

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ачкасов К.А., Бугаев В.Н. Повышение надежности ремонт дизельной топливной аппаратуры // Тезисы докладов на научно-технической конференции стран-членов СЭВ и СФРЮ. – М: ЦНИИТЭИ, 1983.

2. Константинов В.М. Системный подход к проектированию получения защитных покрытий из диффузионно-легированных сплавов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2002. – №7.

3. Боярский В.Н., Казанцев С.П., Кодинцев Н.П. Способ восстановления и упрочнения стальных деталей. Патент на изобретение №2154695. Б.И. №23, 2000 г.

4. Прогрессивные методы химико-термической обработки // Под ред. Ю.М. Лахтина. – М.: Машиностроение, 1972.

### **ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ**

**А.В. Миранович, ассистент;**

**В.В. Тризна; Д.В. Счастный, аспирант**

*УО «БГАТУ», РУП «Завод Минскагропромаш»*

(г. Минск, Республика Беларусь)

### **Formation of covers at electromagnetic welding**

There was examined the mechanism of materials interaction of electromagnetic welding. It is showed, that under the qualitative estimation of their relative influence on the process the solution of the problem can be limited by examining thermophysical and physical chemical phenomena occurred whilst coating and base materials consolidation.

Модификация поверхности заготовки при электромагнитной наплавке (ЭМН) происходит в рабочей зоне установки, реализующей процесс [1]. Рабочая зона – это область пространства между обрабатываемой поверхностью и торцевой поверхностью полюсного наконечника. При ЭМН в рабочую зону подается ферропорошок, частицы которого ориентируются вдоль силовых линий магнитного поля, образуя многомикроэлектродную систему токопроводящих цепочек. При наложении электрического поля на межэлектродный промежуток происходит замыкание электрической цепи «полюсный наконечник – цепочки-микроэлектроды – заготовка», в резуль-

тате чего происходит нагрев и плавление цепочек-микроэлектродов. Капли расплава ферропорошка под воздействием электромагнитных сил, направленного движения газов и поверхностного натяжения осаждаются на поверхность заготовки, формируя покрытие из жидкой фазы.

Установлено [2], что через  $10^{-3}$  с от момента короткого замыкания электрической цепи скорость частиц составляет 15 – 18 м/с. Если считать, что энергия одиночного разряда мгновенно распределяется вдоль его оси и переходит без потерь в энергию ударной волны, то скорость возникшей ударной волны может быть определена по зависимости [3]

$$w = \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda W}{\rho_0} \right)^{1/4} \cdot \tau^{-(1/2)},$$

где  $\lambda$  – коэффициент, зависящий от типа волны;  $W$  – энергия разряда;  $\tau$  – текущее время;  $\rho_0$  – начальная плотность среды.

Скорость движения частиц материала ферропорошка  $V$  отличается по величине от скорости фронта ударной волны согласно [4]

$$V = \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \right) w,$$

где  $\rho$  – плотность среды после прохождения фронта ударной волны.

В работе [1] показано, что при ЭМН плавление цепочек-микроэлектродов, контактирующих с обрабатываемой поверхностью, в рабочей зоне происходит дискретно за счет возникновения кратковременного электрического разряда на каждом из них. Возникновение и протекание дугового разряда определяется комплексным воздействием электрических, магнитных, химических и других факторов. Дуга стремится гореть в месте наименьшего расстояния между обрабатываемой заготовкой и торцевой поверхностью наконечника при минимальном сопротивлении и падении напряжения. Установлено [2], что скорость возникновения дугового разряда и время его существования оказывают большое влияние на производительность процесса ЭМН, глубину зоны термического влияния и равномерность распределения капель расплава материала ферропорошка по обрабатываемой поверхности. Частота возникновения импульсов электрических разрядов зависит от силы разрядного тока, напряжения источника, размеров частиц ферропорошка, скорости вращения заготовки, состава реакционного газа и других факторов [5].

Необходимо отметить, что длительность и частота возникновения импульсов электрических разрядов непостоянны. Возникновение импульса на одной из цепочек по времени никогда не совпадает с моментом возникновения на других. В большинстве случаев воз-

никающий импульс подавляет течение дуговых разрядов на соседних цепочках-микроэлектродах, при одновременном возникновении нескольких их амплитуды меньше амплитуды тока одиночного. В паузах между дуговыми разрядами сила разрядного тока вначале падает до минимального значения, а затем снова нарастает. Повторный импульс может произойти в системе без замыкания, путем ионизации газов в рабочей зоне действием дугового разряда на соседней цепочке [5].

Процесс плавления цепочек-микроэлектродов для многомикроэлектродной системы не отличается от плавления одиночной цепочки-микроэлектрода. В то же время поведение многомикроэлектродной системы имеет некоторые особенности. Так, система может быть настроена таким образом, что в рабочей зоне будет преобладать одиночное пульсирующее горение цепочек-микроэлектродов. В этом случае процесс ЭМН идет неустойчиво, формирование наплавленного слоя осуществляется нестабильно, расход электроэнергии минимальный, производительность невысокая. Однако, когда в рабочей зоне преобладает групповое перекрываемое горение цепочек-микроэлектродов, процесс осуществляется устойчиво, обеспечивается стабильность формирования покрытия.

При ЭМН температурно-временной фактор влияет на образование новых фаз в системе «покрытие-основа» (см. рис. 1) [6], определяющих физико-механические и эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали.

При формировании покрытия ЭМН источником теплового воздействия является энергия электрического разряда. Поскольку электрическое сопротивление цепочек переменное по длине, то плотность проходящего по ней тока не одинакова, что обуславливает разный градиент температур в зонах контакта частиц ферропорошка между собой и с поверхностями заготовки и полюсного наконечника.

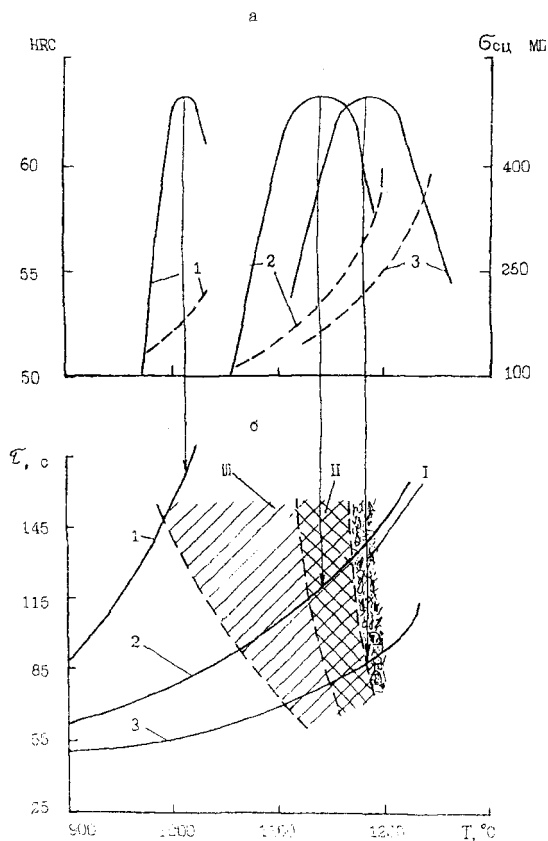
Тепловая мощность  $q_{\Sigma}$ , расходуемая на нагрев и плавление цепочки-микроэлектрода, определяется мощностью  $q_{\delta}$ , выделяющейся по его длине от проходящего тока, и эффективной мощностью  $q_{\text{эд}}$  электрической дуги [2]

$$q_{\Sigma} = q_{\delta} + q_{\text{эд}} = I^2 R_{\text{эц}} + \eta_{\Sigma} IU,$$

где  $I$  – сила тока;  $R_{\text{эц}}$  – сопротивление цепочки-микроэлектрода;  $\eta_{\Sigma}$  – эффективный КПД нагрева дугой;  $U$  – напряжение дуги.

При наплавке цепочка-микроэлектрод состоит из  $n$  частиц ферропорошка с сопротивлениями  $R_1, \dots, R_i, \dots, R_n$  между которыми существуют дополнительные контактные сопротивления  $R_{12}, \dots, R_{i(i+1)}, \dots, R_{(n-1)n}$ .

Установлено [2, 5, 6], что тепловые процессы ЭМН протекают при высоких температурах, где существенную роль играет дуговой электрический разряд, сопровождающийся процессами нагрева, плавления и кристаллизации частиц ферропорошка.



Влияние температуры  $T$ : а – на твердость HRC (сплошные линии) и прочность сцепления покрытия с основой  $\sigma_{сш}$  (штриховые линии); б – на образование областей спекания (I), смешанных (II) и литых (III) структур при скоростях электронагрева 6,25 °C/c (1), 12,50 °C/c (2), 18,75 °C/c (3)

Дальнейшее развитие ЭМН требует изучения условий взаимодействия частиц материала ферропорошка с материалом упрочняемой или восстанавливаемой поверхности детали в процессе формирования покрытия. Так, расчет цикла термического процесса кристаллизации жидкой фазы частицы порошка представляет значительный практический и теоретический интерес, поскольку температурный уровень взаимодействующих веществ определяет адгезию, плотность покрытия и термические напряжения, возникающие в системе «покрытие – основа».

Одной из важных задач является определение времени существования контакта «частица порошка – основа» при температурах достаточных для активации, так как это обеспечивает образование прочных связей жидкой капли с основой. Для ЭМН процесс соединения определяется тремя основными факторами: температурой контакта  $T_k$ , длительностью взаимодействия  $t_k$  и приложенным давлением  $P$ , под действием которого частицы деформируются и соединяются с основой.

Взаимная независимость поведения частиц порошка на основе при ЭМН существенно облегчает анализ причин образования покрытия, практически сводя проблему к теплофизическим и физико-химическим явлениям при затвердевании жидкой фазы материала покрытия. В отличие от компактного материала, имеющего межфазные и межфазовые границы, в наплавленном покрытии имеются два типа границ, оказывающих существенное влияние на свойства покрытия: границы между деформированными частицами и границы, разделяющие покрытие с основой.

Механизм соединения покрытия с основой в настоящее время еще достаточно не изучен. Поэтому вопрос о природе сил связи между покрытием и основой остается открытым, и их взаимодействие условно разделяют на следующие последовательные стадии:

- образование контакта – физическое сближение жидкой фазы ферропорошка и основы на расстояние, достаточное для химического взаимодействия;
- активация и химическое взаимодействие атомов, приводящее к установлению прочной химической связи между ними, определяемой квантовыми процессами электрического взаимодействия;
- релаксационные процессы – рекристаллизация, гетероидифузия, образование новых фаз.

Первые две стадии протекают на поверхности, а последняя – в объеме материала.

При определенных условиях процесс образования прочной химической связи между жидкой фазой порошка и основой можно представить как топохимическую мономолекулярную реакцию и описать с помощью кинетического уравнения типа Аррениуса [7]

$$t_a = -\frac{1}{\partial(P, C)} \ln \left( 1 - \frac{N}{N_0} \right) \exp \left( \frac{E_0}{kT} \right),$$

где  $t_a$  – время, необходимое для того, чтобы прореагировало  $N$  атомов на поверхности основы;  $N_0$  – общее число атомов на поверхности основы;  $E_0$  – энергия активации, которой должны обладать атомы материала поверхности основы;  $T$  – температура, при которой происходит процесс;  $\partial$  – частота собственных колебаний атомов ( $P$  – давление,  $C$  – величина, характеризующая состав и свойства материала);  $k$  – постоянная Больцмана.

Из этого уравнения можно вычислить величину относительной адгезии двух материалов

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \exp \left[ -\frac{\partial_a}{\exp(E_0/kT)} \right].$$

Установлено [7], что одним из главных параметров, характеризующих кинетику протекания химической реакции, является температура, установившаяся в контакте «жидкая фаза порошка – твердая основа». Скорость реакции зависит от условий активации атомов основы, так как все атомы расплавленной частицы активизированы.

Кинетическое уравнение скорости реакции в дифференциальной форме можно представить зависимостью

$$\frac{dX}{dt} = (N_0 - X) \partial \exp \left( -\frac{E_0}{kT_k} \right) \exp \left( \frac{S}{k} \right),$$

где  $X$  – число атомов, прореагировавших за время  $t$ ;  $T_k$  – температура контакта;  $S$  – энтропия активации, учитывающая вероятность  $W_1$  благоприятной ориентации возбужденных атомов вещества в зоне химического взаимодействия и вероятность  $W_2$  совпадения моментов и их возбуждения ( $S = k \ln W_1 \cdot W_2$ ).

В случае наплавки ферропорошка на основе железа и легирующих элементов конфигурационная энтропия мала, поэтому энтропийный показатель можно принять равным единице.

Тогда имеем

$$\frac{dX}{dt} = (N_0 - X) \partial \exp \left( \frac{E_0}{kT_k} \right).$$

После интегрирования (при  $T_k = const$ ) в пределах: при  $t = 0$ ,  $X = 0$  и при  $t = t_a$ ,  $X = N$  получим длительность процесса активации реакции, в течение которой прореагирует  $N$  атомов

$$t_a = \frac{1}{\rho} \ln \left( \frac{N_0}{N_0 - N} \right) \exp \left( \frac{E_0}{kT_k} \right) = -\frac{1}{\rho} \ln \left( 1 - \frac{N}{N_0} \right) \exp \left( \frac{E_0}{kT_k} \right)$$

Рассматривая взаимодействие материалов при плазменном напылении и принимая взаимную независимость поведения частиц можно ограничиться решением задачи оценки теплофизических и физико-химических явлений при затвердевании частицы [8]. В указанной работе представлена схема, поясняющая принцип использования времени  $t_a(T_k, P)$ . Зависимости  $t_a(T_k, P)$  характеризуют время протекания реакции, необходимое для соединения частиц на данную величину адгезии  $N(t_a)N_0$  в зависимости от  $T_k$  и  $P$ .

Анализ результатов исследований [8] показывает, что и для ЭМН кинетика образования связей описывается топохимическими реакциями. Определяющими факторами в процессе формирования химических связей покрытия основы являются температура, длительность взаимодействия, давление, а также свойства материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Наука і тэхніка, 1995.
2. Ящерицын П.И., Кожуро Л.М., Ракомсин А.П. и др. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле. – Мн.: ФТИ НАН Беларуси, 1997.
3. Физические процессы при электроэрозионной обработке металлов // Труды ЭНИМС / Под ред. А.В. Владзиевского. – М.: ЭНИМС, 1967.
4. Коул Р. Подводные взрывы. – М.: ИЛ, 1950.
5. Ракомсин А.П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / Под ред. П.А. Витязя. – Мн.: Парадокс, 2000.
6. Акулович Л.М. Технологические основы термомеханического упрочнения и восстановления деталей в электромагнитном поле. Дис. ... д-р. техн. наук: 05.03.01. – Мн.: 2000.
7. Кудинов В.В., Рыкалин Н.Н., Шорщоров М.Х. К оценке энергетических условий образования соединения между расплавленными частицами и поверхностью твердого тела // ФХОМ. – 1968. – № 4.
8. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. – М.: Наука, 1977.