

УДК 544.5

ВЛИЯНИЕ БЕТА-ОБЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ АКТИВНОСТИ МИКРОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ

Ильин Александр Петрович¹,
ilyin@tpu.ru

Мостовщиков Андрей Владимирович^{1,2},
avmost@tpu.ru

Роот Людмила Олеговна¹,
tolbanova@mail.ru

Змановский Сергей Владиславович³,
zmanovskiy@rusal.com

Исмаилов Данияр Валерьевич⁴,
Ismailov_Daniyar_V@bk.ru

Рузиева Гузель Усеиновна⁴,
guzel.ruzieva@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

³ ООО «СУАЛ ПМ»,
Россия, г. Шелехов, ул. Южная, 2.

⁴ Казахский национальный университет им. Аль-Фараби,
Республика Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71.

Актуальность. Микропорошки алюминия являются сырьем для многих отраслей промышленности: порошковой металлургии, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза новых материалов, водородной энергетики, пиротехники и ракетных топлив. Улучшение характеристик порошков алюминия способствует повышению их качества. Известные способы активирования порошков алюминия путем введения в состав алюминия добавок редкоземельных элементов, соединений ванадия, кремния, бора и других элементов приводит к загрязнению алюминия примесями. Облучение микропорошков β -частицами с энергией менее 8 МэВ не приводит к наведенной радиоактивности и в то же время активирует микропорошки алюминия.

Цель: получение и объяснение экспериментальных данных по изменению параметров активности микропорошков алюминия после их облучения в зависимости от дозы β -облучения.

Объекты: микропорошки алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8, АСД-10, полученные распылением расплава алюминия.

Методы: дифференциальный термический анализ, рентгенофазовый анализ, методика облучения микропорошков алюминия β -излучением, методика расчета параметров активности порошков алюминия.

Результаты. Получены количественные показатели реакционной способности микропорошков алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8 и АСД-10 до и после облучения β -излучением ускорителя ЭЛУ-4 с энергией 4 МэВ, т. е. энергией существенно ниже порога фотоядерных реакций, приводящих к наведенной активности. Дозы облучения образцов порошков составляли 1, 2, 4 Мрад. После β -облучения температура начала окисления снизилась максимально на 205 °С; максимальная скорость окисления возросла на 0,19 мг/мин (106 %); степень окисленности микропорошка АСД-6М повысилась на 18,9 %, а микропорошка АСД-10 минимально понизилась на 12,3 %; удельный тепловой эффект окисления после всех доз β -облучения увеличился максимально для АСД-10 на 188,6 кДж/моль. Запасание энергии микропорошками после β -облучения связано с формированием двойного электрического слоя в частицах алюминия.

Ключевые слова:

Микропорошки, алюминий, параметры активности, облучение, β -излучение, запасенная энергия, теплота плавления.

Введение

Действие ионизирующего излучения на металлы интенсивно изучалось еще со времен появления атомной промышленности [1]. На современном этапе развития радиационной физики и химии действие ионизирующего излучения определяет ресурс металлоконструкций и безопасность их эксплуатации [2]. Ионизирующее излучение в раз-

личных материалах генерирует метастабильные энергонасыщенные структуры: в диэлектриках – объемные однополярные заряды [3], в галогенидах щелочных металлов – различные виды дефектов с запасенной энергией [4], в массивных металлах – точечные, плоские и объемные дефекты [5].

Несмотря на большой объем исследований по действию ионизирующего излучения на материа-

лы в 60–70-е годы прошлого века, к настоящему времени остались практически не изученными микропорошки алюминия, подвергаемые действию излучений [6]. Упрощенный подход к структуре порошков металлов как к массивному материалу, а не к композиционному «металл–оксид» привел к вычеркиванию из научных исследований нового научного направления.

Целью работы являлось получение и объяснение экспериментальных данных по изменению параметров активности микропорошков алюминия после их облучения в зависимости от дозы β -облучения.

Методики экспериментов и характеристики микропорошков алюминия

В качестве объекта исследования выбраны микропорошки алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8, АСД-10, выпускающиеся в промышленном масштабе [7]. Согласно паспортным, данным дисперсность порошков возрастает по порядку увеличения номера в обозначении (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики микропорошков алюминия ($S_{уд}$ – площадь удельной поверхности, d_s – среднеповерхностный диаметр частиц, $\omega(Al)$ – массовая доля Al^0 , h – расчетная средняя толщина оксидной пленки)

Table 1. Characteristics of aluminum micro powders (S_{sp} – specific surface area, d_s – average particle diameter, $\omega(Al)$ – mass fraction of Al^0 , h – estimated average thickness of the oxide film)

Вид порошка Type of powder	$S_{уд}$, м ² /г S_{sp} , m ² /g	d_s , мкм/mkm	$\omega(Al)$ мас. % wt. %	h , нм/nm
АСД-6 ASD-6	0,51	4,36	98	11,9
АСД-6М ASD-6M	0,63	3,53	97	5,1
АСД-8 ASD-8	0,84	2,65	97	9,8
АСД-10 ASD-10	0,94	2,36	96	7,6

Для облучения микропорошков использовали ускоритель электронов ЭЛУ-4: энергия потока электронов – 4 МэВ, длительность импульса – 4,5 мкс, частота – 400 Гц. Образцы микропорошков облучали в тонком слое толщиной ~2 мм в виде конверта из алюминиевой фольги толщиной 8 мкм. Длина пробега электронов превышала толщину облучаемого образца, т. е. облучение проводили «на прострел». Дозу облучения определяли с использованием стандартной методики с использованием цилиндра Фарадея [8]. При выбранной интенсивности (0,01 мкА/см²) облучения температура поверхности образца не превышала 40 °С.

Для определения реакционной способности микропорошков алюминия использовали дифференциальный термический анализ (ДТА) при линейном повышении температуры со скоростью 10 град/мин в атмосфере воздуха (термоанализатор SDT Q600 фирмы «Instrument»). Из практики исследований для количественной оценки реак-

ционной способности порошков металлов использовали четыре параметра активности: температура начала окисления ($t_{но}$, °С), максимальная скорость окисления (V_{max} , мг/мин), степень окисленности порошков (α , %) и удельный тепловой эффект окисления (ΔH , кДж/моль) [9, 10]. Термограммы порошков регистрировали в одинаковых условиях: масса образца – 5 мг, скорость нагрева – 10 град/мин, максимальная температура нагрева – 1250 °С, атмосфера – воздух. В то же время ДТА использовали в качестве метода определения величины запасенной энергии путем вычитания из величины ΔH облученного порошка алюминия величины ΔH этого же порошка до облучения.

Результаты экспериментов

Параметры активности порошков являются тестом на их индивидуальную реакционную способность. В табл. 2 приведены 4 параметра активности исходных порошков алюминия перед облучением.

Таблица 2. Параметры активности исходных микропорошков алюминия (температура начала окисления ($t_{но}$, °С), максимальная скорость окисления (V_{max} , мг/мин), степень окисленности порошков (α , %) и удельный тепловой эффект окисления (ΔH , кДж/моль))

Table 2. Activity parameters of the initial aluminium micro powders (oxidation start temperature (t_{os} , °C), maximal oxidation rate (V_{max} , mg/min), oxidation degree (α , %) and the specific thermal effect (ΔH , kJ/mol))

Вид порошка Type of powder	$t_{но}/t_{ос}$, °С	V_{max} , мг/мин/mg/min	α , %	ΔH , кДж/моль/kJ/mol
АСД-6 ASD-6	550	0,12	21,3	117,8
АСД-6М ASD-6M	530	0,14	23,3	121,2
АСД-8 ASD-8	525	0,18	46,3	159,7
АСД-10 ASD-10	515	0,16	50,9	231,9

Параметры активности микропорошков (табл. 2) отражают их характеристики (табл. 1): с повышением дисперсности порошков реакционная способность возрастает: снижается температура начала окисления с 550 до 515 °С, и возрастает удельный тепловой эффект со 117,8 до 231,9 кДж/г. В то же время максимальная скорость окисления достигала своего максимального значения для АСД-8, а для порошка АСД-10 снизилась до 0,16 мг/мин.

Температуру начала окисления определяли по температуре начала увеличения массы при нагревании порошков (ТГ): результаты измерений $t_{но}$ представлены в табл. 3.

Максимальное снижение температуры начала окисления ($\Delta t_{но max}$) всех исследуемых порошков наблюдали после воздействия дозой 1 Мрад.

Максимальную скорость окисления определяли по отношению $\Delta m/\Delta t$ на линейном участке зависимости массы к температуре, соответствующей

линейному участку увеличения скорости. Полученную величину делили на 10 и получали скорость окисления в мг/мин.

Таблица 3. Температура начала окисления ($t_{\text{но}}$, °C) микронных порошков алюминия до и после β -облучения

Table 3. Oxidation start temperature (t_{os} , °C) of aluminum micron powders before and after β -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	$t_{\text{но}}/t_{\text{ос}}, ^\circ\text{C}$				$\Delta t_{\text{но max}}$ (доза) $\Delta t_{\text{ос max}}$ (exposure)
	Доза β -облучения, Мрад β -radiation exposure, Mrad				
	0	1	2	4	
АСД-6 ASD-6	550	345	515	475	205 (1 Мрад)/(1 Mrad)
АСД-6М ASD-6M	530	390	560	490	140 (1 Мрад)/(1 Mrad)
АСД-8 ASD-8	525	425	475	448	100 (1 Мрад)/(1 Mrad)
АСД-10 ASD-10	515	430	430	460	85 (1 Мрад)/(1 Mrad)

Таблица 4. Максимальная скорость окисления (V_{max} , мг/мин) микронных порошков алюминия до и после β -облучения

Table 4. Maximal oxidation rate (V_{max} , mg/min) of aluminum micron powders before and after β -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	V_{max} , мг/мин/mg/min				ΔV_{max} , мг/мин (доза) mg/min (exposure)
	Доза β -облучения, Мрад β -radiation exposure, Mrad				
	0	1	2	4	
АСД-6 ASD-6	0,12	0,08	0,17	0,10	0,05 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-6М ASD-6M	0,14	0,18	0,23	0,12	0,09 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-8 ASD-8	0,18	0,15	0,37	0,20	0,19 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-10 ASD-10	0,16	0,25	0,19	0,19	0,09 (1 Мрад)/(1 Mrad)

Максимальное увеличение максимальной скорости окисления (ΔV_{max}) наблюдали после облучения дозой 2 Мрад за исключением порошка АСД-10, для которого максимум скорости наблюдали после облучения дозой 1 Мрад. Увеличение V_{max} происходило при окислении порошка АСД-8 практически в 2 раза с 0,18 до 0,37 мг/мин после облучения дозой 2 Мрад (табл. 4).

После β -облучения степень окисленности с увеличением дозы изменялась неоднозначно: максимальных значений α достигала после облучения дозой 2 Мрад, но α порошка АСД-10 после облучения снизилась для всех доз облучения. Результаты расчетов α после β -облучения приведены в табл. 5, $\Delta\alpha_{\text{max}}$ рассчитывали как разность между максимальной величиной α после облучения и исходной α для порошков до их облучения.

До облучения исходные порошки (табл. 1) характеризовались явно выраженной зависимостью повышения α с ростом дисперсности порошков, но уже после облучения дозой 1 Мрад эта закономер-

ность нарушалась (табл. 5). После облучения порошка АСД-10 всеми дозами происходило снижение α : максимально в 4 раза после β -облучения дозой 1 Мрад.

Таблица 5. Степень окисленности (α , %) микронных порошков алюминия до и после β -облучения

Table 5. Oxidation degree (α , %) of aluminum micron powders before and after β -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	α , % (до/up to 1400 °C)				$\Delta\alpha_{\text{max}}$, % (доза)/(exposure)
	Доза β -облучения, Мрад β -radiation exposure, Mrad				
	0	1	2	4	
АСД-6 ASD-6	21,3	18,9	25,0	21,9	3,7 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-6М ASD-6M	23,3	17,8	42,2	21,1	18,9 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-8 ASD-8	40,3	26,1	44,4	30,3	-4,1 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-10 ASD-10	50,9	12,5	38,6	29,6	-12,3 (2 Мрад)/(2 Mrad)

Процесс окисления порошкообразного алюминия сопровождается выделением тепловой энергии (837 кДж/моль) и протекает в режиме саморазогрева – теплового взрыва [11]. Величины удельных тепловых эффектов, рассчитанные по данным дифференциального термического анализа, приведены в табл. 6.

Таблица 6. Удельный тепловой эффект окисления (ΔH , кДж/моль) микронных порошков алюминия до и после их β -облучения

Table 6. Specific heat effect of oxidation (ΔH , kJ/mol) of aluminum micron powders before and after β -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	ΔH , кДж/моль/kJ/mol				ΔH_{max} , кДж/моль (доза) kJ/mol (exposure)
	Доза β -облучения, Мрад β -radiation exposure, Mrad				
	0	1	2	4	
АСД-6 ASD-6	117,8	160,1	291,7	230,2	173,9 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-6М ASD-6M	121,2	136,2	170,6	178,5	57,3 (4 Мрад)/(4 Mrad)
АСД-8 ASD-8	159,7	261,6	339,2	255,6	179,5 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-10 ASD-10	231,9	309,3	420,5	298,8	188,6 (2 Мрад)/(2 Mrad)

Во всех экспериментах β -облучение привело к повышению удельного теплового эффекта окисления исследуемых порошков: максимальное повышение теплового эффекта (ΔH_{max}) наблюдалось после облучения дозой 2 Мрад, исключение составил образец порошка АСД-6М, для которого максимум ΔH наблюдался после облучения дозой 4 Мрад. Таким образом, максимальная запасенная энергия по величине превысила стандартную теплоту плавления после β -облучения в 5,4 (АСД-6М) и в 17,8 раз (АСД-10).

Обсуждение результатов

Микророшки алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8 и АСД-10 представляют собой композит, в структуре которого имеется фаза металла и рентгенаморфная фаза оксидов и гидроксидов [12–14]. Облучение микророшков потоком ускоренных электронов действует на обе фазы. После облучения реакционная способность порошков металлов повышалась (табл. 3); температура начала окисления для всех изучаемых порошков снижалась (1 Мрад). Вероятной причиной снижения является генерирование дефектов в оксидно-гидроксидной оболочке потоком β -частиц [15]. Максимально $t_{\text{но}}$ после облучения снизилась на 205 °С, т. е. реакционная способность порошков алюминия возросла. Облучение порошков алюминия потоком β -частиц привело в целом к повышению V_{max} максимально в 2 раза (табл. 4), что коррелирует с понижением термической устойчивости оксидно-гидроксидной оболочки на поверхности частиц алюминия (табл. 3). При нагревании порошков алюминия наряду с окислением протекают процессы спекания и слияния капель жидкого алюминия [16, 17], что снижает дисперсность и степень окисленности порошка [18]. Действительно, наиболее дисперсный и более склонный к спеканию порошок АСД-10 характеризуется снижением α после облучения (табл. 5). Наиболее значительным действием β -облучения является увеличение удельного теплового эффекта окисления, в 5,4–17,8 раз превышающего стандартное значение теплоты плавления алюминия, и это обусловлено наличием запасенной энергии [19, 20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко П.С. Методика измерения запасенной энергии в облученных материалах. – Дмитровград: НИИАР им. В.И. Ленина (П-168), 1972. – 44 с.
2. Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.
3. Ушаков В.Я., Боев С.Г. Радиационное накопление зарядов в твердых диэлектриках и методы его диагностики. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
4. Воробьев А.А., Завадовская Е.К., Головачевский Е.М. Запасенная энергия в щелочногалогидных кристаллах // Известия Томского политехнического института. – 1969. – Т. 170. – С. 8–24.
5. Fundamentals of the Interaction of Electron Beams with Matter / H. Svensson, P. Almond, A. Brahme, A. Dutreix, H.K. Leetz // Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements. – 1984. – V. 18. – Iss. 2. – P. 3–41.
6. Mills K.C., Däcker C.-Å. The Casting Powders Book. – Springer Int. Publ. AG, 2017. – 550 p.
7. Conditions of Millisecond Laser Ignition and Thermostability for Ammonium Perchlorate/Aluminum Mixtures / V.V. Medvedev, V.P. Tspilev, A.A. Reshetov, A.P. Ilyin // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2017. – V. 42. – Iss. 3. – P. 243–246.
8. Физический энциклопедический словарь / под ред. А.М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – С. 149–151.
9. Wendlandt W.W. Thermal Methods of Analysis. 2nd ed. – NY: John Wiley & Sons, 1974. – 524 p.

При нагревании запасенная энергия проявляется в форме дополнительного энергетического выделения и стимулирует процессы спекания [21], горения [22], химические реакции [21] и др. Следовательно, β -облучение способствует формированию наноструктур [23], активизирует микророшки алюминия, что перспективно для применения в процессах 3D-печати, в порошковой металлургии [24], при горении [25], в химических реакциях [26], при изготовлении специальной керамики [27] и других процессах.

Выводы

1. Облучение микророшков алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8, АСД-10 потоком ускоренных β -частиц приводило к повышению их реакционной способности: снижалась температура начала окисления максимально на 205 °С (АСД-6, 1 Мрад), увеличивалась максимальная скорость окисления максимально в 2 раза (АСД-8, 2 Мрад), степень окисленности максимально увеличивалась на 81,1 % (АСД-6М, 2 Мрад), и повышался удельный тепловой эффект окисления максимально на 81,3 % (АСД-10, 2 Мрад).
2. Облучение микророшков алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8 и АСД-10 потоком β -частиц приводило к повышению запасенной энергии максимально на 57,3–188,6 кДж/моль, что в 5,4–17,8 раз больше стандартной теплоты плавления алюминия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 11.1928.2017/4.6, и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-03-00160.

10. Characterization of Aluminum Powders I. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders / A. Ilyin, A. Gromov, V. An, F. Faubert, C. de Izarra, A. Espagnacq, L. Brunet // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2002. – V. 27. – Iss. 6. – P. 361–364.
11. Федоров А.В., Харламова Ю.В. Воспламенение частиц алюминия // Физика горения и взрыва. – 2003. – Т. 39. – № 5. – С. 65–68.
12. Heat release measurements on micron and nano-scale aluminum powders / A. Morgan, I. Wolf, E. Gulians et al. // Thermochimica Acta. – 2009. – V. 488. – P. 1–9.
13. Alexander M.R., Thompson G.E., Beamson G. Characterization of oxide/hydroxide surface of aluminium using x-ray photoelectron spectroscopy: a procedure for curve fitting the O 1s core level // Surface and Interface Analysis. – 2000. – V. 29. – Iss. 7. – P. 468–477.
14. Influence of Dispersivity of Micron-Sized Aluminium Powders on their Resistance to Water Vapor / S.V. Zmanovskiy, V.V. Smirnova, A.V. Korshunov, A.P. Ilyin // Key Engineering Materials. – 2017. – V. 712. – P. 251–255.
15. Beckstead M.W. A Summary of Aluminum Combustion. – Provo, Utah, USA: Brigham Young University, 2002. – 45 p.
16. Ивсен В.А. Феноменология спекания. – М.: Металлургия, 1985. – 247 с.
17. Гегузин Я.Е. Физика спекания. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
18. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
19. Ильин А.И., Крапошин В.С. Стеклообразные структуры в металлических сплавах, подвергнутых действию высокоэнерге-

- тических пучков // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1985. – № 6. – С. 5–16.
20. Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Egorov I.S. Effect of electron beam irradiation on the thermal properties of the aluminum nanopowder // Radiation Physics and Chemistry. – 2018. – V. 153. – P. 156–158.
21. Bing-She Xu, Shun-Ichiro Tanaka. Behavior and bonding mechanisms of aluminum nanoparticles by electron beam irradiation // Nanostructured Materials. – 1999. – V. 12. – P. 915–918.
22. Жуков Б.П. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. – М.: Янус-К, 2000. – 596 с.
23. Electron-beam induced synthesis of nanostructures: a review / I.G. Gonzalez-Martinez, A. Bachmatiuk, V. Bezugly, J. Kunstmann, T. Gemming, Z. Liu, G. Guniberti, M.H. Rummeli // Nanoscale. – 2016. – V. 8. – P. 11340–11362.
24. Sergeev G.B., Klabunde K.J. Nanochemistry. 2nd ed. – Elsevier, 2013. – 372 p.
25. Brown L.E. A comparative study of fuels for on-board hydrogen production for fuel-cell-powered automobiles // International Journal on Hydrogen Energy. – 2001. – V. 26. – P. 381–397.
26. Сравнительная оценка различных методов гидролизного получения водорода / Л.И. Тунгусова, А.Л. Дмитриев, В.Г. Гришин, Н.С. Прохоров // Химическая промышленность. – 2003. – Т. 80. – № 9. – С. 14–18.
27. On the effects of powder morphology on the post-comminution ballistic strength of ceramics / G.J. Appleby-Thomas, D.C. Wood, A. Hameed, J. Painter, B. Fitzmaurice // International Journal of Impact Engineering. – 2017. – V. 100. – P. 46–55.

Поступила 14.02.2019 г.

Информация об авторах

Ильин А.П., доктор физико-математических наук, профессор отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мостовщиков А.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории СВЧ-технологий Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, доцент кафедры физической электроники Факультета электронной техники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Роот Л.О., кандидат технических наук, доцент отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Змановский С.В., кандидат технических наук, директор Центра инноваций ООО «СУАЛ ПМ».

Исмаилов Д.В., аспирант Казахского национального университета им. Аль-Фараби.

Рузиева Г.У., магистрант Казахского национального университета им. Аль-Фараби.

UDC 544.5

EFFECT OF BETA-RADIATION EXPOSURE ON THE PARAMETERS OF ALUMINUM MICROPOWDERS ACTIVITY

Alexander P. Ilyin¹,

ilyin@tpu.ru

Andrei V. Mostovshchikov^{1,2},

avmost@tpu.ru

Lyudmila O. Root¹,

tolbanova@mail.ru

Sergey V. Zmanovskiy³,

zmanovskiy@rusal.com

Daniyar V. Ismailov⁴,

Ismailov_Daniyar_V@bk.ru

Guzel U. Ruzieva⁴,

guzel.ruzieva@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ OOO SUAL PM,
2, Yuzhnaya street, Shelekhov, Russia.

⁴ Al-Farabi Kazakh National University,
71, Al-Farabi avenue, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan.

The relevance. Aluminum micropowders are the precursors in many industries, such as powder metallurgy, self-propagating high-temperature synthesis of new materials, hydrogen energy, pyrotechnics and rocket fuels. Improvement of characteristics of aluminum powders contributes to their quality. The known methods of aluminum powders activation by addition of rare-earth elements, vanadium compounds, silicon, boron and other elements into the aluminum mixtures composition lead to contamination of aluminum with impurities. β -radiation exposure of micropowders with the energy less than 8 MeV does not lead to induced radioactivity and activates aluminum micropowders at the same time.

The main aim of the paper was reception and explanation of experimental results on the activity parameters of aluminum micro-powders after exposure, depending on the β -radiation dose.

Objects: micron-scaled aluminium powders ASD-6, ASD-6M, ASD-8, ASD-10 obtained by aluminium fusion sputtering.

Methods: differential thermal analysis, X-ray diffraction analysis, the method of aluminum micropowders exposure with β -radiation, the method of calculation of the activity parameters of aluminum powders.

Results. The quantitative indicators of the ASD-6, ASD-6M, ASD-8, ASD-10 aluminum micro-powders reactivity before and after exposure in the ELU-4 accelerator by 4-MeV β -radiation (i. e. the energy is significantly lower than the threshold of photonuclear reactions) were obtained in the work. The doses of powder samples exposure were 1, 2, 4 Mrad. After β -radiation exposure the oxidation start temperature decreased maximally to 205 °C; maximum oxidation rate increased by 0,19 mg/min (106 m%); the oxidation degree of the ASD-6M micropowder increased by 18,9 %, and of the ASD-10 minimally decreased by 12,3 %; the specific thermal effect of oxidation after all doses of β -radiation increased maximally for ASD-10 by 188,6 kJ/mol. Energy storage by micropowders after β -radiation is caused by the formation of a double electric layer in aluminum particles.

Key words:

Micropowders, aluminum, activity parameters, exposure, β -radiation, stored energy, heat of fusion.

This work was financially supported by The Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Project No. 11.1928.2017/4.6, and by the Russian Fund of Fundamental Investigations, Project No. 19–03–00160.

REFERENCES

- Gordienko P.S. *Metodika izmereniya zapasnoy energii v obluchennykh materialakh* [Methods for measuring of stored energy in irradiated materials]. Dimitrovgrad, NIAR im. V.I. Lenina (P-168) Publ., 1972. 44 p.
- Samoylov O.B., Usynin G.B., Bakhmetyev A.M. *Bezopasnost yadernykh energeticheskikh ustanovok* [Safety of nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 280 p.
- Ushakov V.Ya., Boev S.G. *Radiatsionnoe nakoplenie zaryadov v tverdykh dielektrikakh i metody ego diagnostiki* [Radiation accumulation of charge in solid dielectrics and the methods of its diagnostics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 240 p.
- Vorobyev A.A., Zavazovskaya E.K., Golovchanskiy E.M. *Zapassennaya energiya v shchelochnogaloidnykh kristallakh* [The stored energy in alkaline halide crystals]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*, 1969, vol. 170, pp. 8–24.
- Svensson H., Almond P., Brahme A., Dutreix A., Leetz H.K. Fundamentals of the Interaction of Electron Beams with Matter. *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, 1984, vol. 18, Iss. 2, pp. 3–41.
- Mills K.C., Däcker C.-Å. *The Casting Powders Book*. Springer Int. Publ. AG, 2017. 550 p.
- Medvedev V.V., Tsipilev V.P., Reshetov A.A., Ilyin A.P. Conditions of Millisecond Laser Ignition and Thermostability for Ammonium Perchlorate/Aluminum Mixtures. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, vol. 42, Iss. 3, pp. 243–246.
- Fizicheskii entsiklopedicheskiy slovar* [Physical Encyclopedic Dictionary]. Ed. by A.M. Prokhorov. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1984. pp. 149–151.
- Wendlandt W.W. *Thermal Methods of Analysis*. 2nd ed. NY, John Wiley & Sons, 1974. 524 p.
- Ilyin A., Gromov A., An V., Faubert F., de Izarra C., Espagnacq A., Brunet L. Characterization of Aluminum Powders I. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, vol. 27, Iss. 6, pp. 361–364.
- Fedorov A.V., Kharlamova Yu.V. Vosplamnenie chastits alyuminiya [Aluminium particles ignition]. *Fizika gorennya i vzryva*, 2003, vol. 39, no. 5, pp. 65–68.
- Morgan A., Wolf I., Gulians E. Heat release measurements on micron and nano-scale aluminum powders. *Thermochimica Acta*, 2009, vol. 488, pp. 1–9.
- Alexander M.R., Thompson G.E., Beamson G. Characterization of oxide/hydroxide surface of aluminium using x-ray photoelectron spectroscopy: a procedure for curve fitting the O 1s core level. *Surface and Interface Analysis*, 2000, vol. 29, Iss. 7, pp. 468–477.
- Zmanovskiy S.V., Smirnova V.V., Korshunov A.V., Ilyin A.P. Influence of Dispersivity of Micron-Sized Aluminium Powders on their Resistance to Water Vapor. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 712, pp. 251–255.
- Beckstead M.W. *A Summary of Aluminum Combustion*. Provo, Utah, USA, Brigham Young University, 2002. 45 p.
- Ivensen V.A. *Fenomenologiya spevaniya* [Phenomenology of sintering]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 247 p.
- Geguzin Ya.E. *Fizika spevaniya* [Physics of sintering]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 312 p.
- Antsiferov V.N., Bobrov G.V., Druzhinin L.K. *Poroshkovaya metallurgiya i napylenye pokrytiya* [Powder metallurgy and sprayed coatings]. Moscow, Metallurgiya publ., 1987. 792 p.
- Ilyin A.I., Kraposhin V.S. *Stekloobraznye struktury v metallicheskiykh splavakh, podvergnutykh deystviyu vysokoenergeticheskikh puchkov* [Glasslike structures in metal alloys subjected to high-energy beams]. *Poverkhnost. Fizika, khimiya, mekhanika*, 1985, no. 6, pp. 5–16.
- Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Egorov I.S., Effect of electron beam irradiation on the thermal properties of the aluminum nanopowder. *Radiation Physics and Chemistry*, 2018, vol. 153, pp. 156–158.
- Bing-She Xu, Shun-Ichiro Tanaka. Behavior and bonding mechanisms of aluminum nanoparticles by electron beam irradiation. *Nanostructured Materials*, 1999, vol. 12, pp. 915–918.
- Zhukov B.P. *Energeticheskie kondensirovannye sistemy. Kratkiy entsiklopedicheskiy slovar* [Energy condensed systems. A brief encyclopedic dictionary]. Moscow, Yanus-K Publ., 2000. 596 p.
- Gonzalez-Martinez I.G., Bachmatiuk A., Bezugly V., Kunstmann J., Gemming T., Liu Z., Guniberti G., Rummeli M.H. Electron-beam induced synthesis of nanostructures: a review. *Nanoscale*, 2016, vol. 8, pp. 11340–11362.
- Sergeev G.B., Klabunde K.J. *Nanochemistry*. 2nd ed. Elsevier, 2013. 372 p.
- Brown L.E. A comparative study of fuels for on-board hydrogen production for fuel-cell-powered automobiles. *International Journal on Hydrogen Energy*, 2001, vol. 26, pp. 381–397.
- Tungusova L.I., Dmitriev A.L., Grishin V.G., Prokhorov N.S. *Sravnitel'naya otsenka razlichnykh metodov gidroliznogo polucheniya vodoroda* [Comparative evaluation of various methods of hydrolyzing production of hydrogen]. *Khimicheskaya promyshlennost*, 2003, vol. 80, no. 9, pp. 14–18.
- Appleby-Thomas G.J., Wood D.C., Hameed A., Painter J., Fitzmaurice B. On the effects of powder morphology on the post-comminution ballistic strength of ceramics. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, vol. 100, pp. 46–55.

Received: 14 February 2019.

Information about the authors

Alexander P. Ilyin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrei V. Mostovshchikov, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, associate professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Lyudmila O. Root, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey V. Zmanovskiy, Cand. Sc., head of Innovation Centre of «SUAL PM».

Daniyar V. Ismailov, postgraduate student, Al-Farabi Kazakh National University.

Guzel U. Ruzieva, student, Al-Farabi Kazakh National University.