

А. М. Смыслов, Ю. М. Дыбленко, М. К. Смылова,  
К. С. Селиванов, А. Д. Мингажев, А. А. Мингажева

## НОВАЯ ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА И ТЕХНОЛОГИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ, НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛИ ГТД И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Рассматривается конструкция новой вакуумной установки и технологии получения вакуумно-плазменных покрытий для лопаток ГТД и паровых турбин совмещением процессов электродугового осаждения и ионной имплантации. Приводятся результаты исследования образцов с многослойным вакуумно-плазменным покрытием с целью повышения их эрозионной стойкости. *Вакуумная установка; вакуумно-плазменные покрытия; паровые турбины; электродуговое осаждение; ионная имплантация; эрозионная стойкость*

Все более высокие требования, предъявляемые к надежности и долговечности деталей авиационной техники и энергетического оборудования, при одновременном ужесточении условий их эксплуатации требуют разработки новых технологий и оборудования, основанных, в частности, на комбинировании высокоэффективных методов упрочняющей обработки и нанесения защитных покрытий. Как показала практика обработки и упрочнения ответственных деталей авиационных двигателей и энергетических установок, наиболее эффективными являются технологии, основанные на использовании методов вакуумной ионно-имплантационной и ионно-плазменной обработки поверхностей деталей и нанесения защитных покрытий. Однако в настоящее время отсутствует эффективное технологическое оборудование, позволяющее реализовывать подобные технологии.

Существующие вакуумные установки, как правило, предназначены либо для нанесения защитных покрытий [1], либо для ионной упрочняющей обработки [2], либо для модификации поверхности путем ионной имплантации [3]. К недостаткам установки [2] можно также отнести малоэффективный процесс упрочнения поверхности деталей вследствие низкой энергии частиц рабочего газа. Кроме того, при химико-термической обработке для получения необходимой концентрации легирующего элемента в поверхности изделий необходимо длительная выдержка деталей в среде рабочего газа при высокой температуре. Это является причиной низ-

кой производительности процесса. Модификация поверхности путем ионной имплантации позволяет улучшать прочностные характеристики изделий без снижения пластичности, благодаря чему повышают, например, сопротивление усталости изделий. Однако рассмотренные виды установок характеризуются ограниченностью технологических возможностей, вследствие чего не удается получить высокие эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей.

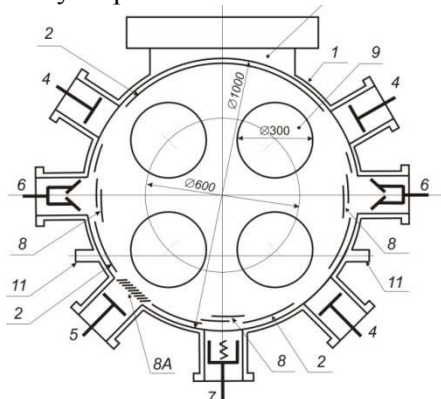
### КОНСТРУКЦИЯ НОВОЙ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ

Для реализации комплекса перспективных вакуумно-плазменных технологий высоких энергий с целью обеспечения заданных эксплуатационных свойств деталей ГТД авторами была разработана новая конструкция вакуумной установки [5]. В частности, установка предназначена для реализации комплексной упрочняющей технологии модифицирования поверхности и нанесения функциональных покрытий на лопатки ГТД, а также паровых турбин с длиной лопаток до 1200 мм. Технология включает в себя операции поверхностной обработки, ионную очистку и активацию поверхности, нанесение различного вида функциональных многослойных (в т. ч. градиентных) покрытий, модифицирование поверхности металлической и газовой плазмой. Кроме того, установка позволяет реализовать комбинированную поверхностную химико-термическую обработку с последующим нанесением покрытия в одном технологическом цикле. Главной особенностью разработанной установки является то, что она позволяет повысить производительность и качество обра-

ботки деталей за счет использования комплекса технологий, основанных на методах вакуумной ионно-плазменной обработки, ионной имплантации и нанесения покрытий без переналадки.

Разработанная установка (рис. 1, 2) содержит вакуумную камеру 1, выполненную из немагнитной нержавеющей стали в виде полый цилиндрической обечайки размерами: диаметр рабочей зоны 900÷1000 мм, высота рабочей зоны 1400÷1500 мм, имеющую загрузочную дверь 10, плоскость разъема которой отсекает часть обечайки вакуумной камеры 1 в плоскости, параллельной плоскости, проходящей через вертикальную ось обечайки вакуумной камеры 1.

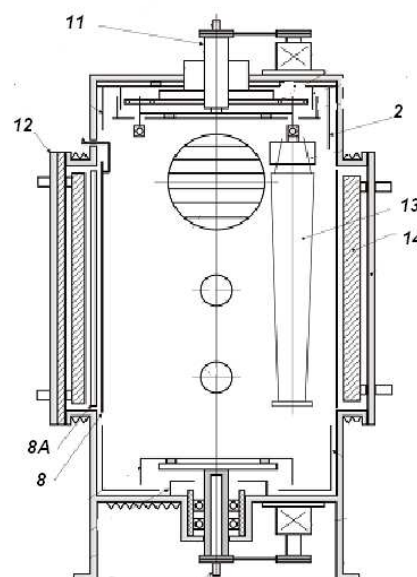
На стенках вакуумной камеры 1 установлены защитные экраны 2, имеется патрубок откачки 3 и технологические модули: протяженный вакуумно-дуговой генератор металлической плазмы 4, протяженный вакуумно-дуговой генератор металлической плазмы с плазменным фильтром 5, протяженный дуальный магнетрон 6, протяженный генератор газовой плазмы 7, источники ускоренных ионов металлов и газов.



**Рис. 1.** Установка для комбинированной ионно-плазменной обработки и нанесения покрытий. Вид сверху – поперечный разрез (позиции указаны в тексте)

Кроме того, в состав технологических модулей могут входить как электродуговые, так и магнетронные испарители, устройства для имплантации ионов газов и металлов, устройства ионного ассистирования протяженным генератором газовой плазмы, устройства для ионно-лучевой обработки и нанесения покрытия, система подачи газов и др. Вакуумная камера 1 снабжена рубашкой водяного охлаждения. Электродуговые испарители снабжены протяженными катодами 14 выполненными в виде пластин размерами 1000×120×30 мм (выбранными из диапазона: длина – 500÷2000 мм, ши-

рина – 50÷300 мм, толщина – 10÷70 мм). В вакуумной камере 1 установлены защитные экраны 2 и подвижные защитные экраны с пневмоприводами 8, поворотное приспособление 11, снабженные держателями изделий и планетарным механизмом перемещения изделий 9, выполненных с возможностью вращения вокруг собственной оси и относительно центра вакуумной камеры 1. Обрабатываемые изделия 13 закрепляются в держателях изделий поворотного приспособления 11. Установка также снабжена дополнительным электродом.



**Рис. 2.** Установка для комбинированной ионно-плазменной обработки и нанесения покрытий. Вид сбоку – продольный разрез (позиции указаны в тексте)

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ НОВОЙ УСТАНОВКИ

Установка для комплексной ионно-плазменной обработки и нанесения покрытий работает следующим образом. Обрабатываемые изделия 13 устанавливаются в специальных держателях изделий, затем закрывают дверь 10 вакуумной камеры 1, создают вакуум и включают привод держателя.

Обработку изделий производят одним из следующих способов: нагревом, химико-термической обработкой, ионной имплантацией, нанесением покрытия или сочетанием этих способов.

*Нагрев изделий* в предлагаемой установке осуществляют следующим образом. В вакуумную камеру 1 напускают рабочий газ. Зажигают вакуумно-дуговой разряд между вакуумной ка-

мерой 1 и катодами электродуговых испарителей 4, закрытых поворотными экранами 8. Вакуумная камера 1 выполняет роль анода вакуумно-дугового разряда. Затем подключают изделия к положительному полюсу источника питания двухступенчатого вакуумно-дугового разряда и зажигают двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд между катодами 4 и изделиями 13. При этом изделия 13, которые служат анодом двухступенчатого вакуумно-дугового разряда интенсивно нагреваются электронами плазмы. Нагрев изделий осуществляют с целью их термической обработки или для подготовки их к последующей обработке, например нанесению покрытия.

*Химико-термическая обработка* изделий производится нагревом изделий вышеописанным способом, а затем, подключая дополнительный электрод к положительному полюсу источника питания, зажигают двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд между катодами 4 и дополнительным электродом, являющимся анодом двухступенчатого вакуумно-дугового разряда. В результате в камере образуется газовая плазма, содержащая ионы рабочего газа, электроны и нейтральные частицы. Изделия выдерживают в газовой плазме в течение заданного времени, при этом происходит диффузионное внедрение ионов и атомов рабочего газа в поверхность изделий.

*Ионная имплантация.* В вакуумную камеру 1 напускают рабочий газ, зажигают вакуумно-дуговой разряд между катодами электродугового испарителя 4 и вакуумной камерой 1, зажигают двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд. В результате горения вакуумно-дугового разряда в камере образуется газовая плазма, содержащая ионы рабочего газа, электроны и нейтральные частицы. На изделия, подвергаемые ионной имплантации, подают отрицательный потенциал достаточной для ионной имплантации величины от источника питания потенциала смещения. При этом ионы плазмы рабочего газа ускоряются в электрическом поле изделий и внедряются в их поверхность.

*Нанесение покрытия.* В вакуумную камеру 1 напускают рабочий газ. Катоды электродуговых испарителей 5 открывают, отводя в сторону оптически непрозрачные поворотные экраны 8. Зажигают вакуумно-дуговой разряд между катодами 5 и вакуумной камерой 1, являющейся анодом вакуумно-дугового разряда. В результате горения вакуумно-дугового разряда в камере образуется металло-газовая плазма, содержащая

ионы рабочего газа, ионы металла катодов, электроны и нейтральные частицы. На изделия 13 подают отрицательный потенциал от источника питания потенциала смещения. При этом ионы металла ускоряются в электрическом поле изделий и осаждаются на их поверхности, образуя покрытие. Плазменные фильтры 8А производят очистку наносимого материала от «капельной фазы». Покрытия также могут быть нанесены электронно-лучевым или магнетронным методами.

Разработанная установка позволяет, в частности, за счет использования протяженных электродуговых источников и источников металлической плазмы обеспечивать одинаковые свойства обрабатываемых деталей во всем объеме камеры. При этом процессы имплантации, ионно-плазменной обработки и нанесения покрытий, осуществляемые в одном технологическом цикле установки, позволяют достичь более высокого качества обработки длинномерных лопаток или их большого количества при одновременной обработке. Кроме того, равномерное распределение плазмы в объеме вакуумной камеры позволяет обеспечивать качественную обработку изделий как при вращении деталей вокруг собственной оси, так и без их вращения. Цилиндрическая форма вакуумной камеры не имеет явно выраженных угловых «мертвых» зон, образованных, как, например в кубическом варианте между гранями вертикальных стенок камеры [4].

Все это обеспечивает повышение технологических возможностей установки при максимальном использовании ее рабочего объема, повышает равномерность распределения плазмы во внутреннем пространстве вакуумной камеры, обеспечивает равномерность обработки деталей при их планетарном вращении, сокращает время технического обслуживания при проведении регламентных работ.

Повышение служебных свойств установки обеспечивается также использованием различных технологических модулей, выполненных с возможностью реализации процессов ионной очистки поверхности материалов, высококонцентрационной ионной имплантации, формирования переходных слоев между основой и покрытием, осаждения покрытий в условиях ионного ассистирования с возможностью обеспечения регулирования интенсивностью последовательного и/или совместного воздействия на поверхность потоков плазмы и ускоренных ионов в едином вакуумном объеме.

### НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

С целью увеличения эрозионной стойкости поверхности рабочих лопаток без снижения их усталостной прочности была разработана новая технология их упрочнения, реализованная на описанной выше вакуумной установке. Технология включала в себя операции ионной очистки, высококонцентрационную ионную имплантацию ионами азота с последующим осаждением многослойных наноструктурированных покрытий на основе титана в условиях ионного ассистирования.

Ионная имплантация позволяет увеличить усталостную прочность лопаток на  $10 \pm 25\%$ , что дает возможность компенсировать ее потерю после осаждения «толстых» (толщиной более 15 мкм) вакуумно-плазменных покрытий и, таким образом, обеспечить заданный уровень усталостных свойств после обработки.

Процесс ионной имплантации ионами азота был реализован с помощью широкопучкового ионного источника, позволяющего получать ионные пучки с высокой равномерностью плотности ионного тока по сечению (неравномерность менее 10%). Плотность тока ионов азота поддерживалась в диапазоне  $80 \div 400$  мкА/см<sup>2</sup>. Энергия ионов азота поддерживалась в диапазоне  $10 \div 40$  кэВ. Обработка технологических образцов проводилась при их планетарном движении.

В качестве материала покрытия были выбраны титановые сплавы с легирующими элементами: Al, Zr, V, Mo. Осаждение покрытий было реализовано электродуговыми испарителями с магнитной фокусной системой при токах дуги 120–160 А. Напряжение смещения регулировалось в широких пределах: при ионной очистке – 800–1000 В и при осаждении – 120–180 В. Ионное ассистирование осуществлялось газовым плазмодгенератором с накаливаемым катодом. Осаждение металлических слоев проводилось при давлении аргона  $(6 \div 8) \cdot 10^{-2}$  Па и нитридных слоев при давлении  $(1 \div 3) \cdot 10^{-1}$  Па.

Металлографические исследования проводились с использованием микротвердомера Neophot-21, электронного микроскопа Jeol с приставкой микрохиманализатора Inca, лабораторного комплекса подготовки образцов CSM-Calotest.

Внешний вид покрытия на контрольных образцах – равномерный золотистого цвета, без вспучиваний, отслоений, трещин. Изучение

сферических микрошлифов к обработанной поверхности позволило установить, что покрытие представляет собой многослойную композицию из

- основных слоев нитрида титана, которые обеспечивают прочностные свойства поверхности;
- промежуточных более пластичных слоев титана, легированного Zr, Al, V, Mo;
- следов «микрокапельной фазы» титана глобулярной формы с максимальным размером до 1 мкм, что значительно меньше размеров аналогичных включений, полученных ранее на установках типа «Булат» и «ННВ6.6-И1».

Результаты измерения параметров покрытия: микротвердости, общей толщины, количества и толщин промежуточных слоев приведены на рис. 3–5 и таблице.

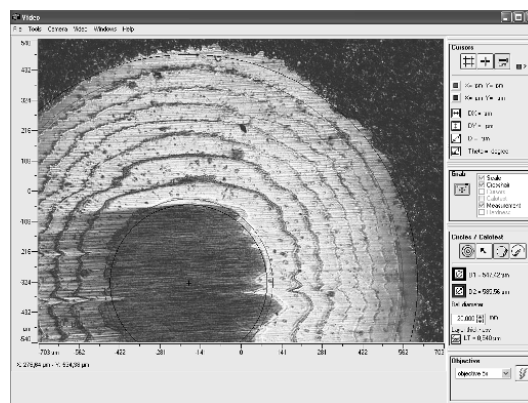
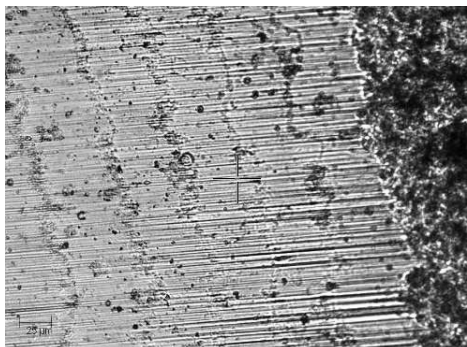


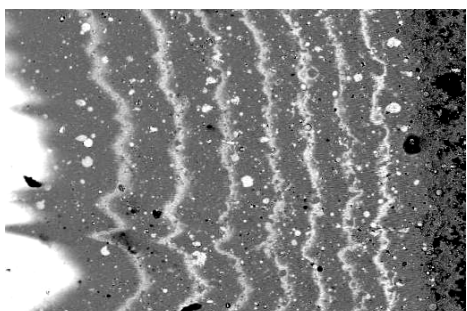
Рис. 3. Измерение толщины многослойного покрытия на установке CSM Scratch Tester, увеличение  $100\times$

Дополнительно для оценки эффективности применения многослойной конструкции покрытия при разрушении сколом на образце было проведено исследование места излома методом фрактографии на электронном микроскопе при увеличении  $5000\times$ . Схема получения излома приведена на рис. 6. Вид излома (рис. 7) свидетельствует о характерной столбчатой структуре слоев TiN, а наличие «ступеньки» на промежуточных слоях Ti указывает на активное торможение развития трещины при ее распространении вглубь покрытия, что должно эффективно уменьшить скорость эрозионного износа при эксплуатации.

Для проведения микрохимического анализа сформированного покрытия по глубине поверхности были сняты спектры химических элементов (рис. 8, а, б).



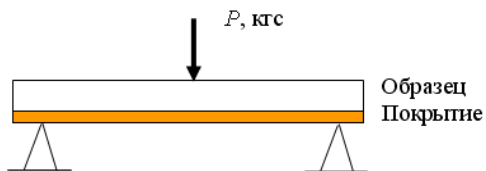
**Рис. 4.** Вид части многослойного покрытия на сферическом шлифе, увеличение 400<sup>×</sup> (поверхность справа)



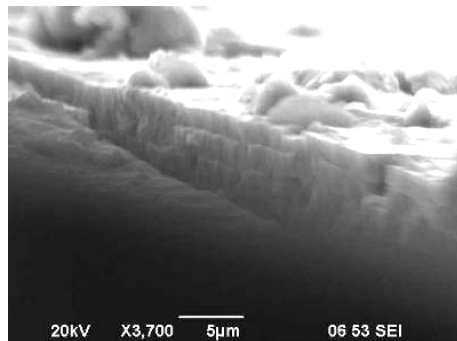
**Рис. 5.** Вид части многослойного покрытия на сферическом шлифе в отраженных электронах, увеличение 400<sup>×</sup> (поверхность справа): общая толщина покрытия 25 мкм; светлые полосы – промежуточные слои титана; светлые точки – «микрокапельная фаза»

**Параметры многослойного покрытия**

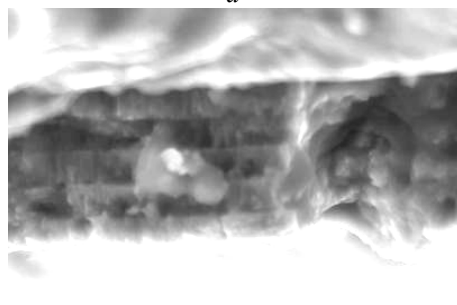
№	Наименование параметра	Величина
1	Общая толщина покрытия	25 мкм
2	Толщина промежуточных слоев Ti	0,5 ± 0,02 мкм
3	Толщина промежуточных слоев TiN	2,5 ± 0,1 мкм
4	Количество слоев Ti-TiN	8 пар
5	Микротвердость HV <sub>50</sub>	21±25 ГПа



**Рис. 6.** Схема разрушения образцов с покрытием для фрактографического анализа

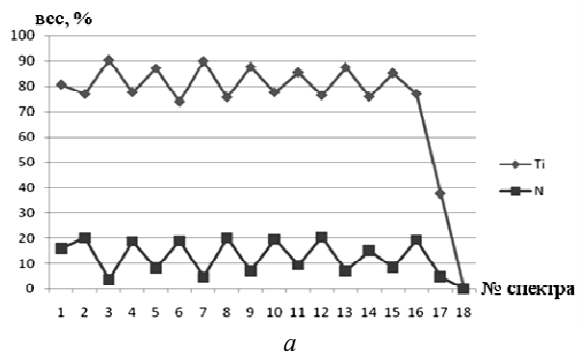


*a*

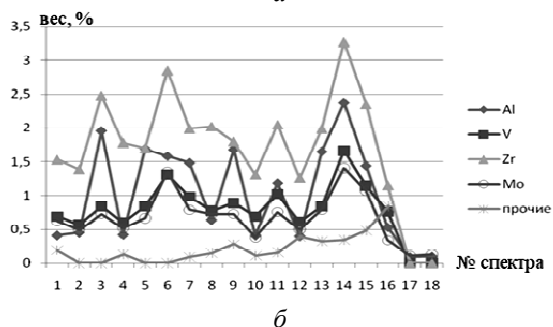


*б*

**Рис. 7.** Фрактографический вид излома части покрытия во вторичных электронах: *a* – вид трещины, *б* – место скола, повернуто (основа сверху)



*a*



*б*

**Рис. 8.** Изменение химического состава покрытия по его толщине: *a* – спектры титана и азота; *б* – спектры прочих элементов; спектр № 1 – поверхность покрытия, № 2–17 – промежуточные слои покрытия, № 18 – основной материал



Сформированное покрытие представляет собой композиционный материал, состоящий из слоев нитрида титана TiN (4:1) с регулярным содержанием прослоек титана, в которых содержание азота не превышает 10 %. Суммарная концентрация легирующих элементов увеличивается от поверхности и достигает своего максимального значения в области основного материала (спектр 14, рис. 8, б), что должно обеспечивать максимальный эффект сопротивления эрозионному воздействию.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реализации комплекса перспективных вакуумно-плазменных технологий высоких энергий с целью обеспечения заданных эксплуатационных свойств деталей ГТД и энергетических установок авторами разработана новая конструкция вакуумной установки. Установка позволяет обеспечить упрочнение рабочих лопаток путем их ионного модифицирования и нанесения функциональных покрытий. Предлагаемая технология упрочнения на новой установке включает в себя операции ионной очистки, высококонцентрационную ионную имплантацию ионами азота с последующим осаждением многослойных наноструктурированных покрытий системы Ti-TiN в условиях ионного асистирувания.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать разработанную технологию и новую вакуумную установку для обработки лопаток ГТД и энергетических установок с целью обеспечения защиты от абразивного, коррозионного и эрозионного воздействия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакуумная установка для нанесения покрытий: Патент РФ № 2058427 МПК С23С14/34 / А. И. Дерюгин [и др.], 1996.
2. **Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н.** Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 447 с.
3. Обеспечение эксплуатационных свойств лопаток компрессора из титановых сплавов путем ионного модифицирования поверхности на установке «Вита» / А. М. Смыслов [и др.] // Авиационная промышленность. 1992. № 5. С. 24–26.
4. Установка для вакуумной ионно-плазменной обработки поверхностей: Патент РФ

№ 2294395, МПК С23С 14/34 / Л. М. Петров [и др.] // Бюл. № 6, 2007.

5. Патент РФ № 2425173. МПК С23С14/02. Установка для комбинированной ионно-плазменной обработки / А. М. Смыслов [и др.] // Бюл. № 21, 2011.

### ОБ АВТОРАХ

**Смыслов Анатолий Михайлович**, зав. каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по произв-ву двигателей летательн. аппаратов (УГАТУ, 1983). Иссл. в обл. формирования свойств поверхности с использованием ионных, плазменных и электронных пучков.

**Дыбленко Юрий Михайлович**, нач. отдела СКТБ «Искра». Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1974). Канд.техн.наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. разработки вакуумно-плазменных технологий высоких энергий и специальных устройств для обеспечения эксплуатационных свойств деталей, эксплуатируемых в экстремальных условиях.

**Смылова Марина Константиновна** доцент каф. ОиТСП. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. высокотвердых вакуумных ионно-плазменных покрытий.

**Селиванов Константин Сергеевич**, доцент каф. ТМ. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. физ.-хим., структурно-фазового состава и экпл. свойств поверхности деталей.

**Мингажев Аскар Джамильевич**, доц. той же каф. Дипл. инженер по машинам и аппаратам хим. производств (УНИ, 1976). Канд. техн. наук по технологии летательн. аппаратов и двигателей (УГАТУ, 1987). Иссл. в обл. жаростойких и термобарьерных покрытий.

**Мингажева Алиса Аскарровна**, асп. той же каф. Дипл. инженер по машинам и технологиям высокоэффективн. процессов обработки (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. армированных теплозащитных покрытий для лопаток ГТД.