

ВЛИЯНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕМПФИРОВАНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ-6

А.В. Микитчик¹, Ю.Э. Рудой¹, И.В. Грушецкий²,
А.О. Ахтырский¹, С.М. Романенко¹

¹Государственное предприятие «Международный центр электронно-лучевых технологий
ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины» (МЦ ЭЛТ).

03150, г. Киев, ул. Горького, 68. E-mail: yakovchuk@paton-icebt.kiev.ua

²Крыловский государственный научный центр.

196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. E-mail: krylov@krylov.spb.ru

Представлены результаты сравнения демпфирующих свойств образцов из сплава Ti–6Al–4V (ВТ-6) без покрытия и с нанесенным трехслойным демпфирующим покрытием Cu/Ni/Cr суммарной толщиной 70 мкм. Покрытие получали электронно-лучевым осаждением в вакууме из паровой фазы. Исследование демпфирующей способности образцов проводили при комнатной температуре. Коэффициенты потерь определяли по ширине резонансного максимума и времени снижения уровней вибрации после импульсного воздействия. Установлено, что нанесение электронным лучом покрытия Cu/Ni/Cr обуславливает повышение демпфирующей способности образцов из ВТ-6 в 2...2,5 раза, о чем свидетельствует увеличение коэффициента потерь. Библиогр. 26, табл. 3, ил. 8.

Ключевые слова: электронно-лучевое испарение и конденсация в вакууме; вибрация; демпфирование (затухание) колебаний; долговечность; титановый сплав ВТ-6; защитные покрытия; компрессорные лопатки ГТД; коэффициент потерь; диссипация энергии

Введение. Титановый сплав Ti–6Al–4V (ВТ-6) широко применяется в авиационной промышленности для производства ответственных деталей компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2]. Детали, изготовленные из данного сплава, обладают низкой демпфирующей способностью, что приводит к снижению их срока эксплуатации в условиях резонансных вибрационных нагрузок и, как следствие, может приводить к поломкам из-за высокочастотной усталости.

Усталость материала является одной из основных причин разрушения ответственных деталей компрессоров ГТД [3] и проявляется в виде возникновения усталостных трещин в теле лопаток при увеличении вибрационных нагрузок [4].

Для снижения амплитуды резонансных колебаний компрессорных лопаток широко используются конструктивные методы, например antivibrational полки или демпферы [3, 5], применение которых приводит к увеличению массы. Также возможен износ и появление трещин в замковой части лопаток [3].

Учитывая тенденцию к снижению веса, в настоящее время широко применяются роторы компрессоров ГТД, состоящих из монолитных дисков с лопатками, изготовленными из титановых сплавов. В этом случае в точках контакта между лопаткой и диском отсутствует конструктивное демпфирование, возникающее при трении. Одним из решений данной проблемы является нанесение

на поверхность лопаток покрытий для снижения резонансных напряжений [6–9]. Высокий уровень рассеяния механической энергии в таких покрытиях снижает уровень вибраций.

Перспективными материалами для демпфирования колебаний являются многослойные покрытия из металлов с различными значениями модуля упругости, который либо возрастает от границы раздела титанового сплава и мягкого демпфирующего подслоя к внешнему твердому эрозионно-стойкому слою, либо снижается от твердого внутреннего подслоя к мягкому внешнему слою [8, 10, 11]. Известно, что градиент модуля упругости слоев при вибрации вызывает внутреннее трение как между слоями покрытия, так и между покрытием и защищаемым сплавом [12].

Многие разрабатываемые современные демпфирующие покрытия на основе MgO + Al₂O₃, NiCrAlY/TiAl, получаемые плазменным напылением, имеют толщину более 250 мкм [4, 13, 14]. Одним из важных требований, предъявляемых к демпфирующим покрытиям, является минимизация их толщины и массы для уменьшения дополнительных нагрузок на современные тонкостенные компрессорные лопатки.

Столбчатая микроструктура конденсационных покрытий, получаемых электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме (ЕВ-PVD) при температуре подложки $0,3T_{пл} < T_{пл} < 0,5T_{пл}$ [15], характерна наличием множества границ и дефек-

тно ориентированных зон, которые увеличивают рассеивание энергии в покрытии за счет внутреннего трения [12, 16]. Этот эффект может усиливаться благодаря формированию многослойных тонких покрытий и способствовать достижению ими демпфирующего эффекта.

Ранее [17] проводились испытания покрытия системы Ag/FeCrAl/Cr общей толщиной 100 мкм, показавшие значительное снижение амплитуды вибраций образца за счет внутренней диссипации энергии. Данное многослойное покрытие получали в МЦ ЭЛТ электронно-лучевым осаждением из паровой фазы на образцах из титанового сплава ВТ-6.

Целью данной работы является оценка демпфирующих свойств образцов из сплава ВТ-6 с трехслойным покрытием Cu/Ni/Cr и без него.

Материалы и методика эксперимента. Образцы представляли собой две одинаковые пластины из сплава ВТ-6, размерами 150×107×2,5 мм, на одну из которых наносили покрытие толщиной порядка 70 мкм на обе стороны.

Многослойное покрытие получали за один технологический цикл путем последовательного электронно-лучевого испарения в вакууме меди, никеля, хрома и последующего их осаждения из паровой фазы на образец, закрепленный в оснастке, расположенной над карусельным испарителем [18, 19]. Оснастка с образцами в процессе осаждения покрытия вращались со скоростью 30 об/мин. Температура подложки во время осаждения не превышала 500 °С.

Для удовлетворительной адгезии с подложкой, а также в качестве мягкого демпфирующего слоя с низким модулем упругости и высоким внутренним трением, была выбрана медь [8]. В качестве внешнего твердого износостойкого слоя с высоким значением модуля упругости использовали хром. Никель как промежуточный слой между медью и хромом был выбран из-за среднего значения модуля упругости, характерной склонности к двойникованию, а также магнитоупругости.

Толщину и микротвердость отдельных слоев покрытия измеряли на шлифах образцов (поперечное сечение) вырезанных из пластин, с помощью оптического микроскопа «Polyvar-Met» и приставки «Micro-Duromat 4000E» с фиксированной скоростью нагружения и временем выдержки при нагрузке 0,2 Н.

Для определения модуля упругости использовали наноиндентометр «Микрон Гамма» [20] в основу которого положен метод У. Оливера и Дж. Фарра [21].

Структуру покрытий исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) «Tescan Vega 3»,

а химический состав определяли с использованием энергодисперсионного спектрометра «Energy 200» к РЭМ «CamScan 4D» (программное обеспечение INCA) [22]. Ионное травление микрошлифов проводили на установке ВУП-5М.

Тонкую структуру образцов с покрытиями (поперечное сечение) изучали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с помощью «Hitachi H-800» при ускоряющем напряжении 200 кВ. Подготовку образцов осуществляли по стандартной методике с использованием приборов «Polyfinn», «Microslice-4», «Ion Tech» (Англия) и «Gatan-656 PIPS» (США).

Исследования демпфирующей способности образцов проводили широко применяемыми в технике методами. Коэффициенты потерь определяли по ширине резонансного максимума и по времени снижения уровней вибрации после импульсного воздействия с использованием микрофона вместо акселерометра, поскольку акселерометр массой даже 2 г, закрепленный на мастике или магните, оказывал существенное демпфирующее влияние [23]. Расстояние между микрофоном и образцом составляло 1 см. Правомерность применения микрофона была обоснована дополнительными экспериментами.

Результаты исследования. Микроструктура и распределение химических элементов в трехслойном покрытии представлены на рис. 1, а, б соответственно. В табл. 1 приведены показатели толщин, микротвердости, модуля упругости и справочные значения материалов отдельных слоев покрытия [24].

Низкие значения модуля упругости осажденных слоев хрома и никеля могут быть связаны с особенностью их строения (рис. 1, б). Исследование тонкой структуры (рис. 2, а) и дифракции внешнего слоя хрома показало, что он состоит из вытянутых по направлению падения парового потока субмикронных монокристаллов (рис. 2, б) с большим количеством разнообразных дефектов, в том числе дислокаций, обеспечивающих диссипацию энергии. В структурах слоев меди и никеля, полученных на РЭМ (после ионного травления),

Таблица 1. Значения толщины, микротвердости, модуля упругости и справочные данные отдельных слоев демпфирующего покрытия				
Материал слоя	Толщина d, мкм	Микротвердость HV, ГПа	Модуль упругости E, ГПа	
			измеренный	справочный
Cu	32	0,8	115	110
Ni	16	1,75	140	210
Cr	32	2,1	117	300

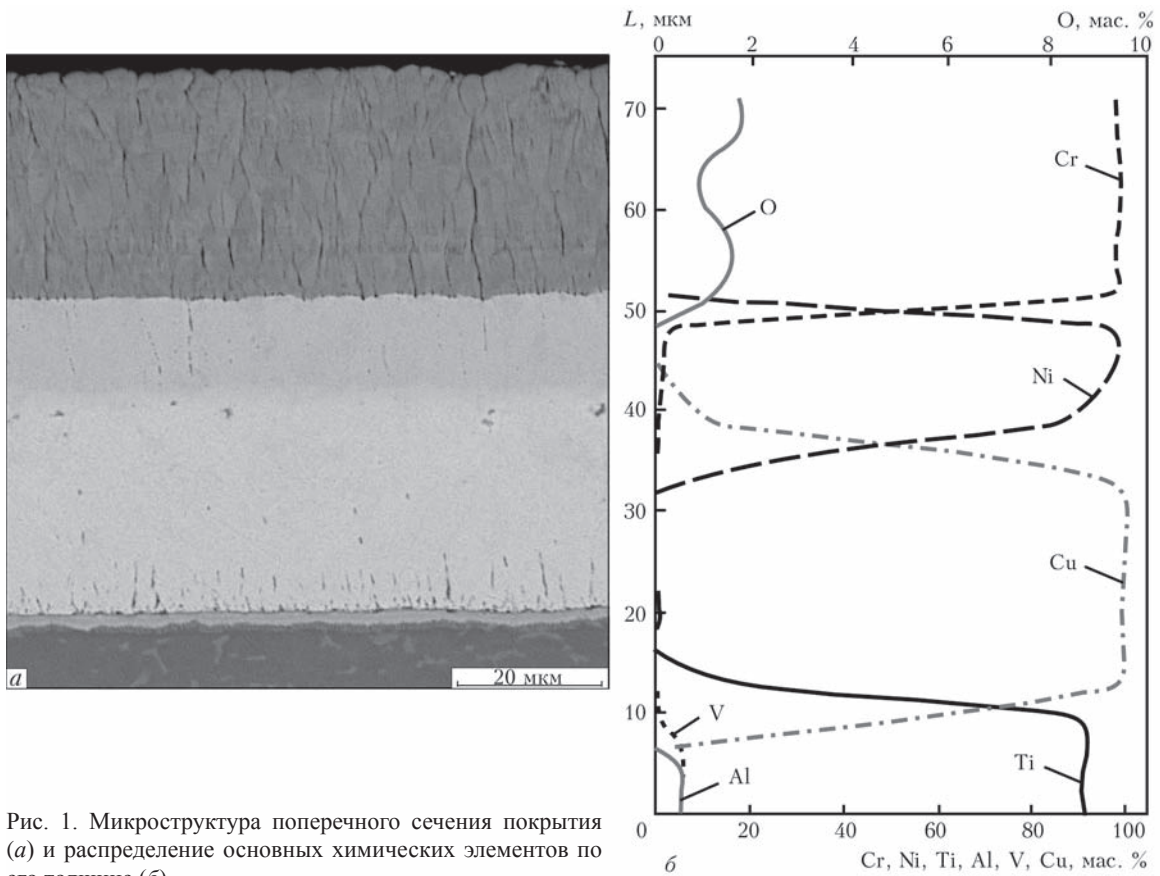


Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения покрытия (а) и распределение основных химических элементов по его толщине (б)

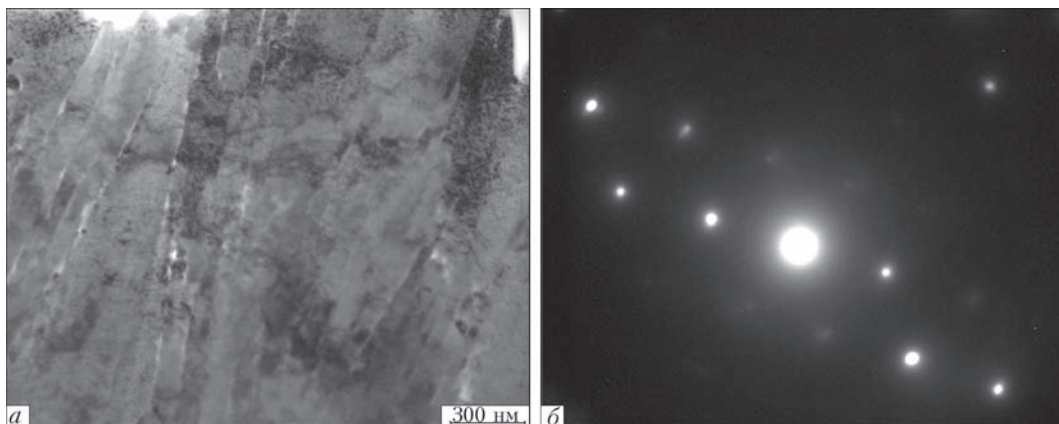


Рис. 2. Тонкая столбчатая структура поперечного сечения слоя хрома (а) и электронная микродифракция монокристалла хрома из этого слоя (б)

отчетливо различаются границы зерен, а также субмикронные двойники. На рис. 3 средний размер зерна в слое меди и никеля составляет 5 и 6 мкм соответственно, причем из-за достаточно низкой температуры подложки размер зерна слоя меди в зоне, прилегающей к подложке, приближается к субмикронным значениям. Именно границы зерен, двойников, дислокаций, присутствующие в полном объеме в тонких слоях, обеспечивают диссипацию механической энергии [25, 26].

Результаты определения коэффициента потерь.
По ширине резонансного максимума. Частотная

характеристика образцов титана с покрытием и без покрытия представлена на рис. 4.

Соответствующие собственные частоты хорошо видны в диапазоне частот до 1500 Гц. На более высоких частотах трудно было определить собственные частоты одинаковых мод колебаний образцов из-за увеличения их плотности. Поэтому, коэффициенты потерь определяли по ширине резонансных максимумов только на 1-й и 2-й собственных частотах.

Коэффициенты потерь, полученные в отдельных измерениях, представлены на рис. 5, средние значения приведены в табл. 2. Коэффициенты потерь

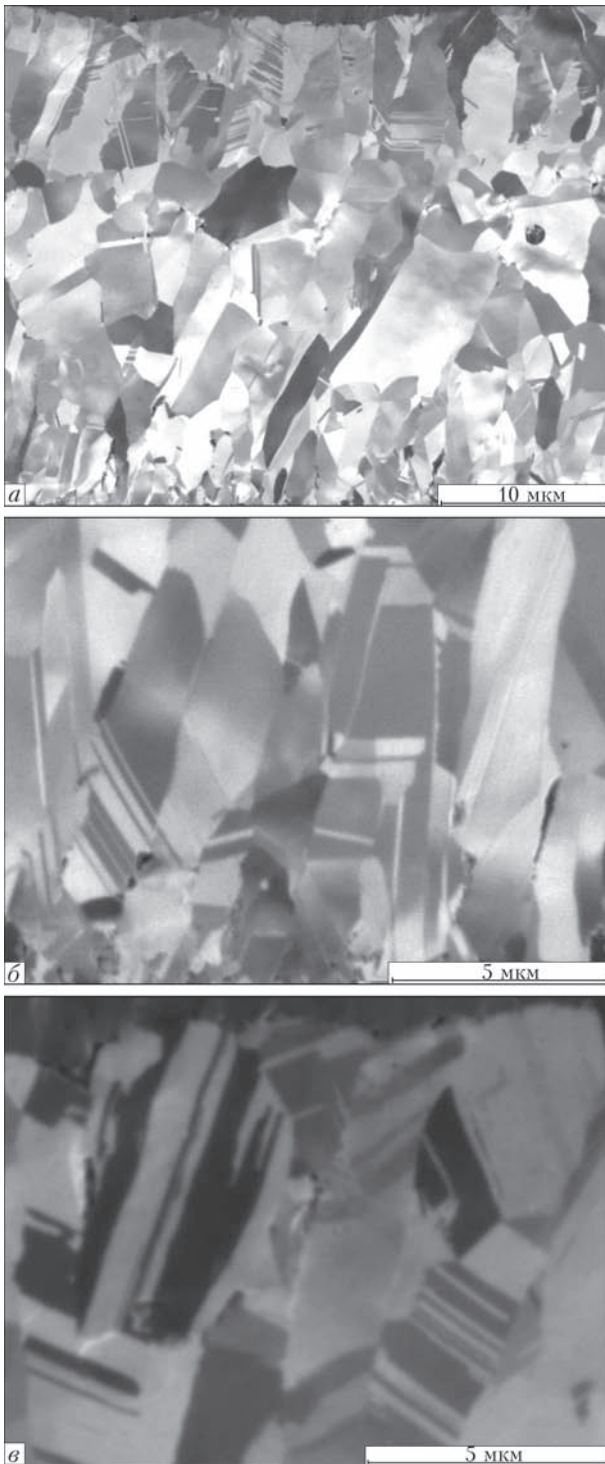


Рис. 3. Структуры слоев меди и никеля после ионного травления (а), меди в зоне прилегающей к подложке (б), меди в зоне прилегающей к внешнему слою хрома (в)

титанового образца с трехслойным покрытием оказались выше, чем коэффициенты потерь титанового образца без покрытия примерно в 2...2,5 раза.

По времени снижения уровней вибрации после импульсного воздействия. Определение коэффициентов потерь выполнялось в пяти точках при возбуждении колебаний последовательно в трех точках (рис. 6). Расстояние между микрофоном и

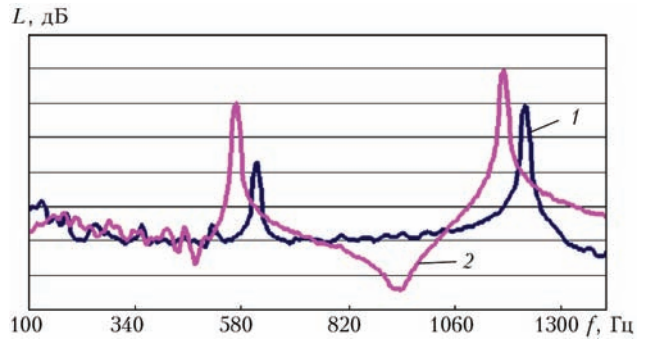


Рис. 4. Частотная характеристика образцов титана с покрытием (1) и без него (2), $\Delta f = 4$ Гц

Таблица 2. Средние значения коэффициентов потерь k_n , определенные на первых двух собственных частотах

Титановый образец	Частота, Гц			
	1-я собственная		2-я собственная	
	609	565	1217	1168
С покрытием	0,0025		0,0015	
Без покрытия	0,001		0,0007	

образцом составляло 1 см. Усредненные результаты измерений в точках представлены на рис. 7.

Коэффициенты потерь, определенные двумя разным методами (по времени снижения уровней вибрации (I) и по ширине резонансных максимумов (II)) для октавных полос частот 500 и 1000 Гц, в которые попадают первые собственные частоты образцов, приведены в табл. 3.

Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что коэффициенты потерь, измеренные двумя методами, достаточно близки. Коэффициенты потерь

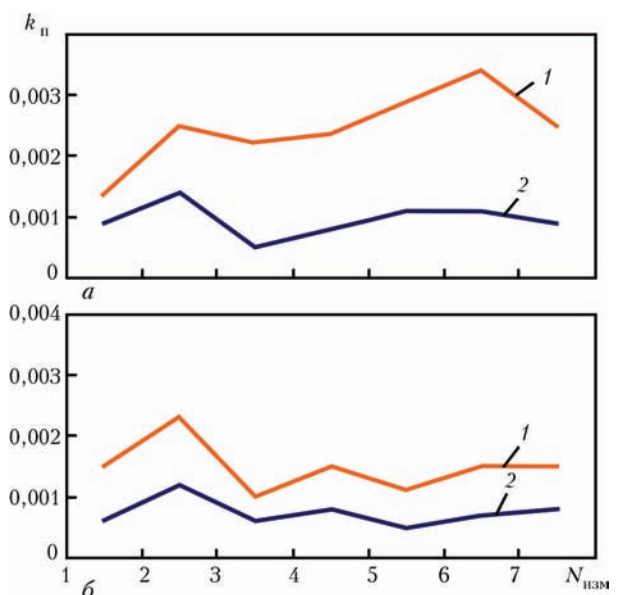


Рис. 5. Значения коэффициентов потерь, полученные при разных измерениях на первой (а) и второй (б) собственной частоте: 1 — титановый образец с покрытием; 2 — без покрытия

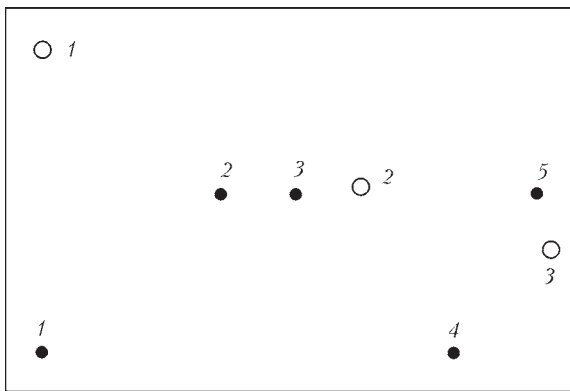


Рис. 6. Схема образца: ● — точки, в которых проводили измерения; ○ — точки в которых возбуждались колебания

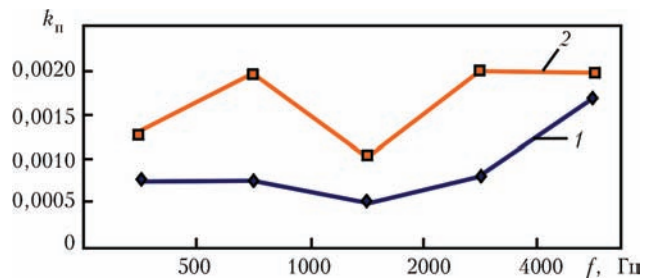


Рис. 7. Средние значения коэффициентов потерь колебаний образцов без покрытия (1) и с покрытием (2)

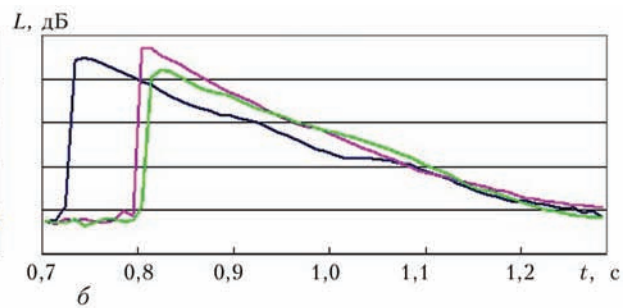
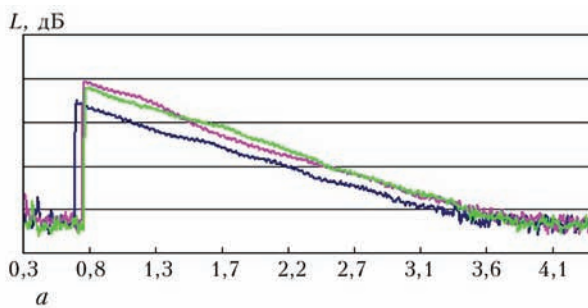


Рис. 8. Снижение уровней вибрации после импульсного воздействия в октавных полосах частот: а — 500; б — 4000 Гц

Таблица 3. Сравнительный анализ коэффициентов потерь образцов из сплава ВТ-6, измеренных двумя методами

Метод	Образец	Частота, Гц	
		500	1000
I	без покрытия	0,00075	0,00075
	с покрытием	0,0013	0,00195
	соотношение	1,73	2,60
II	без покрытия	0,001	0,0007
	с покрытием	0,0025	0,0015
	соотношение	2,50	2,14

образца из сплава ВТ-6 с трехслойным покрытием примерно в 2...2,5 раза выше по сравнению с образцом без покрытия.

Следует отметить, что для сплавов с повышенным демпфированием (например Sonoston, Аврора) высокие коэффициенты потерь достигаются только при значительных уровнях вибрации (напряжений, деформаций), что существенно ограничивает область применения подобных материалов. Для исследованного сплава ВТ-6 с покрытием снижение уровней вибрации после импульсного воздействия вполне равномерное в пределах времени регистрации и однозначно может быть аппроксимировано прямой линией. Примеры для октавных полос 500 и 4000 Гц представлены на рис. 8. Это означает, что коэффициенты потерь не зависят от амплитуды колебаний (в пределах тех амплитуд, которые имели место в данном эксперименте).

Выводы

Установлено, что микроструктура многослойного покрытия медь–никель–хром толщиной 70 мкм, осажденного на образцы из сплава ВТ-6 при температуре 500 °С способом электронно-лучевого испарения за один технологический цикл, состоит из внешнего столбчатого слоя субмикронных монокристаллов хрома с большим количеством дефектов и границ, слоя меди, прилегающего к подложке, и промежуточной прослойки никеля с размером зерен 5 и 6 мкм соответственно, для которых характерно наличие субмикронных двойников.

На основании полученных результатов по изменению модулей упругости слоев покрытия установлена незначительная разница в их значениях. Это свидетельствует о том, что ключевую роль в рассеянии энергии упругих колебаний играет количество дефектов структуры и субграниц, а именно двойников, дислокаций в каждом слое. Определено, что модуль упругости меди почти полностью отвечает справочным данным, а никеля и особенно хрома — отличается. Вероятно, это обусловлено их характерной столбчатой структурой.

Коэффициенты потерь пластины из сплава ВТ-6 с демпфирующим покрытием превышают коэффициенты потерь пластины без покрытия примерно в 2...2,5 раза в широком диапазоне звуковых частот (500...4000 Гц). Повышение коэффициентов потерь в два раза приводит к уменьше-

нию уровней вибрации на собственных частотах примерно на 6 дБ.

1. *Конструкционные материалы*: Справочник / Под ред. Б.Н. Арзамасова. — М.: Машиностроение, 1990. — 687 с.
2. *Структура* и физико-механические свойства вакуумных конденсаторов титанового сплава ВТ6 / И.С. Малащенко, В.В. Куренкова, И.В. Белоусов, В.И. Бибер // Современ. электрометаллургия. — 2014. — № 2. — С. 26–35.
3. *Чичков Б.А.* Рабочие лопатки авиационных газотурбинных двигателей. Ч.1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток. — М.: МГТУ ГА, 2000. — 74 с.
4. *The evaluation of the damping characteristics of a hard coating on titanium* / С. Blackwell, A. Palazotto, T. George et al. // Shock and Vibration. — 2007. — 14. — P. 37–51.
5. *Ножницкий Ю.А., Федина Ю.А., Шадрин Д.В.* Исследование конструкционного демпфирования колебаний рабочих лопаток турбомашин на динамических разгонных стендах // Вест. Самар. гос. аэрокосмич. ун-та. — 2012. — № 3. — С. 314–320.
6. *Movchan B.A., Ustinov A.I.* Highly damping hard coatings for protection of titanium blades / Evaluation, control and preventing of high cycle fatigue in gas turbine engines for land, sea and air vehicles // Proc. of RTO-AVT 121 Symp. (Seville, Spain, Oct. 3–5 2005). — Seville, 2005. — P. 1–15.
7. *Movchan B.A.* Functionally graded EBPVD coatings // Surf. Coat. Technol. — 2002. — 149. — P. 252–262.
8. *Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД* / С.А. Мубояджян, Д.А. Александров, Д.С. Горлов и др. // Авиационные материалы и технологии: Юбил. науч.-техн. сб. — М.: ВИАМ, 2012. — С. 71–81.
9. *Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности* / С.А. Мубояджян, А.Н. Луценко, Д.А. Александров и др. // Труды ВИАМ. — 2013. — № 1. — С. 10–21.
10. *Структура* и свойства эрозионностойких градиентных покрытий на основе TiN, V₂C и Cr, полученных электронно-лучевым осаждением // Тез. докл. 3-й междунар. конф. «HighMatTech 2011», 3–7 окт. 2011 г., Киев, 2011. — С. 392.
11. *Влияние условий конденсации на структуру и свойства твердых покрытий на основе V₂C, полученных электронно-лучевым испарением в вакууме* / К.Ю. Яковчук, Ю.Э. Рудой, А.В. Микитчик и др. // Современ. электрометаллургия. — 2012. — № 1. — С. 28–33.
12. *Green J., Patsias S.* A Preliminary approach for the modeling of a hard damping coating using friction elements // Proc. of the 7th National Turbine Engine High Cycle Fatigue Conference (West Palm Beach, Florida, USA, May 2002). — P. 1–9.
13. *Torvik P.J.* Determination of mechanical properties of non-linear coatings from measurements with coated beams // Intern. J. of Solids and Structures. — 2009. — 46. — P. 1066–1077.
14. *Filippi S., Torvik P.J.* A Methodology for predicting the response of blade with nonlinear coatings // J. Eng. Gas Turbines Power. — 2010. — 133, № 4. — P. 1–7.
15. *Мовчан Б.А., Демчишин А.В.* Исследование структуры и свойств толстых вакуумных конденсаторов никеля, титана, вольфрама, окиси алюминия и двуокиси циркония // Физ. мет. и металлвед. — 1969. — 28, № 4. — С. 654–660.
16. *Torvik P.J.* A slip damping model for plasma sprayed ceramics // J. Appl. Mech. — 2009. — 76, № 6. — P. 1–8.
17. *Torvik P., Langley B.* Material properties of hard coatings developed for high damping // Proc. of the 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, (Orlando, Florida, USA, July 29, 2015). — Orlando, 2015. — P. 1–17.
18. *Яковчук К.Ю., Рудой Ю.Э.* Одностадийная электронно-лучевая технология осаждения термобарьерных градиентных покрытий // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 2. — С. 10–16.
19. *Мовчан Б.А., Яковчук К.Ю.* Электронно-лучевые установки для испарения и осаждения неорганических материалов и покрытий // Там же. — 2004. — № 2. — С. 10–15.
20. *Aznakayev E.* Micron-gamma for estimation the physico-mechanical properties of micromaterials // Proc. of the Intern. conf. «Small Talk-2003». — San Diego, California, USA, 2003. — P. 8–10.
21. *Oliver W.C., Pharr G.M.* An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. — 1992. — 7, № 6. — P. 1564–1583.
22. *ГОСТ 9.312–89 ЕСКЗС.* Покрытия защитные. Методы определения жаростойкости. — Введ. 01.07.90. — М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1989. — 7 с.
23. *Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.* Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. — Киев: Наук. думка, 1971. — 375 с.
24. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя. — В 3 т. — 8-е изд., перераб и доп. — Т. 1. — М.: Машиностроение, 2001. — 912 с.
25. *Устинов А.И.* Диссипативные свойства наноструктурированных материалов // Пробл. прочности. — 2008. — № 5. — С. 96–104.
26. *Структура* и механические свойства наноструктурированных вакуумных конденсаторов никеля / А.И. Устинов, В.С. Скородзиевский, Е.В. Фесюн, В.Н. Тараненко // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии: Зб. наук. пр. — Киев: ПВВ ІМФ, 2012. — 10, № 1. — С. 11–18.

Presented are the results of comparison of damping properties of specimens of alloy Ti–6Al–4V (VT-6) without coating and with a deposited three-layer damping coating Cu/Ni/Cr of 70 μm total thickness. The coating was produced by electron beam precipitation in vacuum from a gas phase. The investigation of the damping ability of the specimens was carried out at a room temperature. The coefficients of losses were determined by a width of the resonance maximum and time of reducing the levels of vibration after the pulsed effect. It was found that the deposition of coating Cu/Ni/Cr by the electron beam increases the damping ability of VT-6 specimens by 2...2.5 times which is witnessed by increase in coefficient of losses. 26 Ref., 3 Tables, 8 Figures.

Key words: electron-beam evaporation and condensation in vacuum; damping (attenuation) of vibrations; durability; titanium alloy VT-6; protective coatings; compressor blades of GTE; coefficient of losses; dissipation of energy

Поступила 14.01.2016