

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ Fe-Al-Si ПОСЛЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик,  
А.В. Астрашаб, А.В. Сосновский

Объединенный институт машиностроения НАН Беларусь,  
ул. Академическая 12, Минск 220072, Беларусь,  
*v\_kukareko@mail.ru*

Исследовано структурно-фазовое состояние, микротвердость и износостойкость композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al-Si в исходном состоянии и после ионно-плазменного азотирования по различным режимам. Показано, что при ионном азотировании покрытия в его стальных частицах образуется высокопрочный нитрид AlN, что приводит к существенному повышению микротвердости частиц и значительному возрастанию износостойкости покрытия в условиях трения со смазочным материалом И-20А. Кроме этого, в процессе изотермической выдержки (4-5 часов) покрытий при температурах ионной обработки 470°C и 520°C происходит образование интерметаллических соединений Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> и Al<sub>5</sub>Fe<sub>2</sub> на границах напыленных алюминиевых и стальных частиц покрытия. Установлено, что ионно-плазменное азотирование при температуре 520°C в течение 5 часов приводит к повышению износостойкости композиционных покрытий на базе системы Fe-Al в ≈ 1.5-1.9 раз по сравнению с исходным состоянием и в ≈ 1.2 раза по сравнению с азотированным по аналогичному режиму покрытием из стали 08Г2С, что обусловлено формированием в композиционном покрытии высокопрочного нитрида алюминия.

**Ключевые слова:** композиционные покрытия; азотирование; нитрид алюминия; износостойкость.

## WEAR RESISTANCE OF COMPOSITE GAS-THERMAL COATINGS Fe-Al AFTER ION-PLASMA NITRIDING

Vladimir Kukareko, Marat Belotserkovsky, Aleksandr Grigorchik,  
Evgeniy Astrashab, Aleksey Sosnovsky

Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus,  
12 Akademicheskaya Str., 220072 Minsk, Belarus,  
*v\_kukareko@mail.ru*

The structural-phase state, microhardness and durability of composite gas-thermal coatings based on the Fe-Al-Si system in the initial state and after ion-plasma nitriding in various modes have been studied. It has been shown that alloying aluminum steel particles in the process of thermal spraying leads to the formation of high-strength AlN nitride in them by ion nitriding. In addition, during isothermal exposure (4-5 hours) of composite coatings at ion treatment temperatures of 470°C and 520°C, intermetallic compounds Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> and Al<sub>5</sub>Fe<sub>2</sub> are formed in them at the boundaries of sprayed aluminum and steel particles. The depth of nitrided layers in composite coatings is 20-105 microns. The large scatter in the values of nitrided layers in depth and their wave-like morphology is due to both the shape of the sprayed particles and the presence on the surface and in the subsurface layers of composite coatings of particles of pure aluminum alloy, which have dense oxide films on the surface, which act as a barrier to the diffusion of nitrogen atoms and prevent its diffusion movement into deeper layers of coatings. It has been established that ion-plasma nitriding leads to a significant increase in the microhardness of steel coating particles and a significant increase in its wear resistance under friction conditions with I-20A lubricant. In particular, the microhardness of steel particles after ion modification with nitrogen is ≈ 1050 HV 0.025. At the same time, ion-plasma nitriding at a temperature of 520°C for 5 hours leads to an increase in the wear resistance of composite coatings based on the Fe-Al-Si system by ≈ 1.5-1.9 times compared to the initial state and ≈ 1.2 times compared to a coating made of 08Mn2Si steel nitrided under a similar regime, which is due to the formation of high-strength aluminum nitride in the composite coating.

**Keywords:** composite coatings; nitriding; aluminum nitride; wear resistance.

## Введение

Ранее в работе [1] было показано, что газотермическое распыление алюминиевой и стальной проволок позволяет формировать композиционные покрытия на базе системы Fe-Al, характеризующиеся повышенной коррозионной стойкостью. В свою очередь, высокая коррозионная стойкость газотермических покрытий на базе системы Fe-Al связана с обволакиванием и легированием стальных частиц алюминием за счет контактного взаимодействия распыляемых частиц в процессе металлизации [2]. В частности, показано [1], что содержание алюминия в стальных частицах покрытия может достигать  $\approx 20$  масс. %. Известно, что формирование специальных нитридов (например, AlN, TiN, CrN) при ионном азотировании позволяет существенно повысить твердость/микротвердость и износостойкость металлических материалов [3]. Принимая во внимание повышенное содержание алюминия в стальных частицах покрытия, представляло интерес провести исследование структурно-фазового состояния и износостойкости композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al-Si, подвергнутых ионно-плазменному азотированию по различным режимам.

## Методика эксперимента

В качестве объектов исследований были выбраны композиционные газотермические покрытия на базе системы Fe-Al-Si, подвергнутые ионно-плазменному азотированию. Напыление покрытий Fe-Al-Si осуществлялось за счет одновременного распыления проволочных материалов из стали 08Г2С и алюминиевого сплава AK12 методом высокоскоростной металлизации [4]. Ионно-плазменное азотирование (ИПА) образцов покрытий проводилось на установке ФТИ 0.361 в среде 15% N<sub>2</sub> + 80% Ar + 5% CH<sub>4</sub>. Параметры ИПА: V=395 В, I=7.4 А, температура 470°C и 520°C, время обработки – 4-5 часов.

## Результаты и их обсуждение

Пористость напыленного покрытия Fe-Al-Si не превышала  $\approx 2$ -3 об. %, а его фазовый состав включает:  $\alpha$ -Fe, Al и оксиды FeO и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Последующее ионно-плазменное азотирование композиционных покрытий из Fe-Al-Si при температурах 470-520°C (4 и 5 часов) приводит к формированию модифицированного азотом слоя, повторяющего профиль напыленных частиц и имеющего глубину 20-105 мкм (рис. 1).

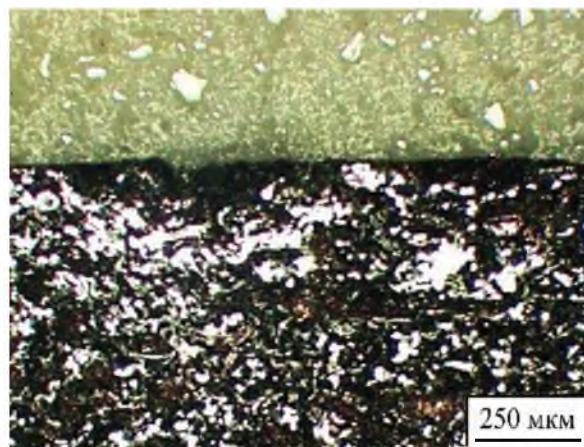


Рис. 1. Характерная микроструктура покрытия из Fe-Al-Si, подвергнутого ИПА при 520°C, 5 часов

Волнообразная морфология азотированных слоев обусловлена как формой напыленных частиц, так и наличием в композиционных покрытиях частиц чистого алюминиевого сплава, имеющего на поверхности плотные оксидные пленки, которые выступают барьером для диффузии атомов азота в глубокие слои покрытий. Кроме этого, как было показано в работе [5], 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.

Фазовый состав композиционных газотермических покрытий, подвергнутых ИПА, включает алюминий, стальные частицы, нитрид железа Fe<sub>4</sub>N и специальный нитрид AlN (рис. 2), а также интерметаллидные соединения Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub>, Al<sub>5</sub>Fe<sub>2</sub>.

Необходимо отметить, что образование

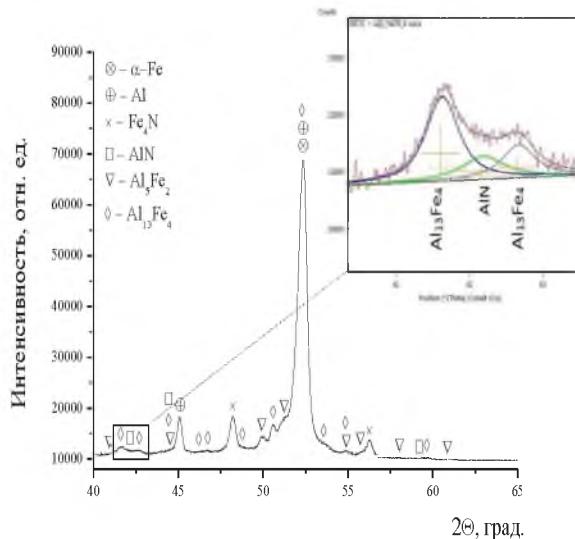


Рис. 2. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoK<sub>α</sub>) от композиционного газотермического покрытия из Fe-Al-Si после ИПА при 520°C (5 часов)

нитрида алюминия происходит в стальных частицах, легированных алюминием в процессе напыления покрытий. Выделение интерметаллических частиц происходит на границах стальных и алюминиевых частиц вследствие активного диффузационного переноса атомов алюминия в стальные прослойки при температурах азотирования.

Микротвердость поверхностных частиц покрытий из Fe-Al-Si после ИПА составляет 100-1050 HV 0.025. Существенное различие значений микротвердости частиц покрытия после ионного азотирования связано с наличием в его поверхностных слоях как ионно-модифицированных стальных прослоек, так и прослоек из незазорированного алюминиевого сплава.

Результаты триботехнических испытаний композиционных газотермических покрытий в условиях трения со смазочным материалом И-20А при удельной нагрузке 10 МПа представлены в таблице 1.

Можно видеть, что ионно-плазменное азотирование композиционного газотермического покрытия Fe-Al-Si при температурах 470°C (4 часа) и 520°C (5 часов) приводит к увеличению его износостойкости в ≈ 1.5-1.9 раза по сравнению с исходным состоянием (табл. 1).

Табл. 1. Интенсивность линейного изнашивания ( $I_h$ ) композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al-Si в условиях трения со смазочным материалом И-20А ( $p=10$  МПа)

Материал покрытия и режим его обработки	$I_h \times 10^{-10}$
Fe-Al-Si (после напыления)	4.3
08Г2С (ИПА при 510°C, 5 ч.)	2.7
Fe-Al-Si (ИПА при 470°C, 4 ч.)	2.8
Fe-Al-Si (ИПА при 520°C, 5 ч.)	2.3

Высокая износостойкость покрытий из Fe-Al-Si в результате ИПА достигается за счет формирования относительно глубоких модифицированных ионами азота поверхностных слоев, имеющих повышенный уровень микротвердости за счет наличия в них нитридов Fe<sub>4</sub>N и AlN.

Также необходимо отметить, что износостойкость композиционного покрытия Fe-Al-Si, обработанного ионами азота при 520°C в течение 5 часов, в ≈ 1.2 раза выше износостойкости монопокрытия из стали 08Г2С после ИПА при 510°C (табл. 1), что связано с присутствием в азотированном композиционном покрытии высокопрочного нитрида алюминия.

### Заключение

Исследовано структурно-фазовое состояние и износостойкость композиционных газотермических покрытий на базе системы Fe-Al-Si, подвергнутых ионно-плазменному азотированию.

Показано, что в процессе ионно-плазменной обработки в поверхностных слоях газотермических покрытий железо-алюминий-кремний формируются модифицированные азотом слои глубиной от 20 до 105 мкм, содержащие высокопрочный нитрид алюминия.

Установлено, что износостойкость прошедшего ионно-плазменное азотирование композиционного покрытия Fe-Al-Si в ≈ 1.5-1.9 раза выше износостойкости покрытия в исходном состоянии, а также в ≈ 1.2

раза выше износостойкости азотированного монопокрытия из стали 08Г2С.

#### **Библиографические ссылки**

1. Григорчик А.Н., Астрашаб Е.В., Кукареко В.А., Белоцерковский М.А., Сосновский А.В. Высокотемпературная термическая обработка газотермических покрытий из псевдосплава «Fe-Al». *Письма о материалах* 2021; 11(2): 198-203.
2. Астрашаб Е.В., Григорчик А.Н., Белоцерковский М.А., Кукареко В.А. Фазовое состояние и триботехнические свойства газотермического покрытия из псевдосплава «08Г2С+АК12», подвергнутого отжигу по различным режимам. *Актуальные вопросы машиноведения* 2020; (9): 353-356.
3. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.-И., Бемер З. Теория и технология азотирования. Москва: Металлургия; 1991. 320 с.
4. Белоцерковский М.А., Прядко А.С. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами. *Упрочняющие технологии и покрытия* 2006; (12): 17-23.
5. Григорчик А.Н., Кукареко В.А., Белый А.В., Белоцерковский М.А. Особенности формирования модифицированного азотом слоя при ионно-лучевой обработке гиперзвукового газотермического покрытия из аустенитной стали. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* 2016; (7): 41-46.