

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Л. С. ПАЛАТНИК

**ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКЕ
МЕТАЛЛОВ И ОПЫТ УСТАНОВЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ**

(Представлено академиком Г. С. Ландсбергом 29 I 1953)

Нами исследовались структурные превращения в поверхностном слое различных металлов, подвергавшихся электроискровой обработке в атмосфере воздуха, при значительном числе (~ 100) сочетаний разноименных электродов (см. табл. 1). Условия электроискровой обработки для большинства образцов: напряжение 110 в, ток короткого замыкания ~ 2 а, емкость от 20 до 280 мф.

По данным рентгеноструктурного анализа (см. табл. 1), а также измерений микротвердости (см. табл. 2), спектрального и микроанализа, мы обнаружили следующие виды переноса и взаимодействия веществ электродов при электроискровой обработке металлов: I. Образование покрытий на катоде из вещества анода. II. Образование сплавов (смесей, твердых растворов или интерметаллических соединений) в поверхностном слое катода в результате взаимной диффузии элементов катода и анода. III. Отсутствие переноса на катод; перенос вещества с катода на анод (с образованием покрытий, либо сплавов). Кроме того, в некоторых случаях наблюдалось окисление электродов либо продуктов их переноса и взаимодействия (см. табл. 1). При перемене полярности электродов, а также при изменении других условий электроискровой обработки вид взаимодействия в большинстве случаев не меняется.

Анализ экспериментальных данных приводит к следующим выводам:

1) При проскакивании искры на поверхности электрода возникает «точечный» тепловой источник, из которого распространяются локальные процессы разогревания, плавления и испарения в «рабочем объеме» электрода. Об этом свидетельствует аксиально-симметричная форма лунки, образующейся при единичном искровом разряде.

2) Оценка времени τ локального разогрева «рабочего объема» электрода дает: $\tau \cong L^2/\kappa > 10^{-2}$ сек. $\gg \tau_0$, где L — диаметр лунки $\sim 10^{-1}$ см, κ — температуропроводность (для большинства металлов $0,1 < \kappa < 1$), τ_0 — продолжительность искрового разряда $\sim 10^{-4}$ сек. (3). Следовательно, фазовые превращения в «рабочем объеме» электрода происходят практически уже после окончания электрического разряда, а заметная «гомогенизация» сплава в поверхностном слое электрода толщиной x возможна только в парообразном или жидком, но не в твердом состоянии — при коэффициентах диффузии не меньше $D_0 \sim \frac{x^2}{\tau} \sim \frac{x^2}{L^2} \kappa \sim 10^{-6} - 10^{-4}$ см²/сек, где $x \sim 10^{-4} - 10^{-3}$ см (по данным рентгеновского анализа).

Таблица 1

Данные рентгеновского анализа кристаллических фаз, обнаруженных в поверхностном слое металлов (на катоде) после электроискровой обработки различными электродами

| Обрабатывающий электрод (анод) | Обрабатываемый металл (катод) | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------|--|---------|----------------------|----|-------|
| | Mg | Al | Fe | Ni | Cu | Zn | Cd | Sn | Pb |
| Be | | Al | FeBe ₂ | | Cu ₅ Be ₈ графит +Cu | | | | |
| C (графит) | Mg | Al ₄ C ₃ | γ, Fe ₃ C | | | | Cd | | |
| Mg | | | Mg, MgO | Mg | Mg α, | | Cd | | Pb |
| Al | MgAl ₂ O ₄ | | FeAl | | (Cu ₉ Al ₄) | Zn, ZnO | Cd, (CdO) | Sn | Pb |
| Cr | | | γ | | Cr | | Cd | Sn | Pb |
| Fe | Fe+Mg | | | γ | Cu+Fe | | Cd | Sn | Pb |
| Co | Co+Mg, MgO | | γ | β | γ* | | Cd | Sn | Pb |
| Ni | | | γ | | α | | Cd | Sn | Pb |
| Cu | Mg | ω,(CuAl ₂) | Cu+Fe | α | | Zn, ZnO | Cd | Sn | Pb |
| Zn | | Zn | Zn, (ZnO) | Zn | Zn, ZnO | | Cd | Sn | |
| Mo | Mo+Mg, MgO | Al | γ* | α | | Zn, ZnO | Cd | | |
| Ag | Mg, MgO | | Ag+Fe | Ag+Ni | Ag+Cu | | Cd | | |
| Cd | Cd, CdO | Cd | Cd | Cd | Cd | Cd | | Sn | Pb+Cd |
| Sn | Sn, SnO ₂ | Sn | Sn, SnO ₂ | Sn | Sn, SnO ₂ | | Sn, SnO ₂ | | |
| Sb | | | Sb | | Sb | | | | |
| W | | Al | γ* | α | | | | | |
| Pb | Pb, (PbO ₂) | Pb | Pb | Pb | Pb | | | | |
| Bi | | | Bi | Bi | Bi | | Cd+Pb | | |

Примечание. Знак + соответствует образованию механической смеси веществ анода и катода в поверхностном слое катода; греческими буквами обозначены твердые растворы, значком * — пересыщенные растворы.

3) Наблюдаемые метастабильные фазы (состояния) образуются в результате «точечной» закалки⁽²⁾.

4) После электроискровой обработки фазовый состав поверхностного слоя образца лишь в частных случаях приближается к предписываемому диаграммой состоянию системы, образуемой из элементов анода и катода, поскольку получаемый результат зависит от кинетики изменения температуры и агрегатных состояний, кинетики диффузионных процессов и т. п. в «рабочих объемах» обоих электродов.

Выберем в качестве приближенного критерия переноса и взаимодействия (типа I, II и III) отношение τ_1/τ_2 где τ_2 и τ_1 — периоды, соответствующие начальным стадиям возникновения очагов плавления и

Таблица 2

Микротвердость образцов до и после электроискровой обработки

| Микротвердость H_{XB}^{20} , кг/мм ² | Материал электрода | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|----|----|----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Fe | Pb | Cd | Zn | Sb | графит | Cr | W | Be | Al | Cu |
| Электродов до обработки | 140 | 12 | 30 | 60 | 110 | — | — | 350 | 320 | 60 | 100 |
| Образцов Fe (катода) после обработки | — | 20 | 70 | 75 | 120 | 800 | 400 | 800 | 700 | 680 | 160 |

интенсивного испарения в «рабочих объемах» электродов 2 и 1. Приближенную оценку отношения τ_1/τ_2 можно дать на основании вероятностных соображений (флуктуационной теоремы (4)) и теории размерностей. При этом истинная форма поверхности и детали ее геометрии не играют существенной роли, когда для обоих электродов выполняются неравенства: $l \ll b \ll S$, где S — размер всей поверхности электрода, l — размер отдельного «источника» (в месте проска-

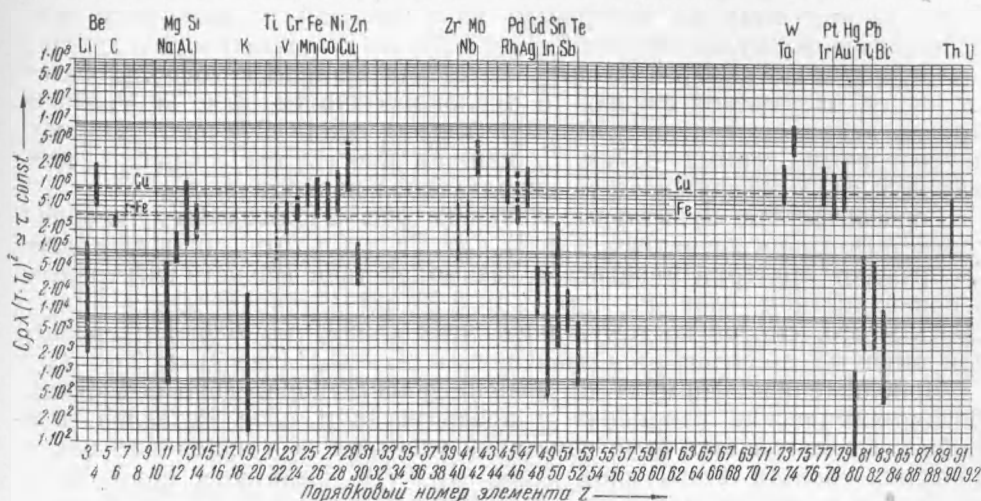


Рис. 1. Графическое изображение критерия взаимодействия при электроискровой обработке

кивания искры), b — расстояние между «источниками» («период» неоднородности) $\leq L$. Время τ выражается приближенной формулой:

$$\tau \sim \frac{L^2}{\alpha} \cong \frac{c_p}{\lambda} \left(\frac{\lambda V f}{q_0} \sqrt{(T - T_0)^2} \right)^2, \quad (1)$$

где c_p — теплоемкость единицы объема металла, λ — коэффициент теплопроводности, q — функция распределения источников тепла, T — температурное поле, T_0 — температура среды (начальная температура электрода), $V f \sim l$. Отношения $q_0 / V f$ имеют один и тот же порядок для анода и катода, следовательно:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} \cong \frac{c_{p1} \lambda_1 (T_1 - T_0)^2}{c_{p2} \lambda_2 (T_2 - T_0)^2}. \quad (2)$$

Формула (2) может служить приближенным критерием* вышеуказанных трех видов взаимодействия между любыми двумя электродами: I. При $\tau_1 \ll \tau_2$ пары 1-го электрода конденсируются, образуя покрытие, на твердой поверхности 2-го электрода, так как интенсивное испарение 1 наступает значительно раньше, чем плавление 2. II. При $\tau_1 \sim \tau_2$ возможно образование сплава между 1 и 2 в поверхностном слое 2, так как процессы интенсивного испарения 1 и испарения 2 происходят одновременно. III. $\tau_1 \gg \tau_2$ соответствует III виду взаимодействия. Вероятность образования сплавов увеличивается по мере ослабления неравенств I и III. При этом состав поверхностного слоя на электроде 2 окажется ближе к составу 1 при $\tau_1/\tau_2 < \sim 1$ и к составу 2 при $\tau_1/\tau_2 > \sim 1$.

* Предлагаемый качественный критерий имеет эмпирический характер, хотя и подтверждается некоторыми общими теоретическими соображениями.

На рис. 1, на основании формулы (2) и приведенных в литературе значений величин c , ρ , λ , (τ) , T_k и T_s (5), дано графическое изображение критерия переноса и взаимодействия между электродами из различных химических элементов: по оси абсцисс отложены порядковые номера Z элементов; широкие вертикальные линии соответствуют (в логарифмическом масштабе) интервалу значений $c\rho\lambda(T - T_0)^2 \cong \tau \cdot \text{const}^*$, причем $T_s \leq T \leq T_k$, где T_s и T_k — температуры плавления и кипения; более узкие — тому же интервалу, но с заменой по известным приближенным формулам значений $c\lambda$ на σ/Z (где σ — электропроводность, Z — порядковый номер элемента), которыми пришлось воспользоваться ввиду отсутствия данных о теплопроводности для Ti, V, Mn и других металлов; вертикальные пунктирные линии отвечают разбросу литературных данных о λ , σ , T_s или T_k . Как видно из рис. 1, для функции $\tau(Z)$ обнаруживается определенная периодичность.

Горизонтальные пунктирные линии на рис. 1 проведены на уровне, соответствующем значениям $T = T_s$ для Fe и Cu. Эти линии наглядно изображают критерий переноса и взаимодействия веществ электродов в поверхностном слое Fe или Cu: I, II или III тип переноса будет иметь место, смотря по тому, ниже этих линий, на близком уровне или выше их располагаются значения $c\rho\lambda(T_i - T_0)^2$ (где $T_s \ll T_i < T_k$).

Приближенная формула (2) вполне удовлетворительно объясняет физико-химические изменения в поверхностном слое металлов для любых исследованных нами сочетаний электродов и изменение механических свойств этого слоя (табл. 1, 2 (2)). Например, при $\tau_1 \ll \tau_2$ на Fe, Cu и других металлах образуются покрытия Bi, Cd, Pb и пр.); при $\tau_1 \sim \tau_2$ образуются сплавы: твердые растворы (Fe — C, Fe — Cr, Fe — Co, Fe — Ni, Cu — Co, Cu — Ni и пр.), интерметаллические соединения (FeBe₂, FeAl, Fe₃C, Cu₅Be₈, Al₁₃C₃ и пр.) либо двухфазные смеси (Fe + Cu, Fe + Ag, Ni + Ag — ср. диаграммы состояний (6)); при $\tau_1 \gg \tau_2$ переноса Fe, Co, Ni и других элементов в поверхностный слой образцов Sn, Pb, Cd не наблюдается.

Критерий (2) удовлетворительно объясняет данные производственного опыта. Например, эффективность упрочнения пористыми (металло-керамическими) электродами выше, чем сплошными такого же состава; производительность резки закаленной стали выше, чем высокоотпущенной или отожженной, и т. п. Данный критерий указывает дополнительные пути для дальнейшего повышения эффективности электроискровой обработки черных и цветных металлов и сплавов, противокоррозионной их защиты, а также для уменьшения эрозии электрических контактов, повышения чувствительности и точности спектрального анализа сплавов и т. п. Например, за счет уменьшения теплопроводности анода, изменения его структурного состояния, состава или формы (путем закалки, химико-термической обработки, создания повышенной микропористости и т. п.) можно увеличить перенос соответствующих химических элементов в требуемом направлении — от анода к катоду, образование метастабильных интерметаллических фаз и твердых растворов, повышающих прочность, стойкость (2) и т. п., предотвращать (или усиливать) «вторичные» — окислительные процессы в поверхностных слоях электродов и т. п.

Харьковский государственный университет
им. А. М. Горького

Поступило
25 II 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко, Электрическая эрозия металлов, в. 1, 1944; в. 2, 1946. ² Л. С. Палатник, Изв. АН СССР, сер. физ., 15, 70, 467 (1951). ³ А. Л. Лившиц, Диссерт., Харьк. политехнич. ин-т, 1950. ⁴ G. H. Wannier, J. appl. Phys., 19, 1020 (1948). ⁵ Свойства металлов и сплавов (справочник), 1949. ⁶ М. Хансен, Структуры бинарных сплавов, 1 и 2, 1941.

* Величина const зависит от условий электроискровой обработки.