диалогических форм учебной работы, имитационно-игрового подхода в преподавании физики. Только в этом случае у студентов в процессе изучения физики будут формироваться знания и умения, приемы и способы деятельности, которые они будут использовать в своей будущей профессиональной деятельности. Только в этом случае они смогут проводить анализ роли факторов и условий, влияющих на протекание исследуемого явления, мысленное моделирование и мысленный эксперимент, сравнение и обобщение и многое другое.

1. Бирюкова А. Н. (Кобзарь А. Н.) Подготовка к решению профессиональных задач студентов медицинских вузов при обучении физике с учётом междисциплинарной интеграции: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.02. М., 2013. 277 с.
2. Бирюкова А. Н. (Кобзарь А. Н.) Физика в медицинском вузе / под ред. С. И. Десненко. Чита: ЧГМА, 2012. 83 с.
3. Вербицкий А. А., Ларионова О. Г. Личностный и компетентностный подходы в образовании: проблемы и интеграция. М.: Логос, 2010. 336 с.
4. Десненко С. И., Бирюкова А. Н. (Кобзарь А. Н.) Формирование у студентов-медиков умений решать задачи профессиональной деятельности как основа реализации профессионально ориентированного обучения физике в медицинском вузе // Ученые записки Забайкальского государственного гуманитарно-педагогического университета. 2012. № 6. С. 129–136.
5. Коржув А. В., Шевченко Е. В. Медицинская физика: общенаучный и гуманитарный контекст. М.: Янус-К, 2000. 120 с.

**Юров В.М., Шельпяков Б.Н., Гученко С.А., Твардовский А.Н.
Нанесение высокоэнтропийных покрытий на турбинные лопатки**

*Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова
(Казахстан, Караганда)*

doi: 10.18411/lj-03-2020-10

idsp: ljjournal-03-2020-10

Аннотация

Нанесение защитных покрытий на рабочие поверхности лопаток турбин – наиболее эффективный способ повышения их качества и долговечности. В настоящей работе в качестве защитного покрытия использовано высокоэнтропийное покрытие. Высокоэнтропийный состав был изготовлен методом механического легирования в эквимольном соотношении. Полученное из магнетронной мишени покрытие на турбинные лопатки отличалось в три раза большей прочностью и в 20! раз меньшим коэффициентом трения. Это резко снижало износостойкость турбинных лопаток.

Ключевые слова: защитное покрытие, турбинная лопатка, высокоэнтропийный состав, магнетрон.

Abstract

The application of protective coatings on the working surfaces of turbine blades is the most effective way to increase their quality and durability. In this work, a high-entropy coating was used as a protective coating. High entropy composition was made by mechanical alloying in an equimolar ratio. The coating on the turbine blades obtained from the magnetron target was three times more durable and 20! times lower coefficient of friction. This sharply reduced the wear resistance of the turbine blades.

Keywords: protective coating, turbine blade, highly entropic composition, magnetron.

Введение. Высокая степень износа основного оборудования в энергетической отрасли ставит перед энергетиками задачу повышения срока его эксплуатации. Особенно значимой является проблема увеличения срока службы деталей контактирующих с паром – рабочие лопатки турбин. Нанесение защитных покрытий на

рабочие поверхности лопаток турбин – наиболее эффективный способ повышения их качества и долговечности.

Нанесению защитных покрытий на турбинные лопатки посвящено большое количество статей, монографий, диссертаций. Отметим лишь некоторые работы последних лет [1-6].

Проведенный в работе [7] сравнительный анализ различных технологических процессов упрочнения лопаток показал, что использование в качестве внешнего износостойкого слоя вакуумно-плазменных покрытий имеют преимущества, как с точки зрения минимального изменения размеров изделия, так и времени осаждения элементов покрытия.

В настоящей работе на турбинные лопатки впервые применялись высокоэнтропийные покрытия.

Приготовление мишени CrNiTiZrCu для нанесения покрытий. Для приготовления мишени CrNiTiZrCu брались микропорошки металлов и смешивались в эквиатомных пропорциях. Затем приготовленная смесь порошков помещалась в мелющий стакан планетарной шаровой мельницы изготовленный из карбида вольфрама и добавлялись мелющие тела (шары диаметром 5-10 мм) также изготовленные из карбида вольфрама, масса которых была равна 10-ти массам смеси порошков (рис. 1 а). После стакан наполняли бензином «Галоша», плотно закрывали крышку и включали планетарную шаровую мельницу (скорость вращения равна 500 об/мин., время работы 5 ч.). Полученный гомогенизированный состав затем сушился в вакууме и при помощи прессформы пресовался в плоский диск диаметром 100 мм и толщиной в 5 мм. Далее диск помещался в вакуумную термо печь и спекался в ней в течение 3 часов. Таким образом, изготовленная мишень CrNiTiZrCu (рис. 1 б) использовалась для дальнейшего магнетронного нанесения покрытий на установке ННВ 6.

а)

б)

Микропорошки металлов смешивались и помещались в мелющий стакан планетарной шаровой мельницы (а), состав затем сушился в вакууме и при помощи пресс-формы пресовался в плоский диск диаметром 100 мм и толщиной в 5 мм (б)

Рисунок 1 - Микропорошки металлов

Нанесение покрытий производилось на подготовленные лопатки турбины. Вакуумная камера откачивалась до давления 0,003 Па затем включался ПИНК производился напуск Ar до давления 1 Па на подложку подавался отрицательный потенциал смещения 1000 В и в течении 10 мин. производилась очистка и нагрев поверхности подложки. После давление аргона понижали до 0,1 Па и включался магнетрон. Смещение на подложке уменьшалось до 150 В, ток магнетрона был постоянным 3 А. Подложка располагалась в камере на расстоянии 15 см, время напыления составляло 1 час.

Эксперимент. Рисунок 2 и 3 показывают химический состав покрытий CrNiTiZrCu, ат. % в эквиатомных пропорциях на турбинные лопатки (табл. 3).

Рисунок 2 - РФЭС CrNiTiZrCu в аргоне в 2 точках

Таблица 1

Количественный химический состав покрытия CrNiTiZrCu, ат. %

Элемент	Cr	Ni	Ti	Zr	Cu
Номинальный	20	20	20	20	20
в аргоне	23,2	21,2	19,9	17,1	6,8

Рисунок 3 – Микроструктура покрытия CrNiTiZrCu на турбинные лопатки при разрешении 20 μm

Результаты измерений микротвердости покрытий даны в табл. 2.

Таблица 2

Микротвердость покрытия CrNiTiZrCu

Микротвердость	1	2	3	4	5	6	7	8	Среднее
HV	839	909	964	842	967	853	921	902	906

В современной экспериментальной трибологии широко используются методологии кинетического контактного взаимодействия штырем или шариком с плоскостью. В частности, методические особенности и требования испытаний на износостойкость типа «штырь на диске» и «шар на плоскости» изложены в международных стандартах. Однако данная методология не является эффективной для исследования износостойкости покрытий и подложки и определения толщины тонких покрытий. Для решения этих задач применяют эффективный метод испытаний на микроабразивный износ путем воздействия вращающегося стального шарика на плоский образец с добавлением эмульсии, содержащей абразивные частицы (рис. 4). В месте контакта образуется кратер сферической формы – калотта, поэтому прибор для обеспечения такого вида испытаний получил название калоттестер. Результаты исследований покрытий CrNiTiZrCu показаны в табл. 3.

Рисунок 4 – Разработанный нами прибор для испытаний материалов и покрытий на микроабразивный износ

Таблица 3

Износостойкость покрытий CrNiTiZrCu на турбинных лопатках

Износ образца (масса в граммах) по 30 мин						
До	15,14852	15,14857	15,14859	15,14856	Среднее	15,148566
После	15,14745	15,14763	15,14759	15,14759	Разность	0,000986

Табл. 3 показывает износостойкость покрытия CrNiTiZrCu $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ г/мин, что отвечает износостойким покрытиям.

Коэффициенты трения измерялась на разработанной нами установке (табл. 4). Основной принцип работы установки для определения коэффициентов трения покоя и скольжения заключается в измерении силы трения покоя и скольжения небольшого исследуемого образца материала, при перемещении его по поверхности подложки из другого материала с известным коэффициентом трения.

Таблица 4

Коэффициенты трения покрытий CrNiTiZrCu по меди и алюминию

Покрытие	по меди		по алюминию	
	коэффициент трения	погрешность	коэффициент трения	погрешность
CrNiTiZrCu	0,041	0,006	0,066	0,002

Обсуждение результатов эксперимента. Изготовленные турбинные лопатки с высокоэнтропийным покрытием изображены на рис. 5.

Рисунок 5 - Турбинные лопатки с высокоэнтропийным покрытием

Беря в функции отклика Φ в нашей работе [8] коэффициент сухого трения и линеаризуя ее, получим следующую формулу:

$$k_{\delta\delta} = \tilde{N} \cdot \dot{O} \cdot \frac{A}{\Delta G^0} \cdot \bar{N}, \quad (*)$$

где A – работа (энергия) разрушения, T – температура, ΔG^0 – энергия Гиббса, $\bar{N}$ – среднее число элементарных носителей разрушения, C – постоянная.

Таким образом, нами получено уравнение, которое показывает нелинейную зависимость коэффициента трения от энергии Гиббса G^0 , от температуры T , от концентрации числа электронов $\bar{N}$ и которое позволяет прогнозировать формирование высокоэнтропийных сплавов. Сравнение свойств турбинных лопаток без покрытия и с покрытием приведено в табл. 5.

Таблица 5
Сравнение турбинных лопаток до и после высокоэнтропийного покрытия CrNiTiZrCu

Параметр	Турбинные лопатки без покрытия	Турбинные лопатки с покрытием CrNiTiZrCu
Микротвердость, HV	261,3	906
Износостойкость, г/мин	$0,4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент трения	0,76	0,04

Из таблицы 5 видно, что с покрытием:

- микротвердость увеличивается порядка в 1,6 раза;
- износостойкость увеличивается в 7,5 раз;
- коэффициент трения уменьшается почти в 20 раз!

Формула (*) показывает, что работа разрушения турбинных лопаток очень сильно (пропорционально) зависит от коэффициента трения покрытия. Износ стали 20X13, используемой на ТЭЦ-3 происходит за 500-550 часов непрерывной работы. То есть, после высокоэнтропийного покрытия CrNiTiZrCu ресурс турбинных лопаток увеличивается почти в 3 раза, что экономически очень существенно [9, 10].

Заключение.

В настоящее время в условиях ограниченности материальных средств в промышленном комплексе особое значение приобретают технологии, увеличивающие долговечность (ресурс) деталей и узлов машин. 90 % деталей и машин выходит из строя из-за поверхностного износа. Особенно это актуально для энергетического комплекса, где большинство механизмов работают в экстремальных условиях и, в частности, в условиях высокого абразивного износа. Так обстоит дело и турбинными лопатками.

Разработанная в настоящей работе магнетронная высокоэнтропийная мишень дала очень хорошие результаты. Ресурс турбинных лопаток увеличен почти в 3 раза. Одна турбинная лопатка длиной 300 мм (как показано на рис. 5) стоит около 450 \$. Экономический эффект очевиден.

Благодарность

Работа выполнена по программе Министерства образования и науки Республики Казахстан. Гранты №0118PK000063 и №Ф.0781.

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. - М.: «МИСИС». – 2006. - 632 с.
2. Лагерева А.В. Эрозия паровых турбин: вероятностный подход. Т.3. Предотвращение эрозии паровых турбин. – М.: «Машиностроение – 1», 2006. – 255 с.
3. Мубояджян С.А., Лесников В.П., Кузнецов В.П. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. - Екатеринбург: Квист. - 2008. - 208 с.

4. Голубенцев А.В. Повышение усталостных характеристик рабочих лопаток ГТУ на основе совершенствования технологии литья и термической обработки. - Дисс. канд. техн. наук. - Рыбинск, 2016. - 178 с.
 5. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. – Рыбинск: Издательский дом «Газотурбинные технологии». – 2017. – 854 с.
 6. Настика В.В. Повышение эксплуатационных свойств литых лопаток из жаропрочных никелевых сплавов за счет наноструктурирования поверхности. – Дисс. канд. тех. наук, Уфа, 2019. – 118 с.
 7. Соболев О.В., Дмитрик В.В., Погребной Н.А., Пинчук Н.В., Мейлехов А.А. Апробация структурного подхода для оптимизации режимов получения покрытий, повышающих износостойкость лопаток турбин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2015, №2/5(74). – С. 52-59.
 8. Юров В.М. Некоторые вопросы физики поверхности твердых тел // Вестник КарГУ. Физика. 2009. № 1(53). - С.45-54.
 9. Юров В.М., Гученко С.А. Антифрикционные свойства высокоэнтропийного покрытия TiNiZrCuCr // Современные наукоемкие технологии, 2019. - № 10. - С. 97-101.
 10. Yurov V.M., Guchenko S.A. High entropy alloy properties CrNiTiZrCu // Scientific Light (Wroclaw, Poland), 2019. - V. 1. - No 28. - P. 20-26.
-