

УДК 621.9.048.7

В. В. БУДИЛОВ, Р. Д. АГЗАМОВ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД ВАКУУМНЫМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ

Рассматривается комплексное модифицирование поверхности лопаток компрессора ГТД, основанное на ионно-плазменном азотировании и последующем нанесении многослойных покрытий. *Лопатки компрессора ГТД; модифицирование поверхности; ионно-плазменное азотирование; многослойные покрытия*

Одним из основных элементов, определяющих работоспособность компрессора ГТД, являются компрессорные лопатки. Поэтому к ним предъявляются жесткие требования по надежности работы на установившихся и переходных режимах на земле и в воздухе в широком диапазоне климатических условий. Лопатки компрессора испытывают большие статические и динамические нагрузки во время работы двигателя и подвержены абразивной эрозии. Вследствие ударов мельчайшие частицы потока разрушают поверхностный слой пера лопаток. Появляющиеся в процессе абразивной эрозии надеры, царапины, а также образующиеся в результате этого микротрещины становятся концентраторами напряжений и при многократном воздействии переменной нагрузки способствуют усталостному разрушению лопаток.

Кроме того, под воздействием агрессивной среды происходит коррозионное разрушение поверхности пера лопаток компрессора ГТД. Наиболее типичными видами коррозионного повреждения поверхности являются окисление, межкристаллитная и питтинговая коррозия, коррозионная усталость и коррозионное растрескивание. Вследствие коррозии на поверхности детали часто образуются микроскопические питтинги (локальные коррозионные разрушения отдельных зерен или группы зерен). Они являются концентраторами напряжений и служат причиной образования сетки микротрещин, что в конечном счете также способствует усталостному разрушению лопаток.

В последнее время в качестве перспективных коррозионностойких и эрозионностойких покрытий для лопаток компрессора ГТД, работающих в диапазоне 300–500°C, рассма-

триваются покрытия на основе карбидов и нитридов металлов [1–4]. В работе [2] получены значения эрозионной стойкости покрытий TiN толщиной $h \sim 7$ мкм на титановом сплаве ВТ6С в 30–160 раз выше, чем сплава ВТ6С без покрытий (при угле обдува $\varphi = 20^\circ$). Показано, что эрозионная стойкость зависит как от размера абразивных частиц, так и от режимов нанесения покрытий. Эрозионная стойкость возрастает с увеличением толщины покрытий. В работе [3] приведены результаты по исследованию коррозионной и эрозионной стойкости рабочих лопаток ГТД компрессора. Показано, что покрытия толщиной $h \sim 10$ мкм увеличивают эрозионную стойкость в 10 раз (при угле обдува $\varphi = 20^\circ$). После коррозионных циклических испытаний (нагрев до 300°C, охлаждение в 3%-м растворе хлористого натрия, выдержка в камере при влажности 95–100% в течение 22 часов) в течение десяти суток коррозия отсутствовала.

Опыт эксплуатации показывает недостаточную эффективность никель-кадмиевых покрытий при рабочих температурах до 450°C. Предел выносливости снижается на 35%. На сталях 13X11H2B2MФ-III и 15X12H2MBФAB2-III эффективной защитой от эрозии и коррозии могут являться: диффузионное хромоалюминидное (Х-ДифА) покрытие, диффузионное алюминидносиликофосфатное (ДифА-СФ) покрытие, ионно-плазменное покрытие TiN, металлокерамическое (ВП-АФЦ) и тоже с подслоем никеля (Н-ВП-АФЦ-2) [4]. На основе сравнения эксплуатационных и технических показателей указанных покрытий авторы делают вывод, что по совокупности свойств оптимальным является покрытие ДифА-СФ.

Однако этот вывод не согласуется с результатами ряда других работ [2, 3], а также с результатами, полученными авторами данной работы. Так, коррозионная стойкость покрытий TiN гораздо выше, чем никель-кадмиевых покрытий, эрозионная стойкость выше, чем у остальных рассмотренных покрытий. Спорным является и утверждение авторов [4] о низкой технологичности покрытий TiN по сравнению с рассмотренными покрытиями.

Известно, что газоабразивный (эрозионный) износ лопаток компрессора является основной причиной досрочного съема и ремонта двигателей, эксплуатирующихся в условиях с сильной запыленностью воздуха. Поэтому защита лопаток компрессора ГТД от газоабразивного износа имеет большое значение. Эрозионный износ поверхности зависит как от многих параметров материала подложки и абразивных частиц, так и от условий взаимодействия с двухфазным потоком. Исследования [5] показали, что повышение износостойкости компрессорных сталей и титановых сплавов возможно только за счет ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких соединений, что стимулировало разработку таких покрытий. Были получены практически все известные карбиды и нитриды металлов и показано, что из-за больших остаточных напряжений, достигающих значений до 1500 МПа, ряд карбидов и нитридов разрушаются после осаждения [5]. По эрозионной стойкости (ЭС) покрытия располагаются в следующий ряд: VN, VC, CrC, ZrN, TiN и т. д. Для указанных ионных покрытий ЭС композиций сплав-покрытие в зависимости от угла атаки пылевоздушного потока в 5–30 раз выше, чем у незащищенного сплава ОТ4-1 или стали ЭИ961.

Переход к многослойным, менее напряженным, структурам типа Me/MeN(C) не позволяет получить высокую ЭС. Применение подслоев из материалов, имеющих промежуточные значения теплового коэффициента линейного расширения (Cr, Ti, Zr, ВЖЛ-2, ВКНА), а также соединений типа (Zr-Nb)N, (Zr-Ti)N тоже не дает выигрыша по ЭС композиции сплав-покрытие. ЭС зависит от толщины покрытия, а также от параметров процесса осаждения [5].

Испытания образцов с покрытиями на коррозионную стойкость в тропической камере (5–8 мес.), в камере соляного тумана (5 мес) и в 3%-м растворе NaCl в течение 5 мес. показали, что худшей коррозионной стойкостью обладают покрытия VN и VC. Покрытия из ZrN, TiN, TiC и CrC обладают удо-

влетворительной коррозионной стойкостью в общеклиматических условиях.

Показано, что длительные коррозионные испытания образцов с покрытиями в условиях тропической камеры (5–8 мес.) не сказываются на их ЭС.

Из исследованных покрытий, представляющих практический интерес, только покрытие из ZrN не снижает предела выносливости сплавов на основе титана. Это покрытие рекомендовано для защиты сплавов на основе Ti. Для защиты компрессорных сталей рекомендовано покрытие CrC [5].

Одним из перспективных методов, повышающих эксплуатационные свойства лопаток компрессора, является ионно-имплантационная обработка [6].

Эксперименты показали, что ионная имплантация поверхности обеспечивает повышение усталостной прочности. Вместе с тем для лопаток компрессора ГТД, работающих в условиях высоких температур, нагрузок и агрессивных сред, появляется необходимость обеспечения комплекса свойств. В частности, для лопаток компрессора ГТД из стали ЭИ-961Ш — это сочетание усталостной прочности, коррозионной и эрозионной стойкости [7].

Объектом исследования явились образцы из стали ЭИ-961Ш, рабочая поверхность которых обрабатывалась по следующим вариантам:

- 1) Ионная имплантация N^+ : $E = 30$ кэВ, $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см², $j = 20-40$ мкА/см² [6].
- 2) Нанесение покрытия TiN: $J_d = 180-200$ А, $U_n = 180-200$ В, $P = 1 \cdot 10^{-3}$ Па, $h = 12-15$ мкм.
- 3) Отжиг: $T = 560 \pm 10^\circ\text{C}$, $t = 2$ часа, $P = 3 \cdot 10^{-5}$ Па.

Данные исследований представлены на рис. 1.

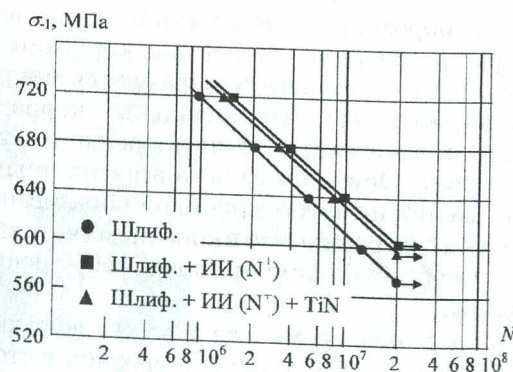


Рис. 1. Влияние вида вакуумно-плазменной обработки на предел выносливости материала ЭИ-961Ш

Анализ данных по влиянию вида вакуумно-плазменной обработки на предел выносливости показывает, что наилучший результат получен у образцов, имплантированных ионами азота и обработанных комбинированной технологией.

Анализ данных площади поражения коррозией (S , %) образцов из материала ЭИ-961Ш показывает, что использование вакуумных ионно-плазменных методов обработки позволяет повысить коррозионную стойкость в 4–5 раз (рис. 2). Эти же данные подтверждаются исследованиями зависимости электродного потенциала от времени при различных видах обработки.

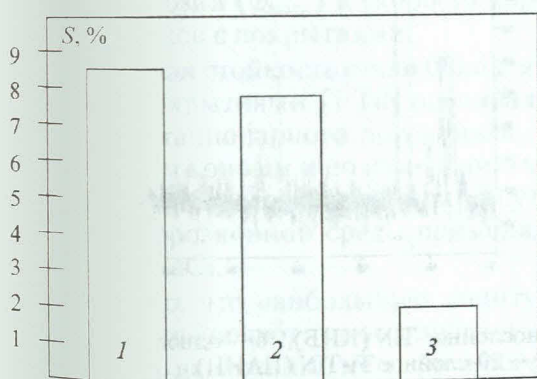


Рис. 2. Гистограмма коррозионной стойкости материала ЭИ-961Ш при различных видах обработки: 1 – шлиф; 2 – исх. + ИИ (N+); 3 – исх. + TiN

Наиболее перспективным и активно разрабатываемым способом создания многофункциональных поверхностных слоев является совмещение высокоэнергетической ионной имплантации с последующим нанесением покрытий, приводящее к формированию уникальных, недостижимых при традиционных методах воздействия, эксплуатационных свойств лопаток ГТД. Однако для получения многофункциональных поверхностных слоев может быть использована технически более простая и экономически более эффективная технология, совмещающая модификацию поверхности низкоэнергетическими ионами из плазменных потоков с последующим нанесением покрытий [8].

Повышение производительности ионно-плазменной обработки и качества поверхностного слоя возможно за счет дополнительной ионизации атомов газа, обеспечиваемой путем применения различных технических решений [8].

Так, применение эффекта полого катода (ЭПК) при азотировании в тлеющем разряде

приводит к увеличению производительности обработки [9].

На рис. 3 показано изменение микротвердости по глубине азотированного слоя стали 38ХМЮА при одинаковых температуре и продолжительности процесса азотирования. Обработка проводилась в смеси газов азота, ацетилена и аргона.

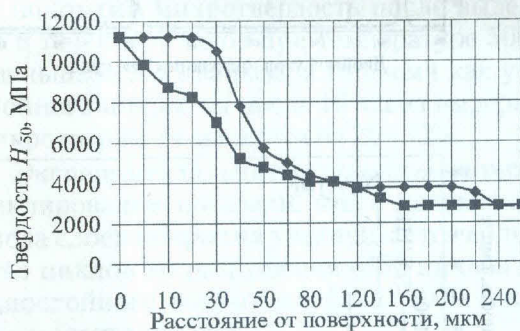


Рис. 3. Изменение микротвердости по глубине азотированного слоя стали 38ХМЮА после обработки в тлеющем разряде ($T = 550^\circ\text{C}$, $t = 6$ часов): \blacklozenge – с ЭПК; \blacksquare – без ЭПК

Из рис. 3 следует, что в условиях проявления ЭПК значение глубины азотированного слоя существенно выше, несмотря на более низкое напряжение горения разряда. Увеличение глубины азотированного слоя на образцах, азотированных в тлеющем разряде в условиях ЭПК при прочих равных параметрах проведения процесса, объясняется более высокой плотностью тока ($j = 5 \text{ мА/см}^2$ – для тлеющего разряда с плоским катодом, $j = 17 \text{ мА/см}^2$ – для тлеющего разряда с ЭПК), что приводит к интенсификации процессов осаждения и диффузии атомов азота в глубь материала.

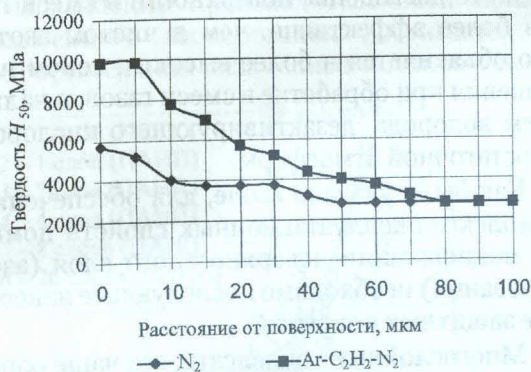


Рис. 4. Профили микротвердости поверхности стали 38ХМЮА, азотированной несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом

Повышение эффективности низкоэнергетического ионно-плазменного азотирования с

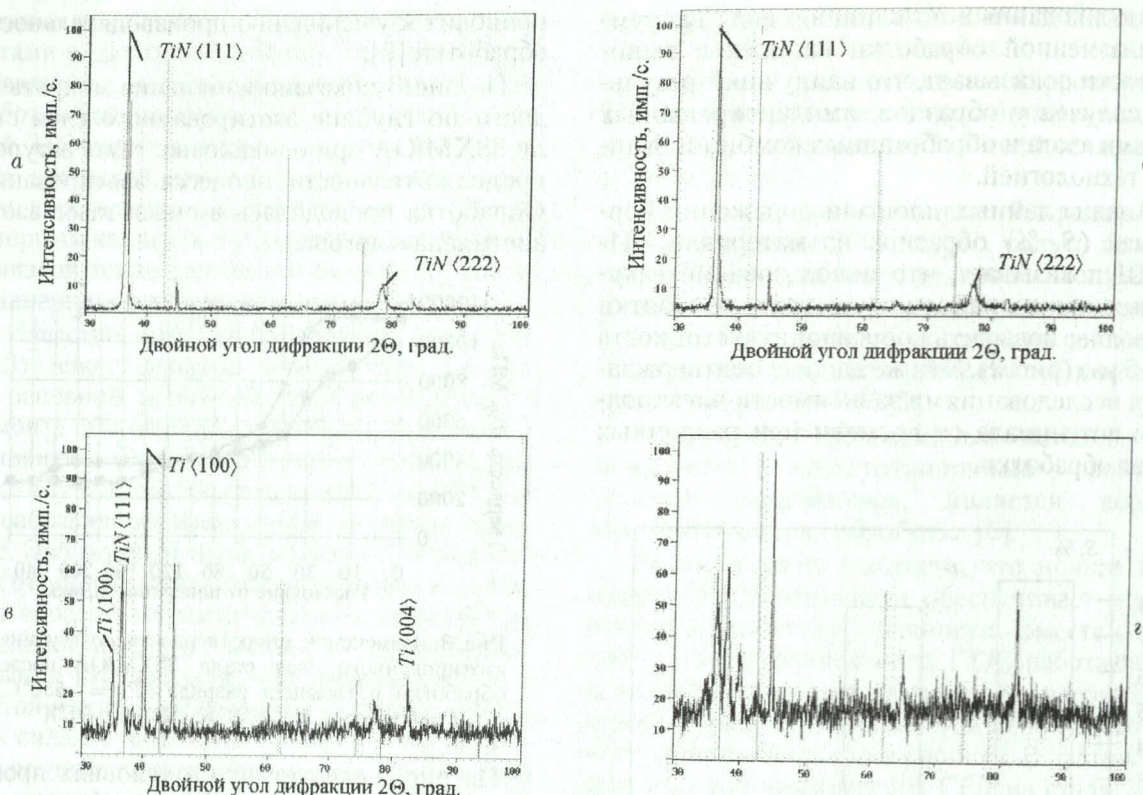


Рис. 5. Рентгенограммы многослойных покрытий: а — однослойное TiN (КИБ), б — однослойное TiN (ПАНП), в — 2-слойное Ti-TiN (ПАНП), г — 20-слойное Ti-TiN (ПАНП)

использованием источников ионов достигает также за счёт применения в качестве рабочей атмосферы смеси газов.

На рис. 4 представлены профили микротвердости поверхности на стали 38ХМЮА, обработанной несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом, реализуемым источником «ПИНК».

Анализ зависимостей (см. рис. 4) показывает, что насыщение поверхности в смеси газов более эффективно, чем в чистом азоте. Это объясняется и более высоким током насыщения при обработке в смеси газов, и наличием водорода, дезактивирующего кислород из остаточной атмосферы.

Как было указано выше, для обеспечения комплекса эксплуатационных свойств помимо модификации поверхностного слоя (азотирования) необходимо последующее нанесение защитных покрытий.

Многослойные конденсаты все чаще обращают на себя внимание исследователей своими уникальными свойствами, реализуемыми за счет резкого увеличения числа межфазных границ.

Так, в работе [10] показано, что нанесение многослойных покрытий с одновремен-

ной бомбардировкой ионами азота затрудняет рост столбчатой структуры образующегося нитрида титана, приводит к формированию покрытий с низкой плотностью дефектов, к снижению внутренних напряжений и с ультрамелкозернистой поликристаллической структурой. Отсюда открывается путь создания перспективных поверхностных слоев с уникальными свойствами.

Анализ рентгенограмм (рис. 5) показал, что однослойные покрытия, нанесенные как методом катодной ионной бомбардировки (КИБ), так и методом плазменно-ассистированного нанесения покрытий (ПАНП), преимущественно состоят из фазы TiN с ярко выраженной текстурой (111).

В многослойных покрытиях выявлено наличие фазы α -Ti и фазы TiN с текстурами различных направлений, причем с увеличением числа слоев увеличивается разориентация кристаллов указанных выше фаз, что приводит к образованию равновесной мелкозернистой структуры и улучшению свойств покрытия.

Анализ физического уширения рентгеновских пиков показал, что с увеличением числа слоев также уменьшается уровень микроис-

Таблица

Коррозионные свойства образцов с покрытиями

Вид покрытия	Без покрытия	TiN (КИБ)	TiN (ПАНП)	Ti-TiN 2 слоя	Ti-TiN 4 слоя	Ti-TiN 8 слоев	Ti-TiN 20 слоев
$\varphi_{кор.}$, мВ	-348,2	-334,9	-254,6	-292,9	-269,7	-234,8	-295,1
$V_{кор.}$, г/м ² ·ч	0,226	0,106	0,092	0,081	0,061	0,065	0,070

кажений кристаллической решётки, что свидетельствует о снижении внутренних напряжений в покрытии. Указанные особенности многослойных покрытий, полученных методом плазменно-ассистированного нанесения покрытий, приводят к увеличению эксплуатационных свойств.

В таблице представлены стационарные потенциалы коррозии ($\varphi_{кор.}$) и скорость коррозии $V_{кор.}$ образцов с покрытиями.

Коррозионная стойкость стали 08кп с многослойными покрытиями Ti-TiN оценивалась по величине стационарного потенциала, поляризационным кривым и по изменению массы образца после выдержки в течение 7 суток. В качестве коррозионной среды применялся 3%-й раствор NaCl.

Установлено, что наибольшую защиту от коррозии обеспечивают многослойные покрытия Ti-TiN, нанесенные методом плазменно-ассистированного нанесения покрытий.

Анализ поляризационных кривых образцов с покрытиями со степенью деформации 20% (деформация сжатия и растяжения) показал, что скорость коррозии увеличивается у всех образцов с покрытиями. Однако у образцов с многослойными покрытиями скорость коррозии намного меньше, чем у образцов с покрытием TiN (рис. 6).

Исследования термостойкости однослойных и многослойных покрытий композиции Ti-TiN показали, что многослойные покрытия обладают более высокой термостойко-

стью, чем однослойные. Так, у однослойного покрытия микротвердость после выдержки в течение 4 часов при температуре 500°C уменьшается в два раза, в то время как у 20-слойного покрытия после 16 часов выдержки микротвердость меняется на 20–30%.

Экспериментальные результаты на термодетектировании показали, что с увеличением числа слоев покрытия увеличивается количество циклов до разрушения (480 циклов для однослойного покрытия и более 1000 циклов для многослойного).

Можно предположить, что многослойные покрытия обладают повышенными эксплуатационными свойствами благодаря чередующимся тонким слоям переменной твердости и различного фазового состава, чрезвычайно эффективно тормозящим развитие трещины, что в целом повышает трещиностойкость и вязкость разрушения композиций покрытие-основной материал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показывают, что предложенные методы ионно-плазменного азотирования и нанесения многослойных покрытий являются перспективными для использования в технологии упрочнения лопаток компрессора ГТД, работающих при температурах до 400–450°C.

Повышение производительности ионно-плазменного азотирования достигается за счет применения плазменных потоков с высо-

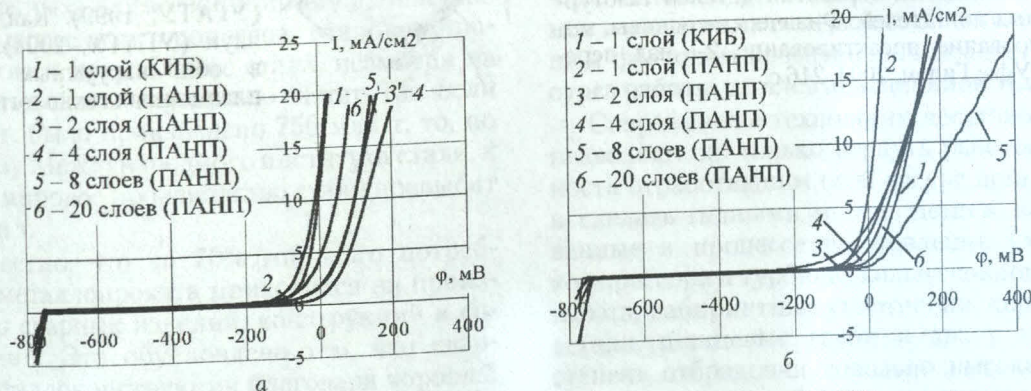


Рис. 6. Поляризационные кривые образцов из стали 08кп с покрытиями Ti-TiN под действием остаточных напряжений: а — растягивающих; б — сжимающих

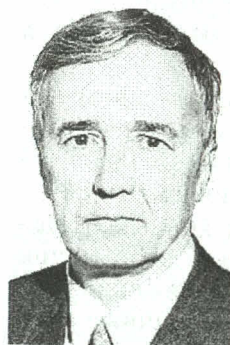
кой плотностью заряженных частиц. Генерация таких плазменных потоков обеспечивается применением эффекта полого катода.

Повышение защитных свойств ионно-плазменных покрытий достигается за счет нанесения многослойных покрытий с одновременной бомбардировкой ионами рабочего газа, что приводит к формированию мелкодисперсных покрытий с низкой плотностью дефектов [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **О механизме** образования покрытия при восстановлении лопаток ГТД на вакуумной ионно-плазменной установке ПНВ-6,6И1 / Ю. А. Скажутин, Е. П. Пантелеев и др. // *Авиационная промышленность*. 1990. Т. 10. С. 21–23.
2. **Исследование** эрозионной прочности ионно-плазменного покрытия из нитрида титана / Л. А. Хворостухин, Ю. А. Ножницкий и др. // *Авиационная промышленность*. 1988. Т. 6. С. 59–61.
3. **Повышение** эрозионной стойкости рабочих лопаток компрессора ГТД / Н. В. Белан, В. В. Омельченко и др. // *Авиационная промышленность*. 1986. Т. 10. С. 19–21.
4. **Душкин А. М., Прощин А. Б., Иванов Е. Г.** Защитные покрытия для стальных лопаток компрессора ГТД // *Авиационная промышленность*. 1988. Т. 7. С. 13–15.
5. **Мубояджан С. А.** Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток авиационных ГТД: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1997. 47 с.
6. **Смыслов А. М.** Комбинированные технологии на базе ионно-имплантационного модифицирования поверхности, обеспечивающие повышение ресурса и надежности лопаток компрессора и турбины ГТД: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 1993. 40 с.
7. **Будиллов В. В., Иванов В. Ю., Мухин В. С.** Интегрированные вакуумные ионно-плазменные технологии обработки деталей газотурбинных двигателей. Физические основы, моделирование, проектирование. 2-е изд. перераб. Уфа: Гилем, 2004. 216 с.
8. **Агзамов Р. Д.** Повышение производительности и качества поверхностного слоя деталей путём дополнительной ионизации газа при ионно-плазменной обработке. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2004. 16 с.
9. **Агзамов Р. Д., Будиллов В. В.** Ионное азотирование в тлеющем разряде с эффектом полого катода // *ОТТОМ-4: Сб. докл. междунар. конф.* Харьков, 2003. С. 262–265.
10. **Агзамов Р. Д., Будиллов В. В., Адашева С. Л.** Коррозионные свойства многослойных покрытий композиции Ti-TiN₂, нанесенных методом плазменно-ассистированного нанесения покрытий // *Инновационные проблемы развития машиностроения в Башкортостане: Сб. тр. науч.-техн. конф.* Уфа: Гилем, 2003. С. 242–254.
11. **Коваль Н. Н.** Источники низкотемпературной плазмы и электронных пучков на основе дуговых разрядов низкого давления с полым анодом. Дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2000. 74 с.

ОБ АВТОРАХ



Будиллов Владимир Васильевич, проф. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1969). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (защ. в МАИ, 1995). Иссл. физических процессов в низкотемпературной плазме, вакуумных ионно-плазменных технологий обработки деталей ГТД.



Агзамов Рашид Денисламович, ст. преп. каф. техн. машиностр. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. вакуумных ионно-плазменных технологий.