

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ  
И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ  
НА БАЗЕ СИСТЕМЫ Fe-Al, ПОДВЕРГНУТЫХ  
ИОННО-ПЛАЗМЕННОМУ АЗОТИРОВАНИЮ<sup>1</sup>**

**В. А. КУКАРЕКО**, д-р физ.-мат.наук, **А. Н. ГРИГОРЧИК**, канд.техн.наук  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
**В. М. КОНСТАНТИНОВ**, д-р техн.наук, **В. Г. ДАШКЕВИЧ**, канд. техн.  
наук, **И. М. МАТЮКОВ**, **П. С. МЫШКЕВИЧ**  
Белорусский национальный технический университет

*Проведено исследование структуры, фазового состава, дюрометрических свойств и износостойкости композиционных газотермических покрытий «08Г2С + АК12» и «06Х19Н9Т + АД1» после ионно-плазменного азотирования по различным режимам. Показано, что в результате ионного модифицирования покрытий азотом в их поверхностных слоях формируются азотированные слои глубиной от 5 до 100 мкм. Установлено, что в фазовом составе подвергнутых ионному азотированию алюмосодержащих композиционных газотермических покрытий регистрируется образование нитрида AlN. Сделан вывод, что нитрид алюминия, наряду с нитридами железа и хрома, образуется в легированных алюминием стальных частицах, формирующихся в процессе напыления газотермических покрытий. Показано, что образование нитрида алюминия в композиционных газотермических покрытиях обуславливает их высокую микротвердость (до 1100 HV 0,025) и износостойкость в условиях сухого и граничного трения. Установлено, что композиционные покрытия на базе системы Fe-Al после азотирования имеют более высокую износостойкость (в 1,1–2,0 раза) по сравнению с монопокрытиями из сталей 08Г2С и 06Х19Н9Т, прошедшими ионно-плазменное азотирование по аналогичным режимам.*

**Ключевые слова:** газотермическое напыление, композиционные покрытия, ионное азотирование, нитрид алюминия, износостойкость

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ в рамках договора № Т23 УЗБ-162

# STRUCTURAL-PHASE STATE AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF COMPOSITE GAS-THERMAL COATINGS BASED ON THE Fe-Al SYSTEM SUBJECT TO ION-PLASMA NITRIDING

V. A. KUKAREKO, Dr. in Physical and Mathematical Sciences,  
A. N. GRIGORCHIK, Ph. D. in Technical Sciences  
United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy  
of Sciences of Belarus

V. M. KONSTANTINOV, Dr. of Engineering Sciences,  
V. G. DASHKEVICH, Ph. D. in Technical Sciences,  
I. M. MATUKOV, P. S. MYSHKEVICH  
Belarusian National Technical University

*A study was carried out of the structure, phase composition, durometer properties and wear resistance of composite thermal gas coatings "08G2S + AK12" and "06Kh19N9T + AD1" after ion-plasma nitriding in various modes. It has been shown that as a result of ion modification of coatings with nitrogen, nitrated layers with a depth of 5 to 100  $\mu\text{m}$  are formed in their surface layers. It has been established that in the phase composition of aluminum-containing composite gas-thermal coatings subjected to ion nitriding, the formation of AlN nitride is recorded. It was concluded that aluminum nitride, along with iron and chromium nitrides, is formed in aluminum-alloyed steel particles formed during the spraying of thermal coatings. It has been shown that the formation of aluminum nitride in composite gas-thermal coatings determines their high microhardness (up to 1100 HV 0.025) and wear resistance under conditions of dry and boundary friction. It has been established that composite coatings based on the Fe-Al system after nitriding have 1.1 to 2.0 times higher wear resistance compared to monocoatings made from 08G2S and 06Kh19N9T steels that have undergone ion-plasma nitriding in similar modes.*

**Keywords:** thermal spraying, composite coatings, ion nitriding, aluminum nitride, wear resistance

**Введение.** Ранее в работах [1, 2] было показано, что газотермическое напыление покрытий из сталей различных классов и их последующее ионное азотирование позволяют формировать на поверхностях изделий слои с повышенной износостойкостью, которые могут работать в высоконагруженных узлах трения. Отмечено, что высокая износостойкость наблюдается у газотермических покрытий с повышенным содержанием хрома (из сталей 40X13, 06X19N9T,

95Х18), который в процессе азотирования образует высокопрочный нитрид CrN [3]. Вместе с тем, известно [3, 4], что для изготовления деталей с повышенной микротвердостью и износостойкостью разработаны специальные стали с повышенным содержанием алюминия (38Х2МЮА, 38ХВФЮА и др.). В результате азотирования этих сталей в их поверхностных слоях образуется нитрид алюминия, имеющий высокие физико-механические характеристики. В частности, микротвердость нитрида алюминия AlN достигает 12 ГПа, а нитрида хрома – 11 ГПа [3]. В то же время введение в сталь при выплавке большого количества алюминия (более 1,0 масс. %) сопровождается рядом трудностей, обусловленных его интенсивным выгоранием, образованием оксида Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, который может понижать пластичность стали. Вместе с тем, как было показано в работах [5–7], совместное газотермическое напыление стальной и алюминиевой проволоки приводит к формированию композиционных покрытий, содержащих стальные частицы, легированные 4–5 масс. % алюминия. Таким образом, можно полагать, что азотирование композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al будет способствовать выделению в них специальных нитридов, в том числе, нитрида алюминия. Вместе с тем, в литературе не представлено данных о влиянии ионного азотирования на структурно-фазовое состояние, твердость и износостойкость композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al. В связи с этим целью работы являлось исследование структуры, фазового состава, твердости и износостойкости в различных условиях трения, подвергнутых ионно-плазменному азотированию композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al.

**Методики получения образцов и исследований.** Газотермическое напыление покрытий на базе системы Fe-Al осуществлялось за счет одновременного распыления проволочных материалов из стали 08Г2С и алюминиевого сплава АК12. Кроме того проводилось напыление покрытий из стали 06Х19Н9Т и алюминиевого сплава АД1. Для сравнения износостойкости ионно-модифицированных композиционных покрытий с монопокрытиями также проводилось ионное азотирование газотермических покрытий из сталей 08Г2С и 06Х19Н9Т. Ионно-плазменное азотирование (ИПА) образцов напыленных монопокрытий и покрытий из композиционных материалов проводилось на установке ФТИ 0.361.

Проводили металлографические исследования (с использованием микроскопа АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ), рентгеноструктурный анализ (на дифрактометре POWDIX 600). Сравнительные испытания триботехнических свойств образцов напыленных покрытий проводили в условиях трения без смазочного материала при удельной нагрузке 1,5 МПа, а также в смазочном материале И-20А при удельной нагрузке испытаний 10 МПа. В качестве контртела использовалась закаленная сталь У8 с твердостью 800 HV 10. Износостойкость призматических образцов с покрытиями в условиях граничного трения определялась посредством измерения величины их линейного износа [8]. При трении без смазочного материала определялась величина массового износа. Путь трения при испытаниях составлял 1200 м. Измерения твердости и микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan20.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В результате совместного газотермического напыления стальной и алюминиевой проволок формировались плотные композиционные покрытия, пористость которых не превышала 2–3 об. % [6, 7]. Фазовый состав напыленных композиционных покрытий «08Г2С + АК12» включает в себя матричные фазы  $\alpha$ -Fe, Al и небольшое количество оксидов FeO и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, а в покрытиях «06Х19Н9Т + АД1» регистрируется, помимо вышеперечисленных фаз, большое количество  $\gamma$ -Fe [9]. В процессе напыления композиционных покрытий на базе системы Fe-Al происходит легирование стальных частиц алюминием, содержание которого в различных участках стальных напыленных частиц варьируется в широком диапазоне и может достигать 4–20 масс. % [10]. В результате ионно-плазменного азотирования в поверхностных слоях газотермических покрытий из «08Г2С + АК12» формируются волнообразные (повторяющие профиль напыленных частиц) модифицированные азотом слои глубиной 20–95 мкм при температуре азотирования 470 °С (4 ч) и глубиной 40–105 мкм при температуре 520 °С (5 ч) (рисунок 1, таблица 1). Глубина азотированных слоев в газотермическом покрытии из «06Х19Н9Т+АД1» составляет 5–20 мкм после ИПА при 470 °С (4 ч) и 10–30 мкм после ионного азотирования при 520 °С (5 ч) (рисунок 2, таблица 1). Пониженная глубина азотированных слоев в покрытиях «06Х19Н9Т + АД1» обусловлена высоким содержанием в покрытии хрома, который являет-

ся сильным нитридообразующим элементом и замедляет диффузионный перенос атомов азота [3, 11, 12].

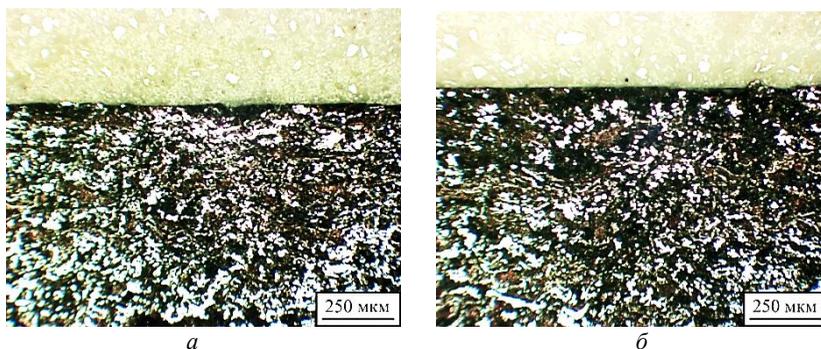


Рисунок 1 – Характерные микроструктуры композиционных газотермических покрытий из «08Г2С + АК12», подвергнутых ионно-плазменному азотированию:  
*a* – ИПА при температуре 470 °С в течение 4 ч;  
*б* – ИПА при температуре 520 °С в течение 5 ч

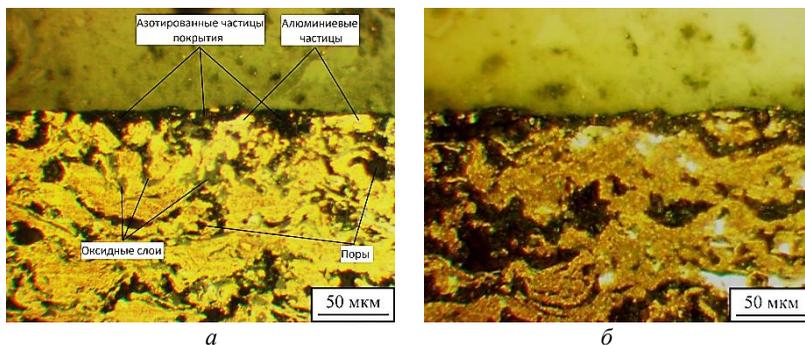


Рисунок 2 – Характерные микроструктуры композиционных газотермических покрытий из «06Х19Н9Т + АД1», подвергнутых ионно-плазменному азотированию:  
*a* – ИПА при температуре 470 °С в течение 4 ч;  
*б* – ИПА при температуре 520 °С в течение 5 ч

Таблица 1 – Глубина азотированных слоев и пористость газотермических покрытий, подвергнутых различным видам упрочняющей обработки

Материал покрытия и режим его обработки	Глубина азотированного слоя, мкм	Пористость покрытий, об. %
«08Г2С + АК12» после напыления	–	2–3
«08Г2С + АК12» + отжиг 510 °С (1 ч)	–	3–5
08Г2С + ИПА при 510 °С (5 ч)	90–100	3–5
«08Г2С + АК12» + ИПА при 470 °С (4 ч)	20–95	8–12
«08Г2С + АК12» + ИПА при 520°С (5 ч)	40–105	12–15
«06Х19Н9Т + АД1» после напыления	–	2–3
«06Х19Н9Т + АД1» + отжиг 510 °С (1 ч)	–	3–5
06Х19Н9Т + ИПА при 510 °С (5 ч)	40–45	3–5
«06Х19Н9Т + АД1» + ИПА при 470 °С (4 ч)	5–20	7–11
«06Х19Н9Т + АД1» + ИПА при 520 °С (5 ч)	10–30	10–15

Несплощность азотированных слоев и их волнообразная морфология обусловлена как формой напыленных частиц, так и наличием на поверхности и в подповерхностных слоях композиционных покрытий частиц чистого алюминиевого сплава, имеющего на поверхности плотные оксидные пленки, выступающие барьером для диффузии атомов азота и препятствующие его диффузионному перемещению в более глубокие слои покрытий (рисунок 3). Кроме этого, как было показано в работе [13], оксидные прослойки, состоящие из FeO и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и располагающиеся на границах стальных частиц, также препятствуют диффузионному переносу атомов азота между смежными стальными частицами (рисунок 3), что, в свою очередь, обуславливает пониженную глубину азотированных слоев в монопокрытиях из сталей, но при этом обеспечивает повышенную концентрацию азота в поверхностных слоях покрытий. Таким образом, поверхность композиционного газотермического покрытия на базе системы Fe-Al после азотирования включает стальные частицы с различной концентрацией атомов азота, а также немодифицированные атомами азота алюминиевые частицы (рисунок 3).

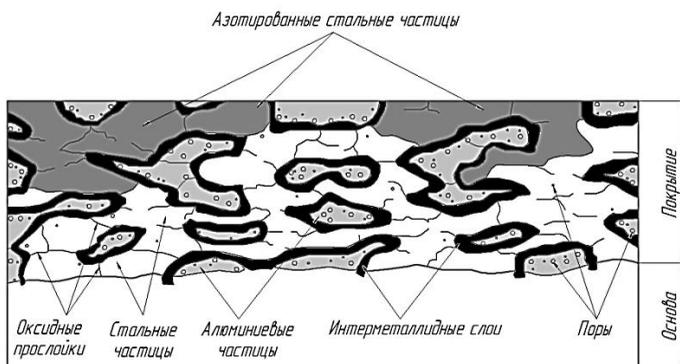


Рисунок 3 – Схема формирования азотированного слоя в композиционном покрытии на базе системы Fe-Al

Установлено, что в результате длительной выдержки в процессе ионного азотирования протекает диффузионный перенос атомов более активного при данных температурах алюминия в стальные прослойки с образованием в них интерметаллидных соединений (таблица 1). При этом, диффузия атомов алюминия в стальные частицы сопровождается переносом на их место вакансий с последующим формированием в процессе изотермической выдержки диффузионной пористости. Пористость композиционных покрытий в результате ионно-плазменного азотирования при температуре 470 °С (4 ч) возрастает до 7–12 об. %, а в результате ионного азотирования при температуре 520 °С (5 ч) – до 10–15 об. %. При этом необходимо отметить, что пористость покрытий на базе системы Fe-Al после напыления не превышает 2–3 об. %.

Фазовый состав композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al представлен на рисунке 4 и в таблице 2. Очевидно, что в процессе ионного азотирования композиционных покрытий из «08Г2С + АК12» в его поверхностных слоях сохраняются частицы из алюминия и легированной алюминием стали, образуется нитрид железа  $Fe_4N$  и специальный нитрид  $AlN$  (таблица 2, рисунок 4, а, б), а также выделяются интерметаллидные соединения  $Al_{13}Fe_4$ ,  $Al_3Fe_2$ . При этом необходимо отметить, что образование нитрида алюминия происходит в стальных частицах, легированных алюминием в процессе напыления покрытий. В свою очередь, вы-

деление интерметаллидных частиц происходит на границах стальных и алюминиевых частиц за счет активного диффузионного переноса атомов алюминия в стальные прослойки при температурах азотирования [10]. В газотермическом покрытии из «06X19H9T + АД1» при ионном азотировании протекают подобные диффузионные процессы, приводящие к образованию нитрида алюминия и интерметаллидов, а также к формированию твердого раствора азота в аустените [14] и нитрида CrN (таблица 2, рисунок 4, в, з) [3, 11, 12]. Кроме этого, необходимо отметить, что повышение температуры ионно-плазменного азотирования от 470 до 520 °С и увеличение времени выдержки от 4 до 5 ч приводит к укрупнению выделившихся частиц AlN (таблица 2), а также повышению его количества в покрытии, о чем свидетельствует возрастание интегральной площади дифракционных линий от данной фазы (рисунок 4).

Таблица 2 – Фазовый состав композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al, а также размер кристаллитов AlN

Материал покрытия и режим его обработки	Фазовый состав	Размер кристаллитов AlN, нм
«08Г2С + АК12» + ИПА при 470 °С (4 ч)	$\alpha$ -Fe, Al, Fe <sub>4</sub> N, Al <sub>13</sub> Fe <sub>4</sub> , Al <sub>5</sub> Fe <sub>2</sub> , AlN	9,7
«08Г2С + АК12» + ИПА при 520 °С (5 ч)	$\alpha$ -Fe, Al, Fe <sub>4</sub> N, Al <sub>13</sub> Fe <sub>4</sub> , Al <sub>5</sub> Fe <sub>2</sub> , AlN	12,8
«06X19H9T + АД1» + ИПА при 470 °С (4 ч)	$\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe, Al, $\gamma'_N$ , Al <sub>13</sub> Fe <sub>4</sub> , Al <sub>5</sub> Fe <sub>2</sub> , Fe <sub>4</sub> N, CrN, AlN	10,8
«06X19H9T + АД1» + ИПА при 520 °С (5 ч)	$\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe, Al, $\gamma'_N$ , Al <sub>13</sub> Fe <sub>4</sub> , Al <sub>5</sub> Fe <sub>2</sub> , Fe <sub>4</sub> N, CrN, AlN	11,6

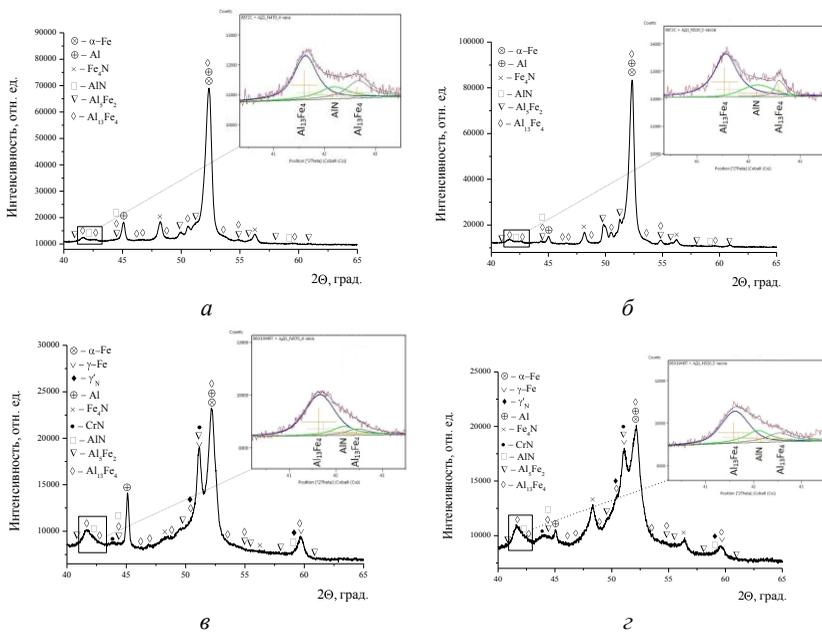


Рисунок 4 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ( $\text{CoK}\alpha$ ) от поверхностных слоев композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al, подвергнутых ионно-плазменному азотированию:

а – ИПА при температуре 470 °C в течение 4 ч;

б – ИПА при температуре 520 °C в течение 5 ч; в – ИПА при температуре 470 °C в течение 4 ч; г – ИПА при температуре 520 °C в течение 5 ч

Образование в процессе ИПА в композиционных покрытиях на базе системы Fe-Al нитрида алюминия приводит к существенному возрастанию микротвердости поверхностных слоев покрытия. Макротвердость композиционных покрытий, подвергнутых ионно-плазменному азотированию (470 и 520 °C) незначительно снижается по сравнению с исходным состоянием после напыления (таблица 3). Понижение значений твердости азотированных композиционных газотермических покрытий обусловлено повышением их пористости (таблица 2) в процессе ионного модифицирования за счет развития диффузионной пористости. В то же время значения микротвердости частиц на поверхности композиционных покрытий находятся в широком диапазоне (таблица 3). Микротвердость поверхностных частиц композиционных покрытий «08Г2С + АК12»

после ИПА составляет 100–1050 HV 0,025, а покрытия из «06X19H9T + АД1» – 100–1100 HV 0,025. Существенное различие значений микротвердости поверхностных частиц покрытий после ионного азотирования связано с наличием в поверхностных слоях композита как ионно-модифицированных стальных прослоек, так и прослоек из неазотированного алюминиевого сплава (рисунки 1– 3). Более высокие значения микротвердости стальных частиц покрытия из «06X19H9T + АД1» связаны с образованием в них в процессе ионного азотирования, помимо частиц нитрида алюминия, также и частиц высокопрочного нитрида хрома CrN (рисунок 4).

Таблица 3 – Твердость и микротвердость композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al после ионно-плазменного азотирования

Материал покрытия и режим его обработки	Твердость, HV 10	Микротвердость, HV 0,025
«08Г2С + АК12» после напыления	190	100–300
«08Г2С + АК12» + ИПА при 470 °С (4 ч)	170	100–950
«08Г2С + АК12» + ИПА при 520°С (5 ч)	170	100–1050
«06Х19Н9Т + АД1» после напыления	180	100–400
«06Х19Н9Т + АД1» + ИПА при 470 °С (4 ч)	175	100–1050
«06Х19Н9Т + АД1» + ИПА при 520 °С (5 ч)	170	100–1100

Результаты триботехнических исследований (таблица 4, рисунок 5) свидетельствуют о следующем. В условиях сухого трения композиционные газотермические покрытия имеют относительно невысокую износостойкость. В частности, интенсивность массового изнашивания покрытия из «08Г2С + АК12» составляет  $400,0 \times 10^{-3}$  мг/м, а покрытия из «06Х19Н9Т + АД1» –  $115,0 \times 10^{-3}$  мг/м (таблица 4). Более высокий уровень износостойкости покрытия, включающего сталь 06Х19Н9Т, обусловлен наличием в нем аустенита, который в условиях жесткого адгезионного взаимодействия при трении претерпевает деформационное мартенситное  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение, в результате которого растет твердость и износостойкость поверхностных слоев покрытия. Отжиг композиционных покрытий при температуре 510 °С в течение 1 ч приводит к повышению их износостойкости (таблица 4, рисунок 5) за счет

дисперсионного упрочения при выделении интерметаллидных соединений  $Al_3Fe_4$ ,  $Al_5Fe_2$  [6, 7]. При этом в случае использования легированной стали 06X19H9T при формировании композиционных покрытий количество выделившихся интерметаллидных соединений в процессе отжига меньше по сравнению с покрытием из «08Г2С + АК12» [10]. Это обусловлено пониженной диффузионной подвижностью атомов алюминия в высоколегированных стальных частицах по сравнению со скоростью диффузионного переноса в частицах из стали 08Г2С. Ионно-плазменное азотирование композиционного покрытия «08Г2С + АК12» при температурах 470 °С (4 ч) и 520 °С (5 ч) приводит к существенному возрастанию его износостойкости в условиях трения без смазочного материала. Повышенная износостойкость композиционного покрытия, подвергнутого ИПА, связана с выделением в его поверхностных слоях при упрочняющей обработке нитрида железа  $Fe_4N$ , твердого нитрида  $AlN$ , а также интерметаллидных соединений  $Al_3Fe_4$ ,  $Al_5Fe_2$ . Следует отметить, что износостойкость композиционного покрытия «08Г2С + АК12» после ионного модифицирования в 1,4–2,0 раза выше по сравнению с монопокрытием из стали 08Г2С после ИПА (таблица 4, рисунок 6), что обусловлено наличием в фазовом составе упрочненного композита нитрида алюминия  $AlN$ . В то же время в результате ионно-плазменного азотирования композиционного покрытия «06X19H9T + АД1» при температуре 470 °С в течение 4 ч интенсивность массового изнашивания снижается до  $42,5 \times 10^{-3}$  мг/м (таблица 4, рисунок 5). При этом на начальных стадиях сухого трения (600 мм) покрытие из «06X19H9T + АД1», обработанное ионами азота при температуре 470 °С в течение 4 ч, характеризуется относительно высокой износостойкостью, а затем происходит резкое повышение массового износа, что обусловлено изнашиванием в процессе трения тонкого упрочненного азотом слоя (таблица 1, рисунок 2) и выходом в зону трения неазотированных слоев покрытия. Ионно-плазменное азотирование покрытия из «06X19H9T + АД1» при температуре 520 °С в течение 5 ч обеспечивает увеличение толщины азотированного слоя и приводит к повышению износостойкости покрытия примерно в 160 раз по сравнению с исходным состоянием (таблица 4, рисунок 5). Существенный прирост износостойкости покрытия «06X19H9T + АД1» после ИПА связан с обра-

зованием в его поверхностных слоях нитрида  $Fe_4N$ , твердого раствора азота в аустените и нитридов  $CrN$  и  $AlN$  (таблица 2, рисунок 4). Вместе с тем, необходимо отметить, что износостойкость композиционного покрытия «06X19H9T + АД1» после ИПА в условиях сухого трения ниже, чем у монопокрытия из стали 06X19H9T, подвергнутого ионному азотированию (таблица 4, рисунок 5). Это связано с формированием в поверхностных слоях покрытия из «06X19H9T + АД1» при ионном азотировании относительно неглубоких модифицированных азотом слоев и повышением его пористости до  $\approx 10-15$  об. % (таблица 1).

Таблица 4 – Интенсивности массового и линейного изнашивания композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al в условиях сухого и граничного трения, соответственно

Материал покрытия и режим его обработки	Интенсивность массового изнашивания в условиях сухого трения ( $p = 1,5$ МПа) $I_q, \times 10^{-3}$ мг/м	Интенсивность линейного изнашивания в условиях граничного трения ( $p = 10$ МПа) $I_{lx}, \times 10^{-10}$
«08Г2С + АК12» после напыления	400,0	4,3
«08Г2С + АК12» + отжиг 510 °С (1 ч)	150,0	3,3
08Г2С + ИПА при 510 °С (5 ч)	3,9	2,7
«08Г2С + АК12» + ИПА при 470 °С (4 ч)	2,8	2,8
«08Г2С + АК12» + ИПА при 520 °С (5 ч)	1,9	2,3
«06X19H9T + АД1» после напыления	115,0	7,0
«06X19H9T + АД1» + отжиг 510 °С (1 ч)	92,6	6,6
06X19H9T + ИПА при 510 °С (5 ч)	0,5	2,4
«06X19H9T + АД1» + ИПА при 470 °С (4 ч)	42,5	2,3
«06X19H9T + АД1» + ИПА при 520 °С (5 ч)	0,7	2,1

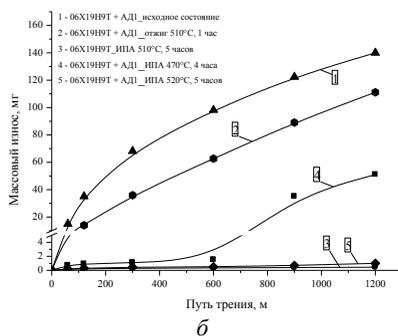
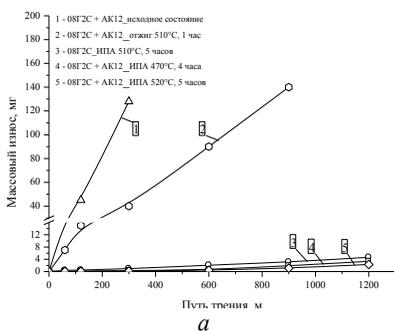


Рисунок 5 – Зависимости массового износа от пути трения для композиционных газотермических покрытий «08Г2С + АК12» (а) и «06Х19Н9Т + АД1» (б), испытанных в условиях сухого трения при удельной нагрузке 1,5 МПа

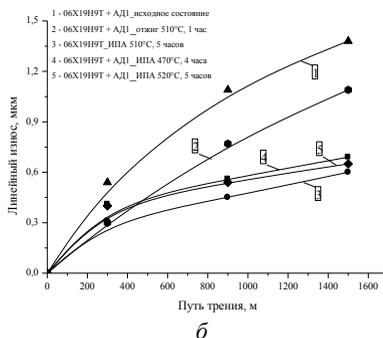
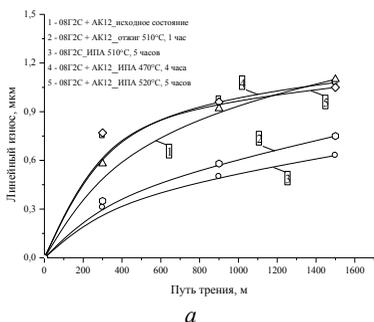


Рисунок 6 – Зависимости линейного износа от пути трения для композиционных газотермических покрытий «08Г2С + АК12» (а) и «06Х19Н9Т + АД1» (б), испытанных со смазочным материалом И-20А при удельной нагрузке 10 МПа

В условиях трения со смазочным материалом И-20А интенсивность линейного изнашивания покрытия из «08Г2С + АК12» составляет  $4,3 \times 10^{-10}$ , а покрытия из «06Х19Н9Т + АД1» –  $7,0 \times 10^{-10}$  (таблица 4, рисунок 6). Повышенная износостойкость в условиях граничного трения покрытия из «08Г2С + АК12» по сравнению с покрытием из «06Х19Н9Т + АД1» обусловлена более высокой твердостью первого из них, которая обусловлена наличием в нем алюминиевого сплава с повышенным содержанием кремния. Последующий отжиг композиционных покрытий при температуре 510 °С в течение 1 ч приводит к увеличению их износостойкости в

условиях трения со смазочным материалом И-20А (таблица 4, рисунок 6). В частности, износостойкость покрытия из «08Г2С + АК12» после отжига увеличивается в 1,3 раза по сравнению с исходным состоянием, а покрытия из «06Х19Н9Т + АД1» – в 1,1 раза. Повышение сопротивления изнашиванию отожженных покрытий обусловлено образованием в них в процессе отжига интерметаллидных соединений  $Al_{13}Fe_4$ ,  $Al_5Fe_2$ , которые повышают твердость и микротвердость композиционных покрытий. Ионно-плазменное азотирование композиционного газотермического покрытия «08Г2С + АК12» при температурах 470 °С (4 ч) 520 °С (5 ч) приводит к увеличению его износостойкости в 1,5–1,9 раз по сравнению с исходным состоянием (таблица 4, рисунок 6). Высокая износостойкость покрытий из «08Г2С + АК12» в результате ИПА достигается за счет формирования относительно глубоких модифицированных ионами азота поверхностных слоев, имеющих повышенный уровень микротвердости (таблица 3) вследствие образования в них нитридов  $Fe_4N$  и  $AlN$ . Также необходимо отметить, что интенсивность линейного изнашивания композиционного покрытия «08Г2С + АК12», обработанного ионами азота при 520 °С в течение 5 ч, в 1,2 раза ниже по сравнению с монопокрытием из стали 08Г2С после ИПА (таблица 4, рисунок 6), что связано с присутствием в композите неазотируемых частиц алюминия. Обработка ионами азота композиционного покрытия «06Х19Н9Т + АД1» при температурах 470 °С (4 ч) и 520 °С (5 ч) также приводит к существенному повышению его износостойкости при трении со смазочным материалом И-20А (таблица 4, рисунок 6). В частности, ионно-модифицированные покрытия из «06Х19Н9Т + АД1» имеют более высокую износостойкость (в 3,0–3,3 раза) по сравнению с исходным состоянием (таблица 4, рисунок 6). Высокая износостойкость композиционных покрытий из «06Х19Н9Т + АД1», подвергнутых ИПА, достигается за счет образования в процессе азотирования в поверхностных слоях покрытий твердых нитридов  $CrN$  и  $AlN$ , а также твердого раствора азота в аустените и нитрида  $Fe_4N$  (таблица 2). Кроме этого, износостойкость композиционных покрытий, подвергнутых ионно-плазменному азотированию, выше на 14 % по сравнению с износостойкостью монопокрытия из аустенитной стали 06Х19Н9Т (таблица 4, рисунок 6). Более высокая износостойкость обработанных

ионами азота покрытий из «06X19H9T + АД1» связана с наличием в их фазовом составе нитрида AlN, который наряду с нитридом CrN, характеризуется повышенной твердостью.

Таким образом, напыление композиционных покрытий на базе системы Fe-Al и их последующее ионно-плазменное азотирование позволяют формировать слои с повышенной износостойкостью, которые могут работать в различных условиях трения при высоких контактных давлениях.

**Заключение.** Исследовано структурно-фазовое состояние и износостойкость композиционных газотермических покрытий «08Г2С + АК12» и «06X19H9T + АД1», подвергнутых ионно-плазменному азотированию. Показано, что в процессе ионно-плазменного азотирования в поверхностных слоях газотермических покрытий формируются модифицированные азотом слои глубиной от 5 до 105 мкм, содержащие высокопрочный нитрид алюминия. В частности, фазовый состав азотированных слоев в композиционных покрытиях из «08Г2С + АК12» включает в себя  $\alpha$ -Fe, Al, Fe<sub>4</sub>N и AlN, а также интерметаллидные соединения Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub>, Al<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>. Модифицированные азотом слои в покрытиях из «06X19H9T + АД1» содержат  $\alpha$ -Fe,  $\gamma$ -Fe, Al,  $\gamma'_N$ , Fe<sub>4</sub>N, CrN, AlN и интерметаллиды Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub>, Al<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>. Микротвердость композиционных покрытий после ионно-плазменного азотирования находится в интервале от 100 до 1100 HV 0,025. Широкий диапазон значений микротвердости поверхностных слоев покрытий, подвергнутых ионному азотированию, обусловлен наличием на его поверхности как азотированных стальных частиц, так и прослоек из чистого неазотируемого алюминия. Показано, что износостойкость ионно-модифицированных азотом композиционных покрытий выше (до 240 раз) в условиях сухого трения и выше в условиях трения со смазочным материалом И-20А (до 3,3 раз) по сравнению с исходным состоянием. Установлено, что азотированные композиционные покрытия «08Г2С + АК12» и «06X19H9T + АД1» имеют более высокую износостойкость, чем покрытия из сталей 08Г2С и 06X19H9Т. Повышенное сопротивление изнашиванию композиционных покрытий «08Г2С + АК12» и «06X19H9Т + АД1», подвергнутых ионно-плазменному азотированию, достигается за счет образования в их поверхностных слоях твердого и высокопрочного нитрида алюминия.

## Список литературы

**1. Влияние** ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства экономичных газотермических покрытий из проволочных сталей различных классов / В. А. Кукареко [и др.] // Трение и износ. – 2013 (34). – № 6. – С. 621–627.

**2. Структурно-фазовое** состояние и износостойкость в условиях граничного трения обработанных ионами азота газотермических покрытий из сталей различных классов / В. А. Кукареко [и др.] // Трение и износ. – 2015 (36). – № 6. – С. 661–670.

**3. Теория и технология** азотирования / Ю. М. Лахтин [и др.]. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.

**4. Лахтин, Ю. М.** Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1984. – 256 с.

**5. Хасуи, А.** Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

**6. Высокотемпературная** термическая обработка газотермических покрытий из псевдосплава «Fe-Al» / А. Н. Григорчик [и др.] // Письма о материалах. – 2021. – Т.11. – № 2. – С. 198–203.

**7. Структурно-фазовое** состояние и коррозионная стойкость покрытий из псевдосплавов Fe-Al, Fe-Cr-Ni-Al и Ni-Cr-Al, напыленных методом гиперзвуковой металлизации / Е. В. Астрашаб [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2022. – Кн. 2. – С. 8–15.

**8. Ионно-модифицированные** субмикроструктурные титановые и циркониевые сплавы для медицины и механики // А. Г. Кононов [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 1 (22). – С. 47–53.

**9. Влияние** отжига на структурно-фазовое состояние и свойства газотермического покрытия из псевдосплава «Al-Fe-Cr-Ni», полученного методом высокоскоростного распыления проволочных материалов / Е. В. Астрашаб [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 4. – С. 71–77.

**10. Астрашаб, Е. В.** Структурно-фазовые превращения в материалах систем Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al и (Ni-Cr)-Al при получении износостойких и коррозионностойких покрытий для деталей машиностроения

ния: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / Е. В. Астрашав; Физико-технический институт НАН Беларуси. – Минск, 2023. – 193 с.

**11. A comparison** of sensitization kinetics in 304 and 316 stainless steels / E. Almanza [et al.] // *Journal of Material Science*. – 2000. – Vol. 35. – P. 3181–3188.

**12. Nitrogen** diffusion in stainless steel during irradiation with mass-selected low-energy N<sup>+</sup> ion beams / N. Tsubouchi [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 196. – P. 271–274.

**13. Особенности** формирования модифицированного азотом слоя при ионно-лучевой обработке гиперзвукового газотермического покрытия из аустенитной стали / А. Н. Григорчик [и др.] // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2016. – № 7. – С. 41–46.

**14. Белый, А. В.** Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота / А. В. Белый, В. А. Кукареко, А. Патеюк. Минск: Белорус. навука, 2007. – 244 с.

## References

**1. Vliyanie ionno-luchevogo azotirovaniya na strukturno-fazovoe sostoyanie i tribotekhnicheskie svojstva ekonomichnyh gazotermicheskikh pokrytij iz provolochnykh stalej razlichnykh klassov** [The influence of ion-beam nitriding on the structural-phase state and tribological properties of economical gas-thermal coatings made of wire steels of various classes] / V. A. Kukareko [et al.] // *Trenie i iznos = Friction and wear*. – 2013 (34). – No. 6. – P. 621–627.

**2. Strukturno-fazovoe sostoyanie i iznosostojkost' v usloviyah granichnogo treniya obrabotannykh ionami azota gazotermicheskikh pokrytij iz stalej razlichnykh klassov** [Structural-phase state and wear resistance under conditions of boundary friction of gas-thermal coatings treated with nitrogen ions from steels of various classes] / V. A. Kukareko [et al.] // *Trenie i iznos = Friction and wear*. – 2015 (36). – No. 6. – P. 661–670.

**3. Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya** [Theory and technology of nitriding] / YU. M. Lahtin [et al.]. – Moscow: Metallurgiya Publ., 1991. – 320 p.

**4. Lahtin, YU. M.** *Himiko-termicheskaya obrabotka metallov* [Chemical-thermal treatment of metals] / YU. M. Lahtin, B. N. Arzamasov. – Moscow: Metallurgiya Publ., 1984. – 256 p.

**5. Hasui, A.** *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying] / A. Hasui, O. Morigaki. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. – 240 p.

**6. Vysokotemperaturnaya termicheskaya obrabotka gazotermicheskikh pokrytij iz psevdosplava «Fe-Al»** [High-temperature heat treatment of gas-thermal coatings made of “Fe-Al” pseudo-alloy] / A. N. Grigorichik [et al.] // *Pis'ma o materialah = Letters about materials*. – 2021. – Vol. 11. – No. 2. – P. 198–203.

**7. Strukturno-fazovoe sostoyanie i korrozionnaya stojkost' pokrytij iz psevdosplavov Fe-Al, Fe-Cr-Ni-Al i Ni-Cr-Al, napylenykh metodom giperzvukovoj metallizacii** [Structural-phase state and corrosion resistance of coatings made of Fe-Al, Fe-Cr-Ni-Al and Ni-Cr-Al pseudo-alloys, sprayed by hypersonic metallization] / E. V. Astrashab [et al.] // *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sbornik nauchnykh trudov = Modern methods and technologies for creating and processing materials: collection of scientific papers* / - Minsk: Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 2022. – Book 2. – P. 8–15.

**8. Ionno-modificirovannyye submikrokristallicheskie titanovyye i cirkonievyye splavy dlya mediciny i mekhaniki** [Ion-modified submicrocrystalline titanium and zirconium alloys for medicine and mechanics] // A. G. Kononov [et al.] // *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*. – 2013. – No. 1 (22). – P. 47–53.

**9. Vliyanie otzhiga na strukturno-fazovoe sostoyanie i svoystva gazotermicheskogo pokrytiya iz psevdosplava «Al-Fe-Cr-Ni», poluchennogo metodom vysokoskorostnogo raspyleniya provolochnykh materialov** [The influence of annealing on the structural-phase state and properties of a gas-thermal coating made of “Al-Fe-Cr-Ni” pseudo-alloy, obtained by high-speed sputtering of wire materials] / E. V. Astrashab [et al.] // *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*. – 2021. – No. 4. – P. 71–77.

**10. Astrashab, E. V.** *Strukturno-fazovyye prevrashcheniya v materialakh sistem Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al i (Ni-Cr)-Al pri poluchenii iznoso- i korrozionnostojkikh pokrytij dlya detalej mashinostroeniya* [Structural-phase transformations in materials of the Fe-Al, (Fe-Cr-Ni)-Al and

(Ni-Cr)-Al systems when obtaining wear- and corrosion-resistant coatings for mechanical engineering parts]: dis. ... kand. techn. nauk: 05.16.09 / E. V. Astrashab; Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2023. – 193 p.

**11. A comparison** of sensitization kinetics in 304 and 316 stainless steels / E. Almanza [et al.] // Journal of Material Science. – 2000. – Vol. 35. – P. 3181 – 3188.

**12. Nitrogen** diffusion in stainless steel during irradiation with mass-selected low-energy N<sup>+</sup> ion beams / N. Tsubouchi [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. 196. – P. 271 – 274.

**13. Osobennosti formirovaniya modifitsirovannogo azotom sloya pri ionno-luchevoj obrabotke giperzvukovogo gazotermicheskogo pokrytiya iz austenitnoj stali** [Features of the formation of a nitrogen-modified layer during ion-beam treatment of a hypersonic gas-thermal coating made of austenitic steel] / A. N. Grigorchik [et al.] // *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya = Surface. X-ray, synchrotron and neutron research.* – 2016. – No. 7. – P. 41–46.

**14. Belyj, A.V. Inzheneriya poverhnostej konstrukcionnyh materialov koncentrirovannymi potokami ionov azota** [Engineering of surfaces of structural materials by concentrated flows of nitrogen ions] / A. V. Belyj, V. A. Kukareko, A. Pateyuk. Minsk: Belarusian navuka Publ., 2077. – 244 p.

*Поступила 18.11.2024*

*Received 18.11.2024*