

УДК 539.211:539.1.06

О. Г. Бобрович, В. В. Яскельчик

Белорусский государственный технологический университет

**МОРФОЛОГИЯ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА АМg2М,
МОДИФИЦИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЕМ ТИТАНА
В УСЛОВИЯХ ИОННОГО АССИСТИРОВАНИЯ**

В данной работе изучали закономерности смачивания и микротвердость поверхности алюминиевого сплава АМg2М после модифицирования осаждением титана в условиях ионного ассистирования при ускоряющем напряжении 3, 6, 9 и 12 кВ для ассистирующих ионов Ti^+ и интегральных потоков ионов $(1,1-2,1) \cdot 10^{17} Ti^+/cm^2$. Морфология поверхности исходных и модифицированных образцов исследовалась с использованием атомно-силовой микроскопии в контактном режиме. Смачивание исходных и модифицированных образцов сплава АМg2М дистиллированной водой определяли по равновесному краевому углу θ смачивания (РКУС). Средняя шероховатость исходного образца сплава АМg2М составляла 34,3 нм и снижалась при увеличении ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов Ti^+ до 8,5 нм при $U = 6$ кВ и 14,4 нм при $U = 12$ кВ. При внедрении сравнимых доз ионов титана в образцы сплава с ростом ускоряющего напряжения значения РКУС также увеличивались. Исходная поверхность сплава была гидрофильной ($\theta = 64,8^\circ$) и оставалась такой после модифицирования при $U = 12$ кВ. Относительное изменение микротвердости модифицированных образцов увеличилось на 13–15% ($U = 3, 6$ кВ) и уменьшилось на 8% ($U = 9$ кВ) при малых нагрузках на индентор микротвердомера.

Ключевые слова: сплав алюминия АМg2М, Ti-покрытия, смачиваемость, гидрофильная поверхность, микротвердость.

O. G. Bobrovich, V. V. Yaskel'chik

Belarusian State Technological University

**MORPHOLOGY AND SURFACE PROPERTIES OF ALLOY 5251, MODIFIED
BY DEPOSITION OF TITANIUM 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 titanium under ion assisting conditions at an accelerating voltage of 3, 6, 9 and 12 kV for assisting Ti^+ ions and integral ion fluxes of $(1.1-2.1) \cdot 10^{17} Ti^+/cm^2$. 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 θ 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 Ti^+ ions to 8.5 nm at $U = 6$ kV and 14.4 nm at $U = 12$ kV. When the comparable doses of titanium 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 $U = 12$ kV. The relative change in the microhardness of the modified samples increases by 13–15% at $U = 3, 6$ kV and decreases by 8% at $U = 9$ kV at low loads on the microhardness indenter.

Key words: aluminum alloy 5251, Ti-coating, wettability, hydrophilic surface, microhardness.

Введение. Алюминиевые сплавы находят широкое применение во многих отраслях промышленности в качестве конструкционных материалов современной техники [1]. Функциональные и эксплуатационные характеристики, такие как износостойкость, коррозионная стойкость, микротвердость, смачивание поверхности, определяются структурой и свойствами поверхности и приповерхностных слоев алюминиевых сплавов [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 АМg2М после модифицирования осаждением титана в условиях ионного ассистирования. Покрытия Ti наносились на сплав АМg2М 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 применялся чистый титан 99,9%. Осаждение титанового покрытия проводили при ускоряющем напряжении 3, 6, 9 и 12 кВ для ассистирующих ионов Ti^{+} и интегральных потоков ионов $(1,1-2,1) \cdot 10^{17} Ti^{+}/cm^2$. Морфологию поверхности исходных и модифицированных образцов изучали с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ) в контактном режиме (атомно-силовой микроскоп NT-206, зонды CSC21), а измерение микротвердости проводили на приборе AFFRI-MVDM8 методом Виккерса. Смачивание исходных и модифицированных образцов сплава АМг2М дистиллированной водой устанавливали по равновесному краевому углу θ 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 $V = (47,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ 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 Ti в условиях ионного ассистирования при ускоряющем напряжении ($U = 12$ кВ) для ионов Ti^{+} .

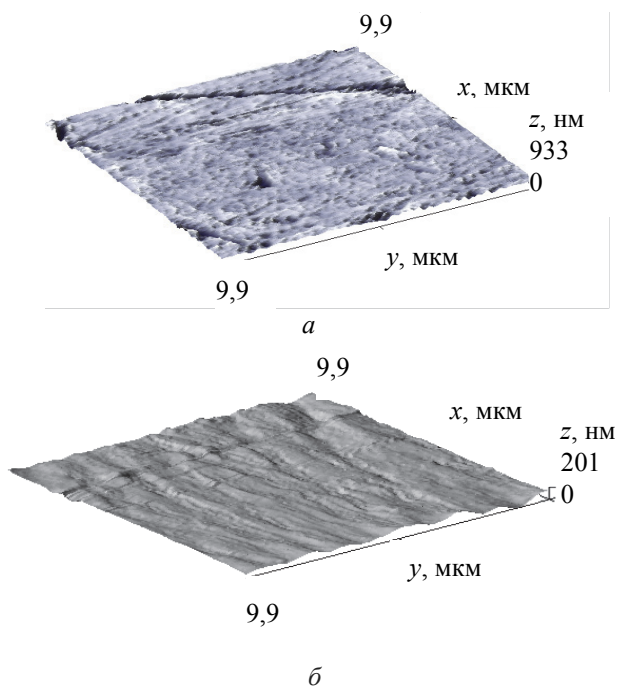


Рис. 1. АСМ-изображения исходной (а) и модифицированной (б) осаждением Ti в условиях ионного ассистирования при $U = 12$ кВ для ионов Ti^{+} поверхности сплава АМг2М

Характеристики поверхности исходного сплава АМг2М и сплава с нанесенным Ti -покрытием представлены в табл. 1.

Таблица 1
Параметры морфологии поверхности исходного алюминиевого сплава АМг2М и после его модифицирования осаждением титана в условиях ионного ассистирования

Ион	U , кВ	Θ , град	R_a , нм	R_q , нм	Z , нм
–	0	64,8	34,3	48,3	655,8
Ti	3	78,1	13,9	20,2	218,2
Ti	6	83,7	8,5	11,2	122,4
Ti	9	89,3	19,5	27,7	371,7
Ti	12	87,4	14,4	19,3	207,1

Средняя шероховатость исходного образца сплава АМг2М составляла 34,3 нм и снижалась при увеличении ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов Ti^{+} до 8,5 нм при $U = 6$ кВ и 14,4 нм при $U = 12$ кВ. При внедрении сравнимых доз ионов титана в образцы сплава с ростом ускоряющего напряжения значения РКУС также увеличивались (рис. 2). Исходная поверхность сплава была гидрофильной ($\Theta = 64,8^\circ$) и оставалась гидрофильной после модифицирования при всех значениях ускоряющих напряжений для ассистирующих ионов титана. После модифицирования сплава при $U = 9, 12$ кВ для ассистирующих ионов значения РКУС поверхности были близки к $\Theta = 90^\circ$, что позволяет предположить дальнейшее увеличение РКУС при росте ускоряющего напряжения.

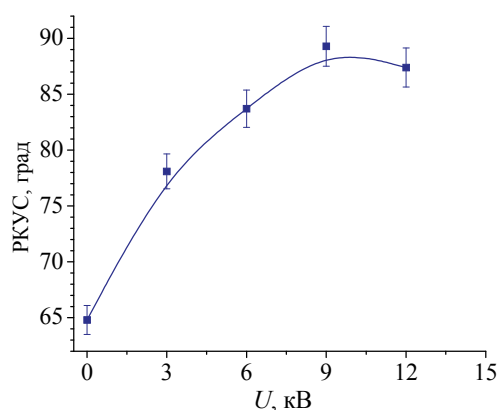


Рис. 2. Зависимость краевого угла смачивания дистиллированной водой поверхности сплава АМг2М от ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов Ti^{+}

Аналогичное увеличение значения РКУС поверхности с ростом ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов наблюдалось в работе [5] по модифицированию сплава АМг2М

осаждением молибдена в условиях ионного ассистирования. Так, увеличение ускоряющего напряжения до значений $U = 9, 12, 15$ кВ приводило к тому, что поверхность сплава становилась гидрофобной и значение РКУС увеличивалось до $\theta = 98,1^\circ$ при $U = 15$ кВ.

Полученные результаты указывают на возможность управления шероховатостью поверхности пленки и ее смачиваемостью путем изменения ускоряющего напряжения для ассистирующего осаждение покрытия ионов Ti^+ и их дозы при модифицировании сплава алюминия АМг2М, как сообщалось ранее некоторыми авторами [6].

При измерении чисел микротвердости, чтобы исключить влияние масштабного эффекта, относительное изменение микротвердости $\Delta H / H_{исх}$ 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 Ti -покрытий приведены в табл. 2.

Таблица 2

Относительное изменение микротвердости сплава алюминия марки АМг2М, модифицированного ионно-ассистируемым осаждением Ti -покрытий, в зависимости от ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов Ti^+

Относительное изменение микротвердости	$P, \text{ г}$	$U, \text{ кВ}$			
		3	6	9	12
$\Delta H / H_{исх}$	10	+0,13	+0,06	-0,08	0,00
	25	+0,03	+0,15	-0,02	+0,10
	50	+0,03	0,00	+0,01	+0,06
	100	+0,03	+0,01	+0,03	+0,04

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

Приведенные в табл. 2 и на рис. 3 результаты свидетельствуют о том, что при нагрузках на индентор, равных 50 и 100 г, относительное изменение микротвердости сплава алюминия лежит в пределах погрешности измерений чисел микротвердости. Увеличение относительного изменения микротвердости на 13% наблюдается при

осаждении Ti -покрытий при ускоряющем напряжении $U = 3$ кВ, на 15% ($U = 6$ кВ) – при малых нагрузках (10 и 25 г) на индентор микротвердомера и уменьшение на 8% ($U = 9$ кВ) – при нагрузке 10 г на индентор микротвердомера.

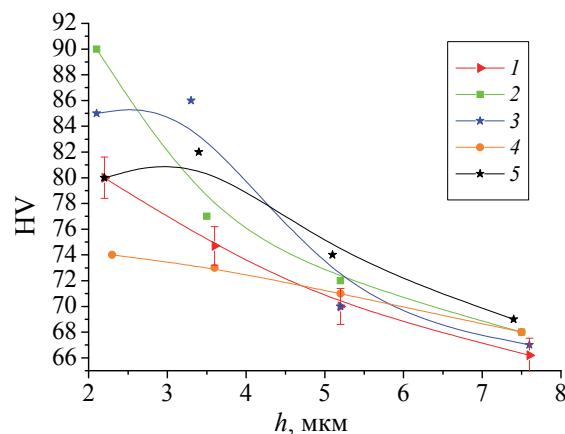


Рис. 3. Графики зависимости микротвердости поверхности сплава алюминия марки АМг2М от глубины проникновения индентора в поверхность исходного образца (1) и модифицированных образцов ионно-ассистируемым осаждением Ti -покрытий при ускоряющих напряжениях: 2 – 3 кВ; 3 – 6 кВ; 4 – 9 кВ; 5 – 12 кВ

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, являются образование в приповерхностных областях карбидов металлов и структурных дефектов, формируемых при ионно-лучевом воздействии в разных условиях модифицирования образцов, 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 [7], 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 пленки и ее смачиваемостью путем изменения ускоряющего напряжения для ассистирующего осаждения

покрытия ионов Ti^{+} и их дозы при модифицировании сплава алюминия АМг2М. Средняя шероховатость модифицированных образцов сплава АМг2М снижалась при увеличении ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов Ti^{+} до 8,5 нм при $U = 6$ кВ и 14,4 нм при $U = 12$ кВ. При внедрении сравнимых доз ионов титана в образцы сплава с ростом ускоряющего напряжения значения РКУС поверхности также увеличивались. Исходная поверхность сплава была гидрофильной ($\theta = 64,8^{\circ}$) и оставалась такой после модифицирования при $U = 12$ кВ. Однако

повышение ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов Ti^{+} до значений $U = 9, 12$ кВ приводит к увеличению значения РКУС, что позволяет предположить дальнейшее повышение значения краевого угла смачивания при росте ускоряющего напряжения и, соответственно, может вызвать гидрофобизацию поверхности. Относительное изменение микротвердости модифицированных образцов увеличилось на 13–15% ($U = 3, 6$ кВ) и уменьшилось на 8% ($U = 9$ кВ) при малых нагрузках 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: Физ.-мат. науки и информатика. С. 78–81.
5. Морфология и свойства поверхности сплава АМг2М, модифицированного осаждением молибдена в условиях ионного ассистирования / О. Г. Бобрович [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2018. № 2. С. 62–66.
6. 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.
7. 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 (Vzaimodeystviye izlucheniya s tverdyim telom)* [Materials of III International Scientific Conference (Interaction of radiation with solids)]. 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. Bobrovich O. G., Barayshuk S. M., Turovets A. I., Yaskel'chik V. V. Morphology and surface properties of alloy 5251, modified by deposition of molybdenum in conditions of ion assistance. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 3, Physics [and mathematics. Informatics], 2018, no. 2, pp. 62–66 (In Russian).
6. Tashlykov I. S., Turovets A. I. [The surface properties of the Mo system/substrate formed by ion assisting]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Vzaimodeystviye izlucheniya s tverdyim telom)* [Materials of X International Scientific Conference (Interaction of radiation with solids)]. Minsk, 2013, pp. 314–316 (In Russian).

7. 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

Яскельчик Валентин Валентинович – ассистент 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

Yaskel'chik Valentin Valentinovich – assistant lecturer, 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 15.05.2019