

УДК 621.793.79

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА ИМПУЛЬСА ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ НАПЫЛЕНИИ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКА

© 2022 г. Г. П. Гололобов^{a, *}, А. Н. Власов^a, М. В. Дубков^a,
Д. В. Суворов^a, Е. В. Сливкин^{a, **}, М. С. Тыщенко^a

^aРязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина,
Рязань, 390005 Россия

*e-mail: gololobov.gennady@yandex.ru

**e-mail: e.slivkin@mail.ru

Поступила в редакцию 14.07.2021 г.

После доработки 23.09.2021 г.

Принята к публикации 23.09.2021 г.

Рассматриваются особенности напыления медного покрытия на никелевую подложку методом электрического взрыва фольги во внешнем импульсном магнитном поле. Проведены исследования влияния фазового сдвига импульса внешнего магнитного поля относительно момента взрыва на морфологию получаемого покрытия. Напыление проводили на модернизированной экспериментальной установке “ИНГИР-Мега-15” при пяти различных условиях: взрыв происходил за 100 мкс до наложения импульса магнитного поля; одновременно с наложением импульса магнитного поля; на середине переднего фронта импульса; на максимуме импульса и на середине заднего фронта импульса. Установлено влияние фазового сдвига импульса магнитного поля относительно момента взрыва на скорость процессов формирования и распада плазменного облака. Показано, что наложение магнитного поля в момент, соответствующий фазе парогазового конденсата, способствует более равномерному распределению капель меди по подложке и изменению их формы.

Ключевые слова: электрический взрыв проводника, магнитное поле, покрытие, островковая структура, степень заполнения.

DOI: 10.31857/S1028096022070056

ВВЕДЕНИЕ

Среди всего многообразия технологий нанесения покрытий на основе металлов и сплавов особенного внимания заслуживает метод электрического взрыва проводника (ЭВП). Многогранность и необычность этого явления стимулируют его детальные исследования и использование в ряде практических применений. Процессы, происходящие при ЭВП, включают, как правило, фазовые переходы металл–жидкость–пары металла в начальной стадии; формирование металлической плазмы при дальнейшем нагреве; образование мелких частиц при разлете продуктов взрыва и их остывании. Условия осуществления электрического взрыва весьма разнообразны, как и получаемые при этом эффекты [1–7]. Все это обуславливает ряд достоинств метода при использовании его для нанесения целого спектра тонких пленок и покрытий. К преимуществам метода можно отнести низкие энергозатраты, а также возможность получения высококачественных беспористых покрытий, с высокой адгезией (на

уровне когезии) к подложке и разнообразными функциональными свойствами. Метод позволяет формировать покрытия с различной структурой.

К недостаткам метода можно отнести значительные механические (до 1000 атм.) и термические (до 10^6 К) нагрузки на подложку, слабую управляемость процесса, значительный разброс получаемого покрытия по толщине и высокий уровень шероховатости. Свести к минимуму перечисленные недостатки во многом возможно за счет изменения условий и параметров взрывного процесса.

Специфической областью экспериментов по ЭВП является электрический взрыв в магнитном поле. Подобные явления изучены мало. Известны лишь несколько публикаций по данной тематике [8–10]. В [8] проанализирован характер влияния импульсного магнитного поля на дисперсный состав частиц парогазового конденсата и морфологические особенности образованного ими медного покрытия на никелевой основе. Получены количественные данные о взаимосвязи

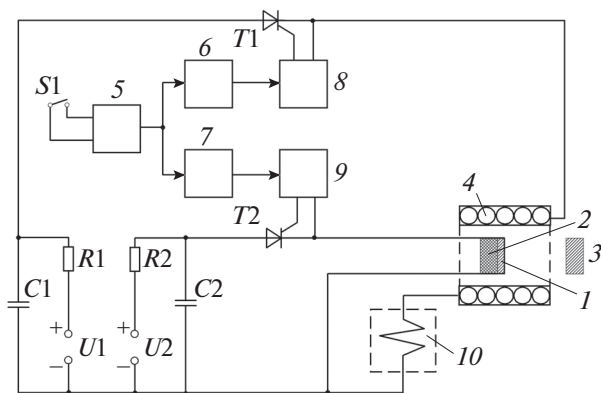


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *C1* – первая конденсаторная батарея (1 Ф); *C2* – вторая конденсаторная батарея (0,18 Ф); $U_1 = 400$ В; $U_2 = 340$ В; *R1* и *R2* – балластные сопротивления; *T1* и *T2* – тиристоры; *S1* – кнопка запуска генератора одиночного импульса; *1* – взрываема медная фольга; *2* – диэлектрический экран; *3* – никелевая подложка; *4* – индуктор с помещенной внутрь взрываема фольгой; *5* – генератор одиночного импульса; *6* и *7* – линии задержки (от 0 до 1 мс); *8* и *9* драйверы тиристоров; *10* – прерыватель тока (взрываема проволочки).

величины магнитного поля с формой и размерами островков напыленного покрытия.

Настоящая работа является продолжением описанных выше исследований и направлена на изучение влияния фазового сдвига импульса внешнего магнитного поля относительно момента взрыва на морфологические особенности медного покрытия, напыляемого методом ЭВП на никелевую подложку.

УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по ЭВП проводили на экспериментальной установке “ИНГИР-Мега-15” [11]. Ее модифицированная для настоящего исследования схема приведена на рис. 1. Установка имеет два источника питания с емкостными накопителями: *C1*, использованный для питания соленоида, и *C2*, нужный для подачи напряжения на взрываема фольгу. Процесс запускали с помощью кнопки *S1*. Ток индуктора *4* прерывался с помощью устройства *10*. Длительность колоколообразного импульса магнитного поля индуктора на полувысоте составляла около 800 мкс, индукция магнитного поля 5 Тл. Длительность переднего фронта импульса тока, протекающего через взрываема фольгу, – около 40 мкс, заднего – 30 мкс. Амплитуда тока составляла 12 кА. Экран *2* способствовал сосредоточению продуктов электрического взрыва фольги *1* на подложке *3*.

Напыление проводили в воздушной атмосфере на подложки из никелевых пластин квадратной формы размером 2×2 см. Конечную полировку поверхности подложек осуществляли с использованием алмазной пасты НОМ 0.5/0. Размеры взрываема фольг из электротехнической меди были сопоставимы с размерами пластин подложек. Расстояние между взрываема фольгой и подложкой варьировалось в диапазоне 3–5 см.

Экспериментальные образцы исследовали в Региональном центре зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-6610LV (Япония), укомплектованного энергодисперсионной приставкой-микроанализатором INCA X-MAX производства Oxford Instruments (Великобритания) для проведения элементного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Напыление продуктов электрического взрыва осуществляли при различных фазах импульса магнитного поля соленоида по отношению к моменту электрического взрыва: *1* – за 100 мкс до наложения импульса магнитного поля; *2* – одновременно с наложением импульса магнитного поля; *3* – на середине переднего фронта импульса; *4* – на максимуме импульса; *5* – на середине заднего фронта импульса. Проводили синхронизацию переднего фронта импульса внешнего магнитного поля. Основные стадии, сопровождающие ЭВП, включали нагрев проводника, переход в жидкую фазу, разрушение и образованием плазмы, распад плазмы и конденсация парогазового конденсата.

Три типичные временные характеристики, показывающие соотношение фаз импульсов тока через взрываема проводник и внешнего магнитного поля, представлены осциллограммами (рис. 2). Они характеризуют случаи *1*, *4* и *5* (рис. 2а, 2б и 2в соответственно).

Следует отметить что, случаи *2–5* характеризуются достаточно крутым (не более 40 мкс) задним фронтом (период образования и распада плазмы) импульса тока через взрываема проводник. В этих случаях обрыв тока происходит в момент действия магнитного поля. В соответствии с [9] при действии внешнего магнитного поля определенного направления ЭВП отличается быстро расширяющейся плазменной оболочкой малой плотности. Таким образом, зафиксирован эффект “подавления” и ускорения распада плазмы под влиянием внешнего магнитного поля.

Случай *1*, наоборот, характеризуется растягиванием заднего фронта импульса тока на уровне 0.15–0.2 его максимальной амплитуды. То есть растущее магнитное поле, появляющееся в мо-

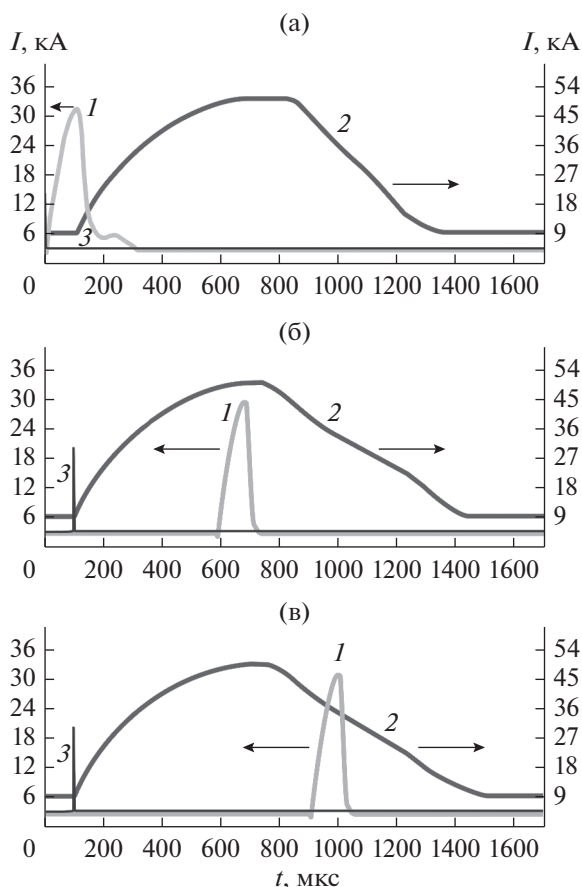


Рис. 2. Осциллограммы взрыва проводника (1) и импульса тока соленоида (2), формирующего внешнее магнитное поле, при различном фазовом сдвиге относительно взрыва: а – взрыв за 100 мкс до наложения импульса магнитного поля; б – на максимуме импульса; в – на середине заднего фронта импульса магнитного поля. Для контроля начала отсчета введен синхроимпульс (3).

мент разрушения проводника с образованием плазмы, способствует продлению активных процессов формирования и распада плазменного облака.

Многочисленные эксперименты, представленные в [4, 8, 12–16], свидетельствуют о том, что разлетающиеся продукты ЭВП характеризуются широким распределением по размерам. Но в основном, как было отмечено в [4], их можно разделить на две большие группы. К первой группе можно отнести неиспарившиеся частицы вещества (капли), возникшие при разрушении исходного проводника из жидкой фазы и сохраняющие свой размер при разлете. Это хаотично расположенные образования неправильной формы с латеральными размерами в диапазоне от единиц до десятков микрометров. Ко второй группе относятся равномерно распределяемые по поверхности подложки частицы с размерами порядка десятков–сотен нанометров, сформировавшиеся в процессе конденсации разлетающегося пара.

В ходе проведенных исследований поверхности образцов никелевой подложки с напылением влияние фазового сдвига импульса внешнего магнитного поля на структурно-морфологические особенности продуктов ЭВП удалось зарегистрировать при формировании частиц второго типа. Наиболее существенным это влияние оказалось в случаях 1 и 5.

Проведение ЭВП в первом случае в условиях наложения магнитного поля на парогазовой конденсат увеличивает вероятность коагуляции наночастиц в области перемешивания продуктов взрыва. Можно предположить, что при растущем магнитном поле за счет дополнительного выделения тепла переохлаждение паров уменьшается, и центры конденсации начинают расти [4]. Осажденные продукты ЭВП на этапе сращивания образуют островковую структуру (рис. 3а). Здесь описание в терминах отдельных островков-зародышей становится затруднительным. Степень заполнения подложки получается максимальной, на уровне 20%.

Проведение ЭВП в пятом случае, в условиях спадающего магнитного поля, позволило выявить несколько характерных особенностей. Формиру-

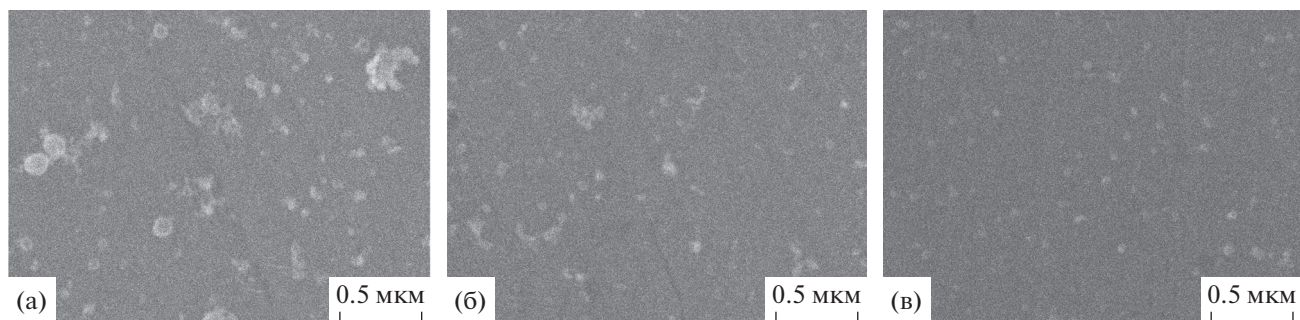


Рис. 3. РЭМ-изображение типичных участков поверхности образцов подложек, полученных при ЭВП за 100 мкс до наложения импульса магнитного поля (а), на максимуме импульса внешнего магнитного поля (б) и середине заднего фронта импульса (в). Светлые пятна – осажденные на поверхности частицы.

ющиеся в процессе конденсации разлетающегося пара частицы приобретают правильную форму, близкую к сферической (рис. 3в). Наблюдается уменьшение разброса латеральных размеров до 50–100 нм. Также они более равномерно распределяются по поверхности. Это может быть связано с направлением действия вихревого электрического поля на спаде импульса и с его взаимодействием с возникающим при этом индукционным разрядом [9]. Разряд поддерживает магнитное поле и дополнительно прогревает зону электрического взрыва, что в свою очередь увеличивает энергию частиц, способствует более равномерному их распределению в облаке и препятствует их коалесценции.

РЭМ-изображение, представленное на рис. 3б, является типичным для случаев 2–4. Здесь присутствуют как отдельные частицы, так и их агломерации. Каких-либо структурно-морфологических различий осажденного на поверхности конденсата (формы, размера, плотности расположения частиц и других различий) в этих трех рассмотренных случаях выявить не удалось.

Методика набора статистических данных по латеральным размерам частиц и оценки поверхностной плотности их расположения, рассмотренная в [17, 18], позволила определить степень заполнения подложки частицами меди. Таким образом, в первом случае она составляет 20%, во втором, третьем и четвертом случаях — около 7% и в пятом случае 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выявлен ряд особенностей нанесения медного покрытия методом электрического взрыва проводника при воздействии внешнего импульсного магнитного поля. Определено влияние фазового сдвига импульса магнитного поля относительно момента взрыва на скорость процессов формирования и распада плазменного облака, а также на морфологические особенности нанесенного медного покрытия.

Установлено, что наибольшая степень заполнения подложки, порядка 20%, достигается в случае взрыва проводника за 100 мкс до наложения импульса магнитного поля. В этом случае наблюдается широкий разброс латеральных размеров частиц (в пределах 0.05–1 мкм) и существенная неравномерность их распределения.

Наиболее равномерное распределение продуктов напыления по поверхности подложки достигается в случае взрыва проводника на середине заднего фронта импульса магнитного поля. В этом случае разброс латеральных размеров уменьшается до 50–100 нм, однако степень заполнения подложки снижается до уровня порядка 5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sedoi V.S., Ivanov Yu.F.* // Nanotech. 2008. V. 19. № 14. P. 145710. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/14/145710>
2. *Котов Ю.А.* // Физика и химия обработки материалов. 1978. № 4. С. 24.
3. *Бурцев В.А.* Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
4. *Гаврилов В.Н., Литвинов Е.А.* // Письма в ЖТФ. 1993. № 2. С. 18.
5. *Grigoriev A.N., Karnaukhov E.I., Pavlenko A.V., Sedoi V.S.* // J. Appl. Mech. Technic. Phys. 2015. V. 56. № 1. P. 136. <https://doi.org/10.1134/S0021894415010204>
6. *Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Tilikin I.N., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Hammer D.A.* // J. Appl. Phys. 2020. V. 128. № 20. P. 205902. <https://doi.org/10.1063/5.0019330>
7. *Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Tilikin I.N., Mingaleev A.R., Aloyan L., Hammer D.A.* // Plasma Phys. Rep. 2018. V. 44. № 2. P. 236. <https://doi.org/10.1134/S1063780X18020113>
8. *Гололобов Г.П., Власов А.Н., Дубков М.В., Буробин М.А., Суворов Д.В., Сливкин Е.В., Арефьев А.С.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 6. С. 29. <https://doi.org/10.7868/S0207352818060069>
9. *Адамьян Ю.Э., Василевский В.М., Колгатин С.Н., Шнеерсон Г.А.* // ЖТФ. 1999. № 5. С. 121.
10. *Адамьян Ю.Э., Василевский В.М., Кривошеев С.И., Колгатин С.Н., Шнеерсон Г.А., Шутов В.Л.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. № 23. С. 43.
11. *Власов А.Н., Черкасова Ю.В., Буробин М.А.* // Вестн. Рязан. гос. радиотех. ун-та. 2017. № 60. С. 154. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2017-60-2-154-162>
12. *Красулин Ю.Л., Петров Ю.П., Гревцев Н.В.* // Электронная техника. Микроэлектроника. 1968. № 4. С. 6.
13. *Волков Н.Б., Майер А.Е., Седой В.С., Фенько Е.Л., Яловец А.П.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 4. С. 77.
14. *Adamian Yu.E., Kolgatin S.N., Shneerson G.A., Glazyrin I.V., Diyankov O.V., Koshelev S.V., Slesareva A.N.* // Pulsed Power Plasma Sci. 2001. V. 1. P. 81. <https://doi.org/10.1109/PPPS.2001.01001999>
15. *Wang K., Shi Z., Shi Y., Zhao Z.* // AIP Advances. 2017. V. 7. P. 095002. <https://doi.org/10.1063/1.4998298>
16. *Lerner M.I., Pervikov A.V., Glazkova E.A., Svarovskaya N.V., Lozhkomev A.S., Psakhie S.G.* // Powder Technol. 2016. V. 288. P. 371. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.037>
17. *Карабанов С.М., Верлов Н.А., Суворов Д.В., Гололобов Г.П., Сливкин Е.В.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 14. С. 56.
18. *Арефьев А.С., Гололобов Г.П., Трегулов В.Р., Уточкин И.Г., Киреева О.В.* // Вестн. Рязан. гос. радиотех. ун-та. 2003. № 12. С. 66.

Effect of Phase Shift Pulse of External Magnetic Field at Coating Deposition by Electric Explosion

G. P. Gololobov^{1, *}, A. N. Vlasov¹, M. V. Dubkov¹, D. V. Suvorov¹, E. V. Slivkin^{1, **}, M. S. Tishchenko¹

¹*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan, 390005 Russia*

**e-mail: gololobov.gennady@yandex.ru*

***e-mail: e.slivkin@mail.ru*

We consider the features of the deposition of a copper coating on a nickel substrate by the method of electric explosion of a foil in an external pulsed magnetic field. Investigations of the influence of the phase shift of the external magnetic field pulse with respect to the moment of explosion on the morphology of the resulting coating have been carried out. The deposition was carried out on the modernized experimental unit "INGIR-Mega-15" under five different conditions: the explosion occurred 100 μ s before the superposition of the magnetic field pulse; it happened simultaneously with the superposition of the magnetic field pulse; at the middle of the leading edge of the pulse, at the maximum of the pulse, and at the middle of the rear edge of the pulse. The effect of the magnetic field pulse phase shift relative to the moment of explosion on the rate of the formation and decay of the plasma cloud has been established. It is shown that the application of a magnetic field at the moment corresponding to the phase of the vapor-gas condensate promotes a more uniform distribution of copper drops over the wafer and a change in their shape.

Keywords: electric explosion of a conductor, magnetic field, coating, island structure, degree of filling.