 1.

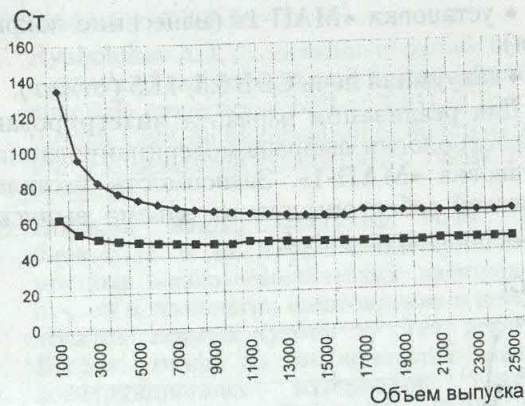


Рис. 3. Зависимость технологической себестоимости от объема выпуска: ◊ — вариант 1; ◻ — вариант 2

Таблица 1

Данные, не зависящие от объема выпуска

Экономические параметры	Вариант 1	Вариант 2	Снижение, %
Затраты по электроэнергии, руб./шт. ....	2,6–2,7	1,5–1,7	35–38
Затраты по материалам, руб./шт. ....	53–55	43–44	15–19
Время обработки, ч/шт. ....	0,6–0,7	0,3–0,4	30–50

Анализ приведенных данных показывает, что обработка лопатки компрессора по предложенной интегрированной технологии экономически выгодна при условии, что ионная имплантация и термообработка выполняются одним источником «ДРАКОН». Скачкообразность технологической себестоимости связана с увеличением парка оборудования при увеличении объема выпускаемой продукции.

Для разработки интегрированной технологии обработки лопатки турбины ГТД в систему вводятся исходные данные. После обработки полученных данных выбраны следующие методы обработки: «нанесение защитного покрытия + термообработка». Предложены два варианта обработки:

- вариант 1: каждый метод обработки проводится на установке, предназначенной для данного вида обработки;

- вариант 2: обработка осуществляется на модернизированной установке.

Для реализации первого варианта технологии выбраны следующие установки:

- установка «МАП-1» (нанесение покрытия);
- вакуумная печь СЭВ 5.5/11.5 (отжиг).

Для реализации варианта интегрированной технологии выбрана модернизированная установка «МАП-1». Зависимость технологической себестоимости от объема выпуска представлена на рис. 4.

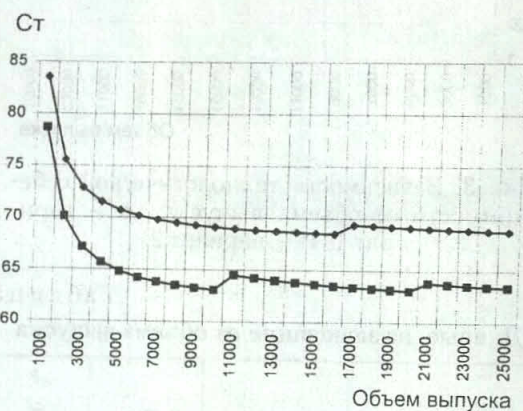


Рис. 4. Зависимость технологической себестоимости от объема выпуска:  $\diamond$  — вариант 1;  $\square$  — вариант 2

Данные, не зависящие от объема выпуска, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные, не зависящие от объема выпуска

Экономические параметры	Вариант 1	Вариант 2	Снижение, %
Затраты по электроэнергии, руб./шт. ....	2,7–2,8	1,8–1,9	22–25
Затраты по материалам, руб./шт. ....	57–58	59–60	–3––5
Время обработки, ч/шт. ....	0,7–0,8	0,3–0,35	40–50

Анализ приведенных данных показывает, что обработка турбины по интегрированной технологии экономически целесообразна. Хотя мы проигрываем по затратам на материалы, однако выигрыш по остальным показателям позволяет снизить технологическую себестоимость на 7–10%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным критерием успешного развития современного авиадвигателестроения является

способность осваивать новые технологии в кратчайшие сроки. Однако игнорирование законов, действующих в производственной сфере, часто сводит на нет преимущества технологий, основанных на новых физических эффектах и позволяющих повысить эксплуатационные характеристики. Причина этого заключается в том, что при создании новейших технологий нарушался главный принцип: обеспечение заданных свойств при приемлемой стоимости. Поэтому создание новых ионно-плазменных методов обработки и их широкое применение должны основываться на системном подходе при решении производственно-технологических задач на базе компьютерного моделирования и использования систем автоматизированного проектирования технологических процессов.

В основу методологии создания новых технологий должны лечь принципы физической, технологической и экономической структуризации методов обработки с использованием имеющихся в настоящее время классификаторов и банков данных.

Таким образом, очевидно, что отдельно рассматриваемые эффекты повышения эксплуатационных свойств не могут служить достаточным основанием для внедрения в производство. Отсюда следует, что полученный положительный эффект в лабораторных условиях при внедрении может реализовываться другими способами, приемлемыми в производственных условиях. Предложенная методология проектирования позволит рассматривать различные ситуационные модели результатов проектирования, значительно снизить технологический риск при разработке и внедрении вакуумных ионно-плазменных интегрированных технологий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль Н. Н., Кондратьев Н. П. и др. Исследование потоков ионов, возникающих в прикатодных областях дуги низкого давления // Изв. РАН. Сер. Физическая. 1999. Т. 63, № 11. С. 2271–2275.
2. Андреев А. А., Саблев Л. П., Ступан Р. И., Шелохаев В. И. Двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд и перспективы его использования в вакуумно-плазменной технологии // Вакуумные покрытия – 87: Тез. док. IV науч.-техн. конф. Рига, 1987. С. 63–65.
3. Budilov V. V., Agzamov R. D. Integrated technique of ion-plasma deposition of high-temperature coatings with the use of electronic heating // Proc. of the 5th Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, 2000. P. 416–417.

4. **Аксенов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М.** Формирование потоков металлической плазмы: Обзор. М.: ЦНИИ Автоинформ, 1984. 83 с.
5. **Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубо-яджан С.А. и др.** Вакуумная плазменная технология высоких энергий — эффективный путь создания новых покрытий и материалов // *Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков*. М.: ВИАМ, 1994. 314–325 с.
6. **Будилов В.В., Мухин В.С.** Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства деталей ГТД с вакуумными ионно-плазменными покрытиями // *Проблемы машиностроения, конструкционных материалов и технологий*. Уфа: Гилем, 1997. С. 63–77.
7. **Данилин Б.С., Сырчин В.К.** Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.
8. Нанесение металлов и их соединений методами магнетронного и диодного распыления: Обзоры по электротехнике. М.: ЦНИИ «Электроника», 1986. 42 с.
9. **Данилин Б.С., Киреев В.Ю.** Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 264 с.
10. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. А.Г. Братухина, Г.К. Язова, Б.Е. Карасева. М.: Машиностроение, 1997. 416 с.
11. **Nastasi M., Mayer J.V., Hirvonen J.X.** Ion-Solid Interaction: Fundamentals and Applications. Cambridge Solid State Science Series. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996. XXVII p. 540 p.
12. **Sharteev Yu.P.** The long range effect in ion implanted metallic materials: dislocation structures, properties, stresses, mechanisms // *Proc. of the 5th Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*. Tomsk, 2000. P. 53–57.
13. **Шулов В.А.** Влияние ионной имплантации на химический состав и структуру поверхностных слоев жаропрочных сплавов // *Изв. вузов. Физика*. 1994. № 5. С. 72–91.
14. **Kalin V.A.** Problems of material modification radiation beam technology choice // *Proc. of the 5th Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*. Tomsk, 2000. P. 285–290.
15. **Бойко В.Л., Евстигнеев В.В.** Введение в физику взаимодействия сильноточных пучков заряженных частиц с веществом. М.: Энергоатомиздат, 1988. 136 с.
16. **Гаврилов Н.В., Никулин С.П., Радковский Г.В.** Источник интенсивных импульсных пучков ионов газов на основе разряда с полным катодом в магнитном поле // *ПТЭ*. 1996. № 1. С. 93–98.
17. **Ryabchikov A.I.** Acceleration of particle beams, methods of analyzer and modification of surface materials properties at NPJ at TPU // *Proc. of the 5th Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*. Tomsk, 2000. P. 22–28.
18. **Ягодкин Ю.Д., Пастухов Н.М., Каблов Е.Н. и др.** Перспективы применения мощных низкоэнергетических электронных пучков в технологии изготовления и ремонта лопаток газовых турбин // *Тез. докл. IV Всерос. конф. по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц*. Томск, 1996. С. 276–279.
19. **Ozur G.E., Proskurovsky D.J., Karlik K.U.** Pul electron beam system for material surface treatment // *Proc. of the 5th Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*. Tomsk, 2000. P. 135–142.
20. **Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Щанин П.М.** Плазменный источник электронов для импульсной термообработки металлов // *Тез. докл. IV Всерос. конф. по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц*. Томск, 1996. С. 47–49.
21. **Якушин В.Л., Калинин Б.А., Скрытный В.И., Буланов И.А.** Упрочнение углеродистых и низколегированных сталей потоками высокотемпературной импульсной плазмы // *Радиационная физика твердого тела: Тр. X Межнац. совещания*. М.: НИИ ПМТ, 2000. С. 273–279.
22. **Калин Б.А., Якушин В.Л., Польский В.И.** Модификация металлических материалов при обработке потоками высокотемпературной импульсной плазмы // *Изв. вузов. Физика*. 1994. № 5. С. 109–126.
23. **Будилов В.В., Иванов В.Ю., Мухин В.С.** Интегрированные вакуумные ионно-плазменные технологии обработки деталей ГТД: физические основы, моделирование и проектирование. Уфа: Гилем, 2000. 256 с.

#### ОБ АВТОРЕ

**Будилов Владимир Васильевич**, профессор кафедры технологии машиностроения УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1969). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (заш. в МАИ, 1995). Исследования физических процессов в низкотемпературной плазме, взаимодействия потоков заряженных частиц с поверхностью конструкционных материалов, вакуумных ионно-плазменных технологий обработки деталей ГТД.

