

## ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг5

**А. А. Предко, И. Г. Олешук, А. Н. Моисеенко, И. Л. Поболь,  
М. Ю. Хома, Н. А. Кананович**

Физико-технический институт НАН Беларуси  
г. Минск, Республика Беларусь

Алюминий и его сплавы нашли широкое применение во многих отраслях промышленности (авиа- и ракетостроении, судостроении, в железнодорожном и автомобильном транспорте, нефтяной, химической и пищевой промышленности, при производстве посуды и др.). Изделия и конструкции из алюминия и его сплавов получаются более легкими (на 50 %), чем из стали. По широте использования сплавы алюминия удерживают второе место после стали и чугуна [1].

Перспективным методом повышения поверхностной твёрдости, износостойкости и коррозионных свойств алюминиевых сплавов является ионно-плазменное азотирование (ИПА). В Республике Беларусь проводятся исследования по ионному азотированию сталей, чугунов и титановых сплавов. Однако в литературе имеется ограниченная информация о методах инженерии поверхности алюминиевых сплавов с применением потоков ионов, электронов и плазмы, в том числе азотирования, для модификации их поверхности. Так, в [2] методом ИПА повышали твердость поверхностного слоя на сплаве А7 (аналоге сплава АД00 СНГ) до 1173 НV, что в 4,3 раза превышает твердость основного материала. В [3] приводятся данные о структуре и толщине диффузионного слоя при обработке сплава А999 (аналоге сплава СВА99) методом ИПА.

Целью настоящей работы был выбор технологических параметров процесса ИПА алюминиевого сплава АМг5, проведение металлографических, спектроскопических, микродюрOMETрических, рентгенофазовых исследований, а также трибологических испытаний упрочненных образцов.

Состав сплава АМг5 по ГОСТ 4784-97, мас. %: 4,8–5,8 магния; 0,3–0,8 марганца; до 0,5 железа; до 0,5 кремния; до 0,1 меди; 0,02–0,1 титана; до 0,005 бериллия. Размеры образцов для ИПА – диаметр 25 мм, толщина – 6 мм.

ИПА проводили в установке дверного типа с «холодными стенками» производства ФТИ НАН Беларуси. Для проведения исследования структуры и глубины азотированного слоя после ИПА изготавливали поперечные шлифы путем вырезания на автоматическом отрезном станке МЕТКОН с водным охлаждением места реза, что позволяет избежать перегрева материала. Для подготовки шлифов использовали пробоприготовительное оборудование Metkon – пресс Escopress 100 и шлифовально-полировальный станок Digiprep. Для травления

поверхности шлифов применяли раствор 0,5 мл HF; 2,5 мл HNO<sub>3</sub>; 1,5 мл HCl; 100 мл H<sub>2</sub>O.

Исследования структуры образцов проводили на оптическом микроскопе Planar MI-1 с CCD камерой и на растровом электронном микроскопе TESCAN MIRA3 с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа. Микротвердость образцов измеряли на автоматическом моторизированном микротвердомере AFFRI-DM8. Измерения проводили при нагрузке 100 г с поверхности образцов и сравнивали с твердостью сердцевины. Для изучения глубины и элементного состава азотированных слоев использовали оптическую электронную спектроскопию в тлеющем разряде на приборе GDOES Profiler 2. Рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеновском дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном CoK $\alpha$ -излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Съёмки осуществляли в непрерывном режиме со скоростью 0,01 град/с. Для расшифровки фазового состава использовали картотеку PDF-2. Изучение трибологических характеристик образцов в исходном состоянии и после ИПА проводили на многофункциональном трибометре UNITEST-750 (DUCOM Instruments) по схеме «палец – диск» при следующих параметрах: палец (контртело) – шарик из стали ШХ15 диаметром 5,5 мм и твердостью 63 HRC, диск (образец сплава алюминия АМг5 до и после ИПА) – диаметр 25 мм, радиус дорожки трения 10 мм; нагрузка на образец 10 Н.

Процесс подготовки образцов из сплава АМг5 перед ионно-плазменным азотированием заключался в шлифовании, полировании и травлении с последующим осветлением поверхности непосредственно перед началом упрочняющей обработки. ИПА образцов осуществляли при температурах 450-500 °С, время выдержки при температуре азотирования составляло от 12 до 24 ч. ИПА проводили в среде азота, водорода и аргона в различном соотношении.

Микротвердость материала поверхности образцов в исходном состоянии составляла HV<sub>0,1</sub> 100. После ИПА поверхностная твердость возросла до HV<sub>0,1</sub> 135-164 в зависимости от режима обработки.

Изучение морфологии поверхности образца из сплава АМг5 на растровом электронном микроскопе показало, что после ИПА поверхность была неоднородной и имела направленную полосчатость с включениями агломератов (рисунок 1). Микрорентгеноспектральный анализ выявил наличие на поверхности азота в количестве 3,35 мас. %.

В соответствии со спектральным анализом толщина упрочненного слоя после ИПА составила около 800 нм (рисунок 2). На поверхности образца до глубины 300–400 нм наблюдалось значительное количество кислорода и азота. Это свидетельствует об образовании оксидов и нитридов алюминия, что подтверждается данными рентгенофазового анализа.

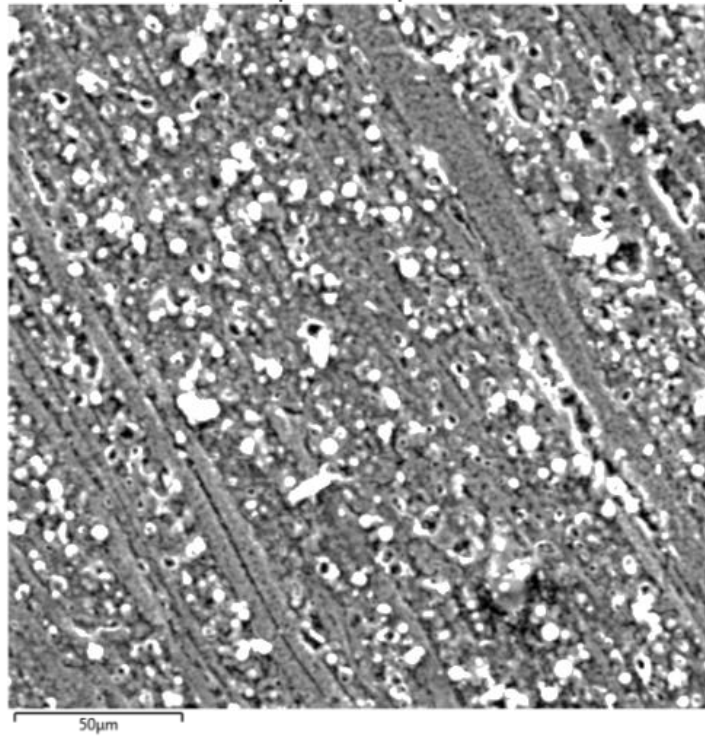


Рисунок 1 – Морфология поверхности образца из сплава АМг5 после ИПА

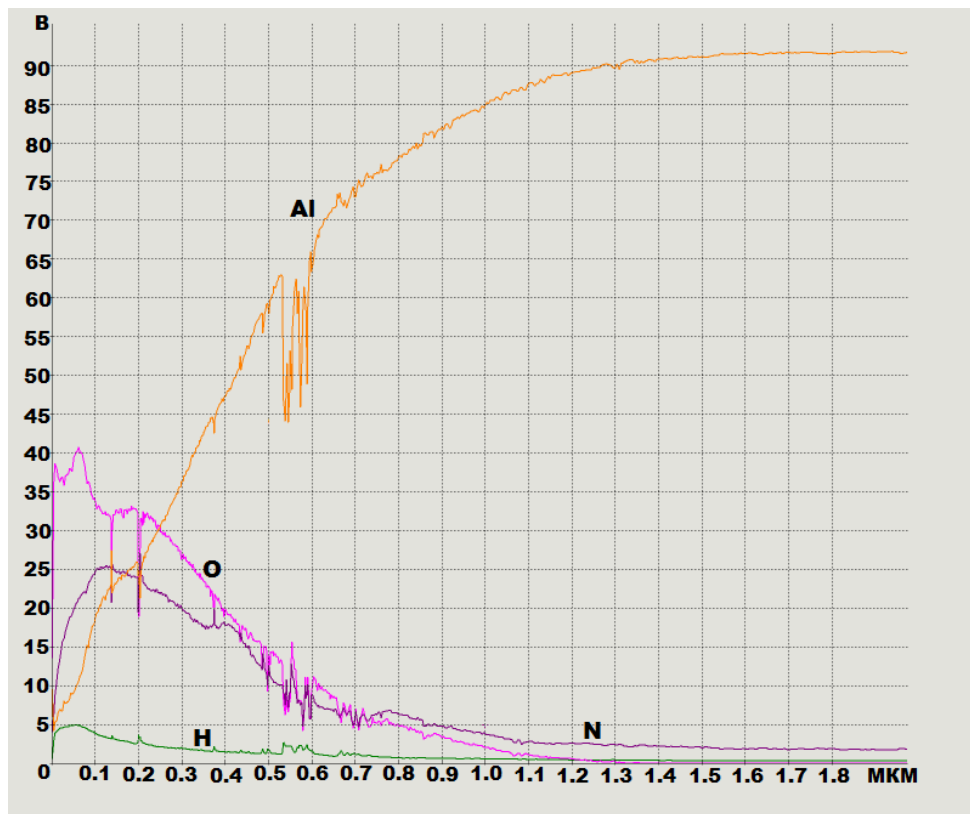
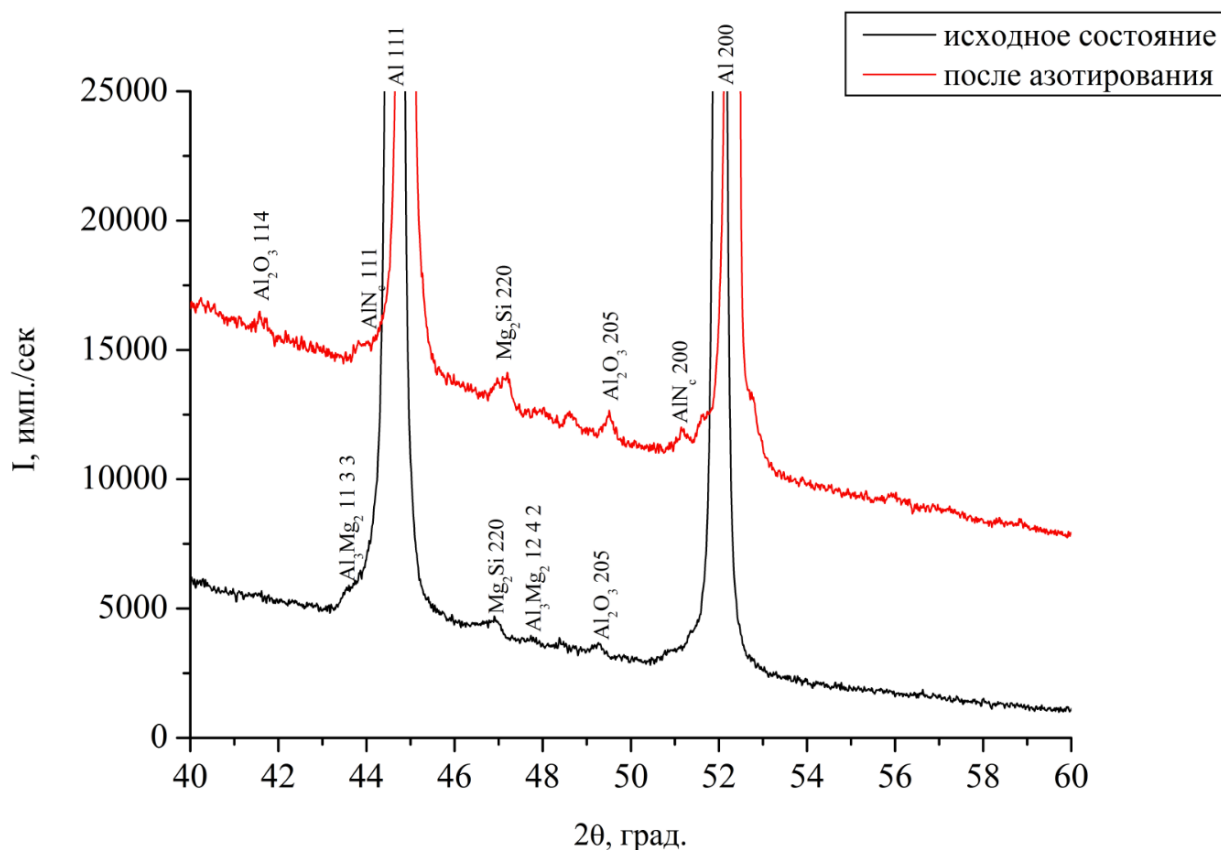


Рисунок 2 – Распределение химических элементов по глубине азотированного слоя на образце из сплава АМг5 после ИПА при температуре 450 °С и времени выдержки 12 ч

На рисунке 3 приведены фрагменты рентгеновских дифрактограмм, полученных на образцах из сплава АМг5. В исходном состоянии на поверхности об-

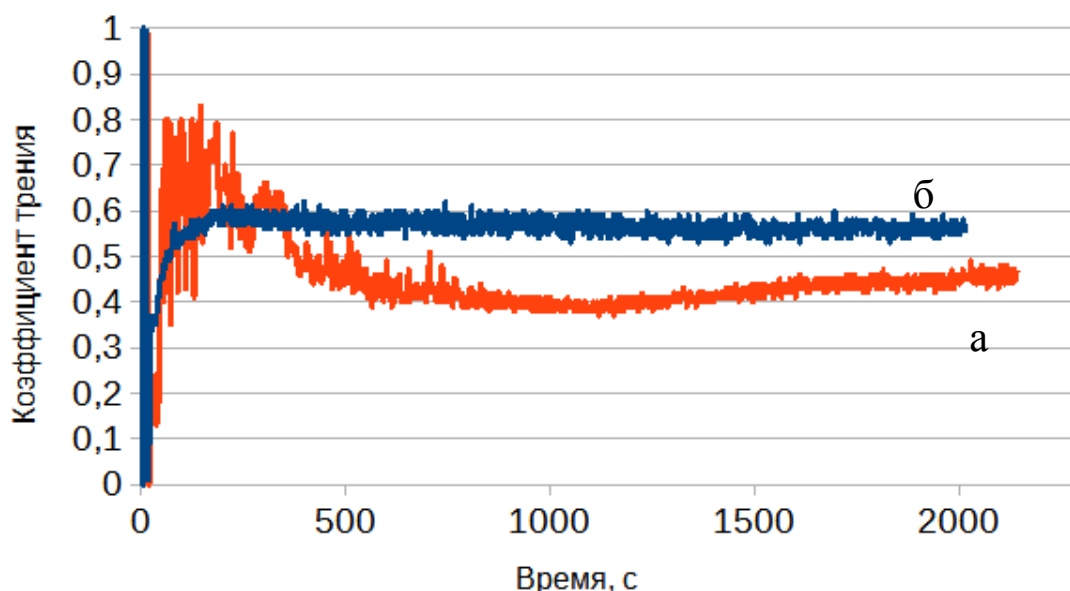
разца обнаружены фазы, соответствующие алюминию, оксиду алюминия  $Al_2O_3$  и соединениям магния  $Al_3Mg_2$  и  $Mg_2Si$ . После ИПА на образцах выявлены фазы Al и нитрида алюминия AlN. Определение фазового состава алюминиевых сплавов после ионной обработки осложняется тем, что пики Al и AlN практически совпадают. Атомы Al и N имеют малую рассеивающую способность, что приводит к низкой интенсивности пиков нитрида алюминия по сравнению с пиками Al, принадлежащими материалу основы. Кроме того, регистрируются линии  $Al_2O_3$  и  $Mg_2Si$  с низкой интенсивностью.



**Рисунок 3 – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы образца из сплава АМг5 в исходном состоянии и после ИПА**

Трибологические испытания показали, что коэффициент трения образца в исходном состоянии составил 0,43 (рисунок 4а). На рисунке 4б представлена зависимость коэффициента трения от времени испытаний для образца из сплава АМг5 после ИПА при температуре 500 °С и времени выдержки 24 ч. Упрочненный слой через 180 с разрушился, а коэффициент трения в установившемся режиме составил 0,57.

По краям трибологической дорожки наблюдалось скопление частиц нитрида алюминия после истирания, что способствовало износу шарика. Твердость контртела из стали ШХ15 составляет  $HV_{0,1} 950$ , из чего можно сделать вывод, что поверхностная твердость нитридного слоя выше измеряемой микротвердомером с поверхности, и по табличным данным она достигает  $HV_{0,1} 1100$ .



**Рисунок 4 – Зависимость коэффициента трения от времени испытаний для образцов из алюминиевого сплава АМг5 в исходном состоянии (а) и после ИПА (б)**

Таким образом, при ИПА образцов из сплава АМг5 на поверхности образуется упрочненный слой с максимальной измеренной микротвердостью до  $HV_{0,1}$  164 толщиной до 800 нм, состоящий из Al, AlN,  $Al_2O_3$  и  $Mg_2Si$ . Коэффициент трения образцов из сплава АМг5 увеличивался с 0,43 в исходном состоянии до 0,57 после ионно-плазменной обработки, что может быть связано с формированием трибологического слоя из продуктов трения упрочняющего слоя и контртела.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Интернет ресурс. Режим доступа: <https://naruservice.com/articles/sferaprimeneniya-alyuminiya> – свободный.
2. Крысина, О. В. Азотирование поверхности технически чистого алюминия в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом / О. В. Крысина [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом: сб. статей. – Минск, 2017. – С. 250–252.
3. Sonnleitner, R., Microstructure of plasma nitrided layers on aluminium / R. Sonnleitner, K. Spiradek-Hahn, F. Rossi // Surface and Coatings Technology, 2002. – № 156. – P. 149–154.