



Устинов А. И.

Тараненко В. Н.

Теличко В. А.

*Институт  
электросварки  
им. Е.О. Патона  
НАН Украины*

Скородзиевский В.С.

*Институт  
металлофизики  
им. Г.В. Курдюмова  
НАН Украины*

Зиньковский А. П.

Токарь И. Г.

Круц В. А.

*Институт проблем  
прочности  
им. Г.С.Писаренко  
НАН Украины*

**УДК 534.282:620.17**

## **ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ДЕМПФИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ТИТАНОВЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ АГТД**

*Досліджені дисипативні властивості нанокompозитних вакуумних конденсатів на основі системи Al-Cr-Fe в діапазоні температур 20...300 °С. Показано, що використання таких конденсатів як покриттів для титанових робочих лопаток компресорів АГТД дозволяє підвищувати їх демпфуючу здатність в 2.5...3 рази.*

*Dissipative properties of the nanocomposite vacuum condensates based on Al-Cr-Fe system are studied within the temperature range from 20 to 300 °C. It is shown that using this condensate as coating for titanium blades in the aircraft GTE compressors makes it possible to increase their own damping capacity by 2.5...3 times.*

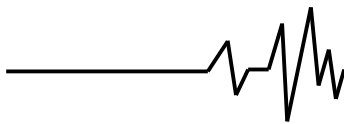
### **Введение**

Снижение уровня опасных резонансных напряжений титановых рабочих лопаток компрессоров авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) по-прежнему относится к наиболее важным научно-техническим задачам в авиатурбостроении [1]. В этом аспекте эффективным конструктивно - технологически решением, направленным на обеспечение допустимого уровня динамической напряженности таких лопаток, является повышение их демпфирующей способности [2].

Одним из возможных способов решения указанной задачи является нанесение высокодемпфирующих металлических покрытий на тонкостенное перо лопаток. При этом материалы для таких покрытий должны обладать не только высокой демпфирующей способностью, но и соответствующим комплексом других физико-механических свойств: повышенными характеристиками

прочности и твердости, а также эрозионной, коррозионной и термической стойкостью.

Известно, что упрочнение металлических материалов достигается их легированием или термической обработкой [3], а также путем уменьшения размера их структурных элементов (зерен, включений, двойников и др.), в особенности при переходе в наноразмерную область [4]. Однако, если применение первого способа сопровождается понижением величины диссипативных характеристик таких материалов, то во втором случае многие из них демонстрируют при повышенных температурах многократное возрастание величины указанных характеристик, что показано на примере вакуумных конденсатов чистых металлов (Cu, Ni, Fe), интерметаллидов (AlFeCu, AlCrCu, AlCrCuFe, AlCo, AlCoFe) и металлокерамик (SnMgO, SnCrMgO) [5]. Такая особенность наноструктурированных материалов обусловлена нарастанием интенсивности термически активированных процессов



перестройки структурных несовершенств зерен в условиях аномально развитой удельной поверхности границ их раздела.

Приемлемым сочетанием прочностных и диссипативных свойств обладают вакуумные конденсаты на основе интерметаллидов со сложной кристаллической структурой (квазикристаллической или аппроксиматной), которые формируются в системах  $Al-Cu-Fe$  и  $Al-Cr-Fe$  при определенном соотношении их компонентов (далее интерметаллиды  $AlCuFe$  и  $AlCrFe$  соответственно). Показано [6], что для этих материалов при размере зерна около 30 нм величина логарифмического декремента колебаний при  $T = 350^{\circ}C$  составляет 5.4% и 6.0%, а микротвердость - 10.5 и 6.0 ГПа соответственно. Следует также отметить, что при испытаниях титановых образцов с покрытиями  $AlCuFe$  не наблюдалось понижения декремента с увеличением частоты колебаний в диапазоне 140÷570 Гц [7]. Учитывая, что интерметаллиды  $AlCuFe$  и  $AlCrFe$  характеризуются повышенными антикоррозионными и трибологическими свойствами [8], их можно рассматривать в качестве перспективных материалов для создания демпфирующих покрытий тонкостенных конструктивных элементов.

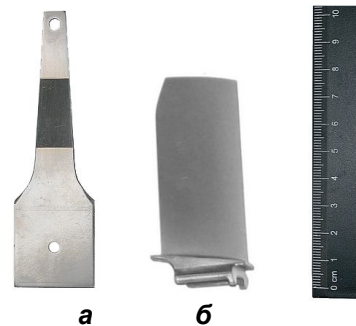
Анализируя результаты изучения влияния морфологического строения конденсатов на основе исследуемых интерметаллидов на их свойства [6], необходимо отметить следующее. Так, конденсаты  $AlCuFe$  формировались при стехиометрическом соотношении химических элементов, что обеспечивало их однородное строение, т. е. они состояли исключительно из частиц интерметаллида наноразмерного масштаба. Конденсаты  $AlCrFe$  представляли собой алюминиевую матрицу с однородно распределенными по ее объему частицами интерметаллида также наноразмерного масштаба. Наличие избыточного алюминия в конденсате  $AlCrFe$  приводило к понижению его твердости на 30...35% по сравнению с  $AlCuFe$ . Однако при этом обеспечивался более высокий уровень характеристик рассеяния энергии. Например, при комнатной температуре его декремент колебаний возрос примерно в два раза. Кроме того, использование хрома в наноструктурированных конденсатах может обеспечивать большую стойкость покрытий к окислению.

С учетом вышеизложенного, целью данной работы является исследование диссипативных свойств нанокompозитных вакуумных конденсатов, состоящих из упрочненной частицами интерметаллида

$AlCrFe$  алюминиевой матрицы, и оценка влияния таких покрытий на демпфирующую способность тонкостенных титановых лопаток компрессора АГТД.

#### **Объекты исследования. Методики определения их диссипативных свойств**

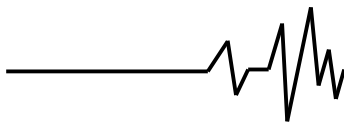
Исследуемые нанокompозитные покрытия на основе системы  $Al-Cr-Fe$  наносили на конструктивные элементы, показанные на рис. 1, а именно: стержневая модель лопатки (а) и натурная рабочая лопатка компрессора АГТД (б). Толщина рабочей части модели лопатки составляет 1.8 мм. Исследуемая рабочая лопатка имеет такие геометрические характеристики: длина пера 55 мм, хорда 24 мм и толщина вдоль линии максимальной толщины в корневом сечении 1.8 мм и в периферийном 1.2 мм.



**Рис. 1. Стержневая модель лопатки (а) и натурная рабочая лопатка компрессора АГТД (б)**

Модель лопатки и натурная лопатка изготовлены из титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ-22 соответственно и относятся к тонкостенным конструктивным стержневым элементам. Покрытия на их рабочую часть наносились примерно равномерным слоем толщиной 40 мк. При этом отношение толщин покрытия и модели лопатки было постоянной величиной и составляло 0.022, а для лопатки с линейным изменением максимальной толщины вдоль пера - 0.022 в корневом и 0.033 в периферийном сечениях.

Композитные покрытия на основе системы  $Al-Cr-Fe$  получали путем электронно-лучевого осаждения металлического пара на исследуемый объект при температуре 300...400 $^{\circ}C$  по технологии, изложенной в [9]. При этом осаждение покрытий на модель лопатки осуществлялось только на одну сторону ее поверхности, тогда как на лопатку - с обеих сторон пера путем вращения лопатки вокруг ее продольной оси. Процессу осаждения



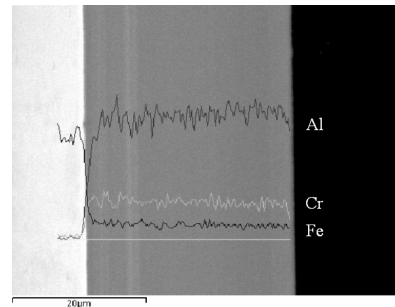
покрытий предшествовала очистка поверхностей объектов исследования ионным пучком аргона с целью обеспечения прочной адгезии покрытия.

Используемая электронно-лучевая технология осаждения конденсатов позволяет получать покрытия сложного химического состава с однородным распределением элементов по объему, что наглядно иллюстрируется приведенными на рис. 2 данными для поперечного сечения стержневой модели лопатки. Кроме того, анализ микроструктуры в поперечном сечении исследуемой лопатки, которая показана на рис. 3, указывает на отсутствие таких дефектов как включения, пустоты и трещины в контактном слое, что позволяет сделать вывод о хорошей адгезионной связи покрытия с поверхностью лопатки. При этом формируемые покрытия обладают однородной, гладкой и бездефектной поверхностью.

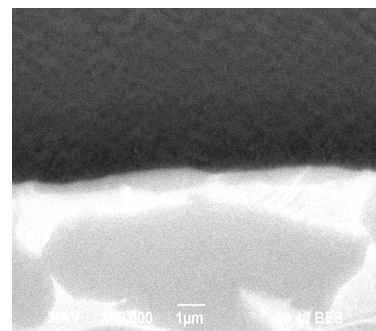
Микротвердость  $H_v$  покрытий  $AlCrFe$  в наноструктурированном состоянии составила  $(6.2 \pm 0.6)$  ГПа, а модуль упругости, определенный методом наноиндентирования, –  $(155 \pm 10)$  ГПа.

Логарифмический декремент колебаний  $\delta_m$  стержневой модели лопатки для случая консольного ее закрепления, что характерно для рабочих лопаток компрессоров АГТД, при изгибных колебаниях по основной форме с частотой 140÷150 Гц определяли методом свободных затухающих колебаний [2]. Для этого использовали экспериментальную установку [10], которая позволяет проводить испытания при комнатной и повышенных температурах. В данном случае диапазон температур нагрева составлял 20...300°C. На основании полученных данных строились амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний модели лопатки  $\delta_m(\varepsilon)$ , где  $\varepsilon$  – амплитуда ее деформации. Эти зависимости использовали в дальнейшем для расчета амплитудной зависимости истинных значений декремента колебаний  $\delta_n(\varepsilon)$  для материала покрытия по методике, изложенной в [11], где  $\varepsilon$  – амплитуда деформации покрытия, соответствующая условиям его однородного напряженного состояния.

Определение декремента колебаний натуральных рабочих лопаток компрессора АГТД при их колебаниях по первой изгибной форме с частотой 635-640 Гц осуществляли методом резонансной кривой [2] с использованием экспериментальной установки [12]. По результатам обработки полученных амплитудно-частотных характеристик строили зависимости  $\delta_n(\varepsilon)$  лопатки.



**Рис. 2. Микроструктура и распределение компонентов нанокompозита  $AlCrFe$  в поперечном сечении стержневой модели лопатки**

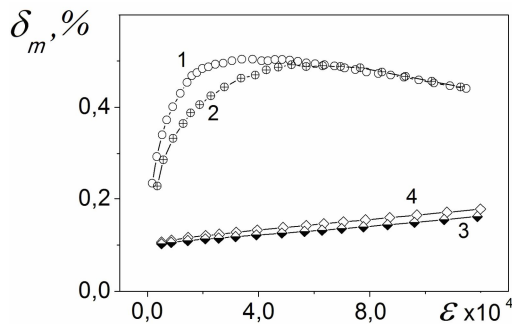


**Рис. 3. Микроструктура в поперечном сечении лопатки компрессора**

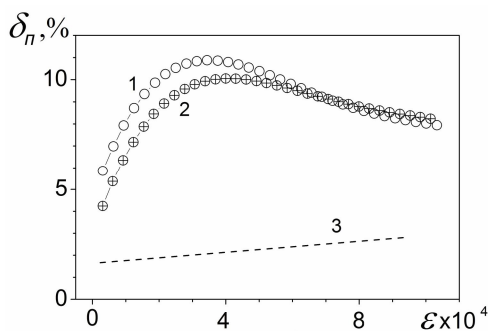
#### **Анализ данных испытаний исследуемых образцов**

На рис. 4 представлены примеры полученных с использованием изложенной методики амплитудные зависимости декремента колебаний  $\delta_m(A)$  стержневой модели лопатки для двух температур. Видно, что наличие выбранного покрытия  $AlCrFe$  обуславливает существенное (примерно трехкратное) возрастание величины логарифмического декремента ее колебаний. При этом он практически не зависит от температуры. Следует также отметить, что в ходе повторного термоциклирования в этом же температурном интервале наблюдалось полное воспроизводство исходных кривых  $\delta_m(\varepsilon)$ .

Далее, с использованием полученных экспериментальных данных были проведены расчеты по определению амплитудной зависимости истинного декремента колебаний покрытия для выбранных температур, которые приведены на рис. 5. Здесь же представлена такая зависимость при комнатной температуре для сплава ВТ1-0, из которого изготовлена модель лопатки.



**Рис. 4. Зависимость логарифмического декремента колебаний стержневой модели лопатки с покрытием (1, 2) и без него (3, 4) от амплитуды деформации при температурах испытания 20 °С (1, 3) и 300 °С (2, 4)**



**Рис. 5. Зависимость истинного логарифмического декремента колебаний материала покрытия AlCrFe от амплитуды деформации при температуре равной 20 °С (1) и 300 °С (2). Штриховая линия (3) – зависимость для сплава VT1-0 при 20 °С**

Анализ представленных зависимостей истинного декремента колебаний материала покрытия, который существенно превышает его величину для материала VT1-0 во всем диапазоне изменения амплитуды деформации, показывает, что по форме они аналогичны таковым для стержневой модели лопатки с покрытием (см. рис. 4, кривые 1 и 2). Как видно, при амплитудах деформации  $\epsilon$  до  $3 \cdot 10^{-4}$  имеет место быстрое возрастание декремента колебаний до максимальной величины с последующим медленным убыванием. При этом декремент колебаний покрытия также практически не зависит от температуры. Так, при температуре 20°C его максимальное значение равно 11 %, а при 300°C – 10 %. В соответствии с классификацией, изложенной в [13], такие материалы относятся к высокодемпфирующим.

Приведенные данные для конденсатов AlCrFe несколько отличаются от таковых, представленных в [6]. Так, в этой работе наблюдалось возрастание декремента колебаний  $\delta_n$  от 3 % до 6 % при повышении температуры от комнатной (20°C) до 300°C, хотя микротвердость  $H_v$  конденсата оставалась практически одинаковой: 6.2 ГПа при данных испытаниях и 6.0 ГПа в работе [6].

Указанное различие диссипативных свойств композитов AlCrFe обусловлено, по-видимому, разным содержанием в них «мягкой» компоненты (алюминиевой матрицы) – несколько большим в исследуемых конденсатах. Наличие же наноразмерных частиц AlCrFe препятствует перемещению зернограницных дислокаций матричного алюминия на большие расстояния, что и обеспечивает повышенную, и примерно одинаковую твердость обоих конденсатов.

Апробация разработанного нанокompозита AlCrFe в качестве демпфирующего покрытия реального конструктивного элемента проведена на титановых рабочих лопатках компрессора АГТД (см. рис. 1, б).

Испытания лопаток проводили по методике, изложенной в [12]. При этом они устанавливались в элементе диска и крепились в соответствующем зажиме.

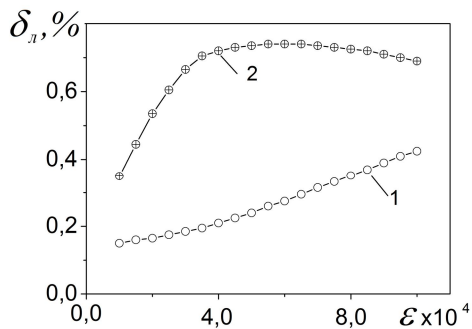
Циклическое нагружение пера лопатки в резонансном режиме колебаний задавали с помощью электродинамического вибратора, а результаты испытаний регистрировались в виде амплитудно-частотных характеристик.

По результатам обработки строились амплитудные зависимости декремента колебаний лопаток, которые для комнатной температуры приведены на рис. 6.

Как следует из полученных результатов, нанесение покрытия на перо лопатки существенно влияет на ее демпфирующую способность, увеличивая логарифмический декремент колебаний в 2.5-3 раза по сравнению с таковым для лопатки без покрытия.

### Выводы

1. На основании результатов выполненного комплекса экспериментально-расчетных исследований по изучению диссипативных свойств нанокompозита на основе системы Al-Cr-Fe установлено, что по величине логарифмического декремента колебаний, которая достигает более 10 %, он относится к высокодемпфирующим материалам с высокой микротвердостью  $H_v$ , равной  $(6.2 \pm 0.6)$  ГПа.



**Рис. 6. Зависимости логарифмического декремента колебаний лопаток без покрытия (1) и с покрытием (2) из нанокompозита системы Al-Cr-Fe при температуре 20 °C**

2. Показано, что логарифмический декремент колебаний как рассматриваемого нанокompозита, так и стержневой модели лопатки с покрытием на его основе практически не зависит от температуры в интервале ее изменения  $20 \div 300^\circ\text{C}$  в диапазоне относительной циклической деформации до  $10^{-3}$ .

3. Проведено оценку демпфирующей способности титановых рабочих лопаток АГТД с покрытиями при частоте их собственных резонансных колебаний 640...650 Гц. Показано, что нанокompозитные покрытия на основе системы Al-Cr-Fe толщиной 40 мкм обеспечивают увеличение демпфирующей способности лопаток в 2.5...3 раза.

### Литература

1. Муравченко Ф.М. Актуальные проблемы динамики, прочности и надежности современных авиадвигателей / Ф.М.Муравченко, А.В.Шереметьев // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 4(20). – С. 2-5.
2. Матвеев В.В. Демпфирование колебаний деформируемых тел / В.В. Матвеев. – Киев: Наук. думка, 1985. – 263 с.
3. Головин С.А. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов / С.А Головин, А. Пушкар, Д.М Левин.- М.: Металлургия, 1987. – 191 с.
4. Андриевский Р.А. Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. Особенности структуры. Термодинамика.

Фазовые равновесия. Кинетические явления / Р.А.Андриевский, А.М.Глезер // Физика металлов и металловедение. – 1999. – №1. – С. 50-73.

5. Устинов А.И. Диссипативные свойства наноструктурированных материалов / А.И.Устинов // Пробл. прочности. – 2008. – № 5. – С. 96 – 104.

6. Ustinov A. Structure and properties of quasicrystalline and approximant EBPVD coatings of Al-based systems / A.Ustinov, S.Polishchuk, V.Skorodzievskii, V.Telychko // Z. Fur Kristallogr. – 2008. – 224. – P. 9-12.

7. Устинов А.И. О возможностях наноструктурированных покрытий для снижения динамической напряженности конструктивных элементов машин / А.И.Устинов, А.П.Зиньковский, В.С.Скородзиевский, И.Г.Токарь // Современная электротехнология. – 2010. – №1. – С. 28-33.

8. Sordelet D.J. Dry sliding of polygrained quasicrystalline and crystalline Al-Cu-Fe alloys / D.J.Sordelet, J.S.Kim, M.F.Besser // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. – 1999. – 553. – P. 459-470.

9. Paton В.Е. Composite Materials Deposited from the Vapour Phase in Vacuum Soviet Technologies Review / В.Е.Paton, В.А. Movchan // Weld and Surfacing. – 1991.– 2. – P. 43-64.

10. Устинов А.И. Исследование демпфирующей способности плоских образцов из титанового сплава Ti-6%Al-4%V с покрытиями из олова и иттрия / А.И.Устинов, В.А.Мовчан, В.С. Скородзиевский // Пробл. прочности. – 2001. – № 4. – С. 55 - 61.

11. Устинов А.И. Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий // Пробл. прочности. – 2007.- № 6.- С. 134 -143.

12. Зиньковский А.П. Демпфирующая способность конструктивных элементов с наноструктурированными покрытиями / А.П. Зиньковский, И.Г.Токарь // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 2. – С. 37-41.

13. Фавстов Ю.К. Металловедение высокодемпфирующих сплавов / Ю.К.Фавстов, Ю.Н.Шульга, А.Г.Рахштадт.- М.: Металлургия, 1980. – 271 с.