

Исследование микроразмерных металлических структур, полученных методом электрического взрыва проводников (часть 2)

*А.Л. Суркаев, М.М. Кумыш, В.И. Усачев, В.Б. Светличная, Т.А. Сухова,
Т.А. Матвеева, Д.А. Мустафина, И.В. Ребро, Г.А. Рахманкулова.*

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

Аннотация: В статье представлены результаты генерации микроразмерных металлических частиц методом электрического взрыва металлических проводников (ЭВП) и получения тонких пленок методом электровзрывного напыления (ЭВН). Экспериментально получены осциллограммы разрядного тока и напряжения, использование которых позволяет определить мощность, выделяемую взрывающимся проводником, а, следовательно, вложенную энергию. Посредством универсальной двулучевой электронной системы Versa 3D определены параметры получаемых микрочастиц и тонких пленок, а, также осуществлен физико-химический анализ. В результате исследований показано, что при протекании плотности разрядного тока $j \approx 10^{10} \text{ А/м}^2$ миллисекундного диапазона толщина пленок и размеры частиц как для обычных металлов, так и для тугоплавких, могут достигать величин меньше микронного масштаба.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, тонкие металлические пленки, мелкодисперсные частицы.

На сегодняшний день информация о становлении и дальнейшем развитии нанотехнологии, которая является одним из приоритетных направлений в современном научном мире, представлена широким спектром [1 - 4]. Метод электрического взрыва проводников (ЭВП) представляется одним из применяемых и перспективных способов [5] получения напыляемых тонких пленок и мелкодисперсных порошков микронного и наноразмерного диапазона. Представленная работа является продолжением экспериментальных исследований, опубликованных ранее [6, 7]. В данной работе сделан акцент пленкам и микрочастицам тугоплавких металлов.

Целью данной работы является получение микроразмерных металлических пленок и частиц методом электровзрывного напыления (ЭВН) и электрического взрыва проводников (ЭВП) в воздушной атмосфере и проведение физико-химического анализа получаемых микроструктур.

Метод получения образцов напыляемых пленок и генерации микрочастиц является общеизвестной и доступной [8]. Описание методики эксперимента и анализ параметров получаемых в процессе ЭВП микроструктур представлен в ранее опубликованной работе [9]. В данной серии экспериментов получение тонких пленок и генерация микрочастиц осуществлялось методом электрического взрыва проволочек различных металлов (медь Cu, никром NiCr, титан Ti, нержавеющей сталь, никель Ni) на аморфные (стекло) и металлические (железо, алюминий) подложки. Электрические сигналы с пояса Роговского (ПР) и делителя напряжения (ДН) регистрировались запоминающим двухлучевым электронным осциллографом (ЭО). Посредством программного обеспечения получаемая информация поступала в оперативную память персонального компьютера (ПК) и подвергалась необходимой обработке. Универсальная двухлучевая система –Versa 3D (электронно-ионный двухлучевой микроскоп) позволяет осуществить трехмерную визуализацию микрообъекта и произвести физико-химический анализ получаемых металлических микроструктур.

На рис. 1 представлены характерные осциллограммы разрядного тока и напряжения электрического взрыва медного (Cu) проводника с геометрическими параметрами $\lambda=70\text{мм}$, $d=0,35\text{мм}$ - (рис. 1a) и $\lambda=150\text{мм}$, $d=0,4\text{мм}$ - (рис. 1b), соответственно. На осциллограмме тока наблюдается ярко выраженная пауза тока, определяющая момент непосредственно взрыва проводника (показана белой стрелкой). Тем не менее, использование энергетической установки с данными техническими характеристиками [7] и взрывающегося медного (Cu) проводника с представленными геометрическими параметрами (рис. 1a) не позволяет сформировать электрический взрыв, протекающий в согласованном режиме согласно [10], т.е. полное выделение энергии в первой половине полупериода разряда.

Наиболее яркое усугубление обстоятельства проявляется с увеличением длины проводника до $\lambda=150\text{мм}$ и диаметра $d=0,4\text{мм}$, в этом случае момент взрыва располагается в первой четверти периода (рис. 1b), не достигая максимального значения тока, и вся энергия конденсаторного накопителя реализуется за весь полный период.

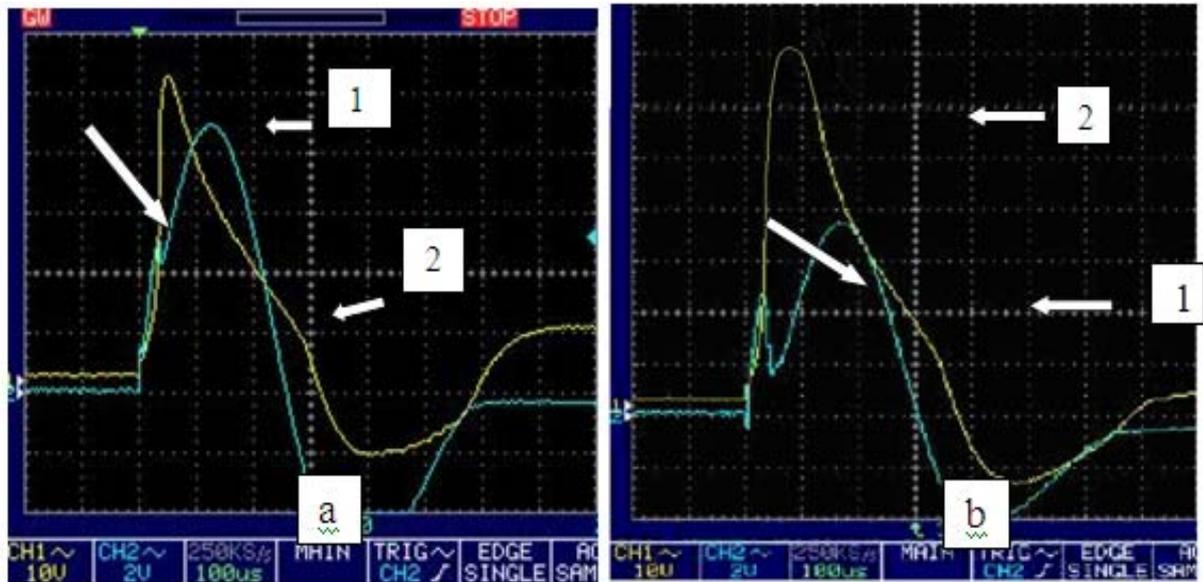


Рис. 1 - Осциллограммы 1 - тока разряда и напряжения - 2 ЭВП медной (Cu) проволочки с геометрическими параметрами $\lambda=70\text{мм}$, $d=0,35\text{мм}$ - 1(a) и с геометрическими параметрами $\lambda=150\text{мм}$, $d=0,4\text{мм}$ - 1(b)

На рис. 2 представлены графики потребленной мощности, полученные при электрическом взрыве медных (Cu) проволочек с данными геометрическими размерами, из которых вытекает значение введенной в проводник энергии. На рис. 3 показаны характерные микрофотографии металлической пленки (a) и микрочастиц (b) меди (Cu) микронного масштаба на стальной подложке.

Осциллограммы результатов экспериментальных исследований электрического взрыва тугоплавких металлов показаны для нихромовой (NiCr) проволочки на рис. 4 и для никелевой (Ni) проволочки на рис. 5. Формирование согласованного режима протекания взрыва проводников, выполненных

из тугоплавких металлов, в воздушной атмосфере сопровождается техническими трудностями вследствие возникновения шунтирующего разряда по поверхности проводника, что сказывается на определении момента времени собственно непосредственно взрыва.

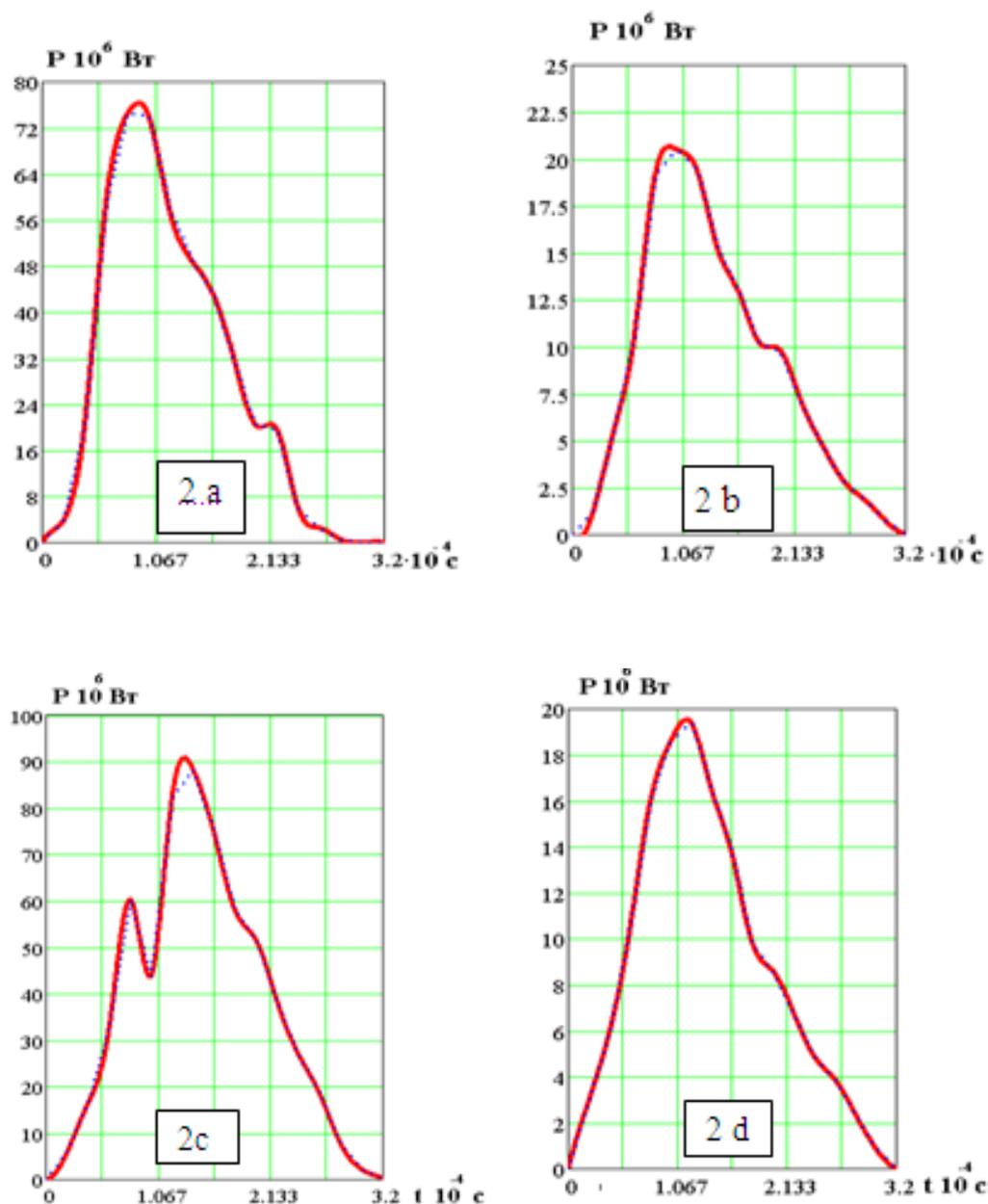


Рис. 2 - Графики потребленной мощности как функции времени при ЭВП медной (Cu) проволоочки параметрами $\lambda=70\text{мм}$, $d=0,35\text{мм}$ - 2 (a) и 2(b) и с параметрами $\lambda=150\text{мм}$, $d=0,4\text{мм}$ - 2(c) и 2(d) для первого и второго полу-периода, соответственно

Микрофотографии (рис. 6) демонстрируют характерные размеры металлической тонкой пленки (а) и микрочастиц (б) ЭВП нихромовой (NiCr) проволочки на стальной подложке, достигающие микронного и меньшего размера в диаметре.

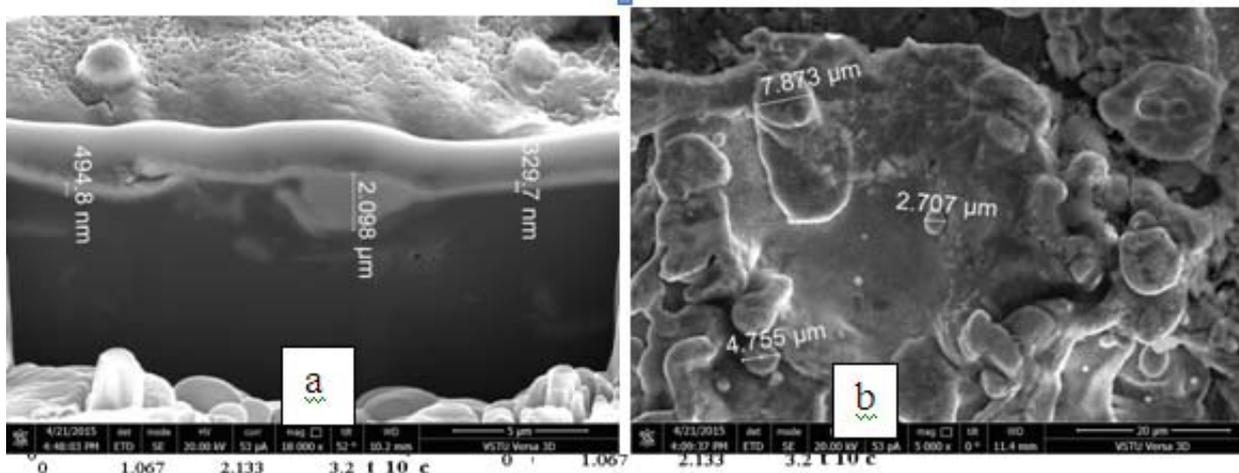


Рис. 3. – Микрофотографии металлической пленки (а) и микрочастиц (б) меди (Cu) на стальной подложке, полученные методом ЭВП.

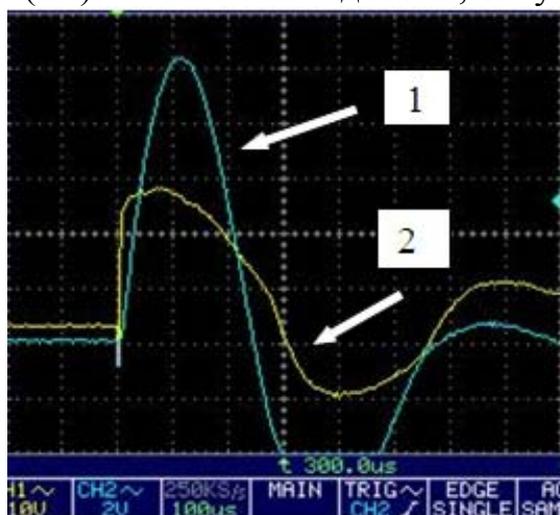


Рис. 4. - Осциллограммы тока -1 и напряжения - 2 ЭВП. Параметры нихромовой (NiCr) проволочки $\lambda=30\text{мм}$, $d=0,04\text{мм}$.

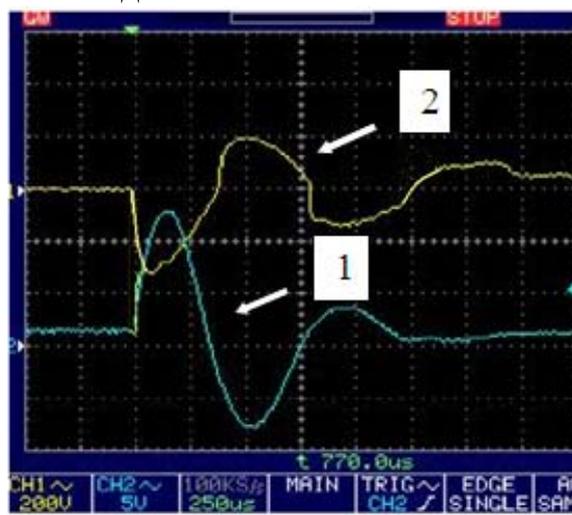


Рис. 5. - Осциллограммы тока -1 и напряжения - 2 ЭВП. Параметры никелевой проволочки (Ni) $\lambda=20\text{мм}$, $d=0,17\text{мм}$.

В таблице № 1 показан анализ распределения микрочастиц в соответствие их размеров, находящихся в локально выделенной площадке, для ЭВП медной (Cu) и нихромовой (NiCr) проволочек. Изучение дисперсного состава

и морфологии частиц электровзрывных порошков металлов Al, Cu, Fe, Ni, Mo, W проводились, в частности, в работе [11], но провести сравнительный анализ полученных результатов проблематично вследствие разности параметров энергетических установок, тем не менее, наблюдается совпадение результатов в области определения диаметров частиц микронного диапазона.

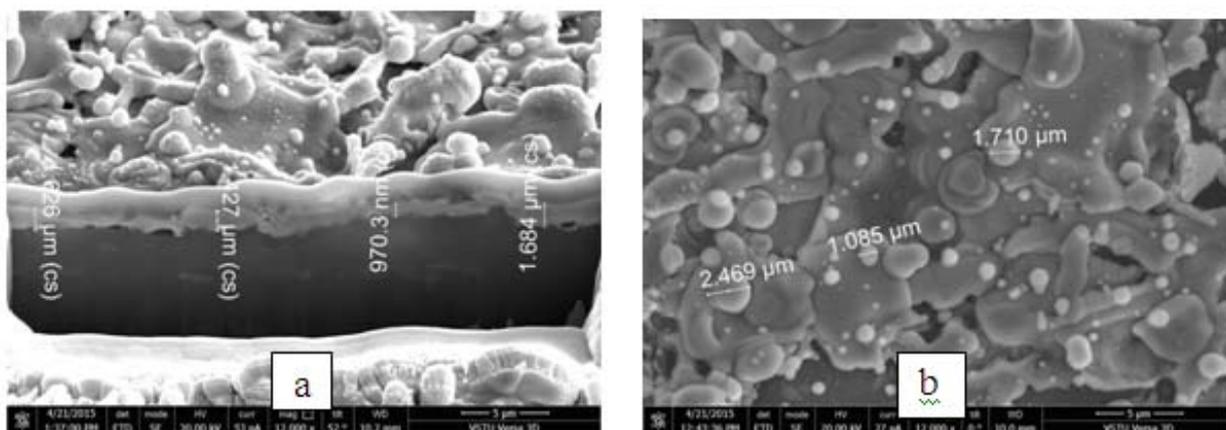


Рис. 6. - Микрофотографии металлической пленки (а) и микрочастиц (б) на стальной подложке, полученные методом ЭВП нихромовой (NiCr) проволоочки с параметрами $\lambda = 30 \text{ мкм}$, $d = 0,04 \text{ мм}$.

Таблица № 1

Характерное распределение размеров микрочастиц

Пр ов ол оч ка	Под лож ка	Характерные размеры, мкм														
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7+
Cu	стек ло	49	23	6	6	5	2	2	2	0	0	0	0	0	0	95
	Al	2	10	11	1	3	5	0	3	1	1	1	0	0	0	38
	Fe	18	14	6	8	7	1	5	3	1	1	0	0	1	1	3
Ni Cr	стек ло	309	93	23	24	15	6	4	2	1	2	3	1	0	0	0
	Al	56	19	12	10	11	1	2	2	1	1	0	0	1	0	0
	Fe	60	31	24	14	6	9	0	3	1	1	1	1	0	1	1

Дальнейшие эксперименты по получению микрочастиц посредством ЭВП металлической титановой (Ti) (рис. 7) и никелевой (Ni) проволоочки с размерами $\lambda = 20 \text{ мм}$, $d = 0,29 \text{ мм}$ и $\lambda = 20 \text{ мм}$, $d = 0,17 \text{ мм}$, соответственно. Анализ

микрофотографий показывает, что микрочастицы имеют ярко выраженную сферическую форму микронного и меньшего размеров диаметров, причем на поверхности полученных частиц наблюдаются и частицы, диаметр которых составляет десятки и менее нанометров, что убедительно согласуется с результатами работ [12, 13]. Т.е. действительно, частицы нанометрового диапазона покрывают поверхность больших частиц и образуют индивидуальные агломераты.

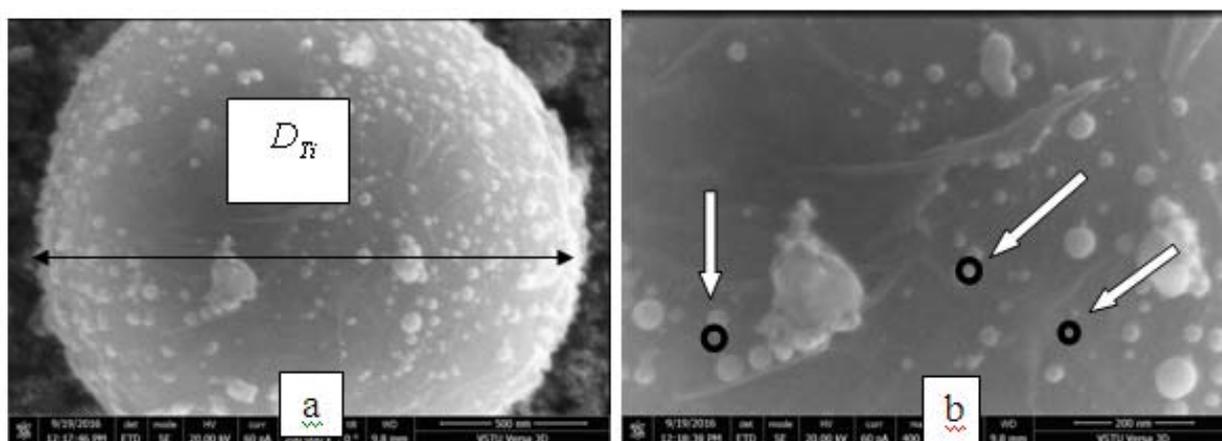


Рис. 7. - Микрофотографии металлической микрочастицы титана (Ti) (a) диаметром $D_n \approx 1,8$ мкм и наночастицы (b) на ее поверхности диаметром $d_n \leq 20$ нм.

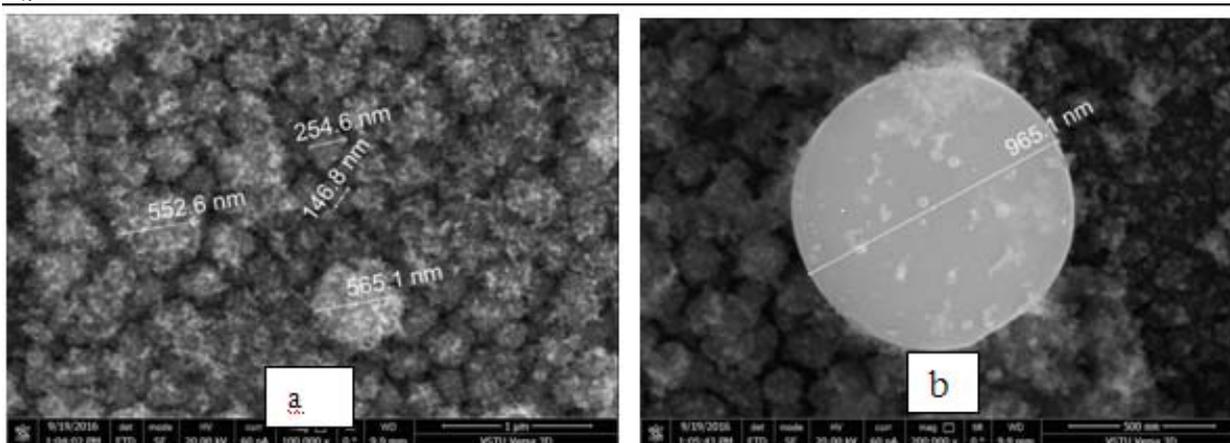


Рис. 8. - Микрофотографии микрочастиц никеля (Ni) (a) и микрочастицы (Ni) (b) диаметром $D_{Ni} \approx 965$ нм и наночастицы на ее поверхности диаметром $D_{Ni} \leq 16$ нм.

Таким образом, в работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса электрического взрыва металлических проводников (ЭВП), выполненных в виде проволочек из меди (Cu) и тугоплавких металлов (NiCr, Ti, Ni), продемонстрированы результаты получения тонких пленок методом электровзрывного напыления (ЭВН) и генерации металлических частиц микронного размера. Электрический взрыв проводников протекал в микросекундном временном интервале в не согласованном режиме, при этом наблюдались мелкодисперсные частицы размерами нанометрового диапазона и тонкие пленки толщиной сотни нанометров.

Литература

1. Sedoi V.S., Ivanov Y.F. Nanotechnology - 2008. Vol. 19. A. № 145. P. 710.
2. Булгаков А.В. и др. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество // коллективная монография. - Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. - С. 432с.
3. Терехов С.В. Варюхин В.Н., Юрченко В.М. Нанотехнологии. - изд. - Донецк: ДонНУ, 2018. - 261 с.
4. Гусев Е.Ю., Гамалеев В.А., Михно А.С., Ерошина Ю.Ю., Мироненко О.О., Габдеев М.М. Исследование газочувствительности пленок ZNO, полученных методом высокочастотного магнетронного распыления // Инженерный вестник Дона, 2012. № 4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1355.
5. Волков Н.Б., Майер А.Е., Седой В.С., Фенько Е.Л., Яловец А.П. Механизмы генерации наноразмерных металлических частиц при электрическом взрыве проводников // ЖТФ, 2010, Т. 80, В. 4. С. 77-80.
6. Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И., Сухова Т.А., Светличная В.Б., Матвеева Т.А. Определение параметров микроразмерных металлических структур электрического взрыва проводников // Научноёмкие инновационные технологии и экологическая безопасность в энергетике. - г.Волжский: Изд:

Филиал ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ" в г. Волжском, 2018.

7. Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И., Сухова Т.А., Светличная В.Б., Матвеева Т.А., Мустафина Д.А., Ребро И.В., Рахманкулова Г.А. / Исследование микроразмерных металлических структур, полученных методом электрического взрыва проводников // Инженерный вестник Дона, 2019, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5869.

8. Арнольд Г., Конн У. Электрический взрыв проводников // Под ред. Рухадзе А.А. М.: Мир. 1965. - 360 с.

9. Суркаев А.Л. Элементы физики высокоэнергетических импульсных процессов в конденсированных средах/Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2015 – 157 с.

10. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости / Киев: Наукова думка, 1986. – 205 с.

11. Коршунов А.В. Особенности дисперсного состава и морфологии частиц электровзрывных порошковых металлов / Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 3, С. 9-16.

12. Доровской В.М., Елесин Л.А., Столяров В.Л., Стеблевский А.В., Уруцков Л.И., Филиппов Д.В. / Исследование продуктов электровзрыва титановых фольг с помощью электронного микроскопа // Прикладная физика № 4. 2006, С. 28-34.

13. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В., Толбанова Л.О. / Получение нанопорошков молибдена в условиях электрического взрыва проводников // Известия Томского политехского университета. 2009. Т. 314. № 3, С.31-35.

References

1. Sedoi V. S., Ivanov Y. F. Nanotechnology. 2008. Vol. 19. A № 145 P. 710.
2. Bulgakov A.V. i dr. Sintez nanorazmernih materialov pri vozdejstvii moshhnyh potokov jenergii na veshhestvo [Synthesis of nanoscale materials under the influ-

- ence of powerful energy flows on matter]. Novosibirsk: Institut teplofiziki SO RAN, 2009. 432 p.
3. Terehov S.V., Varjuhin V.N., Jurchenko V.M. Nanotehnologii [Nanotechnology. Izd. Doneck: DonNU, 2018. 261 p.
 4. Gusev E.Ju., Gamaleev V.A., Mihno A.S., Eroshina Ju.Ju., Mironenko O.O., Gabdeev M.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1355.
 5. Volkov N.B., Majer A.E., Sedoj V.S., Fen'ko E.L., Jalovec A.P. ZhTF, 2010, T. 80, V. 4. pp. 77-80.
 6. Surkaev A.L., Kumysh M.M., Usachev V.I., Suhova T.A., Svetlichnaja V.B., Matveeva T.A. s.Volzhskej: Izd: Filial FGBOU VO "Nacional'nyj issledovatel'skij universitet "MJeI" v g. Volzhskom, 2018.
 7. Surkaev A.L., Kumysh M.M., Usachev V.I., Suhova T.A., Svetlichnaja V.B., Matveeva T.A., Mustafina D.A., Rebro I.V., Rahmankulova G.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5869.
 8. Arnol'd G., Konn U. Jelektricheskij vzryv provodnikov [Electrical explosion of conductors]. M.: Mir. 1965. 360 p.
 9. Surkaev A.L. Volgograd: IUNL VolgGTU, 2015. 157 p.
 10. Krivickij E.V. Dinamika jelektrovzryva v zhidkosti [Dynamics of electric explosion in a liquid]. Kiev: Naukova dumka, 1986. 205 p.
 11. Korshunov A.V. Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2012. T. 320. № 3, pp. 9-16.
 12. Dorovskoj V.M., Elesin L.A., Stoljarov V.L., Steblevskij A.V., Uruckoev L.I., Filippov D V. Prikladnaja fizika № 4. 2006, pp. 28-34.
 13. Il'in A.P., Nazarenko O.B., Tihonov D.V., Tolbanova L.O. Izvestija Tomskogo politehskogo universiteta. 2009. T. 314. № 3, pp.31-35.
-