



6. ГОСТ 52335-2005. Продукция винодельческая. Термины и определения. – М. : Стандартиформ, 2009. – 5 с.
7. ГОСТ 13192-73. Вина, виноматериалы и коньяки. Метод определения сахаров. – М. : Стандартиформ, 2011. – 9 с.
8. ГОСТ 32114-2013. Продукция алкогольная и сырье для ее производства. Методы определения массовой концентрации титруемых кислот. – М. : Стандартиформ, 2013. – 5 с.
9. ГОСТ 32000-2012. Продукция алкогольная и сырье для ее производства. Метод определения массовой концентрации приведенного экстракта. – М. : Стандартиформ, 2014. – 6 с.
10. ГОСТ Р 51293-99. Идентификация продукции. Общие положения. – М. : Стандартиформ, 2008. – 7 с.
11. Лунина, Л. В. Разработка способов оценки качества и идентификации виноградных вин и винных напитков / Л. В. Лунина. // Автореф. дисс...канд. техн. наук: 05.18.15, 05.18.01. – Краснодар, 2005. – 22 с.
12. Овчинников, Е. П. О факторах, влияющих на экстрактивность белых столовых вин и связи экстракта с качеством вин / Е. П. Овчинников // Виноградарство и виноделие. –1990. – № 23. – С. 5–12.
13. Савчук, С. А. Идентификация винодельческой продукции методами высокоэффективной хроматографии и спектрометрии / С. А. Савчук, В. Н. Власов // Виноград и вино России. – 2000. – № 5. – С. 5–13.
14. L'influence de la situation géographique et des facteurs pédoclimatique sur le rapport d'isotopes  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  dans le raisin et dans le vin / L. Ognésynts [and others] // Le bulletin de l'OIV. – 2012. – Vol. 85, No 971–973. – P. 61–70.

УДК 691.9.048.4

### **Роль физических критериев в объяснении механизмов образования микроплазменных покрытий**

*Чигринова Н. М., доктор техн. наук, профессор  
Белорусский национальный технический университет  
220013, Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65*

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность применения общеизвестных физических критериев подобия для объяснения механизма формирования покрытий при различных видах металлизации поверхностей. Целью данного исследования является определение роли выбранных физических критериев в выяснении характера и особенностей всех этапов образования микроплазменных покрытий методом электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием (ЭИЛ с УЗВ), осуществляемого в воздушной среде, и методом анодного микродугового окислирования (АМДО), проводимого в жидкой среде. Для описания микроплазменных процессов, осуществляемых в различных передающих средах, составлен подобный по физической сущности функционал, в который введены обобщенные характеристики материала: соста-



вы передающей среды при АМДО и легирующего электрода, переносимого на поверхность в процессе интегрального воздействия ЭИЛ с УЗВ, его теплосодержание, удельный вес и энергия активации. При этом учитывалось, что на кинетику процесса массопереноса, выбранного материала, оказывают влияние проводимость плазмы, сила тока и напряжение, скорость перенесения частицы в потоке, имеющем определенное сечение, в среде с конкретным внешним давлением. Было принято, что для реализации конкретного (искрового) процесса переносимый материал должен иметь (при наличии ограничений на мощность источника энергии) достаточно низкое по сравнению с металлизированной поверхностью теплосодержание. При выборе таких критериев использован известный подход, когда условия взаимодействия отдельного фрагмента (частички) поверхности обрабатываемого объекта с формируемым на ней покрытием принимаются в качестве целевой функции, например, припекания. Введение в модель механизма металлизации поверхности при микроплазмоискровой обработке безразмерных и имеющих численное выражение критериев с заменой ими отношений действующих параметров обеих технологий позволяет упрощать управление и коррекцию всех стадий образования и роста функциональных покрытий.

**Ключевые слова:** микроплазмоискровые технологии, процессы металлизации, управляемые и самоорганизуемые компоненты, электроразряд, передающие среды, физические критерии, целевая функция, многофакторные функционалы.

### **The role of physical criteria in explaining the mechanisms of formation of microplasma coatings**

*Chigrinova N. M.*

*Belarusian National Technical University*

**Annotation.** The article discusses the possibility of using well-known physical similarity criteria to explain the mechanism of coating formation for various types of surface metallization. The purpose of this study is to determine the role of selected physical criteria in elucidating the nature and characteristics of all stages of the formation of microplasma coatings by the method of electric spark alloying with additional ultrasonic action (ESA with USV), carried out in an air environment, and by the method of anodic microarc oxidation (AMAO), carried out in a liquid environment. To describe microplasma-spark processes carried out in various transmission media, a functional similar in physical essence has been compiled, into which generalized characteristics of the material are introduced: the composition of the transmission medium during AMDO and the alloying electrode transferred to the surface during the integral action of ESA with USV, its heat content, specific gravity and activation energy. It was taken into account that the kinetics of the mass transfer process of the selected material is influenced by plasma conductivity, current and voltage, and the speed of particle transfer in a flow having a certain cross-section in a medium with a specific external pressure. It was accepted that in order to implement a specific (spark) process, the transferred material must have (subject to restrictions on the power of the energy source) a heat content that is sufficiently low compared to the metallized surface. When selecting such criteria, a well-known approach was used, when the conditions of interaction



of a separate fragment (particle) of the surface of the processed object with the coating formed on it are taken as the objective function, for example, baking. The introduction of dimensionless and numerically expressed criteria into the model of the mechanism of surface metallization during microplasma-spark processing, with them replacing the relationships between the operating parameters of both technologies, makes it possible to simplify the control and correction of all stages of the formation and growth of functional coatings.

**Keywords:** microplasma-spark technologies, metallization processes, controlled and self-organized components, electric discharge, transmission media, physical criteria, objective function, multifactor functionals,

**Введение.** При выборе адекватных физических критериев для объяснения механизма образования микроплазменных покрытий использовался известный подход [1], когда условия взаимодействия отдельного фрагмента (частички) поверхности объекта с формируемым на ней покрытием принимаются в качестве целевой функции, например, припекания. Такого рода подход в виду своей общности для любых процессов металлизации видится вполне продуктивным и для микроплазменной обработки в условиях управляемого электроразряда – интегрального метода электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием (ЭИЛ с УЗВ) и анодного микродугового оксидирования (АМДО) [1–2].

**Основная часть.** Известен аналитический подход [3–4], при котором в качестве одного из управляющих факторов процесса металлизации рассматривается контактная температура капли металла  $t_k$ , достаточная для сцепления частицы с металлируемой поверхностью.

В модели распределения температуры внутри микроплазменного разряда основная роль принадлежит самоорганизующимся компонентам и, прежде всего, температуре микроразряда, определяющей кинетику процесса взаимодействия на контактной поверхности.

Для описания всех многовариантных взаимодействий, протекающих при осуществлении микроплазменных процессов в различных передающих средах нами использовались общеизвестные критерии [3]: Рейнольдса ( $Re$  – критерий динамического подобия), критерий Маха-Маевского ( $M$  – критерий сжимаемости газа), критерий Кнудсена ( $K_n$  – критерий непрерывности сечения), энергетический критерий ( $K_3$  – конвективный критерий электротеплового взаимодействия), критерий Прандтля ( $Pr$  – магнитное число Прандтля), критерий Ома ( $O_m$  – критерий проводимости) и др.

В предлагаемой модели микроплазменного разряда управляемыми факторами являются напряжение и ток процесса, расстояние между электродами (в случае ЭИЛ с УЗВ – дистанция между легирующим электродом и обрабатываемым изделием, при АМДО – расстояние между анодом (изделием) и катодом (электролизной ванной или дополнительным электродом) [5].

Такая многофакторность микроплазменных процессов требует для их описания использовать многофакторные сложные функционалы, содержащие в своей структуре основные компоненты обеих технологий.



При этом в конкретных расчетах в качестве целевой функции используется многофакторный функционал вида  $t_k = t(E, T, k, N, \nu)$ , зависящий, в свою очередь, от функционала, определяющего температуру процесса как функцию энергии, скорости реакции и времени  $T = T(E, k, t)$ .

Для обеспечения сцепления частицы, находящейся в плазменном потоке, с металлической подложкой необходимы соответствующие температура контакта и энергия активации, объединенные выражением [6; 7]:

$$t = -\ln\left(1 - \frac{N}{N_0}\right) e^{\frac{E}{kTv}}, \quad (1)$$

где  $t$  – время реакции;  $N$  – число атомов из числа  $N_0$ , прореагировавших за время реакции;  $E$  – энергия активации;  $K$  – константа скорости реакции;  $T$  – температура в контакте;  $\nu$  – частота собственных колебаний атомов, находящихся в контакте.

Таким образом, реализация этого процесса может быть описана многофакторным функционалом:

$$t = t(N, N_0, E, k, T). \quad (2)$$

В приведенном функционале содержатся управляемые (энергия активации, контактная температура) и самоорганизующиеся (все остальные) компоненты, управлять которыми в совокупности возможно путем рецептурного подбора передающей среды и вариации подводимой энергии за счет изменения напряжения и тока анализируемых процессов.

С сохранением наполнения приведенного функционала (2) и подбором физических критериев [8, 9], содержащих алгебраические компоненты, необходимые для описания микроплазмоисковых процессов, осуществляемых в различных передающих средах, составлен подобный по физической сущности функционал, в который введены обобщенные характеристики материала, а не его отдельных фрагментов: составы передающей среды при АМДО и легирующего электрода, переносимого на поверхность в процессе интегрального воздействия ЭИЛ с УЗВ, его теплосодержание, удельный вес и энергия активации. При этом учитывалось, что на кинетику процесса массопереноса выбранных материалов оказывают влияние проводимость плазмы, сила тока и напряжение, скорость перенесения частицы в потоке, имеющем определенное сечение, в среде с конкретным внешним давлением. Было принято, что для реализации конкретного (искрового) процесса переносимый материал должен иметь (при наличии ограничений на мощность источника энергии) достаточно низкое по сравнению с металлизированной поверхностью теплосодержание.

Управление микроплазмоисковыми процессами должно включать активацию в качестве ведущего фактора. Поскольку активация процесса в большинстве случаев близка к значениям энтальпии, то для описания механизма образования микроплазмоисковых покрытий целесообразно в качестве основного применить энергетический критерий, содержащий этот параметр [10, 11]:



$$K = \frac{I^2}{V} d^3 \sigma \rho i, \quad (3)$$

где  $I$  – ток дуги;  $V$  – скорость потока;  $d$  – характерный параметр;  $\sigma$  – проводимость плазмы;  $\rho$  – характерная плотность потока;  $i$  – характерная энтальпия.

В приведенном энергетическом критерии присутствует трудно определяемый на практике характерный параметр  $d$ , величина которого может быть выражена через число Кнудсена:

$$K_n = \frac{L}{d} = \frac{C}{dp}, \quad (4)$$

где  $L$  – усредненное значение свободного пролета электрона;  $C$  – постоянная для данного процесса величина;  $p$  – усредненное давление внешней среды.

Для дальнейшего упрощения энергетического критерия с целью возможности управления процессом с помощью задаваемых, легкоизмеряемых и контролируемых в реальном времени параметров тока и напряжения предложено использовать число подобия  $O_m$ , учитывающее наряду с напряжением на дуге и током процесса длину свободного пролета электронов и приблизительно постоянную проводимость плазмы [12]:

$$O_m = \frac{d\sigma U}{I}, \quad (5)$$

где  $U$  – напряжение на дуге.

Преобразуя  $K = \frac{I}{d} U d^2 \rho \frac{I}{\sigma}$  и  $\frac{O_m}{U} = \frac{d\sigma}{I}$ , получаем

$$K = I \frac{V}{O_m} \frac{1}{U d^2 \rho}. \quad (6)$$

Размерность выражения  $U d^2 \rho$  включает компоненты

$$\frac{M}{L^3} \frac{L}{T} L^2 = \frac{M}{T} = \frac{dm}{dt} = Q, \quad (7)$$

где  $Q$  – итоговое значение массового расхода вещества электрода в единицу времени, кг/с.

Тогда выражение для ведущего для описания механизма металлизации при микро-плазмоискровом воздействии энергетического критерия принимает вид:

$$Q = I \frac{V}{K} O_m. \quad (8)$$



При постоянном для стабилизированного процесса значении знаменателя управление массопереносом как для ЭИЛ с УЗВ, так и для АМДО в первом приближении может быть представлено параболической функцией при двумерном задании, связанной с производением тока и напряжения микроплазмойскрового процесса.

Проверка эффективности выбранных физических критериев для описания механизмов образования покрытий при микроплазмойскровой обработке осуществлялась посредством аппроксимации полученных экспериментальных кривых нарастания толщины покрытия при ЭИЛ с УЗВ и АМДО-обработке путем составления и обработки регрессионных уравнений (рис. 1, 2) [11].

Игнорирование наименьших значений приводит аппроксимирующий полином к виду

$$y = 0,0117x^2 + 0,0086 \text{ при } R^2 = 0,63.$$

В обоих случаях на рис. 1 и 2 экспериментальная кривая 1 отражает зависимости массопереноса электродного материала на обрабатываемую поверхность от режимов микроплазмойскровой обработки; кривая 2 – линейный тренд к кривой 1; кривая 3 – линейная фильтрация кривой 1; кривая 4 – полиномиальная линия тренда к кривой 1.

Анализируя графики изменения толщины формируемого покрытия при микроплазмойскровой обработке, следует подчеркнуть, что начальные участки изменения толщины покрытий при их обработке методами АМДО (рис. 1) и ЭИЛ с УЗВ (рис. 2) при малых (до 10 А) токах линейны.

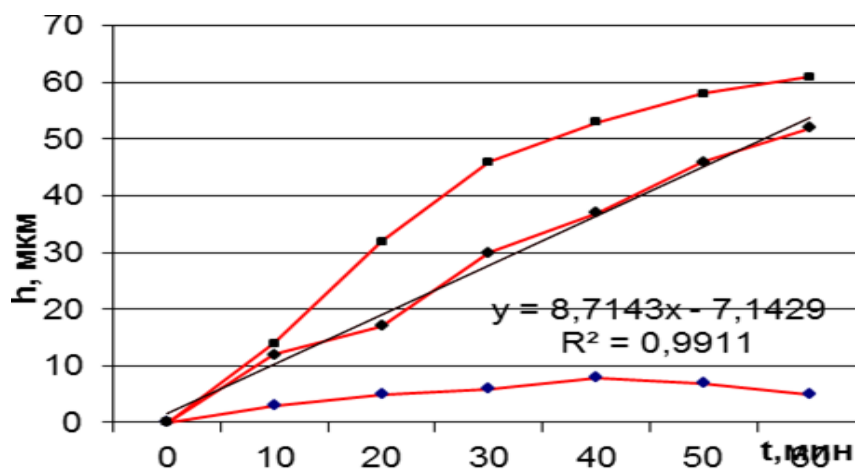


Рис. 1. Зависимость изменения толщины покрытия от времени при изменяющихся значениях тока АМДО

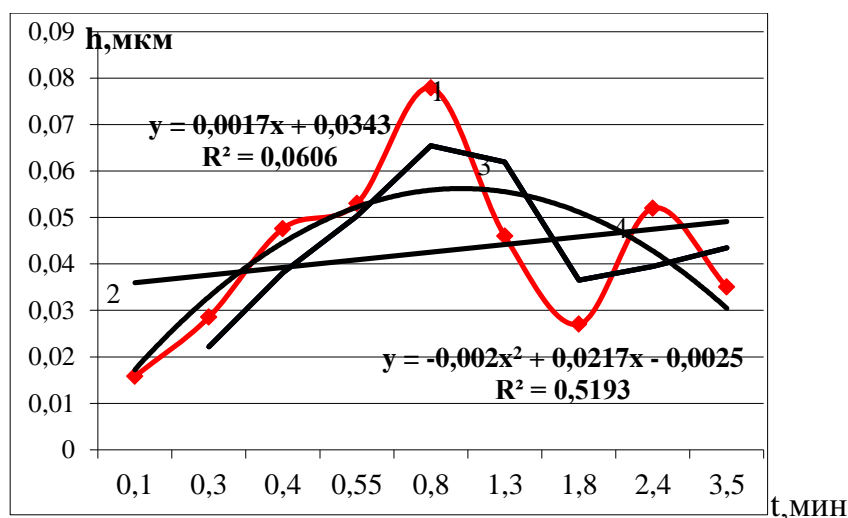


Рис. 2. Зависимость величины массопереноса твердосплавного электрода из вольфрам-кобальтового сплава ВК8 на металлируемую основу от величины тока при ЭИЛ с УЗВ

Можно предположить, что в этом случае после преобразований:

$$X = I^2 = K / Ud^3 \sigma p = K / C,$$

где  $C = UD^3 \Sigma P = const$ , уравнение примет наиболее простую форму:

$$y = 0,0117K / C + 0,0086.$$

Приведенные примеры показывают, что в первом приближении и с достаточно малой дисперсией совокупность представленных критериев может оказаться продуктивной в задачах моделирования при достаточно представительной выборке из результатов проведенных экспериментов.

Однако, ударная активация плазменной дуги при микроплазмоискровых воздействиях, также как и ударная инициация процесса припекания, характерная для неплазменных методов металлизации поверхности, отличает рассматриваемые процессы ЭИЛ с УЗВ и АМДО, т. к. включает фазу ударного сжатия с образованием в контактном слое зоны упругопластической (вязкоупругой и пластической) деформации, свойственной удару при малых скоростях.

Основные факторы этой стадии включают:

- а) повышение уровня акустической эмиссии, выявление характерных параметров волн (частот);
- б) повышение температуры в точках контакта;
- в) понижение энергии выхода электрона в точках контакта;
- г) вскрытие активных центров и ускорение химических и электрохимических взаимодействий;
- д) развитие дислокационных реакций.

Завершением ударной активации является отскок на величину  $L$  за время  $T$  ( $T_{\min} \approx 10 \cdot 1/30000 = 1/3000$  с  $\approx 0,3$  мс).



Термоудар, электронный взрыв следует после открытия тиристора на аппарате – источнике питания. Он реализуется путем электронного насыщения и пробоя межэлектродного промежутка при фиксированной мощности и напряжении. При этом выявляются такие важнейшие факторы управления процессом, как мощность, сила тока, напряжение и частота разряда, искра и фазовый переход с кольцевой волной КОЗ после отрыва в магнитном поле.

Процесс последовательно проходит через стадии:

- перегрев в зонах максимального перегрева поверхности;
- плазмообразование с максимумом плотности;
- удар;
- стадия отскока, разряд;
- сток внешних электронов (в фазе после прохода разряда);
- кольцевая корона.

В результате ударного контактирования электрод, после воздействия волн ударной нагрузки, подвергается влиянию волн разгрузки, где фаза сжатия сменяется фазой растяжения [12; 13].

При известной энтальпии (теплосодержания) электродного материала

$$\sum H_i = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots + \Delta \Pi, \quad (9)$$

где  $i = 1 \dots n$  – номера потенциальных энтальпий компонентов;  $\Delta \Pi$  – энергия связи компонентов и выделение избыточной мощности (Дж), реализуется условие теплового баланса:

$$VC_p = W = \rho V \sum H_i, \quad (10)$$

из которого определяется максимально возможный объем  $V = \frac{W}{\rho \sum H_i}$  частиц, составляющих насыщение плазменного пучка.

Сопровождающий процесс электрический разряд обуславливает оплавление и «стягивание» энергетически выгодно расплавленной массы любого электродного материала  $\Delta V$  в виде оплавленной капли, обладающей кинетической энергией отрыва в области оплавления [12–14]. Появление такого рода фрагментов дополнительно к плазменному потоку качественным образом выделяет рассматриваемые микроплазменные процессы в отдельную группу.

При этом, к представленному функционалу, наряду со временем ударного контакта,  $\tau_{1\text{уд}}$ ,  $\tau_2$  и временем отрыва частицы  $\tau_1'$  и  $\tau_2'$  силы ударной электронной инициации оплавления и отрыва и ударной инициации схватывания и отрыва, и соответствующей диссоциации электрической энергии разряда источника, добавляется энергия образования трещины, что является самостоятельным предметом исследования.

**Заключение.** В процессе проведенного исследования показано, что многофакторность микроплазмоискровых процессов ЭИЛ с УЗВ и АМДО требует для их описания использовать многофакторные сложные функционалы, содержащие в своей структуре основные компоненты обеих технологий.

При этом в конкретных расчетах в качестве целевой функции используется многофакторный функционал вида  $t_k = t(E, T, k, N, \nu)$ , зависящий, в свою очередь,



от функционала, определяющего температуру процесса как функцию энергии, скорости реакции и времени  $T = T(E, k, t)$ .

Установлено, что изменение толщины покрытий при их обработке методами АМДО и ЭИЛ с УЗВ при малых (до 10 А) токах происходит линейно.

Таким образом, введение в модель механизма металлизации при микроплазменной обработке безразмерных и имеющих численное выражение критериев с заменой ими отношений действующих параметров позволяет упростить управление и коррекцию этих процессов.

## Литература

1. Чигринова, Н. М. Инновации в электроискровых технологиях : теория и практика. – Минск : Бестпринт, 2018. – 261 с.
2. Чигринова, Н. М. Анодное микродуговое окисление: проблемы, решения, перспективы. – Минск : Бестпринт, 2019. – 256 с.
3. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учебное пособие : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007.
4. Лифшиц, Е. М. Физическая кинетика / Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 536 с.
5. Чигринова, Н. М. Интенсификация процессов микроплазменного упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электромеханическим воздействием: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Н. М. Чигринова – Минск, 2010. – 310 с.
6. Кутателадзе, С. С. Анализ подобия и физические модели / С. С. Кутателадзе. – Новосибирск : Наука, 1986. – 297 с.
7. Губанов, В. А. Введение в системный анализ / В. А. Губанов, В. В. Захаров, А. Н. Коваленко / под ред. Л. А. Петросяна. – Л. : Издательство ЛГУ, 1988. – 230 с.
8. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. В 2 ч. / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
9. Герловин, И. Л. Основы единой теории всех взаимодействий в веществе / И. Л. Герловин. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 432 с.
10. Chigrinova, N. M. Theoretical model of the engineering of metal surfaces by microplasma alloying with the alternative intensity of the mechanical impact // Surface engineering and Applied electrochemistry. – 2010. – Vol. 46, No 1. – P. 21–26.
11. Чигринова, Н. М. Использование автоматизированного измерительного комплекса для исследования микроплазменных процессов / Н. М. Чигринова // Сборник докладов международного научно-технического симпозиума «Прогрессивные процессы порошковой металлургии», Минск, Беларусь, 30 марта 2005 г. – Минск, 2005. – С. 65–68.
12. Стрелков, В. С. Физические основы методов диагностики плазмы в токамаке / В. С. Стрелков. – М. : МИФИ, 2004. – 88 с.
13. Konuma, M. Plasma techniques for film deposition / M. Konuma. – Hardcover : Alpha Science, 2005. – 347 p.
14. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / С. К. Жданов [и др.]. – М. : МИФИ, 2007. – 368 с.