

## СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МАГНИЯ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕЕ ИМПУЛЬСНЫМ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А.Е. Лигачев<sup>1)</sup>, М.В. Жидков<sup>2)</sup>, Г.В. Потемкин<sup>3)</sup>, С. Сорокин<sup>4)</sup>, Ю.Р. Колобов<sup>2), 5)</sup>

<sup>1)</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,

ул. Вавилова 38, 119991 Москва, Россия, carbin@yandex.ru

<sup>2)</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет,

ул. Королева 2а, 308034 Белгород, Россия, zhidkov@bsu.edu.ru

<sup>3)</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,

пр. Академический 2/3, 634055 Томск, Россия

<sup>4)</sup>Институт проблем химической физики РАН,

ул. Лесная 9, 142432 Черноголовка, Россия, kolobov@\_bsu.edu.ru

<sup>5)</sup>Томский политехнический университет,

ул. Ленина 2а, 634050 Томск, Россия, ep.gvp@yandex.ru

Исследовано влияние потока мягкого импульсного рентгеновского излучения (плотности энергии излучения на поверхности образца за один импульс  $\sim 11$  Дж/см<sup>2</sup>) на топографию поверхности магния. В результате плавления и последующего затвердевания на поверхности магния формируется волнистый рельеф после воздействия одного импульса; после воздействия двух и более импульсов поверхность магния покрывается кратерами округлой формы различного диаметра.

**Ключевые слова:** магний; мягкое рентгеновское излучение; топография; структура.

## CONDITION OF SURFACE OF MAGNEZIUM AFTER PULSED X-RAY EXPOSURE

A.E. Ligachev<sup>1)</sup>, M.V. Zhidkov<sup>2)</sup>, G.V. Potemkin<sup>3)</sup>, S.A. Sorokin<sup>4)</sup>, Yu.R. Kolobov<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,

38 Vavilova Str., 199991 Moscow, Russia, carbin@yandex.ru

<sup>2)</sup>Belgorod state national research University,

85 Pobedy Str., 308015 Belgorod, Russia, zhidkov@bsu.edu.ru

<sup>3)</sup>National research Tomsk Polytechnic University,

30 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia, ep.gvp@yandex.ru

<sup>4)</sup>Institute of High Current Electronics, Russian Academy of Sciences,

2/3 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russia

<sup>5)</sup>Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,

142432 Chernogolovka, Russia

The effect of the pulsed soft X-ray flux on the topography of surface the magnezium has been studied. The radiation energy density on the surface of the sample is  $\sim 10$  J/cm for one pulse. It is found that a corrugated topography is formed on the surface of magnezium as a result of melting followed by freezing.

**Keywords:** magnesium; soft X-ray; topography; structure.

### Введение

Исследованиям формирования топографии и структуры поверхностного слоя металлов и сплавов под воздействием мощных потоков мягкого импульсного рентгеновского излучения (МИРИ) [5] до настоящего времени уделялось скромное внимание в отличие от вопросов связанных с модификацией поверхности мощными импульсными электронными, ионными пучками или лазерным излучением [1-3, 6-10]. Разработка современных конструкционных материалов требует расширения ассортимента используемых металлов и сплавов и углубления знаний о процессах протекающих под действием мощных потоков энергии для направленного изменения свойств поверхностных слоев различных металлов. С этими целями на установке МИГ [4] нами были проведены эксперименты по модификации МИРИ поверхности магния.

### Материал и методика эксперимента

В качестве объекта исследований использовался технически чистый магний (99.9%). Образцы перед поверхностной обработкой мягким рентгеновским излучением (энергия квантов 0.1-1.0 кэВ) подвергались шлифовке и полировке. Облучение образца МИРИ проводили на сильноточном генераторе МИГ [4]. Образец располагался в 10 см от источника рентгеновского излучения. Так как расстояние до облучаемого образца существенно больше размера источника рентгеновского излучения, то плотность потока излучения на образец однородна. Длительность импульса (или одной дозы) излучения равнялась 60 нс. Энергия, излучаемая источником за импульс, составляла 10-12 ( $\pm 2$ ) кДж, что соответствует плотности энергии излучения на поверхности образца около 11 Дж/см<sup>2</sup>. Число доз облучения: один и два импульса.

Исследования топографии и структуры поверхности образцов после облучения проводили с ис-

пользованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Quanta 600 FEG, оснащенного энергодисперсионным спектрометром (разрешение спектрометра 127.1 эВ по MnK $\alpha$ , элементы с Be).

### Результаты и их обсуждение

Согласно данным растровой электронной микроскопии после обработки магния потоком рентгеновского излучения изменяется топография его поверхности (рис. 1, 2).

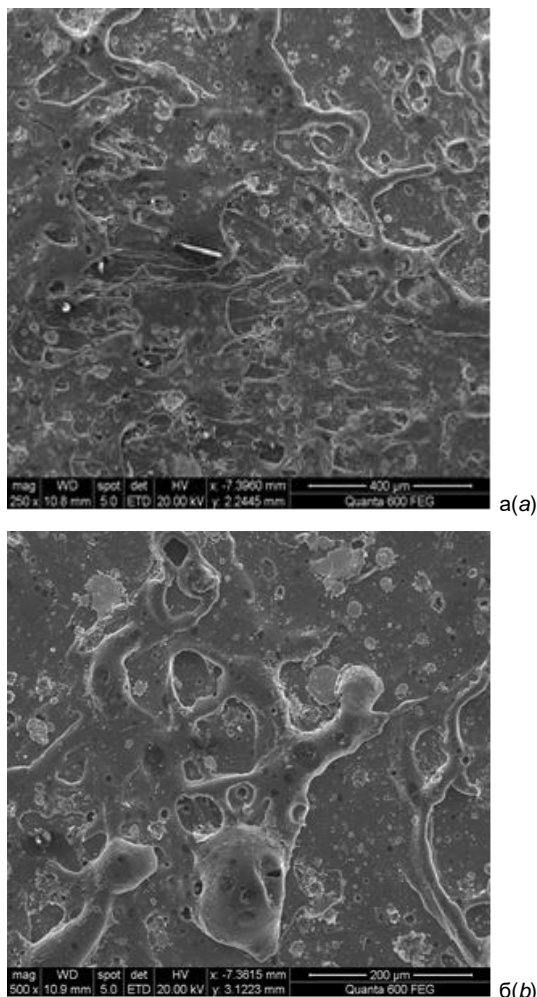


Рис. 1. Рельеф поверхности магния после воздействия одного импульса МИРИ

Fig. 1. Relief of magnesium surface after exposure to a single pulse of soft pulsed X-rays

После обработки одним импульсом рентгеновского излучения на поверхности магния формируется рельеф, состоящий из затвердевших областей (в виде волн) жидкого металла, из-за оплавления приповерхностного слоя магния (рис. 1, а, б). Размер и расположение волн по поверхности облучения носит хаотический характер. Так же на поверхности магния присутствуют кратеры различной формы (рис. 1, б).

В результате воздействия второго импульса на поверхности первичных волн (образовавшихся после первого импульса) застывшего магния возникает множество кратеров овальной форм и различ-

ного диаметра, сформировавшихся практически на всей облученной поверхности (рис. 2, б). По периметру очень значительного количества кратеров (на их внешней стороне, рис. 2, б) заметно утолщение, возникновение которого, скорее всего, связано с кипением жидкого металла под действием второго импульса МИРИ. Следует отметить, что образование кратеров за счет возможного кипения жидкого металла приповерхностного слоя наблюдается только после второго импульса МИРИ. Пока мы можем предположить, что после первого импульса жидкий приповерхностный слой магния мог поглотить значительное количество газов из окружающего воздуха, и во время воздействия второго импульса МИРИ растворенный в приповерхностном слое магния газ в виде пузырьков выходит на поверхность. В результате быстрого охлаждения приповерхностного слоя магния (когда действие импульса МИРИ на металл закончилось) поверхность кипения затвердевает, что мы и наблюдаем на рисунке 2, б.

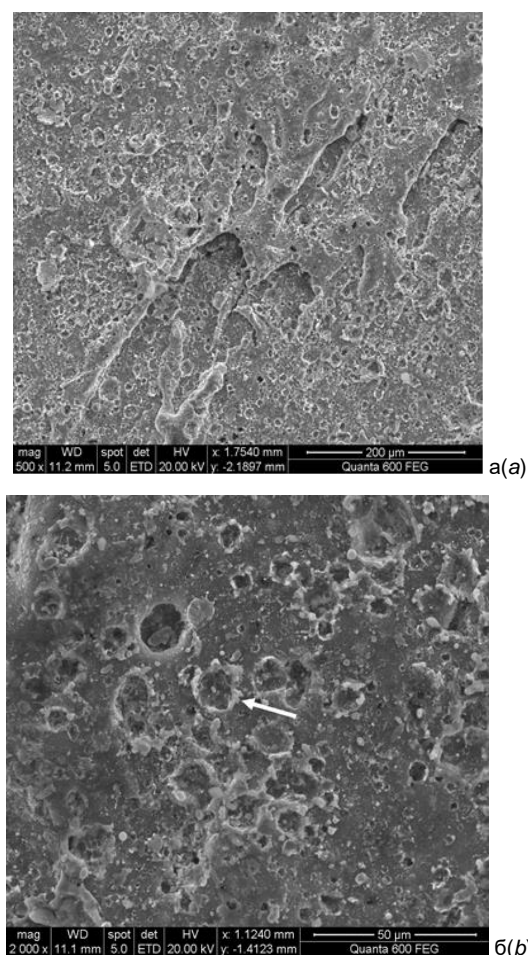


Рис. 2. Рельеф поверхности магния после воздействия двух импульсов МИРИ.

Fig. 1. Relief of magnesium surface after exposure two pulses of soft pulsed X-rays

### Заключение

При воздействии наносекундных импульсов мягкого рентгеновского излучения на поверхности

магния в результате его плавления и последующего затвердевания формируется волнистый рельеф и рельеф, покрытый кратерами различной формы и размера. Вызывает дальнейший интерес изучение изменений структурно-фазового состояния приповерхностных слоев и физико-химических свойств магния и его сплавов после такого вида поверхностной обработки. Работы в данном направлении будут продолжены.

Исследование выполнено при поддержке государственного Программы Президиума РАН 11П.

### Библиографические ссылки

1. Korotaev A.D., Tyumentsev A.N., Pinzhin Yu.P., Remnev G.E. Features of the morphology, defect substructure, and phase composition of metal and alloy surfaces upon high-power ion beam irradiation. *Surface & Coatings Technology* 2004; (185): 38-49.
2. Sinyakova E., Panin A., Perevalova O., Kazachenok M., Ivanov Y. & Kalashnikov M. Structure changes in the surface layers of Ti-6Al-4V titanium alloy under electron beam treatment. Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures (9.10.17-13.10.17): Tomsk, Russia. American Institute of Physics Inc., 2017: 1909. P.020198.
3. Kolobov Yu. R., Golosov E. V., Vershinina T. N., Zhidkov M.V., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Ligachev A.E. Structural transformation and residual stresses in surface layers of alpha plus beta titanium alloys nanotextured by femtosecond laser pulses. *Applied Physics A* 2015; 119 (1): 241-247.
4. Кабламбаев Б.А., Лучинский А.В., Петин В.К., Ратахин Н.А., Сорокин С.А., Федущак В.Ф., и др. Установка МИГ-универсальный рентгеновский источник. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру* 2001; (3-4): 149-155.
5. Ligachev A.E., Zhidkov M.V., Potemkin G.V., Sorokin S.A., Kolobov Yu. R. Condition of Surface of Titanium after Pulsed X-ray Exposure. *Inorganic Materials: Applied Research* 2019; 10(3): 541-543.
6. Черненко А.С., Королев В.Д., Устроев Г.И., Иванов М.И., Александрин С.Ю., Хунчунь Ц. Динамика энергетического спектра мягкого энергетического спектраизлучения плазмы при имплозии многопроволочных лайнеров на установке С-300. *Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез* 2004; (2):25-34.
7. Жариков И.Ф., Немчинов И.В., Цикулин М.А. Исследование воздействия на твердое тело светового излучения, полученного при помощи источника взрывного типа. *Прикладная механика и техническая физика* 1967; (1): 31-44.
8. Афанасьев В. В., Кроль В.М., Крохин О.Н., Немчинов И.В. Газодинамические процессы при нагревании вещества излучением лазера. *Прикладная математика и механика* 1966; 31 (6).
9. Зельдович Я. Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Москва: Наука; 1966. 686 с.
10. Афанасьев Ю.В., Крохин О.Н. Испарение вещества под действием излучения лазера. *Журнал*

*экспериментальной и теоретической физики* 1967; (52): 966-975.

### References

1. Korotaev A.D., Tyumentsev A.N., Pinzhin Yu.P., Remnev G.E. Features of the morphology, defect substructure, and phase composition of metal and alloy surfaces upon high-power ion beam irradiation. *Surface & Coatings Technology* 2004; (185): 38-49.
2. Sinyakova E., Panin A., Perevalova O., Kazachenok M., Ivanov Y. & Kalashnikov M. Structure changes in the surface layers of Ti-6Al-4V titanium alloy under electron beam treatment. Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures (9.10.17-13.10.17): Tomsk, Russia. American Institute of Physics Inc., 2017: 1909. P.020198.
3. Kolobov Yu. R., Golosov E. V., Vershinina T. N., Zhidkov M.V., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Ligachev A.E. Structural transformation and residual stresses in surface layers of alpha plus beta titanium alloys nanotextured by femtosecond laser pulses. *Applied Physics A* 2015; 119 (1): 241-247.
4. Kalambaev B.A., Luchinsky A.V., Petin V.K., Ratakhin N.A. Sorokin S.A., Feduschak V.F., Ustanovka MIG-universal'nyy rentgenovskiy istochnik [Installation MIG is a universal x-ray source. Issues of nuclear science and technology]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnuyu apparaturu* 2001; (3-4):149-155. (In Russian)
5. Ligachev A.E., Zhidkov M.V., Potemkin G.V., Sorokin S.A., Kolobov Yu.R. Condition of Surface of Titanium after Pulsed X-ray Exposure. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2019; 10(3): 541-543.
6. Chernenko A.S., Korolev V.D., Ustroev G.I., Ivanov M.I., Aleksandrin S.Yu., Khunchun' Ts. Dinamika energeticheskogo spektra myagkogo energeticheskogo spektra izlucheniya plazmy pri implozii mnogoprovolochnykh laynerov na ustanovke S-300 [Dynamics of the energy spectrum of the soft energy spectrum of plasma radiation during implosion of multi-wire liners at the s-300 unit]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya Termoyadernyy sintez* 2004; (2): 25-34. (In Russian)
7. Zharikov I.F., Nemchinov I.V., Tsikulin M.A. Issledovanie vozdeystviya na tverdoe telo svetovogo izlucheniya, poluchennogo pri pomoshchi istochnika vzryvnogo tipa [Investigation of the effect on a solid body of light radiation obtained by an explosive source]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* 1967; (1): 31-44. (In Russian)
8. Afanas'ev V.V., Krol' V.M., Krokhin O.N., Nemchinov I.V. Gazodinamicheskie protsessy pri nagrevanii veshchestva izlucheniem lazera [Gas-dynamic processes when heated by laser radiation]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* 1966; 31 (6). (In Russian)
9. Zel'dovich Ya.B., Rayzer Yu.P. Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moskva: Nauka; 1966. 686 p. (In Russian)
10. Afanas'ev Yu.V., Krokhin O.N. Isparenie veshchestva pod deystviem izlucheniya lazera [Evaporation of the substance under the action of laser radiation]. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* 1967; (52): 966-975. (In Russian)