Таблица 6

Количество монослоев R в слое d(I) лантаноидов

Me	R	Me	R	Me	R
Ce	7	Eu	13	Er	$a/c=15/10$
Pr	$a/c=11/4$	Gd	$a/c=15/9$	Tm	$a/c=15/9$
Nd	$a/c=12/4$	Tb	$a/c=15/9$	Yb	8
Pm	$a/c=12/4$	Dy	$a/c=15/9$	Lu	$a/c=16/10$
Sm	$a/c=12/1$	Ho	$a/c=15/10$	-	-

Особенно проявляются отличия в количестве монослоев R в слое d(I) лантаноидов (табл. 6).

Нужно отметить, что ВЭСы в составе лантаноидов не наблюдались. Это связано, видимо, с большими параметрами кристаллической решетки лантаноидов.

Если за основу брать размерную зависимость какого-либо свойства (длина свободного пробега электрона, фонона, магнона и т.п.), то будем иметь множество размерных эффектов. Однако все эти эффекты разыгрываются в области размеров d(I) или d(II), которые определяются одним параметром – атомным объемом вещества v , который играет фундаментальную роль и периодически изменяется в соответствии с периодическим законом Д.И. Менделеева.

Благодарность

Работа выполнена по программе Министерства образования и науки Республики Казахстан. Гранты №0118РК000063 и №Ф.0781.

1. Yeh J.W., Chen Y.L., Lin S.J. High-entropy alloys – a new era of exploitation // Materials Science Forum. 2007. Vol. 560. – P. 1-9.
2. Шайсултанов Д.Г. Структура и механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeNiX (X=Mn, V, Mn и V, Al и Cu). - Дисс. канд. тех. наук, Белгород, 2015. – 142 с.
3. Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Фирстов С.А. Высокоэнтропийные сплавы - электронная концентрация - фазовый состав - параметр решетки – свойства // ФММ, 2017. Vol. 118. №10. – С. 1017-1029.
4. Юров В.М., Гученко С.А., Лауринас В.Ч. Толщина поверхностного слоя, поверхностная энергия и атомный объем элемента // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2018. □ Вып. 10. – С. 691-699.
5. Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А. Некоторые вопросы физики прочности металлических наноструктур // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2013. Вып. 5. - С. 408-412.

Юров В.М., Гученко С.А.

Коэффициенты трения высокоэнтропийных сплавов CrNiTiZrCu

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

doi: 10.18411/lj-06-2019-160

idsp: ljjournal-06-2019-160

Аннотация

Показано, что уменьшение коэффициента сухого трения возможно за счет уменьшения поверхностной энергии. При этом используются пары трения, у которых значительно различается работа выхода электронов. Это приводит к различию в контактной разности потенциалов и, соответственно, к уменьшению поверхностной энергии. Показано, что коэффициент трения зависит от фрактальной структуры поверхности многих твердых тел и это является их характерным свойством.

Ключевые слова: трение, износ, поверхность, энтропия, фрактал.

Abstract

It is shown that a decrease in the dry friction coefficient is possible due to a decrease in surface energy. In this case, friction pairs are used, in which the electron work function varies considerably. This leads to a difference in the contact potential difference and, accordingly, to a decrease in the surface energy. It is shown that the friction coefficient depends on the fractal structure of the surface of many solids and this is their characteristic property.

Keywords: friction, wear, surface, entropy, fractal.

Истоки трибологии - науки о трении, износе и смазке машин - уходят в глубины человеческой истории [1,2]. Первый период истории включает накопление человечеством трибологических знаний с доисторических времен до конца XVI века. В XVII-XVIII веках происходит зарождение науки о трении, впоследствии получившей название «трибология». В XIX веке прогресс техники (прежде всего - развитие железных дорог) выдвигает на первый план проблемы трибологического характера. Словом, до начала XX века трибология прошла длительный и славный путь, успешно решая задачи, выдвигаемые практикой, и едва ли прогресс техники надолго задерживался из-за невозможности решения трибологических проблем [1-3].

Начало XXI века актуально особенно для узлов трения, функционирующих в экстремальных условиях (аэрокосмическая, атомно-энергетическая, скоростной транспорт, техника для освоения Океана, глубоких недр Земли и др.) [4]. Актуальная задача заключается в обобщении экспериментальных данных, прогнозировании надежности и ресурса в широком диапазоне изменений напряжений, температур, окружающих сред, воздействия полей различной физической природы (акустических, электромагнитных, радиационных и др.) [5].

Начало XXI века положило всеобъемлющему исследованию трибологическим свойствам наноструктур и наноматериалов. Использование нанопокровов позволяет значительно снизить коэффициент трения при сохранении износостойкости, повысить вязкость покрытий при сохранении антикоррозионных свойств и увеличения температуры эксплуатации на 50 °С. Все это особо актуально в области машиностроения. Для создания нанопокровов используются наноструктурированные материалы, суспензии. В покрытия внедряются специальные добавки, которые модифицируют их структуру и обеспечивают получение необходимых свойств.

Сравнительно недавно появились новые объекты исследования – высокоэнтروпийные сплавы [6]. Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) - сплавы, которые содержат не менее 5 элементов, причём количество каждого из них не должно превышать 35 ат.% и не должно быть меньше 5 ат.%. Для таких сплавов характерны повышенные, по сравнению с традиционными многокомпонентными сплавами, значения энтропии смешения S_{mix} .

В настоящей работе исследуются ВЭСы CrNiTiZrCu.

Напыление CrNiTiZrCu производилось на неподвижный образец в течении часа с опорным напряжением 150 и 250 вольт в течении часа в режиме постоянной мощности 1.5 кВт. Образец №25 в среде азота и образец №39 в среде аргона. Электронно-микроскопическое исследование было проведено на растровом электронном микроскопе MIRA 3 фирмы TESCAN. Исследования проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и рабочем расстоянии около 15 мм. Для каждого образца было сделано по 4 снимка с 4 точек поверхности при разных увеличениях: 245 крат, 1060 крат, 4500 крат и 14600 крат.

Рисунок 1 – РФЭС покрытия CrNiTiZrCu в среде аргона

Рисунок 2 – РФЭС покрытия CrNiTiZrCu в среде азота

Результаты рис. 1 и 2 показывают формирование ВЭСов, к которым относятся многокомпонентные сплавы CrNiTiZrCu. Коэффициенты трения измерялись на разработанной нами установке [7]. Коэффициенты трения табл. 1 сравнивались с табл. 2 и 3.

Таблица 1

Коэффициенты трения по меди и алюминию

покрытие	по меди		по алюминию	
	коэффициент трения	погрешность	коэффициент трения	погрешность
CrNiTiZrCu аргон	0,041	0,006	0,066	0,002
CrNiTiZrCu азот	0,057	0,001	0,077	0,004

Таблица 2

Коэффициенты трения для одноименных пар материалов [8]

Комбинации материалов		Коэффициент сухого трения
Алюминий	Алюминий	(1,05-1,35)
Медь	Медь	1,0
Сталь	Сталь	0,8
Железо	Железо	1,0
Кадмий	Кадмий	0,5
Хром	Хром	0,41
Магний	Магний	0,6
Никель	Никель	(0,7-1,1)
Платина	Платина	1,2
Серебро	Серебро	1,4
Цинк	Цинк	0,6

Таблица 3

Коэффициенты трения многоэлементных покрытий Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al [9]

Наименование образцов	Коэффициент трения	
	Алюминиевая пластина	Медная пластина
Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al	0,219	0,256
Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al+i аргон	0,365	0,426
Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al+Ti азот	0,273	0,269

Высокоэнтропийные покрытия CrNiTiZrCu оказываются антифрикционными, что со всей очевидностью приводит к экономии энергоресурсов.

Практическое использование знаний о фрактальной структуре поверхности твердого тела пока еще детально не исследовано и пока еще неизвестно в каких явлениях оно окажется решающим. Рассмотрим известное явление холодной эмиссии электронов из металла под действием внешнего электрического поля, обусловленной, в основном, квантовым туннельным эффектом. Как известно, ток холодной эмиссии описывается выражением:

$$j = j_0 \exp(E_0 / E) \quad (1)$$

где E – напряженность внешнего поля, E_0 – электрическое поле поверхности металла:

$$E_0 = \frac{4\sqrt{2m}}{3e\hbar} (A - T_e)^{3/2} \quad (2)$$

где A – работа выхода электрона, T_e – его кинетическая энергия.

Выше для зависимости электрической проводимости пленки от ее толщины h мы получили следующее выражение [10]:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{d}{h}\right), \quad (3)$$

где d – некоторый критический размер пленки, начиная с которого объемные свойства «исчезают». После преобразований, получим:

$$j = \sigma E, \quad j_0 = \sigma_0 E_0,$$

$$\sigma E = \sigma_0 E_0 \exp(E / E_0),$$

$$\sigma_0 \left(1 - \frac{d}{h}\right) E = \sigma_0 E_0 \exp(E_0 / E), \quad (4)$$

$$E = E_0 \exp(E_0 / E) \left(1 - \frac{d}{h}\right) \approx E_0 \left(1 - \frac{E_0}{E}\right) \left(1 - \frac{d}{h}\right).$$

Обозначая $E_0/E = z$, $1 - d/h = k$, где z – комплексные числа, а k – действительное, мы получаем знаменитое итерационное уравнение Мандельброта:

$$z = z^2 + k. \quad (5)$$

Алгоритм решения достаточно прост. Итерации выполняются для каждой стартовой точки с прямоугольной или квадратной области – подмножестве комплексной плоскости. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока z не выйдет за пределы окружности радиуса 2, центр которой лежит в точке (0,0), (это означает, что аттрактор динамической системы находится в бесконечности), или после достаточно большого числа итераций (например, 200-500) z сойдется к какой-нибудь точке окружности. В зависимости от количества итераций, в течение которых z оставалась внутри окружности, можно установить цвет точки C (если z остается внутри окружности в течение достаточно большого количества итераций, итерационный процесс прекращается и эта точка раstra окрашивается в черный цвет).

Для нас важно следующее: приведенный пример показывает фрактальную структуру поверхности металла. Аналогичные закономерности проявляются и при

термоэмиссии, экзоэмиссии электронов из металлов и полупроводников. Все это указывает, что фрактальная структура поверхности многих твердых тел является характерным их свойством.

Работа выполнена по программе Министерства образования и науки Республики Казахстан. Гранты №0118РК000063 и №Ф.0781.

1. Современная трибология: Итоги и перспективы. / под. ред. В.К. Фролова. – М.: Издательство ЛКИ. 2008. – 480 с.
2. Bhushan B. Introduction to Tribology. - John Wiley & Sons. Ltd. 2013. – 711 p.
3. Stachowiak G., Batchelor A. Engineering Tribology. - Butterworth-Heinemann. 2014. – 884 p.
4. Мусалимов В.М., Сизова А.А., Иванов Е.К., Крылов Н.А., Ткачёв А.Л. Основы трибоники. - С-Пб: СПбГУ ИТМО. 2009. - 77 с.
5. Овчаренко В.Е., Иванов Ю.Ф. Трибологические свойства наноструктурированной поверхности металлокерамического сплава на основе карбида титана. // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. № 2. – С. 114-118.
6. Yeh J.W., Chen Y.L., Lin S.J. High-entropy alloys – a new era of exploitation // Materials Science Forum. 2007. Vol. 560. – P. 1-9.
7. Юров В.М., Гученко С.А., Ибраев Н.Х. Определение коэффициента трения скольжения. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. №8. – С. 148-152.
8. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. - М.: Машгиз, 1962. – 220 с.
9. Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А., Завацкая О.Н. Поверхностное натяжение упрочняющих покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия, 2014. - № 1. - С. 33-36.
10. Юров В.М., Гученко С.А., Лауринас В.Ч. Толщина поверхностного слоя, поверхностная энергия и атомный объем элемента // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2018. □ Вып. 10. – С. 691-699.