

П. В. Тарасов, А. А. Быбин, Р. Р. Невьянцева

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ УДАЛЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ Ti-TiN С ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА НА ЕГО УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

Рассмотрено влияние удаления различными способами износостойкого покрытия TiN с поверхности титанового сплава. Изучен процесс полного снятия покрытия химическим методом с использованием кислотного раствора и процесс разрыхления покрытия с последующей механообработкой абразивным инструментом. Показано, что циклическая долговечность образцов в случае применения указанных методов не отличается от исходного состояния. *Ионно-плазменное покрытие нитрида титана; титановый сплав; способы удаления покрытия; усталостная прочность*

### ВВЕДЕНИЕ

Длительная и надежная эксплуатация лопаток компрессора современных газотурбинных двигателей (ГТД), изготавливаемых из высокопрочных титановых сплавов, может осуществляться только при условии нанесения на их проточную часть износ- и коррозионностойкого покрытия типа Ti-TiN [1]. Нанесение указанного покрытия осуществляется методом конденсации с ионной бомбардировкой или магнетронным методом. При осаждении покрытия в результате нарушения технологии его нанесения возможно появление различных дефектов: повышенная пористость, отслаивание и вспучивание покрытия, наличие участков со следами электроразрядов (в виде «морозца») и др. Эксплуатация лопаток компрессора ГТД с такими дефектами недопустима, что вызывает необходимость создания технологии их ремонта.

Для удаления дефектного покрытия с поверхности лопаток компрессора может быть применен механический метод, включающий шлифование и отделочную обработку, например, полирование. Однако многие ионно-плазменные покрытия обладают достаточно высокой твердостью, что требует назначения интенсивных режимов абразивной механообработки. При использовании таких режимов на обрабатываемой поверхности велика вероятность появления прижогов, характеризующихся измененной структурой материала и являющихся центрами зарождения усталостных трещин. Кроме того, механическому способу ремонта присуща высокая трудоемкость обработки со значительной долей ручного труда.

В научной и патентной литературе сообщается о возможности использования для ремонта покрытия из нитрида титана химического метода, включающего выдержку лопаток в травильном растворе, содержащем неорганические кислоты [2–4]. Приведенные в литературе составы растворов в основном применимы к стальной подложке. Для удаления покрытия с титанового сплава предложен только один раствор, содержащий азотную кислоту с добавками тетрафторбората калия и полифосфата натрия [5]. Однако проведенные авторами работы [6] исследования по применимости указанного электролита для удаления нитридного ионно-плазменного покрытия показали, что в рекомендованном растворе [5] даже за 120 ч обработки удаления покрытия не происходит. Наблюдается лишь образование многочисленных язв глубиной до 0,5 мм. При использовании растворов, применяемых для удаления покрытия TiN со стальной подложки, также не наблюдается никаких признаков травления даже за 100 ч выдержки или имеет место появление в покрытии глубоких язв по местам наличия крупных пор.

На основании представленных данных и серии поисковых экспериментов авторами работы [6] был разработан состав травильного раствора, представляющий собой систему  $\text{HNO}_3 - \text{HF}$ , обеспечивающую съём покрытия толщиной 10 мкм за время 1...4 мин при уровне шероховатости титановой подложки Ra 1,5...1,7 мкм [7]. Данный состав предполагает его использование в технологии ремонта путем выдержки деталей до полного удаления покрытия. В то же время большую часть электролита травления составляет плавиковая кислота, которая согласно данным работы [8] может наводороживать поверхность титанового сплава. В результате такой обработки можно ожидать снижения усталост-

ной прочности деталей, изготовленных из титанового сплава, чувствительного к наличию концентраторов напряжения.

Цель данной работы – установить влияние технологии удаления покрытия Ti-TiN химическим методом в предлагаемом растворе на усталостную прочность образцов из титанового сплава BT-6.

## 1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводили на образцах из титанового сплава BT-6, которые прошли термическую и предварительную механообработку в соответствии с серийными режимами, применяемыми для лопаток компрессора ГТД. Далее на образцы за одну садку в установке ВУ-2М было нанесено однослойное нитридное покрытие системы Ti-TiN толщиной 10 мкм.

Удаление покрытия проводили при комнатной температуре с использованием электролита системы  $\text{HNO}_3$  – HF. Гравиметрическим методом определяли скорость удаления покрытия. Полноту съема оценивали визуально по отсутствию следов покрытия на обрабатываемой поверхности. С использованием профилометра измеряли шероховатость поверхности после удаления покрытия. С применением бинокуляра изучали состояние поверхности титанового сплава после проведения обработки.

Усталостные испытания проводили по ГОСТ 25.502-81 на консольных образцах прямоугольного сечения с симметричным циклом нагружения при комнатной температуре на вибростенде St-5000/300. Все образцы после испытаний подвергали контролю ЛЮМ-10В с целью выявления образовавшихся трещин. Фрактрографический анализ изломов вскрытых трещин изучали на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для изучения особенностей удаления покрытия нитрида титана с поверхности титанового сплава было проведено исследование структуры покрытия.

Установлено, что ионно-плазменное покрытие системы Ti-TiN на титановой подложке представляет собой покрытие, обладающее мозаичной структурой, нормально ориентированной к подложке (рис. 1, а). Участки между отдельными блоками мозаики заполнены  $\alpha$ -Ti. На границе с подложкой и между слоями нитрида титана имеются прослойки титана, наносимые для улучшения адгезии и когезии нитридного

покрытия. РЭМ-анализ покрытия выявил значительную неоднородность структуры в связи с образованием микрокапельной металлической фазы (рис. 1, б). Образование данной фазы вызвано особенностями вакуумно-дуговой генерации металлической плазмы при нанесении покрытия: наряду с ионами и электронами с поверхности титанового катода образуется интенсивный поток микрокапель размерами от единиц микрометров до сотен ангстрем [9].

В рамках данной работы для удаления исследуемого покрытия применялся раствор, содержащий азотную и фтористоводородную кислоты с добавлением фениламина [7]. Ранее проведенные исследования показали, что титановая подложка активно взаимодействует с указанным раствором, вызывая образование глубоких растратов. Учитывая данное обстоятельство, рассматривались два способа удаления покрытия. В первом способе образцы выдерживались в растворе до полного съема покрытия, а во втором выполнялось только разрыхление покрытия, предполагающего не полное его удаление. В обоих случаях после выдержки образцов в растворе проводилась обработка поверхности с использованием абразивных кругов, что позволяло достичь чистоты поверхности, отвечающей требованиям конструкторской документации по нанесению ионно-плазменного покрытия.

Анализ особенностей удаления покрытия Ti-TiN показал, что в случае удаления покрытия по первому способу в результате взаимодействия компонентов раствора с покрытием происходит активное растворение титановой составляющей с образованием комплексных соединений с фтор-ионами [10]. Процесс сопровождается активным выделением бесцветного газа NO, при этом центрами зарождения пузырьков газа являются границы стыковки частиц нитрида титана. Бурное выделение газа и наличие значительных остаточных напряжений в конденсированном покрытии Ti-TiN способствуют его отслаиванию и скалыванию в виде мелких чешуек TiN. При достижении электролитом поверхности титановой подложки начинается выделение бурого газа NO<sub>2</sub>. Максимальное восстановление HNO<sub>3</sub> с выделением газа NO<sub>2</sub> обусловлено взаимодействием кислоты с активной поверхностью титанового сплава, содержащего в качестве легирующих элементов алюминий и ванадий, повышающих ЭДС микрогальванопар. Взаимодействие электролита с титановой подложкой сопровождается также

повышением его температуры вплоть до закипания. В результате значительно возрастает скорость процесса, что приводит к образованию глубоких растратов на поверхности титанового сплава. Рассмотренные закономерности съема покрытия подтверждаются экспериментальными данными по измерению бестоковых электродных потенциалов поверхности и расчетом скорости удаления покрытия (рис. 2).

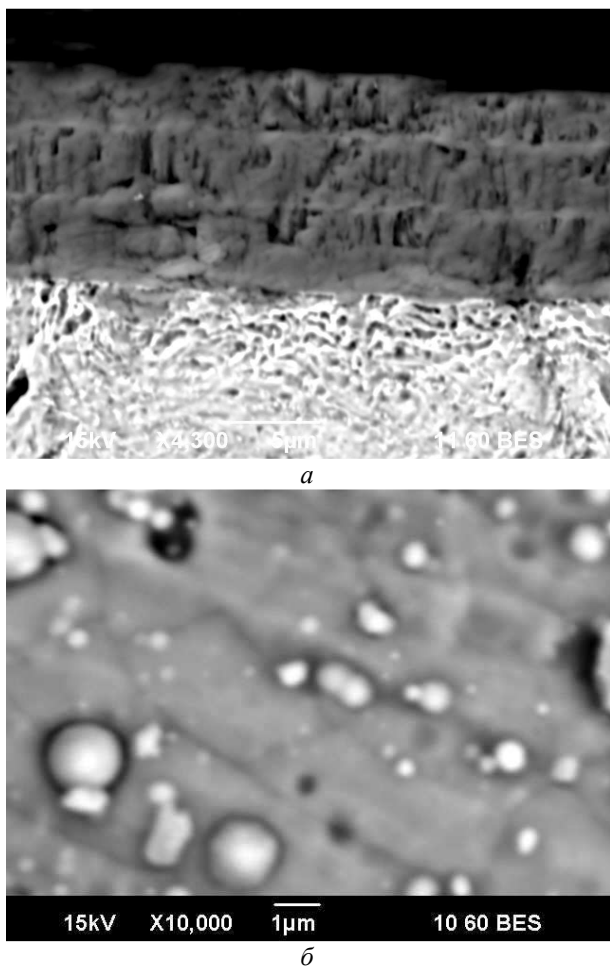


Рис. 1. Микроструктура (а) и топография поверхности (б) покрытия Ti-TiN

Разрыхление покрытия во втором способе с использованием указанного травильного раствора сопровождается аналогичными явлениями, характерными для удаления нитридного покрытия по первому способу до момента начала выделения бурого газа  $\text{NO}_2$ . Как показывают измерения микротвердости поверхности, покрытие перед ремонтом характеризуется высокой твердостью  $\sim 3100$  кгс/мм<sup>2</sup>. Благодаря растворению титановой составляющей когезионная прочность покрытия падает, что вызывает и снижение его микротвердости (рис. 3).

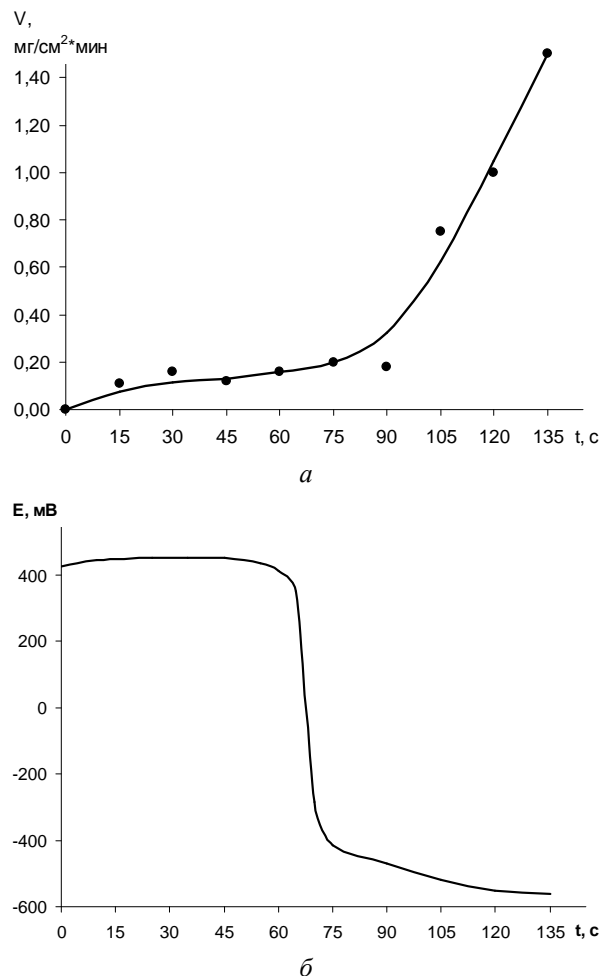


Рис. 2. Динамика скорости съема покрытия Ti-TiN (а) и бестокового электродного потенциала поверхности (б)

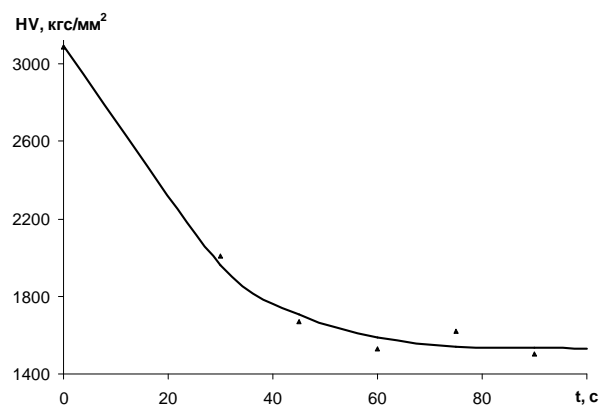
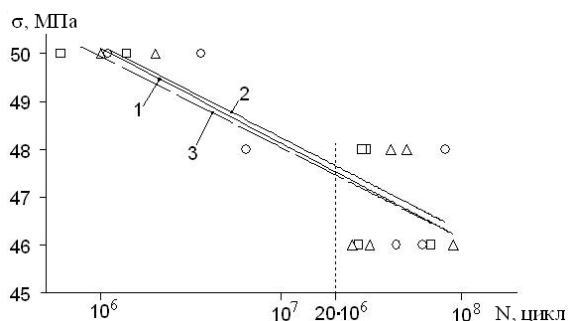


Рис. 3. Зависимость микротвердости покрытия Ti-TiN от времени выдержки образцов в травильном растворе

Из рисунка видно, что, при достижении времени выдержки в растворе равном 60 с, снижение микротвердости замедляется и устанавливается на одном уровне  $\sim 1500$  кгс/мм<sup>2</sup>. По-

следующая обработка покрытия с использованием абразивных кругов показала, что интенсивность съема разрыхленного покрытия незначительно увеличивается по сравнению с вариантом его удаления механическим методом. Несмотря на то, что нижние слои покрытия обладают значительной адгезионной прочностью и требуют приложения больших сил резания при шлифовании, удаление разрыхленного слоя происходит с высокой скоростью, что в целом определяет повышение интенсивности процесса абразивной обработки. Увеличение времени разрыхления свыше 60 с приводит к образованию на обрабатываемой поверхности локальных ямок травления, глубина которых превышает оставшуюся часть покрытия. Полученные данные свидетельствуют о необходимости ограничения времени разрыхления до 60 с.

Для подтверждения целесообразности использования предложенных способов удаления нитридного покрытия с титановой подложки были проведены усталостные испытания образцов, прошедших указанную обработку. Для сравнения испытывались образцы, подготовленные под напыление ионно-плазменного покрытия Ti-TiN. Результаты испытаний представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** Кривые усталости образцов из сплава ВТ-6 в исходном состоянии (1) и прошедших удаление покрытия Ti-TiN по двум способам: 2 – полное удаление покрытия; 3 – разрыхление в течение 60 с

Из представленных данных видно, что ход кривых усталости одинаков для всех сравниваемых вариантов: снижение амплитудного напряжения вызывает увеличение базы испытаний. Для подтверждения одинакового характера разрушения образцов с различным состоянием поверхности был проведен фрактографический анализ поверхности соответствующих изломов, фотографии которых представлены на рис. 5. Установлено, что во всех рассматриваемых случаях излом соответствует классическому уста-

лостному типу с превалированием зоны усталостного разрушения над зоной статического разрушения.

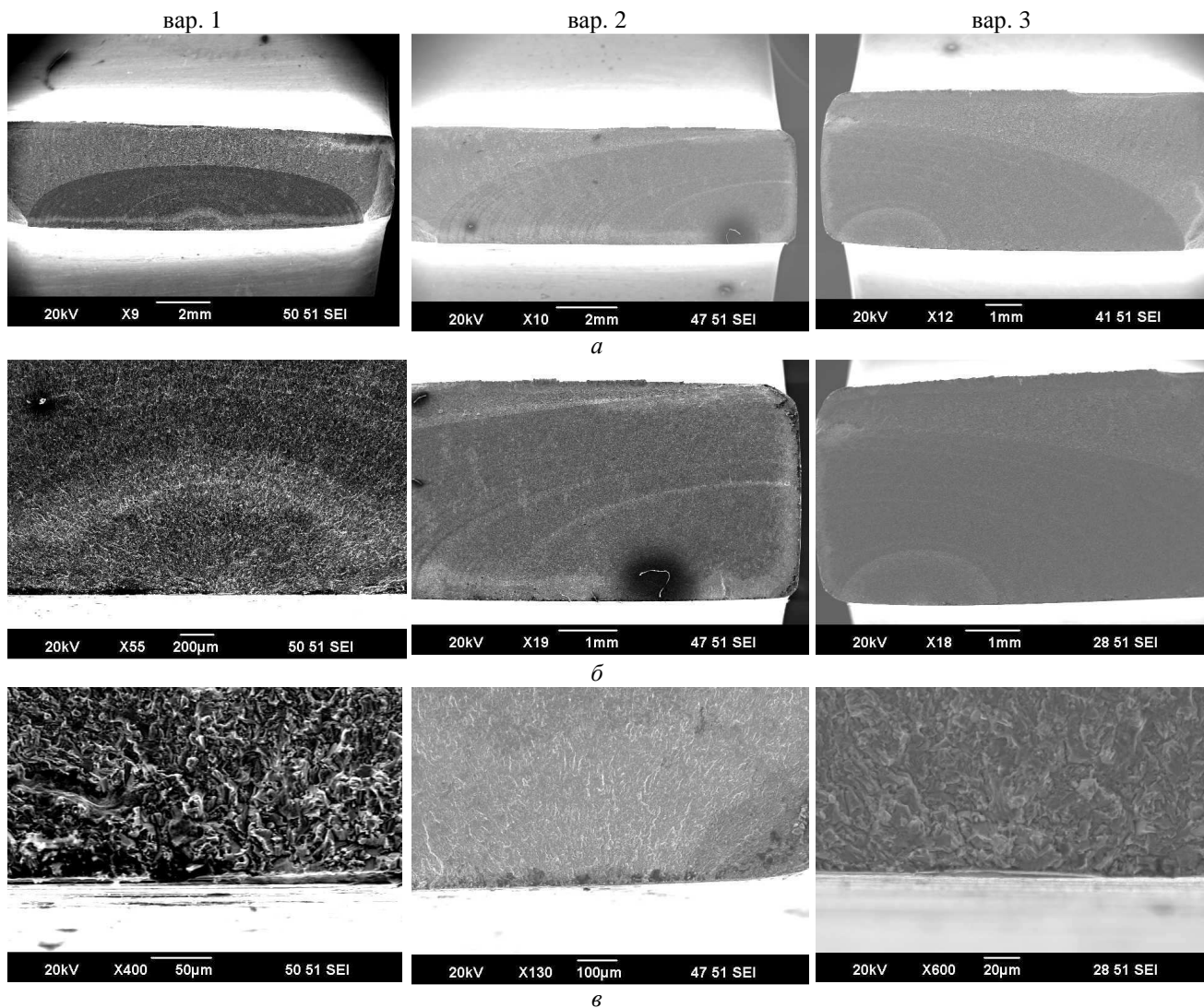
Линия фронта представляет собой дугу окружности, что свидетельствует о равенстве скорости движения фланговых точек и центра. На всех образцах очаг разрушения располагается непосредственно на поверхности. Разрушение в очаге происходит путем образования сколов. На расстоянии ~ 0,5...0,8 мм в изломе появляются усталостные бороздки. Во всех вариантах бороздки сглажены и их формирование, по-видимому, происходит под действием небольших напряжений на концах магистральной трещины. Замер плотности бороздок на единицу длины показал, что во всех сравниваемых вариантах она одинакова и составляет 1,4...1,6 мм<sup>-1</sup>. Полученные данные свидетельствуют об одинаковой циклической долговечности образцов, обработанных по разным вариантам.

Несмотря на полученные результаты исследований, следует учитывать, что они проведены на модельных образцах и их прямое экстраполирование на натурные детали может привести к ошибочным результатам. Многие лопатки компрессора ГТД характеризуются жесткими допусками на геометрические параметры. При использовании способа полного удаления покрытия из нитрида титана неизбежно формируется поверхность с высокой шероховатостью Ra 2...3 мкм.

При последующей абразивной обработке за счет снятия данной дефектной поверхности геометрические параметры могут выйти за пределы заданного допуска, увеличив долю окончательно забракованных деталей. В данном аспекте наиболее предпочтительным является способ, включающий предварительное разрыхление химическим методом ионно-плазменного покрытия и последующий съем оставшейся части покрытия механическим методом.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, для снятия ионно-плазменного покрытия из нитрида титана с поверхности титанового сплава могут быть использованы два способа: полное снятие покрытия химическим методом и комбинированный способ, включающий предварительное разрыхление в травильном растворе и последующую абразивную обработку. Оба способа не снижают усталостной прочности титанового сплава, а их применение ограничивается только степенью требуемой точности ремонтируемой детали.



**Рис. 5.** Излом образцов с различным состоянием поверхности после усталостных испытаний при  $\sigma_a = 480$  МПа: вар. 1 – исходное состояние до нанесения покрытия Ti-TiN; вар. 2 – полное удаление покрытия; вар. 3 – разрыхление покрытия в течение 60 с + механообработка; а – общий вид излома; б – зона усталостного излома; в – очаг зоны усталостного разрушения

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гецов Л. Б.** Материалы и прочность деталей газовых турбин. Рыбинск: ООО «Изд. дом «Газотурбинные технологии», 2010. Кн. 1. 611 с.
2. **Остапов О. В., Хазанская И. И.** Раствор для удаления покрытия из нитрида титана: Патент РФ № 2087591 МПК6 C23F1/38, C23F1/44. Оpubл. 20.08.1997.
3. **Кузнецов Э. А., Липинецкая А. И., Логинова Е. В.** Состав для удаления покрытий из нитридов титана: Патент РФ № 2101389. МПК6 C23G1/02. Оpubл. 10.01.1998.
4. **Амирханова Н. А., Невьянцева Р. Р., Тимергазина Т. М.** Раствор для удаления покрытий из

нитрида и карбонитрида титана: Патент РФ № 2081207. МПК7 C23F1/44, 1/26. Оpubл. 10.06.1997.

5. Состав для очистки металлических поверхностей от комплексных нитридных покрытий: Патент РФ № 2151821. МПК7 C23G1/02 / Л. В. Падерова [и др.]. Оpubл. 27.06.2000.

6. **Невьянцева Р. Р., Быбин А. А., Тарасов П. В.** Разработка состава раствора для удаления вакуумно-плазменного покрытия Ti-TiN с лопаток компрессора из титанового сплава // Инновации, проблемы машиноведения, процессов управления и критических технологий в машиностроении РБ: сб. науч. тр. Уфа: АН РБ, Гилем, 2010. С. 128–137.

7. Состав для удаления покрытий из нитрида титана с поверхности деталей из титановых сплавов:

Патент РФ № 2396372. МПК7 C23F1/26, C23F1/44. / Р. Р. Невьянцева [и др.]. Оpubл. 10.08.2010.

8. **Розенфельд И. Л.** Ингибиторы коррозии. М.: Химия, 1977. 352 с.

9. **Асанов Б. У., Макаров В. П.** Нитридные покрытия, полученные вакуумно-дуговым осаждением // Вестник КРСУ, 2002. Т. 2. № 2 [Электронный ресурс] (<http://www.krsu.edu.kg/vestnik/>).

10. **Рипан Р., Четьяну И.** Неорганическая химия. Химия металлов. М.: Мир, 1972. Т. 2. 872 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Тарасов Павел Валерьевич**, асс. каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. технологий восстановительного ремонта деталей из титановых сплавов

**Быбин Андрей Александрович**, доц. той же каф. Дипл. инженер по автоматизации технологическ. процессов и производств (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двиг. и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. технологий восстановительного ремонта деталей газовых турбин.

**Невьянцева Римма Рахимзяновна**, доц. каф. общ. химии. Дипл. инженер-металлург и физ.-химик (Челябинск. политехн. ин-т, 1965). Канд. хим. наук по неорг. химии (защ. в ИПФ СО АН СССР, 1972). Иссл. в обл. ремонта лопаток авиац. двигателей.