

УДК 539.211:539.1.06

**О. Г. Бобрович<sup>1</sup>, С. М. Барайшук<sup>2</sup>, А. И. Туровец<sup>3</sup>, В. В. Яскельчик<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет<sup>3</sup>Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка**МОРФОЛОГИЯ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА АМГ2М,  
МОДИФИЦИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЕМ МОЛИБДЕНА  
В УСЛОВИЯХ ИОННОГО АССИСТИРОВАНИЯ**

В данной работе изучали закономерности смачивания и микротвердость поверхности алюминиевого сплава АМГ2М после модифицирования осаждением молибдена в условиях ионного ассистирования при ускоряющем напряжении 3, 6, 9, 12 и 15 кВ для ассистирующих ионов  $\text{Mo}^+$  и интегральных потоков ионов  $(1,1-2,1) \cdot 10^{17} \text{Mo}^+/\text{cm}^2$ . Морфология поверхности исходных и модифицированных образцов изучалась с использованием атомно-силовой микроскопии в контактном режиме. Смачивание исходных и модифицированных образцов сплава АМГ2М дистиллированной водой определяли по равновесному краевому углу  $\theta$  смачивания (РКУС). Средняя шероховатость исходного образца сплава АМГ2М составляла 34,3 нм и снижалась при увеличении ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов  $\text{Mo}^+$  до 7,8 нм при  $U = 12$  кВ и до 9,9 нм при  $U = 15$  кВ. При внедрении сравнимых доз ионов молибдена в образцы сплава с увеличением ускоряющего напряжения значения РКУС также увеличиваются. Исходная поверхность сплава была гидрофильной ( $\theta = 64,8^\circ$ ) и оставалась гидрофильной после модифицирования при  $U = 3$  и 6 кВ. После модифицирования сплава при  $U = 9, 12, 15$  кВ для ассистирующих ионов поверхность стала гидрофобной и значение РКУС увеличилось до  $\theta = 98,1^\circ$  при 15 кВ. Относительное изменение микротвердости модифицированных образцов увеличилось на 15% при  $U = 9$  кВ и уменьшилось на 8% при  $U = 6$  кВ.

**Ключевые слова:** сплав алюминия АМГ2М, Мо-покрытия, смачиваемость, гидрофобная и гидрофильная поверхность, микротвердость.

**O. G. Bobrovich<sup>1</sup>, S. M. Barayshuk<sup>2</sup>, A. I. Turovets<sup>3</sup>, V. V. Yaskel'chik<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>Belarusian State Agrarian Technical University<sup>3</sup>Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank**MORPHOLOGY AND SURFACE PROPERTIES OF ALLOY 5251, MODIFIED  
BY DEPOSITION OF MOLYBDENUM IN CONDITIONS OF ION ASSISTANCE**

In this paper we studied the wetting behavior and microhardness of the surface of the aluminum alloy 5251 after modification by the deposition of molybdenum under ion assisting conditions at an accelerating voltage of 3, 6, 9, 12 and 15 kV for assisting  $\text{Mo}^+$  ions and integral ion fluxes of  $(1.1-2.1) \cdot 10^{17} \text{Mo}^+/\text{cm}^2$ . The morphology of the surface of the initial and modified samples was studied using atomic-force microscopy in the contact regime. Wetting of the initial and modified samples of the alloy 5251 with distilled water was determined from the equilibrium contact angle  $\theta$  of the wetting. The average roughness of the initial sample of the alloy 5251 was 34.3 nm and decreased with an increase in the accelerating voltage for the assisting  $\text{Mo}^+$  ions to 7.8 nm at  $U = 12$  kV and 9.9 nm at  $U = 15$  kV. When the comparable doses of molybdenum ions were introduced into the samples of the alloy with an increase in the accelerating voltage, the values of the contact angle of wetting also increased. The initial surface of the alloy was hydrophilic ( $\theta = 64.8^\circ$ ) and remained hydrophilic after modification at  $U = 3$  and 6 kV. After modifying the alloy at  $U = 9, 12, 15$  kV for assisting ions, the surface became hydrophobic and the value of the contact angle of wetting increased to  $\theta = 98.1^\circ$  at 15 kV. The relative change in the microhardness of the modified samples increases by 15% at  $U = 9$  kV and decreases by 8% at  $U = 6$  kV.

**Key words:** aluminum alloy 5251, Mo-coating, wettability, hydrophobic and hydrophilic surface, microhardness.

**Введение.** Алюминиевые сплавы широко используются во многих отраслях промышленности, в том числе связанных с развитием энергосберегающих технологий, в качестве

конструкционных материалов современной техники [1]. Структура и свойства поверхности и приповерхностных слоев алюминиевых сплавов определяют их функциональные и

эксплуатационные характеристики, такие как износостойкость, коррозионная стойкость, микротвердость, смачивание поверхности [2–4]. Применение ионных пучков вызывает в материале как химические, так и физические изменения. Для улучшения физико-механических и физико-химических свойств алюминиевых сплавов используются различные методы ионно-лучевой модификации. В данной работе изучали закономерности смачивания и микротвердость поверхности алюминиевого сплава АМг2М после модифицирования осаждением молибдена в условиях ионного ассистирования. Покрытия Мо наносились на сплав АМг2М с использованием резонансного ионного источника вакуумной электродуговой плазмы. Данный источник создает плазму вакуумного электродугового разряда, в которой одновременно генерируются положительные ионы и нейтральная фракция из материала электродов источника ионов. В качестве материала электродов использовался чистый молибден 99,9%. Осаждение молибденового покрытия проводили при ускоряющем напряжении 3, 6, 9, 12 и 15 кВ для ассистирующих ионов  $\text{Mo}^+$  и интегральных потоков ионов  $(1,1\text{--}2,1) \cdot 10^{17} \text{Mo}^+/\text{см}^2$ . Морфология поверхности исходных и модифицированных образцов изучалась с использованием атомно-силовой микроскопии в контактном режиме (атомно-силовой микроскоп NT-206, зонды CSC21), а измерение микротвердости проведено на приборе AFFRI–MVDM8 методом Виккерса. Смачивание исходных и модифицированных образцов сплава АМг2М дистиллированной водой определяли по равновесному краевому углу  $\theta$  смачивания (РКУС). Краевой угол определяли по основным размерам капель воды, наносимой на исследуемые образцы: по высоте и диаметру ее основания. Для получения воспроизводимых результатов капли воды, наносимые на образцы, имели примерно одинаковый объем  $V = (47,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ мл}$ . Погрешность в измерении РКУС составляла не более 2%.

**Основная часть.** Метод атомно-силовой микроскопии использовался для изучения топографии и шероховатости исходных и модифицированных образцов сплава алюминия. На рис. 1 показаны изображения исходной поверхности сплава АМг2М и модифицированной осаждением Мо в условиях ионного ассистирования при ускоряющем напряжении для ионов  $\text{Mo}^+$   $U = 15 \text{ кВ}$ , а также показаны капли дистиллированной воды на этих образцах.

Характеристики поверхности исходного сплава АМг2М и сплава с нанесенным Мо-покрытием представлены в табл. 1. Средняя шероховатость исходного образца сплава АМг2М

составляла 34,3 нм и снижалась при увеличении ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов  $\text{Mo}^+$  до 7,8 нм при  $U = 12 \text{ кВ}$  и 9,9 нм при  $U = 15 \text{ кВ}$ . При внедрении сравнимых доз ионов молибдена в образцы сплава с увеличением ускоряющего напряжения значения РКУС также увеличивались (рис. 2). Исходная поверхность сплава была гидрофильной ( $\Theta = 64,8^\circ$ ) и оставалась гидрофильной после модифицирования при  $U = 3$  и 6 кВ. После модифицирования сплава при  $U = 9, 12, 15 \text{ кВ}$  для ассистирующих ионов поверхность стала гидрофобной и значение РКУС увеличилось до  $\Theta = 98,1^\circ$  при 15 кВ.

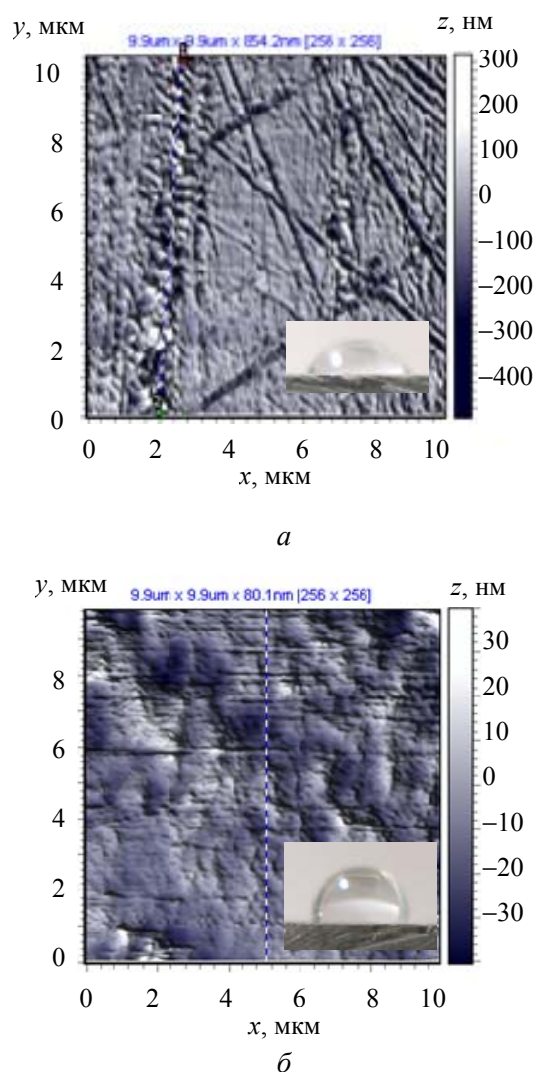


Рис. 1. АСМ-изображения исходной (а) и модифицированной (б) осаждением Мо в условиях ионного ассистирования при  $U = 15 \text{ кВ}$  для ионов  $\text{Mo}^+$  поверхности сплава АМг2М

Полученные результаты указывают на возможность управления шероховатостью поверхности пленки и ее смачиваемостью путем

изменения ускоряющего напряжения для ассистирующего осаждение покрытия ионов  $\text{Mo}^+$  и их дозы при модифицировании сплава алюминия АМг2М, как сообщалось ранее некоторыми авторами [5].

Таблица 1

**Параметры морфологии поверхности исходного алюминиевого сплава АМг2М и после его модифицирования осаждением молибдена в условиях ионного ассистирования**

Ион	$U$ , кВ	$\Theta$ , град	$R_a$ , нм	$R_q$ , нм	$Z$ , нм
–	0	64,8	34,3	48,3	655,8
Mo	3	68,5	15,5	21,0	310,9
Mo	6	75,8	16,3	23,1	322,4
Mo	9	92,8	11,0	15,2	187,2
Mo	12	95,6	7,8	10,4	138,2
Mo	15	98,1	9,9	14,9	181,6

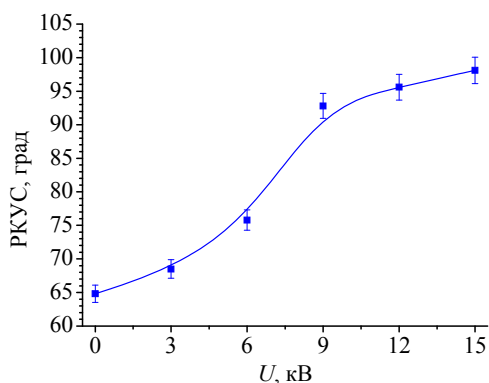


Рис. 2. Зависимость краевого угла смачивания дистиллированной водой поверхности сплава АМг2М от ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов  $\text{Mo}^+$

При измерении чисел микротвердости, чтобы исключить влияние масштабного эффекта, относительное изменение микротвердости  $\Delta H/H_{\text{исх}}$  модифицированных образцов сплава алюминия определялось для одинаковых глубин проникновения индентора микротвердомера. Нагрузка на индентор  $P$  менялась в интервале от 10 до 100 г, что соответствовало изменению глубины проникновения индентора от  $2,2 \pm 0,1$  до  $7,5 \pm 0,3$  мкм. Следует отметить, что толщина модифицированного слоя была на 1–2 порядка меньше глубины проникновения индентора микротвердомера в поверхность модифицированного образца. Данные об относительном изменении микротвердости поверхности сплава алюминия после ионно-ассистируемого осаждения Мо-покрытий представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Относительное изменение микротвердости сплава алюминия марки АМг2М, модифицируемого ионно-ассистируемым осаждением Мо-покрытий в зависимости от ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов  $\text{Mo}^+$**

Относительное изменение микротвердости	$P$ , г	$U$ , кВ			
		3	6	9	12
$\Delta H/H_{\text{исх}}$	10	+0,03	–0,08	+0,15	–0,06
	25	–0,01	+0,07	+0,14	–0,01
	50	+0,01	–0,01	+0,06	–0,04
	100	+0,01	+0,06	+0,04	–0,02

Полученные экспериментальные данные изменения микротвердости с увеличением глубины проникновения индентора для сплава алюминия марки АМг2М, модифицированного ионно-ассистируемым осаждением Мо-покрытий, представлены на рис. 3.

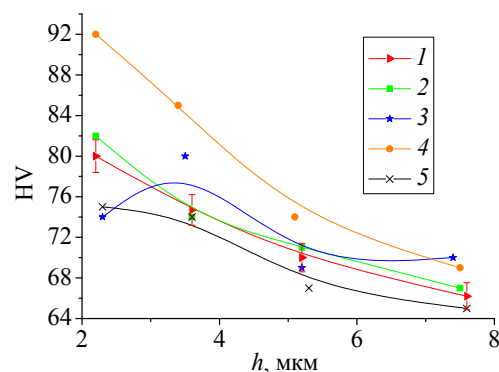


Рис. 3. Графики зависимости микротвердости поверхности сплава алюминия марки АМг2М от глубины проникновения индентора исходного образца (1) и модифицированных образцов ионно-ассистируемым осаждением Мо-покрытий при ускоряющих напряжениях: 2 – 3 кВ; 3 – 6 кВ; 4 – 9 кВ; 5 – 12 кВ

Приведенные в табл. 2 и на рис. 3 результаты свидетельствуют о том, что при нагрузках на индентор 50 и 100 г относительное изменение микротвердости сплава алюминия лежит в пределах погрешности измерений чисел микротвердости. Увеличение относительного изменения микротвердости на 14–15% наблюдается при осаждении Мо-покрытий при ускоряющем напряжении 9 кВ, а уменьшение на 8% ( $U = 6$  кВ) – при малых нагрузках (10 и 25 г) на индентор микротвердомера.

Изменение микротвердости поверхности сплава алюминия марки АМг2М при ионно-

ассистируемом осаждении покрытий обусловлено, по-видимому, конкуренцией двух механизмов. Один механизм – это формирование на поверхности сплава алюминия слоев с повышенными прочностными свойствами. Причинами увеличения микротвердости, как известно, является образование в приповерхностных областях карбидов металлов и структурных дефектов, формируемых при ионно-лучевом воздействии, а также твердорастворное упрочнение, обусловленное присутствием атомов легирующих элементов в алюминии. Второй механизм связан с разупрочнением приповерхностных слоев полученных структур. При осаждении покрытий в приповерхностных слоях сформированных структур содержится водород. Нами ранее были проведены исследования методом ядерных реакций [6], которые установили, что в покрытиях, полученных ионно-ассистируемым осаждением, содержится ~6–10 ат. % водорода, что приводит к уменьшению прочности поверхности образца.

**Заключение.** В результате выполненных исследований установлена возможность управления шероховатостью поверхности плен-

ки и ее смачиваемостью путем изменения ускоряющего напряжения для ассистирующих осаждение покрытия ионов  $Mo^+$  и их дозы при модифицировании сплава алюминия АМг2М. Средняя шероховатость модифицированных образцов сплава АМг2М снижалась при увеличении ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов  $Mo^+$  до 7,8 нм при  $U = 12$  кВ и до 9,9 нм при  $U = 15$  кВ. При внедрении сравнимых доз ионов молибдена в образцы сплава с увеличением ускоряющего напряжения значения РКУС также увеличиваются. Исходная поверхность сплава была гидрофильной ( $\theta = 64,8^\circ$ ) и оставалась такой после модифицирования при  $U = 3$  и 6 кВ. Однако увеличение ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов  $Mo^+$  до значений  $U = 9, 12, 15$  кВ модифицировало поверхность сплава таким образом, что она стала гидрофобной и значение РКУС увеличилось до  $\theta = 98,1^\circ$  при 15 кВ. Относительное изменение микротвердости модифицированных образцов увеличилось на 15% ( $U = 9$  кВ) и уменьшилось на 8% ( $U = 6$  кВ) при малых нагрузках (10 г) на индентор микротвердомера.

### Литература

1. Давыдов В. Г. О некоторых актуальных проблемах разработки алюминиевых сплавов и технологий для авиакосмического применения // Известия вузов. Цветная металлургия. 2001. № 4. С. 32–36.
2. Анищик В. М., Васильева Л. А., Жукова С. И. Влияние имплантации высокоэнергетических ионов неона на структуру сплава алюминий-марганец // Физика и химия обработки материалов. 1998. № 1. С. 5–8.
3. Углов В. В., Черенда Н. Н., Кулешов А. К. Трибологические свойства углеродных покрытий, осажденных на алюминий // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы III Междунар. науч. конф., Минск, 6–8 окт. 1999 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т. Минск, 1999. Ч. 2. С. 270–272.
4. Бобрович О. Г., Ташлыков И. С., Тульев В. В. Микротвердость поверхности сталей марок 40Х, 45 и СТ3, модифицированной осаждением тонких покрытий в условиях ассистирования ионами титана и кремния // Труды БГТУ. 2012. № 6 (153): Физ.-мат. науки и информатика. С. 78–81.
5. Ташлыков И. С., Туровец А. И. Свойства поверхности системы Мо/подложка, формируемой при ионном ассистировании // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы X Междунар. науч. конф., Минск, 24–27 сент. 2013 г. / Белорус. гос. ун-т. Минск, 2013. С. 314–316.
6. Изучение ядерно-физическими методами металлосодержащих (Ti, Co)-покрытий, осажденных методом ионного ассистирования на кремний / О. Г. Бобрович [и др.] // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 1. С. 54–58.

### References

1. Davydov V. G. On some topical problems of the development of aluminum alloys and technologies for aerospace applications. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Proceedings of high schools. Non-ferrous metallurgy], 2001, no. 4, pp. 32–36 (In Russian).
2. Anishchik V. M., Vasil'eva L. A., Zhukova S. I. Effect of high-energy implantation of neon ions at the alloy of aluminum and manganese *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of material processing], 1998, no. 1, pp. 5–8 (In Russian).
3. Uglov V. V., Cherenda N. N., Kuleshov A. K. Tribological properties of carbon coatings deposited on aluminum. *Materialy III mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Vzaimodeystvie izlucheniya s tverdyim telom": v 2 chastyach* [Materials of III International Scientific Conference "Interaction of radiation with solids": in 2 parts]. Minsk, 1999, part 2, pp. 270–272 (In Russian).

4. Bobrovich O. G., Tashlykov I. S., Tul'ev V. V. Microhardness of the surfaces of steels 40X, 45 and ST3 modified by deposition of thin coatings under the conditions of titanium and silicon ions. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 78–81 (In Russian).

5. Tashlykov I. S., Turovets A. I. The surface properties of the Mo system / substrate formed by ion assisting. *Materialy X mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Vzaimodeystvie izlucheniya s tverdyim telom"* [Materials of X International Scientific Conference "Interaction of radiation with solids"]. Minsk, 2013, pp. 314–316 (In Russian).

6. Bobrovich O. G., Tashlykov I. S., Tul'ev V. V., Barayshuk S. M. The study of nuclear-physical methods of metal (Ti, Co)-coating deposited by ion-assisting of on silicon. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of material processing], 2006, no. 1, pp. 54–58 (In Russian).

### Информация об авторах

**Бобрович Олег Георгиевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: olegbobrovich@belstu.by

**Барайшук Сергей Михайлович** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой практической подготовки студентов. Белорусский государственный аграрный технический университет (220023, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Республика Беларусь). E-mail: bear\_s@bsatu.by

**Туровец Антон Иванович** – аспирант кафедры физики и методики преподавания физики. Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка (220050, г. Минск, ул. Советская, 18, Республика Беларусь). E-mail: anton\_turavets@mail.ru

**Яскевич Валентин Валентинович** – аспирант кафедры химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: yaskelchik@belstu.by

### Information about the authors

**Bobrovich Oleg Georgievich** – PhD (Physics and Mathematics), Assistant Professor, the Department of Physics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olegbobrovich@belstu.by

**Barayshuk Sergey Mihaylovich** – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Department of Practical Training of Students. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bear\_s@bsatu.by

**Turovets Anton Ivanovich** – PhD student, the Department of Physics and Methods of Teaching Physics. Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank (18, Sovetskaya str., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anton\_turavets@mail.ru

**Yaskel'chik Valentin Valentinovich** – PhD student, the Department of Chemistry, Technology of Electrochemical Productions and Electronic Engineering Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yaskelchik@belstu.by

Поступила 15.05.2018