

## Исследование микроразмерных металлических структур, полученных методом электрического взрыва проводников

*А.Л. Суркаев, М.М. Кумыш, В.И. Усачев, Т.А. Сухова, В.Б. Светличная,  
Т.А. Матвеева, Д.А. Мустафина, И.В. Ребро, Г.А. Рахманкулова*  
*Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград*

**Аннотация:** В статье представлены результаты экспериментальных исследований параметров микроразмерных металлических частиц и напыляемых пленок, получаемых методом электрического взрыва металлических проводников (ЭВП) и электровзрывного напыления (ЭВН), соответственно. В качестве взрывающихся проводников использовались медные (Cu) и алюминиевые (Al) металлические проволоочки. Геометрические параметры и физико-химический анализ, получаемых микрочастиц и тонких пленок, осуществлялся посредством универсальной двулучевой электронной системы Versa 3D. Из анализа полученных образцов напыляемых тонких пленок и мелкодисперсных частиц следует, что при протекании плотности разрядного тока  $j \approx 10^{10} \text{ А/м}^2$  миллисекундного диапазона толщина пленок и размеры частиц могут достигать величин меньше микронного масштаба.

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

Одним из приоритетных направлений в науке и технике на сегодняшний день является дальнейшее становление и развитие [1-4] нанотехнологий. В современной научно-технической литературе представлен широкий спектр методов и технологий получения микро и наноструктур [5], в частности: термическим испарением материалов (электрический взрыв проволоочных или ленточных металлических проводников), ионным распылением мишеней из наносимых материалов (магнетронное распыление) [6, 7], химическим осаждением пленок в результате протекания химических реакций и т.д. Метод электрического взрыва проводников (ЭВП) представляется одним из применяемых и перспективных способов получения напыляемых тонких пленок и мелкодисперсных порошков микронного и наноразмерного диапазона. В работах [8-9] в качестве примера рассмотрены возможные применения данного метода для электровзрывного напыления (ЭВН) тонких металлических пленок. При формировании тонких пленок и

---

генерации мелкодисперсных частиц значительную роль играют степень и однородность джоулевого нагрева взрывающегося проводника. Введенная в проводник энергия, радиус и разновидность металла проволоки, плотность разрядного тока, а также, параметры окружающей среды и ее химическая активность определяют толщину получаемых тонких пленок и геометрические размеры мелкодисперсных частиц.

Целью данной работы является получение и анализ микроразмерных металлических пленок и частиц, получаемых методом электровзрывного напыления (ЭВН) и электрического взрыва проводников (ЭВП) в воздушной атмосфере при протекании разрядного тока микросекундного временного интервала.

Методика получения напыляемых пленок и генерации микрочастиц является общедоступной [10], а анализ параметров получаемых структур представлен в ранее показанных работах [11, 12]. В данной серии экспериментов получение тонких пленок и микрочастиц осуществлялось методом ЭВП проволок различных металлов на аморфные и металлические подложки. В экспериментах использовался генератор импульсных токов (ГИТ) конденсаторного типа, технические характеристики которого представлены в таблице 1.

Таблица № 1

Технические характеристики энергетических накопителей.

Тип конд.	$U_{max}, кВ$	$C_{max}, мкФ$	$W_{max}, кДж$	$L_x, мкГн$	$R, Ом$	$T, мкс$
К75-100	3	1200	5,4	6,3	0,24	550
К75-100	3	2200	9,9	8.2	0,31	750

Сила разрядного тока определялась посредством пояса Роговского (ПР), падение напряжения на взрывающемся проводнике осуществлялось посредством делителя напряжения (ДН). Генерируемые электрические сигналы

регистрировались запоминающим двухлучевым электронным осциллографом (ЭО), имеющим оперативную связь с персональным компьютером (ПК). Трехмерная визуализация и физико-химический анализ получаемых металлических микроструктур осуществлялся универсальной двухлучевой системой –Versa 3D.

На рис.1(а) представлены характерные осциллограммы разрядного тока и напряжения, а также график 1(б) и 1(с) потребленной мощности как функции времени электрического взрыва медного (Cu) проводника с геометрическими параметрами  $\lambda=70$  мм,  $d=0,35$ мм. На осциллограмме тока наблюдается ярко выраженная пауза тока, определяющая момент непосредственно взрыва проводника (показана белой стрелкой). Применение медного (Cu) проводника с представленными геометрическими параметрами не позволяет сформировать электрический взрыв, протекающий в согласованном режиме - полное выделение энергии в первой половине полупериода разряда.

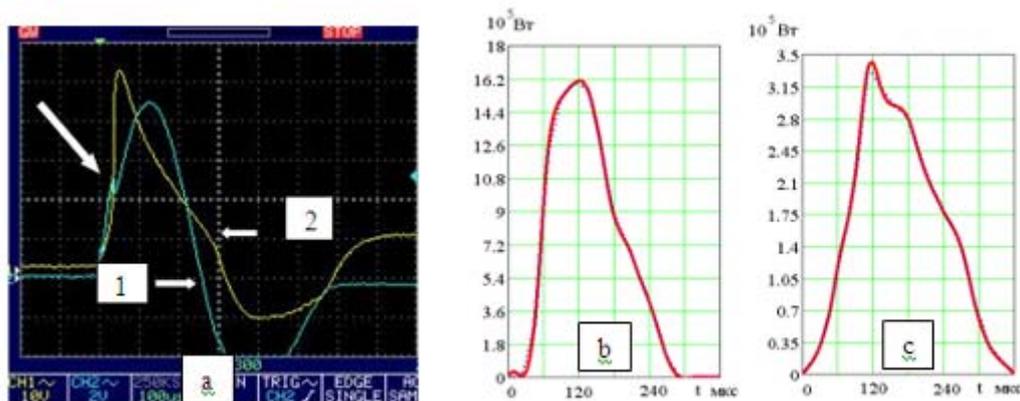


Рис. 1. - Осциллограммы 1 - тока и 2 - напряжения 1(а) ЭВП медной (Cu) проволочки; график потребленной мощности в первой 1(б) и второй 1(с) половине периода разряда как функции времени.

В данном случае для используемой энергетической установки полное выделение энергии происходит за весь периода разряда. Ситуация усугубляется с увеличением длины проводника до  $\lambda=150$  мм, в этом случае момент взрыва располагается в первой четверти периода, не достигая максимального

значения тока, и вся энергия конденсаторного накопителя реализуется за весь полный период. Более выгодная ситуация в смысле согласованности режима протекания взрыва складывается при взрыве алюминиевого проводника, пауза тока (рис. 2) располагается в области максимального значения тока разряда. Тем не менее, возникает аналогичная ситуация, вся энергия конденсаторного накопителя реализуется за весь полный период. На (рис.3) представлены осциллограммы разрядного тока и напряжения, иллюстрирующие протекание электрического взрыва металлического проводника (Cu) в согласованном (оптимальном) режиме [13] в воздушной среде.

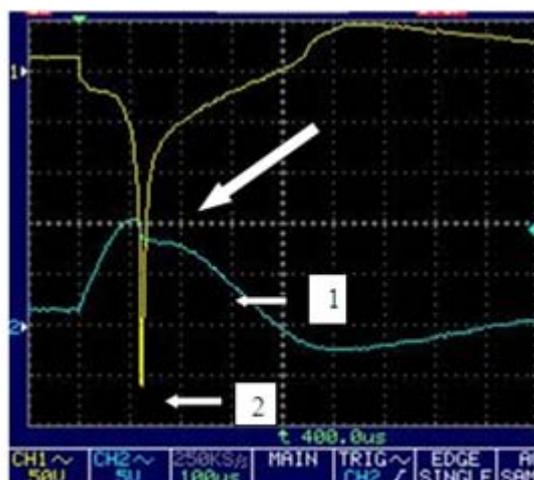
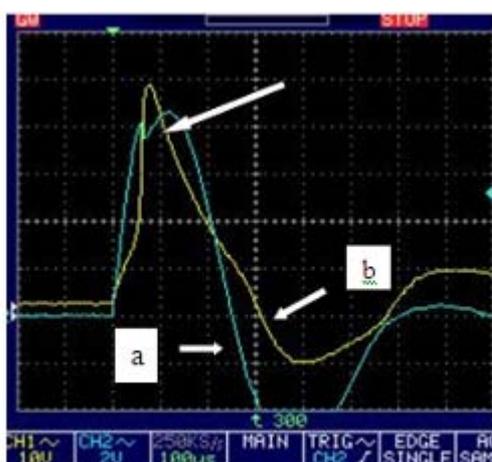


Рис. 2. - Осциллограммы тока (a) и напряжения (b) ЭВП. Параметры алюминиевой (Al) проволоки  $\lambda=70\text{мм}$ ,  $d=0,8\text{мм}$ . Параметры разрядного контура  $C=1200\text{ мкФ}$ ,  $U_0=2,8\text{кВ}$ .  
Рис. 3. - Осциллограммы согласованного режима ЭВП. Параметры проволоки (Cu)  $\lambda=110\text{мм}$ ,  $d=0,8\text{мм}$ . Параметры разрядного контура  $C=2200\text{ мкФ}$ ,  $U_0=2,8\text{кВ}$ .

Наличие паузы тока (показано белой стрелкой), характеризующей момент непосредственно разрушения металлической проводимости меди, и расположенной в области максимального значения тока, во второй половине полупериода разряда, говорит о согласованности режима взрыва. На микрофотографиях (рис. 4) представлены медные (Cu) тонкие пленки, а также по-

казаны характерные размеры толщины (срез), измеренные в пределах локально произвольной площадки. Толщина пленки, полученная при взрыве проволоочки с размерами  $\lambda=70$  мм,  $d=0,35$  мм, колеблется в пределах  $h=1,883\div 2,482$  мкм. Толщина пленки, полученная при взрыве проволоочки с размерами  $\lambda=150$  мм,  $d=0,4$  мм, колеблется в пределах  $h=1,461\div 4,071$  мкм, что говорит о неоднородности взрыва и напыления.

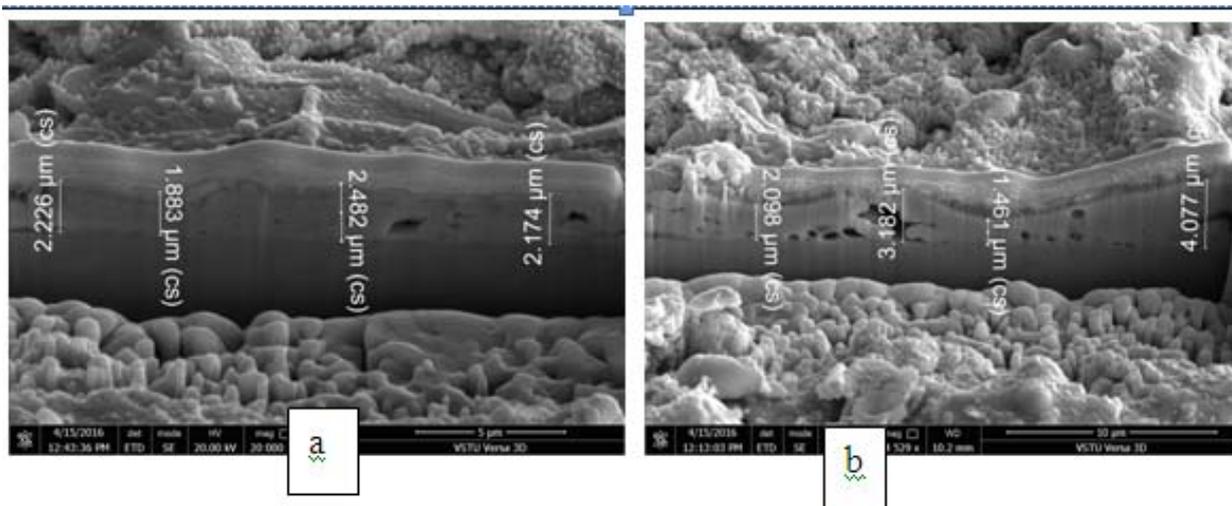


Рис. 4. – Микрофотография металлической медной (Cu) пленки на стальной подложке, полученной методом ЭВП с геометрическими размерами проволочек (а)  $\lambda=70$  мм,  $d=0,35$  мм и (б)  $\lambda=150$  мм,  $d=0,4$  мм; полное выделение энергии за весь период разряда.

На (рис. 5) представлена микрофотография металлической алюминиевой (Al) пленки на стальной подложке, полученной методом ЭВН с геометрическими размерами взрывающейся проволоочки  $\lambda=70$  мм,  $d=0,8$  мм, в которой также наблюдается достаточно большой разброс толщины пленки  $h=1,967\div 6,403$  мкм, ее неравномерность напыления и неоднородность электрического взрыва, которая подтверждается осциллограммами тока и напряжения. При этом следует отметить, что при таком режиме протекания взрыва возникают участки с полным отсутствием (5б) алюминиевого напыления

(показано белыми стрелками), а также отсутствием в этой области металлических частиц микро и наноразмера.

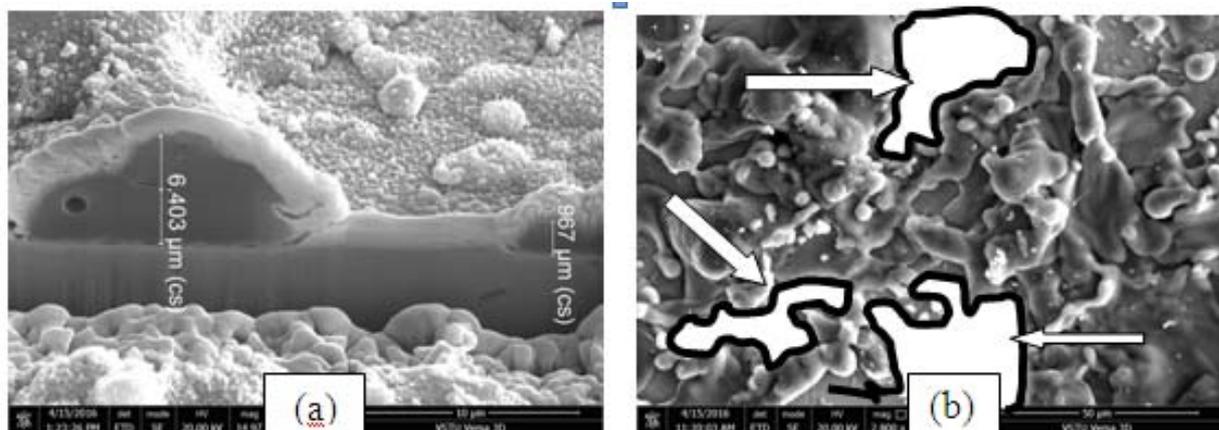


Рис. 5. – Микрофотография (а) металлической алюминиевой (Al) пленки на стальной подложке, полученной методом ЭВН с геометрическими размерами проволоочки  $\lambda=70$  мм,  $d=0,85$ мм; полное выделение энергии за весь период разряда. Наличие участков (b) подложки с полным отсутствием алюминиевого напыления

В данном случае можно говорить о получении тонких пленок, обладающих островковой электропроводностью. Металлические nanoостровковые покрытия получали авторы [14] методом конденсации металла из паровой фазы (PVD-метод) в вакууме. Размеры островков в образцах получаемых пленок лежали в пределах  $d_{осп}=100-800$  нм, в нашем случае в локально расположенном участке пленки размеры островков составляли  $d_{осп}=10-50$  мкм. Определить островковую электропроводность алюминиевого напыления электропроводность не удастся вследствие применения стальной подложки.

На (рис. 6) представлены напыляемая (Cu) медная пленка (а) и получаемые микрочастицы (b) на алюминиевой (Al) подложке.

Размеры пленки достигают  $h=329,7\div 494,8$  нм, размеры микрочастиц  $h=1,673\div 5,180$  мкм. На (рис. 7) и в таблице 2 представлен химический состав полученных микроструктур.

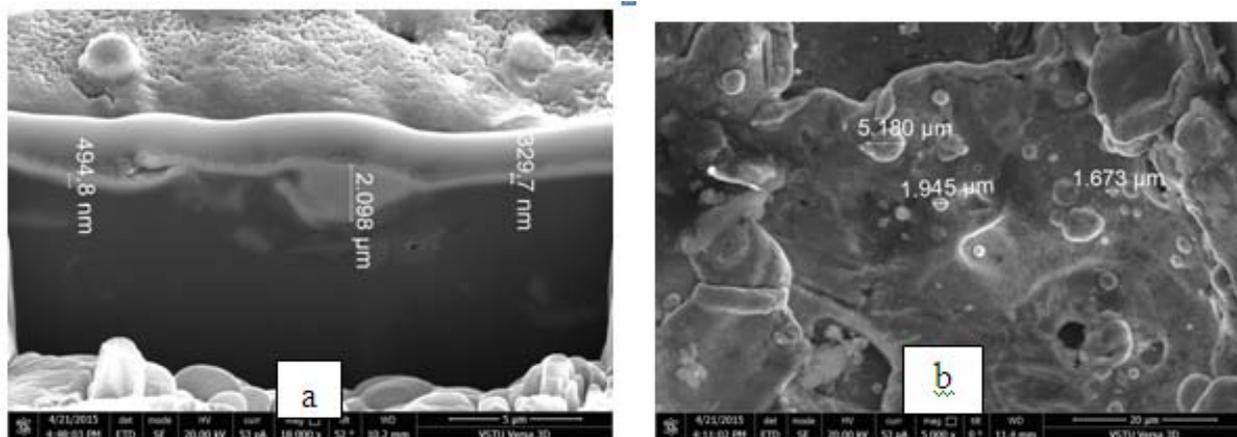


Рис. 6. – Медная (Cu) пленка (a) и микрочастицы (b) на алюминиевой (Al) подложке.

Таблица № 2

Элемент	Весовая доля, %	Атомная доля, %	Погрешность, %
O K	5.08	16.5	9.28
AlK	5.29	10.2	10.6
CuK	89.63	73.31	2.11

#### Химический состав микроструктур.

Из полученных результатов следует наличие в полученных структурах химических элементов меди и алюминия, а также кислорода (электрический взрыв осуществлялся в воздушной среде) в определенных пропорциях, зависящих от выбранного участка исследуемого образца. Основной вклад в химический состав образцов вносит медь. Явно выраженной зависимости толщины пленки и размера генерируемых микрочастиц от использования подложек из различных материалов не выявлено. В таблице 3 приведены основные измерительные и расчетные параметры физических величин электрического взрыва проводников.

Основные параметры физических величин ЭВП.

Металл	Размер мм	$W_0$ , кДж	$U_0$ ,кВ	$W$ , Дж	$j^* \cdot 10^6$ , А/мм <sup>2</sup>	$W_{\text{поп}}^{\text{оаа}}$ , кДж/г	$W_{\text{субл}}$ , Дж
Cu	$\lambda=70, d=0,35$	4,7	2,8	650	0,228	5,31	318,4
Cu	$\lambda=150, d=0,4$	8,62	2,8	725	0,155	5,31	887
Al	$\lambda=70, d=0,8$	8,62	2,8	366	0,042	8,49	806,1

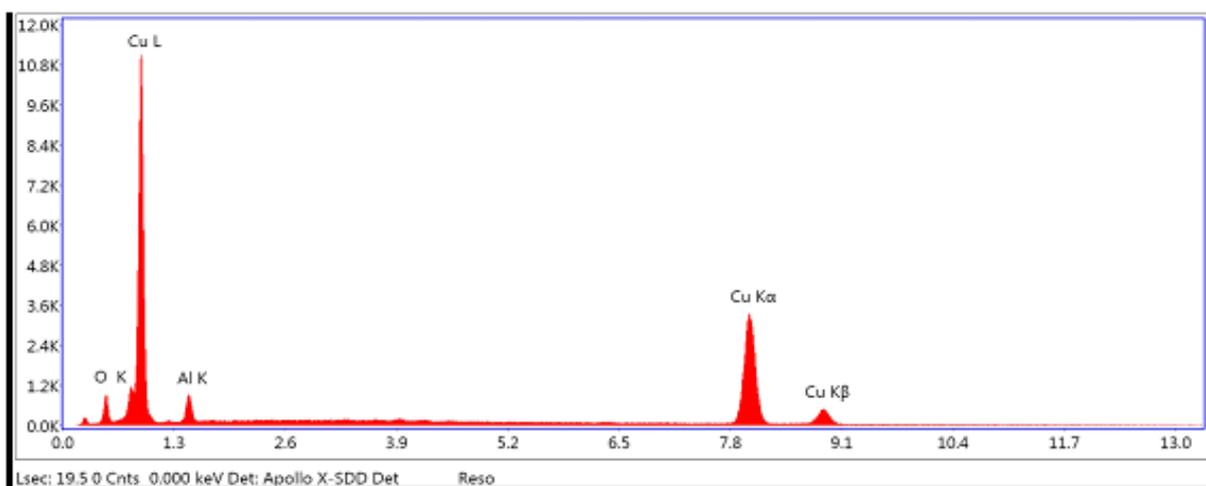


Рис.7. - Химический состав микроструктур.

В таблице 3 представлены следующие параметры процесса взрыва:  $W_0$  - запасенная энергия конденсаторного накопителя;  $U_0$  - начальное напряжение на конденсаторной батарее;  $W$  - энергия, вложенная в проводник  $W = \int IUdt$ ;  $j^*$  - максимальное значение плотности разрядного тока;  $W_{\text{поп}}^{\text{оаа}}$  - удельная энергия сублимации [15];  $W_{\text{субл}}$  - энергия сублимации, необходимая для осуществления фазовых переходов данного образца.

Таким образом, в работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса электрического взрыва металлических проводников (ЭВП), выполненных в виде медных и алюминиевых проволочек, 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 мелкодисперс-



ные частицы размерами меньше микронного масштаба и тонкие пленки толщиной сотни нанометров. В качестве примера для каждого взрывающегося образца рассчитаны значения вложенной энергии и энергии сублимации.

### Литература

1. Sedoi V.S., Ivanov Y.F. Nanotechnology - 2008. Vol. 19. A. no. 145. P. 710.
2. Kotov Y.A. J. Nanopart. Res. - 2003. Vol. 5. P. 539.
3. 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.
4. Назаренко О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение /Под ред. Ильина А.П. – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2005. – 148 с.
5. Панфилов Ю.В. Нанесение тонких пленок в вакууме // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 3. С. 76-80.
6. 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 (часть 2) URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1355/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1355/).
7. Гусев Е.Ю., Михно А.С., Гамалеев В.А., Юрченко С.А. Исследования влияния относительной влажности воздуха на электрическое сопротивление нанокристаллических пленок ZNO, полученных методом реактивного магнетронного распыления // Инженерный вестник Дона, 2014, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2554/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2554/).
8. Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И., Канцдалов Д.А. Устройство для нанесений покрытий электрическим взрывом фольги. Пат. № 2449052 С1 РФ. МПК С 23 С 14/32 / ВолгГТУ Волгоград. Заяв.: 2010152115/02, 20.12.2010. Оpubл.: 27.04.2012, Бюл. № 30.



9. Суркаев А.Л., Кульков В.Г., Кумыш М.М., Усачев В.И. Устройство для нанесения покрытий электрическим взрывом фольги. Пат. № 2449945 С1 РФ. МПК С 23 С 14/32 / ВолгГТУ Волгоград. Заяв.: 2010139502/02, 24.09.2010. Оpubл.: 10.05.2012, Бюл. № 30.
10. Арнольд Г., Конн У. Электрический взрыв проводников // Под ред. Рухадзе А.А.. М.: Мир. 1965. - 360 с.
11. Суркаев А.Л. Возникновение магнитогидродинамических возмущений в металлических проводниках при протекании импульса разрядного тока // ЖТФ, 2015, Т 85, В. 7. С. 37-44.
12. Суркаев А.Л. Элементы физики высокоэнергетических импульсных процессов в конденсированных средах/Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2015 – 157 с.
13. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости / Киев: Наукова думка, 1986. – 205 с.
14. Томилин С.В., Бержанский В.Н., Милюкова Е.Т., Томилина О.А., Яновский А.С. / Получение nanoостровковых пленок Sn, Al, Cu и исследование их электропроводящих свойств // Физика твердого тела, 2017, том 59, вып. 4. С. 639 – 647.
15. Драпкин Б.М., Руденко В.А. Об определении энергии сублимации металлов / ЖТФ. Т 62, вып. 9, 1992. С. 125-130.

#### References

1. Sedoi V.S., Ivanov Y.F. Nanotechnology. 2008. Vol. 19. A. no. 145. P. 710.
  2. Kotov Y.A. J. Nanopart. Res. 2003. Vol. 5. 539 p.
  3. 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.
  4. Nazarenko O.B. Pod red. Il'ina A.P. Elektrovzryivnyie nanoporoshki: poluchenie, svoystva, primenenie [Electroexplosive nanopowders: preparation, properties, application]. Tomsk: Izd-vo Tom. Un-ta, 2005. 148 p.
-

5. Panfilov Ju.V. Technologies in Electronic Industry. 2008. № 3. pp.76-80.
6. Gusev E.Ju., Gamaleev V.A., Mihno A.S., Eroshina Ju.Ju., Mironenko O.O., Gabdeev M.M. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2012. № 4 (part 2). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1355/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1355/).
7. Gusev E.Ju., Mihno A.S., Gamaleev V.A., Jurchenko S.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2014. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2554/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2554/).
8. Surkaev A.L., Kumysh M.M., Usachev V.I., Kancedalov D.A. Ustrojstvo dlja nanesenij pokrytij jelektricheskim vzryvom fol'gi [Apparatus for electric foil blasting]. Pat. № 2449052 S1 RF. MPK S 23 S 14/32. VolgGTU Volgograd. Zajav.: 2010152115/02, 20.12.2010, Opubl.: 27.04.2012, Bjul. № 30.
9. Surkaev A.L., Kul'kov V.G., Kumysh M.M., Usachev V.I. Ustrojstvo dlja nanesenija pokrytij jelektricheskim vzryvom fol'gi [Coater for electric explosion of the foil.]. Pat. № 2449945 S1 RF. MPK S 23 S 14/32. VolgGTU Volgograd. Zajav.: 2010139502/02, 24.09.2010, Opubl.: 10.05.2012, Bjul. № 30.
10. Arnol'd G., Konn U. Jelektricheskij vzryv provodnikov [Electrical explosion of conductors] Pod red. Ru-hadze A.A.. M.: Mir. 1965. 360 p.
11. Surkaev A.L. ZhTF, 2015, T 85, V. 7. pp. 37-44.
12. Surkaev A.L. Jelementy fiziki vysokojenergeticheskikh impul'snyh pro-cessov v kondensirovannyh sredah [Elements of physics of high-energy pulsed processes in condensed matter] Volgograd: IUNL VolgGTU, 2015.157 p.
13. Krivickij, E.V. Dinamika jelektrovzryva v zhidkosti [Dynamics of electric explosion in a liquid] Kiev: Naukova dumka, 1986. 205 p.
14. Tomilin S.V., Berzhanskij V.N., Miljukova E.T., Tomilina O.A., Janovskij A.S. Fizika tverdogo tela, 2017, tom 59, vyp. 4. pp. 639 – 647.
15. Drapkin B.M., Rudenko V.A. ZHTF. T 62, vyp. 9, 1992. pp. 125-130.