

УДК 621.7

## **Изготовление и исследование низкоплотных металлических материалов**

Казаков А. Г., Пхайко Н. А., Сафронов К. В., Горнов В. Н.,  
Пешкичева Л. Е., Пахомов С. Н., Писарев Е. М.,  
Смирнов Ю. Ю., Савельев А. В.

*ФГУП Российский Федеральный Ядерный Центр —  
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина  
ул. Васильева, д. 13, г. Снежинск,  
Челябинская область, 456770, Российская Федерация  
dep5@vniitf.ru*

Получено: 20 июля 2022 г.

Отрецензировано: 22 июля 2022 г.

Принято к публикации: 22 июля 2022 г.

**Аннотация:** В статье представлена технология получения низкоплотной металлической пены из алюминия и меди методом резистивного распыления в среде инертного газа — аргона. Распыление производилось при двух давлениях газа: 40 Па и 440 Па. Минимальная плотность была достигнута на образце алюминиевой пены, полученной при давлении 440 Па. Толщина лазерной мишени составляет  $74,8 \pm 0,9$  мкм. Плотность пенного материала равна  $72 \pm 4$  мг/см<sup>3</sup>, пористость — 97 %. Размер пор и полостей не превышает 3 мкм.

**Ключевые слова:** низкоплотная металлическая пена, алюминий, медь, метод резистивного распыления, лазерная мишень.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Изготовление и исследование низкоплотных металлических материалов / А. Г. Казаков и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 3. С. 342—352.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Изготовление и исследование низкоплотных металлических материалов / А. Г. Казаков, Н. А. Пхайко, К. В. Сафронов и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 342—352.

### **1. Введение**

Согласно данным, приведенным в работе [1], использование низкоплотных мишеней позволяет значительно увеличить выход рентгенов-

ского излучения из лазерной плазмы. Настоящий доклад посвящен разработке технологии изготовления низкоплотных мишеней для экспериментов по получению мощных пикосекундных импульсов мягкого рентгена из лазерной плазмы. Для экспериментов на лазерной установке характерные размеры пор и полостей материала мишени должны быть много меньше диаметра фокального пятна.

Таковыми характеристиками могут обладать пористые материалы, имеющие поры, глубина которых больше, чем их ширина, например металлические пенные материалы. Методы получения пористых металлов, описанные в литературе [2—5], позволяют получать материалы в широком диапазоне плотностей от  $1,6 \text{ мг/см}^3$  до  $700 \text{ мг/см}^3$ . Однако при низкой плотности пенные материалы, полученные промышленными способами (матричный метод, диспергирование газа в расплав, метод спекания с использованием порофоров), обладают большими размерами пор от 100 до 3000 мкм, что является недопустимым для экспериментов по лазерному ускорению заряженных частиц.

Ультрадисперсные металлические пенные системы с наноразмерным диаметром частиц (до 200 нм) могут быть изготовлены испарением в установке термического испарения в среде инертного газа. Образующиеся в зоне испарения преимущественно сферические частицы в среде газа охлаждаются и конденсируются в виде кластеров на охлаждаемой подложке, образуя пористую структуру металла. В работе [5] охарактеризована форма и размер металлических частиц, полученных при различных технологических параметрах. Для большинства материалов зарождение и рост частиц зародышей происходит в области над поверхностью металла, на подложку частицы переносятся конвективным потоком газа. При испарении металлов в атмосфере более тяжелых инертных газов (гелий, аргон, криптон) образуются более крупные частицы. Рост частиц прямо пропорционален давлению газа и возрастает экспоненциально с ростом температуры у источника испарения. Изменяя параметры технологического процесса, можно получать структуры с размером частиц от 0,2 до 200 нм. За основу технологии изготовления лазерных мишеней взяты данные, представленные в работе [6].

## **2. Описание техпроцесса изготовления пенометаллов**

Для изготовления низкоплотных пенометаллов использовалась установка резистивного распыления УВН-2М, оснащенная системой газонапуска для создания инертной атмосферы. В качестве рабочего газа использовался аргон при давлении в рабочей камере 40 и 440 Па.

В качестве распыляемой навески использовались медь марки М1 (99,90 % *Cu*) и алюминий марки АД1 (99,30 % *Al*).

Распыление меди велось из молибденовой лодочки, распыление алюминия — с вольфрамового проволочного испарителя.

В качестве подложки использовалась полоска из алюминиевой фольги, поверхность которой предварительно обезжиривалась. Рядом с подложками располагали свидетель, по которому определяли толщину нанесенного слоя.

В вакуумной камере свидетель и подложки закреплялись в подложкодержателе на одинаковом расстоянии от навески распыляемого материала. Рабочая камера откачивалась турбомолекулярным насосом до давления  $10^{-3}$  Па. По окончании откачки камеру заполняли аргоном до рабочего давления 40 Па, либо 440 Па (в разных экспериментах). Контроль давления осуществлялся с помощью вакуумметра СС-10. После достижения рабочего давления внутри камеры установки проводили напыление пористого слоя металла. Процесс напыления велся до полного испарения навески. Термостабилизация образцов проводилась в течение 2 часов при давлении в рабочей камере  $10^{-3}$  Па. После разгерметизации рабочей камеры подложки и свидетель извлекали из подложкодержателя.

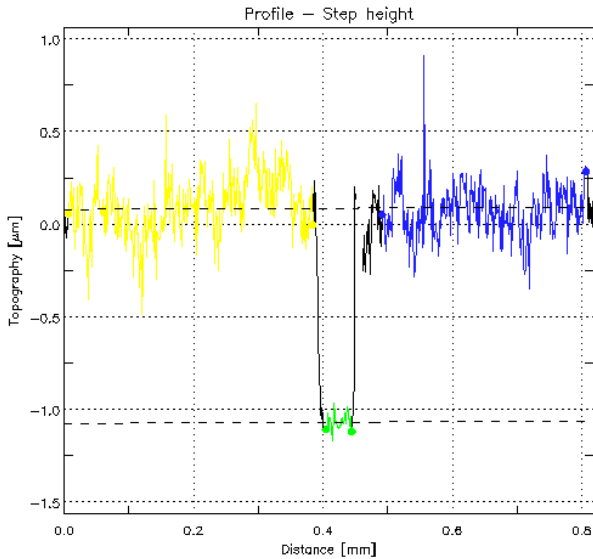
### 3. Исследование характеристик полученного материала

Основным параметром, определяющим качество изготовленной мишени, является ее плотность (не более  $100 \text{ мг/см}^3$ ). Кажущаяся плотность учитывает массу единицы объема пенного материала вместе с порами и пустотами ( $\text{мг/см}^3$ ). Массу напыленного слоя определяли разницей между массой свидетеля с напыленным слоем и массой свидетеля до напыления.

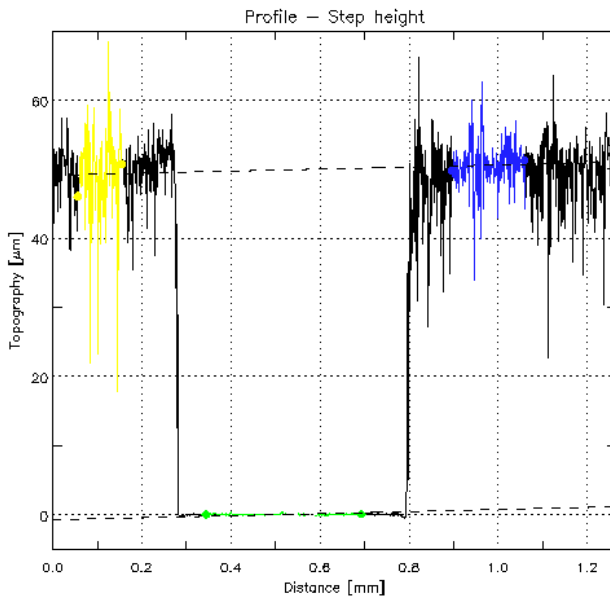
Для определения толщины покрытия острым ножом снималась часть покрытия в центральной части образцов. Высоту образовавшейся ступеньки измеряли с помощью оптического профилометра *FRT MicroSpy*. На рисунках 1 и 2 представлены профили ступенек медных и алюминиевых пен, полученных при разных давлениях аргона в рабочей камере.

Результаты измерений и вычислений параметров пенного материала представлены в таблице 1.

При низких давлениях рабочего газа (40 Па) образовывались более плотные пленки. Образец пеноалюминия, изготовленный при рабочем давлении аргона 440 Па, обладает удовлетворительными характеристиками для создания лазерной мишени для экспериментов по получению мощных пикосекундных импульсов мягкого рентгена.

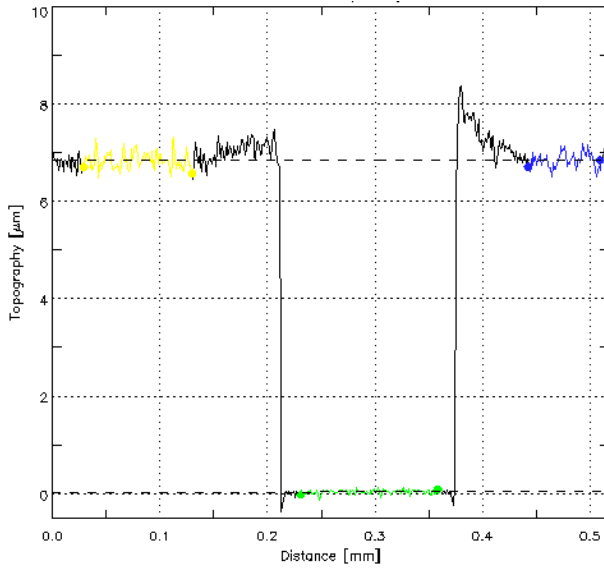


а

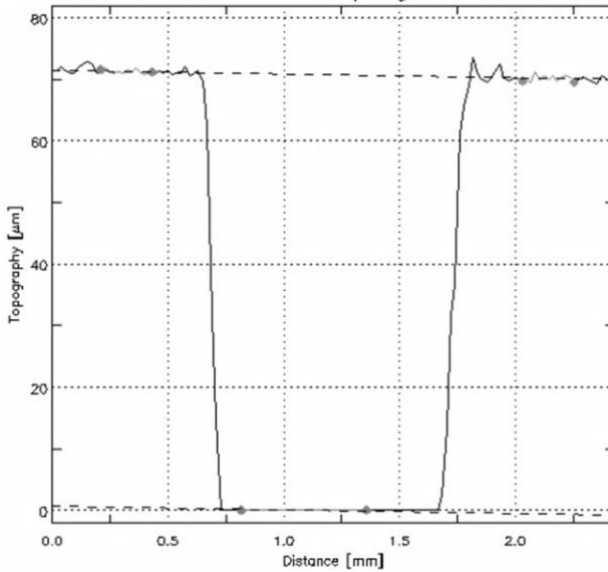


б

Рис. 1. Профиль медного пенного материала, нанесенного при давлениях 40 Па (а) и 440 Па (б).  
Fig. 1. Profile of copper foam applied at pressures of 40 Pa (a) and 440 Pa (b)



а



б

Рис. 2. Профиль алюминиевого пенного материала, нанесенного при давлениях 40 Па (а) и 440 Па (б).

Fig. 2. Profile of aluminum foam applied at pressures of 40 Pa (a) and 440 Pa (b)

Таблица 1 — Table 1

Обр.	Me	Давление, Па	Масса пленки, мг	Толщина, мкм	Кажущаяся плотность, мг/см <sup>3</sup>	Пористость, %
1	Al	40	2,1 ± 0,1	6,7 ± 0,2	800 ± 40	70
2	Al	440	2,0 ± 0,1	74,8 ± 0,9	72 ± 4	97
3	Cu	40	1,5 ± 0,1	1,2 ± 0,3	3 400 ± 200	62
4	Cu	440	4,1 ± 0,1	50 ± 4	214 ± 5	98

Исследование структуры и состава поверхностного слоя пены проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) высокого разрешения с энергодисперсионным спектрометром. На рисунке 3 приведено изображение пеноалюминия, полученного при давлении 440 Па. Морфология материала представляет собой пену с наноразмерными цепочками частиц напыленного металла. Размер пор и полостей не превышает 3 мкм.

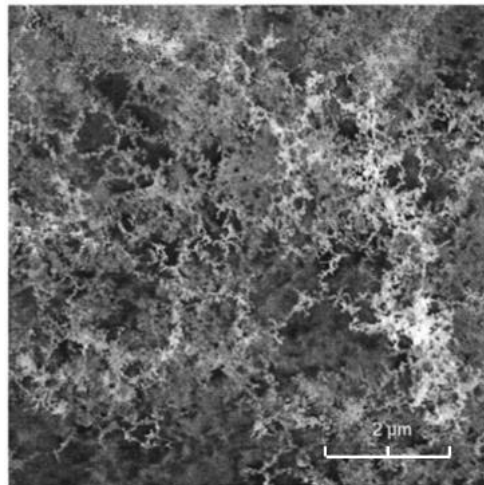


Рис. 3. СЭМ изображение поверхности алюминиевой пены, полученной резистивным методом при 440 Па.

Fig. 3. SEM image of the surface of aluminum foam obtained by resistive method at 440 Pa

Состав и состояние поверхностного слоя частиц исследовали с применением рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). На рисунке 4 представлен рентгеновский спектр, полученный с поверхности алюминиевой пены.

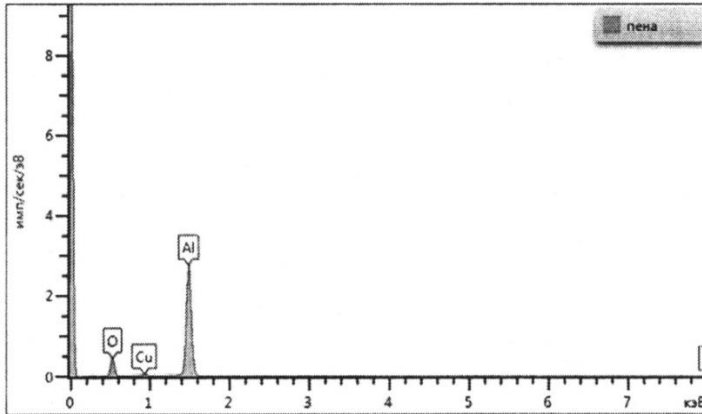


Рис. 4. Рентгеновский спектр поверхности алюминиевой пены, полученной резистивным методом при 440 Па.

Fig. 4. X-ray spectrum of the surface of aluminum foam obtained by the resistive method at 440 Pa



Рис. 5. Внешний вид лазерных мишеней.

Fig. 5. Appearance of laser targets

На рентгеновском снимке регистрируется пик, принадлежащий кислороду. Наличие кислорода на поверхности пенного материала связано с высокой химической активностью алюминия, приводящей к быстрому окислению структуры.

Таким образом, полученные образцы материалов представляет собой пену с наноразмерными частицами алюминия и оксида алюминия. Размер пор и полостей не превышает 3 мкм. Толщина лазерной мишени составляет  $74,8 \pm 0,9$  мкм. Плотность пенного материала равна  $72 \pm 4$  мг/см<sup>3</sup>, пористость — 97 %. Из полученных в работе образцов пенного алюминия были изготовлены мишени для экспериментов по получению мощных пикосекундных импульсов мягкого рентгена из лазерной плазмы.

#### 4. Заключение

Для экспериментов по получению из лазерной плазмы мощных пикосекундных импульсов мягкого рентгена методом резистивного распыления в среде инертного газа изготовлен металлический низкоплотный материал ( $72 \pm 4$  мг/см<sup>3</sup>). Весовым методом определена кажущаяся плотность, где толщину покрытия измеряли по профилю поверхности покрытия на свидетеле с помощью профилометра *FRT Micro Spy*. Рассчитана пористость металлической пены. Удовлетворительными характеристиками для создания лазерной мишени обладает низкоплотный материал из пеноалюминия, нанесенный при 440 Па. Из данного материала изготовлены лазерные мишени. Структура пенного материала и толщина мишени исследована методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения с энергодисперсионным спектрометром.

#### Список литературы

1. Intense Picosecond X-Ray Pulses from Laser Plasmas by Use of Nanostructured “Velvet” Targets / G. Kulcsár, D. AlMawlawi, F. W. Budnik et al. // *Physical Review Letters*. Vol. 84, no 22. P. 5149—5152.
2. Крушенко Г. Г., Решетникова С. Н., Двирный Г. В. Наножетонная технология изготовления конструкционных алюминиевых профилей // *Исследования наукограда*. 2016. № 1-2 (16). С. 46—50.
3. Назарова М. А., Аминова Г. А., Кузнецов В. Г. Способы получения металлической пены // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18, № 1. С. 204—205.
4. Взаимодействие ударной волны с металлической алюминиевой пеной с закрытой пористостью / М. Д. Гозл, Ф. Альтенфер, В. А. Матсагар и др. // *Физика горения и взрыва*. 2015. Т. 51, № 3. С. 98—105.
5. Калининченко В. А., Калининченко А. С. Способы получения вспененного алюминия, области его применения и ряд особенностей механической обработки // *Литье и металлургия*. 2005. № 2 (34). С. 164—169.
6. Granqvist C. G., Buhrman R. A. Ultrafine metal particles // *Journal of Applied Physics*, 1976. Vol. 47, no. 5. P. 2200—2219.



### Информация об авторах

**Казakov Александр Георгиевич**, инженер-исследователь III категории, ФГУП РФЯЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

**Пхайко Николай Анатольевич**, начальник группы, ФГУП РФЯЦ — ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина.

**Сафонов Константин Владимирович**, начальник группы, ФГУП РФЯЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

**Горнов Владимир Николаевич**, ведущий инженер-исследователь, ФГУП РФЯЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

**Пешкичева Людмила Евгеньевна**, инженер-исследователь III категории, ФГУП РФЯЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

**Пахомов Сергей Николаевич**, инженер-исследователь II категории, ФГУП РФЯЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

**Писарев Евгений Максимович**, лаборант, ФГУП РФЯЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

**Смирнов Юрий Юрьевич**, лаборант, ФГУП РФЯЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

**Савельев Александр Валерьевич**, лаборант, ФГУП РФЯЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

## Production and Research of Low-Density Metal Materials

A. G. Kazakov, N. A. Phaiko, K. V. Safronov,  
V. N. Gornov, L. E. Peshkicheva, S. N. Pakhomov,  
E. M. Pisarev, Y. Y. Smirnov, and A. V. Savelyev

*Russian Federal Nuclear Center –  
Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics  
13, Vasilyeva st. PO box 245, Snezhinsk, Chelyabinsk reg., 456770, Russian Federation  
dep5@vniitf.ru*

Received: July 20, 2022

Peer-reviewed: July 22, 2022

Accepted: July 22, 2022

**Abstract:** *For experiments on laser interaction with matter, a method has been developed for manufacturing a low-density material from aluminum and copper by the method of resistive sputtering in an inert gas – argon. Deposition was carried out at two gas pressures: 40 Pa and 440 Pa. The densities of the obtained samples were determined by the gravimetric method: the mass of the sprayed layer was measured by weighing the substrate before and after deposition, the volume was calculated based on measurements of the material thickness using an optical profilometer. The thickness of the deposition layer is  $74.8 \pm 0.9 \mu\text{m}$ . The minimum density was achieved on a sample of a porous aluminum layer obtained at a pressure of 440 Pa. Its value was  $(72 \pm 4) \text{ mg/cm}^3$ . According to the images obtained with a scanning electron microscope, it was found that the pore size in the material does not exceed 3 microns. Measurements of the chemical composition with an X-ray fluorescence spectrometer showed the presence of oxygen on the samples, which indicates the oxidation of the surface layer of the prepared samples. targets (2 pcs.) for experiments on laser interaction with matter were made from the samples of porous aluminum obtained in this work.*

**Keywords:** *low-density metal foam, aluminum, copper, resistive sputtering method, laser target.*

**For citation (IEEE):** A. G. Kazakov et al., “Production and Research of Low-Density Metal Materials,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 342–352, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.25. (In Russ.).

### References

- [1] G. Kulcsár et al., “Intense Picosecond X-Ray Pulses from Laser Plasmas by Use of Nanostructured ‘Velvet’ Targets,” *Physical Review Letters*, vol. 84, no. 22, pp. 5149–5152, May 2000, doi: 10.1103/physrevlett.84.5149.

- [2] G. G. Krushenko, S. N. Reshetnikova, and G. V. Dvirny, "Nanoextrusion technology for manufacturing structural aluminum profiles," *Issledovaniya Naukograda*, no. 1-2 (16), pp. 46–50, 2016. (In Russ.).
- [3] M. A. Nazarova, G. A. Aminova, and V. G. Kuznetsov, "Methods for obtaining metallic foam," *Vestnik of the Technological University*, vol. 18, no. 1, pp. 204–205, 2015. (In Russ.).
- [4] M. D. Goel, F. Altenhofer, V. A. Matsagar, A. K. Gupta, K. Mundt, and S. Marburg "Interaction of a Shock Wave with a Closed Cell Aluminum Metal Foam," *Fizika goreniya i vzryva*, vol. 51, no. 3, 2015, doi: 10.15372/fgv20150314. (In Russ.).
- [5] V. A. Kalinichenko and A. S. Kalinichenko, "Methods for obtaining foamed aluminum, areas of its application and a number of features of mechanical processing," *Lityo i metallurgiya*, no. 2 (34), pp. 164–169, 2005. (In Russ.).
- [6] C. G. Granqvist and R. A. Buhrman, "Ultrafine metal particles," *Journal of Applied Physics*, vol. 47, no. 5, pp. 2200–2219, May 1976, doi: 10.1063/1.322870.

### Information about the authors

**Alexander G. Kazakov**, research engineer of category III, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

**Nikolay A. Paiko**, head of the group, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

**Konstantin V. Safronov**, head of the group, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

**Vladimir N. Gornov**, Leading Research Engineer, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

**Lyudmila E. Peshkicheva**, category III research engineer, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

**Sergey N. Pakhomov**, research engineer of the 2<sup>nd</sup> category, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

**Evgeny M. Pisarev**, laboratory assistant, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

**Yury Y. Smirnov**, laboratory assistant, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

**Alexander V. Savelyev**, laboratory assistant, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.