

P15-2014-87

А. Ю. Дидык *, Р. Вишневецкий ^{1, **}

**СИНТЕЗ НОВЫХ СТРУКТУР
И ОБРАЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ПЛОТНОМ ГЕЛИИ ПРИ ДАВЛЕНИИ 3,05 КБАР
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТОРМОЗНЫМИ γ -КВАНТАМИ
С ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ 10 МэВ**

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

¹ Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

* E-mail: didyk@jinr.ru

** E-mail: roland.wisniewski@gmail.com

Дидык А. Ю., Вишнеvский Р.

P15-2014-87

Синтез новых структур и образование химических элементов в плотном гелии при давлении 3,05 кбар при облучении тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ

Газообразный гелий при начальном давлении около 3,05 кбар, находившийся в камере высокого давления гелия (HeHPC), был облучен тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ в течение $1,0 \cdot 10^5$ с при токе электронного пучка 18–21 мкА. За время облучения давление в HeHPC уменьшилось на 65 бар. Внутри HeHPC были обнаружены множественные объекты, находившиеся на внутренних поверхностях реакционной камеры, входного окна, состоящих из бериллиевой бронзы, и медного сборника продуктов ядерных и химических реакций. Элементный анализ с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеновского микрозондового анализа (РМЗА) позволил установить, что объекты состоят преимущественно из углерода и в меньших количествах из других элементов от углерода до железа. Предложено объяснение обнаруженных элементов и аномалий на основе ядерных реакций слияния гелия под действием γ -квантов по аналогии с реакциями на звездах в астрофизике.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2014

Didyk A. Yu., Wiśniewski R.

P15-2014-87

Synthesis of New Structures and Formation of Chemical Elements in Dense Helium at a Pressure of 3.05 kbar under Irradiation of Braking γ -Rays with a Threshold Energy of 10 MeV

The high-pressure helium chamber (HeHPC) filled with helium gas under a pressure of about 3.05 kbar was irradiated by braking γ -rays of 10 MeV threshold energy for $1.0 \cdot 10^5$ s at an electron beam current of 18–21 μ A. During the irradiation of the HeHPC, the pressure decreased by 65 bar. Inside the chamber, multiple objects were found at the internal surfaces of the reaction chamber, input window from beryllium bronze and copper collector of nuclear and chemical reaction products. The element analysis made by using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray microprobe analysis (XMPA) revealed that the objects mainly consist of carbon and smaller amounts of other elements from carbon to iron. An explanation of the observed elements and anomalies based on nuclear fusion reactions of helium under the action of γ -rays is proposed by analogy with the reactions taking place in stars in astrophysics.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2014

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] газообразный гелий при начальном давлении около 1,1 бар, находившийся в камере высокого давления гелия (HeHPC), был облучен тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ в течение $1,0 \cdot 10^5$ с при токе электронного пучка 22–24 мкА. При вскрытии HeHPC остаточное давление гелия оказалось равным 430 бар. Внутри HeHC были обнаружены синтезированные фольги черного цвета и другие множественные объекты, находившиеся на внутренних поверхностях реакционной камеры, состоящей из меди высокой чистоты (99,99 %), входного окна γ -квантов из бериллиевой бронзы и медного сборника продуктов ядерных и химических реакций. Элементный анализ с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеновского микрозондового анализа (РМЗА) позволил установить, что фольги состоят преимущественно из углерода и в меньших количествах из других элементов от углерода до железа. Предложено объяснение обнаруженных элементов и аномалий на основе ядерных реакций слияния гелия под действием γ -квантов по аналогии с реакциями на звездах в астрофизике. Развитый подход хорошо согласуется с циклом исследований авторов при воздействии γ -квантов на плотные газы водорода и дейтерия в присутствии в реакционной камере металлов или при их отсутствии.

Цель настоящей работы — исследование процессов образования новых химических элементов, ранее отсутствовавших в материалах всех элементов HeHPC, с образованием новых синтезированных структур в плотном газообразном дейтерии при более высоком давлении до 3, 5 кбар и при тех же условиях облучения тормозными γ -квантами, что и в [1, 2].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлена схема *модифицированной камеры высокого давления*, заполненной гелием (или сокращенно HeHPC) на момент облучения γ -квантами, имевшим давление 3,05 кбар. Гелий особой спектральной очистки внутри камеры имел чистоту по паспортным данным 99,999 ат. %. Все операции при заполнении гелием, как в предыдущем эксперименте, были повторены. Обозначения элементов сохранены, как и в первом эксперименте [1, 2].

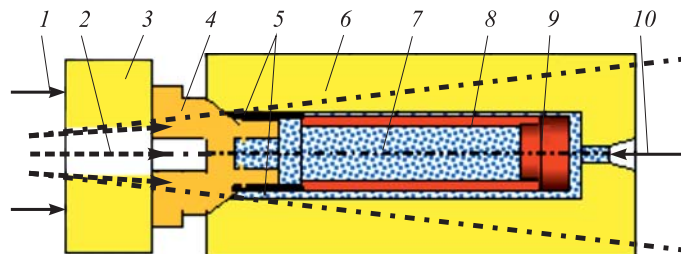


Рис. 1. Элементы камеры высокого давления гелия (HeHPC), использованные при облучении γ -квантами. 1 — винтовое прижимное уплотнение (конус $60^\circ/58^\circ$), которое не показано на этом рисунке; 2 — поток γ -квантов с проходным сечением в 6 мм; 3 — входное окно, в которое вставляется прижимной винт; 4 — входное окно γ -квантов; 5 — область, в которой были обнаружены «углеродные» фолги в [1,2]; 6 — камера высокого давления с внешним защитным стальным цилиндром (не показан на рисунке); 7 — гелий (исходное давление 3,05 кбар); 8 — реакционная камера; 9 — сборник продуктов реакции, закрывающий реакционную камеру; 10 — устройство для загрузки-разгрузки газа и измерения его давления при контроле и в процессе облучения

Отличие данного эксперимента от [1,2] заключается в том, что такие элементы, входящие в HeHPC, как: входное окно (4), камера высокого давления (6), реакционная камера (8) и сборник продуктов реакций (9) были изготовлены из одного материала — бериллиевой бронзы. Поэтому присутствие иных химических элементов, кроме меди (98–96 ат. %) и бериллия (2–4 ат. %) из бериллиевой бронзы (ББ) и примесей в ней, исключалось. Концентрация примесей в бериллиевой бронзе (с составом $\text{Cu}_{98-96}\text{Be}_{2-4}$) контролировалась путем ее измерения РЭМ и РМЗА как на поверхности элементов HeHPC, так и внутри — при распиле на две части.

Исходное давление в HeHPC перед облучением, измеренное с использованием внутреннего тензор датчика (см. рис. 1, поз. 10) и измерительного модуля (Model P3 Strain indicator and recorder), перед облучением оказалось равным 3,051 кбар, и это давление держалось около одного месяца без изменений. При давлении гелия около 3,0 кбар его атомную плотность можно оценить примерно как $2,59 \cdot 10^{22}$ ат./см³ [3].

Измерение давления внутри HeHPC показало, что оно составляло $P = 3051$ бар. Облучение HeHPC было проведено в течение $\approx 1,02 \cdot 10^5$ с на ускорителе электронов МТ-25 Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова. Энергия электронного пучка была 10 МэВ при токе пучка электронов в диапазоне от 15 до 20 мкА. Тормозные γ -кванты непрерывного спектра с граничной энергией примерно 10 МэВ были получены с использованием тормозной мишени в виде вольфрамовой фолги с толщиной 2,5 мм и алюминиевого поглотителя электронного пучка толщиной 25 мм. При облуче-

нии температура внутри внешнего защитного стального цилиндра (оболочки) HeHPC (рис. 1, поз. б) доходила до 75 °С в стационарном режиме облучения.

Давление внутри камеры в начале облучения выросло от относительного давления +748 до +870, т.е. давление выросло до $\Delta P = 3 \times (840 - 748) = 276$ бар. После окончания облучения (за время 27 ч 51 мин, или $1,0 \cdot 10^5$ с) изменение давления в камере составило только 63 атм.

Отметим, что в первом эксперименте [1, 2] за это же время и при близких параметрах облучения (интенсивности электронного пуска и энергии электронов) давление внутри HeHPC упало от исходного 1092 бар до 426 бар.

Входное окно из бериллиевой бронзы. Конической формы (см. рис. 1, поз. 4) входное окно (ВО) было разрезано на две половинки, и на срезе был сделан рентгеновский микрозондовый анализ, который только условно можно считать исходным составом бериллиевой бронзы. Подобные анализы исходной ББ делались многократно, и в ее состав входила медь. А бериллий не измеряется РМЗА. В табл. 1 приведен соответствующий элементный состав.

Отметим присутствие помимо основного элемента материала ВО меди ($90,41 \pm 2,33$) вес. %, или 64,77 ат. %), значительного количества углерода (34,58 ат.%).

На рис. 2, а, б два РЭМ-изображения поверхности ВО в месте расположения резьбы и гладкого участка.

На правом рисунке видны куски ББ после разрезки ВО на две половинки.

Таблица 1. Концентрация элементов на срезе ВО

Элемент	Z	Серия	(C ± ΔC), вес. %	C, ат. %
Углерод	6	К	9,12 ± 2,06	34,58
Алюминий	13	К	0,28 ± 0,05	0,47
Кремний	14	К	0,03 ± 0,03	0,05
Кобальт	27	К	0,16 ± 0,04	0,12
Медь	29	К	90,41 ± 2,33	64,77

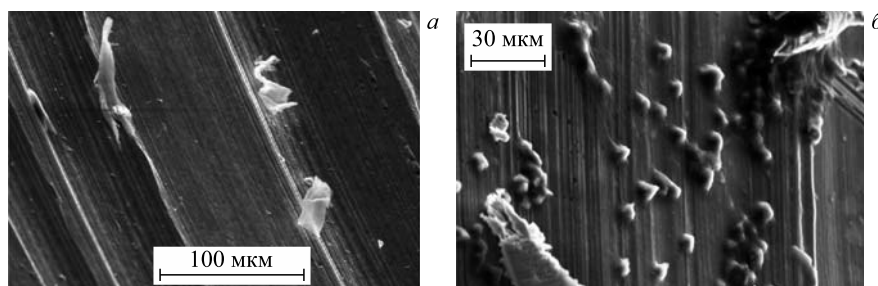


Рис. 2. Два РЭМ-изображения участков ВО со светлыми фольгами (а) и коническими структурами (б)

На рис. 3, *a, б* представлено РЭМ-изображение частицы на поверхности ВО, в т. 17 которой был сделан РМЗА (*a*), и СХРИ в т. 17 (*б*).

В табл. 2 представлен элементный состав, измеренный в т. 17 и соответствующий СХРИ на рис. 3, *б*. Как видно, частица содержит углерод

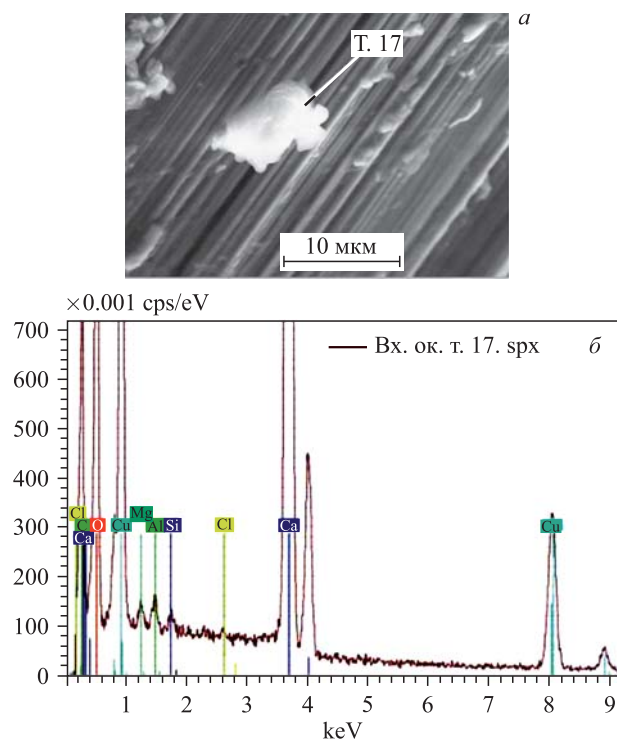


Рис. 3. РЭМ-изображение светлой частицы на поверхности ВО, в т. 17 которой был сделан РМЗА (*a*), и СХРИ в т. 17 (*б*)

Таблица 2. Элементный состав, соответствующий СХРИ на рис. 3, *б*

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Углерод	6	К	$17,04 \pm 3,20$	26,05
Кислород	8	К	$54,27 \pm 8,63$	62,31
Магний	12	К	$0,21 \pm 0,05$	0,16
Алюминий	13	К	$0,26 \pm 0,05$	0,18
Кремний	14	К	$0,13 \pm 0,04$	0,09
Хлор	17	К	$0,04 \pm 0,03$	0,02
Кальций	20	К	$18,18 \pm 0,67$	8,33
Медь	29	К	$9,86 \pm 0,36$	2,85

(26,05 ат. %), кислород (62,31 ат. %) и относительно много кальция (8,33 ат. %).

Реакционная камера из бериллиевой бронзы (РК), первая половинка из двух после распила. На рис. 4, *a*, *б* и рис. 5, *a*, *б* представлены крупная частица, по форме напоминающая смятую фольгу с шириной более 600 мкм, обнаруженная на резьбе РК (рис. 4, *a*), СХРИ в т. 3 (рис. 4, *б*), крупный объект длиной более 500 мкм на поверхности РК (рис. 5, *a*) и СХРИ (рис. 5, *б*), измеренный в т. 4.

В табл. 3 представлены элементные составы, измеренные на рис. 4, *a* в т. 3 и на рис. 5, *a* в т. 4, и соответствующие СХРИ приведены на рис. 4, *б* и 5, *б*. Как видно, в частицах содержится углерод (46,54 и 39,58 ат. %), азот (9,45 и 9,99 ат. %), кислород (38,13 и 39,35 ат. %) и целый спектр элементов вплоть до железа (0,14 ат. %, т. 3). Естественно, азот может находиться только в химически связанном состоянии.

Как видно, частица на рис. 4, *a* представляет собой смятую фольгу, состоящую преимущественно из углерода $C = 46,54$ ат. % с наличием и других

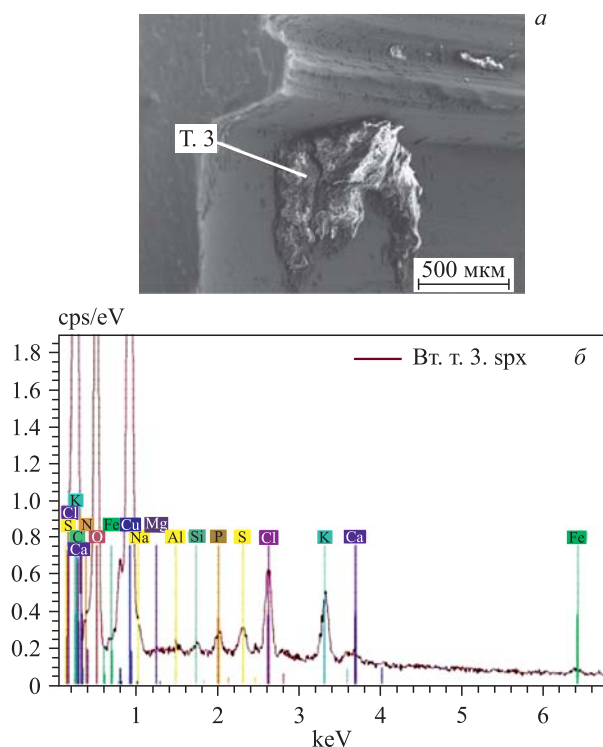


Рис. 4. РЭМ-изображение частицы на резьбе РК (*a*) и соответствующий СХРИ в т. 3 (*б*)

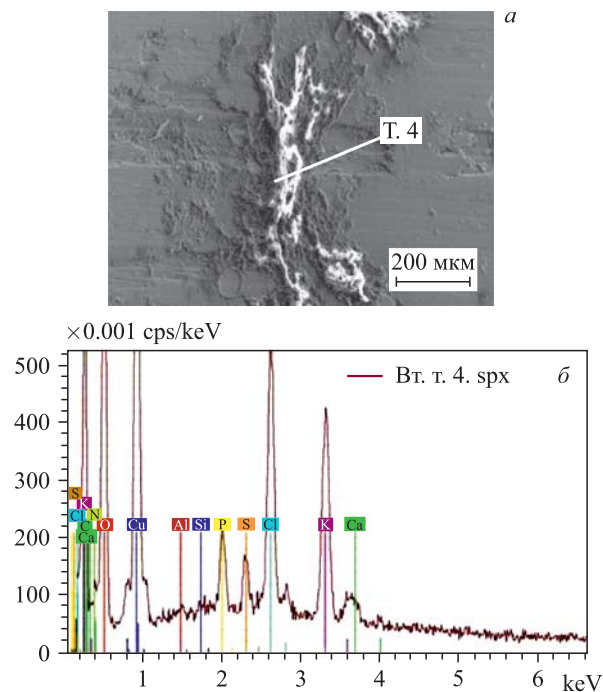


Рис. 5. РЭМ-изображение частицы на поверхности РК (а) и соответствующий СХРИ в т. 4 (б)

Таблица 3. Элементные составы, измеренные на рис. 4, а в т. 3 и на рис. 5, а в т. 4 и отвечающие СХРИ на рис. 4, б и 5, б соответственно

Элемент	Z	Серия	Рис. 4, а, т. 3		Рис. 5, а, т. 4	
			(C ± ΔC), вес. %	C, ат. %	(C ± ΔC), вес. %	C, ат. %
Углерод	6	K	34,24 ± 4,83	46,54	26,14 ± 3,89	39,58
Азот	7	K	8,11 ± 1,75	9,45	7,70 ± 1,74	9,99
Кислород	8	K	37,37 ± 5,16	38,13	34,62 ± 4,57	39,35
Натрий	11	K	0,23 ± 0,05	0,16	0,86 ± 0,09	0,69
Магний	12	K	0,06 ± 0,03	0,04	—	—
Алюминий	13	K	0,07 ± 0,03	0,04	0,05 ± 0,03	0,03
Кремний	14	K	0,10 ± 0,03	0,06	0,06 ± 0,03	0,04
Фосфор	15	K	0,23 ± 0,04	0,12	0,83 ± 0,06	0,48
Сера	16	K	0,28 ± 0,04	0,14	0,55 ± 0,05	0,31
Хлор	17	K	0,91 ± 0,06	0,42	2,90 ± 0,12	1,49
Калий	19	K	0,80 ± 0,06	0,33	2,58 ± 0,10	1,20
Кальций	20	K	0,17 ± 0,03	0,07	0,33 ± 0,04	0,15
Железо	26	K	0,14 ± 0,03	0,04	—	—
Медь	29	K	17,30 ± 0,49	4,44	23,37 ± 0,58	6,69

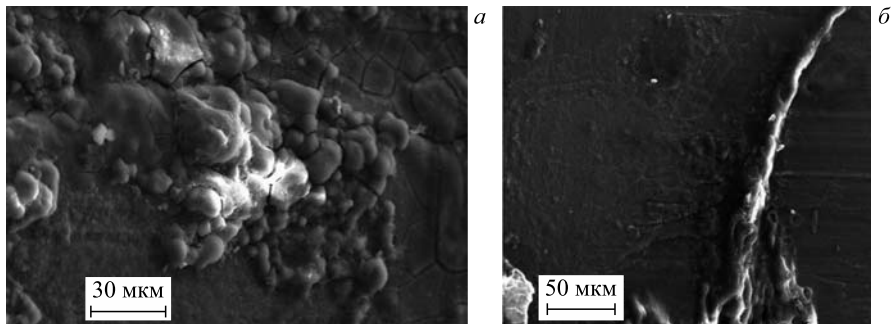


Рис. 6. РЭМ-изображения участков РК с рыхлой структурой (а) и протяженным объектом (б)

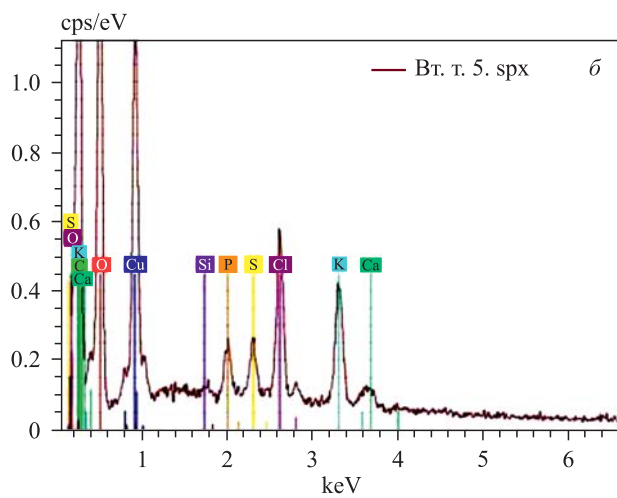
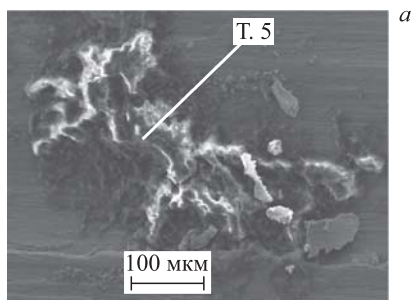


Рис. 7. РЭМ-изображение частицы сложной формы на поверхности РК (а) и соответствующий СХРИ в т. 5 (б)

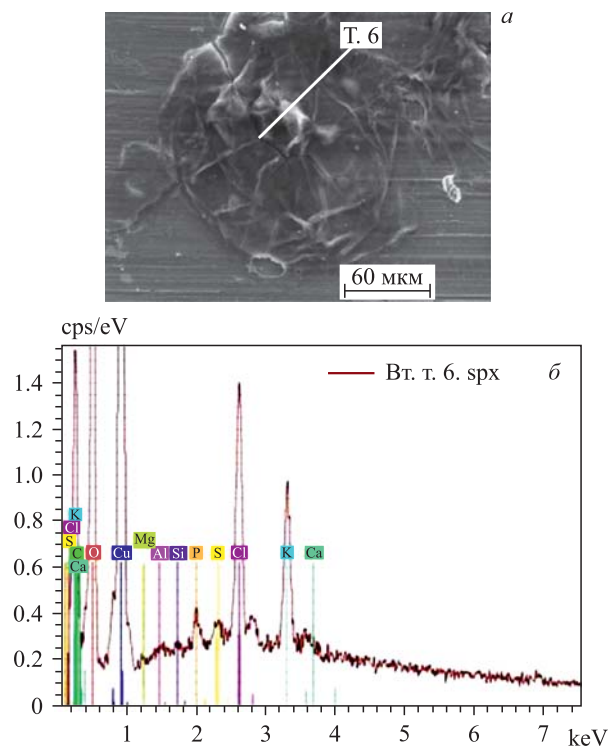


Рис. 8. РЭМ-изображение частицы на поверхности РК (а) и соответствующий СХРИ в т. 6 (б)

Таблица 4. Элементные составы, измеренные на рис. 7, а в т. 5 и на рис. 8, а в т. 6 и отвечающие СХРИ на рис. 7, б и 8, б соответственно

Элемент	Z	Серия	(C ± ΔC), вес. %		(C ± ΔC), вес. %	
			Рис. 7, а, т. 5		Рис. 8, а, т. 6	
Углерод	6	K	33,97 ± 4,51	46,34	15,44 ± 2,40	32,22
Кислород	8	K	46,29 ± 5,59	47,40	27,48 ± 3,31	43,06
Натрий	11	K	—	—	0,89 ± 0,09	0,97
Магний	12	K	0,09 ± 0,03	0,06	0,09 ± 0,04	0,10
Алюминий	13	K	0,02 ± 0,03	0,01	0,04 ± 0,03	0,03
Кремний	14	K	0,11 ± 0,03	0,06	0,05 ± 0,03	0,05
Фосфор	15	K	0,75 ± 0,06	0,40	0,31 ± 0,04	0,25
Сера	16	K	0,58 ± 0,05	0,30	0,23 ± 0,04	0,18
Хлор	17	K	2,05 ± 0,09	0,95	2,59 ± 0,11	1,83
Калий	19	K	1,71 ± 0,08	0,72	1,72 ± 0,08	1,10
Кальций	20	K	0,32 ± 0,04	0,13	0,11 ± 0,03	0,07
Железо	26	K	0,12 ± 0,03	0,03	—	—
Кобальт	27	K	—	—	0,10 ± 0,03	0,04
Медь	29	K	13,99 ± 0,36	3,61	50,95 ± 1,19	20,10

элементов. Такая фольга образовалась, скорее всего, при сбросе давления гелия из камеры HeHPC после облучения.

На рис. 6, *a, б* представлены два РЭМ-изображения поверхности РК с рыхлой структурой (*a*) и протяженным объектом в виде трубки (*б*).

На рис. 7, *a, б* представлено РЭМ-изображение поверхности РК со структурой сложной формы (*a*), в т. 5 которой сделан РМЗА, и СХРИ в т. 5 (*б*).

На рис. 8, *a, б* представлено РЭМ-изображение поверхности РК со структурой типа смятой пленки (*a*), в т. 6 которой сделан РМЗА, и СХРИ в т. 6 (*б*).

В табл. 4 представлены элементные составы, измеренные на рис. 7, *a* в т. 5 и на рис. 8, *б* в т. 6 на рис. 5, *a* и отвечающие СХРИ на рис. 7, *б* и 8, *б* соответственно.

Структура, изображенная на рис. 8, *a*, напоминает смятую тонкую фольгу сложного состава со значительной концентрацией хлора и калия. Эта структура, так же как и структура на рис. 6, *a*, растрескалась ввиду диэлектрических свойств при измерении РМЗА. Вся поверхность на рис. 6, *a* покрыта нанесенным слоем, скорее всего соединений углерода.

Из табл. 4 следует, что структура на рис. 7, *a* имеет значительную толщину, так как концентрация меди относительно низкая (3,61 ат. %), а фольга на рис. 8, *a* значительно тоньше — концентрация меди выше (20,10 ат. %).

На рис. 9 представлены три различных объекта, обнаруженные на стенке РК.

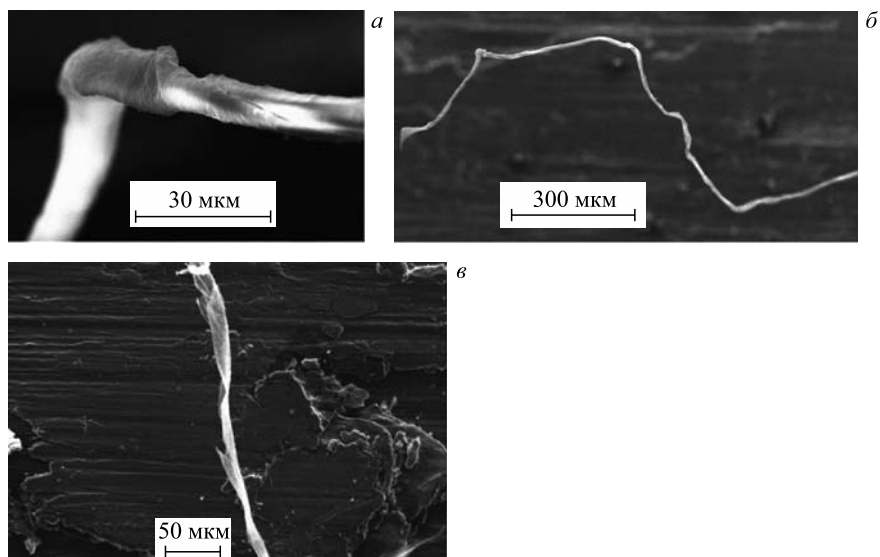


Рис. 9. Различные объекты, обнаруженные на стенке РК

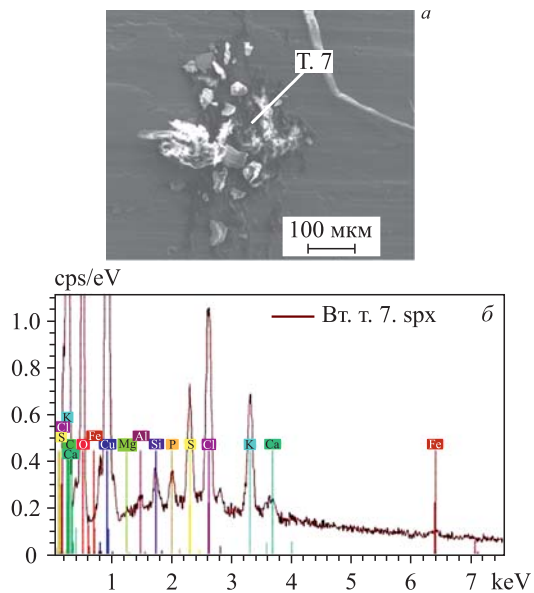


Рис. 10. РЭМ-изображение частицы сложной формы на поверхности РК (а) и соответствующий СХРИ в т. 7 (б)

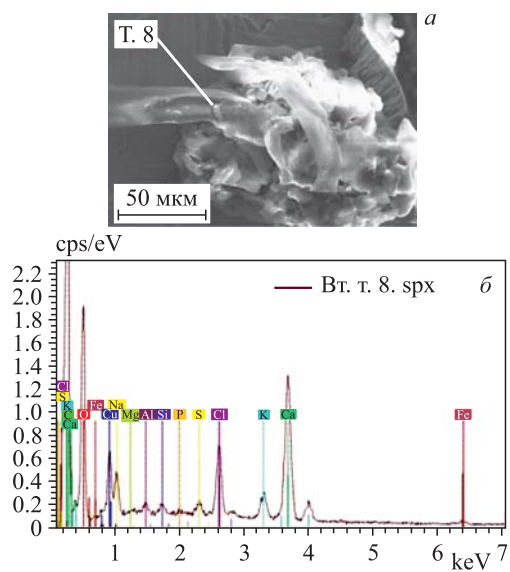


Рис. 11. РЭМ-изображение частицы сложной формы на поверхности РК (а) и соответствующий СХРИ в т. 8 (б)

Таблица 5. Элементные составы, измеренные на рис. 10, *a* в т. 7 и на рис. 11, *a* в т. 8 и отвечающие СХРИ на рис. 10, *б* и 11, *б* соответственно

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
			Рис. 10, <i>a</i> , т. 7		Рис. 11, <i>a</i> , т. 8	
Углерод	6	К	32,20 ± 3,68	49,03	36,00 ± 5,26	45,48
Азот	7	К	6,99 ± 1,23	9,13	7,27 ± 1,95	7,88
Кислород	8	К	26,36 ± 2,96	30,14	43,51 ± 6,69	41,28
Фтор	9	К	—	—	0,57 ± 0,29	0,45
Натрий	11	К	0,74 ± 0,07	0,59	1,46 ± 0,15	0,96
Магний	12	К	0,06 ± 0,03	0,04	0,09 ± 0,04	0,06
Алюминий	13	К	0,12 ± 0,03	0,08	0,15 ± 0,04	0,09
Кремний	14	К	0,27 ± 0,04	0,18	0,13 ± 0,03	0,07
Фосфор	15	К	0,38 ± 0,04	0,23	0,02 ± 0,03	0,01
Сера	16	К	1,14 ± 0,06	0,65	0,22 ± 0,04	0,10
Хлор	17	К	2,35 ± 0,09	1,21	1,51 ± 0,09	0,64
Калий	19	К	1,34 ± 0,06	0,63	0,63 ± 0,05	0,24
Кальций	20	К	0,20 ± 0,03	0,09	5,03 ± 0,20	1,93
Железо	26	К	0,11 ± 0,03	0,04	0,18 ± 0,04	0,05
Медь	29	К	27,40 ± 0,59	7,88	3,17 ± 0,14	0,76
Цинк	30	К	0,35 ± 0,04	0,10	0,06 ± 0,03	0,01

На рис. 10, *a* и 11, *a* представлены два объекта сложной формы, а СХРИ, измеренные в т. 7 и 8, приведены на рис. 10, *б* и 11, *б* соответственно. Концентрации элементов, оцененные по соответствующим СХРИ, приведены в табл. 5.

Из рис. 11 видно, что структура сложной формы представляет собой объект, состоящий из переплетения лент, полос и трубок.

На рис. 12 представлены две структуры на поверхности РК в виде трубки (*a*) и ленты (*б*) значительной длины.

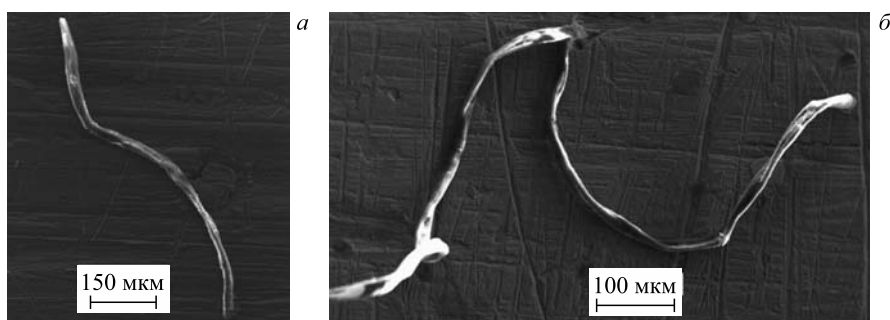


Рис. 12. РЭМ-изображение частиц на поверхности РК в виде трубки (*a*) и ленты (*б*)

Как видно из табл. 5, в объектах на рис. 10, *a* и 11, *a* присутствуют в значительных количествах углерод, кислород и азот (9,13 и 7,88 ат. %), а в объекте на рис. 11, *a* — также фтор (0,45 ат. %) и в существенно большем количестве кальций (5,03 вес. %).

Реакционная камера из бериллиевой бронзы (РК), вторая половинка из двух после распила. На рис. 13, *a* и 14, *a* приведены «россыпи» частиц на поверхности РК, в т. 9 и т. 10 которых был сделан РМЗА со спектрами на рис. 13, *б* и 14, *б*.

Вся поверхность на рис. 13, *a* покрыта тонким слоем, по-видимому, углерода.

В табл. 6 представлены соответствующие спектрам на рис. 13, *б* и 14, *б* концентрации элементов.

Удивительным фактом следует считать наличие в т. 9 на рис. 13, *a* значительного количества титана (26,83 вес. %, или 10,30 ат. %). Это отчетливо видно и из СХРИ, где присутствует мощный пик от титана. А в т. 10 на рис. 14, *a* обнаружено присутствие цинка также в большом количестве

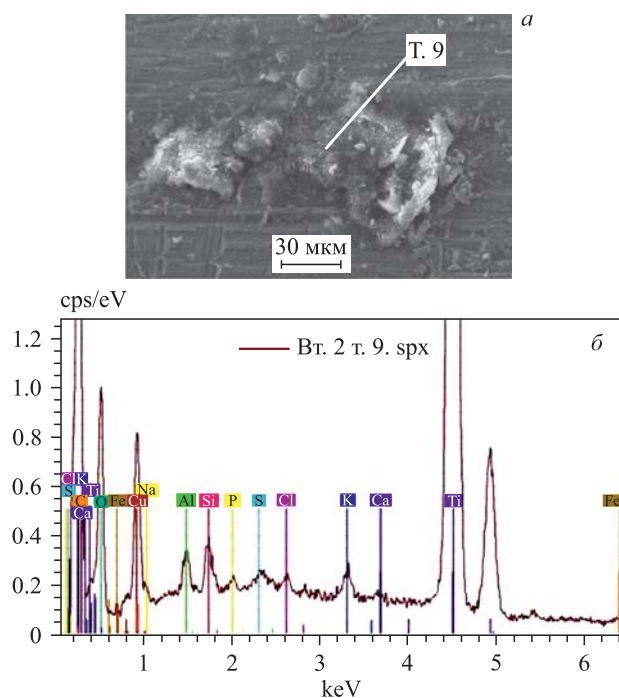


Рис. 13. РЭМ-изображение частицы сложной формы на поверхности РК (*a*) и соответствующий СХРИ в т. 9 (*б*)

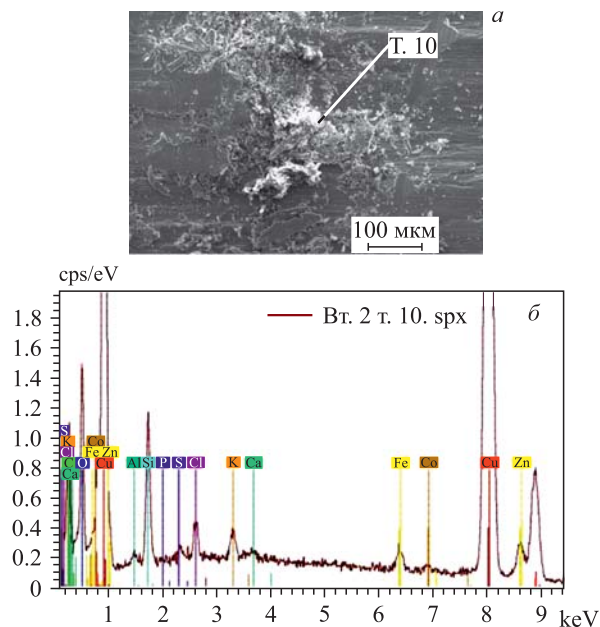


Рис. 14. РЭМ-изображение частицы сложной формы на поверхности РК (а) и соответствующий СХРИ в т. 10 (б)

Таблица 6. Элементные составы, измеренные на рис. 13, а в т. 9 и на рис. 14, а в т. 10 и отвечающие СХРИ на рис. 13, б и 14, б соответственно

Элемент	Z	Серия	Рис. 13, а, т. 9		Рис. 14, а, т. 10	
			(C ± ΔC), вес. %	C, ат. %	(C ± ΔC), вес. %	C, ат. %
Углерод	6	K	34,01 ± 3,91	52,03	8,82 ± 1,84	25,14
Кислород	8	K	29,73 ± 3,72	34,14	14,24 ± 2,11	30,47
Натрий	11	K	0,44 ± 0,06	0,35	—	—
Магний	12	K	0,02 ± 0,03	0,02	—	—
Алюминий	13	K	0,50 ± 0,05	0,34	0,57 ± 0,07	0,72
Кремний	14	K	0,42 ± 0,04	0,28	2,80 ± 0,16	3,42
Фосфор	15	K	0,13 ± 0,03	0,08	—	—
Сера	16	K	0,21 ± 0,03	0,12	0,15 ± 0,04	0,16
Хлор	17	K	0,15 ± 0,03	0,08	0,62 ± 0,05	0,60
Калий	19	K	0,30 ± 0,04	0,14	0,57 ± 0,05	0,50
Кальций	20	K	0,06 ± 0,03	0,03	0,19 ± 0,04	0,16
Титан	22	K	26,83 ± 0,64	10,30	—	—
Хром	24	K	0,19 ± 0,03	0,07	—	—
Железо	26	K	0,16 ± 0,03	0,05	0,60 ± 0,05	0,37
Кобальт	27	K	—	—	0,19 ± 0,04	0,11
Медь	29	K	6,84 ± 0,19	1,98	67,74 ± 1,72	36,51
Цинк	30	K	—	—	3,51 ± 0,14	1,84

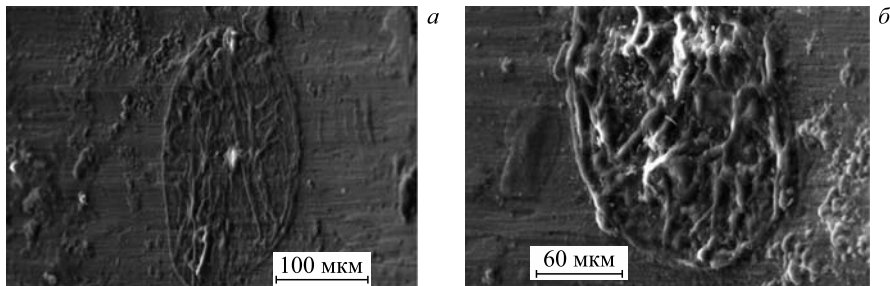


Рис. 15. РЭМ-изображения двух плоских объектов на поверхности РК малой толщины (3,51 и 1,84). Отметим здесь еще раз, что РК изготовлено из бериллиевой бронзы, где цинк не присутствует.

На рис. 15 приведены плоские тонкостенные объекты, состоящие из углерода, на которых даже трудно сделать РМЗА. Вся поверхность вокруг покрыта тонким слоем, видимо, углерода.

На рис. 16, *a* представлен объект, обнаруженный на поверхности резьбы с одного из краев РК, состоящий как бы из множества более мелких частиц,

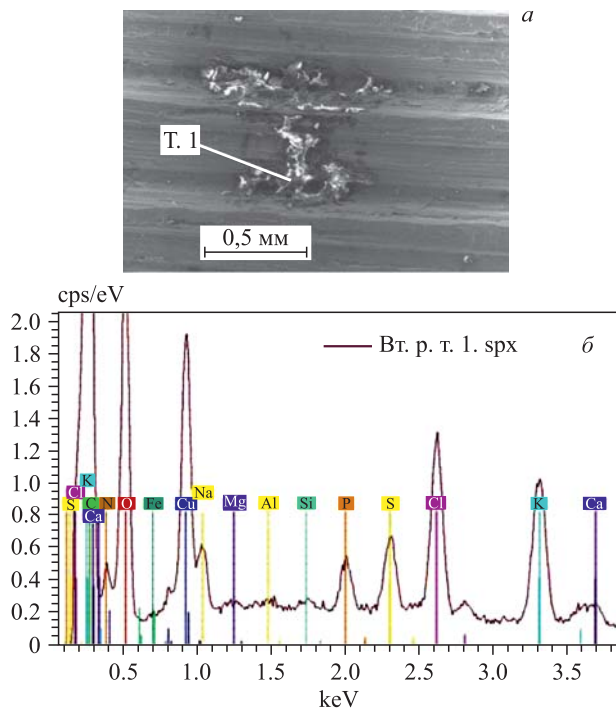


Рис. 16. РЭМ-изображение комплекса частиц на поверхности участка РК с резьбой (*a*) и СХРИ, полученный для т. 1 (*б*)

а на рис. 16, б СХРИ, сделанного в т. 1 РМЗА. Шаг резьбы отчетливо виден на рис. 16, а.

На рис. 17, а приведен протяженный объект на поверхности РК также в месте резьбового соединения с выделенной т. 2, в которой проведен РМЗА со спектром на рис. 17, б. Для сравнения на рис. 17, б спектры на рис. 16, б и 17, б наложены друг на друга. Как видно, эти спектры совершенно подобны.

Как хорошо видно на рис. 17, вся поверхность покрыта тонким слоем углерода, который в отдельных местах потрескался.

В табл. 7 представлены соответствующие спектрам на рис. 16, б и 17, б концентрации элементов.

Из табл. 7 видно, что в т. 1 и т. 2 также присутствует азот (9,60 и 4,74 ат. %), наряду со значительным количеством углерода (49,99 и 49,78 ат. %) и кислорода (35,16 и 40,14 ат. %) соответственно. Стоит отметить также натрий (0,74 и 1,16 ат. %), хлор (1,97 и 0,82 вес. %) и калий (2,10 и 2,46 вес. %).

На рис. 18, а представлено РЭМ-изображение участка поверхности РК, покрытого сложными наслоениями, а на рис. 18, б — СХРИ, измеренный в результате РМЗА в т. 11.

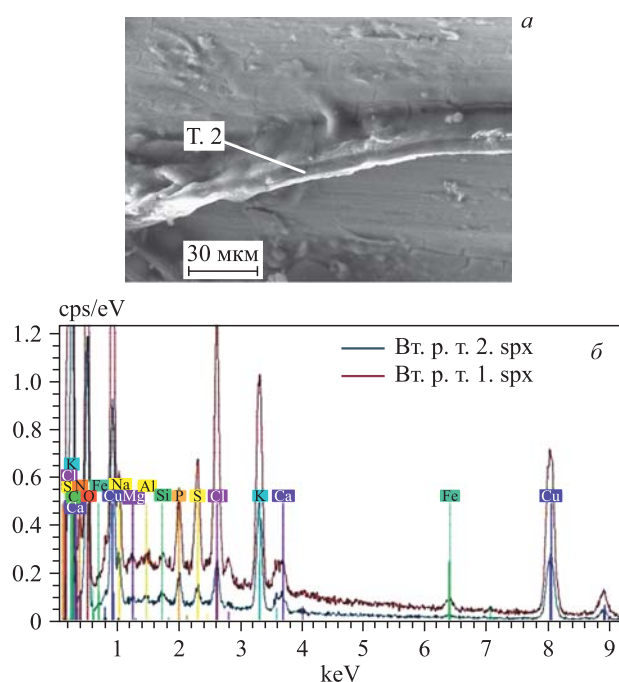


Рис. 17. РЭМ-изображение комплекса частиц на поверхности участка РК с резьбой (а) и СХРИ, полученный для т. 2 (б)

Таблица 7. Концентрации элементов на рис. 16, *a* в т. 1 и на рис. 17, *a* в т. 2, соответствующие СХРИ на рис. 16, *б* и 17, *б*

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
			Рис. 16, <i>a</i> , т. 1		Рис. 17, <i>a</i> , т. 2	
Углерод	6	K	39,19 ± 5,32	49,99	38,88 ± 5,73	49,78
Азот	7	K	8,78 ± 1,81	9,60	4,32 ± 1,36	4,74
Кислород	8	K	36,72 ± 5,05	35,16	41,75 ± 6,10	40,14
Натрий	11	K	1,10 ± 0,11	0,74	1,74 ± 0,16	1,16
Магний	12	K	0,09 ± 0,03	0,06	0,17 ± 0,04	0,10
Алюминий	13	K	0,02 ± 0,03	0,01	0,14 ± 0,04	0,08
Кремний	14	K	0,07 ± 0,03	0,04	0,18 ± 0,04	0,10
Фосфор	15	K	0,46 ± 0,05	0,23	0,49 ± 0,05	0,24
Сера	16	K	0,70 ± 0,05	0,33	0,30 ± 0,04	0,15
Хлор	17	K	1,97 ± 0,10	0,85	0,82 ± 0,06	0,36
Калий	19	K	2,10 ± 0,10	0,82	2,46 ± 0,11	0,97
Кальций	20	K	0,32 ± 0,04	0,12	0,39 ± 0,04	0,15
Железо	26	K	0,24 ± 0,04	0,07	0,16 ± 0,04	0,04
Медь	29	K	8,25 ± 0,26	1,99	8,19 ± 0,27	1,98

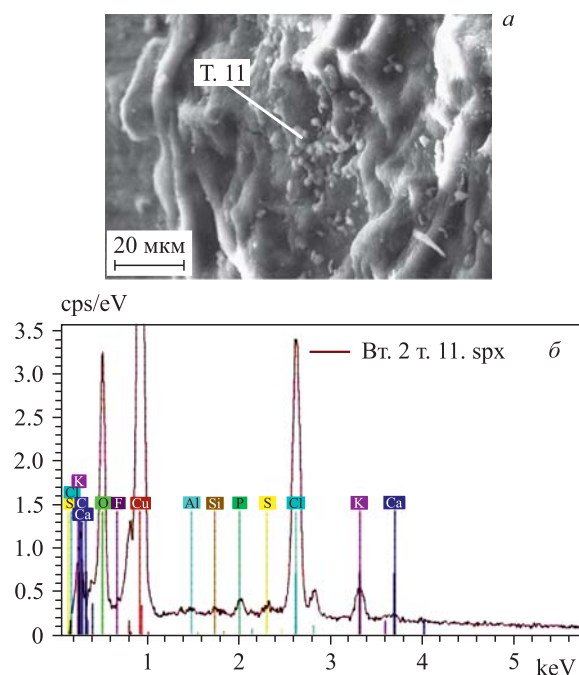


Рис. 18. РЭМ-изображение участка поверхности РК, покрытого наслоениями (*a*) и СХРИ, измеренный в т. 11 (*б*)

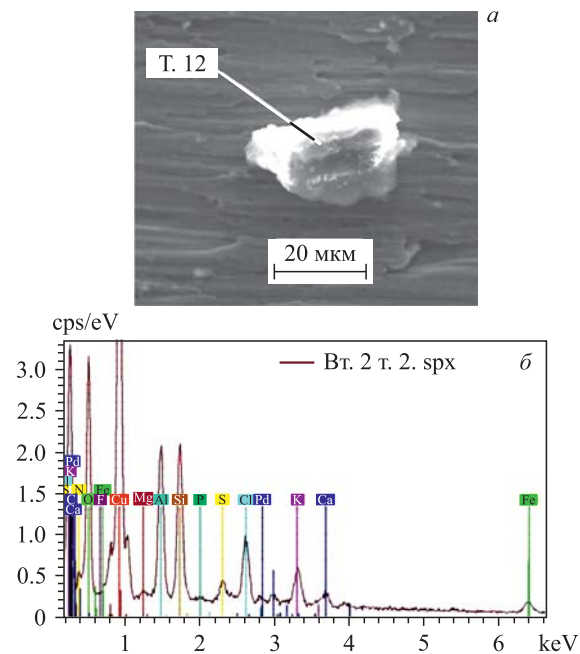


Рис. 19. РЭМ-изображение отдельной частицы на поверхности РК (а) и СХРИ, полученный для т. 12 (б)

Таблица 8. Концентрации элементов на рис. 18, а в т. 11 и на рис. 19, а в т. 12, соответствующие СХРИ на рис. 18, б и 19, б

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %		$(C \pm \Delta C)$, вес. %	
			Рис. 18, а, т. 11	C, ат. %	Рис. 19, а, т. 12	C, ат. %
Углерод	6	K	$8,67 \pm 2,05$	19,24	$32,81 \pm 4,94$	47,88
Кислород	8	K	$34,40 \pm 4,77$	37,68	$34,40 \pm 4,77$	37,68
Фтор	9	K	$0,33 \pm 0,19$	0,47	—	—
Натрий	11	K	—	—	$3,63 \pm 0,29$	2,77
Магний	12	K	—	—	$0,71 \pm 0,08$	0,51
Алюминий	13	K	$0,08 \pm 0,03$	0,08	$4,36 \pm 0,25$	2,83
Кремний	14	K	$0,09 \pm 0,03$	0,09	$2,87 \pm 0,16$	1,79
Фосфор	15	K	$0,25 \pm 0,04$	0,22	$0,12 \pm 0,03$	0,07
Сера	16	K	$0,13 \pm 0,03$	0,10	$0,45 \pm 0,05$	0,25
Хлор	17	K	$6,37 \pm 0,26$	4,79	$1,54 \pm 0,08$	0,76
Калий	19	K	$0,79 \pm 0,06$	0,54	$0,90 \pm 0,06$	0,40
Кальций	20	K	$0,16 \pm 0,04$	0,11	$0,39 \pm 0,04$	0,17
Хром	24	K	—	—	$0,06 \pm 0,03$	0,02
Железо	26	K	$0,07 \pm 0,03$	0,03	$0,62 \pm 0,05$	0,19
Кобальт	27	K	$0,13 \pm 0,04$	0,06	—	—
Медь	29	K	$51,23 \pm 1,42$	21,48	$16,74 \pm 0,48$	4,62
Серебро	47	K	—	—	$0,41 \pm 0,04$	0,07

На рис. 19, *а* представлено РЭМ-изображение отдельной частицы с размерами примерно 30 на 20 мкм, в т. 12 которой сделан РМЗА со спектром на рис. 19, *б*.

В табл. 8 представлены концентрации элементов, измеренные РМЗА в тт. 11 и 12.

На рис. 20 представлено РЭМ-изображение встречающихся структур типа протяженных тонких нитей, а на рис. 21, *а* приведено РЭМ-изображение двух других нитей, в т. 13 которых сделан РМЗА со спектром на рис. 21, *б*.

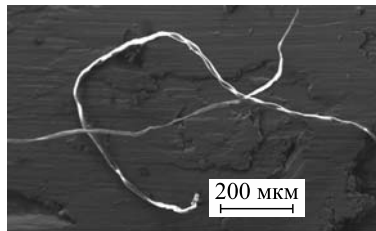


Рис. 20. РЭМ-изображение двух пересекающихся протяженных нитей

На рис. 22, *а* приведено РЭМ-изображение участка поверхности на резьбе РК, покрытого, как и на рис. 18, *а*, наслоениями в виде смятой пленки. В т. 13 был сделан РМЗА, СХРИ которого представлен на рис. 22, *б*.

В табл. 9 приведен элементный состав в т. 13 на рис. 21, *а* и т. 14 на рис. 22, *а*.

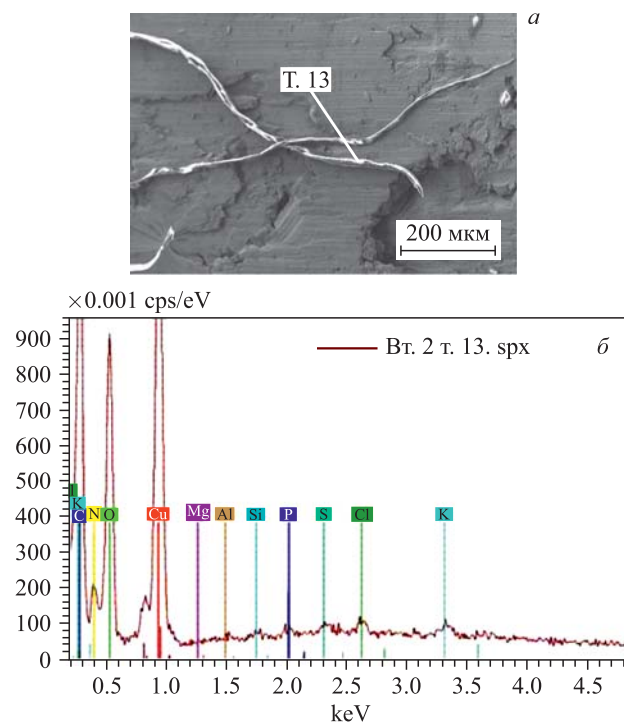


Рис. 21. РЭМ-изображение двух пересекающихся протяженных нитей (*а*), в т. 13 сделан РМЗА со спектром (*б*)

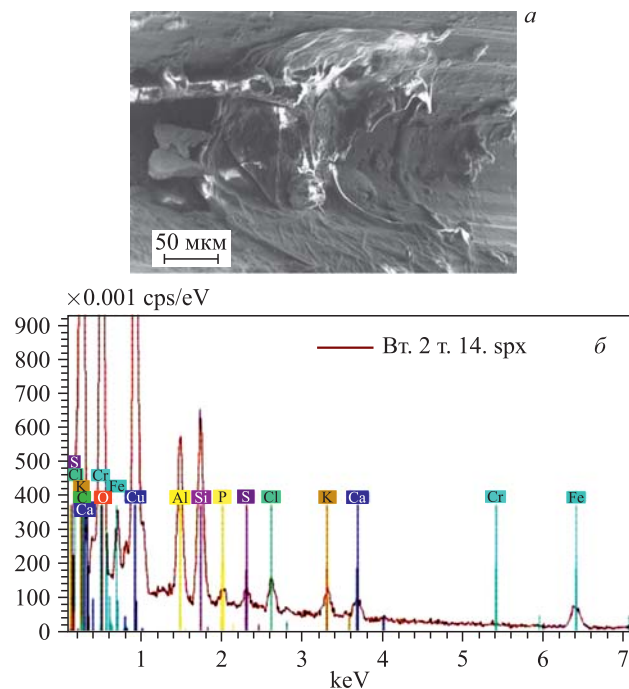


Рис. 22. РЭМ-изображение участка поверхности на резьбе РК, покрытого наслоениями (а), и СХРИ, полученный для т. 14 (б)

Таблица 9. Концентрации элементов на рис. 21, а в т. 13 и на рис. 22, а в т. 14, соответствующие СХРИ на рис. 21, б и 22, б

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %		$(C \pm \Delta C)$, вес. %	
			Рис. 21, а, т. 13		Рис. 22, а, т. 14	
Углерод	6	K	27,77 ± 3,94	44,28	25,58 ± 3,49	42,44
Азот	7	K	10,89 ± 2,02	14,89	5,16 ± 1,01	7,34
Кислород	8	K	23,97 ± 3,41	28,69	26,22 ± 3,43	32,65
Натрий	11	K	0,36 ± 0,07	0,30	—	—
Магний	12	K	0,04 ± 0,04	0,03	0,31 ± 0,05	0,25
Алюминий	13	K	0,11 ± 0,04	0,08	2,87 ± 0,17	2,12
Кремний	14	K	0,31 ± 0,05	0,21	3,95 ± 0,20	2,80
Фосфор	15	K	0,36 ± 0,05	0,22	0,30 ± 0,04	0,20
Сера	16	K	0,42 ± 0,05	0,25	0,48 ± 0,05	0,30
Хлор	17	K	0,56 ± 0,06	0,30	0,89 ± 0,07	0,50
Калий	19	K	0,65 ± 0,06	0,32	0,89 ± 0,07	0,46
Кальций	20	K	—	—	0,87 ± 0,07	0,43
Железо	26	K	—	—	7,51 ± 0,40	2,68
Медь	29	K	34,55 ± 4,53	10,41	24,95 ± 3,25	7,83

Как видно из табл. 9, в тт. 13 и 14 присутствует много азота — по 14,89 и 7,34 ат. %. В т. 14 на рис. 22, *a* присутствуют также значительные количества алюминия (2,12 ат. %) и кремния (2,80 ат. %).

Сборник продуктов (СБ) ядерных и химических реакций из бериллиевой бронзы. На рис. 23, *a* представлено РЭМ-изображение внешнего вида

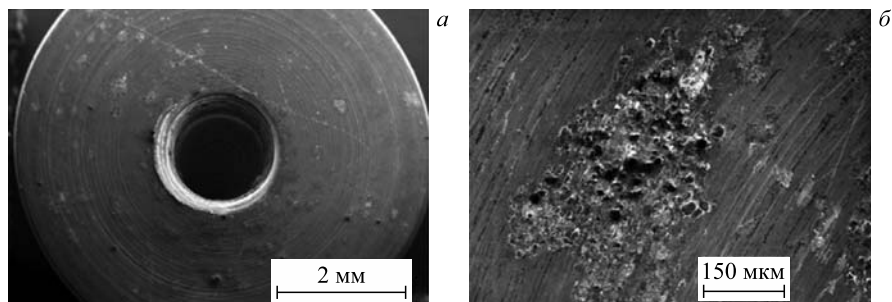


Рис. 23. РЭМ-изображение внешнего вида СБ (*a*) и РЭМ-изображение наслоения (*б*)

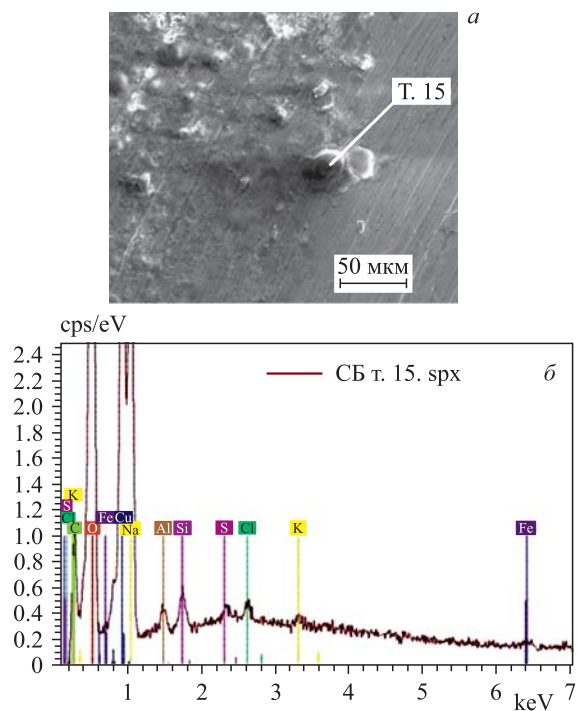


Рис. 24. РЭМ-изображение участка поверхности СБ с наслоениями (*a*) и СХРИ в т. 15 (*б*)

сборника с углублением в центре, покрытого в отдельных местах наслоениями, РЭМ-изображение одного из которых и приведено на рис. 23, б.

На рис. 24 представлено РЭМ-изображение участка поверхности СБ с наслоениями (а), в т. 15 которого проведен РМЗА со спектром (б).

На рис. 25 представлено два РЭМ-изображения участков на внутренней стенке центрального заглибления СБ с налипшими на ней кусками.

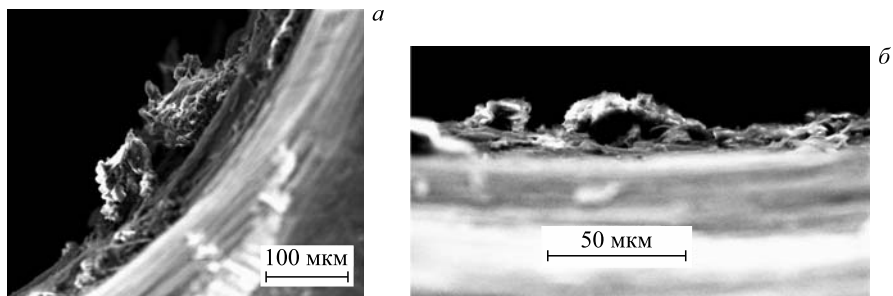


Рис. 25. РЭМ-изображение участка внутренней стенки центрального заглибления СБ

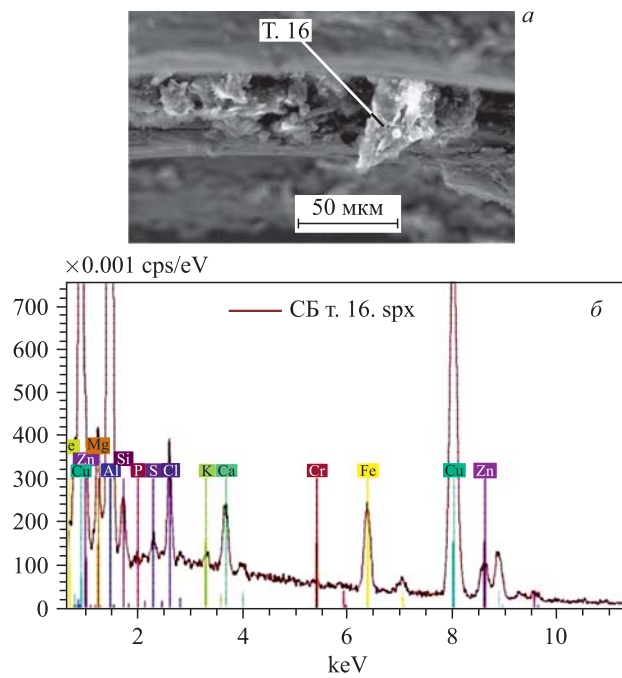


Рис. 26. РЭМ-изображение внутренней поверхности заглибления на СБ с частицей (а) и СХРИ, полученный для т. 16 (б)

Таблица 10. Концентрации элементов на рис.24,а в т.15 и на рис.26,а в т.16, соответствующие СХРИ на рис.24,б и 26,б

Элемент	Z	Серия	(C ± ΔC), вес. %	C, ат. %	(C ± ΔC), вес. %	C, ат. %
			Рис. 24, а, т. 15		Рис. 26, а, т. 16	
Углерод	6	К	12,25 ± 1,92	21,22	30,41 ± 4,30	46,67
Азот	7	К	—	—	5,32 ± 1,22	7,00
Кислород	8	К	43,68 ± 4,88	56,80	23,79 ± 3,20	27,41
Натрий	11	К	12,31 ± 0,80	11,15	0,17 ± 0,04	0,14
Магний	12	К	—	—	0,76 ± 0,07	0,58
Алюминий	13	К	0,33 ± 0,05	0,26	15,27 ± 0,73	10,43
Кремний	14	К	0,39 ± 0,05	0,29	0,44 ± 0,05	0,29
Фосфор	15	К	—	—	0,09 ± 0,03	0,05
Сера	16	К	0,12 ± 0,03	0,08	0,23 ± 0,04	0,13
Хлор	17	К	0,20 ± 0,03	0,12	0,92 ± 0,06	0,48
Калий	19	К	0,13 ± 0,03	0,07	0,12 ± 0,03	0,06
Кальций	20	К	—	—	1,05 ± 0,06	0,48
Хром	24	К	—	—	0,05 ± 0,03	0,02
Железо	26	К	0,14 ± 0,03	0,05	1,98 ± 0,08	0,65
Медь	29	К	30,45 ± 0,75	9,97	17,27 ± 0,45	5,01
Цинк	30	К	—	—	2,11 ± 0,09	0,60

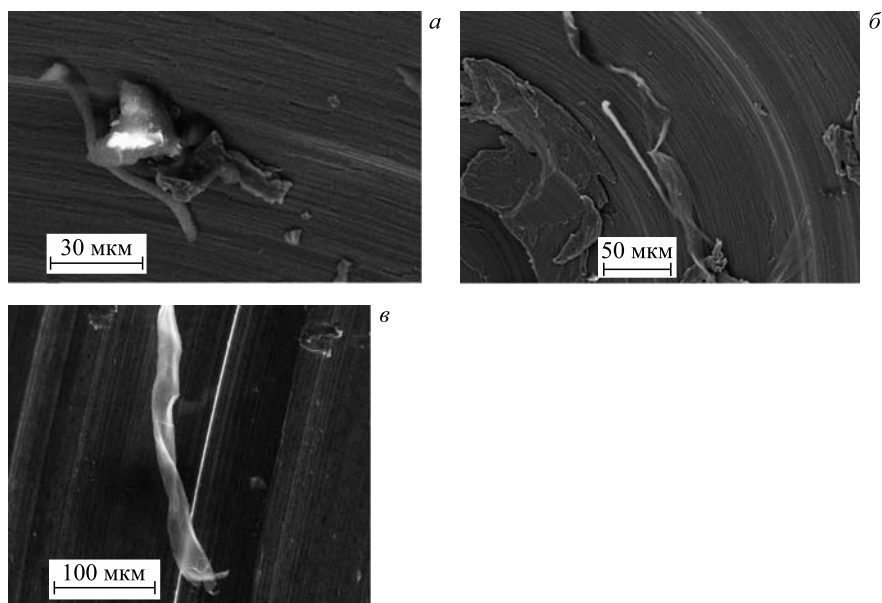


Рис. 27. Различные объекты, обнаруженные на стенке РК

На рис. 26 представлено увеличенное изображение одной из таких прилипших частиц (*a*), в т. 16 которой сделан РМЗА с СХРИ (*б*).

В табл. 10 представлены элементные составы в т. 15 на рис. 24, *a* и т. 16 на рис. 26, *a*.

Как видно из табл. 10, в частичке в т. 15 на поверхности СБ присутствует значительное количество натрия (11,15 ат. %) при высокой концентрации кислорода, а в частице на стенке заглубления в т. 16 при высокой концентрации углерода (46,67 ат. %) присутствует много алюминия (10,43 ат. %) и цинка (2,11 вес. %).

На рис. 27 представлены структуры, также обнаруженные на поверхности СБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Результаты по изучению структур и их элементного состава на всех внутренних поверхностях элементов HeHPC, имевших контакт с гелием при давлении 3 кбар, показывают, что в целом обнаруженные изменения соответствуют данным, представленным в работе [2].

Следует отметить, что, в отличие от [1, 3], несмотря на те же условия облучения по току электронного пучка и времени облучения, в данном эксперименте относительно крупные углеродные фольги найдены не были, хотя поверхность внутри реакционной камеры и покрыта углеродным слоем с наличием относительно крупных фольг (см. рис. 4, *a*, 8, *a*, 15, *a* и 22, *a*).

Особо отметим, что по результатам данной работы можно сделать вывод о том, что более значительные эффекты были достигнуты при давлении гелия 1,1 кбар в HeHPC [1, 2], а не при значительно более высоком давлении 3,05 кбар.

Исследования, проведенные ранее с использованием DHPC при давлении 1,2 кбар с дейтерием и при давлении 3,0 кбар с палладиевым стержнем внутри (см. [4–6]), показывают, что, по-видимому, давление для наиболее эффективного протекания реакций не требуется чрезмерно высокое, а существует оптимальное. Хотя в данном случае время облучения отличалось в три раза.

Такой же вывод можно сделать из сравнения данных, полученных при облучении HPC с палладием при давлении 0,5 кбар [7] и 2,5 кбар [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Свойства объектов на основе углерода, синтезированных в ядерных реакциях в гелии при давлении 1,1 кбар под действием облучения тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2014-38. Дубна, 2014. 22 стр.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).

2. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Ядерные реакции, синтез химических элементов и новых структур в плотном гелии при давлении 1,1 кбар под действием облучения тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ P15-2014-50. Дубна, 2014. 42 стр.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).
3. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Properties of Carbon-Based Structures Synthesized through Nuclear Reactions in Helium at 1.1 kbar Pressure under Irradiation with Braking γ -Rays of 10 MeV Threshold Energy // *Eur. Phys. Lett. (EPL)*. 2014 (in press).
4. *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; Препринт ОИЯИ P15-2013-15. Дубна, 2013. 39 стр.
5. *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; Препринт ОИЯИ P15-2013-20. Дубна, 2013. 32 стр.
6. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure, and Technological Applications. Dubna: JINR, 2013. 320 p.
7. 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 P15-2014-6. Дубна, 2014. 34 стр.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).
8. 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 P15-2014-7. Дубна, 2014. 24 стр.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).

Получено 18 ноября 2014 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 16.01.2015.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,69. Уч.-изд. л. 2,08. Тираж 225 экз. Заказ № 58445.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/