

*к.т.н. Ершов В.М.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Приведені експериментальні результати по використанню трибоелектричного ефекту для сортування сталі по хімічному складу і маркам.*

**Ключові слова:** *трибоелектричний ефект, метали, сталі, сортування по марках.*

*Приведены экспериментальные результаты по применению трибоэлектрического эффекта для сортировки сталей по химическому составу и маркам.*

**Ключевые слова:** *трибоэлектрический эффект, металлы, сталы, сортировка по маркам.*

В практике машиностроительного производства часто возникают проблемы с сортировкой металлических материалов по химическому составу и маркам, особенно на складах металлопродукции и на участках сборки изделий. В настоящее время для решения этих вопросов применяют различные методы, в том числе и электротехнические способы. Показано, например, что с помощью компактных портативных электрических приборов, таких как термоэлектрический прибор типа ТЭДИ – 1 [1], можно производить сортировку сталей по маркам. Однако, используемый в этом приборе метод термоЭДС, не позволяет в некоторых случаях рассортировывать материалы, имеющие одинаковые значения ТЭДС, при сильно различающемся у них химическом составе ..

В настоящем исследовании, автор предпринял попытку использовать для целей сортировки металлических материалов известный [2] трибоэлектрический эффект. Он заключается в том, что при трении двух металлических поверхностей, между ними возникает ЭДС, величина и знак которых зависит от ряда факторов, в том числе и от химического состава материалов [3].

Физической основой трибоэлектрических явлений считаются контактные явления, при которых в момент фрикционного контакта металлических поверхностей, наблюдается переход электронов и ионов от одного тела к другому [2]. При этом на границе раздела трущихся тел

образуется скачек потенциала, равный разности энергетических уровней Ферми двух металлов ( $F_1 - F_2$ ) до их контакта. Этот скачек потенциала препятствует преобладающему переходу электронов проводимости от одного тела в другое, в результате чего, между поверхностями этих тел возникает контактная разность потенциалов, равная разности работ выхода электронов из этих металлов.

Для измерения трибоэлектрической разности потенциалов различных металлов и сплавов, автор сконструировал специальную установку, состоящую из вибратора и измерительного милливольтметра. Перед измерением трибоЭДС, в подвижный щуп вибратора устанавливался стержень эталонного металла (Al, Fe, Ni и др.) и этот подвижный стержень прижимали к поверхности контролируемого образца металла. Вибратор создавал 50 поперечных колебаний в секунду с амплитудой 5-6 мм. Эталонный стержень и образец контролируемого металла соединялись проводниками с чувствительным зеркальным милливольтметром марки M1202..

Для исследования использовали чистые поликристаллические металлы (ХЧДА) и различные углеродистые и легированные промышленные стали. Образцы исследуемых материалов перед измерением проходили тщательную зачистку поверхности и обезжиривание ацетоном, Измерение трибоЭДС производили при комнатной температуре и относительной влажности воздуха в помещении 50-60%. На каждом образце производили по 10 замеров трибоЭДС и полученные результаты усредняли с расчетом доверительного интервала (с доверительной вероятностью 0.95) по общепринятой методике. Для всех материалов расчетная погрешность измерения ЭДС находилась в пределах 3-5%.

На первом этапе работы были исследованы образцы чистых металлов: от самого легкого - бериллия, до самого тяжелого – висмута. В качестве эталонного металла использовали стержни из Al, Ni, W и Bi. Известно, что эти металлы имеют различную работу выхода электронов, плотность свободных носителей и энергию Ферми [3].

В таблице 1 приведены усредненные экспериментальные значения трибоЭДС металлов для вышеперечисленных эталонов. Кроме того, из данных монографии [4] для использованных металлов, в таблицу внесены значения работы выхода электронов  $\phi_F$ , энергия Ферми  $E_F$  и плотность электронов проводимости  $N/V$ .

Из приведенных в таблице 1 данных видно, что величина и знак трибоЭДС для всех контролируемых металлов различна и зависит от их природы и эталонного металла. Наименьшие значения контактной разности потенциалов оказались для алюминиевого эталона, а наибольшие – для висмута.

Таблица 1 -Трибоэлектрические и электронные свойства металлов

Металл	$\phi_F$ эВ	$E_F$ эВ	$N/V$ $10^{28} \text{ м}^{-3}$	ТрибоЭДС, мкВ, для эталонов из Ni, W, Bi, Al			
				Al	Ni	W	Bi
Be	3.92	14.3	24.7	+ 4	+ 74	- 10	+ 170
Al	4.25	11.7	18.1	0	+ 34	- 6	+ 130
Ti	3.95	-	-	- 6	+ 16	- 30	+ 130
Fe	4.31	11.1	17.0	+ 24	+ 80	+ 210	+ 130
Co	4.41	-	-	- 40	+ 20	- 70	+ 20
Ni	4.50	-	-	- 24	0	- 400	+ 380
Cu	4.40	7.0	8.47	+ 4	+ 20	+ 2	+350
Zn	4.24	9.47	13.2	+ 6	+ 40	+ 3	+ 110
Mo	4.30	-	-	+ 8	+ 48	+ 12	+ 110
Cd	4.10	7.47	9.27	+ 2	+ 52	+ 6	+ 140
Sn	4.38	10.2	14.8	+ 3	+ 8	- 4	+ 70
Sb	4.08	10.9	-	+ 2	+350	+ 150	+ 780
Ta	4.12	-	-	+ 4	+ 30	- 10	+ 180
W	4.54	-	-	+ 6	+ 100	0	+ 400
Pt	5.32	-	-	0	+ 52	- 100	+ 380
Pb	4.00	9.47	13.2	0	+ 4	- 8	+ 90
Bi	4.40	9.0	-	- 450	- 800	- 300	0

Известно [2,3], что абсолютная величина трибоэлектрического потенциала пропорциональна разности работ выхода электронов  $\delta\phi_F$  из контактирующих металлов. Так, если разность  $\delta\phi_F$  для платины, по отношению к алюминию, составляет 1.07эВ, то трибоЭДС у этих металлов различается на 250 мкВ для эталона из висмута и 18 мкВ – для никеля. Однако в некоторых случаях контактная ЭДС напрямую не зависит от работы выхода электронов. Например, для железа и молибдена работы выхода электронов близки (4.31 и 4.30 эВ, соответственно), а трибоЭДС сильно различается, как для вольфрамового, так и для никелевого эталонов.

Сопоставление величин трибоЭДС для всех исследуемых металлов дало возможность составить ряд, в котором всякий последующий металл более электроотрицателен, чем предыдущий. Для эталона из никеля ряд имеет следующий вид: Sb, W, Fe, Be, Cd, Pt, Mo, Zn, Al, Ta, Cu, Co, Ti, Sn, Pb, Bi. Этот ряд заметно отличается от рядов Фарадея, Вольта и Гезехуса [2].

Таким образом, анализ трибоэлектрических характеристик металлов показал, что в сплавах на основе железа, можно ожидать изменение

трибоЭДС в зависимости от вида легирующих элементов и их количества в сплаве.

Исследование промышленных сплавов проводили по вышеприведенной методике анализа чистых металлов, для чего использовали эталоны из никеля, вольфрама, железа и никеля. Экспериментальные данные по измерению трибоЭДС сталей приведены в таблице 2.

Таблица 2 -Трибоэлектрические характеристики конструкционных и инструментальных промышленных сталей

Марка стали	ТрибоЭДС, мкВ, для эталонов			
	Ni	Fe	W	Bi
<b>Конструкционные</b>				
Сталь 20	+102	- 10	+36	+300
20X	+96	- 6	+22	+90
20X13	+90	- 36	+20	+190
08X17T	+130	- 36	+52	+150
14X17H2	+170	- 18	+40	+240
12X18H9T	+106	- 64	- 6	+170
20X2H4A	+80	- 76	+2	+250
30XГСА	+92	- 40	+3	+240
03H18K9M5T	+90	- 52	+2	+100
60C2	+112	- 40	+20	+450
<b>Инструментальные</b>				
Сталь У13	+140	- 16	+24	+100
ШХ15	+90	- 4	+14	+50
ШХ15СГ	+140	- 30	-8	+70
P18	+130	- 32	+20	+90
P9	+146	- 4	+24	+140
P6M5	+140	- 4	+28	+130
X12M	+164	- 2	+22	+170
X12Ф1	+160	+2	+76	+300
ХВГ	+120	- 22	+14	+130
9ХС	+65	- 88	+6	+210
95X18	+140	- 4	+34	+510

Из приведенных в таблице 2 данных следует, что наибольшие значения трибоЭДС как у конструкционных, так и у инструментальных сталей, обнаружались в том случае, когда использовались в качестве эталонов стержни из никеля и висмута. Наименьшие значения ЭДС оказались у эталонов из вольфрама и железа. Объяснением этому служит

положение элементов-эталонов в вышеприведенном ряде (таблица 1). Действительно, висмут в ряде располагается крайним слева и поэтому все элементы, расположенные вправо от него, будут давать положительные значения трибоЭДС.

Различия в легированности сталей существенно влияет на трибоэлектрические свойства сплавов. Так, легирование сталей хромом привело к заметному снижению положительных значений ЭДС, а комплексное легирование сплавов несколькими элементами создало эффект частичной компенсации в интегральной ЭДС за счет различного положения металлов в вышеприведенном ряде элементов. Поэтому у сложнoleгированных сталей оказались невысокие значения трибоэлектрических параметров. Кроме того, из данных таблицы 2 также следует, что увеличение содержания углерода в сталях заметно сказалось на величине трибоЭДС, например, у высокоуглеродистых инструментальных сталей ее значения оказались значительно выше, чем у малоуглеродистых конструкционных сталей.

На следующем этапе настоящей работы, по полученным данным производили сопоставление значений трибоЭДС сталей с целью оценки возможностей их сортировки по маркам. Для этого находили разность в значениях трибоЭДС каждой пары сталей для одного эталона и сопоставляли с утроенной величиной статистической погрешности измерения ЭДС каждой из них. В том случае, если разность в трибоЭДС у пары сталей оказывалась меньше утроенной величины погрешности, то мы считали разделение по маркам каждой из них невозможным. Когда вышеназванная разность превосходила этот интервал на величину погрешности, разделение марок сталей признавалось возможным (удовлетворительным), а значительное превышение погрешности, признавалось при сортировке весьма надежным (хорошим).

В таблице 3 приведены данные сопоставления парной марочной сортировки конструкционных сталей трибоэлектрическим методом. Эти данные получены для парного анализа трибоЭДС сталей с использованием никелевого эталона. Здесь видно, что стали, легированные хромом (1.5 - 17%), надежно отсортировываются от углеродистой стали и разделяются между собой. Однако, комплексное легирование сталей хромом, никелем и другими элементами, делает невозможным их разделение от чисто хромистых сталей.

Особое место в марочной сортировке сталей трибоэлектрическим методом занимают кремнистая сталь 60С2 и комплексно легированная сталь 14Х17Н2. Как видно из таблицы 3, эти стали хорошо выявляются в парах всех сталей, выбранных для контроля. Аналогичная ситуация по марочной сортировке конструкционных сталей была ранее выявлена нами и при использовании термоэлектрического метода контроля [1].

Таблица 3 - Парный сортировочный контроль конструкционных сталей для никелевого эталона\*

Марки сталей	20	20X	20X13	08X17T	14X17H2	12X18H9T	20X2H4A	03H18K9M5T	30XГСА	60C2
20	-	-	+	++	++	-	+	+	+	++
20X	-	-	-	++	++	-	+	-	-	++
20X13	+	-	-	++	++	+	+	-	-	++
08X17T	+	+	++	-	++	+	++	++	++	++
14X17H2	++	++	++	++	-	++	++	++	++	++
12X18H9T	-	-	+	+	++	-	+	+	+	++
20X2H4A	+	+	+	++	++	+	-	+	+	++
03H18K9M5T	-	-	-	++	++	+	+	-	-	++
30XГСА	+	-	-	++	++	+	+	-	-	++
60C2	++	++	++	++	++	++	++	++	++	-

Примечание. Знак (-) указывает на невозможность разделения, знак (+) – на удовлетворительное разделение, а знак (++) – на хорошее разделение марок сталей.

Парная сортировка по термоЭДС инструментальных сталей (таблица 4) во многом повторила ситуацию с конструкционными сталями. Действительно, некоторые стали (ШХ15, 9ХС) оказались способными к надежной сортировке по отношению к выбранным для контроля сталям. В то же время быстрорежущие стали слабо разделяются по термоЭДС между собой, что не дает возможности их совместной сортировки по маркам. Высокохромистые инструментальные стали удовлетворительно сортируются по маркам с остальными сталями, но не между собой. Аналогичная ситуация и с низколегированными высокоуглеродистыми сталями. Здесь сталь ХВГ надежно отсортировывается только от сталей ШХ15 и 9ХС, а среднеуглеродистая сталь 5ХНМ надежно отсортировывается только от высокохромистых сталей Х12М и Х12Ф1.

Таблица 4 - Парный разделительный контроль инструментальных сталей для никелевого эталона

Марки сталей	5ХНМ	ШХ15	ШХ15СГ	Р18	Р9	Р6М5	Х12М	Х12Ф1	ХВГ	9ХС	95Х18
5ХНМ		+	-	+	+	+	++	++	-	++	+
ШХ15	+		++	++	++	++	++	++	++	++	++
ШХ15СГ	-	++		-	-	-	+	++	+	++	-
Р18	+	++	-		-	-	+	+	-	++	-
Р9	+	++	-	-		-	-	-	+	++	-
Р6М5	+	++	-	-	-		+	+	+	++	-
Х12М	++	++	+	+	-	+		-	++	++	-
Х12Ф1	++	++	+	+	+	+	-		+	++	+
ХВГ	-	+	+	-	+	+	++	+		++	+
9ХС	++	++	++	++	++	++	++	++	++		+
95Х18	+	++	-	-	-	-	+	+	+	++	

Примечание. Обозначения по примечанию таблицы 3.

Таким образом, трибоэлектрический метод сортировки сталей вполне пригоден для применения в машиностроительном производстве. Только для его применения необходимо иметь исходные данные. аналогичные информации, приведенной в таблицах 3 и 4.

Сопоставляя возможности термоэлектрического и трибоэлектрического методов марочной сортировки сталей, нужно признать, что метод термоЭДС, примененный нами ранее [1], дал лучшие результаты. Так, например, он позволил надежно разделять близкие по составу сплавы, такие как высокохромистые и быстрорежущие стали. Кроме того, дополнительным преимуществом термоэлектрического метода можно считать и то обстоятельство, что абсолютная величина ЭДС, измеренная этим методом, оказалась на порядок выше, чем трибоЭДС тех же материалов.

Дальнейшие исследования в направлении применения трибоэлектрического метода необходимо сосредоточить на выявлении роли термической обработки сталей (отжига, закалки, отпуска и ХТО) в марочном контроле.

### **Библиографический список**

1. Григорьев С.В. Применение термоэлектрического метода сортировки промышленных сталей / С.В. Григорьев, Н.В. Русанова, В.М. Ершов. - Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск.: Ладос, 2008. - № 27. - С. 324-329.

2. Белокур И.П. Дефектоскопия материалов и изделий / И.П. Белокур, В.А. Коваленко В.А. – К. Наукова Думка, 1989. - 192 с.

3. Самсонов Г.В. Свойства элементов. Физические свойства. Справочник / Г.В. Самсонов. – М. Металлургия, 1976. - 600 с.

4. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник / В.С. Фоменко. - К. Наукова Думка, 1981.- 336 с.

*Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.*