

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ОБЛУЧЕНИЮ
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ И МЕДИ
 γ -КВАНТАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 23 МэВ
В АТМОСФЕРЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ДЕЙТЕРИЯ
ПРИ ДАВЛЕНИИ 2 кбар**

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

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

Образцы ряда металлов были размещены последовательно по длине в камере высокого давления дейтерия «пальчикового типа» (DHPC-FT). Образцы представляли собой два стержня из алюминия, стержень из меди, два слитка сплава YМn₂ и стержень из нержавеющей стали. Давление молекулярного дейтерия в камере DHPC-FT составляло 2 кбар. Облучение образцов было проведено тормозными γ -квантами с граничной энергией 23 МэВ. После облучения все образцы были исследованы на сканирующих электронных микроскопах (СЭМ) с рентгеновским микроэлементным зондовым анализом (РМЗА). Обнаружены значительные изменения структуры поверхностей и элементного состава всех измеренных образцов: меди, алюминия, сплава YМn₂ и нержавеющей стали. Все полученные необычные результаты детально проанализированы, и проведено сравнение с предыдущими данными.

Metal samples were placed in a deuterium high pressure chamber of «finger type» (DHPC-FT) along its length. The samples were two aluminum rods, a copper rod, two pieces of homogeneous alloy YМn₂ and stainless steel wire. The deuterium molecular pressure inside the DHPC-FT was about 2 kbar. Irradiation of the samples was carried out by braking γ -quanta with a threshold energy of 23 MeV. All the samples were studied using scanning electronic microscope (SEM) with roentgen microelement probe analysis (RMPA). Significant changes in the surface structures and element compositions were observed in all the measured samples: copper, aluminum, YМn₂ alloy and stainless steel. All of the obtained unusual results were analyzed in detail and compared with previous ones.

PACS: 25.20.-x

ВВЕДЕНИЕ

В серии предыдущих статей были представлены результаты по изменению химического состава поверхностей компонент, входящих в камеру высокого давления дейтерия (DHPC) с Pd-цилиндром внутри (см. рис. 1 в [1–5]), при давлении дейтерия около 3 кбар

¹E-mail: didyk@jinr.ru

²E-mail: roland.wisniewski@gmail.com

с образованием радиационно-синтезированной структуры из химических относительно легких элементов (${}^6\text{C}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{22}\text{Ti}$, ${}^{29}\text{Cu}$, ${}^{30}\text{Zn}$), а также и более тяжелых элементов в меньших количествах, таких как ${}^{47}\text{Ag}$, ${}^{73}\text{Ta}$, ${}^{74}\text{W}$, ${}^{78}\text{Pt}$, ${}^{82}\text{Pb}$, образовавшихся в результате ядерных реакций, инициированных γ -квантами с энергией 9 МэВ в насыщенном дейтерием палладиевом цилиндре. В серии следующих исследований была также использована ДНРС также с палладиевым цилиндром внутри при давлении дейтерия около 1,2 кбар при облучении γ -квантами с энергией 11 МэВ при более чем в два раза длительной экспозиции [6, 7]. В этом случае вся внутренняя поверхность ДНРС оказалась покрытой преимущественно свинцом, но опять же и с образованием ${}^{47}\text{Ag}$, ${}^{78}\text{Pt}$, ${}^{79}\text{Au}$. В серии следующих исследований с использованием камеры высокого давления дейтерия удлиненного (пальчикового типа) ДНРС-FT при давлении молекулярного дейтерия примерно 2 кбар были изучены следующие составы: палладий и рений [8], нержавеющая сталь и ванадий [9] при облучении γ -квантами с энергией 23 МэВ. Этот диапазон энергий γ -квантов уже соответствует сечениям ${}^A_Z\text{N}(\gamma, n){}^{A-1}_Z\text{N}$ реакций, характерным для гигантского дипольного резонанса [10]. Для случая облучения ДНРС с ${}^{46}\text{Pd}$ и ${}^{75}\text{Re}$ внутри был также обнаружен широкий спектр продуктов ядерных реакций с выбросами из поверхностей Pd и Re, напоминающими «застывшие в полете протуберанцы» с образованием на поверхности палладия в районах образовавшихся трещин и разломов, привнесенных от находящихся вблизи образцов рения монокристаллов оксида рения. Весьма значительные изменения произошли и в камере ДНРС-FT с находящимися внутри нержавеющей сталью и ванадием, на поверхности которых также обнаружен сильно измененный химический состав. А образовавшиеся трещины и разломы совместно с сильно окисленной поверхностью ванадия позволяют сделать вывод о высокой температуре за счет происходящих ядерных реакций. Полученные в работах [1–9] результаты позволили авторам запатентовать новый способ получения энергии, представленный в патенте [11].

На основе обнаруженных изменений концентраций химических элементов была предложена феноменологическая модель ядерных реакций [12] с использованием реакции типа реакции Оппенгеймера [13] и им сопутствующих в капельной модели ядра при изменении вращательного момента [14–16].

Данная работа является продолжением экспериментов, начатых в работах [8, 9], и следующего эксперимента с применением ДНРС-FT с целью выяснения зависимостей эффектов для различных материалов от величины давления дейтерия в камере, влияния интенсивности потока γ -квантов и их энергии, описание которых начато в работе [17].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Образцы из Al (99,8%), Cu (99,9%) в виде кусочков проволоки, два необработанных кусочка гомогенного сплава YMn_2 и кусок нержавеющей проволоки с параметрами, представленными в табл. 1, были помещены внутрь камеры высокого давления дейтерия удлиненного типа ДНРС-FT (deuterium high pressure chamber of finger's type), схематически представленной на рис. 1.

Размещение внутри ДНРС-FT разнородных материалов естественно затрудняет последующий анализ процессов, которые имели место. Но установить общие закономерности и тенденции поведения материалов в плотном молекулярном дейтерии при облучении γ -квантами все же возможно.

Таблица 1. Параметры и расположение образцов в ДНРС-FT при облучении

Номер образца	Материал	L , см	D , см	m , г
1	Al, $\rho = 2,69 \text{ г/см}^3$	1,52	0,205	0,1180
2	Слиток, Y Mn_2	—	—	0,0452
3	Al, $\rho = 2,69 \text{ г/см}^3$	1,15	0,205	0,0877
4	Слиток, Y Mn_2	—	—	0,0229
5	Cu, $\rho = 8,96 \text{ г/см}^3$	0,92	0,205	0,2413
6	Нержавеющая сталь, $\rho = 7,9 \text{ г/см}^3$	5,56	0,05	0,0851
7	Дейтерий ($\approx 2 \text{ кбар}$)			

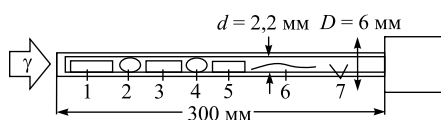


Рис. 1. Схема камеры ДНРС-FT для облучения материалов. 1–6 — номера образцов; 7 — дейтерий (см. табл. 1)

Давление молекулярного газообразного дейтерия в ДНРС-FT составляло примерно 2 кбар. Облучение всех образцов было проведено на электронном ускорителе МТ-25 электронами с энергией 23,5 МэВ при среднем токе пучка электронов 11–12 мкА в течение 19,5 ч (т. е. полное время облучения составило $7,02 \cdot 10^4 \text{ с}$).

Толщина W тормозной мишени составляла 3 мм, поглотитель из Al имел толщину 25 мм, следовательно, расстояние от первого образца из Al-проволоки с учетом толщины входного окна $\sim 7 \text{ мм}$, состоящего из нержавеющей стали, было равным $L_1 = 35 \text{ мм}$. Диаметр электронного пучка на вольфрамовой фольге составлял примерно 8 мм, угловая расходимость потока тормозных γ -квантов примерно 8° на 0,7 высоты распределения [1].

Достоинства и недостатки расположения образцов в ДНРС-FT описаны в [8, 9], в частности, одним из достоинств можно считать следующее: при расположении образцов вдоль оси камеры можно за одно облучение получить различные плотности потоков γ -квантов и доз облучения. Методика расчета потока γ -квантов в камеру ДНРС-FT и через образцы представлена в [1–4].

Необходимо отметить, что в отличие от первого эксперимента, который был детально описан в [1–7], а использованная ДНРС-FT камера запатентована в [10], в данном эксперименте стенки камеры, созданной по иному проекту, состоят из нержавеющей стали типа ОХ18Н10 с тем, чтобы исключить такие химические элементы, которые присутствовали в первом эксперименте, как медь и цинк.

1.1. Экспериментальные результаты в проволоке из нержавеющей стали (см. рис. 1, образец № 6). На рис. 2 представлено СЭМ-изображение поверхности нержавеющей стали (НС) после воздействия γ -квантов с энергией 23 МэВ, а в табл. 2 элементный состав (с концентрацией C), зарегистрированный практически со всей поверхности фотографии рентгеновского микроэлементного зондового анализа (РМЗА).

Обозначения $\text{SS}_{\text{Cr,Fe,Ni}}$ (ат. %) в табл. 2 и во всех последующих таблицах введены для относительных концентрации основных элементов, которые присутствуют в нержавеющей

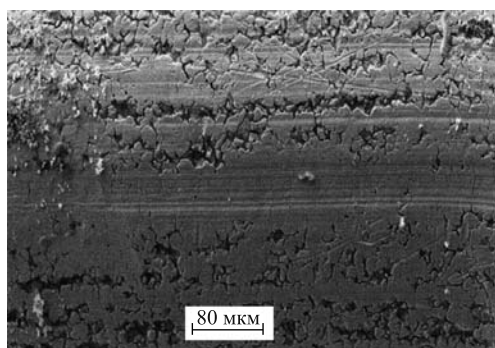


Рис. 2. СЭМ-изображение поверхности облученной НС, с которой сделан РМЗА

Таблица 2. Элементный состав НС, соответствующий рис. 2

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %	SS, ат. %
⁶ C	К	8,30	28,63	—
⁸ O	К	1,27	3,29	—
¹³ Al	К	0,26	0,41	—
¹⁴ Si	К	0,31	0,46	—
²⁴ Cr	К	16,53	13,17	19,93
²⁵ Mn	К	1,17	0,88	—
²⁶ Fe	К	62,75	46,55	70,43
²⁸ Ni	К	9,03	6,37	9,64
²⁹ Cu	К	0,37	0,24	—

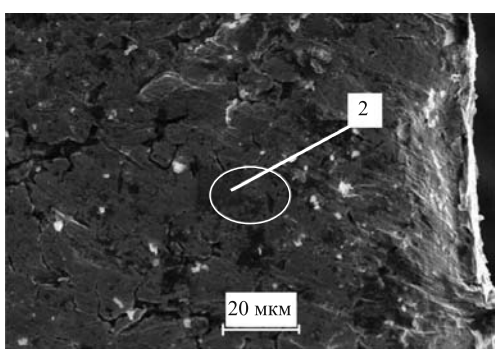


Рис. 3. СЭМ-изображение поверхности облученной НС

Таблица 3. Элементный состав НС, соответствующий рис. 3

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %	SS, ат. %
¹³ Al	К	0,27 ± 0,05	0,56	—
¹⁴ Si	К	0,21 ± 0,04	0,41	—
²⁴ Cr	К	17,73 ± 0,50	18,80	18,98
²⁶ Fe	К	71,06 ± 1,85	70,15	70,84
²⁸ Ni	К	10,73 ± 0,36	10,08	10,18

щей стали. SS отражены в таблицах с использованием соотношения:

$$SS_{Cr,Fe,Ni}(\text{ат. \%}) = 100\% \frac{C_{Cr,Fe,Ni}(\text{ат. \%})}{C_{Cr}(\text{ат. \%}) + C_{Fe}(\text{ат. \%}) + C_{Ni}(\text{ат. \%})}$$

На рис. 3 представлено изображение другого участка поверхности НС, а в табл. 3 приведен элементный состав, полученный со всей площади рисунка.

На рис. 4 представлено изображение участка поверхности нержавеющей стали (НС), а в табл. 4 элементный состав, измеренный РМЗА на площади 3 и в двух точках (4, 5).

На рис. 5 дано СЭМ-изображение участка поверхности НС, а в табл. 5 представлены элементные составы, измеренные РМЗА на отмеченных на рис. 4 площадях 6 и 7.

На рис. 6 дан характеристический спектр рентгеновского излучения, снятый с площади 7 на рис. 5, который подтверждает существование элементов, представленных в табл. 5.

На рис. 7 представлено СЭМ-изображение торцевого участка поверхности НС (одного из краев), а в табл. 6 элементный состав, измеренный в т. 8.

На рис. 8 представлен характеристический спектр рентгеновского излучения, снятый в т. 8 на рис. 7.

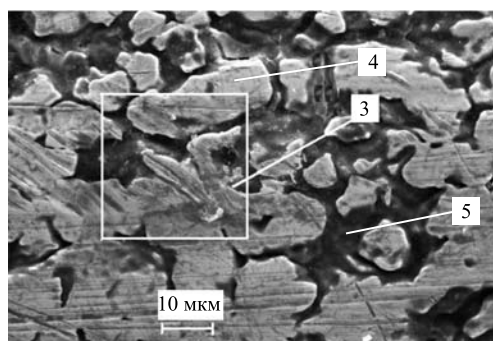


Рис. 4. СЭМ-изображение поверхности облученной нержавеющей стали с выделенной площадью 3 и тт. 4, 5 РМЗА

Таблица 4. Элементный состав SS, измеренный на площади 3 и в тт. 4 и 5 на рис. 4

ZN	Се- рия	C,	C,	SS,	C,	C,	SS,	C,	C,	SS,
		вес. %	ат. %	ат. %	вес. %	ат. %	ат. %	вес. %	ат. %	ат. %
		Площадь 3			Точка 4			Точка 5		
6C	K	9,96 ± 2,67	33,63	—	8,87 ± 2,29	30,98	—	16,71 ± 2,89	42,09	—
8O	K	—	—	—	—	—	—	7,04 ± 1,23	13,32	—
11Na	K	—	—	—	—	—	—	1,30 ± 0,14	1,71	—
12Mg	K	—	—	—	—	—	—	1,33 ± 0,12	1,66	—
13Al	K	0,42 ± 0,07	0,63	—	—	—	—	0,82 ± 0,08	0,92	—
14Si	K	0,30 ± 0,06	0,44	—	—	—	—	0,66 ± 0,06	0,71	—
15P	K	—	—	—	—	—	—	0,07 ± 0,03	0,07	—
16S	K	—	—	—	—	—	—	0,12 ± 0,04	0,12	—
17Cl	K	—	—	—	—	—	—	0,31 ± 0,04	0,26	—
20Ca	K	—	—	—	—	—	—	0,18 ± 0,04	0,14	—
24Cr	K	14,75 ± 0,43	11,50	17,61	16,01 ± 0,45	12,91	18,90	12,12 ± 0,35	7,05	18,07
25Mn	K	—	—	—	0,93 ± 0,08	0,71	—	—	—	—
26Fe	K	65,39 ± 1,63	47,46	72,68	64,99 ± 1,59	48,82	71,48	52,07 ± 1,34	28,21	72,31
28Ni	K	9,18 ± 0,37	6,34	9,71	9,20 ± 0,35	6,57	9,62	7,27 ± 0,26	3,75	9,61

На рис. 9 представлены два конца НС-проволоки с мелкими выступами, которые отчетливо видны.

На рис. 10 представлены СЭМ-изображения нескольких застывших выбросов из поверхности НС и указана точка на самом крупном выбросе, в которой был сделан РМЗА. В табл. 7 представлен элементный состав этого выброса.

Как видно из табл. 7, в этом выбросе отсутствуют хром и никель, но присутствует медь. Следует отметить, что проволока из нержавеющей стали находилась вблизи медного образца (см. рис. 1, поз. 5) и покрылась медным налетом при облучении γ -квантами. Об этом будет сказано ниже при описании эффектов на медном образце.

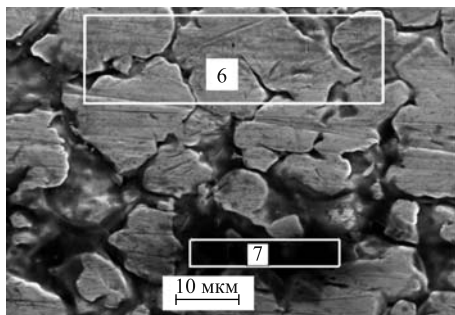


Рис. 5. СЭМ-изображение поверхности НС с РМЗА на площадях 6 и 7

Таблица 5. Элементный состав НС, измеренный РМЗА для площадей 6 и 7 рис. 5

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %	SS, ат. %	C, вес. %	C, ат. %	SS, ат. %
		Площадь 6			Площадь 7		
6C	K	7,92 ± 1,91	28,38	—	28,27 ± 4,89	56,74	—
8O	K	—	—	—	7,93 ± 1,67	11,95	—
11Na	K	—	—	—	3,16 ± 0,28	3,32	—
12Mg	K	—	—	—	0,74 ± 0,09	0,73	—
13Al	K	—	—	—	0,75 ± 0,08	0,67	—
14Si	K	—	—	—	0,77 ± 0,07	0,66	—
15P	K	—	—	—	—	—	—
16S	K	—	—	—	0,41 ± 0,05	0,31	—
17Cl	K	—	—	—	0,80 ± 0,07	0,54	—
19K	K	—	—	—	0,41 ± 0,05	0,31	—
20Ca	K	—	—	—	0,59 ± 0,06	0,36	—
24Cr	K	16,27 ± 0,44	13,47	19,02	10,67 ± 0,33	4,95	20,20
25Mn	K	1,02 ± 0,08	0,80	—	—	—	—
26Fe	K	65,97 ± 1,62	50,87	71,83	40,34 ± 1,05	17,42	71,07
28Ni	K	8,83 ± 0,31	6,48	9,15	5,20 ± 0,23	2,14	8,73

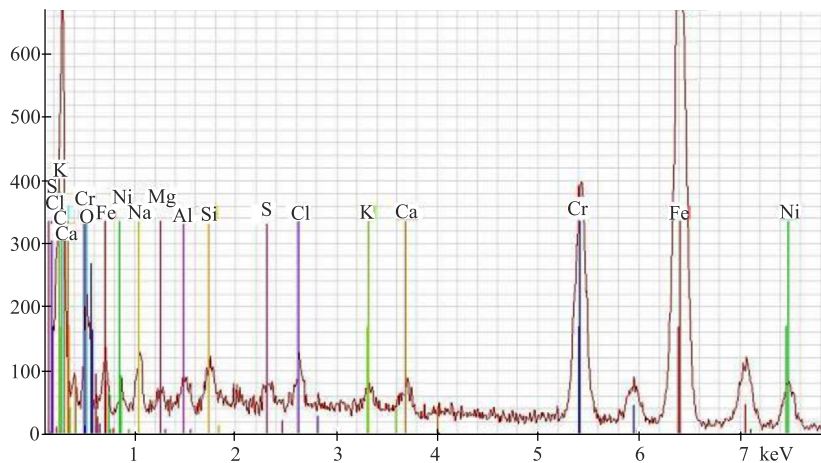


Рис. 6. Характеристический спектр рентгеновского излучения, снятый с площади 7 на рис. 5

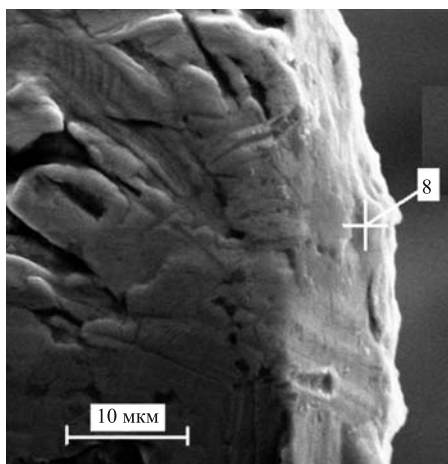


Рис. 7. СЭМ-изображение торцевого участка поверхности НС (одного из краев)

Таблица 6. Элементный состав на рис. 7 в т. 8

ZN	Серия	C , вес. %	C , ат. %	SS, ат. %
6C	K	$15,38 \pm 3,22$	34,40	—
8O	K	$32,06 \pm 1,81$	30,53	—
${}^{11}Na$	K	$4,07 \pm 0,35$	4,76	—
${}^{12}Mg$	K	$0,99 \pm 0,11$	1,09	—
${}^{13}Al$	K	$16,52 \pm 0,85$	16,45	—
${}^{14}Si$	K	$0,22 \pm 0,06$	0,47	—
${}^{16}S$	K	$0,22 \pm 0,04$	0,19	—
${}^{17}Cl$	K	$1,17 \pm 0,08$	0,89	—
${}^{19}K$	K	$0,66 \pm 0,06$	0,45	—
${}^{20}Ca$	K	$2,05 \pm 0,11$	1,38	—
${}^{24}Cr$	K	$9,23 \pm 0,30$	4,77	20,14
${}^{26}Fe$	K	$35,14 \pm 1,01$	16,90	71,37
${}^{28}Ni$	K	$4,38 \pm 0,19$	2,01	8,49

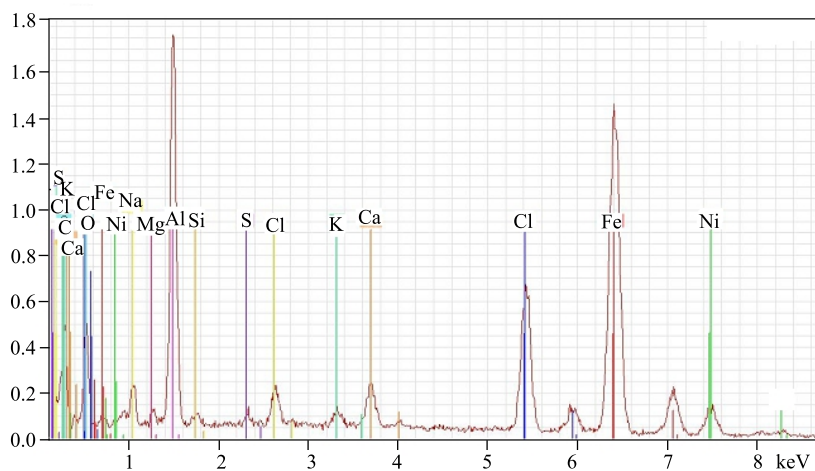


Рис. 8. Характеристический спектр рентгеновского излучения, снятый в т. 8 на рис. 7

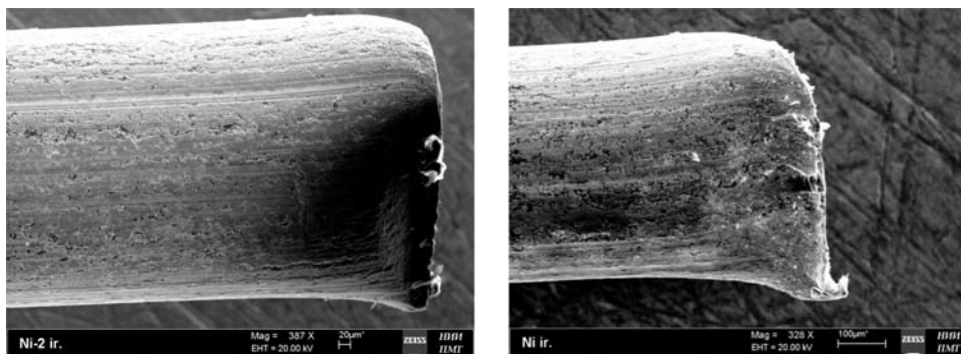


Рис. 9. СЭМ-изображения обоих концов НС (см рис. 1, поз. 6)

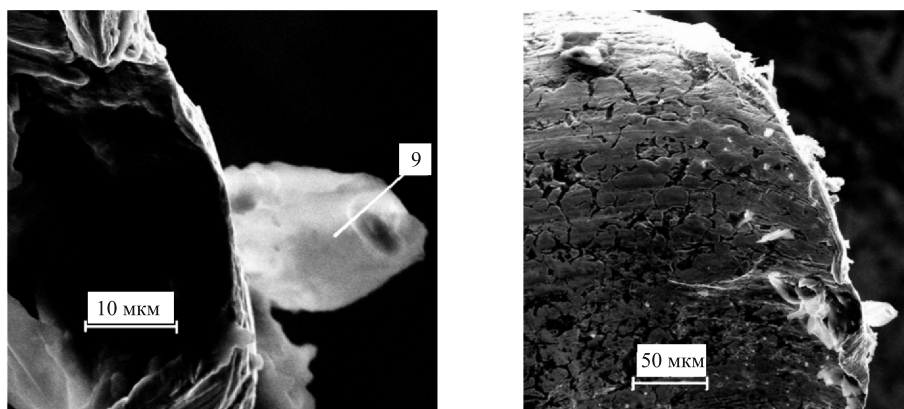


Рис. 10. СЭМ-изображения двух застывших выбросов из поверхности: НС, с выделением выступа 9, на котором был проведен РМЗА

Таблица 7. Элементный состав выступа сложной формы в т. 9 на рис. 10

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
⁶ C	K	23,54 ± 4,20	35,08
¹¹ Na	K	4,21 ± 0,33	4,36
¹² Mg	K	1,95 ± 0,16	1,91
¹³ Al	K	57,79 ± 2,75	51,06
¹⁴ Si	K	0,51 ± 0,07	0,44
¹⁶ S	K	0,66 ± 0,07	0,49
¹⁷ Cl	K	5,18 ± 0,23	3,48
¹⁹ K	K	3,52 ± 0,17	2,15
²⁶ Fe	K	0,86 ± 0,10	0,37
²⁹ Cu	K	1,79 ± 0,16	0,67

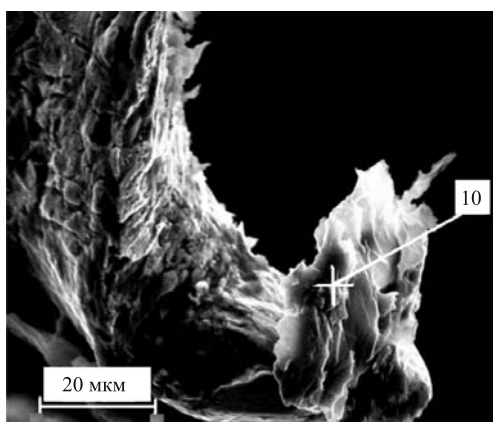


Рис. 11. СЭМ-изображение структуры на конце НС-проволоки с указанием точки 10, в которой был сделан РМЗА

Таблица 8. Элементный состав структуры на рис. 11 в т. 10

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
⁶ C	K	73,94 ± 9,07	90,56
¹² Mg	K	0,49 ± 0,06	0,30
¹³ Al	K	12,70 ± 0,66	6,92
¹⁷ Cl	K	1,08 ± 0,07	0,45
²⁴ Cr	K	0,21 ± 0,04	0,06
²⁶ Fe	K	0,65 ± 0,06	0,17
²⁹ Cu	K	0,50 ± 0,06	0,12
⁴⁷ Ag	L	10,42 ± 0,37	1,42

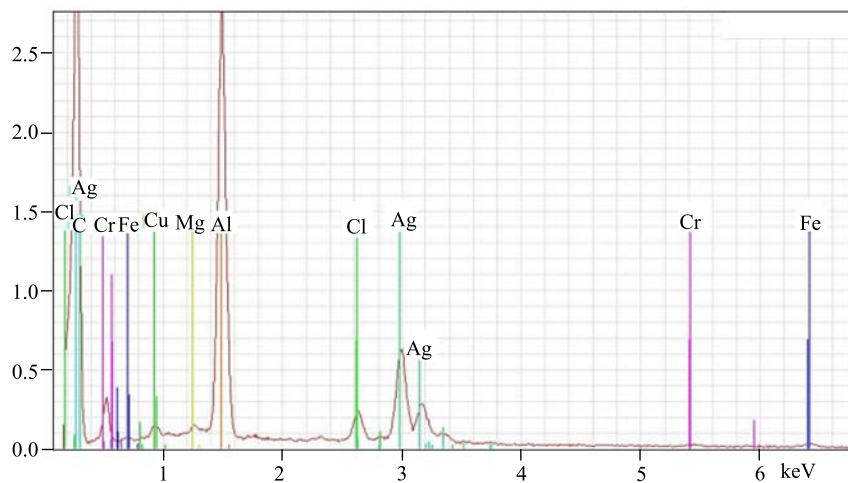


Рис. 12. Характеристический спектр рентгеновского излучения на рис. 11 в т. 10

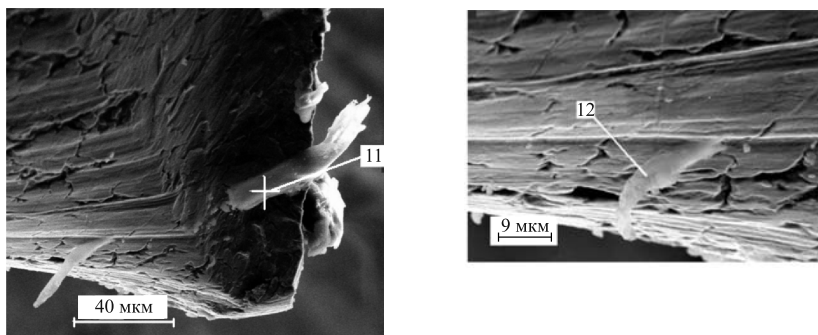


Рис. 13. СЭМ-изображения двух выбросов, которые повсеместно встречаются на облученной НС-проволоке

На рис. 11 представлено СЭМ-изображение структуры, напоминающей змеиный зуб на конце проволоки, и указана точка 10, в которой был сделан РМЗА. В табл. 8 представлен элементный состав этой структуры.

На рис. 12 представлен характеристический спектр рентгеновского излучения в т. 10 на рис. 11.

На рис. 13 представлены СЭМ-изображения двух выбросов, которые повсеместно встречаются на облученной НС-проволоке. В табл. 9 представлен элементный состав, измеренный в т. 11 и т. 12 на рис. 13.

1.2. Экспериментальные результаты в образце меди (рис. 1, поз. 5). На рис. 14 представлено СЭМ-изображение поверхности облученной меди с выделением площади 13, на которой был проведен РМЗА. Результаты анализа представлены в табл. 10.

На рис. 15 представлено СЭМ-изображение поверхности облученной меди с выделением площади т. 14, на которой был проведен РМЗА. Результаты анализа даны в табл. 11.

На рис. 16 представлено СЭМ-изображение поверхности облученной меди с выделе-

Таблица 9. Элементный состав на рис. 13 в тт. 11 и 12

zN	Серия	Рис. 13, а, т. 11			Рис. 13, б, т. 11		
		C, вес. %	C, ат. %	SS, ат. %	C, вес. %	C, ат. %	SS, ат. %
⁶ C	К	47,15 ± 9,02	59,82	—	47,13 ± 8,75	66,98	—
⁸ O	К	32,06 ± 6,41	30,53	—	14,59 ± 3,14	15,57	—
¹¹ Na	К	3,24 ± 0,34	2,15	—	0,78 ± 0,11	0,58	—
¹² Mg	К	0,70 ± 0,09	0,44	—	0,68 ± 0,09	0,48	—
¹³ Al	К	6,26 ± 0,46	3,54	—	15,23 ± 1,02	9,64	—
¹⁴ Si	К	0,37 ± 0,06	0,20	—	0,16 ± 0,04	0,10	—
¹⁵ P	К	0,15 ± 0,04	0,07	—	—	—	—
¹⁶ S	К	0,33 ± 0,05	0,16	—	—	—	—
¹⁷ Cl	К	1,59 ± 0,11	0,69	—	—	—	—
¹⁹ K	К	0,56 ± 0,06	0,22	—	—	—	—
²⁰ Ca	К	0,96 ± 0,08	0,37	—	0,38 ± 0,05	0,16	—
²⁴ Cr	К	1,43 ± 0,10	0,42	22,95	4,21 ± 0,20	1,38	21,23
²⁶ Fe	К	4,62 ± 0,23	1,26	68,85	14,93 ± 0,59	4,56	70,15
²⁸ Ni	К	0,57 ± 0,08	0,15	8,20	1,91 ± 0,13	0,56	8,62

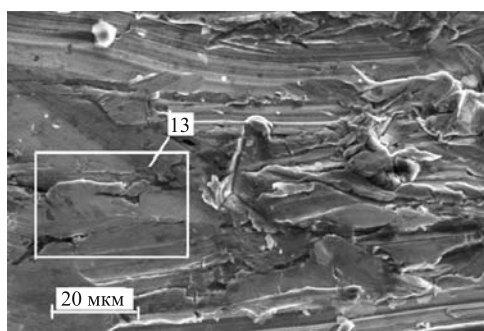


Рис. 14. СЭМ-изображение поверхности облученной меди с выделением площади 13 РМЗА

Таблица 10. Элементный состав в т. 13 на рис. 14

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
⁶ C	К	10,68 ± 3,00	34,79
⁸ O	К	5,22 ± 1,33	12,76
¹³ Al	К	0,84 ± 0,10	1,21
²⁹ Cu	К	83,26 ± 2,38	51,24

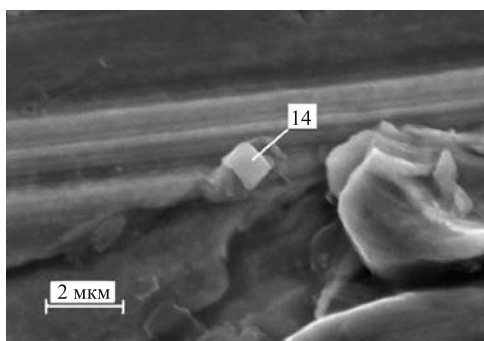


Рис. 15. СЭМ-изображение поверхности облученной меди с выделением т. 14 РМЗА

Таблица 11. Элементный состав в т. 14 на рис. 15

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
⁶ C	К	14,57 ± 3,96	33,08
⁸ O	К	22,11 ± 4,39	37,69
¹³ Al	К	0,19 ± 0,06	0,19
²⁰ Ca	К	7,75 ± 0,30	5,27
²⁹ Cu	К	55,38 ± 1,69	23,76

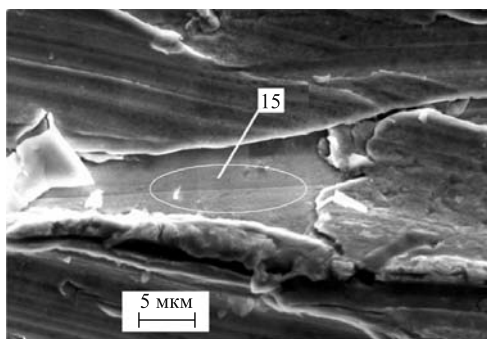


Рис. 16. СЭМ-изображение поверхности облученной меди с выделением т. 15 РМЗА

Таблица 12. Элементный состав в т. 15 на рис. 16

ZN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
6C	К	$3,65 \pm 1,27$	15,74
8O	К	$0,56 \pm 0,27$	1,82
13Al	К	$3,98 \pm 0,37$	7,64
29Cu	К	$91,81 \pm 2,85$	74,80

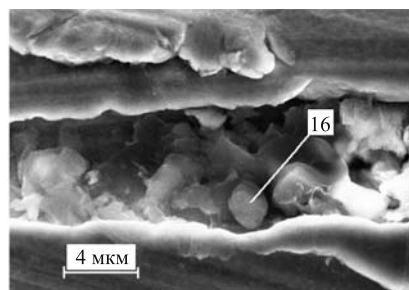
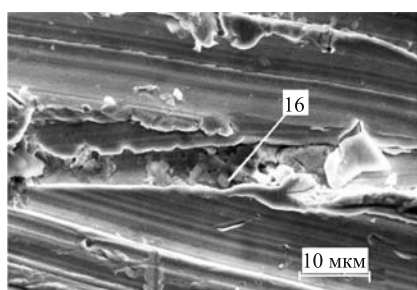


Рис. 17. СЭМ-изображения поверхности облученной меди с различным увеличением с выделением т. 16 РМЗА

Таблица 13. Элементный состав в т. 16 на рис. 17

ZN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
6C	К	$10,52 \pm 2,35$	24,32
8O	К	$21,40 \pm 3,63$	37,15
13Al	К	$2,08 \pm 0,17$	2,14
20Ca	К	$29,33 \pm 0,72$	20,32
26Fe	К	$0,63 \pm 0,08$	0,31
29Cu	К	$36,05 \pm 0,90$	15,76

нием площади (т. 15), на которой был проведен РМЗА. Результаты анализа приведены в табл. 12.

На рис. 17 представлены СЭМ-изображения с различным увеличением поверхности облученной меди с выделением площади (т. 16), на которой был проведен РМЗА. Результаты анализа представлены в табл. 13.

На рис. 18 представлен характеристический спектр рентгеновского излучения в т. 16 на рис. 17.

На рис. 20 представлен характеристический спектр рентгеновского излучения в т. 17 на рис. 19.

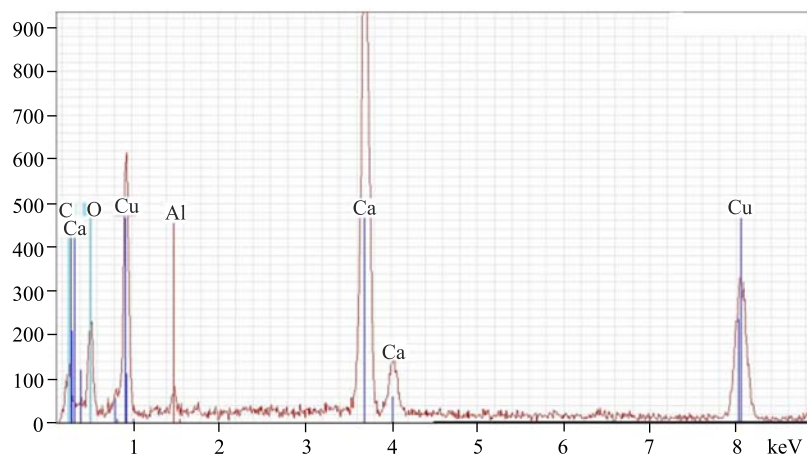


Рис. 18. Характеристический спектр рентгеновского излучения в т. 16 на рис. 17

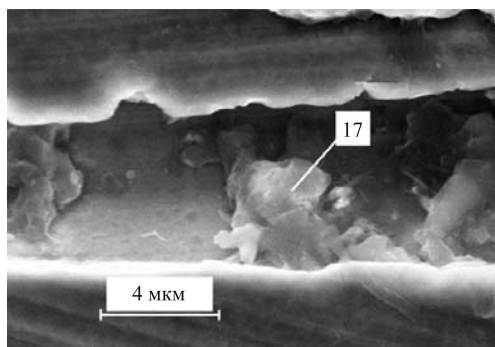


Рис. 19. СЭМ-изображение поверхности меди в т. 17 РМЗА

Таблица 14. Элементный состав в т. 17 на рис. 19

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
6C	K	14,10 ± 2,14	35,70
8O	K	8,06 ± 1,18	15,33
12Mg	K	13,12 ± 0,69	16,42
13Al	K	1,83 ± 0,12	2,06
14Si	K	4,57 ± 0,21	4,95
16S	K	0,28 ± 0,04	0,26
20Ca	K	1,30 ± 0,07	0,99
26Fe	K	0,49 ± 0,05	0,26
29Cu	K	43,05 ± 1,07	20,61
47Ag	K	5,87 ± 0,20	1,66
53I	K	7,33 ± 0,23	1,76

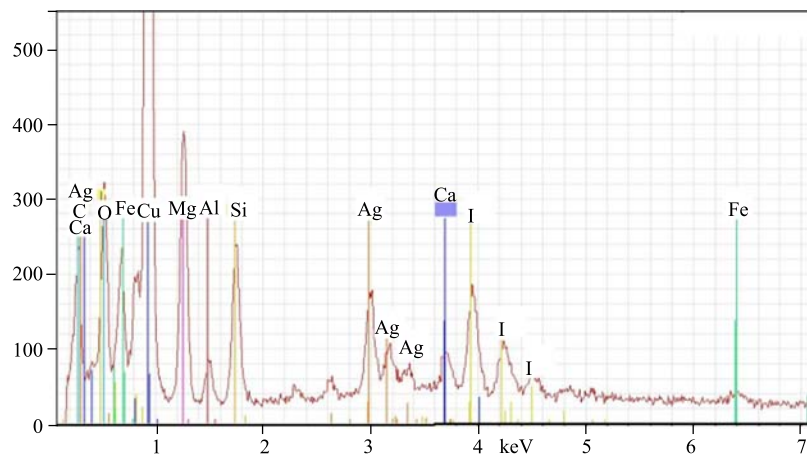


Рис. 20. Характеристический спектр рентгеновского излучения в т. 17 на рис. 19

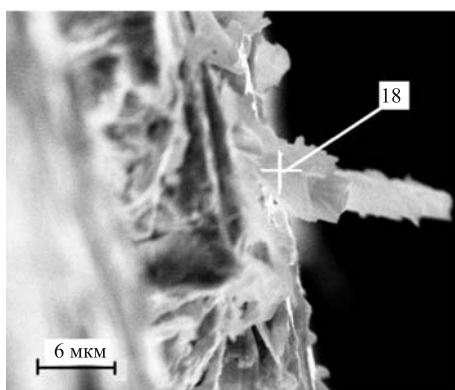


Таблица 15. Элементный состав в т. 18 на рис. 21

ZN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
⁶ C	K	26,71 ± 8,35	42,90
⁸ O	K	12,74 ± 3,62	15,36
¹² Mg	K	1,48 ± 0,16	1,17
¹³ Al	K	54,37 ± 3,01	38,87
¹⁴ Si	K	0,64 ± 0,09	0,44
²⁵ Mn	K	0,50 ± 0,10	0,18
²⁹ Cu	L	3,56 ± 0,36	1,08

Рис. 21. СЭМ-изображение выброса из поверхности меди, в т. 18 — РМЗА

На рис. 19 представлено СЭМ-изображение поверхности облученной меди с выделением т. 17, в которой был проведен РМЗА. Результаты анализа представлены в табл. 14.

На рис. 21 представлено СЭМ-изображение выброса из поверхности облученной меди с выделением т. 18, в которой был проведен РМЗА. Результаты анализа представлены в табл. 15.

На рис. 22 представлен характеристический спектр рентгеновского излучения в т. 18 на рис. 21.

На рис. 23 представлено СЭМ-изображение частицы на поверхности меди, в т. 19, в которой был проведен РМЗА. Результаты анализа представлены в табл. 16.

Введем параметр $Mn/Y = C_{Mn}(ат. \%) / C_Y(ат. \%) = 1,48$, который характеризует состав частицы по отношению к исходным двум слиткам состава YMn_2 (см. рис. 1, поз. 2 и измеренное исходное отношение (до облучения) для этого сплава было равным $Mn/Y = 2,56$. Следовательно, состав частицы, попавшей на поверхность меди, не соответствует исходному составу марганцево-иттриевого сплава (см. детальные результаты в [17]).

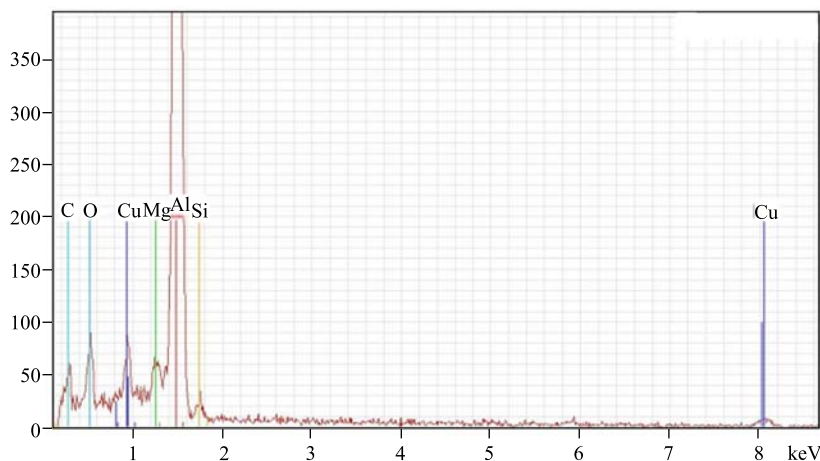


Рис. 22. Характеристический спектр рентгеновского излучения в т. 18 на рис. 21

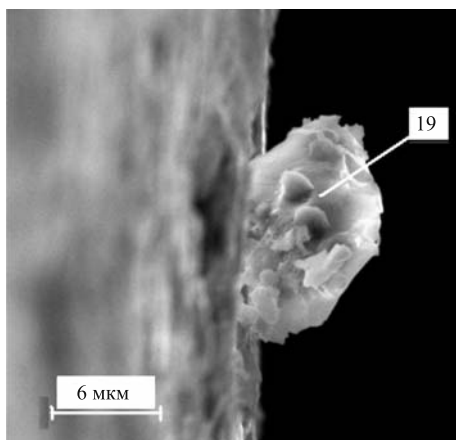


Рис. 23. СЭМ-изображение частицы на поверхности меди, в т. 19 сделан РМЗА

Таблица 16. Элементный состав в т. 19 на рис. 23

ZN	C, вес. %	C, ат. %
⁶ C	7,64 ± 3,26	24,02
⁸ O	2,40 ± 1,09	5,76
¹² Mg	0,76 ± 0,15	1,18
¹³ Al	22,55 ± 1,57	31,57
¹⁴ Si	0,91 ± 0,13	1,23
²⁹ Cu	3,19 ± 0,22	1,90
²⁵ Mn	29,90 ± 1,12	20,56
³⁹ Y	32,65 ± 1,93	13,87

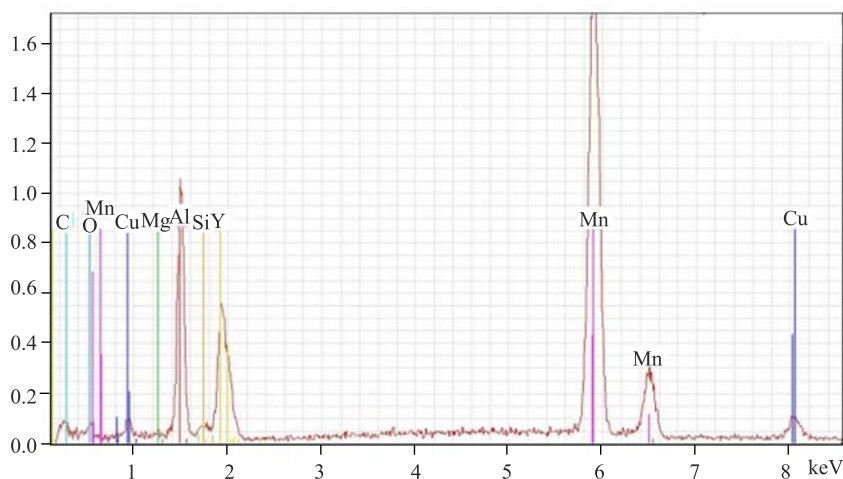


Рис. 24. Характеристический спектр рентгеновского излучения в т. 19 на рис. 23

На рис. 24 представлен характеристический спектр рентгеновского излучения в т. 19 на рис. 23.

Для подтверждения достоверности представленных здесь результатов, а также и результатов в работе [17] приведем данные, полученные на другом сканирующем микроскопе с другим рентгеновским микроанализатором на образце меди и втором образце алюминия (см. рис. 1, поз. 3 и 5 табл. 1).

Отметим, что поверхность образца проволоки из нержавеющей стали общей длиной примерно 8 мм, расположенной вблизи медного образца со всех сторон покрылась визуально видимым красноватым налетом, который представлял собой распыленную медь. Наличие меди на поверхности нержавеющей стали подтвердил и последующий РМЗА. Заметим, что испарение меди возможно только при температурах испарения меди, т. е.

при температуре 2543 °С [18], плавление оксида меди (Cu_2O) происходит при температуре 1242 °С, а разложение при температуре 1800 °С, т. е. летучих низкотемпературных и медных оксидов нет.

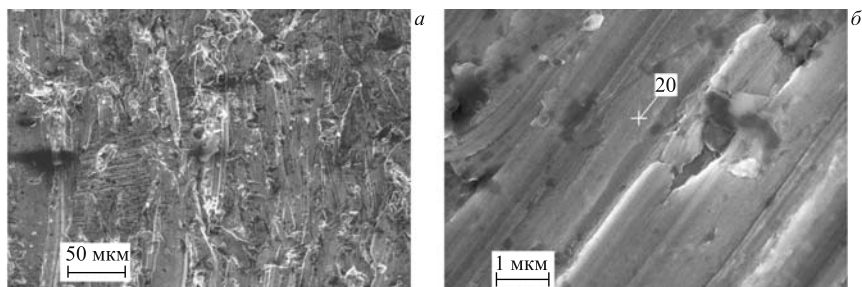


Рис. 25. СЭМ-изображения поверхности облученной меди с другого СЭМ-микроскопа при различных увеличениях

На рис. 25 представлены СЭМ-изображения поверхности меди после воздействия γ -квантов, полученные с разным увеличением. Как видно из рис. 25, б, поверхность имеет характерный для переплавленной поверхности вид.

В табл. 17 представлен элементный состав, измеренный на ровном участке в т. 20 на рис. 25, б с вычетом вклада углерода.

Таблица 17. Элементный состав гладкого участка меди на рис. 25, б в т. 20

ZN	C, вес. %	C, ат. %
8O	1,01	3,87
13Al	0,79	1,78
29Cu	98,20	94,35

На рис. 26 представлено СЭМ-изображение участка поверхности в отраженных электронах, т. е. более темным участкам соответствуют бóльшие порядковые номера расположенных на них химических элементов.

В табл. 18 представлен элементный состав, измеренный РМЗА в тт. 21, 22 и 23.

Следует отметить, что на темных участках с более низким коэффициентом отражения электронов обнаружено значительное количество элементов, начиная с $Z = 8$ (кислород) до $Z = 29$ (медь как основной материал), но присутствует также и более тяжелый

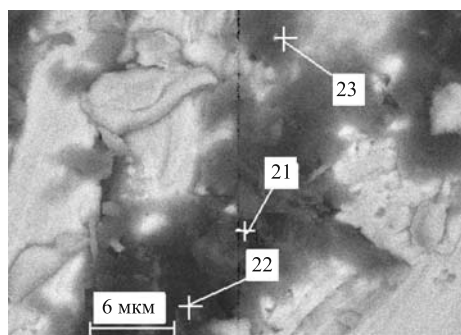


Рис. 26. СЭМ-изображение участка поверхности меди в отраженных электронах, в трех точках которой проведен РМЗА

Таблица 18. Элементный состав, промеренный РМЗА в точках, указанных на рис. 26

zN	т. 21		т. 22		т. 23	
	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %
8O	24,96	48,29	45,99	73,56	36,06	62,13
12Mg	—	—	0,64	0,67	1,37	1,56
13Al	21,93	25,16	4,33	4,10	12,98	13,26
14Si	0,35	0,38	4,28	3,90	1,46	1,44
15P	—	—	—	—	0,38	0,34
16S	—	—	—	—	0,27	0,23
17Cl	0,21	0,19	—	—	0,44	0,34
19K	0,19	0,15	0,61	0,40	0,64	0,45
20Ca	0,83	0,64	2,64	1,68	0,57	0,39
22Ti	0,20	0,13	—	—	—	—
26Fe	0,82	0,45	14,44	6,62	2,82	1,39
29Cu	50,51	24,61	18,58	7,48	42,18	18,30
56Ba	—	—	8,49	1,58	0,83	0,17

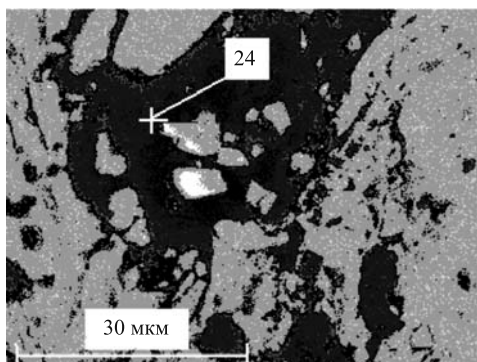


Рис. 27. СЭМ-изображение участка поверхности меди в отраженных электронах. В одной т. 24 проведен РМЗА

Таблица 19. РМЗА элементный состав в т. 24 на рис. 27

zN	C, вес. %	C, ат. %
8O	7,06	21,3
12Mg	0,74	1,51
13Al	0,87	1,61
14Si	0,86	1,52
16S	0,81	1,26
17Cl	1,41	1,97
19K	0,34	0,43
20Ca	1,68	2,08
22Ti	0,35	0,36
25Mn	1,22	1,11
29Cu	84,66	66,22

элемент с $Z = 56$ (барий). Отметим, что расчеты элементного состава проведены за вычетом углерода, от которого трудно избавиться и который обычно присутствует.

Для большей достоверности приведен другой участок облученной меди, СЭМ-изображение которого представлено в отраженных электронах на рис. 27.

В табл. 19 представлен элементный состав, измеренный в т. 24 на рис. 27. На рис. 28 представлен соответствующий спектр РМЗА анализа, данные которого приведены в табл. 19.

1.3. Экспериментальные результаты на образце алюминия (рис. 1, поз. 3). Второй образец алюминия (рис. 1, поз. 3) был изучен на электронном микроскопе и рентгеновском анализаторе в независимом центре аналитических исследований. На рис. 29 представлены два СЭМ-изображения второго алюминиевого образца: *a*) в месте входа

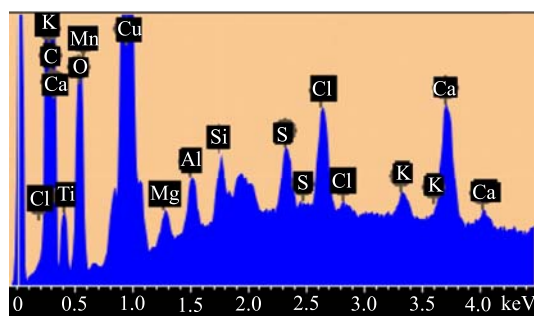


Рис. 28. ХСРП-спектр, соответствующий данным в табл. 19

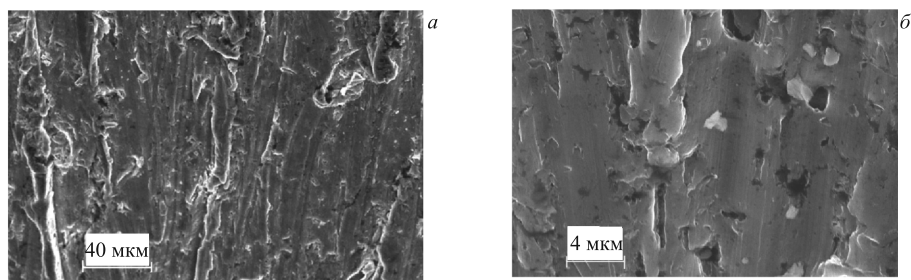


Рис. 29. СЭМ-изображения поверхности Al в месте входа (а) и выхода (б) γ -квантов

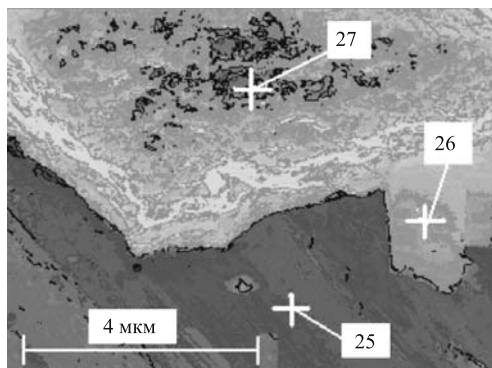


Рис. 30. СЭМ-изображение поверхности алюминиевого стержня, в трех характерных точках которой сделан РМЗА

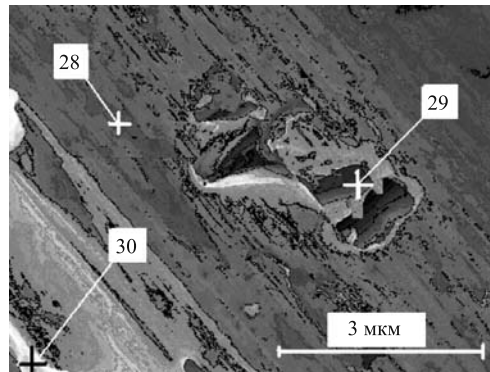


Рис. 31. СЭМ-изображение поверхности алюминиевого стержня, в трех характерных точках которой сделан РМЗА

и б) на выходе пучка γ -квантов. Как видно, поверхность алюминия на выходе γ -квантов имеет характерный вид оплавленной, так как отсутствуют даже характерные царапины на поверхности.

На рис. 30 представлено СЭМ-изображение поверхности алюминия снизу, в т. 25 сделано измерение элементного состава, а сверху расположена инородная частица, в тт. 26 и 27 проведен элементный анализ. В табл. 20 приведены результаты элементного анализа на рис. 30.

Таблица 20. Элементный состав в тт. 25, 26 и 27 на рис. 30

zN	т. 25		т. 26		т. 27	
	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %
8O	1,31	2,29	21,15	43,39	2,02	7,00
9F	—	—	1,24	2,14	—	—
13Al	91,11	94,07	26,39	32,10	8,13	16,68
14Si	1,91	1,89	2,65	3,10	—	—
25Mn	0,70	0,35	5,86	3,50	56,81	57,21
39Y	1,99	0,62	42,71	15,77	28,48	17,73
47Ag	2,97	0,77	—	—	—	—
73Ta	—	—	—	—	2,07	0,63
74W	—	—	—	—	2,49	0,75

Таблица 21. Элементный состав в тт. 28, 29 и 30 на рис. 31

zN	т. 28		т. 29		т. 30	
	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %
8O	0,92	1,57	0,86	1,48	1,61	2,74
9F	0,46	0,66	—	—	1,74	2,49
13Al	89,17	90,43	44,89	45,97	91,03	91,80
14Si	6,85	6,67	53,09	52,24	1,84	1,79
25Mn	—	—	—	—	0,20	0,10
26Fe	—	—	—	—	0,78	0,38
47Ag	2,60	0,66	1,16	0,30	2,80	0,70

На рис. 31 представлено СЭМ-изображение и проведены РМЗА-измерения в трех отличающихся между собой точках: гладкая поверхность (т. 28), стенка кратера (т. 29) и светлое пятно (т. 30) на поверхности алюминия. В табл. 21 приведены соответствующие элементные составы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Данная работа является продолжением статьи [17], в которой представлены результаты изменений элементного состава и структуры поверхности после облучения ДНРС-FT γ -квантами с энергией 23 МэВ, т.е. в области гигантского дипольного резонанса (см. [10]), двух алюминиевых стержней, однородного сплава $Y\text{Mn}_2$ (два слитка), медного стержня и проволоки из нержавеющей стали (см. рис. 1). Естественно, интерпретация результатов элементного анализа в этом случае затруднительна из-за разного состава материалов. Тем не менее, на основе проведенных исследований с применением методов сканирующей электронной микроскопии с рентгеновским микрозондовым анализом можно выявить общие закономерности поведения всех использованных материалов.

Следует отметить, что проволока из нержавеющей стали, находившаяся при облучении вблизи поверхности меди, покрылась со всех сторон на длину перекрытия (примерно 6–8 мм) медью, что видно и визуально, и при РМЗА. Это однозначно свидетельствует

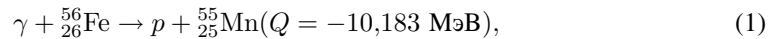
о высокой температуре медного образца, когда возможны процессы локального испарения меди (температура возгонки меди 2543 °С при температуре плавления 1083 °С). Это исключает присутствие окислов меди типа Cu_2O , которые имеют температуру разложения 1800 °С при температуре плавления 1242 °С [18]. Представляют также интерес данные по соотношению основных металлов Fe, Cr и Ni, входящих в нержавеющую сталь. В табл. 22 приведены сводные данные по всем измерениям концентраций этих металлов, взятые из табл. 2–6 и табл. 9. В табл. 22 эти данные обозначены как ТТ. 2–6 и Т. 9.

Таблица 22. Процентные соотношения Fe, Cr и Ni во всех измерениях НС

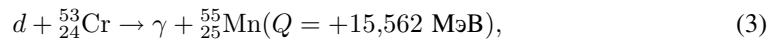
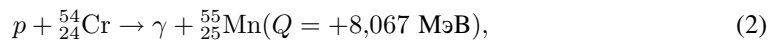
ZN	Т. 2	Т. 3	Т. 4, т. 3	Т. 4, т. 4	Т. 4, т. 5	Т. 5, т. 6	Т. 5, т. 7	Т. 6	Т. 9, т. 11	Т. 9, т. 12
^{27}Cr	19,93	18,98	17,61	18,90	18,07	19,02	20,20	20,14	22,95	21,23
^{26}Fe	70,4 3	70,84	72,68	71,48	72,31	71,83	71,07	71,37	68,85	70,15
^{28}Ni	9,64	10,18	9,71	9,62	9,61	9,15	8,73	8,49	8,20	8,62

Как видно, концентрация хрома варьируется от 17,61 до 22,95 % при среднем значении $19,703^{+16,5}_{-10,6}$ %; концентрация железа варьируется от 68,85 до 72,68 % при среднем значении $71,101^{+2,2}_{-3,2}$ %; концентрация хрома варьируется от 8,20 до 10,18 % при среднем значении $9,195^{+10,7}_{-10,8}$ %.

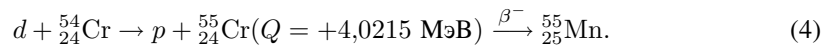
На поверхности облученной нержавеющей стали присутствуют элементы с зарядами ядер от $Z = 6$ (углерод) до $Z = 20$ (кальций), встречается и марганец с $Z = 25$. Образование ^{25}Mn возможно в реакциях (γ, p):



в реакциях подбарьерного слияния:



в реакции Оппенгеймера [13]:



Здесь приведены реакции (1)–(4) с образованием стабильного моноизотопа марганца, но марганец мог появиться и в результате распада гомогенизированного сплава YMn_2 с последующим его осаждением на поверхность НС.

Большой интерес представляют застывшие выбросы из поверхности НС (см. рис. 9–11 и 13 и соответствующие им табл. 7–9), в которых легкие элементы. Перечислим их здесь, включая гипотетические, т. е. не зарегистрированные или летучие элементы: ^1H , ^1D , ^2He , ^3Li , ^4Be , ^5B , ^6C , $^7\text{N}\uparrow$, ^8O , ^9F (см. [17]), $^{10}\text{Ne}\uparrow$, ^{11}Na , ^{12}Mg , ^{13}Al , ^{14}Si , ^{15}P , ^{16}S , ^{17}Cl , $^{18}\text{Ar}\uparrow$, ^{19}K , ^{20}Ca . Элементы ^1H , ^1D , ^2He , ^3Li , ^4Be , ^5B не регистрируются методом РМЗА, а элементы $^{10}\text{Ne}\uparrow$ и $^{18}\text{Ar}\uparrow$ — летучие инертные газы. В работе [17] представлены результаты, где обнаружена высокая концентрация фтора в застывшем выбросе из поверхности алюминия, которая составляет $(20,08 \pm 3,50)$ вес. % ([17], рис. 9 и табл. 8).

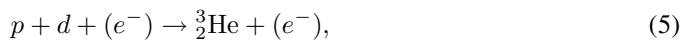
При исследовании образца меди установлено, что на гладких участках поверхности на рис. 15 (табл. 10), рис. 16 (табл. 12) и рис. 25 (табл. 17), вероятно, происходит очищение

от примесей, так как концентрация меди на них достигает $(83,26 \pm 2,38)$, $(91,81 \pm 2,85)$ и $98,20$ вес. % соответственно. Но в целом на поверхности медного образца обнаружены значительные разрушения с образованием трещин и разломов (см. рис. 14–17). При этом в трещинах обнаружено значительное количество кальция, например, в разломе (трещине) на рис. 15 поверхности обнаружены структуры, напоминающие кристаллы с концентрацией кальция $(7,75 \pm 0,30)$ вес. % (табл. 10), на рис. 17 на дне трещины видны структуры из кальция с его концентрацией до $(29,33 \pm 0,72)$ вес. % (табл. 13), на дне глубокой трещины (рис. 19) обнаружен спектр легких элементов ${}^6\text{C}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{16}\text{S}$, ${}^{20}\text{Ca}$, ${}^{26}\text{Fe}$ при наличии более тяжелых элементов типа ${}^{47}\text{Ag}$ ($(5,87 \pm 0,20)$ вес. %) и ${}^{53}\text{I}$ ($(7,33 \pm 0,23)$ вес. %). Отметим, что концентрация магния также здесь оказалась высокой: $16,42$ ат. % (или $(13,12 \pm 0,69)$ вес. %, табл. 14). Похожие картины по изменению структуры и широкому спектру элементных составов обнаружены и на рис. 26 (табл. 18) и на рис. 27 (табл. 19). Также интересно отметить обнаруженные застывшие выбросы из поверхности меди (рис. 21, табл. 15), где присутствует в большом количестве алюминий, до $(54,37 \pm 3,01)$ вес. %, а также и явно привнесенные на поверхность меди частицы сложного состава (рис. 23, табл. 16, где много Y ($13,87$ ат. %), Mn ($20,56$ ат. %) и Al ($31,57$ ат. %)).

Для достоверности был проанализирован и второй алюминиевый образец (см. рис. 1, поз. 3). Поверхность алюминиевого образца также носит характер оплавленной поверхности (см. рис. 29, б). На поверхности алюминиевого образца обнаружены более крупные частицы, представляющие собой куски развалившегося второго гомогенного слитка YMn_2 (см. рис. 1, поз. 4). В целом поверхность алюминия покрылась как бы налетом мелких частиц из Y и Mn с наличием серебра (см. рис. 30, табл. 20, т. 25). Серебро было также обнаружено на конце проволоки из нержавеющей стали в виде структуры сложной формы (рис. 11, табл. 8, с концентрацией серебра $(10,42 \pm 0,37)$ вес. %), в трещине на медной поверхности (рис. 19, табл. 14, с концентрацией серебра $(5,87 \pm 0,20)$ вес. %), на поверхности алюминия (см. рис. 31, табл. 21). Серебро было также обнаружено на поверхности первого алюминиевого образца (см. [17], рис. 13, табл. 11).

Вызывает удивление обнаружение более тяжелых элементов, чем даже иттрий, таких как ${}^{47}\text{Ag}$, ${}^{53}\text{I}$, а особенно тантал ${}^{73}\text{Ta}$ и вольфрам ${}^{74}\text{W}$ (рис. 30, табл. 20, т. 27), а также ${}^{56}\text{Ba}$ (рис. 26, табл. 18, тт. 22 и 23). Тем не менее, все эти результаты оставлены для полноты картины, хотя они явно требуют уточнения и дополнительных измерений.

Представляет интерес привести здесь результаты работ [19, 20], в которых рассматриваются ядерные реакции 2-го порядка, так называемая твердотельная внутренняя конверсия с помощью третьей заряженной частицы (electron or heavy charge particle assisted nuclear processes), такие как



В этих реакциях энергия возбуждения составного ядра не излучается в виде энергичного γ -кванта с $E_\gamma \approx Q$, а возбуждение снимается кинетическими энергиями легкого и более тяжелого продукта реакции. В обзорной работе авторов [14, 15] делается вывод, что если помогающей (assisted) частицей является протон, то в протонно-ассоциированной реакции ядерного захвата создается энергичный протон с энергиями порядка нескольких МэВ, который при его последующих процессах замедления может создавать вторичные свободные протоны, если такие протоны присутствуют в кристалле. Такие вторичные

протоны могут принимать дальнейшее участие в протонно-ассоциированных реакциях ядерного синтеза. Таким образом, вторичные протоны могут играть такую же роль, как вторичные нейтроны в случае ядерного деления, создавая цепные реакции деления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Didyk A. Yu., Wisniewski 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-P1–22001-P6.
2. *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. 26 p.
3. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* 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. 16 с.
4. *Wisniewski R., Didyk A. Yu., Wilczinska-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. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* 2013. V. 7, No. 2. P. 239–247.
5. *Вишневецкий Р., Дидык А. Ю., Вилчинска-Китовска Т.* Фоторасщепление дейтрона, термоядерные и реакции деления ядер, вызванные γ -квантами в насыщенном дейтерием палладии и плотном газообразном дейтерии с синтезом новых структур // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2013. Т. 7, № 2. С. 239–247.
6. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т.* Изменения структуры поверхности и элементного состава Pd-стержня и сборника продуктов ядерных и химических реакций, облученных 10 МэВ-ными γ -квантами в плотном дейтерии. Препринт ОИЯИ P15-2013-15. Дубна, 2013. 39 с.
7. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т.* Изменения свойств поверхности и элементного состава компонентов камеры высокого давления с Pd-стержнем внутри, облученных 10 МэВ-ными γ -квантами в плотном дейтерии. Препринт ОИЯИ P15-2013-20. Дубна, 2013. 32 с.
8. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* 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.* 2012. № 5. С. 5–13; Препринт ОИЯИ P15-2012-63. Дубна, 2012. 22 с.
9. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Изменения поверхности, объемных свойств образцов ванадия и нержавеющей стали, облученных в плотном газообразном дейтерии γ -квантами с пороговой энергией 23 МэВ. Препринт ОИЯИ P15-2012-75. Дубна, 2012. 15 с.
10. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М.* Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 215 с.
11. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т.* Устройство для получения энергии. Патент на полезную модель. № 122197 от 21 июня 2012 г.
12. *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(180). P. 437–457; JINR Preprint E15-2012-35. Dubna, 2012. 25 p.
13. *Oppenheimer J. R., Phillips M.* Note for the Transmission Functions for Deuteron // *Phys. Rev.* 1935. V. 48, No. 15. P. 500–502.

14. *Moretto Luciano G.* Statistical Emission of Large Fragments: A General Theoretical Approach // Nucl. Phys. A. 1975. V. 247. P. 211–230.
15. *Sierk A. J.* Mass-Asymmetric Fission of Light Nuclei // Phys. Rev. 1985. V. 55, No. 6. P. 582–583.
16. *Sierk A. J.* Macroscopic Model of Rotating Nuclei // Phys. Rev. C. 1986. V. 33, No. 6. P. 2039–2052.
17. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Результаты по облучению алюминия и гомогенного сплава $Y\text{Mn}_2$ γ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2013-41. Дубна, 2013. 23 с.
18. Физические величины: Справ. / Под ред. И. С. Григорьева и Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1233 с.
19. *Kálmán P., Keszthelyi T.* Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. 031606(R). P. 031606-1–031606-3.
20. *Kálmán P., Keszthelyi T.* Lattice Effect in Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. 031602(R). P. 031602-1–031606-4.

Получено 3 июля 2013 г.