

Пластичность электроискровых медьсодержащих покрытий

Ф. Х. Бурумкулов, В. И. Иванов, С. А. Величко, В. А. Денисов

Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии),

1-й Институтский проезд, д. 1, г. Москва, 109428, Россия, e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Выполнена экспериментальная работа по определению контактной жесткости толстослойных электроискровых медьсодержащих покрытий. Установлено, что исследованные покрытия являются пористыми, их плотность без разрушения слоя можно увеличить пластической деформацией. Расчётно-экспериментальным методом получены зависимости уменьшения толщины (уплотнения) электроискрового покрытия от силового нагружения, а также жесткости покрытия.

Ключевые слова: электроискровая обработка, образец, покрытие, профиль поверхности, пластичность, силовое нагружение, деформация, смятие, параметры шероховатости.

УДК 621.9.048.4

ВВЕДЕНИЕ

При восстановлении изношенных поверхностей плоскостей разъёма, неподвижных соединений, прецизионных и тяжело нагруженных пар трения машин и механизмов электроискровой обработкой в газовой среде (ЭИО) одним из контролируемых параметров является контактная жесткость [1–4]. Как правило, публикации, посвященные ЭИО материалов, не содержат сведений о пластичности покрытий, характере разрушения от осевых и тангенциальных сил.

В данной работе объектом исследований выбраны толстослойные слои металла толщиной более 1 мм, образованные ЭИО на поверхности чугуна электродом из медных сплавов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Известно, что поверхности деталей машин даже после чистовой обработки остаются шероховатыми. Параметры шероховатости оцениваются по ГОСТ 2789-73, ISO 4287, в том числе средней высотой микронеровностей R_a .

Рассмотрим профили 1 и 2 двух соединённых деталей, находящихся под внешней нагрузкой N (рис. 1) [5, 6]. Эти поверхности обладают определенной микрошероховатостью, субмикрощероховатостью, которая накладывается на первую (участок *Б*), и волнистостью – совокупность периодически повторяющихся неровностей (на рис. 1 не показана).

Из-за шероховатости соединённые детали машин соприкасаются не по номинальной площади контакта, а только в отдельных точках. Например, при номинальной длине l сечения детали (рис. 1) контакт осуществляется только в

двух точках *А*. Поэтому фактическая площадь контакта очень мала.

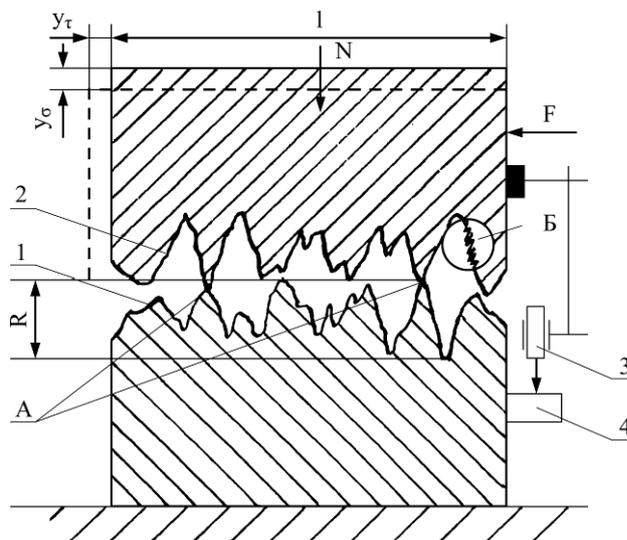


Рис. 1. Схема контактирования сопряженных деталей.

При силовом нагружении микронеровности поверхностей в точках контакта деформируются упруго и пластически. Происходят «контактные смещения» или «смещения в стыках» на величину y_σ и y_τ . Для оценки интенсивности контактных смещений под действием внешних сил введено понятие контактной жесткости.

В общем случае контактная жесткость k определяется через отношение давления σ к упругому смещению y_k :

$$k = \sigma / y_k.$$

Контактные деформации разделяют на нормальные и тангенциальные. Соответственно говорят о нормальных контактных смещениях y_σ и нормальной контактной жесткости k_σ , а также

тангенциальных контактных смещениях y_τ и тангенциальной контактной жесткости k_τ . И те и другие проявляются в одних и тех же стыках.

Под действием нормальной силы N (рис. 1) соприкасающиеся микровыступы деформируются (сжимаются) и верхняя деталь смещается на величину y_σ .

При малых номинальных площадях контакта {менее $(1,0-1,5)10^{-4}$ мм²}, когда влиянием отклонений от плоскостности можно пренебречь, нормальные контактные смещения y_σ в направлении силы N определяются эмпирической зависимостью

$$y_\sigma = C \cdot \sigma^m,$$

где σ – среднее давление, или контактное напряжение; C , m – соответственно коэффициент и показатель степени, зависящие от материала, шероховатости поверхности, вида обработки и др., определяются экспериментально.

В общем случае нормальная контактная жесткость

$$k_\sigma = 1/C \cdot \sigma^{m-1}.$$

Определение сопротивляемости смятию и разрушению упрочненных и восстановленных электроискровой обработкой рабочих поверхностей плоскостей разъема деталей, неподвижных соединений, прецизионных и тяжело нагруженных пар трения машин и механизмов является исходным для суждения о качестве покрытий деталей и об эффективности выбранного способа восстановления.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка жесткости электроискровых покрытий проводилась по стандартной методике [5, 6] согласно схеме рис. 1. В процессе эксперимента смещение регистрируется датчиком 3, который неподвижно закреплен на верхней детали и перемещается вместе с ней относительно упорного элемента 4 нижней детали. Аналогично определяется тангенциальное контактное смещение y_τ , с возрастанием силы F верхняя деталь смещается относительно нижней на величину y_τ . Сила N при этом постоянна.

В последнем случае речь идет о смещении, которое наблюдается до начала проскальзывания одной детали относительно другой, которое принято называть «предварительным смещением».

Метод состоит в следующем: на шлифованные торцы образцов наносится исследуемое покрытие. После этого к каждому образцу прикладывается нормально направленное на сжатие усилие. Под действием нормальных напряжений происходит упругопластическая деформация или

разрушение материала покрытия. Усилие разрушения характеризует прочность покрытия.

Предел прочности при сжатии определяют по формуле

$$\sigma = N/F_0,$$

где N – наибольшая нагрузка; F_0 – площадь поперечного сечения образца до испытания.

Относительное укорочение образца при сжатии определяется в процентах:

$$E = \frac{y_\sigma}{H_0} \times 100 = \frac{H_0 - H}{H_0} \times 100,$$

где H_0 – начальная высота образца; H – высота после испытания.

Приближённую оценку контактной жесткости покрытий, образованных ЭИО, проводили в следующей последовательности.

Электроискровое покрытие наносилось на шлифованную поверхность чугунного образца размером 80x70x20 мм (рис. 2), затем он разрезался по разметке для получения отдельных образцов размером 10x10x20 мм.

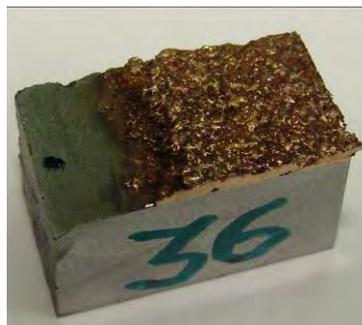


Рис. 2. Образец после нанесения ЭИ покрытия (установка «БИГ-5», электрод БрКМц 3-1, толщина нанесенного слоя 1,09 мм).

Испытание на сжатие осуществляли на разрывной машине Hegewald & Peschke Inspekt table 50 кН (рис. 3).



Рис. 3. Разрывная машина Hegewald & Peschke Inspekt table 50 кН.

Толщина и качество покрытия определялись с использованием профилографа–профилометра «Form Talysurf» английской фирмы «Тейлор Хобсон».

Параметры эксперимента: нагружение (сжатие) образца с покрытием проведено с силой 5; 10; 17,5; 25; 32,5; 40; 47,5; 50 кН по схеме, когда «тело» 2 (рис. 1) принимается абсолютно жёстким и гладким. Номинальная площадь покрытия 1 см².

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены результаты измерения параметров Δ_{\max} (по вершинам поверхности покрытия) и Δ_{\min} (по впадинам) толщин покрытия; максимальное расстояние пик-впадин профиля в пределах длины оценки Rt ; расстояние от базовой поверхности до наибольшей глубины шероховатости Δh^* экспериментального образца до начала испытаний и после его нагружения при различном нормальном давлении (рис. 4 и 5).

Таблица 1. Параметры профиля поверхности покрытия после нагружения

Сила нагружения (напряжения) (σ), кН	Δ_{\max}	Δ_{\min}	Rt (Pt)*	Δh^*
Без нагрузки	1,09	0,907	0,18	0,907
5 (500 кгс/см ²)	1,06	0,792	0,27	0,729
10 (1000 кгс/см ²)	1,00	0,903	0,0963	0,903
17,5 (1750 кгс/см ²)	0,942	0,786	0,155	0,786
25 (2500 кгс/см ²)	0,865	0,725	0,14	0,725
32,5 (3250 кгс/см ²)	0,775	0,663	0,112	0,633
40 (4000 кгс/см ²)	0,708	0,623	0,0854	0,623
47,5 (4750 кгс/см ²)	0,619	0,538	0,0813	0,538
50 (5000 кгс/см ²)	0,573	0,528	0,0453	0,528

Примечание: $Rt(Pt)^*$ – по ISO4287; Δh^* – условная толщина покрытия.

Анализ данных табл. 1 и 2 и графика на рис. 6 показывает, что по мере увеличения нагрузки параметры шероховатости и условная толщина покрытия уменьшаются по криволинейному закону.

Из рис. 6 следует также, что нормальные контактные уплотнения слоя нанесённого металла в направлении силы N подчиняются эмпирической зависимости:

$$\Delta h = -5 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^2 - 0,0046\sigma + 0,8692.$$

По данным наших экспериментов, нормальные контактные смещения y_{σ} в направлении силы N определяются эмпирической зависимостью (рис. 7):

$$y_{\sigma} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^2 + 0,001\sigma - 0,0008.$$

Тогда нормальная контактная жёсткость покрытия

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma}{3 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^2 + 0,001\sigma - 0,0008}.$$

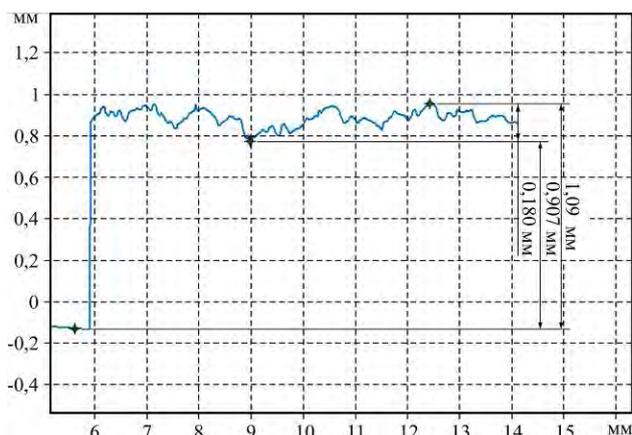


Рис. 4. Профиль покрытия до нагружения.

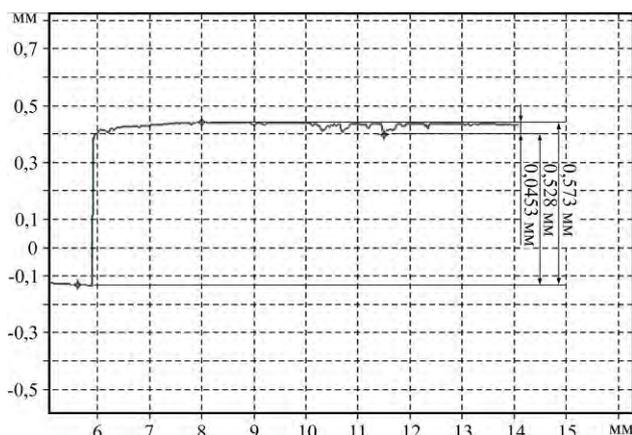


Рис. 5. Профиль покрытия после нагружения 50 кН.

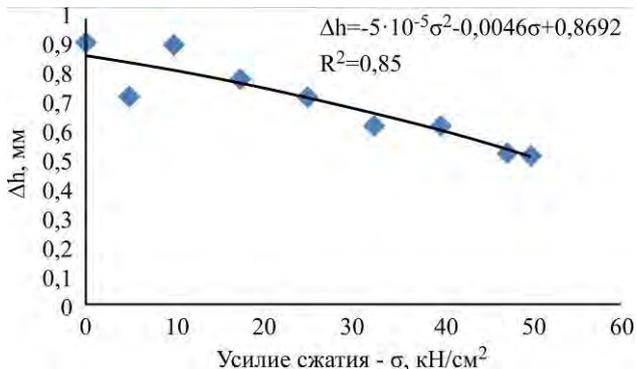


Рис. 6. График уплотнения (уменьшения толщины) покрытия при изменении величины нормальной нагрузки.

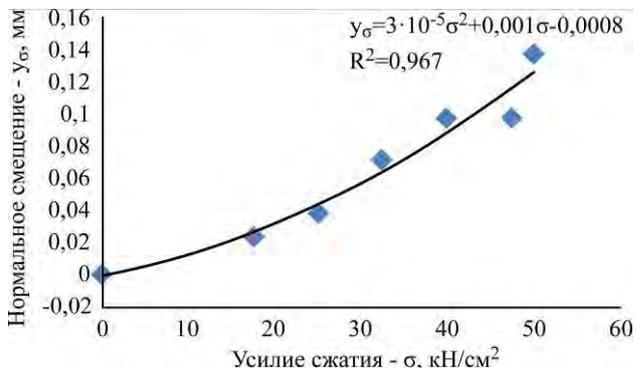


Рис. 7. Деформация покрытия при нормальном сжатии.

Из табл. 1 и 2 видно, что по мере увеличения напряжения – сжатия толщина слоя уменьшается в 1,71 раза, то есть «тело» покрытия обладает высокой пластичностью; параметры шерохова-

Таблица 2. Микрогеометрия поверхности покрытия после нагружения (мкм)

Сила нагружения, кН	R_p	R_v	R_z	R_c	R_t	R_a	R_q	R_{sk}	R_{ku}
Без нагрузки	0,0281	0,0339	0,062	0,045	0,0759	0,0125	0,0152	-0,374	2,76
5	0,0304	0,043	0,0734	0,0493	0,161	0,0148	0,0183	-1,86	12,1
10	0,0142	0,0238	0,0379	0,0294	0,0716	0,00844	0,010	-1,37	6,93
17,5	0,0183	0,0231	0,0414	0,0277	0,115	0,00879	0,0105	-2,11	21,2
25	0,0203	0,0332	0,0535	0,0326	0,118	0,00938	0,0128	-2,6	17,0
32,5	0,0128	0,0239	0,0367	0,0232	0,102	0,00685	0,00895	-4,23	34,5
40	0,00638	0,0182	0,0246	0,011	0,0688	0,00304	0,0047	-9,59	95,6
47,5	0,00979	0,0136	0,0234	0,012	0,0593	0,00395	0,00541	-3,63	28,5
50	0,0053	0,0123	0,0176	0,00683	0,037	0,00259	0,0036	-3,06	21,0

Примечание: параметры шероховатости согласно ISO 4287.

тости также уменьшаются, например: R_p – в 5,3 раза; R_z – в 3,52, R_a – в 4,82, а R_t – в 2,05 раза.

Отметим при этом, что в процессе экспериментов после каждого этапа испытания, то есть приложения нормальной нагрузки, образцы осматривались с применением лупы 7-кратного увеличения. Разрушения поверхности не обнаружено.

Металлографические исследования образцов после испытания показали, что микротрещин как по «телу» нанесённого покрытия, так и по границе раздела не обнаружено.

ВЫВОДЫ

1. Слоям металла, сформированным на изношенной поверхности детали после ЭИО электродами БрКМц 3-1 и медью, можно придать различные свойства путём операций поверхностно-пластического деформирования: осадки, укатки, раскатки и т.п.

2. Установлено, что исследованные покрытия обладают пористостью, которую можно уменьшить пластической деформацией.

3. Осевая нагрузка в 500 МПа в три раза превышает допустимую, возникающую в реальных соединениях. При этом покрытие уплотняется без разрушения и трещинообразования. Так, например, максимальное расстояние «пик-впадина» R_t уменьшается в 2,05 раза, а толщина нанесенного слоя – в 1,71 раза, то есть покрытие обладает высокой пластичностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурмукулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И., Величко, С.А., Ионов П.А. *Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов*. Саранск: Красный октябрь, 2003. 504 с.
2. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
3. Верхотуров А.Д. *Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании*. Владивосток: Дальнаука, 1995. 321 с.
4. Евразийский патент № 017066. *Электроискровой способ нанесения толстослойных покрытий повышенной сплошности*. Иванов В.И., Бурмукулов Ф.Х., Денисов В.А. Бюллетень ЕАПВ «Изобретения (евразийские заявки и патенты)» № 9, 2012.
5. ГОСТ 25.503-97. *Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие*. 56 с.
6. Чернянский П.М. Жёсткость в технологии машиностроения. Часть 2. *Технология металлов*. 2001, (9), 35–39.

Поступила 31.01.13
После доработки 04.04.13

Summary

The experimental work to determine the contact stiffness of thick copper-bearing coatings formed by electro-spark erosion has been carried out. It is established that the investigated coatings are porous, and their density can be increased by plastic deformation, without destructing the surface layer.

Keywords: electrospark erosion, design, coating, profile surface, plasticity, loading force, deformation, crushing, roughness.