

СИНТЕЗ МИКРОЧАСТИЦ В ВОДОРОДЕ (1 кбар) ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОРМОЗНЫХ γ -КВАНТОВ (10 МэВ) НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ КОМПОНЕНТОВ КАМЕРЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

А. Ю. Дидык^{а, 1}, Р. Вишневский^{б, 2}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

Камера высокого давления, заполненная молекулярным водородом при давлении 1 кбар, была облучена тормозными γ -квантами с энергией 10 МэВ при интенсивности пучка электронов 20–21 мкА в течение 14 ч. Послерadiационные исследования структуры и элементного состава неоднородностей на поверхности, а также двух более крупных синтезированных частиц из всех обнаруженных после облучения позволили установить наличие в них легких элементов от углерода до кальция. Помимо этого найдены и изучены множественные частицы свинца малого размера. Обнаруженные синтезированные частицы имеют сложную форму и состав. На обеих сторонах внутренней поверхности разрезанной латунной втулки найдены тонкостенные микротрубки и другие объекты сложной формы. Выявленные аномалии обсуждаются на основе моделей реакций слияния ядер водорода и более тяжелых ядер («восходящие» реакции) и реакций деления («нисходящие» реакции) и синтеза («восходящие» реакции) в ядрах стенок камеры.

A high-pressure chamber filled with molecular hydrogen at 1 kbar was exposed to braking γ -rays produced by 10 MeV electron beam of 20–21 μ A intensity during 14 h. Post-irradiation investigations of the structure and elemental composition of the irregularities at the surface, as well as of two largest synthesized particles among the ones registered after the irradiation, established the presence of light elements from carbon to calcium. Besides, multiple lead particles of small size were found and studied. The detected synthesized particles have a complex shape and composition. At both sides of the inner surfaces of the cut brass sleeve, thin-walled microtubes and other objects of complex shape were found. The observed anomalies are discussed based on the models of the fusion of hydrogen nuclei and heavier nuclei («upstream» reactions) and fission reactions («downstream» reactions) and fusion reactions («upstream» reactions) of nuclei in the chamber walls.

PACS: 25.70.Jj; 25.45.-z

ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований с использованием дейтерированной камеры высокого давления (ДНРС) образцов ряда чистых металлов Al, V, Cu, Pd, Re, а также сплавов YМn₂ и нержавеющей стали при давлениях дейтерия 1,2; 2 и 3 кбар в процессе облучения

¹E-mail: didyk@jinr.ru

²E-mail: roland.wisniewski@gmail.com

γ -квантами с энергиями 9, 10, 11 и 23 МэВ (т. е. в области ядерного гигантского дипольного резонанса [1]) представлены в [2–13]. В этих работах были обнаружены значительные изменения структуры поверхности, объемных свойств и элементного состава всех компонентов внутри ДНРС, обусловленные ядерными реакциями. Устройство на основе ДНРС для получения энергии с высоким коэффициентом полезного действия описано авторами в [14]. Детальные исследования составов всех исходных материалов, входящих в элементы внутренних конструкций ДНРС, и объектов исследования до и после воздействия γ -квантов позволили однозначно установить образование в процессе протекающих ядерных реакций как более легких элементов, т. е. с меньшим атомным номером Z (от углерода до кальция), чем Z изучаемого материала мишени («нисходящие» реакции), так и более тяжелых: ${}_{73}\text{Ta}$, ${}_{74}\text{W}$, ${}_{78}\text{Pt}$, ${}_{79}\text{Au}$ и ${}_{82}\text{Pb}$ («восходящие» реакции).

На основе установленных эмпирических закономерностей образования в результате ядерных реакций химических элементов в столь широком диапазоне Z была предложена феноменологическая модель, учитывающая, как нам казалось, большинство возможных, т. е. энергетически не запрещенных, ядерных реакций, даже тех, которые имеют предельно малые вероятности (см. [15, 16]).

Исследования (см. [3, 17]), проведенные с заменой дейтерия в ДНРС с палладиевым стержнем внутри на молекулярный водород (98,0 %) при давлении 2,5 кбар (камера ННРС) в процессе облучения γ -квантами с максимальной пороговой энергией ≈ 10 МэВ при электронном пучке интенсивностью 2–4 мкА, позволили установить, что на поверхностях конструктивных элементов ННРС (разрезанной вдоль продольной оси латунной втулки и латунного сборника продуктов ядерных и химических реакций (см. [2–5])) образуются частицы, состоящие преимущественно из свинца, и частицы, имеющие в своем составе легкие элементы от углерода до кальция.

Цель настоящей работы — исследование возможностей протекания ядерных и физико-химических реакций под действием γ -квантов с энергиями ниже энергии гигантского дипольного резонанса [1], приводящих к изменениям элементного состава и структур на внутренних поверхностях конструктивных элементов ННРС (входного окна из бериллиевой бронзы, внутренних стенок латунной втулки, марганцовой фольги и сборника продуктов ядерных реакций), а также образования частиц микроскопических размеров.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКА И ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлена конструкция камеры высокого давления водорода (ННРС) с основными элементами, которая использовалась в предыдущих экспериментах [2, 3–9, 17] с одним отличием — отсутствовал образец палладия. По сравнению с применением в экспериментах ДНРС [2, 3–9] и ННРС [17] в данном исследовании была использована аналогичная камера со стандартным набором компонентов за исключением образца металла (палладия), который отсутствовал.

ННРС была заполнена молекулярным водородом при давлении на момент облучения 1 кбар. Такое давление соответствует атомной концентрации водорода $n_{\text{H}} \approx 2,952 \cdot 10^{22}$ ат. н · см⁻³ при его плотности $\rho_{\text{H}} \approx 0,0494$ г · см⁻³ (см. монографию [16]). Внутри ННРС находилась только фольга из марганца, т. е. Pd-стержень отсутствовал. Облучение ННРС было проведено на ускорителе МТ-25 Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова в течение 14 ч (т. е. $5,04 \cdot 10^4$ с). Энергия электронного пучка состав-

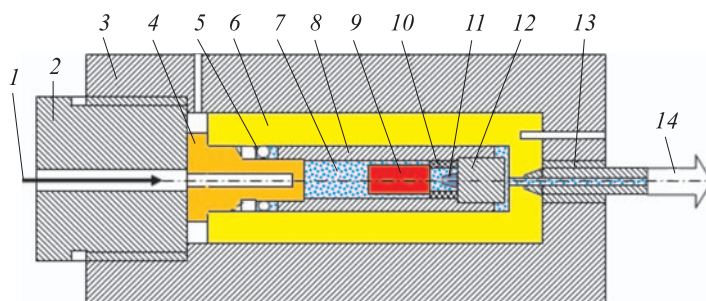


Рис. 1. Схематическое изображение ДНРС и ННРС: 1 — поток γ -квантов; 2 — резьбовое соединение с входным отверстием; 3 — корпус камеры высокого давления; 4 — «входное окно» из $\text{Cu}_{0,98}\text{Be}_{0,02}$; 5 — уплотнение для высокого давления; 6 — цилиндр камеры высокого давления из $\text{Cu}_{0,98}\text{Be}_{0,02}$; 7 — дейтерий (ДНРС) или водород (ННРС); 8 — латунная втулка; 9 — Pd-стержень (отсутствует в данном исследовании); 10 — разделительная фольга из марганца; 11 — синтезированный продукт реакции; 12 — латунный сборник; 13 — капилляр высокого давления; 14 — клапан и тензор-датчик давления

ляла 10 МэВ при среднем токе 20–21 мкА. Тормозные γ -кванты были получены с использованием мишенного устройства — тормозной мишени из вольфрама с толщиной фольги 2,5 мм и алюминиевого поглотителя электронов толщиной 25 мм.

При вскрытии ННРС из нее высыпалось восемь мелких частиц размерами около 1 мм. При этом одна часть частиц визуально производила впечатление темных, а другая — светлых. При фотографировании со специальным приспособлением все частицы оказались прозрачными. Детальные исследования с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеновского микроэлементного зондового анализа (РМЗА) двух частиц (темной и светлой), как и синтезированные объекты на обеих внутренних поверхностях разрезанной вдоль на две половины латунной втулки (рис. 1, поз. 8), будут рассмотрены в статье [24].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Входное окно из бериллиевой бронзы (рис. 1, поз. 4). Отметим, что для большей достоверности и убедительности полученных результатов исследования СЭМ и РМЗА проводились последовательно в двух независимых аналитических центрах: в НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова и НИИ ПМТ ТУ-МИЭМ.

На рис. 2 представлены: СЭМ-изображение входного окна (ВО) ННРС (а) и характеристический спектр рентгеновского излучения (ХСРИ) (б), измеренный в обл. 30. ВО из бериллиевой бронзы ($\text{Cu}_{98-96}\text{Be}_{2-4}$) имело контакт с водородом при высоком давлении.

В табл. 1 приведены концентрации химических элементов, соответствующие ХСРИ на рис. 2, б.

Как видно, ВО состоит из меди с малым содержанием кислорода. Присутствующий в составе материала ВО бериллий (2–4 ат. %) использованным в измерениях РМЗА спектрометром не регистрируется.

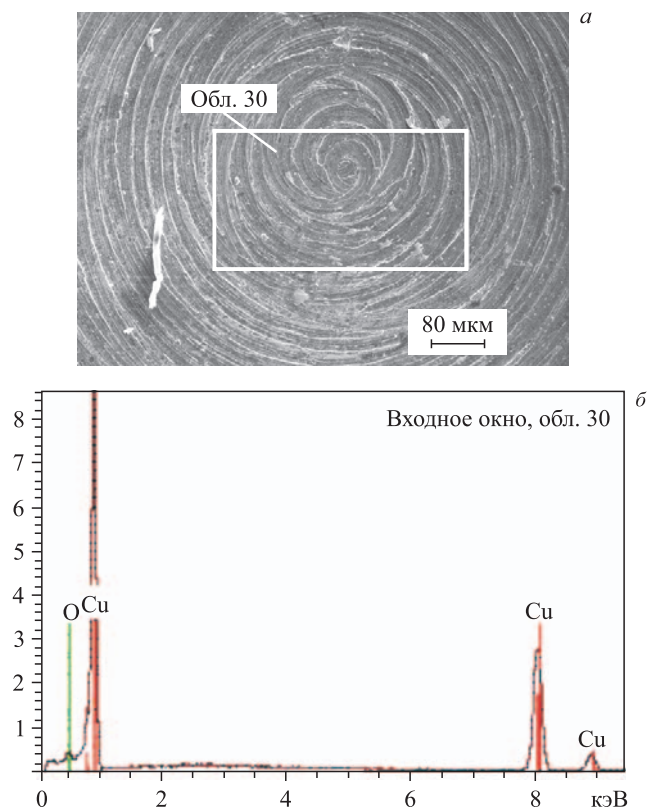


Рис. 2. СЭМ-изображение ВО в ННРС (а) и ХСРИ, измеренный в обл. 30 (б)

Таблица 1. Концентрации химических элементов, соответствующие ХСРИ на рис. 2, б

Элемент	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C , ат. %
Медь	К	$95,34 \pm 2,58$	83,75
Кислород	К	$4,66 \pm 2,58$	16,25

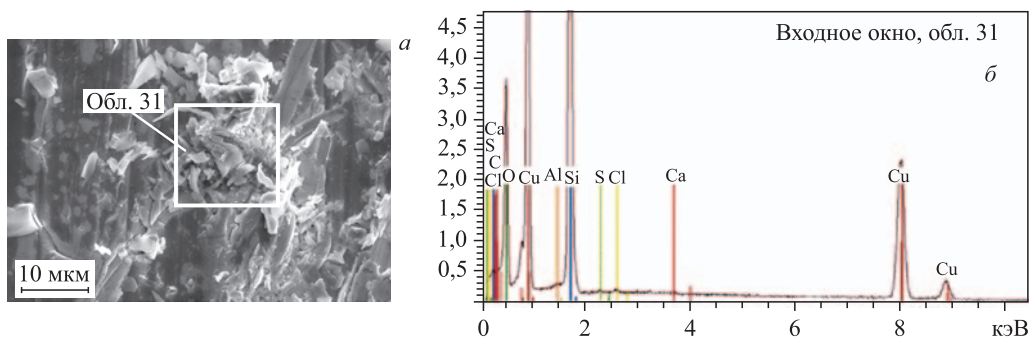


Рис. 3. СЭМ-изображение ВО в ННРС (а) и ХСРИ, измеренный в обл. 31 (б)

На рис. 3, *a* представлен участок поверхности ВО, значительно деструктурированный в результате воздействия облучения γ -квантами, и обл. 31, где выполнен РМЗА. ХСРИ этой области дан на рис. 3, *б*. В табл. 2 см. соответствующие концентрации элементов.

Таблица 2. Концентрации химических элементов в обл. 31 на рис. 3, *a*

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Углерод	6	К	$7,66 \pm 3,09$	17,45
Кислород	8	К	$24,84 \pm 6,38$	42,49
Алюминий	13	К	$0,13 \pm 0,07$	0,14
Кремний	14	К	$19,91 \pm 1,73$	19,40
Сера	16	К	$0,06 \pm 0,06$	0,05
Хлор	17	К	$0,11 \pm 0,07$	0,08
Кальций	20	К	$0,06 \pm 0,06$	0,04
Медь	29	К	$47,24 \pm 2,59$	20,35

Из таблицы видно, что в измеренной обл. 31 присутствуют легкие элементы: ${}^6\text{C}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{16}\text{S}$, ${}^{17}\text{Cl}$ и ${}^{20}\text{Ca}$. Отметим относительно большое содержание кремния (19,91 вес. %, или 19,40 ат. %).

На поверхности ВО обнаружены объекты сложной формы, один из которых представлен на рис. 4, *a*. ХСРИ, измеренный в обл. 33, продемонстрирован на рис. 4, *б*. Концентрации химических элементов приведены в табл. 3.

Видно, что частица на ВО состоит преимущественно из кремния и кислорода. Отношение концентраций кислорода и кремния составляет $C_{\text{O}}(\text{ат. \%})/C_{\text{Si}}(\text{ат. \%}) \approx 2$.

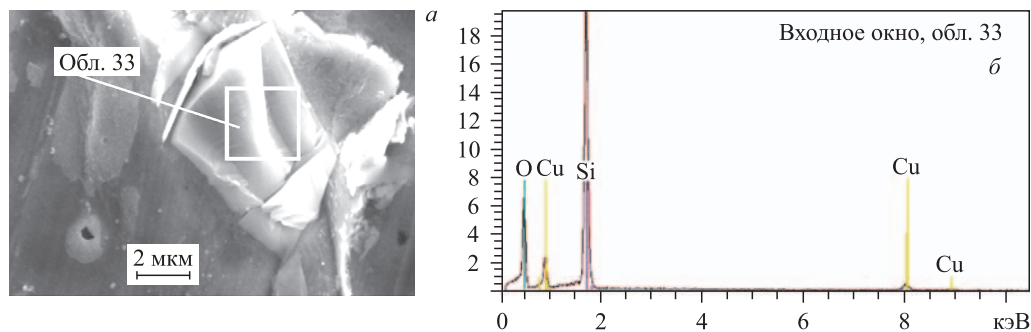


Рис. 4. СЭМ-изображение частицы на поверхности ВО с выделенной обл. 33, в которой был проведен РМЗА (*a*), и соответствующий ХСРИ (*б*)

Таблица 3. Концентрации химических элементов, измеренные РМЗА в обл. 33 на рис. 4, *a*

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	$46,72 \pm 9,22$	64,25
Кремний	14	К	$39,59 \pm 2,20$	31,01
Медь	29	К	$13,69 \pm 4,74$	4,74

Отсюда можно заключить, что данное соединение является диоксидом кремния (SiO_2). Толщина частицы достаточно значительная, так как основной материал ВО — медь — слабо проявляется, и ее концентрация составляет только 4,74 ат. %.

На рис. 5, *а* представлено изображение той же частицы с обл. 34, где сделан РМЗА для подтверждения достоверности измерений в обл. 33 на поверхности ВО, на рис. 5, *б* — ХСРИ, измеренный в обл. 34.

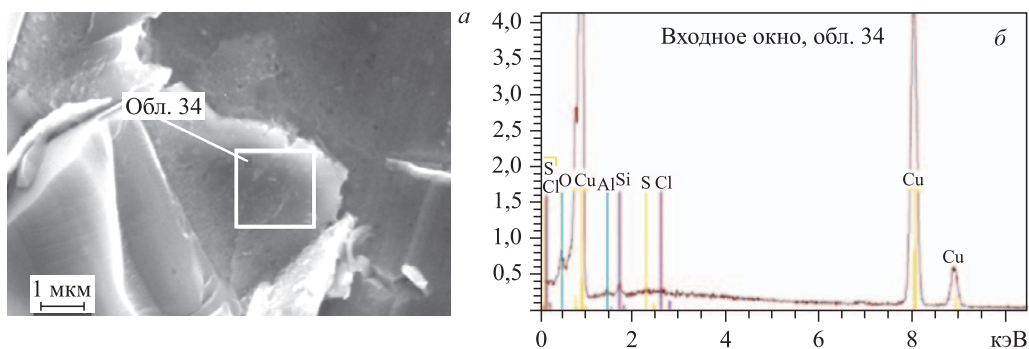


Рис. 5. Изображение частицы на поверхности ВО с выделенной областью, где выполнен РМЗА (*а*), и соответствующий ХСРИ (*б*)

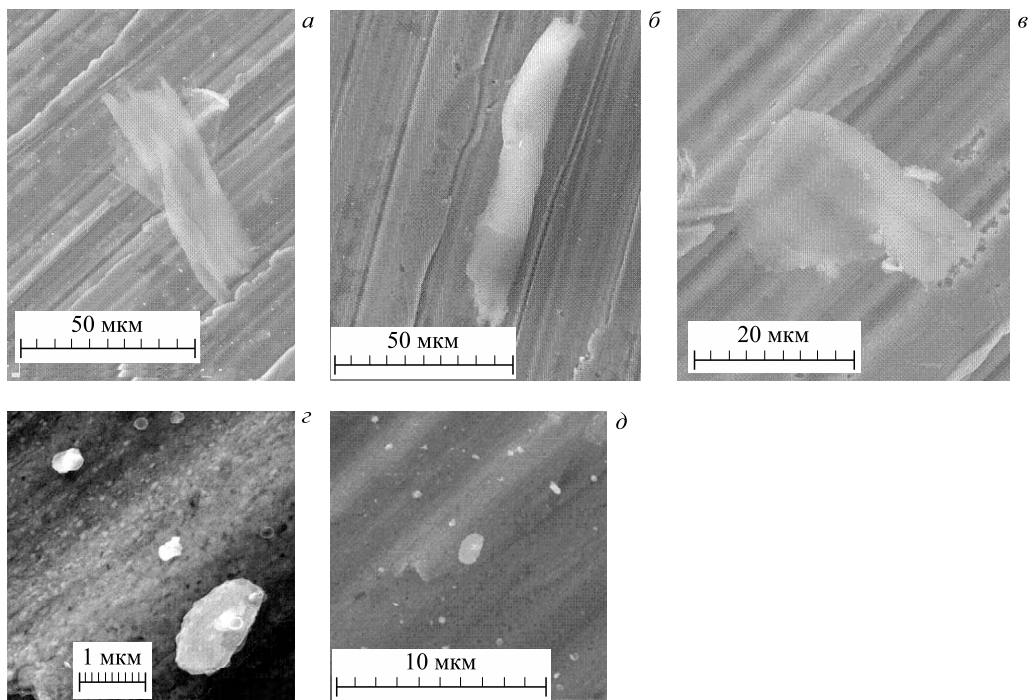


Рис. 6. СЭМ-изображения различных структур на поверхности ВО

Как видно из спектра на рис. 5, б, в этой частице толщина слоя кремния значительно меньше, чем на рис. 4, б. Особо отметим, что присутствуют также кислород, алюминий, сера и хлор.

На рис. 6 представлены СЭМ-изображения различных структур, обнаруженных на поверхности ВО. Первые три изображения на рис. 6, а–в — это различные конфигурации микротрубок, остальные два (более мелкие частицы на рис. 6, г, д) — это частицы с отличающимся элементарным составом. Элементарный состав всех частиц будет представлен ниже.

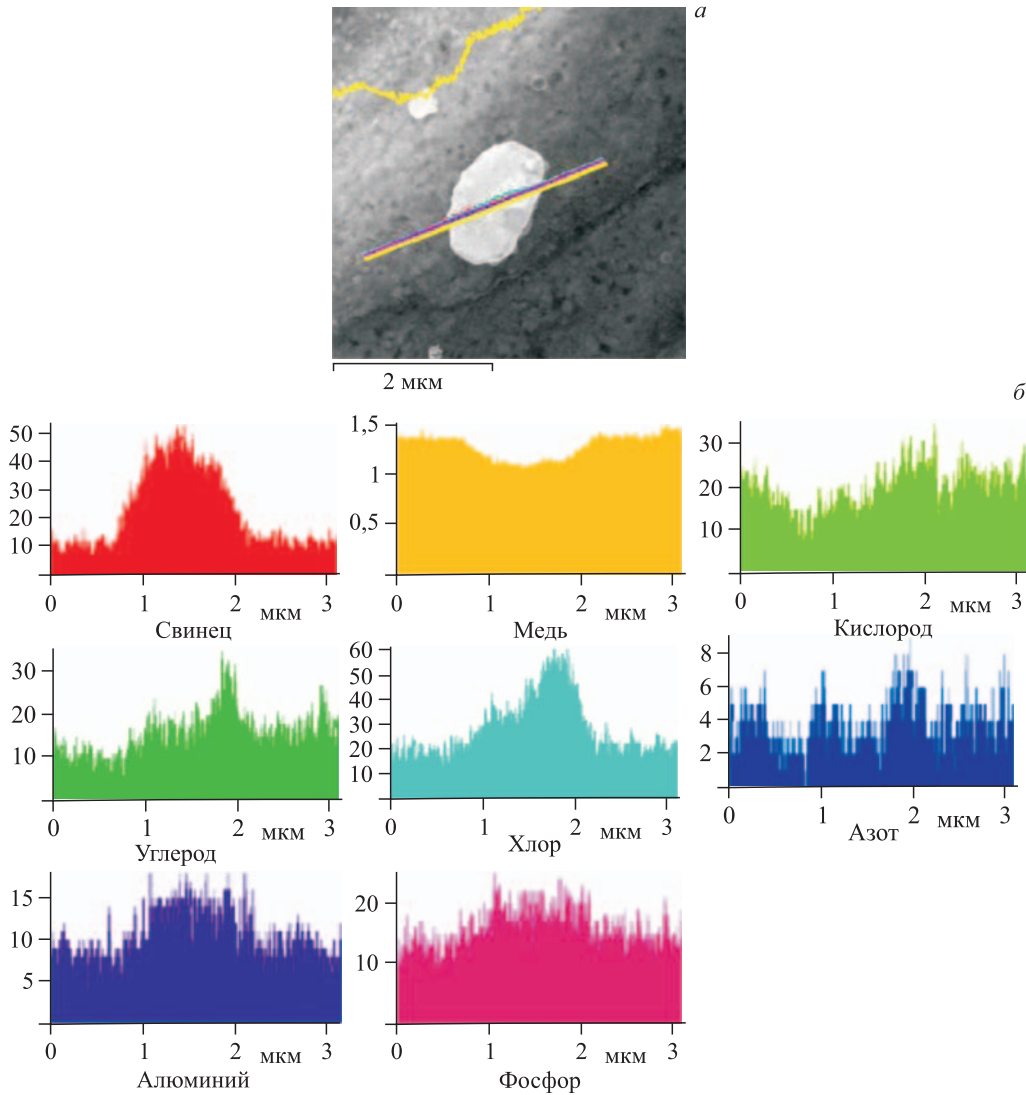


Рис. 7. СЭМ-изображение частицы (а) и ХСРИ (б), промеренные вдоль полосы сканирования на рис. а

На рис. 7, *a* представлена частица (см. рис. 6, *z*), на которой вдоль обозначенной полосы сделан РМЗА. Часть измеренных спектров элементов приведена на рис. 7, *б*.

Из рис. 7, *б* можно сделать вывод, что частица состоит из свинца (50 отн. ед.), хлора (60 отн. ед.), алюминия (18 отн. ед.), фосфора (до 20 отн. ед.) с присутствием азота (до 7 отн. ед.). Значения концентраций взяты в максимумах распределений.

На рис. 8, *a* дано изображение частицы малого размера на поверхности ВО с отмеченной т. 35, где проведен РМЗА, а на рис. 8, *б* — ХСРИ, измеренный в этой точке. В табл. 4 приведен соответствующий элементный состав.

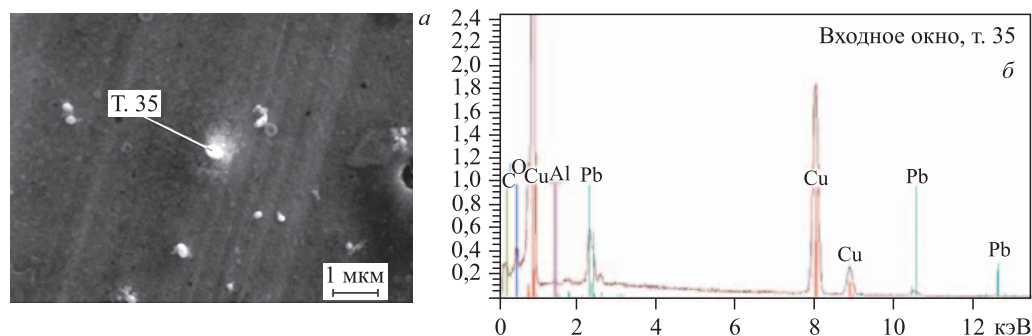


Рис. 8. СЭМ-изображение частицы на поверхности ВО с выделенной т. 35, где выполнен РМЗА (*a*), и соответствующий ХСРИ (*б*)

Таблица 4. Распределение концентраций элементов в ВО (т. 35)

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Углерод	6	K	$10,11 \pm 3,91$	34,59
Кислород	8	K	$6,37 \pm 2,30$	16,35
Алюминий	13	K	$0,10 \pm 0,07$	0,15
Медь	29	K	$72,23 \pm 4,05$	46,69
Свинец	82	L	$11,19 \pm 1,06$	2,22

Эта частица размером около 0,5 мкм содержит относительно много свинца (2,22 ат. %, или 11,19 вес. %), а при учете того, что область возбуждения рентгеновского излучения гораздо больше 1 мкм, можно считать, что эта частица состоит преимущественно из свинца в соединении с другими элементами: углеродом (34,59 ат. %) и кислородом (16,35 ат. %).

На рис. 9 представлены с разным увеличением изображения двух участков поверхности ВО с частицами иного вида. На рис. 9, *б* видно, что по всей границе частицы размером примерно 4×8 мкм присутствуют такие же маленькие светлые частицы, как и на рис. 8, *a*, состоящие из свинца. Частицы такого типа обнаружены и на других участках поверхности.

На рис. 10, *a* приведено изображение участка поверхности ВО с тонкостенной трубчатой структурой длиной более 100 мкм. В двух областях этой структуры (обл. 36) площадями примерно $7,5 \times 20$ мкм были проведены РМЗА. Один из ХСРИ представлен на рис. 10, *б*. Похожие трубки см. на рис. 2, *б* и 6, *a–в*. Отметим, что при измерении этих двух спектров тонкостенная трубка претерпела значительные изменения: ее диаметр в

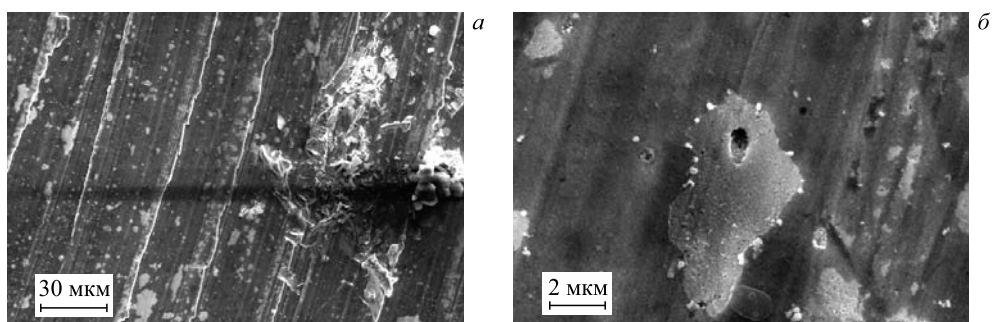
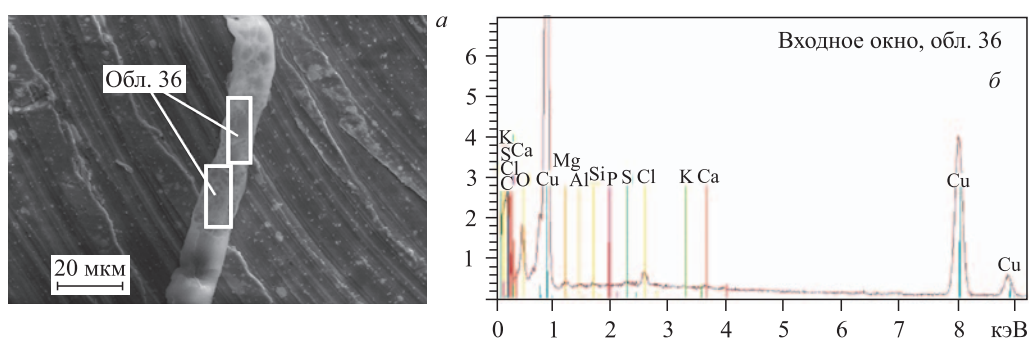
Рис. 9. СЭМ-изображения областей ВО с различным увеличением: $\times 1,6\text{K}$ (а) и $\times 19,63\text{K}$ (б)

Рис. 10. Изображение трубчатой частицы на поверхности ВО с двумя обл. 36, где был выполнен РМЗА (а), и соответствующий ХСРИ (б)

месте измерения уменьшился, т. е. трубка сжалась, а стенка трубки здесь потемнела. Как видно из спектра на рис. 10, б, несмотря на большую анализируемую площадь $\approx 150 \text{ мкм}^2$, с которой был измерен ХСРИ, отчетливо просматриваются пики подложки из меди, а легкие элементы, из которых и состоит трубка, видны очень слабо. Именно поэтому трубка названа нами тонкостенной. На рис. 11 представлен ХСРИ подобной трубки, измеренный в другом аналитическом центре на более современном сканирующем электронном микроскопе и анализаторе. Хорошо видно, что в состав данной структуры входят следующие химические элементы: ${}^6\text{C}$, ${}^7\text{N}\uparrow$, ${}^8\text{O}$, ${}^7\text{N}\uparrow$, ${}^9\text{F}\uparrow$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{15}\text{P}$, ${}^{16}\text{S}$, ${}^{17}\text{Cl}$, ${}^{18}\text{Ar}\uparrow$, ${}^{19}\text{K}$ и ${}^{20}\text{Ca}$. Как отмечено выше, концентрации этих элементов малы по сравнению с пиками спектра подложки из меди, что объясняется малой толщиной стенки трубки (возможно, в несколько десятков атомных слоев). Фактически здесь присутствует весь ряд легких элементов от углерода до кальция, за исключением азота, фтора, неона и аргона, которые являются летучими элементами. В представленном выше ряду обнаруженных химических элементов они обозначены стрелками: ${}^7\text{N}\uparrow$, ${}^9\text{F}\uparrow$, ${}^{10}\text{Ne}\uparrow$, ${}^{18}\text{Ar}\uparrow$.

На рис. 12, а представлено СЭМ-изображение участка поверхности ВО с другой, похожей тонкостенной трубчатой структурой длиной 160 мкм, а на рис. 12, б — с ее расширенной «головной» частью. Видно, что частица представляет собой свернутую в трубку плоскость. РМЗА показывает, что эта трубка тонкостенная.

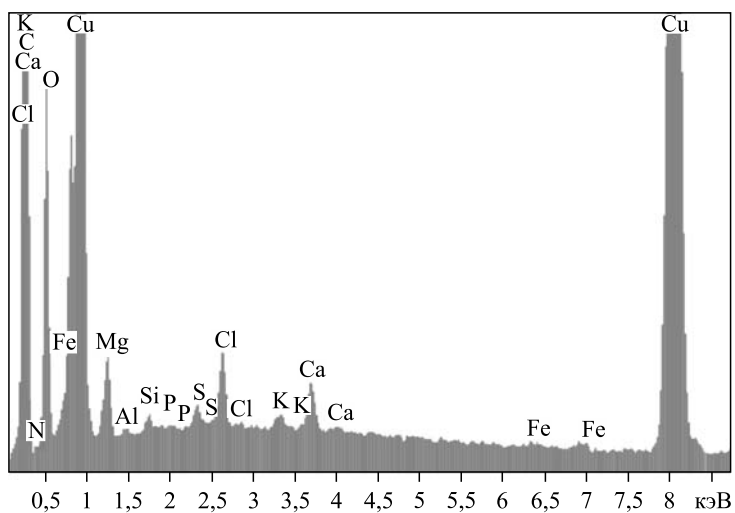


Рис. 11. ХСРИ, измеренный на другой трубчатой частице

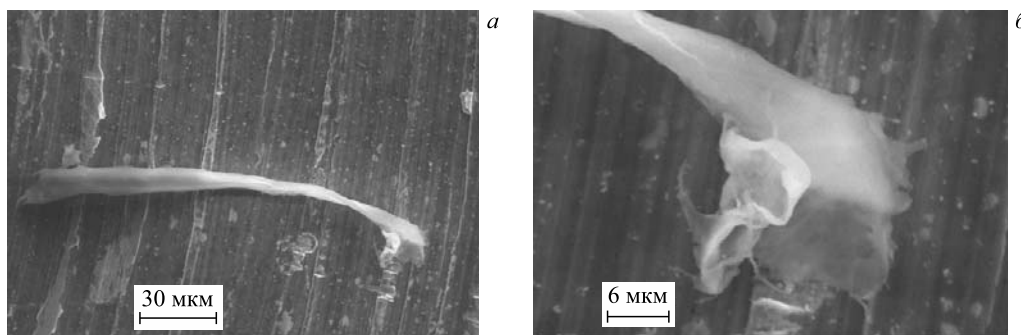


Рис. 12. СЭМ-изображения трубчатой частицы на поверхности ВО (а) и ее расширенной «головной» части (б)

На рис. 13,а показана уширенная часть тонкостенной трубки с обл. 37, на которой был выполнен РМЗА. ХСРИ приведен на рис. 13,б. СЭМ-изображение уширенной «головной» части этой трубки очень похоже на «раскрывшийся» участок свернутой плоскости. Она, возможно, была создана за счет образования на поверхности ВО нескольких десятков слоев плоской структуры, преимущественно состоящих из легких элементов, которая затем за счет поверхностного натяжения свернулась в трубку.

Как и при измерении ХСРИ на рис. 10,а, эта тонкостенная трубка также претерпела существенные изменения: ее диаметр в месте измерения уменьшился, а сама стенка трубки потемнела. Как видно из рис. 13,б, здесь также имеет место интенсивный сигнал от медно-бериллиевой подложки, несмотря на то, что анализируемая площадь «головной» части «раскрывшейся» трубки составляет примерно $6,3 \times 10$ мкм. Тем не менее сигналы от ее материала, состоящего из легких элементов, присутствуют в спектре, хотя имеют малую интенсивность. Как и на рис. 10,а, б, элементный состав этой «головной» части

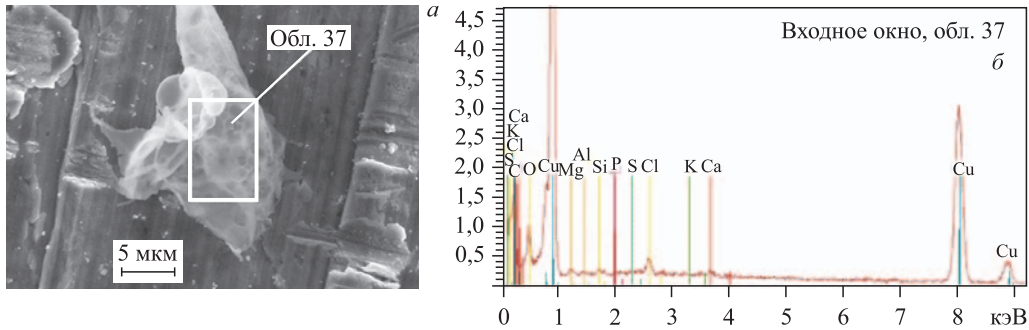


Рис. 13. Изображение трубчатой частицы на поверхности ВО с обл. 37 (а), где был проведен РМЗА, и соответствующий ХСРИ (б)

тонкостенной «раскрывшейся» трубки следующий: ${}^6\text{C}$, ${}^7\text{N}\uparrow$, ${}^8\text{O}$, ${}^7\text{N}\uparrow$, ${}^9\text{F}\uparrow$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{17}\text{Cl}$, ${}^{18}\text{Ar}\uparrow$ и ${}^{20}\text{Ca}$.

2.2. Манганиновая разделительная фольга (рис. 1, поз. 10). Отметим, что манганиновая фольга была сохранена в ННРС (рис. 1, поз. 10) без палладиевого стержня (рис. 1, поз. 9), но с заполнением камеры молекулярным водородом при давлении 1 кбар (рис. 1, поз. 7) для более полного воспроизведения условий облучения в ННРС с Pd-стержнем в атмосфере плотного водорода (см. [17]).

На рис. 14, а приведено СЭМ-изображение поверхности манганиновой фольги (далее МФ), покрытой кавернами. На рис. 14, б представлен ХСРИ, измеренный практически со всей площади поверхности. В табл. 5 показан элементный состав, соответствующий спектру на рис. 14, б.

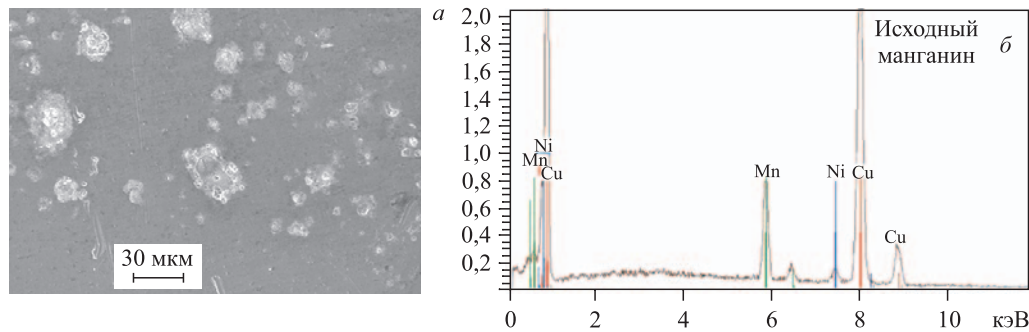


Рис. 14. СЭМ-изображение поверхности МФ, покрытой кавернами (а), и соответствующий ХСРИ (б), измеренный со всей площади

Таблица 5. Концентрация элементов в МФ

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Марганец	25	К	$9,67 \pm 0,63$	10,99
Никель	28	К	$2,63 \pm 0,28$	2,80
Медь	29	К	$87,70 \pm 4,91$	86,20

Из таблицы видно: отношение атомных концентраций в МФ составляет C_{Cu} (ат. %): C_{Mn} (ат. %): C_{Ni} (ат. %) = 86,6 : 10,99 : 2,80, что примерно соответствует концентрации элементов в манганине.

На рис. 15, *a* показано СЭМ-изображение поверхности МФ с инородной частицей, в т. 21 которой проведен РМЗА. Соответствующий ХСРИ дан на рис. 15, *б*. В табл. 6 представлен элементный состав в т. 21 на рис. 15, *a*.

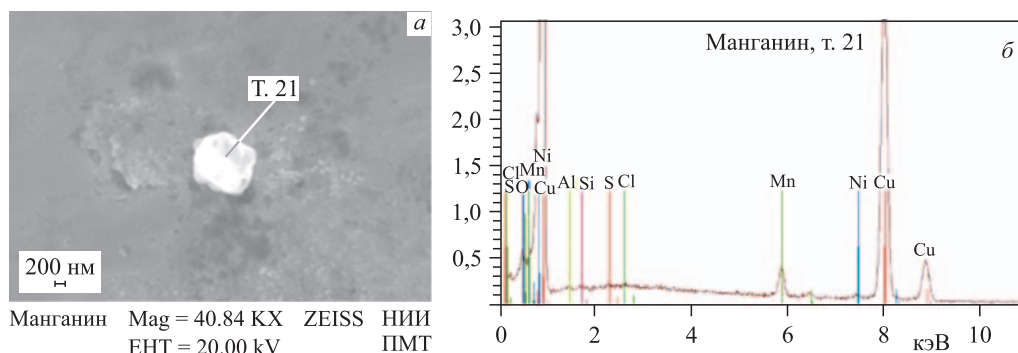


Рис. 15. СЭМ-изображение малой частицы на поверхности МФ (*a*) и ХСРИ в т. 21 (*б*), измеренный при энергии электронов 20 кэВ

Таблица 6. Концентрация элементов на поверхности МФ в т. 21 при энергии электронов 20 кэВ

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	$13,12 \pm 3,77$	34,84
Магний	12	К	$0,07 \pm 0,07$	0,12
Алюминий	13	К	$0,05 \pm 0,06$	0,07
Кремний	14	К	$0,21 \pm 0,09$	0,32
Сера	16	К	$0,14 \pm 0,07$	0,18
Хлор	17	К	$11,99 \pm 0,95$	14,37
Марганец	25	К	$3,17 \pm 0,50$	2,45
Медь	29	К	$71,25 \pm 17,25$	47,63

ХСРИ, ввиду малости размера частицы, измерен с использованием пониженной энергии пучка электронов сканирующего микроскопа, а именно при 20 кэВ. Из рис. 15, *a* и табл. 6 видно, что помимо материалов подложки из манганина ($Cu_{84}Mn_{14}Ni_2$) на поверхности присутствуют в небольших концентрациях элементы O, Mg, Al, Si, Cl, а также Mn, Cu и Ni. Из этого спектра можно сделать вывод, что изучаемая частица со средним диаметром примерно 1,08 мкм имеет малую толщину и электронный пучок с энергией 20 кэВ воздействует в основном на подложку из манганина.

Для уменьшения глубины слоя возбуждения характеристического рентгеновского излучения энергия электронного пучка была снижена до 10 кэВ. На рис. 16 представлен спектр, измеренный при этой энергии электронов. В табл. 7 даны соответствующие концентрации элементов.

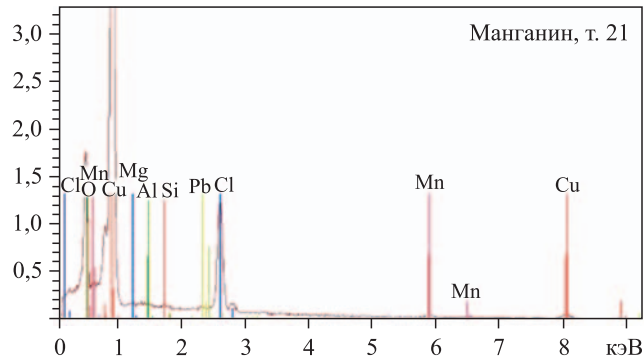


Рис. 16. ХСРИ в т. 21 на рис. 15, а, измеренный при энергии электронов 10 кэВ

Таблица 7. Концентрация элементов на поверхности МФ в т. 21 при энергии электронов 10 кэВ

Элемент	Z	Серия	($C \pm \Delta C$), вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	$13,05 \pm 3,78$	34,86
Магний	12	К	$0,07 \pm 0,07$	0,12
Алюминий	13	К	$0,05 \pm 0,06$	0,07
Кремний	14	К	$0,18 \pm 0,08$	0,28
Хлор	17	К	$11,93 \pm 0,95$	14,39
Марганец	25	К	$3,24 \pm 0,51$	2,52
Медь	29	К	$70,77 \pm 17,31$	47,61
Свинец	82	М	$0,70 \pm 0,14$	0,14

Можно сделать вывод, что в данной частице присутствуют О, Mg, Al, Si, Cl в большом количестве (11,93 вес. %, или 14,39 ат. %) и в малом количестве свинец.

2.3. Латунный сборник продуктов реакций (рис. 1, поз. 12). На рис. 17, а представлен общий вид латунного сборника (далее ЛС) (рис. 1, поз. 12) с сильно измененной центральной частью (вдоль оси ННРС) в виде пятна диаметром 621,7 мкм и другими ви-

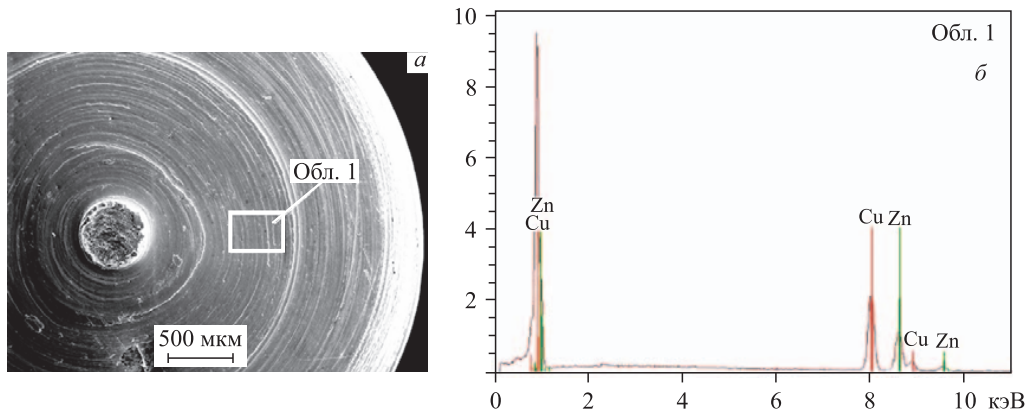


Рис. 17. СЭМ-изображение общего вида ЛС с пятном в центре и части поверхности ЛС с выделенной обл. 1 (а), где сделан РМЗА, и соответствующий ХСРИ (б)

Таблица 8. Концентрация элементов ЛС в обл. 1 на рис. 17, а

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Медь	29	K	$58,92 \pm 3,06$	59,61
Цинк	30	K	$41,08 \pm 2,26$	40,39

димыми аномалиями (частицами) в правой части и ниже центра сборника с выделенной обл. 1, имеющей площадь 480×360 мкм, на которой был проведен РМЗА. В табл. 8 показан ее элементный состав.

Как видно из рис. 17, б, в ХСРИ латуни присутствуют только медь и цинк, а их отношение $Cu_{\text{эксп}} (\text{ат. \%}) : Zn_{\text{эксп}} (\text{ат. \%}) = 59,61 : 40,39$ очень хорошо согласуется с аналогичным паспортным отношением для латуни 60 : 40 ат. %.

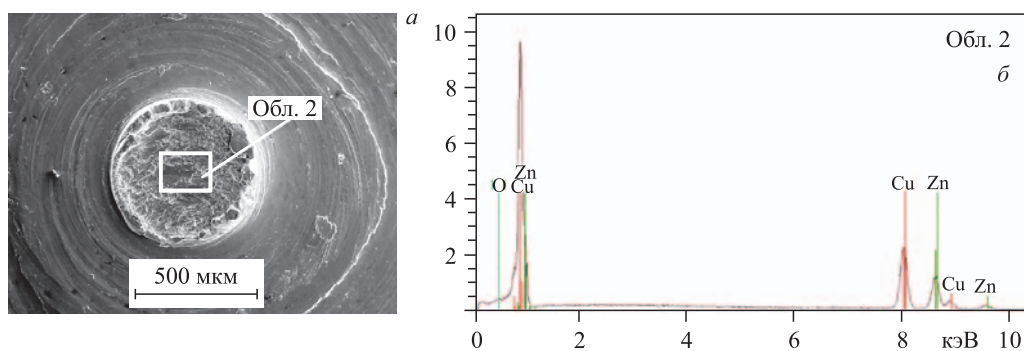


Рис. 18. СЭМ-изображение участка поверхности ЛС (а) и ХСРИ (б), проведенный в обл. 2

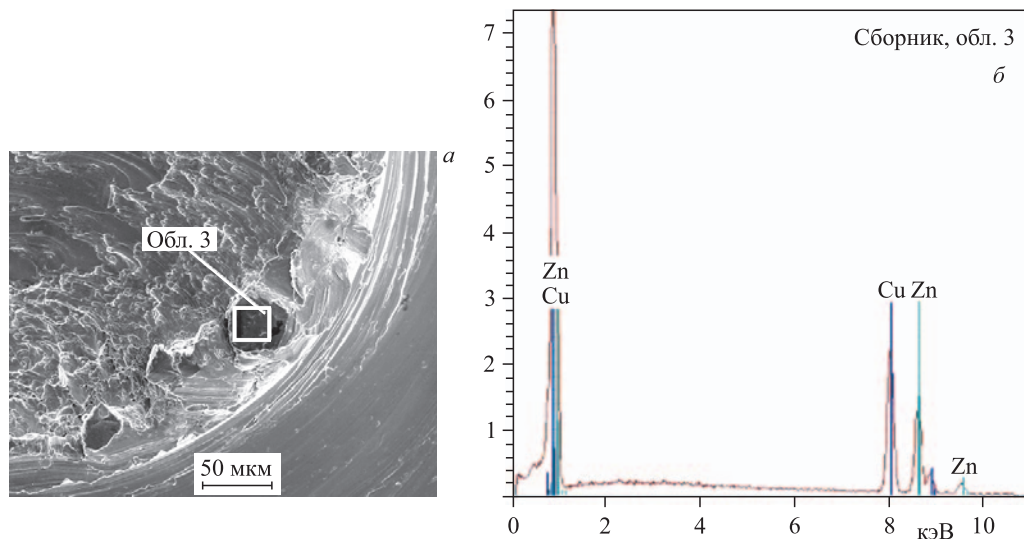


Рис. 19. СЭМ-изображение центральной части деструктурированного пятна с явно видимыми границами и темного участка вблизи границы (а) с измерением ХСРИ на плоской части поверхности в обл. 3 (б)

На рис. 18, *a* представлена центральная часть ЛС с измененным пятном диаметром 621,7 мкм (обл. 2), а на рис. 18, *б* — соответствующий ХСРИ.

Сравнение спектров на рис. 17, *б* и 18, *б* показывает, что изменений элементного состава в сильно деформированном пятне не произошло, по-видимому, здесь протекали процессы эрозии поверхности при прохождении γ -квантов в присутствии водорода при давлении 1 кбар.

На рис. 19 представлено СЭМ-изображение центральной части деформированного пятна с явно видимыми границами и его темный участок вблизи границы (*a*) с измерением ХСРИ на плоской части поверхности в обл. 3 (*б*).

Как видно из рис. 19, *б*, в спектре по-прежнему присутствуют только медь и цинк! Это свидетельствует о том, что ядерных реакций водорода и γ -квантов с ядрами меди и цинка не происходит, а потока нейтронов из (γ, n)-реакций в вольфрамовой тормозной мишени и в бериллии (бериллиевой бронзе) недостаточно, чтобы вызвать существенные изменения химического состава ЛС, которые можно измерить.

На поверхности ЛС присутствуют различные структуры; изображение одной из них представлено на рис. 20, *a*; в обл. 4 измерен ХСРИ (рис. 20, *б*). В табл. 9 приведен соответствующий элементный состав.

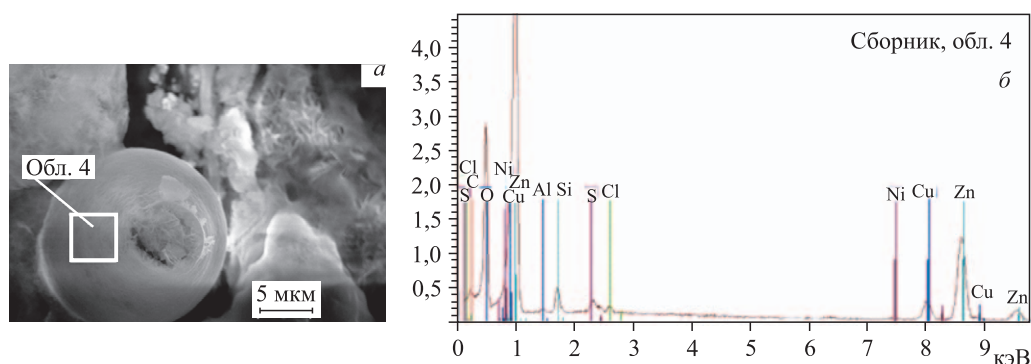


Рис. 20. СЭМ-изображение структуры на поверхности ЛС (*a*); в обл. 4 измерен ХСРИ (*б*)

Таблица 9. Концентрации элементов на ЛС в обл. 4 на рис. 20, *a*

Элемент	Z	Серия	($C \pm \Delta C$), вес. %	C, ат. %
Углерод	6	К	$14,70 \pm 4,82$	30,52
Кислород	8	К	$30,45 \pm 7,57$	47,45
Алюминий	13	К	$0,11 \pm 0,07$	0,10
Кремний	14	К	$1,27 \pm 0,17$	1,13
Сера	16	К	$0,54 \pm 0,10$	0,42
Хлор	17	К	$0,32 \pm 0,08$	0,23
Никель	28	К	$0,26 \pm 0,08$	0,11
Медь	29	К	$7,32 \pm 0,48$	2,87
Цинк	30	К	$45,01 \pm 2,46$	17,16

В сферической структуре диаметром примерно 18,6 мкм имеется отверстие с выбросами по краю, что свидетельствует о произошедшем удалении материала с разрывом шаровой поверхности.

В структуре обнаружены легкие элементы, такие как С, О, Al, Si, S, Cl, и более тяжелый металл Ni. Следует особо отметить, что здесь наблюдается, в отличие от спектров на рис. 18, б, 19 и 20, б, значительное превышение концентрации цинка по отношению к меди. Возможно, цинк входит в состав этой сложной структуры.

На рис. 21 приведены СЭМ-изображения отдельных фрагментов, которые присутствуют на рис. 20, а, а именно границы на краю отверстия (а) и пористой структуры, состоящей из более мелких деталей (б), видимых справа на рис. 21, а.

На рис. 22, а представлено СЭМ-изображение всего фрагмента, в которое входит сферический объект на рис. 20, а, б. Он выглядит как «раскрывшаяся чаша» со сложным внутренним рельефом. Увеличенный участок слева от этого фрагмента дан на рис. 21, б. Видны несколько светлых кристаллитов малого размера (порядка 0,5 мкм), на одном из которых в т. 5 (рис. 22, б) измерен ХСРИ (рис. 23). В табл. 10 описаны концентрации элементов в этой точке. Как видно из спектра, обнаружены преимущественно легкие

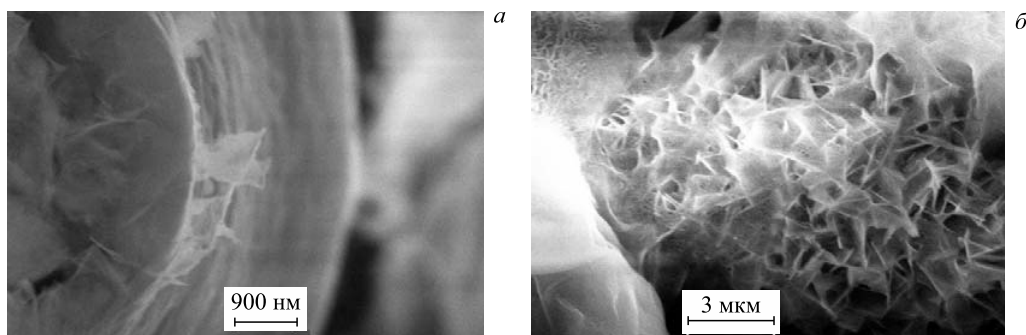


Рис. 21. СЭМ-изображения отдельных фрагментов, которые присутствуют на рис. 20, а: граница на краю отверстия (а) и рыхлая губчатая нитевидная структура (б)

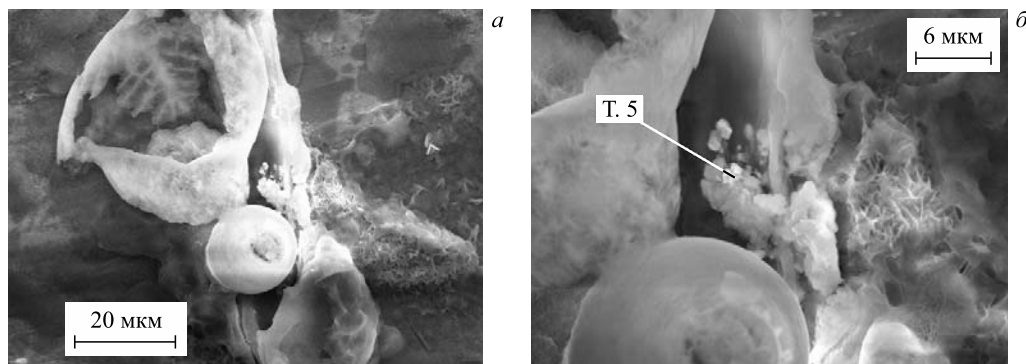


Рис. 22. СЭМ-изображения полного фрагмента, в который входит сферический объект (а), представленный на рис. 20, а, и увеличенное изображение участка слева от этого фрагмента (б), в т. 5 которого проведен РМЗА и измерен ХСРИ

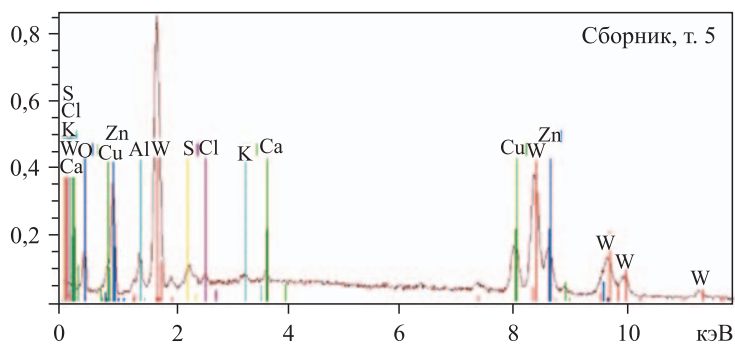


Рис. 23. ХСРИ, измеренный в т. 5 на рис. 22, б

Таблица 10. Концентрации элементов на ЛС в т. 5 на рис. 22, б

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	$6,43 \pm 2,63$	32,62
Алюминий	13	К	$1,94 \pm 0,30$	5,85
Сера	16	К	$1,15 \pm 0,17$	2,90
Хлор	17	К	$0,52 \pm 0,11$	1,18
Кальций	20	К	$0,37 \pm 0,10$	0,77
Железо	26	К	$0,28 \pm 0,09$	0,40
Медь	29	К	$9,56 \pm 0,68$	12,22
Цинк	30	К	$10,15 \pm 0,73$	12,60
Вольфрам	74	К	$69,17 \pm 4,35$	30,55

химические элементы — O, Al, S, Cl, K и Ca. Основные пять линий с высокой интенсивностью соответствуют вольфраму, элементу с номером $Z = 74$, с очень высокой концентрацией: 69,17 вес. %, или 30,55 ат. %! Первые пики вольфрама при малой энергии даже превосходят пики от меди и цинка. Все эти пять пиков несколько смещены от табличных стандартов в область меньших энергий, но присутствуют все линии спектра, которые должны быть! Следует особо отметить, что пики от цинка превышают пики от меди, а их атомные отношения близки: $\text{Cu (ат. \%)} : \text{Zn (ат. \%)} = 49,23 : 50,77$.

Для уточнения полученных выше результатов был измерен ХСРИ в т. 6 (рис. 24, а), рядом с обнаруженными светлыми частицами вольфрама. Спектр представлен на рис. 24, б. Соответствующие концентрации элементов приведены в табл. 11. Как видно из спектра и таблицы, элементный состав в т. 6 оказался более разнообразным, чем в т. 5. Здесь найден ряд легких химических элементов, таких как O, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, и более тяжелые элементы — железо, никель и опять же вольфрам.

Видно также, что здесь пики от кислорода (60,74 ат. %), магния (4,65 ат. %), алюминия (7,50 ат. %), кремния (8,87 ат. %) и кальция (9,13 ат. %) превышают или сравнимы с пиками от цинка (6,59 ат. %). В свою очередь, пики от цинка (6,59 ат. %) также более интенсивны, чем пики от меди (1,19 ат. %).

На рис. 25, а представлен фрагмент сложной фигуры рис. 22, а — основание «раскрывшейся чаши», т. е. области, расположенной рядом со сферическим объектом на рис. 20, а.

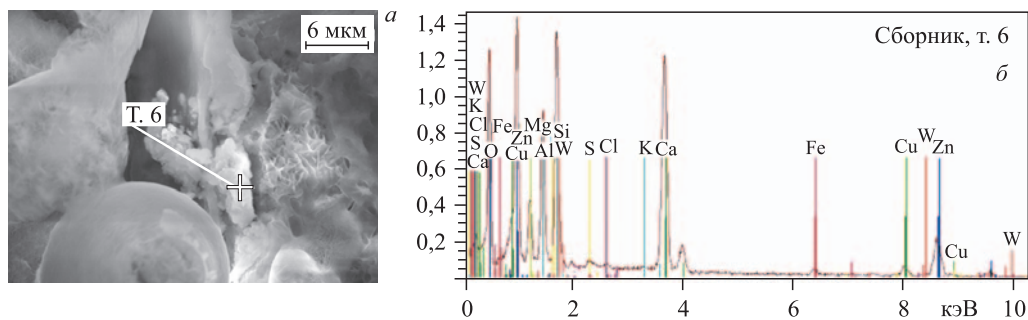


Рис. 24. СЭМ-изображение области рядом со сферическим объектом на рис. 20, а (а), в т. 6 которого проведен РМЗА и измерен ХСРИ (б)

Таблица 11. Концентрации элементов в ЛС в т. 6 на рис. 24, а

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	$39,19 \pm 10,84$	60,74
Магний	12	К	$4,56 \pm 0,58$	4,65
Алюминий	13	К	$8,16 \pm 0,84$	7,50
Кремний	14	К	$10,04 \pm 0,90$	8,87
Фосфор	15	К	$0,28 \pm 0,09$	0,22
Сера	16	К	$0,35 \pm 0,10$	0,27
Хлор	17	К	$0,24 \pm 0,09$	0,17
Калий	19	К	$0,08 \pm 0,07$	0,05
Кальций	20	К	$14,76 \pm 0,91$	9,13
Железо	26	К	$0,78 \pm 0,14$	0,35
Никель	28	К	$0,40 \pm 0,12$	0,17
Медь	29	К	$3,06 \pm 0,32$	1,19
Цинк	30	К	$17,38 \pm 1,14$	6,59
Вольфрам	74	К	$0,71 \pm 0,19$	0,10

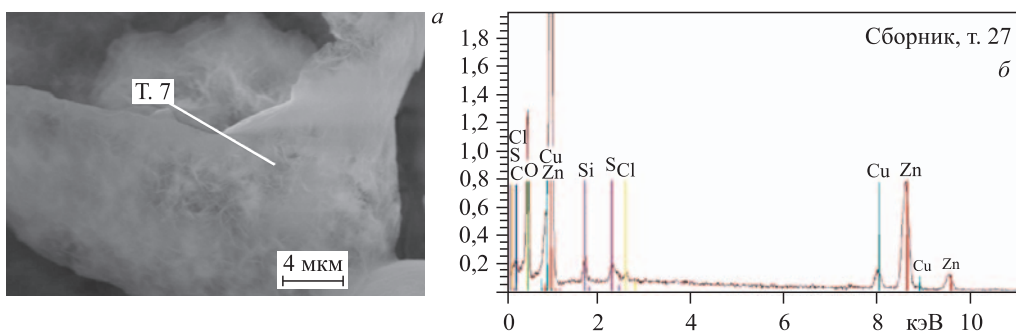


Рис. 25. СЭМ-изображение части структуры (а); ХСРИ в т. 7 (б)

ХСРИ в т. 7 дан на рис. 25, б. Видно, что здесь присутствуют O, Si, S, Cl и опять же пики цинка значительно превышают пики меди.

На рис. 26, а приведено СЭМ-изображение другого участка «раскрывшейся чаши» рис. 22, а. На рис. 26, б показан ХСРИ, измеренный в т. 8, а в табл. 12 отображен соответствующий элементный состав. В изученной области присутствуют легкие элементы — O, Si, S и Cl наряду с элементами ЛС — цинком и медью. Интенсивность пиков от цинка (27,07 ат. %) также сильно превосходит интенсивность пиков от меди (8,12 ат. %).

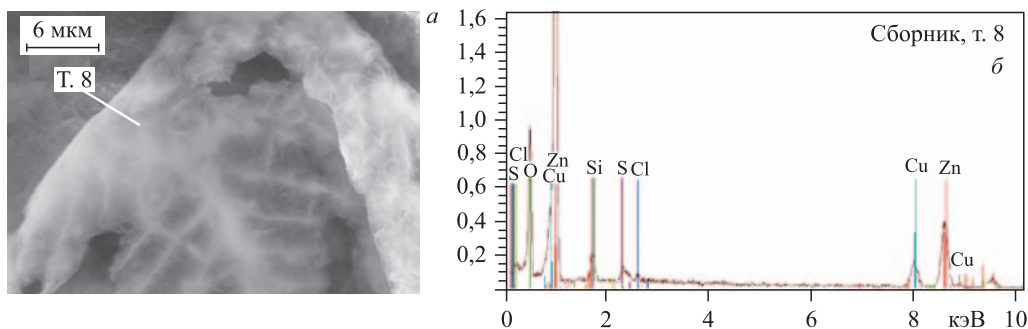


Рис. 26. СЭМ-изображение структуры в виде «раскрывшейся чаши» (а) и ХСРИ в т. 8 (б)

Таблица 12. Концентрации элементов на ЛС в т. 8 на рис. 26, а

Элемент	Z	Серия	(C ± ΔC), вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	28,38 ± 8,44	60,09
Алюминий	13	К	0,25 ± 0,11	0,31
Кремний	14	К	2,28 ± 0,29	2,75
Сера	16	К	1,15 ± 0,18	1,22
Хлор	17	К	0,46 ± 0,12	0,44
Медь	29	К	15,22 ± 1,07	8,12
Цинк	30	К	52,26 ± 2,95	27,07

На рис. 27 представлено СЭМ-изображение поверхности ЛС с тонкостенной трубчатой структурой (а) (см. рис. 2, а, 6, а–в, 10, 12 и 13, а с аналогичными структурами на поверхности ВО), а ХСРИ, измеренный в т. 9, показан на рис. 27, б. В табл. 13 приведены соответствующие концентрации элементов.

В изученной области присутствуют такие легкие элементы, как O (53,12 ат. %), Mg (1,18 ат. %), Al (1,42 ат. %), Si (3,50 ат. %), S (1,80 ат. %), Cl (0,99 ат. %), K (0,33 ат. %), Ca (1,23 ат. %), наряду с элементами ЛС — цинком (26,86 ат. %) и медью (7,98 ат. %). Интенсивность пиков от цинка также превосходит интенсивность пиков от меди. Но здесь, в отличие от элементного состава на ВО, найдены тяжелые металлы — железо (0,33 ат. %) и никель (1,09 ат. %). Такая же тонкостенная трубка на поверхности ВО с похожим элементным составом приведена на рис. 10, а, 12 и 13, а.

На поверхности ЛС также обнаружены плоские частицы, одна из которых показана на рис. 28, а. В обл. 10 проведен РМЗА, ХСРИ представлен на рис. 28, б.

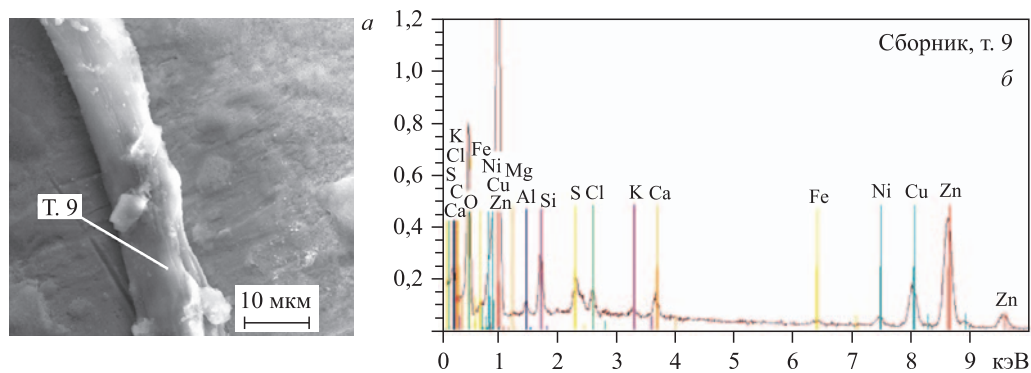


Рис. 27. СЭМ-изображение структуры в виде тонкостенной трубки (а) и ХСРИ в т. 9 (б)

Таблица 13. Концентрации элементов на ЛС в т. 9 на рис. 27, а

Элемент	Z	Серия	(C ± ΔC), вес. %	C, ат. %
Кислород	8	K	24,13 ± 5,01	53,12
Магний	12	K	0,82 ± 0,15	1,18
Алюминий	13	K	1,09 ± 0,15	1,42
Кремний	14	K	2,79 ± 0,25	3,50
Фосфор	15	K	0,13 ± 0,07	0,15
Сера	16	K	1,64 ± 0,15	1,80
Хлор	17	K	1,00 ± 0,12	0,99
Калий	19	K	0,36 ± 0,08	0,33
Кальций	20	K	1,40 ± 0,13	1,23
Железо	26	K	0,55 ± 0,10	0,35
Никель	28	K	1,82 ± 0,16	1,09
Медь	29	K	14,40 ± 0,69	7,98
Цинк	30	K	49,87 ± 2,13	26,86

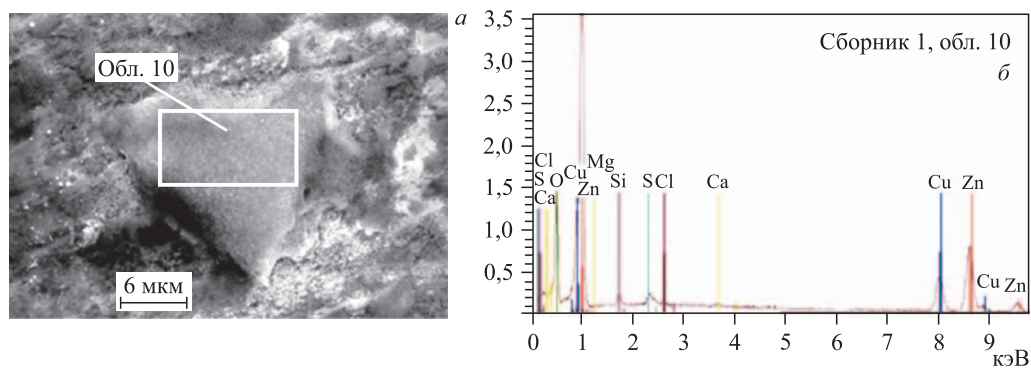


Рис. 28. СЭМ-изображение плоской частицы на поверхности ЛС (а) и ХСРИ в обл. 10

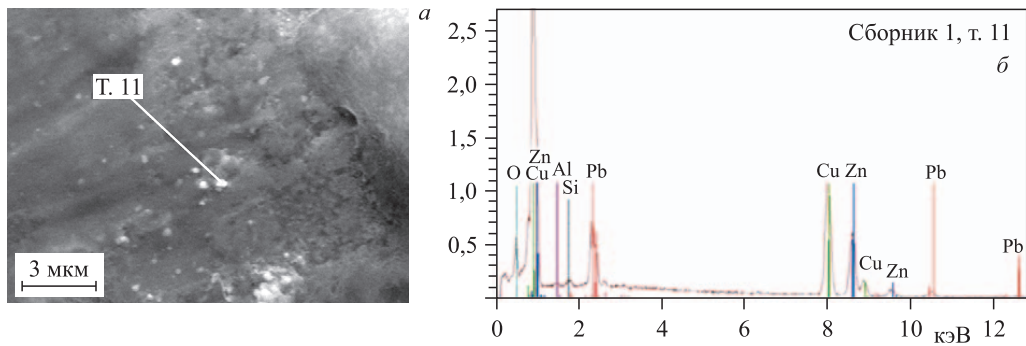


Рис. 29. СЭМ-изображение светлой структуры малого размера (а) и ХСРИ в т. 11 (б)

Отметим, что РМЗА в обл. 10 площадью $12,3 \times 6,3$ мкм выявил O, Mg, Si, S, Cl, Cu и Zn с превышением концентрации цинка по отношению к меди.

На рис. 29, а представлено СЭМ-изображение светлой частицы малого размера (менее 200 нм). ХСРИ в т. 11 представлен на рис. 29, б. Такие частицы присутствуют на поверхности ЛС в значительном количестве.

РМЗА показал, что в малой частице (т. 11) присутствует помимо O, Al и Si свинец, который идентифицируется по множеству своих рентгеновских линий. Соотношение меди к цинку близко к характерному для латуни.

На рис. 30, а представлено СЭМ-изображение участка поверхности ЛС с протяженной структурой длиной 1 мкм и максимальной шириной 150 нм, а на рис. 30, б — ХСРИ в т. 12. Таких структур, но меньшего размера, имеется на изображении несколько. Здесь, как и на рис. 29, б, видно, что присутствует свинец, определенный по своим характеристическим линиям. Соотношение меди к цинку приближается к исходному соотношению для латуни.

На рис. 31, а дано СЭМ-изображение участка поверхности ЛС со своеобразной сеткой из нитевидных образований и сферических структур, также покрытых нитями (см. похожие структуры в работах [8, 9]). На рис. 31, б представлено увеличенное изображение центрального кластера на рис. 31, а с выделением обл. 13, где был проведен РМЗА. ХСРИ

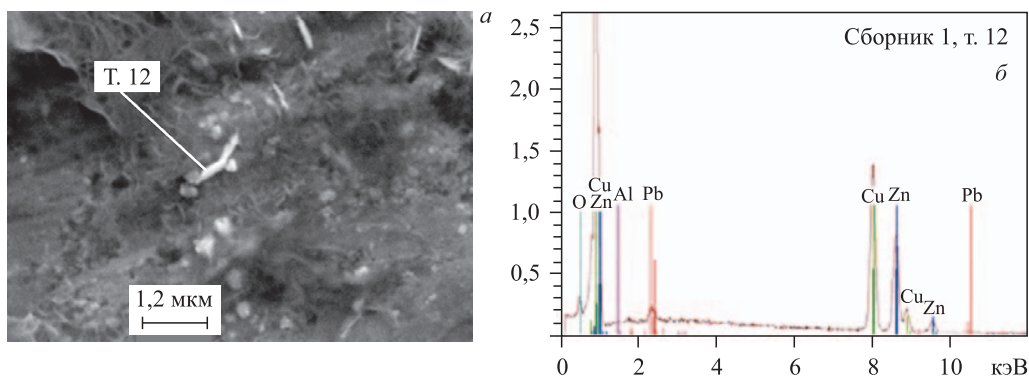


Рис. 30. СЭМ-изображение светлой протяженной структуры (а); ХСРИ в т. 12 (б)

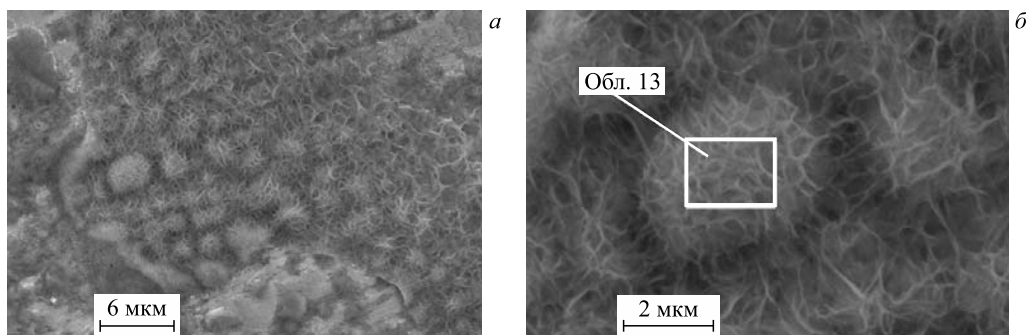


Рис. 31. СЭМ-изображения участка поверхности ЛС, покрытого сеткой из нитевидных образований и сферических структур, с различными увеличениями, с выделением обл. 13, где проведен РМЗА

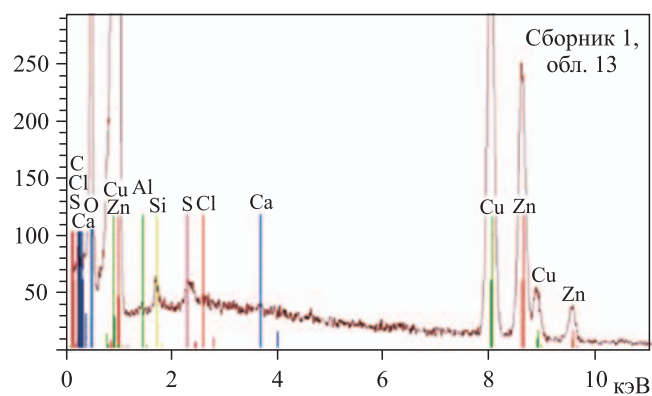


Рис. 32. ХСРИ, измеренный в обл. 13 на рис. 31, б

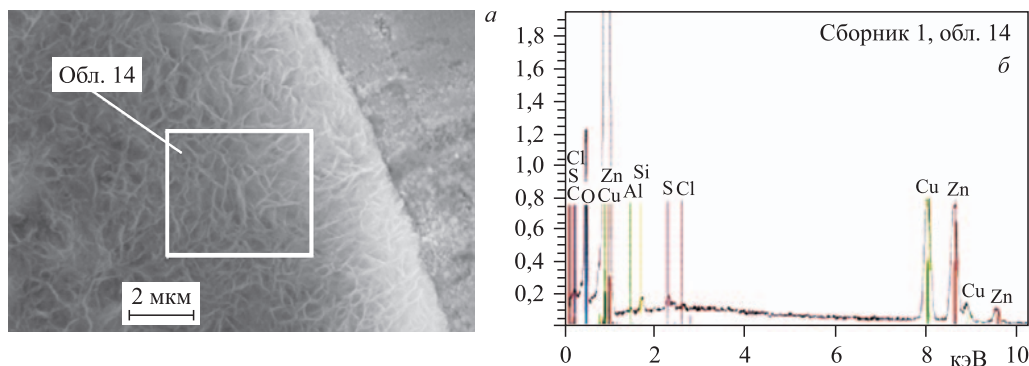


Рис. 33. СЭМ-изображение части трубки (а); ХСРИ в обл. 14 (б)

приведен на рис. 32. Наряду с правильным соотношением концентраций между медью и цинком в латуни, покрытый сеткой из нитевидных образований участок содержит Al, Si, S, Cl, Ca.

На рис. 33, *a* представлено СЭМ-изображение участка трубки на поверхности ЛС, также покрытой сеткой из нитевидных образований, а на рис. 33, *б* — ХСРИ, измеренный в обл. 14. Здесь, как и в приведенных выше ХСРИ-измерениях, найдены O, Al, Si, Cl, а пики в спектрах меди и серебра подравнялись по амплитуде.

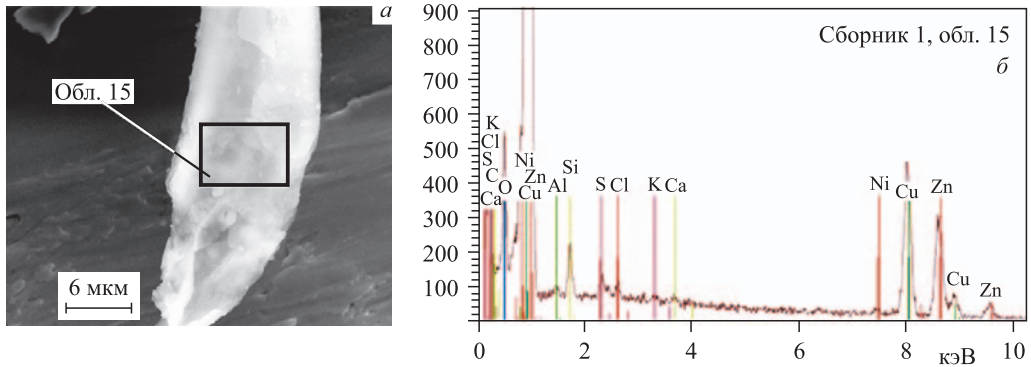


Рис. 34. СЭМ-изображение светлой структуры на поверхности ЛС (*a*); ХСРИ в т. 15 (*б*)

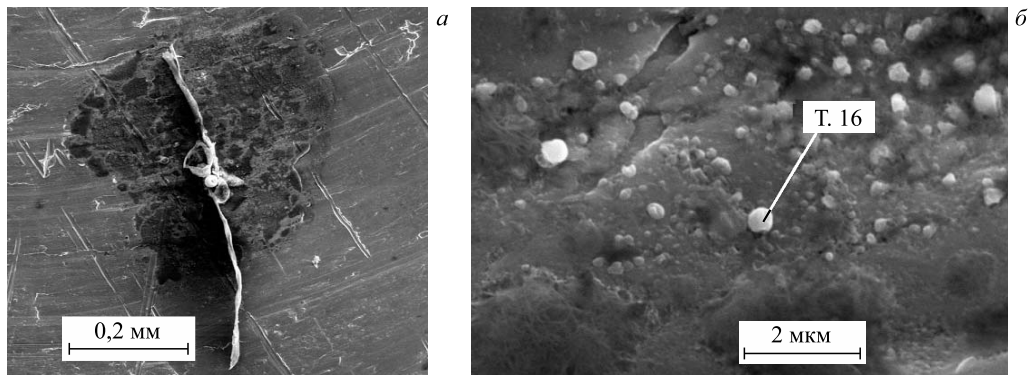


Рис. 35. СЭМ-изображение всей трубки (*a*); ХСРИ в т. 16 на светлой округлой частице (*б*)

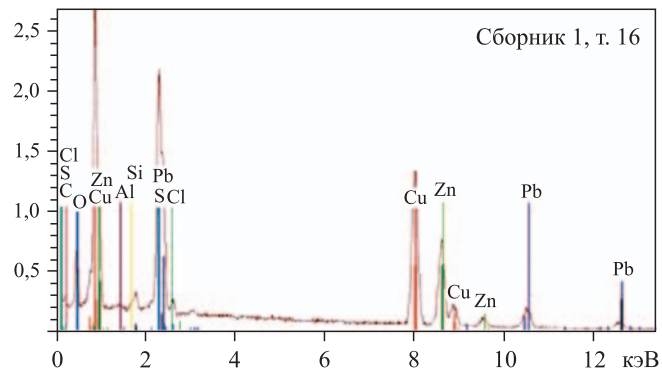


Рис. 36. ХСРИ в светлой частице в т. 16 на рис. 35, *б*

На рис. 34, *a* представлено СЭМ-изображение светлой структуры длиной более 28,7 мкм и максимальной шириной 11,4 мкм на поверхности ЛС, а на рис. 34, *б* — ХСРИ. В спектре четко проявились пики от O, Al, Si, Cl, K и Ca, а также Ni. Концентрации Cu и Zn близки к исходным концентрациям в латуни.

На рис. 35, *a* приведено СЭМ-изображение всей длинной структуры в виде трубки, расположенной на темной поверхности, с особенностями, которые детально изучены выше. Элементный РМЗА проведен в т. 16 на рис. 35, *б*, где встречаются светлые частицы округлой формы, но различных размеров, диаметрами менее 400 нм. Соответствующий ХСРИ в т. 16 дан на рис. 36. В этой частице присутствуют O, Al, Si, S, Cl и Ca вместе с четко проявившимися пиками от Pb.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучено изменение элементного состава и структуры поверхности ВО из бериллиевой бронзы (рис. 1, поз. 4), МФ (рис. 1, поз. 10) и ЛС продуктов ядерных и химических реакций (рис. 1, поз. 12). Но это не все результаты, полученные в описываемом эксперименте. В данную статью не вошли более полные результаты по этой части работы и описание исследований внутренних поверхностей латунной втулки и синтезированных частиц светлого и темного оттенков. Они представлены в работах [24, 25], публикуемых отдельно ввиду большого объема полученных экспериментальных данных и необходимой убедительности в их представлении и обоснованности результатов (см. также [26, 27]).

Показано, что имеют место значительные изменения на внутренней поверхности ВО с появлением различных частиц (см. рис. 2, *a*, 3, *a*, 4, *a*, 5, *a*, 7, *a*, 8, *d*, 8, *a*), частиц в виде тонкостенных трубок (см. рис. 7, *a–в*, 12, 14, 15, *a*), мелких частиц из соединений свинца (рис. 6, *a–в*, 8, *a*, 9, *a, б*, 10, *a*, 12, *a, б*, 13, *a*) и других объектов сложной формы (рис. 3, 4, *a*, 5, *a*, 9, *a, б*). Тонкостенные трубки состоят из следующего набора элементов: ${}^6\text{C}$, ${}^7\text{N}\uparrow$, ${}^8\text{O}$, ${}^9\text{F}\uparrow$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{15}\text{P}$, ${}^{16}\text{S}$, ${}^{17}\text{Cl}$, ${}^{18}\text{Ar}\uparrow$, ${}^{19}\text{K}$ и ${}^{20}\text{Ca}$.

МФ также претерпела изменения структуры поверхности. На ней появились нарушения типа эрозии поверхности (см. рис. 14, *a*), встречаются частицы малого размера ≈ 1 мкм (см. рис. 15, *a*), содержащие элементы O, Al, Si, S и Cl (в большом количестве — 11,99 вес. %, или 14,37 ат. %) и, возможно, свинец (см. рис. 14, *a*, 15, *a, б*, 16 и табл. 6 и 7).

ЛС продуктов реакций оказался с сильно измененной центральной частью (вдоль оси ННРС) в виде пятна диаметром 621,7 мкм и другими аномалиями (частицами) на поверхности сборника (см. рис. 17, *a*, 18, *a*, 19, *a*). Химический состав поверхности сборника не изменился (см. спектры на рис. 17, *б*, 18, *б*, 19, *б* и табл. 8), но сильно изменилась ее структура: обнаружены образования в виде трубок, но с более сложными включениями (см. рис. 20, *a*, 21, *a*, 22, *a, б*, 24, *a*, 25, *a*, 26, *a*, 27, *a* и 35, *a*), а также частицы (см. рис. 28, *a*, 31, *a, б*, 33, *a*, 34, *a*), состоящие из легких химических элементов: O, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca и более тяжелых элементов, таких как железо. Помимо этого найдены мелкие частицы сферической формы из соединений свинца (см. рис. 29, *a*, 30, *a*, 35, *a*).

РМЗА структур на поверхности ЛС показал во многих случаях изменение относительных концентраций цинка и меди с увеличением концентрации цинка, что отличается от их исходного соотношения в латуни (см. спектры на рис. 20, *б* и табл. 9, рис. 22, *б* и табл. 10, рис. 24, *б* и табл. 11, рис. 25, *б*, 26, *б* и табл. 12, рис. 27, *б* и табл. 13, рис. 28, *б*,

29, б и 33, б). Исходное соотношение меди и цинка 60:40 ат. % (см. рис. 17 и табл. 8, рис. 18, б, 19, б, 29, б, 32, 34, б, 36). Отметим, что значительные отличия в этом соотношении от исходного отмечаются там, где присутствуют более или менее крупные частицы на поверхности ЛС.

Вызывает удивление обнаружение вольфрама в значительной концентрации — $(69,17 \pm 4,35)$ вес. %, или 30,55 ат. % (см. рис. 22, б, 23 и табл. 10), а также $(0,71 \pm 0,19)$ вес. %, или 0,10 ат. % (см. рис. 24, б и табл. 11).

Интерпретация полученных результатов представляет значительные трудности ввиду обнаруженных экспериментальных аномалий. Можно предположить, что образование легких элементов, начиная с углерода, а возможно, и более легких происходит либо при делении более тяжелых элементов в ядерных реакциях с нейтронами, протонами и дейтронами (см. [15, 17, 24, 26]) — «нисходящие» реакции, либо путем реакций синтеза легких ядер в более тяжелые — «восходящие» реакции (см. [8, 9, 24, 26]). При этом обнаружение более тяжелых химических элементов в результате ядерных реакций с ядрами средних масс (см. [2–13, 15, 16, 17, 24, 26]) свидетельствует о синтезе, т. е. о «восходящих» реакциях.

Установлено, что на срезе обеих половинок латунной втулки присутствуют мелкие вкрапления свинца и, возможно, олова [24]. Диффузионные процессы по возможному выделению малых концентраций примесей из металлов, входящих в материал самих ННРС и ДНРС, и последующее собирание их в кластеры имеют малые коэффициенты диффузии и, следовательно, подавлены [24]. Из этого факта следует, что тяжелые ядра могли быть синтезированы из более легких ядер самой латуни, насыщенной водородом, в реакциях, которые упоминаются в работах [8, 9]. Образование же значительного количества легких элементов в составе крупных частиц и других структур, возможно, происходит, во-первых, при делении ядер средних масс и процессах при синтезе тяжелого элемента — свинца («нисходящие» реакции) (см. [15–17] и приведенные там ссылки), а во-вторых, при синтезе легких элементов в плотном водороде по соответствующим реакциям синтеза (см., например, циклы Бете: протон-протонный и углеродно-азотный [19–22]).

Приведем здесь перевод одного из положений в работе [22] (см. также [23]): «В расчетах звездных моделей часто используется так называемая смесь Рассела тяжелых элементов (*Russell-mixture of heavy elements*), которая представляет собой простейшее приближение к точным составам (*constitutions*) звезд. Эта смесь Рассела дается в виде 50% ${}^8\text{O}$, 25% ${}^{11}\text{Na}$ и ${}^{12}\text{Mg}$; 6% ${}^{14}\text{Si}$, 6% ${}^{19}\text{K}$ и ${}^{20}\text{Ca}$, 13% ${}^{26}\text{Fe}$ и имеет средний эффективный молекулярный вес $\mu = 1,85$ ».

Можно сделать вывод, что в данной работе наблюдается похожий состав вновь образованных химических элементов в обеих синтезированных структурах и в других обнаруженных объектах (см. также [17, 24–27]).

Помимо этого можно предположить, что в процессах могут принимать участие реакции, предложенные в работах [28, 29], т. е. так называемые ассоциированные ядерные реакции с участием третьей частицы в латуни, насыщенной водородом, и бериллиевой бронзе.

Атомные процессы при рассеянии γ -квантов и реакции с участием ядер водорода представлены конспективно в работе [17, 24, 26].

Для проверки методологии подхода с использованием ДНРС/ННРС, наполненных плотными газами водорода и дейтерия, было проведено несколько контрольных исследований по влиянию облучения γ -квантами и загрузки плотного газа:

а) облучение γ -квантами с энергией 10 МэВ в течение 10 ч при токе электронного пучка около 5–7 мкА ННРС/ДНРС, откаченных до вакуума 10^{-4} торр, но без металлического стержня;

б) загрузка ДНРС с Pd-стержнем и дейтерием до давления 3,5 кбар, выдерживание этого давления в течение 48 ч, разгрузка ННРС/ДНРС путем сбрасывания давления дейтерия до давления 1 атм. Повторение этой операции «загрузка-разгрузка» осуществляется три раза;

в) облучение образца (Pd-стержня) на воздухе γ -квантами с энергией 10 МэВ в течение 10 ч при токе электронного пучка около 5–7 мкА;

г) облучение γ -квантами с энергией 10 МэВ в течение 18 ч при токе электронного пучка около 10–11 мкА специализированных камер низкого давления иного вида, заполненных исследуемым веществом и водородом или дейтерием при давлении 65 бар, с монокристаллическими образцами $Pd_{0,9}Ag_{0,1}$ или мелкодисперсными порошками чистых (0,98 %) рения или никеля.

Исследования элементного состава всех поверхностей компонентов ННРС/ДНРС (см. рис. 1 в [1]), имеющих контакт с плотными газами, а именно: бериллиевого входного окна (поз. 4), Pd-стержней (поз. 9), латунных сборников продуктов реакций (поз. 12), марганциновых фольг (поз. 10), разрезанных поверхностей латунных втулок (поз. 8) и облученных материалов в камерах низкого давления — позволили установить отсутствие заметных изменений состава, наличия трещин и других эффектов.

В аналогичных условиях была облучена ННРС с Pd-стержнем внутри, но при давлении молекулярного водорода 0,5 кбар. Результаты, полученные в этих исследованиях и по п. г), будут в ближайшее время опубликованы.

В приложении 1 к полному описанию всех эффектов в работе [24] представлены реакции (γ, n) и (γ, p) на ядрах, входящих в компоненты материалов ННРС. Из их анализа можно сделать вывод, что в основном эти реакции не происходят при энергиях γ -квантов, использованных в работе, $E_\gamma = 10$ МэВ. В приложении 2 (см. там же) приведены реакции синтеза легких элементов из водорода.

В заключение авторы выражают признательность за полезные обсуждения ведущему научному сотруднику ЛЯР им. Г. Н. Флерова ОИЯИ В. А. Щеголеву, за активное участие в подготовке эксперимента научному сотруднику НЦЯИ доктору Т. Вилчинска-Китовской, за облучение камеры ННРС γ -квантами А. Г. Белову, за СЭМ-исследования и РМЗА старшему научному сотруднику аналитического центра Научно-исследовательского института перспективных материалов МИЭМ А. И. Гайдар и научному сотруднику НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова Д. В. Петрову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М.* Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1979. 215 с.
2. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Nuclear Reactions, Induced by Gamma Quanta, in Palladium Saturated with Deuterium Surrounded by Dense Deuterium Gas // *Eur. Phys. Lett.* 2012. V. 99. P. 22001-1–22001-6.
3. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Nuclear Reactions in Deuterium-Saturated Palladium under Irradiation by 10 MeV γ -Quanta in Dense Molecular Deuterium at 1.2 kbar Pressure // *Eur. Phys. Lett.* 2013. V. 103. P. 42002-1–42002-6.

4. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Chemical Composition and Structural Phase Changes of Novel Synthesized Structure and of Pd Sample under γ -Quanta Irradiation in Dense Deuterium Gas // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2012. V. 9, No. 8. P. 615–631; JINR Preprint E15-2012-34. Dubna, 2012.
5. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Синтез новых структур в плотном газообразном дейтерии и насыщенном дейтерием палладии при ядерных реакциях, инициированных γ -квантами // *Физика и химия обработки материалов.* 2012. № 5. С. 5–13; Препринт ОИЯИ P15-2012-50. Дубна, 2012.
6. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T.* Deuteron Disintegration, Thermonuclear and Nuclear Fission Reactions Induced by γ -Quanta in D-Saturated Palladium and Dense Deuterium Gas with Synthesis of New Structures // *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techn.* 2013. V. 7, No. 2. P. 239–247.
7. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Synthesis of New Structures in Dense Deuterium Gas and Deuterated Palladium under Nuclear Reactions Induced by γ Quanta // *Inorganic Materials: Appl. Res.* 2013. V. 4, No. 3. P. 5–13.
8. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T.* Changes of Surface Structure and Elemental Composition of Pd Rod and Collector of Nuclear Reaction Products Irradiated with 10-MeV γ -Quanta in Dense Deuterium Gas // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10, No. 7. P. 804–819; JINR Preprint P15-2013-15. Dubna, 2013. 34 p.
9. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T.* Changes of Surface Structure and Elemental Composition of Components of Deuterium High-Pressure Chamber with Pd Rod inside Irradiated with 10-MeV γ -Quanta in Dense Deuterium Gas // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10, No. 7. P. 820–832; JINR Preprint P15-2013-20. Dubna, 2013. 29 p.
10. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Ядерные реакции в насыщенном дейтерием палладии и рении в атмосфере плотного дейтерия при облучении γ -квантами непрерывного спектра с граничной энергией 23 МэВ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2013. Т. 10, № 4(181). С. 603–621; Препринт ОИЯИ P15-2012-63. Дубна, 2012.
11. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Изменения поверхности, объемных свойств образцов ванадия и нержавеющей стали, облученных в плотном газообразном дейтерии γ -квантами с пороговой энергией 23 МэВ. Препринт P15-2012-75. Дубна, 2012.
12. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Результаты по облучению алюминия и гомогенного сплава YMn_2 γ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар. Препринт ОИЯИ P15-2013-41. Дубна, 2013; *Письма в ЭЧАЯ.* 2014. Т. 11, № 2(186). С. 278–292.
13. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Результаты по облучению нержавеющей стали и меди γ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар. Препринт ОИЯИ P15-2013-42. Дубна, 2013; *Письма в ЭЧАЯ.* 2014. Т. 11, № 3(187). С. 491–512.
14. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П., Вилчинска-Китовска Т.* Устройство для получения энергии. Патент на полезную модель № 122197 от 21 июня 2012 г.
15. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Phenomenological Nuclear-Reaction Description in Deuterium-Saturated Palladium and Synthesized Structure in Dense Deuterium Gas under γ -Quanta Irradiation // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10, No. 3. P. 283–287; JINR Preprint E15-2012-35. Dubna, 2012.
16. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure, and Technological Applications. Dubna: JINR, 2013. 320 p.
17. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Изменения структуры и элементного состава Pd-стержня и сборника продуктов реакций, облученных 10-МэВ тормозными γ -квантами в молекулярном водороде при давлении 2,5 кбар. Препринт ОИЯИ P15-2013-80. Дубна, 2013; Изменения структуры и элементного состава Pd-стержня и сборника продуктов реакций, облученных 10-МэВ тормозными γ -квантами в камере высокого давления молекулярного водорода при давлении 2,5 кбар // *Письма в ЭЧАЯ.* 2014. Т. 11, № 4(188). С. 796–816.

18. Углов В. В. Радиационные эффекты в твердых телах. Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 2011. 207 с.
19. Ииханов Б. С., Капитонов И. М., Тутынь И. А. Нуклеосинтез во Вселенной. М.: Либроком, 2009; <http://nuclphysinpmsuru/nuclsynt.html>.
20. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1. Физика атомного ядра. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 590–593.
21. Bethe H. A. Energy Production in Stars // Phys. Rev. 1939. V. 55. P. 434–456.
22. Gamov G. Nuclear Energy Sources and Stellar Evolution // Phys. Rev. 1938. V. 53. P. 595–604.
23. Marshak R. E., Morse P. M., York H. Equation of State of Hydrogen, Helium, and Russel Mixture at High Temperatures and Pressures // Astrophys. J. 1950. V. 111. P. 214–220.
24. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Ядерные реакции синтеза и изменения структуры и химического состава поверхностей элементов ННРС, облученных 10-МэВ тормозными γ -квантами в молекулярном водороде при давлении 1 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2014-3. Дубна, 2014; Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 1(192). С. 199–230.
25. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Синтез микрочастиц в молекулярном водороде при давлении 1 кбар в ядерных реакциях под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ. Химический состав и структуры на внутренних поверхностях компонентов камеры высокого давления. Препринт ОИЯИ Р15-2014-2. Дубна, 2014. 40 с.
26. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Синтез новых структур на поверхности Pd-стержня и элементов ННРС и их химический состав при ядерных реакциях под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ в молекулярном водороде при давлении 0,5 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2014-6. Дубна, 2014. 32 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (направлено).
27. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Химический состав и структура синтезированных частиц на поверхности ННРС при ядерных реакциях при облучении тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ в молекулярном водороде при давлении 0,5 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2014-7. Дубна, 2014. 23 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (направлено).
28. Kálmán P., Keszthelyi T. Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. P. 031606-1–031606-3.
29. Kálmán P., Keszthelyi T. Lattice Effect in Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. P. 031602-1–031602-4.

Получено 8 апреля 2014 г.