

Электроэрозионная износостойкость композитов на медной основе, содержащих высокотвердые углеродные частицы

Е. И. Дроздова, Е. А. Екимов*, В. В. Измайлов**,
М. В. Новоселова**, И. Н. Ушакова, О. П. Черногорова

Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН,
Москва, e-mail: drozdova@imet.ac.ru

*Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН, Москва

**Тверской государственный технический университет, Россия,
e-mail: iz2v@tvcom.ru

Представлены результаты исследования электроэрозионной износостойкости и контактного электросопротивления композиционных электроконтактных материалов на основе медной матрицы с добавлением высокотвердых углеродных частиц. В качестве таких частиц использовались дисперсные искусственные алмазы и частицы сверхупругого твердого углерода, полученные из фуллеренов.

Ключевые слова: электроконтактный материал, электроэрозионное изнашивание, контактное электросопротивление, медная матрица, углерод, твердые частицы.

Введение

Надежность и эффективность электрокоммутирующих устройств в значительной мере определяются выбором электроконтактного материала (ЭКМ) в соответствии с условиями их работы. Во многих случаях эти условия таковы, что существенную, а иногда и решающую роль играют процессы электроэрозионного изнашивания. Поэтому повышение электроэрозионной износостойкости ЭКМ является актуальной задачей.

Одним из самых распространенных ЭКМ остается электротехническая медь и композиции на ее основе. К числу достоинств меди как ЭКМ относятся ее высокие электрокоммутирующие характеристики. Так, по величине известного критерия электроэрозионной стойкости материалов Л. С. Палатника [1]

$$P_a = \lambda_{cy} T_{пл}^2$$

медь превосходит такие ЭКМ, как серебро, хром, практически не уступает молибдену и уступает только вольфраму. В формуле λ — теплопроводность, Вт/м·К; c — удельная теплоемкость, Дж/кг·К; γ — плотность материала, кг/м³; $T_{пл}$ — температура плавления, К.

Тем не менее имеются резервы для повышения электроэрозионной износостойкости меди. Например, в композиционные порошковые материалы (КПМ) на медной основе вводят тугоплавкие компоненты в виде чистых металлов (молибден, вольфрам, хром) или их химических соединений (карбиды, бориды, силициды), а также углерод в различных

© Е. И. Дроздова, Е. А. Екимов, В. В. Измайлов, М. В. Новоселова,
И. Н. Ушакова, О. П. Черногорова, 2016

фазовых состояниях. Но в этом случае при увеличении электроэрозионной стойкости возрастает удельное электросопротивление, что приводит к повышенному нагреву контакт-деталей и снижению надежности контактного соединения. Поэтому при выборе ЭКМ необходимо решение компромиссной задачи сочетания приемлемых значений износостойкости и электропроводности.

Предмет и методы исследований

В данной работе представлены результаты сравнительных испытаний на электроэрозионную износостойкость образцов ЭКМ на медной основе. Для оценки электроэрозионной износостойкости ЭКМ использована установка, описанная в работе [2]. Испытания проводили в режиме импульсного разряда в емкостном накопителе энергии. Применение емкостных накопителей энергии позволяет достаточно легко варьировать режимы разряда. Результаты испытаний в режиме импульсного разряда можно распространить на другие виды разрядов, учитывая условия выделения энергии в межэлектродном пространстве.

При испытаниях образцы исследуемого материала использовали в качестве анода, поскольку в режиме импульсного разряда, как известно, анод гораздо больше подвержен эрозии, чем катод. Катодом служил цилиндрический электрод диаметром 1 мм, изготовленный из вольфрама. Вольфрам выбран в качестве второго электрода ввиду его высокой электроэрозионной стойкости, о чем свидетельствует его наибольшее значение критерия Палатника в ряду металлических материалов. Расположение электродов: нижний образец — анод, верхний — катод.

Частота коммутаций (число циклов включение-выключение) составляла 0,33 Гц (20 коммутаций в минуту). Раствор контакта — 7 мм, скорость замыкания (размыкания) — примерно 30 мм/с, продолжительность включения — 50%. Для гашения вибрации контактов используется специальный фрикционный демпфер, гасящий энергию колебаний за счет трения. Усилие нажатия — 0,5 Н, оно прикладывалось к верхнему электроду (катод) с помощью разновесов и оставалось постоянным во всех описанных далее экспериментах. Соответствующее контактное давление — примерно 0,64 МПа, напряжение на электродах — 100—200 В, энергия разряда — 1—3 Дж.

В качестве характеристик износостойкости приняты удельные величины: линейный износ, приходящийся на один цикл коммутации (I_n , мкм/цикл), и массовый износ (удельная эрозия) — отношение массы потерянного материала к величине энергии импульсного разряда (I_m , мкг/Дж). Точность измерения линейного износа — 0,1 мкм/цикл.

Твердость индентирования образцов H_{IT} (ГОСТ Р 8.748-2011), известную также как твердость по Мейеру, определяли вдавливанием в поверхность материала алмазного индентора в виде конуса. Нагрузка на индентор составляла 45 Н. Диаметры отпечатков при измерении твердости изменялись в пределах 0,1—0,25 мм, глубина отпечатка — в пределах 30—70 мкм. Диаметр отпечатка был достаточным, чтобы исключить влияние неоднородности состава материала и оценить интегральную (усредненную) величину твердости. В то же время глубина отпечатка свидетельствует о твердости именно поверхностных слоев материала.

Для ЭКМ важными характеристиками являются также его удельное и контактное электросопротивление. Поэтому результатом сравнительных

испытаний являлось построение рядов относительного электроэрозийного износа, относительной электропроводности материалов и относительного контактного сопротивления. За эталон принята медь марки М1.

Удельное электросопротивление образцов измеряли методом ван дер Пау [3], контактное — согласно методике, рекомендованной в работе [4]. Исследуемый материал оценивали в паре с эталонным зондом из сплава ЗлМ-800 (80% (мас.) Au—20% (мас.) Cu) диаметром 1 мм с радиусом закругления вершины 0,5 мм по четырехпроводной схеме при постоянном токе, при этом зависимости контактного сопротивления от полярности зонда и образца не обнаружено. Нагрузка на зонд во всех случаях составляла 1 Н (100 гс). Контактное сопротивление измеряли при напряжении на разомкнутом контакте не более 50 мВ. Повторность измерений — 15—20-кратная. Для сравнения по описанной методике определяли сопротивление контакта эталонного зонда с образцом из золота чистотой 99,99%.

Электроэрозийная износостойкость и электропроводность КПП на основе меди с добавлением дисперсного алмаза

Исследуемые материалы содержали 2—10% (мас.) углерода в виде дисперсного алмазного порошка. Образцы получены прессованием смеси порошков под давлением 65 МПа при комнатной температуре в цилиндрической пресс-форме. Дальнейшее спекание проводили в вакууме в течение 1 ч при температуре 1000 °С.

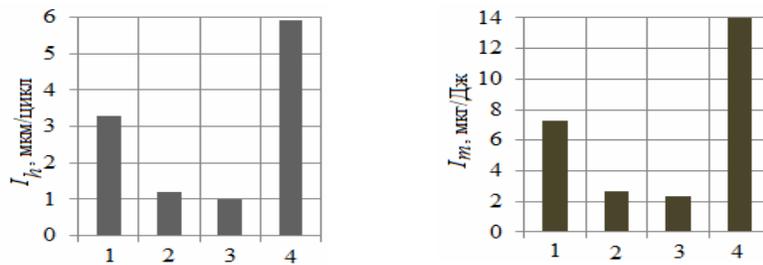
Состав материалов, их физико-механические и электроконтактные характеристики представлены в табл. 1. В скобках после обозначения материала указано содержание дисперсных алмазов в процентах массовых.

Экспериментальные результаты в виде сравнительных диаграмм удельных величин износа I_n и I_m представлены на рисунке. Они подтверждают, что введение дисперсных алмазов в электроконтактный материал на медной основе существенно снижает интенсивность изнашивания по сравнению с медью. К сожалению, электрическая проводимость этих материалов невысокая (табл. 1). Наибольшей относительной износостойкостью обладает материал, содержащий 10% (мас.) углерода в виде алмазов.

Анализируя результаты испытаний исследованных материалов, необходимо обсудить возможность графитизации алмазов при спекании порошковой заготовки. В работе [5] на основании анализа большого количества экспериментальных данных сделан вывод о том, что опасность

Т а б л и ц а 1. Состав и характеристики исследованных образцов

Номер образца	Материал	H_{IT} , МПа	Пористость, %	ρ , $\cdot 10^{-8}$ Ом·м	Относительная проводимость, % IACS
1	CuC (2)	570—590	12—14	2,8	62
2	CuC (5)			3,8	46
3	CuC (10)			6,5	27
4	Cu (эталон)	716	0	1,8	96



Величина удельного износа образцов КМ на основе меди с различным содержанием дисперсного алмазного порошка. Нумерация образцов соответствует приведенной в табл. 1.

графитизации алмазов при спекании в вакууме или инертной атмосфере становится значительной при температурах выше 1370—1670 К. Исследованные нами образцы спекали при меньших температурах. Оптическая микроскопия исследованных образцов с содержанием алмазов 10% (мас.) показала наличие в материале именно алмазных зерен.

Электроэрозионная износостойкость и электропроводность КПП на основе меди с добавлением частиц сверхтвёрдого углерода

Образцы КМ на основе медной матрицы, объемно армированной углеродными частицами, синтезировали из смеси порошков меди и 10% (мас.) фуллеренов (C_{60+70}) под давлением 8 МПа при температуре 800 °С с выдержкой в течение 45 с. Образцы имели вид таблеток диаметром 5 мм и высотой 2,5 мм.

Размер частиц армирующей углеродной фазы — 3—100 мкм, частицы не создают каркаса в медной матрице и расположены равномерно по объему материала. Их объемная доля составляла ~30% (об.). Некоторые свойства армирующей углеродной фазы и КМ приведены в табл. 2. Синтезированные из фуллеренов армирующие углеродные частицы обладают уникальной комбинацией механических свойств: очень высокой микротвердостью, которая сравнима с микротвердостью карбида кремния и выше, чем у корунда, при относительно низком модуле Юнга (сравним с модулем Юнга для стали).

В контактной механике отношение микротвердости к модулю упругости H/E используют в качестве показателя деформационных характеристик контактного материала [6]. Величина этого отношения характеризует степень упругого восстановления материала при индентировании (отношение упругой деформации к общей деформации при индентировании). Армирующие частицы из твердого углерода, полученные из фуллеренов под давлением, можно отнести к сверхупругим, поскольку они характеризуются величиной $H/E = 0,15—0,19$.

Измерение контактного электросопротивления исследуемого КМ дало следующие результаты. Наиболее вероятное значение контактного сопротивления исследуемого КМ в паре с зондом из сплава ЗлМ800 равно 30 мОм. Для сравнения: наиболее вероятное значение контактного сопротивления эталонного контакта ЗлМ800/Au — 11 мОм. Естественно, что сопротивление контакта ЗлМ800/Au меньше, чем контакта ЗлМ800/КМ, поскольку золото — материал, стойкий к окислению на воздухе в естественных

Т а б л и ц а 2. Свойства армирующей углеродной фазы и композиционного материала

Свойства армирующей углеродной фазы		
Микротвердость HV_{50} , ГПа	Модуль Юнга E , ГПа	Упругое восстановление при индентировании, %
30—35	180—200	82
Свойства КМ		
Твердость индентирования H_{IT} , ГПа	Удельное электросопротивление ρ , Ом·м	
1,43—5,73	$(1,7—2) \cdot 10^{-8}$	

условиях, то есть на его поверхности присутствует практически только монослой адсорбированных газов. На поверхности меди, которая составляет основу КМ, в естественных условиях образуются оксидные пленки гораздо большей толщины. Они существенно увеличивают контактное сопротивление материала. Кроме того, площадка контакта зонда с образцом могла располагаться в области как медной матрицы, так и углеродной фазы или захватывать и ту и другую области. В связи с этими обстоятельствами величину контактного сопротивления 30 мОм следует признать достаточно хорошим результатом.

Испытания исследуемого КМ в режиме импульсного разряда показали его высокую электроэрозионную износостойкость: удельный линейный износ $I_h = 1,1$ мкм/цикл, удельный массовый износ $I_m = 1,73$ мкг/Дж, относительная величина удельного износа по сравнению с медью М1 — 0,19. Следует отметить, что величина линейного износа данного материала практически совпадает с аналогичной характеристикой образца на основе медной матрицы с добавлением 10% (мас.) дисперсных алмазов (см. табл. 1 и рисунок).

Корреляция величины электроэрозионного износа с физико-механическими свойствами материалов

Очевидно, что электроэрозионная износостойкость ЭКМ зависит от большого числа факторов, которые не всегда могут быть точно определены. Из физических соображений очевидно, что интегральной характеристикой электрических свойств материала может служить его удельная электропроводность (удельное сопротивление), а интегральной характеристикой механических свойств материала — его твердость. Была исследована корреляция электроэрозионного износа материала с указанными характеристиками. Наличие корреляции величины износа с удельным сопротивлением и твердостью оценивали параметрическими и непараметрическими методами математической статистики.

С достаточной степенью достоверности на основании коэффициента ранговой корреляции γ Кендалла (уровень значимости $p = 0,042$) можно отметить положительную корреляцию величин износа и удельного сопротивления (чем больше удельное сопротивление, тем больше износ). Это можно объяснить тем, что большое удельное сопротивление (малая

электропроводность) соответствует малой теплопроводности материала, что, в свою очередь, соответствует малой электроэрозионной стойкости, согласно критерию Палатника.

Статистически значимой корреляции между твердостью материала и величиной электроэрозионного износа не обнаружено.

Заключение

Электроэрозионное изнашивание в значительной мере определяет ресурс электрических контактов. Приведенные в работе экспериментальные результаты свидетельствуют о высокой электроэрозионной стойкости исследованных КПП и дают основания рекомендовать их в качестве перспективных материалов для разрывных электрических контактов.

1. Буткевич Г. В. Электрическая эрозия силовых контактов и электродов / [Г. В. Буткевич, Г. С. Белкин, Н. А. Ведешенков, М. А. Жаворонков]. — М. : Энергия, 1978. — 256 с.
2. Пат. 2265862 Российской Федерации. Способ оценки электроэрозионной износостойкости материалов для электрических контактов / В. В. Измайлов, М. В. Новоселова. — Оpubл. 10.12.2005, Бюл. № 34. — С. 6.
3. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. — М. : Высш. школа, 1987. — 239 с.
4. *Standard Practice for Construction and Use of a Probe for Measuring Electrical Contact Resistance*: ASTM B667 – 97.2014.
5. Иванов В. В. Физико-химические основы технологии и материаловедение порошковых электроконтактных композитов. — Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2002. — 234 с.
6. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. — М. : Мир, 1989. — 510 с.

Електроерозійна зносостійкість композитів на медній основі, що містять надтверді вуглецеві частинки

Є. І. Дроздова, Є. А. Єкімов, В. В. Ізмайлов, М. В. Новоселова,
І. М. Ушакова, О. П. Черногорова

Представлено результати дослідження електроерозійної зносостійкості і контактної електроопору композиційних електроконтактних матеріалів на основі мідної матриці з додаванням високотвердих вуглецевих частинок. В якості таких частинок використовували дисперсні штучні діаманти і частинки надпружного твердого вуглецю, одержані з фулеренів.

Ключові слова: електроконтактний матеріал, електроерозійне зношування, контактний електроопір, мідна матриця, вуглець, тверді частинки.

Electroerosive wear resistance of composites on copper base with very hard carbon particles

E. I. Drozdova, E. A. Ekimov, V. V. Izmailov,
M. V. Novoselova, I. N. Ushakova, O. P. Chernogorova

The results of the investigation of electroerosive wear resistance and contact electrical resistance of composites for electrical contacts with the copper matrix and very high carbon particles as additives have been presented. Fine-dispersed synthetic diamonds and particles of hyperelastic hard carbon obtained from fullerenes were used as additives.

Keywords: material for electrical contacts, electroerosive wear, contact electrical resistance, copper matrix, carbon, hard particles.