

---

# Трение высокоэнтропийных сплавов и толщина их поверхностного слоя

**Юров Виктор Михайлович**  
кандидат физ.-мат. наук, доцент

**Гученко Сергей Алексеевич**  
докторант PhD  
Карагандинский государственный университет имени Е.А. Букетова,  
Казахстан, Караганда  
E-mail: [exciton@list.ru](mailto:exciton@list.ru)

**Аннотация.** Экспериментально сформированы высокоэнтропийные сплавы методов механического легирования. Для них измерены коэффициенты трения. Получено уравнение, по которому можно вычислять толщину поверхностного слоя сплава и определять поверхностное натяжение, связанное с коэффициентом трения.

**Ключевые слова:** коэффициент трения, поверхностный слой, высокоэнтропийный сплав, эквипроцентные пропорции.

## Введение

Сравнительно недавно появились новые объекты исследования — высокоэнтропийные сплавы [1]. 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.%.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭСы) выделены в особую группу, так как процессы структуро- и фазообразования в них, а также диффузионная подвижность атомов, механизм формирования механических свойств и термическая стабильность существенно отличаются от аналогичных процессов в традиционных сплавах [2, 3].

В настоящей работе мы рассмотрим вопрос — как связан коэффициент трения с толщиной поверхностного слоя, который формируется в процессе синтеза ВЭСов.

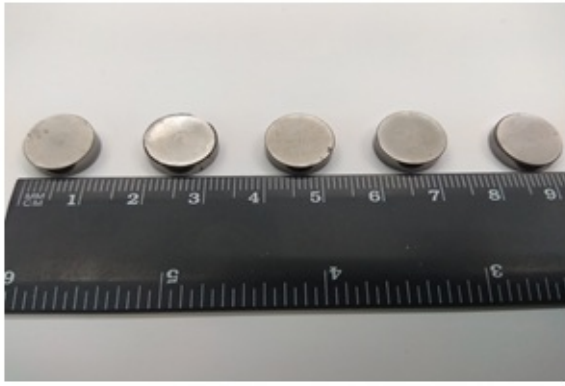
## Методика эксперимента.

Для синтеза использовались микропорошки из представленных ниже составов:

1. Fe-Co-Cr-Ni-Ta-Ti-Zr;
2. Fe-Co-Cr-Ni-Ta-Ti-Mo;
3. Fe-Co-Cr-Ni-Ta-Ti-W;
4. Fe-Co-Cr-Ni-Ta-Ti-Al;
5. Fe-Co-Cr-Ni-Ta-Ti-Cu.

Для приготовления таблеток брались микропорошки соответствующих металлов и смешивались в эквипроцентных пропорциях. Затем приготовленная смесь порошков помещалась в мелющий стакан планетарной шаровой мельницы изготовленный из карбида вольфрама и добавлялись мелющие тела (шары диаметром 5-10мм) также изготовленные из карбида вольфрама, масса которых была равна 10-ти массам смеси порошков. После стакан наполняли бензином «Галоша», закрывали крышку и включали планетарную шаровую мельницу (скорость вращения составляла 500 об/мин., время работы 5 ч.).

Полученные таким образом гомогенизированные составы затем сушились в вакууме и при помощи пресс-формы (давление 20 т) прессовались в плоские диски диаметром 12 мм и толщиной в 3 мм (рис. 1).



**Рис. 1** — Синтезированные диски ВЭСов

Исследование фазового состава и структурных параметров образцов проводилось на дифрактометре XRD-6000 на  $\text{CuK}\alpha$ -излучении. В результате были обнаружены две фазы: ОЦК+ГЦК. Экспериментальная установка для определения коэффициентов трения описана нами в работе [4].

Для определения толщины поверхностного слоя различных соединений нами использовалась размерная зависимость некоторого физического свойства  $A^{\text{®}}$ :

$$\begin{aligned} A(r) &= A_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{r}\right), & r \gg d \\ A(r) &= A_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{d+r}\right), & r \leq d \end{aligned} \quad (1)$$

Параметр  $d$  связан с поверхностным натяжением  $\sigma$  формулой:

$$d = \frac{2\sigma v}{RT}, \quad (2)$$

Здесь  $\sigma$ —поверхностное натяжение массивного образца;  $v$ —объем одного моля;  $R$ —газовая постоянная;  $T$ —температура. В работе [5], а также [6], было показано, что с большой точностью выполняется соотношение:

$$\sigma = 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot T_m, \quad (3)$$

где  $T_m$  — температура плавления твердого тела (К). Соотношение выполняется для всех металлов и для других кристаллических соединений. Если его подставить в (2), то при  $T = T_m$  получим:

$$d = 0.17 \cdot 10^{-5} v. \quad (4)$$

Уравнение (4) показывает, что толщина поверхностного слоя  $d(l)$  определяется одним фундаментальным параметром — атомным объемом элемента, который периодически изменяется в соответствие с таблицей Д.И. Менделеева.

### **Результаты эксперимента и их обсуждение.**

Из (2) вытекает, что  $d \sim \sigma$  — поверхностное натяжение ВЭСов. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Толщина поверхностного слоя  $d$  и коэффициент трения  $k_{\text{тр}}$  высокоэнтропийных сплавов

Сплав	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	M, моль <sup>-1</sup>	d, нм	K <sub>тр</sub>
FeCoCrNiTaTiCu	7.15	519	12,3	0,141
FeCoCrNiTaTiW	7.91	639	13,7	0,152
FeCoCrNiTaTiZr	6.42	546	14,5	0,191
FeCoCrNiTaTiMo	6.31	551	14,9	0,256
FeCoCrNiTaTiAl	5.41	482	15,1	0,302

Из табл. 1 следует, что коэффициент трения  $k_{тр}$  снижается в соответствии с уменьшением поверхностного натяжения. В работе [7] дан подробный обзор влияния различных факторов на трибологические свойства ВЭСов. Можно сформулировать два основных способа повышения износостойкости материалов [7]: за счет повышения твердости поверхностных слоев и за счет снижения коэффициента трения между соприкасающимися поверхностями (уменьшение схватываемости).

В этом случае увеличение активации поверхностных слоев осуществляется за счет снижения поверхностной энергии и облегчения пластической деформации. Направленное изменение свойств покрытий путем варьирования их состава, структуры и строения за счет легирования позволяет существенно влиять на контактные характеристики процесса трения.

#### **Заключение.**

Снижение поверхностной энергии (иначе-удельного поверхностного натяжения) мы и показали. Уравнение (4) дает возможность определять толщину поверхностного слоя и ВЭСов и других материалов по одному параметру: атомному объему образца ( $v=M/\rho$ ).

#### **Список литературы**

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. Фирсов С.А., Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Печковский Э.П. Упрочнение и механические свойства литых высокоэнтропийных сплавов // Композиты и наноструктуры, 2011, № 2. — С. 3-20.
3. Погребняк А.Д., Багдасарян А.А., Якущенко И.И., Береснев В.М. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе // Успехи химии, 2014, т. 83, вып. 11. — С. 1027-1061.
4. Колесников В.А., Байсагов Я.Ж., Юров В.М. Информационно-измерительный прибор для определения коэффициента трения скольжения // Фундаментальные исследования. 2011. № 12. Часть 1. — С. 121-124.
5. 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.
6. Рехвиашвили С.Ш., Кишტიкова Е.В., Кармокова Р.Ю. К расчету постоянной Толмена // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. вып. 2. — С. 1-7.
7. Ахммад М. Махммуд Албу-Бадри. Физико-механические свойства и структура покрытий на основе Ti, Al, Zr, Si и N. Дисс. кандид. физ.-мат. наук. Сумы. 2013. — 150 с.