

УДК 544.032.65

МОРФОЛОГИЯ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ, ЦИНКА, МЕДИ И КОБАЛЬТА, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ ПОД ВОДОЙ

С. С. АНУФРИК¹⁾, С. Н. АНУЧИН¹⁾, Н. Н. КУРЬЯН¹⁾, Н. Г. ВАЛЬКО¹⁾

¹⁾Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

Аннотация. Наночастицы никеля, цинка, меди и кобальта получены из различных твердофазных, в том числе гальванических, материалов при импульсной лазерной абляции в дистиллированной воде. Представлена экспериментальная лазерная установка, а также изложена методика проведения исследования. Проанализированы данные, полученные методами атомно-силовой и просвечивающей электронной микроскопии, для определения размерных

Образец цитирования:

Ануфрик СС, Анучин СН, Курьян НН, Валько НГ. Морфология наночастиц никеля, цинка, меди и кобальта, синтезированных при лазерной абляции гальванических мишеней под водой. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2026;1:4–12.
EDN: CSMLMC

For citation:

Anufrick SS, Anuchin SN, Kurian NN, Valko NG. Morphology of nickel, zinc, copper and cobalt nanoparticles synthesised by laser ablation of galvanic targets underwater. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2026;1:4–12. Russian.
EDN: CSMLMC

Авторы:

Славамир Степанович Ануфрик – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета.

Сергей Николаевич Анучин – заведующий лабораторией компьютерного моделирования физических процессов, лабораторией лазерной физики и технологий и лабораторией термодинамики, гидродинамики и теплообмена кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета.

Николай Николаевич Курьян – старший преподаватель кафедры современных технологий программирования факультета математики и информатики.

Наталья Георгиевна Валько – доктор физико-математических наук, доцент; профессор кафедры общей физики физико-технического факультета.

Authors:

Slavamir S. Anufrick, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of theoretical physics and heat engineering, faculty of physics and technology.
anufrick@grsu.by

<https://orcid.org/0000-0002-5761-4965>

Sergei N. Anuchin, head of the laboratory of computer modelling of physical processes, laboratory of laser physics and technology and laboratory of thermodynamics, hydrodynamics and heat transfer, department of theoretical physics and heat engineering, faculty of physics and technology.
anuchin_sn@grsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-4699-4349>

Nikolay N. Kurian, senior lecturer at the department of modern programming technologies, faculty of mathematics and informatics.
kuryn_nn@grsu.by

<https://orcid.org/0009-0004-5047-1457>

Natalia G. Valko, doctor of science (physics and mathematics), docent; professor at the department of general physics, faculty of physics and technology.
n.valko@grsu.by

<https://orcid.org/0009-0009-5269-0043>

и спектральных характеристик, габитуса изучаемых наночастиц. Выявлено, что преимущественно формируются частицы размерами до 100 нм. Доля более крупных частиц невелика. Обнаружено, что при абляции гальванических пленок образуются частицы, форма которых близка к сферической. При абляции гальванических сплавов никеля, цинка и меди создаются конгломераты в виде цепочек из наноструктур пирамидальной формы. Полученные экспериментальные материалы сопоставлены с литературными данными, сформулированы аргументированные выводы. Результаты исследования представляют интерес с точки зрения теории и технологии формирования наноструктур при взаимодействии лазерного излучения с металлами.

Ключевые слова: лазерная абляция; цветные металлы; наночастицы; спектры.

MORPHOLOGY OF NICKEL, ZINC, COPPER AND COBALT NANOPARTICLES SYNTHESISED BY LASER ABLATION OF GALVANIC TARGETS UNDERWATER

S. S. ANUFRICK^a, S. N. ANUCHIN^a, N. N. KURIAN^a, N. G. VALKO^a

^a*Yanka Kupala State University of Grodno, 22 Azheshka Street, Grodno 230023, Belarus*

Corresponding author: S. S. Anufriick (anufriick@grsu.by)

Abstract. Nickel, zinc, copper and cobalt nanoparticles were obtained from various solid-phase (including galvanic) materials using pulsed laser ablation in distilled water. An experimental laser setup, as well as a methodology for conducting experimental studies are presented. Data obtained by atomic force microscopy and transmission electron microscopy are analysed to determine the size and spectral characteristics, habit of the nanoparticles. It was found that particles up to 100 nm in size are predominantly formed. The proportion of larger particles is small. It was discovered that particles close to spherical in shape are formed during galvanic film ablation. During ablation of galvanic alloys of nickel, zinc and copper, conglomerates in the form of chains of pyramidal nanostructures are appeared. The obtained experimental materials are compared with literature data, and reasoned conclusions are formulated. The results of the study are of interest from the point of view of the theory and technology of nanostructure formation during the interaction of laser radiation with metals.

Keywords: laser ablation; non-ferrous metals; nanoparticles; spectra.

Введение

В настоящее время особое внимание уделяется исследованиям взаимосвязи размерных параметров наночастиц цветных металлов с их физическими и химическими свойствами [1–5]. Наноструктурированные материалы широко используются в различных отраслях промышленности, оптоэлектронике, нанофотонике, машиностроении, а также применяются для получения новых композитных сред с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Важную роль играют способы синтеза наночастиц, среди которых наиболее предпочтительным является метод лазерной абляции. Он позволяет варьировать размерные параметры наночастиц, отличается экспрессностью и простотой. В исследованиях [6; 7] получены наночастицы благородных металлов при лазерной абляции в жидкости с использованием лазера на парах меди и Nd : YAG-лазера. В публикации [8] показано, что поверхность медных частиц, образованных при лазерной абляции в воде, быстро окисляется или взаимодействует с водой с образованием гидроксида из-за высокой химической активности меди. Авторы работы [9] изучили механизм формирования наночастиц золота и серебра в водном коллоидном растворе додецилсульфата натрия в зависимости от плотности энергии, размера лазерного пятна и частоты лазерных импульсов. Установлено, что при фиксированной плотности энергии излучения и уменьшении частоты лазерных импульсов увеличивается вынос вещества в окружающую жидкость. Большое внимание исследователей уделено абляции благородных металлов, таких как золото, серебро и платина. Ряд публикаций касаются абляции меди, свинца, титана и других металлов, а также композитных материалов. В зависимости от среды, в которой происходит процесс, возможно образование частиц, идентичных по составу материалу мишени, или, что особенно характерно для металлов, получение их оксидов, карбидов, гидроксидов.

В работе [10] показано, что при абляции в воде никеля, цинка и хрома преимущественно образуются частицы размерами до 100 нм, а при абляции твердого сплава марки ВК8 – частицы размерами до 200 нм. Выявлена зависимость параметров распределения частиц по размерам от условий их синтеза. Показано,

что при абляции в воде формируются частицы, форма которых близка к сферической, а при абляции твердосплавного материала – частицы хлопьевидной формы с развитой поверхностью.

Авторы исследования [11] установили полидисперсность продуктов импульсной абляции металлических мишеней в водной среде, что свидетельствует о протекании различных механизмов образования частиц. Именно под воздействием лазерного импульса на поверхности мишени одновременно происходят плавление, взрывоподобное испарение и локальное разрушение мишени в результате действия ударной волны и термоупругих напряжений.

При абляции никелевой мишени в дистиллированной воде и этаноле образуются наноструктуры со средним поперечным размером 30–50 нм. Они имеют кристаллографическую огранку и являются кристаллическими [12; 13].

В результате проведения исследования [14] было установлено, что абляция кобальта в воде с использованием излучения третьей гармоники Nd : YAG-лазера приводит к получению наночастиц сесквиоксида кобальта.

Актуальность гальванических покрытий обусловлена высокими свойствами защиты от факторов внешнего воздействия, надежностью по отношению к ударным нагрузкам, длительным сроком службы. Кроме того, они придают эффектный внешний вид изделиям.

В спектрах оптической плотности наносuspензий алюминия наблюдается поглощение в ультрафиолетовой области спектра, что характерно для многих металлических материалов. Данные рентгеновской дифрактометрии подтверждают наличие металлических частиц в продуктах импульсной лазерной абляции алюминия сразу после их получения [15]. По всей видимости, сразу после синтеза в наносuspензии содержится довольно большое количество металлических частиц в составе пассивирующей оксидной пленки. С течением времени происходит агрегатирование продуктов абляции в более крупные образования, меняется габитус частиц, протекают структурные изменения, начинают преобладать частицы пластинчатой формы.

Анализ литературы и интернет-источников показал, что механизм формирования наночастиц цветных металлов в различных средах изучен не в полной мере, несмотря на наличие множества работ на данную тему. Отсутствуют результаты исследования влияния лазерного излучения умеренной интенсивности и плотности энергии на концентрацию, размеры и форму наночастиц, образующихся при абляции гальванических сплавов в водной среде. Цель работы – выявление новых закономерностей в процессе воздействия лазерного излучения умеренной интенсивности с плотностью энергии 0,3–0,4 Дж/см² и длиной волны 1064 нм на морфологию и размерные параметры осажденных из коллоидных растворов наноструктур цветных металлов в водной среде.

Используемая аппаратура

Облучение поверхности исследуемых образцов гальванических сплавов никеля, цинка, меди и кобальта проводилось на экспериментальной установке, представленной на рис. 1. Источником излучения являлся Nd³⁺ : YAG-лазер LS-2147 (LOTIS III, Беларусь – Япония), работающий в режиме модуляции добротности на длине волны 1,06 мкм с частотой следования лазерных импульсов 10 Гц. Длительность лазерного импульса составляла 16 нс при энергии генерации 300 мДж. Лазерная абляция гальванических сплавов осуществлялась в водной среде в течение 20 мин. Образцы помещались в стеклянную кювету с дистиллированной водой объемом 20 мл. Лазерное излучение фокусировалось длиннофокусной линзой ($F = 614$ мм) на поверхности мишени в жидкости. Толщина слоя воды над поверхностью образца составляла 15 мм.

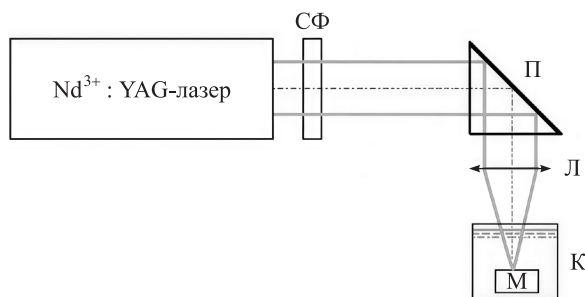


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: СФ – светофильтр марки СЗС-23;

П – поворотная призма; Л – фокусирующая линза ($f = 614$ мм);

К – кварцевая кювета с дистиллированной водой; М – мишень (металл)

Fig. 1. Scheme of an experimental setup: СФ – light filter type СЗС-23;

П – rotary prism; Л – focusing lens ($f = 614$ mm);

К – quartz cuvette with distilled water; М – target (metal)

Выбор сплавов никеля, цинка, меди и кобальта обусловлен необходимостью разработки методик получения с помощью лазерной абляции наночастиц металлов и сплавов широкого класса, осажденных гальваническим методом, который является энергоэффективным и менее трудозатратным методом и позволяет получать более чистые металлы и сплавы. Данные цветные металлы широко применяются в приборо- и машиностроении. Наночастицы цветных металлов обладают локализованным поверхностным плазмонным резонансом – нелинейным откликом на излучение видимого и ближнего диапазонов инфракрасного излучения. Уникальные свойства наночастиц благородных металлов привлекательны для создания металлоорганических комплексов с красителями, переносящих энергию плазмонного резонанса, а также для применения в фотовольтаике, катализе, оптоэлектронике, квантовой электронике и фотонике.

Спектры поглощения наносuspензий исследуемых наночастиц регистрировались на спектрофотометре Spexord-200 (*Analytik Jena*, Германия). Изучение морфологии и размерных параметров наночастиц, осажденных на диэлектрические покрытия, проводилось с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь), а также с применением просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-1011 (*JEOL*, Япония).

Результаты и их обсуждение

Осаждение полученных наночастиц металлов из коллоидных растворов осуществлялось путем последовательного нанесения растворов на диэлектрическую подложку и выпаривания их каждой капли. Выпаривание коллоидных растворов наночастиц производилось в сушильном шкафу при температуре 25 °С. Наночастицы осаждались на покровные стекла с высокой степенью чистоты поверхности (рис. 2).

Возможность образования конгломератов в коллоидном растворе наночастиц исследуемых металлов может обуславливаться использованием дистиллированной воды без добавок стабилизаторов, что подтверждается спектрами поглощения, АСМ-снимками, а также сведениями авторов исследований [11; 12]. Разница в изображениях АСМ и ПЭМ может быть связана с различием в методиках нанесения и исследования наночастиц. ПЭМ позволяет получать более точные результаты о форме и размерах наночастиц, поскольку исключается влияние подложки.

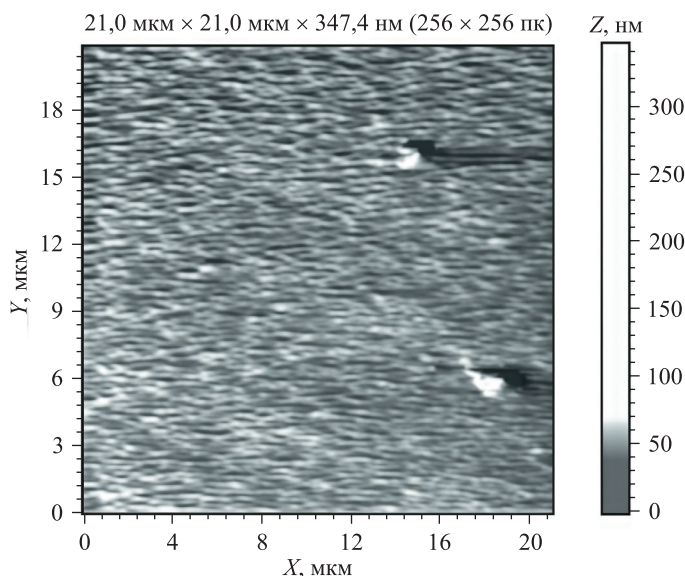


Рис. 2. АСМ-снимок стеклянной подложки без покрытия

Fig. 2. Atomic force microscopy (AFM) image of an uncoated glass substrate

Сначала были исследованы спектры электронного поглощения коллоидных растворов наночастиц, полученных при лазерной абляции гальванических сплавов никеля, цинка, меди и кобальта (рис. 3). Все спектры имеют характерные максимумы в области ультрафиолетового излучения, связанные с наличием наночастиц в растворе. Для спектра наночастиц никеля характерно наличие слабого максимума ($D = 0,2$) в области длин волн 260–280 нм. В отношении спектра наночастиц цинка наблюдается два максимума – сравнительно узкий максимум в области длины волны 270 нм и пологий максимум в области длины волны 400 нм. Спектр наночастиц меди представлен довольно широкой полосой поглощения в области длин волн 280–400 нм. Для наносuspензий кобальта характерно наличие интенсивной полосы поглощения, которая содержит три слабых максимума, расположенных в области длин волн 230–400 нм, причем наиболее интенсивный максимум соответствует длине волны 230 нм.

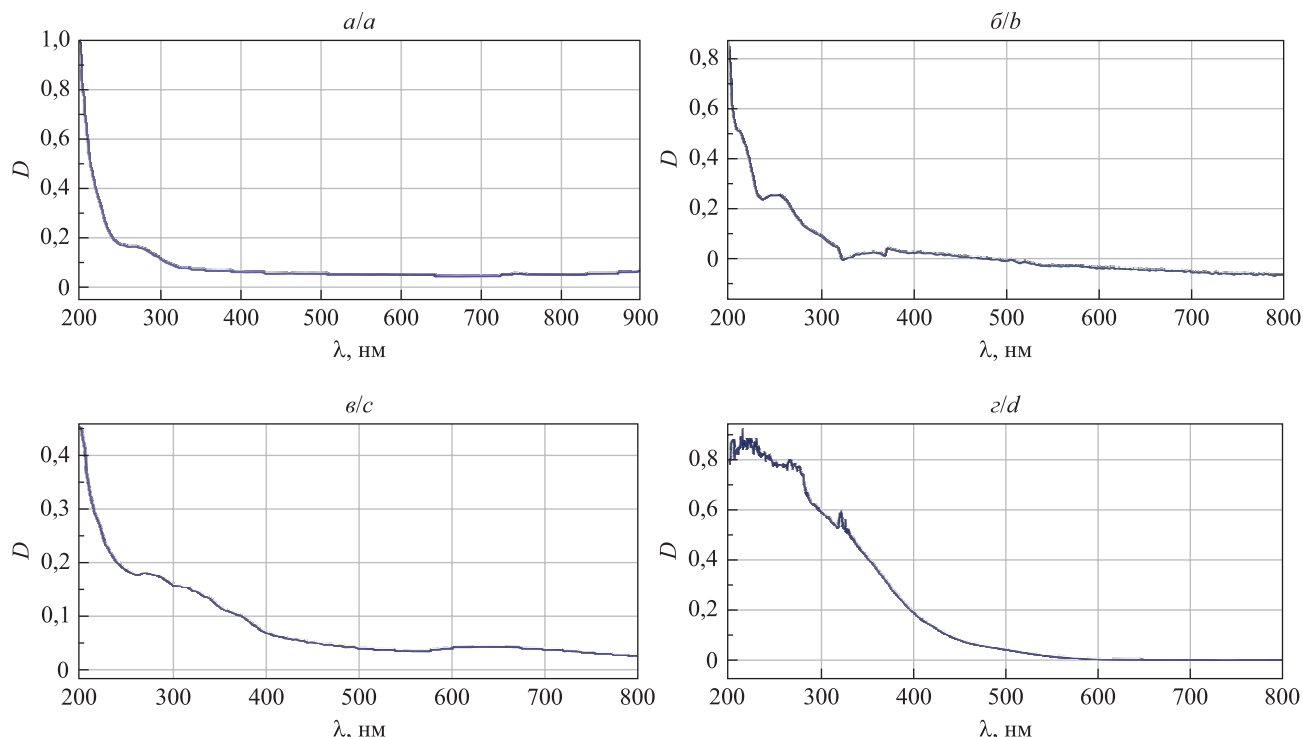


Рис. 3. Спектры оптической плотности коллоидных растворов наночастиц никеля (а), цинка (б), меди (в) и кобальта (г)

Fig. 3. Optical density spectra of colloidal solutions of nickel (a), zinc (b), copper (c) and cobalt (d) nanoparticles

Далее гальванические металлы осаждались на диэлектрические покрытия. Для определения морфологии, размерных параметров и формы полученных наночастиц использовались методы зондовой микроскопии и ПЭМ. В целях интерпретации наблюдаемых максимумов в спектрах коллоидных растворов наночастиц и установления их корреляции с размерными параметрами наночастиц также применялись методы зондовой микроскопии и ПЭМ.

На рис. 4 приведен АСМ-снимок адсорбированных из коллоидного раствора наночастиц никеля, полученных при абляции гальванического никеля в дистиллированной воде. Данное изображение содержит как мелкие наночастицы, так и более крупные конгломераты, расположенные цепочками. Средний размер наиболее мелких наночастиц находится в диапазоне 30–50 нм, они имеют овальную по основанию форму. Характерные размеры отдельных конгломератов пирамидальной формы составляют около 1,0–1,5 мкм по основанию и до 900 нм по высоте.

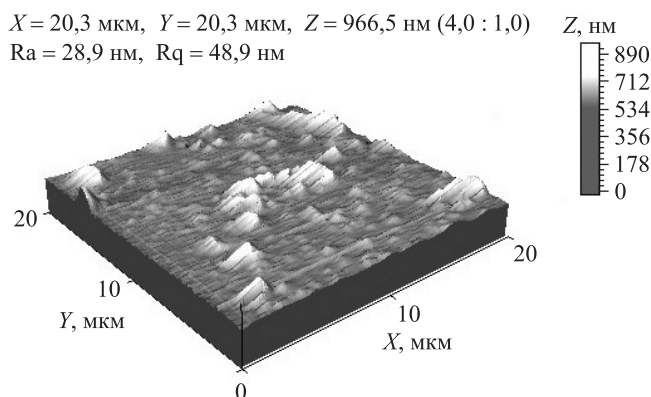


Рис. 4. АСМ-снимок наночастиц никеля

Fig. 4. AFM image of nickel nanoparticles

АСМ-снимок осажденных из коллоидного раствора наночастиц гальванического цинка представлен на рис. 5. На нем наблюдается волнообразное покрытие, наноструктуры распределены вдоль одной из координатных осей. Размеры наноструктур достигают примерно 600 нм на гребне и 200 нм во впадинах.

В целом покрытие образовано нитевидными наночастицами размерами 25–35 нм без выраженной структуризации. Вместе с тем выделяется единичный конгломерат размером около $1,0 \times 0,5$ мкм.

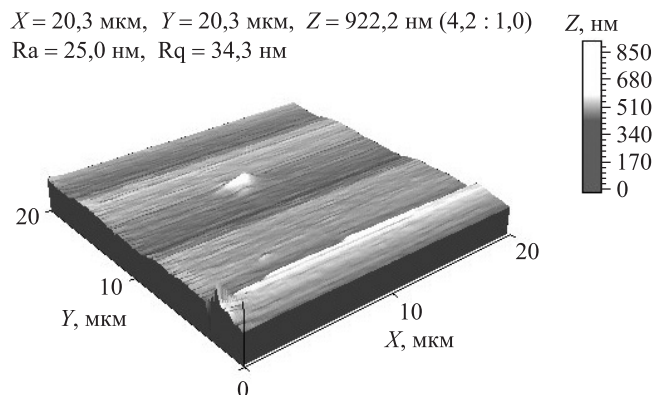


Рис. 5. АСМ-снимок наночастиц цинка
Fig. 5. AFM image of zinc nanoparticles

На рис. 6 приведен АСМ-снимок осажденных из коллоидного раствора наночастиц гальванической меди. Покрытие имеет столбчатую структуру, которая состоит из крупных призматических конгломератов, расположенных под углом около 30° к поверхности. Размеры образовавшихся структур (кристаллитов) равны приблизительно $2,0 \times 0,9$ мкм по основанию и до 450 нм по высоте.

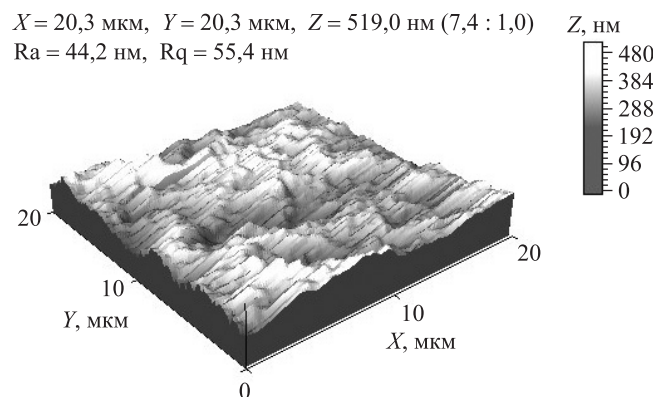


Рис. 6. АСМ-снимок наночастиц меди
Fig. 6. AFM image of copper nanoparticles

АСМ-снимок осажденных из коллоидного раствора наночастиц гальванического кобальта представлен на рис. 7. Поверхность содержит упорядоченные вытянутые конгломераты в виде цепочки, образованные из наноструктур пирамидальной формы различных размеров и разной степени агрегации. Размеры наблюдаемых конгломератов равны $3,0 \times 1,5$ мкм по основанию и до 500 нм по высоте. Наиболее мелкие наночастицы имеют диаметр 28–40 нм.

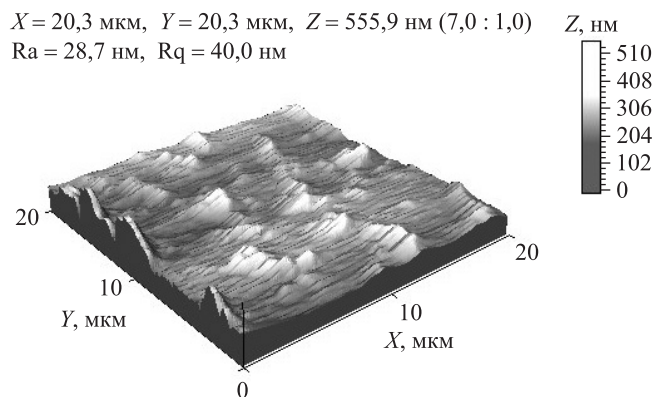


Рис. 7. АСМ-снимок наночастиц кобальта
Fig. 7. AFM image of cobalt nanoparticles

Затем для выяснения характерных размеров и формы аблированных наночастиц исследуемых металлов были получены их ПЭМ-снимки. Данные ПЭМ позволяют более точно определить распределение и размер наночастиц, их габитус. Поскольку адсорбция наночастиц из суспензии на диэлектрические подложки неизбежно связана с их взаимодействием с поверхностью, ее диэлектрическими и другими физико-химическими свойствами, ПЭМ исключает такое взаимодействие, так как наночастицы из коллоидного раствора осаждаются на измерительную сетку электронного микроскопа.

Как видно из рис. 8, наночастицы никеля сформировали цепочку сфер различного диаметра. Наиболее мелкие наночастицы (на снимке имеют серый цвет), размеры которых составили около 10 нм и менее, связаны между собой и представлены в большей степени. Средние наночастицы диаметром приблизительно 10 нм располагаются изолированно и составляют около 50 % всех наночастиц. Наиболее крупные сферические наночастицы, образованные, вероятно, слиянием более мелких наночастиц и имеющие диаметр около 50 нм, распределены хаотично и представлены в незначительном количестве (около 20 % всех наночастиц).

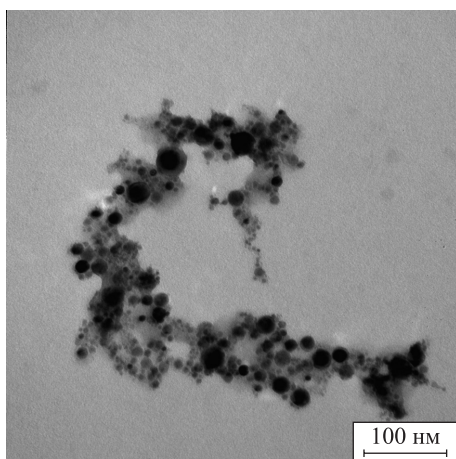


Рис. 8. ПЭМ-снимок наночастиц никеля

Fig. 8. Transmission electron microscopy (TEM) image of nickel nanoparticles

ПЭМ-снимок наночастиц цинка (рис. 9) содержит в основном мелкие сферические структуры диаметром 10–15 нм. Все они являются различными, но располагаются довольно близко друг к другу и вследствие взаимного протяжения образуют хаотичные по размеру скопления. На изображении видны более крупные наночастицы (размерами 80–110 нм), которые сформированы, вероятно, из более мелких наночастиц. Мелкие наночастицы имеют тенденцию к прилипанию друг к другу.

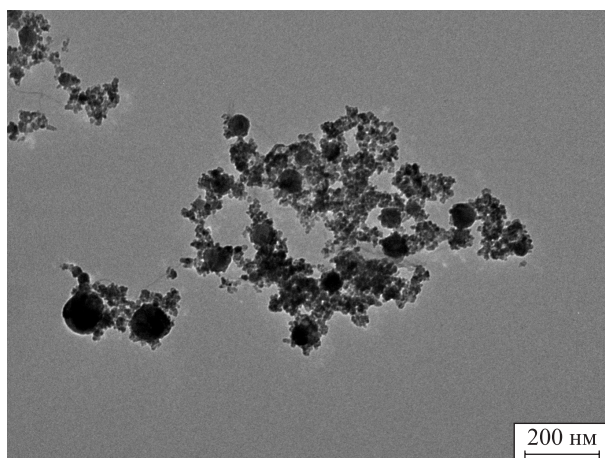


Рис. 9. ПЭМ-снимок наночастиц цинка

Fig. 9. TEM image of zinc nanoparticles

Наночастицы меди представлены на ПЭМ-снимке (рис. 10) преимущественно двумя типами обособленных околосферических наночастиц. Наиболее мелкие наночастицы, диаметр которых достигает 10–20 нм, содержатся в большем количестве и составляют 70 % всех наночастиц. Более крупные

наночастицы, имеющие размеры 30–50 нм, образованы, вероятно, агломерацией более мелких наночастиц и представлены в небольшом количестве (30 % всех наночастиц). Габитус наночастиц изменяется от сферического до эллипсоидного.

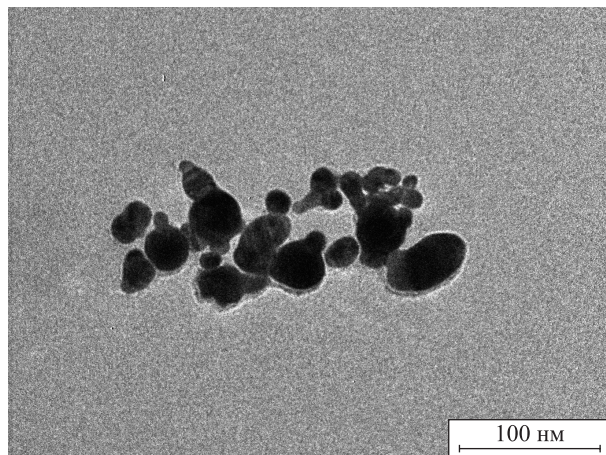


Рис. 10. ПЭМ-снимок наночастиц меди

Fig. 10. TEM image of copper nanoparticles

Из рис. 11 видно, что наночастицы кобальта распределены хаотично. Размеры наиболее мелких наночастиц составляют около 50 нм, им свойственна овальная форма. Более крупные наночастицы, размеры которых достигают приблизительно 80 нм, имеют кубическую форму и располагаются как отдельно, так и в составе продолговатых структур. Наиболее крупные наночастицы (размерами около 300 нм и более) из-за агломерации приобретают более сложные формы (прямоугольные, квадратные, овальные) и образуют упорядоченные структуры.

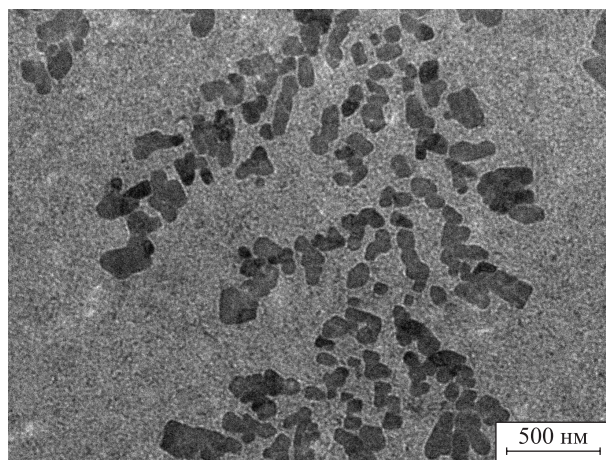


Рис. 11. ПЭМ-снимок наночастиц кобальта

Fig. 11. TEM image of cobalt nanoparticles

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Комплексное использование методов спектроскопии поглощения, а также силовой и электронной микроскопии позволяет более детально исследовать морфологию адсорбируемых наноструктур, размерные параметры, распределение и форму наночастиц металлов.
2. Спектры оптической плотности коллоидных растворов наночастиц содержат качественную информацию о полосах поглощения разноразмерных наночастиц и свидетельствуют о преобладании в суспензии наночастиц определенного размера (преимущественно мелких наночастиц).
3. Анализ АСМ-снимков наночастиц никеля, цинка, меди и кобальта позволяет установить различия в морфологии адсорбированных на покрытия наноструктур. Показано, что они отличаются структуризацией поверхности, размерами, формой и пространственным расположением нанокристаллов.

4. ПЭМ позволяет идентифицировать размеры, распределение и габитус изолированных или агрегированных наночастиц в пространстве. Установлено, что наиболее мелкие наночастицы исследуемых металлов, имеющие сферическую форму и синтезированные при одинаковых условиях абляции, существенно различаются по размерам (размеры наночастиц никеля, цинка, меди и кобальта составляют около 1–10; 10; 20 и 50 нм соответственно). Вместе с тем наблюдается тенденция к агрегации наиболее мелких наночастиц в кластеры наночастиц, имеющих различные размеры (диаметр наночастиц никеля, цинка, меди и кобальта составляет около 50; 100; 50 и 300 нм соответственно) и околосферическую форму.

Библиографические ссылки

1. Макаров ГН. Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии. *Успехи физических наук*. 2013;183(7):673–718. DOI: 10.3367/UFNr.0183.201307a.0673.
2. Абаева ЛФ, Шумский ВИ, Петрицкая ЕН, Рогаткин ДА, Любченко ПН. Наночастицы и нанотехнологии в медицине сегодня и завтра. *Альманах клинической медицины*. 2010;22:10–16. EDN: NTBKGf.
3. Лешик СД, Шупан ПИ, Сергиенко ИГ, Линник ДА. Синтез наночастиц методом лазерной абляции металлических материалов в жидкости в режиме наносекундных импульсов. *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6, Техника*. 2016;6(2):44–53. EDN: YPCHRJ.
4. Miller JC, editor. *Laser ablation: principles and applications*. Berlin: Springer-Verlag; 1994. XII, 187 p. (Springer series in materials science; volume 28).
5. Лешик СД, Зноско КФ, Калугин ЮК. Исследование частиц, генерированных лазерной абляцией твердых тел в жидкости. *Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение*. 2014;4:6–10. EDN: YUDYAP.
6. Казакевич ВС, Казакевич ПВ, Яреско ПС, Нестеров ИГ. Влияние физико-химических свойств жидкости на процессы лазерной абляции и фрагментации наночастиц Au в изолированном объеме. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012;14(4):64–69. EDN: PIYUWP.
7. Казакевич ВС, Казакевич ПВ, Яреско ПС, Камынина ДА. Лазерная абляция золота в жидком аргоне. *Физическое образование в вузах*. 2016;22(1):159–164. EDN: VOUCPH.
8. Yeh YH, Yeh MS, Lee YP, Yeh CS. Formation of Cu nanoparticles from CuO powder by laser ablation in 2-propanol. *Chemistry Letters*. 1998;27(11):1183–1184. DOI: 10.1246/cl.1998.1183.
9. Изгалиев АТ, Симакин АВ, Шафеев ГА. Образование сплава наночастиц Au и Ag при лазерном облучении смеси их коллоидных растворов. *Квантовая электроника*. 2004;34(1):47–52.
10. Cai H, Chaudhary N, Lee J, Becker MF, Brock JR, Keto JW. Generation of metal nanoparticles by laser ablation of microspheres. *Journal of Aerosol Science*. 1998;29(5–6):627–636.
11. Бармина ЕВ, Лау Труонг С, Бозон-Вердюра Ф, Леви Ж, Симакин АВ, Шафеев ГА. Генерация наноструктур на поверхности никеля при лазерной абляции в жидкости и их активность в гигантском комбинационном рассеянии. *Квантовая электроника*. 2010;40(4):346–348. EDN: TTFGRN.
12. Журавлева ВИ, Маркевич МИ, Камалов АБ, Асанов ДЖ, Чапланов АМ. Получение наночастиц никеля методом лазерной абляции. В: Крупышева ПО, редактор. *Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2021. Сборник научных трудов VII Международной конференции; 23–26 марта 2021 г.; Москва, Россия. Часть 2*. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; 2021. с. 50–53.
13. Tsuji T, Hamagami T, Kawamura T, Yamaki J, Tsuji M. Laser ablation of cobalt and cobalt oxides in liquids: influence of solvent on composition of prepared nanoparticles. *Applied Surface Science*. 2005;243(1–4):214–219. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.09.065.
14. Тверьянович ЮС, Маньшина АА, Тверьянович АС. Получение нанодисперсных материалов и тонких пленок методами лазерной абляции в жидкости и вакууме. *Успехи химии*. 2012;81(12):1091–1116. DOI: 10.1070/RC2012v081n12ABEH004285.
15. Светличный ВА, Стадниченко АИ, Лапин ИН. Получение наночастиц γ -Al(OH)₃ и γ -Al₂O₃ методом импульсной лазерной абляции металлического алюминия в воде. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2017;60(2):157–158. EDN: YFSVKV.

Получена 16.08.2025 / исправлена 14.11.2025 / принята 17.11.2025.
Received 16.08.2025 / revised 14.11.2025 / accepted 17.11.2025.