

# І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 621.7

Канд. техн. наук Пухальская Г. В.<sup>1</sup>, Подгорский К. Н.<sup>2</sup>, Гликсон И. Л.<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук Степанова Л. П.<sup>1</sup>, Щербина М. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Запорожский национальный технический университет, <sup>2</sup> АТ «Мотор Сич»; г. Запорожье

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ПЕРА ЛОПАТОК

**Цель работы.** Исследовать характеристики поверхностного слоя и диссипативные свойства наноструктурированных покрытий лопаток ГТД.

**Методы исследования.** Исследования проводили на лопатках из титанового сплава ВТЗ-1, покрытых наноструктурированной медью и серебром после ультразвукового упрочнения шариками. Покрытия получали методом электронно-лучевого испарения и конденсации материала покрытия в вакууме [3]. Испытания по исследованию диссипативных свойств проводили на виброэлектродинамическом стенде ВЭДС-400 согласно [11]. Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре ДРОН-3 в медном монохроматическом излучении с фильтрацией дифракционных отражений и компьютерной обработкой данных.

**Полученные результаты.** Приведены результаты исследований диссипативных свойств наноструктурированных покрытий из меди и серебра рабочих поверхностей лопаток. Показано, что лопатки обладают большей демпфирующей способностью, чем исходные без покрытия; причем конденсаты из наноструктурированной меди приводят к большей диссипации энергии. Результаты измерения шероховатости и микротвердости свидетельствуют о том, что покрытие не ухудшает качество поверхности и не приводит к изменению твердости подслоной области и сердцевины. Установлено, что покрытие пера лопаток из наноструктурированной меди и серебра не приводит к снижению выносливости лопаток и не изменяет частоту собственных колебаний лопатки.

**Научная новизна.** Установлено, что наноструктурированные покрытия меди и серебра текстурованы и имеют ориентационное расположение плотноупакованных плоскостей (111) и, частично, плоскостей (100), параллельно поверхности лопатки, что должно обеспечивать хорошее сцепление покрытия с поверхностью лопатки.

**Практическая ценность.** Установлено, что покрытие пера лопаток наноструктурированной медью приводит к значительному повышению демпфирующей способности лопаток и обеспечивает благоприятные характеристики поверхностного слоя, что позволяет рассматривать его в качестве возможной составляющей композитных защитных покрытий лопаток ГТД.

**Ключевые слова:** наноструктурированные покрытия, диссипационные свойства, шероховатость, лопатка, микротвердость, текстура.

### Введение

В связи с развитием современного машиностроения высокие требования предъявляются к надежности и долговечности как отдельных конструктивных элементов, так и машин в целом. Поскольку большинство из них эксплуатируются в условиях широкого спектра динамических нагрузок, которые могут вызвать выход из строя и разрушение конструктивных эле-

ментов, а также привести к катастрофическим последствиям, то одной из ключевых задач достижения надежного функционирования в течение требуемого ресурса является обеспечение их динамической прочности.

Применительно к рабочим лопаткам компрессоров ГТД, изготавливаемым из высокопрочных с низкими значениями диссипативных свойств титановых сплавов,

одним из эффективных способов повышения вибрационной надежности является нанесение на перо высокодемпфирующих покрытий [1].

Реализовать этот подход трудно, так как необходимо использовать материалы с высокими значениями предела выносливости, твердости и, в то же время, высоким уровнем демпфирования.

У разработанных ранее [2] высокодемпфирующих материалов необходимый комплекс свойств отсутствует, что препятствует их применению в качестве покрытий для деталей ГТД.

Для достижения высокого уровня прочности материала элементы его субструктуры должны оставаться неподвижными при как можно более высоких напряжениях. С другой стороны, для обеспечения высокого уровня демпфирования требуется подвижность элементов субструктуры уже при незначительных напряжениях. Следовательно, сочетание высоких уровней прочности и демпфирующей способности в одном и том же материале представляется в определенной мере взаимоисключающим [3].

На примере конденсатов Cu, Al-Cu-Fe, полученных электронно-лучевой технологией из паровой фазы, показано, что размер микроструктурных элементов чистых металлов, интерметаллидных соединений и металллокерамических систем оказывает значительное влияние на их диссипативные свойства [3]. Для каждого из материалов существуют критические размеры (наномасштабного уровня) микро- и субструктурных элементов, по достижении которых диссипативные свойства материалов качественно изменяются: повышается уровень демпфирования в области малых амплитуд деформации, изменяется вид амплитудной зависимости коэффициента энергетических потерь механической энергии колебаний материала и происходит его существенный рост с повышением температуры [3].

Сочетание повышенных прочностных свойств с высоким уровнем диссипации механической энергии материалов в наноструктурированном состоянии представляется перспективным для создания на их основе защитных покрытий, которые обеспечили бы не только демпфирование колебаний деталей сложных механических систем, но и защиту их поверхности от механических повреждений [3].

В работах [3–7] исследовали микроструктуры вакуумных конденсатов меди, полученных при различных температурах подложки. Показано, что чем ниже температура подложки, тем меньше размер зерен в конденсате.

Из [3, 8] следует, что с уменьшением температуры осаждения изменяется внутреннее строение кристаллитов, что проявляется в образовании прослойки из двойниковых доменов, расположенных преимущественно параллельно фронту роста кристаллитов. Количество таких двойников резко возрастает с понижением температуры осаждения начиная с  $T_c \approx 350$  °С.

При дальнейшем снижении температуры их количество увеличивается, что приводит к формированию в кристаллитах нанодвойниковой субструктуры [8].

Следовательно, на примере меди видно, что путем понижения температуры подложки можно формировать покрытия, в которых размер зерен изменяется в несколько раз, а толщина двойниковых доменов – от микро- до наномасштабного уровня [8].

В работах [3, 5, 8, 9, 10] изучали зависимость логарифмического декремента затухания колебаний в зависимости от температуры осаждения и размеров зерен. Конденсаты с размерами зерен выше критического значения имеют низкий уровень демпфирования, который не изменяется при их нагреве, демпфирующие свойства конденсатов с размерами зерен меньше критического значения при нагреве существенно повышаются.

При переходе от микро- к нанодвойниковой субструктуре покрытий наблюдается не только изменение характеристик демпфирования, но и резкий рост микротвердости [3, 8, 9].

Анализ результатов показывает, что независимо от вида материала диссипативные свойства конденсатов претерпевают существенные изменения, если размеры их структурных элементов (зерно или двойниковый домен) достигают величин, меньших некоторых критических значений. С дальнейшим уменьшением размеров структурных элементов эти изменения становятся еще более выраженными [3].

Согласно существующим представлениям, деформационное поведение материалов при уменьшении размера зерен определяется главным образом процессами, развивающимися по границам зерен. На этом основании можно предположить, что и демпфирование в наноструктурированных материалах контролируется зернограницными процессами. Как следствие такого предположения, можно ожидать изменения характеристик демпфирования материала независимо от его химического состава при переходе в наноструктурированное состояние [3].

Целью работы является исследование диссипативных свойств и характеристик поверхностного слоя наноструктурированных покрытий лопаток ГТД.

#### Методика исследований

Объектом исследований являются лопатки третьей ступени компрессора низкого давления двигателя Д-36 из титанового сплава ВТ3-1 с нанесенными на перо лопаток наноструктурированными покрытиями из серебра и меди. Поверхность пера окончательно обработана шариками в ультразвуковом поле (УЗУ) по серийной технологии до нанесения покрытия.

Покрытия из меди и серебра ( $Ag + 6\% Cd$ ) получали методом электронно-лучевого испарения и конденсации материала покрытия в вакууме [3]. Толщина покрытия порядка 10 мкм. Покрытия осаждались на часть пера лопатки, подвергающейся максимальным напряжениям в эксплуатации.

На начальном этапе процесса осаждения покрытия при помощи электронно-лучевой пушки производился нагрев лопатки до температуры осаждения 300 °С, затем с помощью ионного источника проводилась очистка поверхности лопатки. С помощью электронно-лучевой пушки нагревался слиток с материалом покрытия. Вследствие бомбардировки поверхности электронным пучком материал нагревался до температуры, при которой происходит его испарение с требуемой скоростью. В образующийся поток помещалась подложка, на которую конденсировалось испаряемое вещество. Пример титановых лопаток с конденсатами меди представлен на рис. 1.



Рис. 1. Лопатки с покрытием наноструктурированной медью

Испытания по определению демпфирующей способности покрытий проводили на виброэлектродинамическом стенде ВЭДС-400, позволяющем возбуждать и стабильно поддерживать колебания лопаток по основному тону с необходимым уровнем нагружения. Установка оборудована комплектом задающей и контрольно-измерительной аппаратуры для измерения и контроля параметров процесса усталостных испытаний.

Испытания проводили на исходных лопатках (УЗУ) и лопатках с покрытием из наноструктурированной меди и серебра согласно [11].

Измерение параметров шероховатости  $R_z$  и  $R_a$  рабочих поверхностей лопаток после УЗУ и с покрытием наноструктурированной медью выполняли на приборе «Hommelwave T8000» вдоль и поперек оси лопаток.

Замеры твердости проводились на микротвердомере LECO LM-248AT, оснащенный системой автоматического измерения твердости АМН-43 в соответствии с [12]. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом между противоположными гранями 136 градусов. К индентору прилагалась нагрузка 0,5 Н, с выдержкой усилия в течение 15 секунд.

Испытания на усталость лопаток с покрытиями проводили способом динамического возбуждения в них колебаний по первой изгибной форме на вибростенде ВЭДС-400 согласно [13]. Лопатки крепились в специальном замке и испытывались в резонансном режиме до появления макротрещины, что соответствовало падению частоты собственных колебаний. Было испытано по 6 лопаток с покрытиями из меди и серебра. Для исходных лопаток были использованы данные по испытаниям серийных лопаток. База испытаний  $N=100$  млн. циклов.

Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре ДРОН-3 в медном монохроматическом излучении с фильтрацией дифракционных отражений и компьютерной обработкой данных.

Для исследования влияния покрытия пера лопаток на частоту собственных колебаний был проведен модальный анализ в ANSYS Workbench для определения частот колебания модели исходной лопатки (после УЗУ) и лопатки, покрытой наноструктурированной медью. Для проведения данного анализа построена твердотельная модель по номинальным размерам в соответствии с чертежом.

### Результаты исследований и их обсуждение

Исследование диссипативных свойств покрытий проводили в такой последовательности: установив и закрепив стойку на столе вибратора, обеспечили плотное прилегание нижней поверхности стойки к поверхности стола. Установили лопатку в зажим, обеспечив с помощью тарированного ключа одинаковую величину усилия зажатия (рис. 2). Найдя частоту собственных колебаний лопатки, вывели на амплитуду колебаний  $2A = 7$  мм, что соответствует задаваемому напряжению в наиболее нагруженной зоне пера  $\sigma = 400$  Н/мм<sup>2</sup>.

Энергию, необходимую для нагружения лопаток одинаковым уровнем деформации ( $2A = 7$  мм) определяли по величине подводимой мощности путем изменения подаваемых на вибростенд силы тока и напряжения. Следует отметить, что в процессе нагружения лопаток с течением времени величины силы тока и напряжения, необходимые для поддержания одинакового уровня деформации, лопатки меняются. Стабилизация этих величин происходит спустя 30 мин после начала нагружения. Поэтому, регистрацию показаний вольтметра и амперметра выполняли в начале испытаний и после наработки 10, 20 и 30 минут. Результаты измерений занесли в таблицу 1.

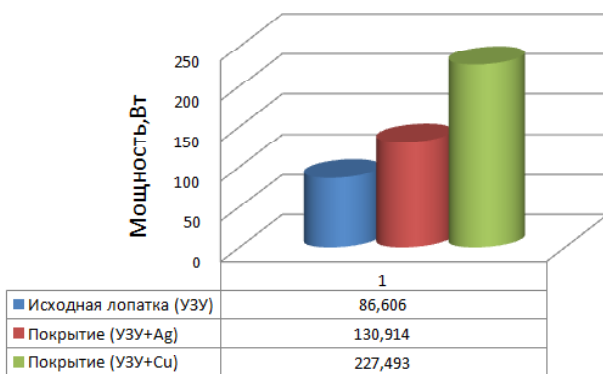
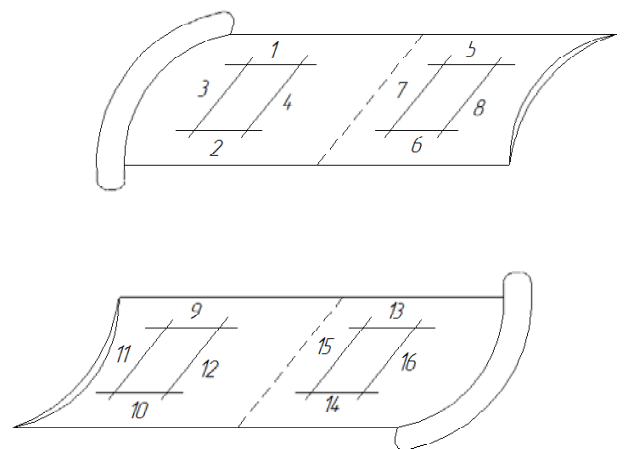


Рис. 2. Лопатка с покрытием из меди, закрепленная на стенде ВЭДС-400

**Таблиця 1** – Результати определения энергии, необходимой для нагружения лопаток амплитудой колебания  $2A = 7$  мм

Состояние лопаток, инд. номер	Наработка, мин												F, Гц
	В начале			10			20			30			
	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	
Исходная (УЗУ) 1.	12,9	6,5	83,85	12,2	6,2	75,6	12,2	6,2	75,6	12,0	6,1	73,2	548
Исходная (УЗУ) 2.	14,4	7,2	103,7	13,8	6,8	93,8	13,8	6,8	93,8	13,7	6,8	93,2	544
Покрытие (УЗУ+Ag) 1.	18,0	8,6	154,8	16,2	7,8	126,3	15,8	7,7	121,7	15,3	7,4	113,2	543
Покрытие (УЗУ+Ag) 2.	17,8	8,5	151,3	16,3	7,9	128,8	16,3	7,9	128,8	15,9	7,7	122,4	536
Покрытие (УЗУ+Cu) 1.	25,2	11,7	294,8	20,7	9,7	200,8	19,4	9,2	178,5	18,4	8,8	161,9	546
Покрытие (УЗУ+Cu) 2.	27,9	12,8	357,1	22,7	10,5	238,4	21,2	9,9	209,9	19,2	9,3	178,6	541

Сравнив мощность, затраченную на заданную амплитуду колебаний  $2A = 7$  мм, исходных лопаток (УЗУ) и лопаток с покрытием (УЗУ+Cu и УЗУ+Ag), можно сделать вывод, что для лопаток, покрытых медью, необходимо затратить гораздо больше энергии, чем исходных, что говорит о диссипации энергии. Лопатки с покрытиями из серебра (Ag + 6 % Cd) незначительно отличаются от исходных лопаток, что говорит о меньшей демфирующей способности покрытия. Следовательно, при одинаковом уровне нагружения лопатки с покрытием наноструктурированной медью будут иметь меньшую амплитуду колебаний, чем исходные (УЗУ), что приведет к снижению динамической напряженности.

**Рис. 3.** Средняя мощность, затраченная на нагружение лопаток амплитудой колебаний  $2A = 7$  мм**Рис. 4.** Схема измерения шероховатости поверхности лопаток (1...16 – направление и порядок измерений)

Измерение параметров шероховатости  $R_z$  и  $R_a$  на лопатках выполняли по схеме, представленной на рис. 4. Измерение проводили на исходных лопатках (после УЗУ) и лопатках с покрытием (УЗУ+Cu).

Полученные результаты занесли в таблицу 2.

По результатам полученных измерений параметров шероховатости можно сделать вывод, что после покрытия лопатки медью качество поверхности практически не изменилось. Параметры шероховатости вдоль оси пера лучше, чем поперек. Среднее значение шероховатости покрытия (УЗУ+Cu) составляет 0,2675 мкм, поверхности исходной лопатки (УЗУ) – 0,2563 мкм.

**Таблиця 2** – Результати измерения шероховатости поверхности лопаток исходных (УЗУ) и покрытых медью (УЗУ+Cu)

		Спинка				Корыто				Среднее значение $R_a$ , мкм	Среднее значение $R_z$ , мкм
		$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм		
покрытие (УЗУ+Cu)	вдоль оси	0,18	0,19	1,75	1,75	0,19	0,21	1,58	1,99	0,1925	1,7675
	поперек оси	0,48	0,31	1,58	1,53	0,29	0,29	1,50	1,69	0,3425	1,575
исходная (УЗУ)	вдоль оси	0,18	0,17	1,38	1,53	0,17	0,22	1,44	2,03	0,185	1,595
	поперек оси	0,35	0,30	1,72	1,58	0,27	0,39	1,54	2,36	0,3275	1,8

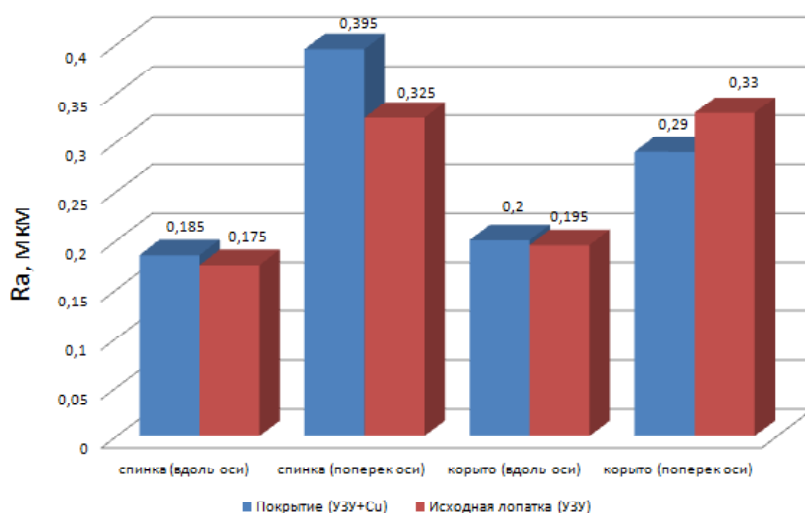


Рис. 5. Результаты измерения шероховатости лопаток вдоль и поперек оси

Образцы для измерения микротвердости вырезали на электроэрозионном станке из наиболее плоских участков профильной части лопаток. На рис 6 представлена схема замера твердости образцов с покрытием медью и без; замеры проводились в трех зонах и в сечении у поверхности с шагом 30 мкм. Полученные результаты представлены в табл. 3 и 4. Величину микротвердости определяли как среднее значение пяти отпечатков индентора.

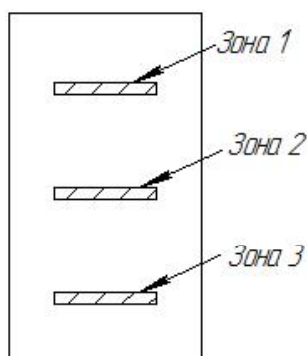


Рис. 6. Схема измерения микротвердости поверхности образцов

Полученные результаты микротвердости образцов в сечении без покрытия и с покрытием медью практически не отличаются, что свидетельствует о том, что данный метод нанесения покрытий не изменяет твердость подслоной области лопаток. Данные микротвердости поверхностного слоя существенно отличаются: после упрочнения шариками в ультразвуковом поле в результате поверхностной пластической деформации твердость увеличивается в среднем до 424 HV, покрытие меди показало низкие значения твердости порядка 94 HV, что требует дальнейшего изучения.

Проведен модальный анализ в ANSYS Workbench для определения частот колебания исходной лопатки и лопатки с покрытием (UZU+Cu). Для проведения данного анализа построена твердотельная модель исходной лопатки (UZU) и лопатки с покрытием (UZU+Cu) толщиной 10 мкм в системе Siemens NX. Задали покрытие свойства меди, а лопатке – титанового сплава BT3-1.

При генерации конечно-элементной сетки использовался элемент Solid186 с одинаковой густотой разбивки в моделях исходной лопатки (UZU) и лопатки с покрытием (UZU+Cu). Граничные условия в виде закрепления прикладывали на замковую часть лопатки.

Таблица 3 – Значения микротвердости образцов

Образец		Зона 1		Зона 2		Зона 3	
		Твердость HV0.05	Диагональ отпечатка мм	Твердость HV0.05	Диагональ, мм	Твердость HV0.05	Диагональ отпечатка мм
Исходный образец (UZU)	1	412	0,01500	454	0,01429	428	0,01472
	2	413	0,01498	440	0,01452	417	0,01491
	3	436	0,01458	453	0,01431	429	0,01470
	4	443	0,01447	440	0,01452	423	0,01481
	5	426	0,01475	478	0,01393	425	0,01477
Среднее		426	-	453	-	424	-
Образец с покрытием (UZU+Cu)	1	94	0,03141	91	0,01429	98	0,01472
	2	97	0,03092	93	0,01452	95	0,01491
	3	91	0,03192	106	0,01431	93	0,01470
	4	95	0,03124	87	0,0142	93	0,01481
	5	97	0,03092	103	0,01393	92	0,01477
Среднее		95	-	96	-	94	-

Таблиця 4 – Значення мікротвердості образців в сеченні у поверхності

Исходный образец (УЗУ)	Расстояние, мм	Твердость HV0.05	Диагональ, мм	Образец с покрытием (УЗУ+Cu)	Расстояние, мм	Твердость HV0.05	Диагональ, мм
1	0,03	382	0,01558		0,03	386	0,01550
2	0,06	391	0,01540		0,06	389	0,01544
3	0,09	381	0,01560		0,09	384	0,01554
4	0,12	390	0,01542		0,12	393	0,01536
5	0,15	385	0,01552		0,15	382	0,01558
6	0,18	393	0,01536		0,18	390	0,01542

Математическое моделирование дает возможность визуально оценить формы изгибных колебаний лопаток. Результаты проведенного модального анализа представлены в табл. 5. На рис. 7 приведена форма и частота первой изгибной формы для исходной лопатки (УЗУ), на рис. 8 – соответственно для лопатки с покрытием (УЗУ+Cu).

По результатам модального анализа можно сделать вывод, что покрытие из наноструктурированной меди не меняет частоту собственных колебаний исходной лопатки. Результаты данного анализа согласуются с проведенными ранее исследованиями (табл. 1).

Рентгеноструктурные исследования проводили на образцах, покрытых наноструктурированной медью и серебром и для сравнения исходных лопаток после УЗУ. Образцы сняты в монохроматическом медном излучении с поверхностного слоя лопатки. На рис. 10 приведена дифрактограмма сплава ВТЗ-1 после окончательной обработки УЗУ. В структуре выявлены линии  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз. Линии имеют значительную ширину, что свидетельствует о наличии внутренних микронапряжений, вызванных пластической деформацией поверхностного слоя после обработки шариками в ультразвуковом поле.

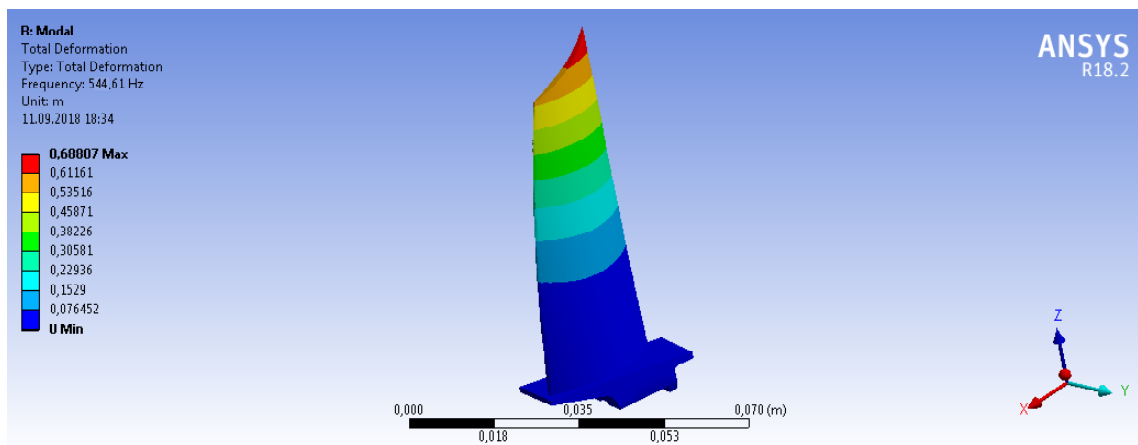


Рис. 7. Форма и частота первой изгибной формы для исходной лопатки (УЗУ)

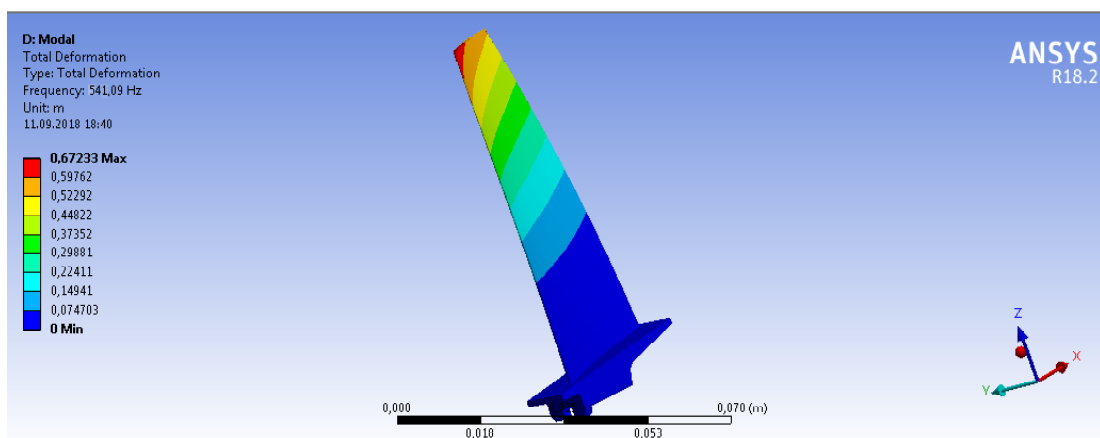


Рис. 8. Форма и частота первой изгибной формы для лопатки с покрытием (УЗУ+Cu)



**Таблица 5** – Расчетные значения частот собственных колебаний моделей исходной лопатки (УЗУ) и лопатки с покрытием (УЗУ+Cu)

Моды	Частота колебаний, Гц	
	Исходная лопатка (УЗУ)	Лопатка с покрытием (УЗУ+Cu)
1	544	541
2	1747	1730
3	2222	2210
4	4042	3968
5	4379	4315
6	5426	5389

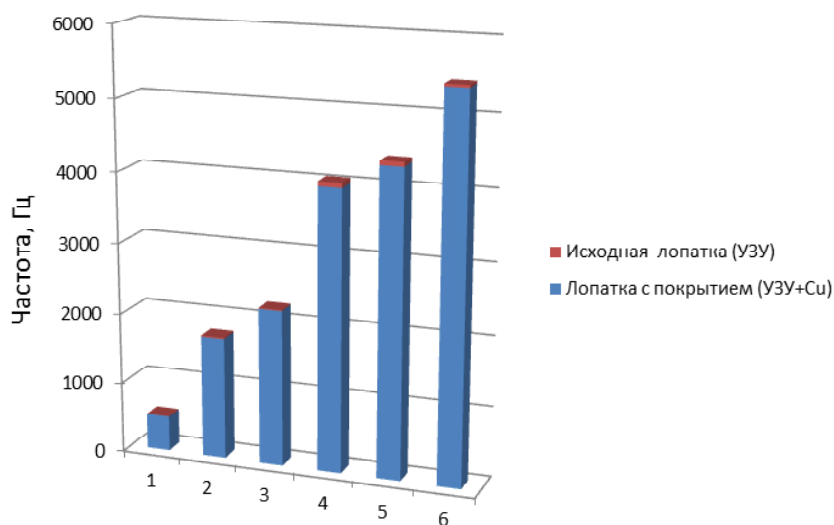
Дифрактограмма, снятая с поверхностного слоя лопатки с нанесенным покрытием меди, показана на рис. 11. Наличие дифракционных линий меди свидетельствует о кристаллической структуре покрытия для

используемой технологии нанесения на поверхность лопатки. Покрытие плотное, линии  $\alpha$  - фазы от поверхностного слоя титанового сплава лопатки под покрытием очень слабые по интенсивности, т. к. они практически поглощаются в покрытии меди.

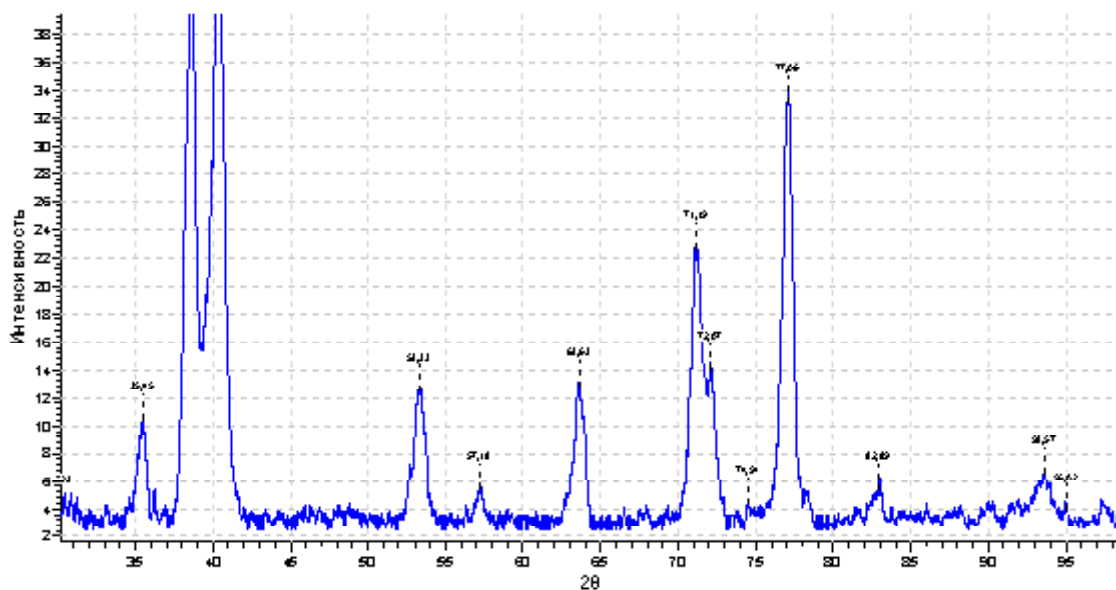
Особенностью структуры покрытий, полученных по использованной технологии на лопатках из титанового сплава ВТЗ-1, является образование текстуры в ориентации зерен в покрытии.

Для сравнения с лопаток был снят слой покрытия в виде порошка, для которого характерно хаотическое расположение кристаллографических направлений в зернах, т. е. практически бестектурный. Дифрактограмма для порошка меди показана на рис. 12.

На рис. 13 представлена дифрактограмма покрытия серебра на лопатке



**Рис. 9.** Частоты собственных колебаний исходной лопатки (УЗУ) и лопатки с покрытием (УЗУ+Cu) по результатам модального анализа



**Рис. 10.** Дифрактограмма поверхностного слоя лопатки после УЗУ

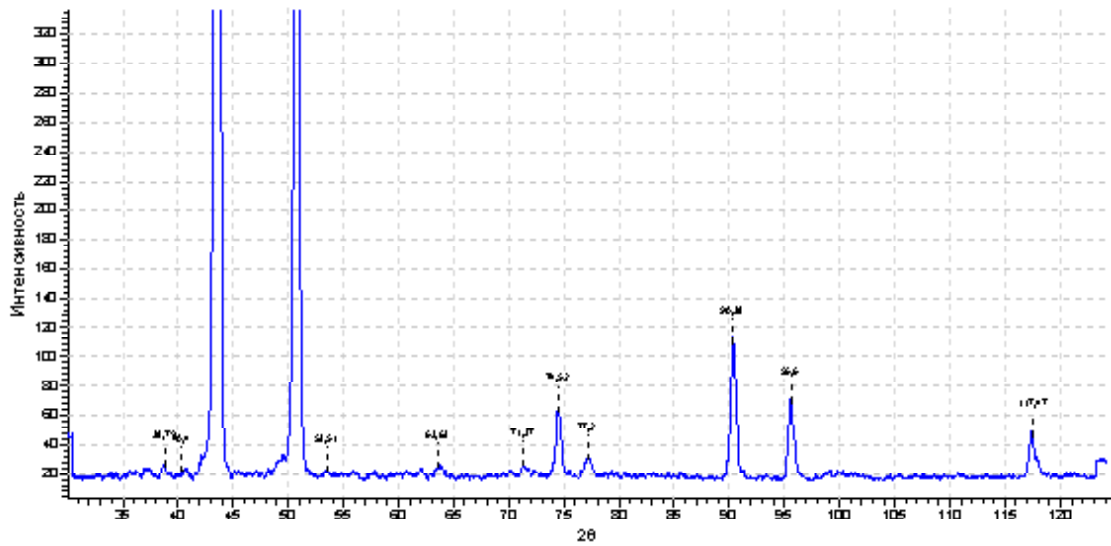


Рис. 11. Дифрактограма поверхнового слоя лопатки с покрытием меди

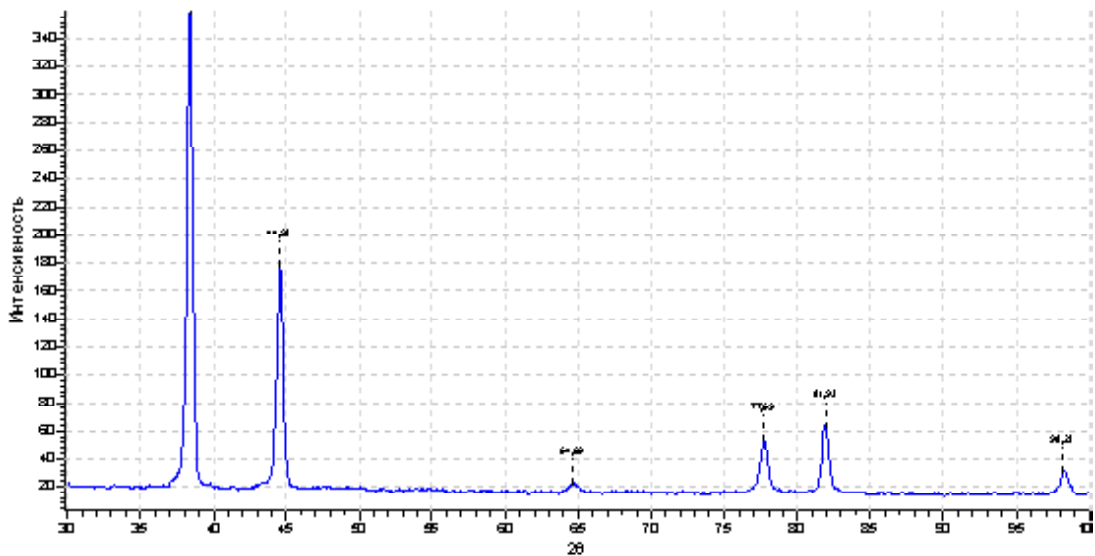


Рис. 12. Дифрактограма порошка меди

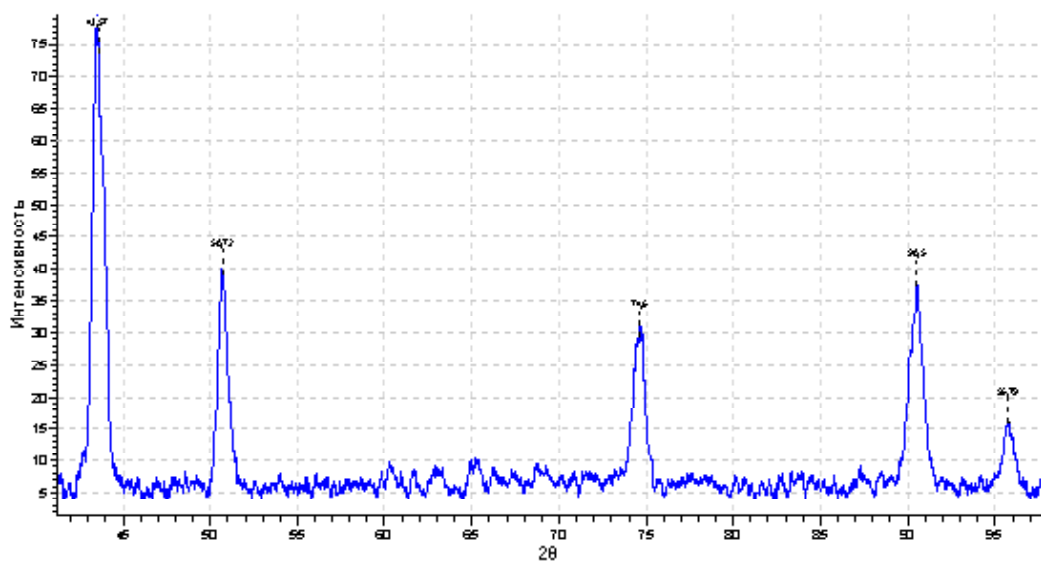


Рис. 13. Дифрактограма покриття срібра на лопатке



На всех дифрактограммах интенсивности первых трех линий (111, 200 и 220) существенно различаются на дифракционных картинах покрытия и для порошковых образцов. Количественные соотношения интенсивностей дифракционных линий, вычисленные после обработки дифрактограмм, сведены в таблице 6.

**Таблица 6** – Соотношение интенсивностей (I) для первых трех линий дифрактограмм

Материал	$I_{111}/I_{220}$	$I_{200}/I_{220}$
Покрытие меди на лопатке	12,5	8,1
Порошок меди	2,6	1,3
Покрытие серебра на лопатке	16,6	8,3
Порошок серебра	3,8	1,8

Существенное различие в интенсивности дифракционных линий, полученных от покрытий и порошков, свидетельствует о наличии преимущественной ориентировки в зернах покрытий, что позволило сделать следующие выводы. В покрытии большинство зерен относительно поверхности лопатки, в основном ориентировано кристаллографическими направлениями  $\langle 111 \rangle$  и, частично,  $\langle 100 \rangle$ . Аналогично, такой вывод следует сделать и относительно покрытия серебра (рис. 13 и таб. 6), что вполне понятно, так как оба металла имеют ГЦК решетку, а образование ориентацией обуславливается прежде всего технологией получения покрытия и типом решетки. Следует отметить, что образование такой кристаллографической структуры покрытия будет улучшать сцепление покрытия с лопаткой и повышать износостойкость, поскольку плоскости (111) в ГЦК решетке являются наиболее плотноупакованными.

Результаты исследования усталостной прочности лопаток с покрытием из наноструктурированной меди лучше, чем серебра. 50 % лопаток, покрытых медью, обработали полную базу испытаний ( $N = 100$  млн. циклов) без разрушения при напряжении 480 МПа, 40 % лопаток покрытых наноструктурированным серебром ((Ag+6 % Cd), «отстояли» 450 МПа без разрушения. Предел выносливости исходных лопаток, окончательно обработанных УЗУ 330 МПа, что говорит о положительном влиянии наноструктурированных покрытий на усталостную прочность.

### Выводы

На основе проведенных исследований диссипативных свойств и характеристик поверхностного слоя наноструктурированных покрытий из меди и серебра рабочих лопаток ГТД можно сделать следующие выводы:

- рабочие лопатки компрессора из титанового сплава после УЗУ с покрытием из меди и серебра обладают большей демфирующей способностью, чем исходные лопатки без покрытия; причем конденсаты из наноструктурированной меди приводят к большей диссипации энергии;

- результаты измерения шероховатости поверхности лопаток, покрытых наноструктурированной медью, показали, что покрытие не ухудшает качество поверхности и не приводит к увеличению параметров шероховатости;

- измерения микротвердости по сечению пера лопатки показали, что покрытие пера наноструктуриро-

ванной медью не приводит к изменению твердости подслоной области и сердцевины;

- рентгеноструктурные исследования показали, что наноструктурированные покрытия меди и серебра текстурованы и имеют ориентационное расположение плотноупакованных плоскостей (111) и, частично, плоскостей (100), параллельно поверхности лопатки, что должно обеспечивать хорошее сцепление покрытия с поверхностью лопатки;

- испытания на усталостную прочность показали, что покрытие пера лопаток из наноструктурированной меди и серебра не приводит к снижению выносливости лопаток;

- результаты модального анализа в ANSYS показали, что покрытие пера лопаток из наноструктурированной меди не изменяет частоту собственных колебаний лопатки.

Таким образом установлено, что покрытие пера лопаток наноструктурированной медью приводит к значительному повышению демфирующей способности лопаток и обеспечивает благоприятные характеристики поверхностного слоя, что позволяет рассматривать его в качестве возможной составляющей композиционных защитных покрытий лопаток ГТД.

### Список литературы

1. Матвеев В. В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. / В. В. Матвеев. – К. : Наук. думка, 1985. – 263 с.
2. Фавстов Ю. К. Металловедение высокодемпфирующих сплавов. / Ю. К. Фавстов, Ю. Н. Шульга, А. Г. Рахштадт. – М. : Металлургия, 1980. – 272 с.
3. Устинов А. И. Диссипативные свойства наноструктурированных материалов / А. И. Устинов // Пробл. прочности. – 2008. – № 5. – С. 97–103.
4. Мовчан Б. А. Исследование структуры и свойств толстых вакуумных конденсатов никеля, титана, вольфрама, окиси алюминия и двуокиси циркония / Б. А. Мовчан, А. В. Демчишин // Физика металлов и металловедение. – 1969. – 28, № 4. – С. 653–660.
5. Устинов А. И. Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий. Сообщение 1. Метод определения амплитудной зависимости истинного декремента колебания материала покрытия / А. И. Устинов, В. С. Скордзиевский, Н. С. Косенко // Пробл. прочности. – 2007. – № 6. – С. 134–143.
6. Устинов А. И. Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий. Сообщение 2. Конденсаты меди с различными характеристиками микроструктуры / А. И. Устинов, В. С. Скордзиевский, Н. С. Косенко // Пробл. прочности. – 2008. – № 2. – С. 149–159.
7. Демпфирующая способность покрытий Co-Ni и Co-Fe, полученных методом электронно-лучевого осаждения / А. И. Устинов, Б. А. Мовчан, Ф. Лемке, В. С. Скордзиевский // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 4. – С. 123–126.
8. О возможностях наноструктурированных покрытий для снижения динамической напряженности конструктивных элементов машин / А. И. Устинов, А. П. Зиньковский, И. Г. Токарь, В. С. Скордзиевский // Автоматическая сварка. – 2010. – № 1. – С. 15–21.
9. Зиньковский А. П. Демпфирующая способность конструктивных элементов с наноструктурными покрытиями

- ми / А. П. Зиньковский, И. Г. Токарь // Вестник двигателестроения. – 2009. – №2. – С. 37–41.
10. Влияние температуры подложки на микро- и субструктуру вакуумных конденсатов меди / А. И. Устинов, Е. В. Фесюн, Т. В. Мельниченко, С. М. Романенко // Сов. электротехнология. – 2007. – № 4. – С. 19–26.
  11. ОСТ 100870-77 Лопатки газотурбинного двигателя (ГТД). Методы испытания на усталость. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 34 с.
  12. ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 33 с.
  13. ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 25 с.

Одержано 03.09.2018

**Пуخالська Г.В., Підгорський К.Н., Гліксон І.Л., Степанова Л.П., Щербина М.А. Дослідження дисипативних властивостей та характеристик поверхневого шару наноструктурованих покриттів пера лопаток**

**Мета роботи.** Дослідити характеристики поверхневого шару та дисипативні властивості наноструктурованих покриттів лопаток ГТД.

**Методи дослідження.** Дослідження проводили на лопатках з титанового сплаву VT3-1 з нанесеними покриттями наноструктурованої міді і срібла після ультразвукового зміцнення поверхні кульками. Покриття отримували методом електронно-променевого випаровування й конденсації матеріалу покриття у вакуумі [3]. Випробування дисипативних властивостей проводили на віброелектродинамічному стенді ВЕДС-400 згідно з [11]. Рентгеноструктурні дослідження проводилися на дифрактометрі ДРОН-3 в мідному монохроматичному випромінюванні з фільтрацією дифракційних променів і комп'ютерним обробленням даних.

**Отримані результати.** Наведено результати досліджень дисипативних властивостей наноструктурованих покриттів з міді та срібла на робочі поверхні лопаток. Показано, що лопатки мають більшу демпфувальну здатність, ніж вихідні без покриття; причому конденсати з наноструктурованої міді приводять до більшої дисипації енергії. Результати вимірювання шорсткості й микротвердості свідчать про те, що покриття не погіршує якість поверхні і не призводить до зміни твердості підшарової області і серцевини. Встановлено, що покриття пера лопаток з наноструктурованої міді і срібла не приводить до зниження витривалості лопаток і не змінює частоту власних коливань лопатки.

**Наукова новизна.** Встановлено, що наноструктуровані покриття міді і срібла текстуровані і мають орієнтаційне розташування щільноупакованих площин (111) та частково площин (100), паралельно поверхні лопатки, що має забезпечувати гарне зчеплення покриття з поверхнею лопатки.

**Практична цінність.** Встановлено, що нанесення покриття з наноструктурованої міді на перо лопатки приводить до значного підвищення демпфувальної здатності лопаток і забезпечує сприятливі характеристики поверхневого шару, що дозволяє розглядати його як можливу складову композитних захисних покриттів лопаток ГТД.

**Ключові слова:** наноструктуровані покриття, дисипативні властивості, шорсткість, лопатка, микротвердість, текстура.

**Puhalskaya G., Podgorsky K., Glikson I., Stepanova L., Shcherbyna M. Research of dissipative properties and characteristics of the surface layer of nanostructured coatings of the blade feather**

**Purpose.** Investigate the characteristics of the surface layer and dissipative properties of nanostructured coatings of GTE blade.

**Methods of research.** Studies were performed on blades of titanium alloy VT3-1 coated with nanostructured copper and silver after ultrasonic hardening with balls. Coatings were obtained by electron beam evaporation and condensation of the coating material in vacuum [3]. Tests for the study of dissipative properties were carried out on a VEDS-400 vibroelectrodynamics test bench according to [11]. X-ray diffraction studies were carried out on a DRON-3 diffractometer in monochromatic copper radiation with filtration of diffraction reflections and computer data processing.

**Results.** The results of studies of the dissipative properties of nanostructured coatings of copper and silver on the working surfaces of blades are presented. It is shown that these blades have a greater damping ability than the original without coating; moreover, condensates of nanostructured copper lead to greater energy dissipation. The results of measuring the roughness and microhardness indicate that the coating does not impair the quality of the surface and does not lead to a change in the hardness of the sublayer region and core. It has been established that the coating of blades feather made of nanostructured copper and silver does not lead to a decrease in the endurance of the shoulder-blades and does not change the frequency of natural oscillations of the blades.

**Scientific novelty.** It has been established that nanostructured copper and silver coatings are textured and have an orientation arrangement of close-packed (111) planes and, partially, (100) planes, parallel to the shoulder-blade surface, which should ensure good adhesion of the coating to blade surface.

**Practical value.** It has been established that the coating of feather blades with nanostructured copper leads to a significant increase in the damping capacity of the blades and provides favorable characteristics of the surface layer, which makes it possible to consider it as a possible component of composite protective coatings for GTE blades.

**Key words:** nanostructured coatings, dissipation properties, roughness, blade, microhardness, texture.