

УДК 621.791

К РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ

**М. П. КУЛЬГЕЙКО, Д. В. МЕЛЬНИКОВ,
Г. С. КУЛЬГЕЙКО, Г. В. ПЕТРИШИН**

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Непрерывно возрастающие требования к качеству выпускаемых машин свидетельствуют о необходимости повышения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей. Формирование эксплуатационных свойств требует совершенствования существующих и создания новых технологических процессов формообразования поверхностных слоев деталей машин. Одним из эффективных методов упрочнения и восстановления поверхностных слоев деталей является магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ).

Магнитно-электрическое упрочнение позволяет получать покрытия высокой износостойкости с надежной связью нанесенного слоя с основным материалом детали. Сущность способа заключается в совокупном воздействии на ферромагнитный порошок и поверхностный слой электрической, магнитной и механической энергии, под действием которых порошок расплавляется и наносится на обрабатываемую поверхность.

Толщина и качество наносимого покрытия зависит от многих электрофизических и механических факторов и геометрических параметров процесса, в том числе от силы тока, магнитной индукции и величины рабочего зазора между поверхностью детали и электродом [1]. Многофакторность механизма формирования поверхностного слоя обуславливает реализацию ряда сложных процессов, протекающих в рабочей зоне. Среди выделенных элементарных процессов [2] представляет несомненный интерес и практическую значимость расплавление контактного мостика, т. е. расплавление ферромагнитных зерен, замыкающих под действием магнитного поля контакт между деталью и электродом-ротором. Процесс расплавления в значительной степени определяется электрическим сопротивлением в области стягивания контактного мостика.

Целью данной работы является установление зависимости электрического сопротивления в рабочей зоне от физических и геометрических факторов процесса.

Основная часть

Магнитно-электрическое упрочнение осуществляется при нагреве и расплавлении ферромагнитного порошка за счет тепловой энергии, выделяемой электрическим током на активном сопротивлении. Как и при электроконтактном припекании [3], при МЭУ энергия выделяется в виде тепла непосредственно в порошковом слое, а также на контактах между частицами порошка, поверхностью детали и электрода. Активация процессов расплавления порошка и нанесения расплава на подложку при МЭУ осуществляется за счет энергии электрического тока и магнитного поля. Механическая активация может производиться на конечной стадии формирования по-

крытия. Электроконтактное припекание сопровождается одновременным воздействием силовых и термических активирующих факторов, в том числе при импульсном пропускании электрического тока, а также вибрационного и импульсного приложения давления. Поэтому при припекании преобладающее значение имеет выделение тепла за счет контактного сопротивления между отдельными частицами порошка [3]. При этом с увеличением температуры в условиях значительного механического давления возрастает пластическая деформация вершин частиц порошка, что приводит к увеличению их контактных площадок, разрушению окисных пленок и снижению пористости порошкового слоя. Как следствие электрическое сопротивление с ростом температуры снижается до минимума при достижении температуры $0,4-0,8T_{пл}$. В этом случае основную роль играет активное сопротивление материала порошка, а контактное сопротивление можно не учитывать. Дальнейшее повышение температуры вызывает рост электросопротивления вследствие нагрева материала покрытия, и стабильность тепловыделения в порошковом слое определяется величиной его начального электрического сопротивления R_0 [3].

Результаты исследования и их обсуждение

При МЭУ интенсивность нагрева порошка определяется одновременно протекающими процессами выделения тепла в соответствии с законом Джоуля–Ленца и его распространение теплопередачей. Так как упрочнение происходит при использовании кратковременных импульсов тока и электроконтактный нагрев происходит с высокой скоростью, можно пренебречь теплопроводностью и другими факторами отвода энергии от контакта. Сопротивление контакта увеличивается с повышением температуры контактного мостика в соответствии с зависимостью [2]:

$$R_k(T) = R_0 \left(1 + \frac{2}{3} \alpha T\right), \quad (1)$$

где R_0 – сопротивление в области стягивания контактного мостика в ненагретом состоянии; α – температурный коэффициент сопротивления; T – температура контакта.

На основании трубной модели силовых линий электрического тока по аналогии между течением по трубе вязкой жидкости и течением электрического тока по проводу [4] полное электрическое сопротивление контакта можно определить как сумму:

$$R_0 = R_r + R_{mr}, \quad (2)$$

где R_r – геометрическая составляющая полного сопротивления контакта, определяющаяся искривлением линий электрического тока при прохождении через зерна порошка; R_{mr} – сопротивление, обусловленное микрогеометрией контакта, которое создается искривлением линий электрического тока при прохождении через микроконтакты шероховатости.

При МЭУ силовые линии электрического поля проходят через частицы порошка между инструментом-ротором и обрабатываемой поверхностью (рис. 1). Геометрическую составляющую контактного сопротивления по аналогии с [4] можно определить по формуле

$$R_r = \int_a^b \frac{\rho dx}{S(x)}, \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление; $S(x)$ – площадь сечения трубки электрического тока.

Как следует из схемы распределения линий тока, при увеличении кривизны трубки удлиняется путь тока от инструмента к поверхности детали, а следовательно, возрастает электрическое сопротивление.

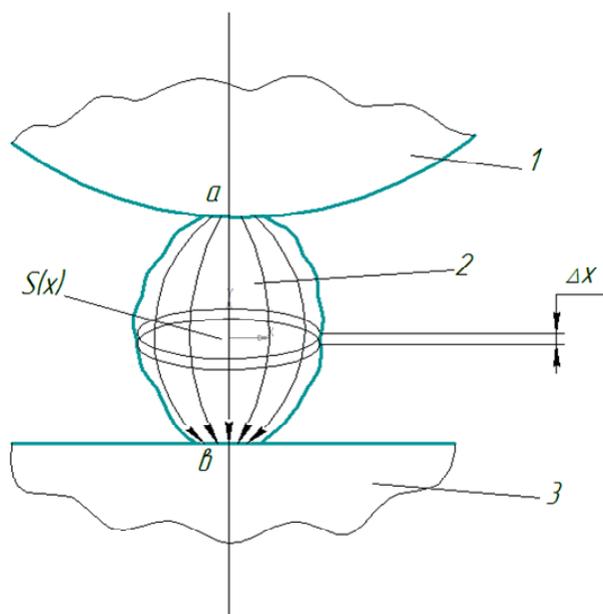


Рис. 1. Схема распределения линий тока в частице ферромагнитного порошка:
1 – инструмент-ротор; 2 – частица порошка; 3 – обрабатываемая деталь

Феррообразивные частицы порошка имеют сложную геометрическую форму. В результате при прохождении тока можно наблюдать искривление линий тока, создающее дополнительное сопротивление. Приняв допущение о симметричной форме зерен порошка близкой к эллипсоиду, в первом приближении частицу ферромагнитного порошка можно рассматривать в виде двух усеченных конусов, примыкающих друг к другу большими основаниями (рис. 2). Частица такой вытянутой формы в магнитном поле будет располагаться своей осью в направлении линий магнитного поля, т. е. замыкать контакт между инструментом и деталью вдоль своей большей оси. Для половины частицы порошка сопротивление можно найти по формуле

$$r_r = \int_0^{\Delta/2} \frac{\rho dx}{S(x)}, \quad (4)$$

где Δ – максимальный размер, т. е. зернистость феррообразивного порошка.

Площадь сечения частицы порошка как переменную величину находим по формуле

$$S(x) = \frac{\pi d^2(x)}{4}. \quad (5)$$

Тогда выражение (4) можно представить в виде

$$r_r = \int_0^{\Delta/2} \frac{4\rho dx}{\pi d^2(x)} = \frac{4\rho}{\pi} \int_0^{\Delta/2} \frac{dx}{d^2(x)}. \quad (6)$$

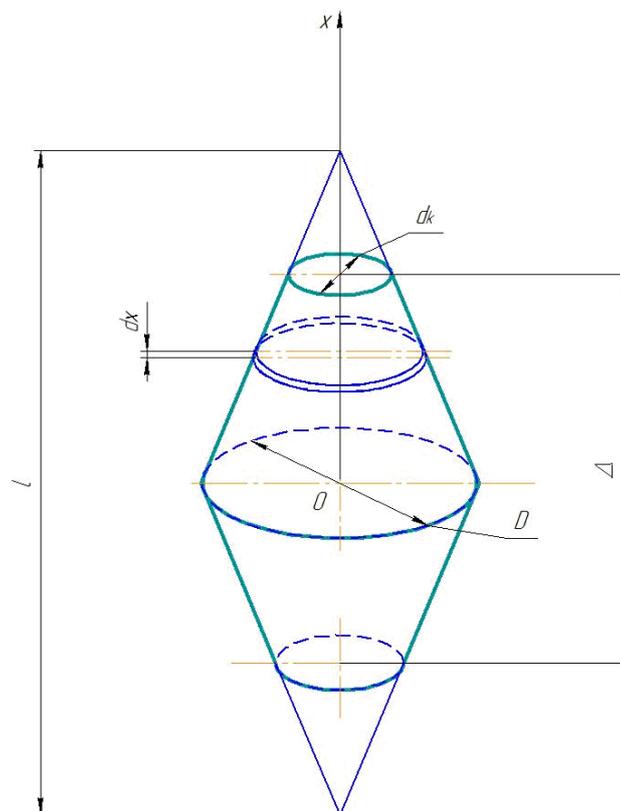


Рис. 2. Модель частицы порошка к определению геометрической составляющей контактного сопротивления

Из схемы на рис. 2 можно записать равенство тангенсов:

$$\frac{D/2}{l/2} = \frac{d(x)/2}{l/2 - x}, \quad (7)$$

откуда

$$d^2(x) = \frac{4D^2(l/2 - x)^2}{l^2}. \quad (8)$$

Подставляя выражение (8) в формулу (6), получим:

$$r_r = \frac{4\rho}{\pi} \int_0^{\Delta/2} \frac{l^2 dx}{4D^2(l/2 - x)^2} = \frac{\rho l^2}{\pi D^2} \int_0^{\Delta/2} \frac{dx}{(l/2 - x)^2} = \frac{2\rho l \Delta}{\pi D^2(l - \Delta)}. \quad (9)$$

Принимая во внимание контактную площадь частицы порошка, т. е. меньшее основание конуса, и возвращаясь к равенству тангенсов, можно записать:

$$\frac{d_k}{2} = \frac{D(l/2 - \Delta/2)}{l}, \quad \text{или} \quad d_k = \frac{D(l - \Delta)}{l}. \quad (10)$$

Сделав подстановку в результат (9), получим

$$r_r = \frac{2\rho \Delta}{\pi D d_k}. \quad (11)$$

Тогда геометрическую составляющую полного сопротивления контактного мостика из выражения (2) можно определить:

$$R_{\Gamma} = \frac{4\rho\Delta}{\pi D d_k}. \quad (12)$$

Контактную площадь частицы порошка диаметром d_k можно рассматривать как площадь пятна контакта абразивной частицы определенного радиуса скругления при известной нагрузке на зерно [5].

При МЭУ зерна ферроабразивного порошка контактируют преимущественно с выступами неровностей поверхности (инструмента и детали), которые являются концентраторами магнитного поля. Следовательно, сопротивление, обусловленное микрогеометрией контакта $R_{\text{мг}}$ [см. формулу (2)], будет определяться сопротивлением неровностей поверхности инструмента и детали, с которыми в данный момент времени контактирует единичное зерно ферроабразивного порошка. За основу примем модель единичной неровности поверхности в виде пирамиды с квадратным основанием [4]. Так как материал ферропорошка более тугоплавкий по сравнению с материалом обрабатываемой детали, то при нагреве в первую очередь будут оплаиваться микронеровности поверхности детали. Тогда на начальном этапе площадь их контакта будет определяться контактной площадью частицы порошка диаметром d_k (рис. 2). Поэтому целесообразно для дальнейшего анализа представить единичную микронеровность поверхности в виде эквивалентного конуса (рис. 3).

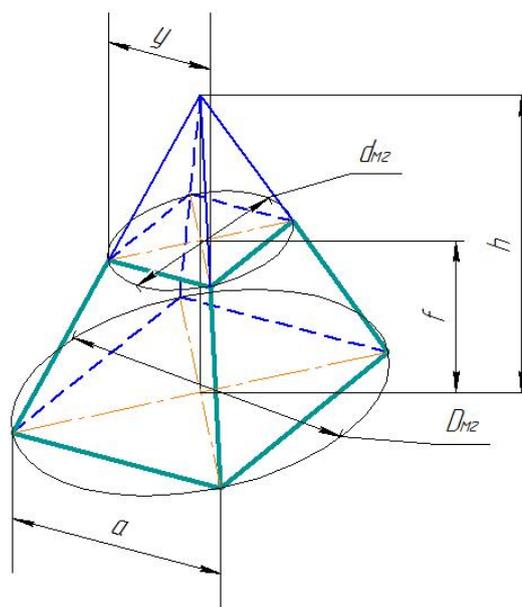


Рис. 3. Моделирование шероховатости к расчету электрического сопротивления микронеровностей поверхности

Из формулы (4) по аналогии с (12) находим электрическое сопротивление контактирующих с частицей порошка двух микронеровностей (инструмента и детали):

$$R_{\text{мг}} = \frac{4\rho_{\text{м}} 2f}{\pi D_{\text{мг}} d_{\text{мг}}} = \frac{8\rho_{\text{м}} f}{\pi D_{\text{мг}} d_{\text{мг}}}, \quad (13)$$

где ρ_m – удельное сопротивление материала микронеровности, т. е. материала ротора и обрабатываемой поверхности; f – высота микронеровности при ее частичной деформации; $D_{\text{мг}}$ и $d_{\text{мг}}$ – эквивалентный диаметр основания и вершины микронеровности, соответственно.

Выразим входящие в формулу (13) геометрические параметры через известные параметры неровностей при различных способах обработки поверхности [4].

Из равенства сечений квадрата и круга:

$$a^2 = \frac{\pi D_{\text{мг}}^2}{4}, \quad (14)$$

находим

$$D_{\text{мг}} = \frac{2a}{\sqrt{\pi}}. \quad (15)$$

Так как оплавление вершины микронеровности происходит раньше оплавления частицы порошка, логично номинальной поверхностью их контакта считать контактную площадь ферромагнитной частицы, т. е.

$$d_{\text{мг}} = d_k. \quad (16)$$

Из подобия треугольников (рис. 3) имеем соотношение

$$\frac{D_{\text{мг}}/2}{h} = \frac{d_{\text{мг}}/2}{h-f}. \quad (17)$$

Отсюда находим:

$$f = \frac{(D_{\text{мг}} - d_{\text{мг}})h}{D_{\text{мг}}}. \quad (18)$$

Подставляя в (18) значения $D_{\text{мг}}$ и $d_{\text{мг}}$ и произведя необходимые преобразования, получим:

$$f = h \left(1 - \frac{\sqrt{\pi} \cdot d_k}{2a} \right). \quad (19)$$

Полученные выражения (15), (16) и (19) подставим в формулу (13) и выполним соответствующие преобразования. В результате получим выражение для определения электрического сопротивления микрогеометрических неровностей:

$$R_{\text{мг}} = \frac{2\rho_m h}{a} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot d_k} - \frac{1}{a} \right) = \frac{2\rho_m h}{a} \left(\frac{1,13}{d_k} - \frac{1}{a} \right). \quad (20)$$

В результате полное электрическое сопротивление контактного замыкания определяется следующим выражением:

$$R_o = \frac{4\rho\Delta}{\pi D d_k} + \frac{2\rho_m h}{a} \left(\frac{1,13}{d_k} - \frac{1}{a} \right). \quad (21)$$

Параметры, входящие в полученное выражение, задаются изначально при разработке технологии МЭУ или принимаются по справочным данным технических источников. Однако ряд параметров формулы (21) характеризуется значительной неопределенностью. Так, геометрическая и физическая неопределенность характерна для размеров и свойств ферроабразивных частиц порошка, параметров шероховатости поверхности и др. А структурная нестабильность контактирующих поверхностей обуславливает соответствующую физическую неопределенность – разброс значений их удельного сопротивления. Принятые в работе функциональные и геометрические модели и аналогии также вносят определенную неоднозначность в полученные результаты.

В целом процесс магнитно-электрического упрочнения представляет собой сложную совокупность физических и химических явлений, протекающих в микрообъемах металла [2]. Электрофизические микроявления в контактной зоне практически сложно поддаются управлению и регулированию производственными техническими средствами. Поэтому в технологии МЭУ большое значение придается стабилизации процесса на основе теоретического анализа влияния отдельных факторов и экспериментального исследования технологических режимов.

Заключение

Таким образом, представленные результаты исследования позволяют оценить роль геометрических и физических факторов процесса в формировании электрического сопротивления контакта, что в значительной степени определяет энергетику МЭУ. Полученные зависимости предназначены не столько для расчетов, сколько необходимы для более наглядного представления взаимосвязи параметров, определяющих контактные процессы в рабочей зоне. Теоретические формулы показывают возможные неопределенности и пути их преодоления с целью управления электроконтактными явлениями в процессе МЭУ.

Литература

1. Влияние технологических факторов на показатели процесса магнитно-электрического упрочнения / М. П. Кульгейко [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2003. – № 1. – С. 48–52.
2. Механизм формирования поверхностного слоя при магнитно-электрическом упрочнении / М. П. Кульгейко [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2000. – № 1. – С. 19–25.
3. Дорожкин, Н. Н. Импульсные методы нанесения порошковых покрытий / Н. Н. Дорожкин, Т. М. Абрамович, В. К. Ярошевич. – Минск : Наука и техника, 1985. – 279 с.
4. Кочергин, К. А. Контактная сварка / К. А. Кочергин. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 240 с.
5. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 328 с.

Получено 08.09.2016 г.