



## ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ Fe-Al

**Селиверстов И.А.**

*Херсонский национальный технический университет,*

**Троцан Г.Н.**

*Херсонская государственная морская академия,*

**Смирнов И.В.**

*Национальный технический университет Украины*

*«Киевский политехнический институт»,*

**Селиверстова С.Р.**

*Херсонский филиал Национального университета кораблестроения  
имени адмирала Макарова*

*С учетом современных тенденций интенсификации производственных процессов, увеличения рабочих давлений, скоростей, температуры, приводящих к ускоренному изнашиванию деталей, сформированы поверхностные слои покрытий путем плазменного напыления терморезагирующего порошка  $Fe_3Al$  и порошка, состоящего из механической смеси Fe и Al. Проведен анализ механических свойств плазменных покрытий. По результатам исследования химического состава и механических свойств композиций Fe—Al,  $Fe_3Al$  и бронзы ПГ19М установлены основные характеристики, определяющие износ и трение плазменных покрытий. Установлено, что покрытия Fe—Al,  $Fe_3Al$  обладают высокой износостойкостью, а по антифрикционным свойствам могут успешно конкурировать с бронзами.*

*В дальнейшем разработанные покрытия могут быть использованы для деталей, которые эксплуатируются при статических и динамических нагрузках.*

*Ключевые слова: механические свойства, износостойкость, твердость, напыление, плазменные покрытия.*

**Введение.** Среди перспективных интерметаллидных конструкционных материалов, обладающих уникальным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств, получивших распространение в последние годы [1], особое место занимают материалы и покрытия на основе алюминидов железа  $Fe_3Al$ . Эти материалы более легкие (плотность 6,7 г/см<sup>3</sup>) и значительно более дешевые, чем многие жаропрочные стали и сплавы. При получении таких сплавов, что немало важно, не требуется большого количества дефицитных легирующих элементов, например, как альтернатива сплавы Fe—Al могут успешно заменить дорогостоящие интерметаллидные системы Ni—Al и Ni—Ti. В ряде работ отмечены уникальные свойства сплавов  $Fe_3Al$ , в частности, высокая стойкость против окисления и сульфидной коррозии при потенциальной цене ниже многих нержавеющей сталей, недостатком является низкотемпературная хрупкость [2]. Введение 2...5 % Cr в сплав устраняет этот недостаток.

Область применения интерметаллидных сплавов на основе алюминидов железа достаточно широка: диски регенераторов автомобильных газотурбинных систем, фильтры горячего газа для газификации углей, экраны, обкладки, системы дожигания выхлопных газов автомобилей (замена нержавеющей стали при изготовлении элементов выхлопной системы), восстановление поверхностей деталей машин и др. [3, 4].

Однако, материалы алюминиды железа  $Fe_3Al$  не получили широкого применения в промышленности, из-за отсутствия относительно простой и недорогой технологии их производства.

Для получения композиционных материалов на основе Fe—Al сплавов используют различные методы, такие, как горячее изостатическое прессование и спекание в вакууме [5], дуговое и плазменное распыление [6], самораспространяющийся высокотемпературный синтез [7] и др. Технология их производства очень сложна и во многих случаях не позволяет достичь в композиционном конструкционном материале более высокого качественного уровня эксплуатационных и механических свойств.



Таким образом, получение сплавов Fe–Al методом газотермического нанесения покрытий является перспективным направлением. В частности, плазменное напыление позволяет производить синтез новых соединений из простых компонентов, имеет возможность проводить ремонтновосстановительные работы, производить напыление непосредственно на месте эксплуатации изделия при отсутствии корабления деталей и т.д. [8]

Поэтому работы по исследованию свойств и созданию новых экономно-легированных плазменных покрытий на основе железа являются актуальными.

**Цель статьи.** С учетом современных тенденций интенсификации производственных процессов, увеличения рабочих давлений, скоростей, температуры, приводящих к ускоренному изнашиванию деталей, сформировать поверхностные слои покрытий путем плазменного напыления термореагирующего порошка  $Fe_3Al$  и порошка, состоящего из механической смеси Fe и Al, рассмотреть возможность применения плазменных покрытий в качестве антифрикционных материалов. Провести анализ механических свойств плазменных покрытий на основе Fe и Al.

**Материалы и методы исследования.** Формирование поверхностных слоев покрытий производилось путем плазменного напыления термореагирующего порошка порошка  $Fe_3Al$  и порошка, состоящего из механической смеси Fe и Al. Согласно [9], для получения упорядоченной структуры  $Fe_3Al$  необходимое количество алюминия составляет 25-34 % ат. Температура плавления порошка  $Fe_3Al$   $T_{пл}=1510^{\circ}C$ , твердость HRC<sub>3</sub> 25-35. В качестве основы использовалась сталь 45. Размер фракций порошка в обоих случаях в исходном состоянии составлял 40-60 мкм.

Напыление осуществлялось на плазмотроне с частично вынесенной дугой в режиме генерации ламинарного плазменного потока, что обеспечивает лучшее проплавление частиц. Мощность плазмотрона составляет до 8 кВт, рабочий ток дуги плазмотрона 80-90А, напряжение 60В, в качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовался аргон с общим расходом 6 л/мин.

Износостойкость покрытий исследовалась на специально разработанной и усовершенствованной машине трения (рис. 1). Пары трения: неподвижный плоский образец 1 – исследуемый; подвижный (контртело) 2, цилиндр диаметром 8 мм – сталь 45 (HRC 50-52). Износостойкость определяли гравиметрическим методом. По условиям экспериментов значение окружной скорости контртела 0,1 м/с, нагрузка задавалась весом 3 с помощью рычага 4 и составляла 4,0-12,0 Н. Для определения момента трения трущихся пар в приводе контртела использовалась упругая муфта, значение момента пропорционально углу закручивания полумуфты.

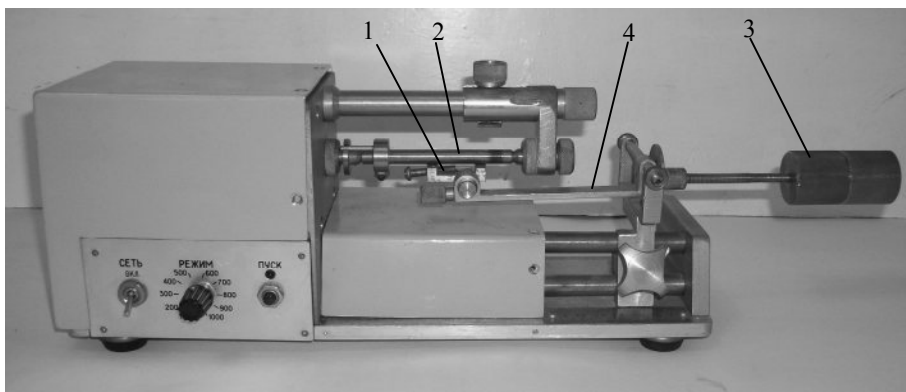


Рисунок 1 – Прибор для измерения износостойкости (общий вид)

Для оценки износостойкости и твердости покрытий использовался общеизвестный склерометрический метод исследований [10]. В качестве индентора использовалась четырехгранная алмазная пирамида Виккерса. Значение твердости определялось по формуле:



$$H_{\mu} = \frac{1.8544P_B}{b^2/2}, \quad (1)$$

где  $b$  – ширина царапины, м;  $P_B$  – нагрузка на индентор, Н.

Микроструктуру исследуемых композитов в зоне трека, а также его геометрические параметры изучали на микроскопе МИИ-8. Элементный состав полученных плазменных покрытий определялся методом локального микро-рентгеноспектрального анализа на растровых электронных микроскопах Camscan-4DV и ZEISS EVO 50XVP с применением энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Макро- и микроанализ поверхностных слоев сплава полученных покрытий показал, что структура покрытий достаточно плотная, с размерами сплетов от 18 до 140 мкм. Граница раздела между покрытием и подложкой без видимых дефектов. На покрытиях из механической смеси порошков Fe–Al наблюдаются незначительные зоны отслаивания покрытия. Пористость покрытий из порошка Fe<sub>3</sub>Al находится в пределах 2-3 %, покрытия из смеси порошков обладают большим значением пористости в пределах 3-8 %.

Результаты химического анализа покрытий Fe–Al (табл. 1, рис. 2) показали, что в процессе образования покрытия произошло практически полное взаимодействие компонентов Fe и Al, а неравномерность распределения фаз и компонентов объясняется не только синтезом интерметаллидов Fe<sub>3</sub>Al, но и других соединений FeAl<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, FeAl<sub>3</sub> образующихся при более высоком содержании алюминия.

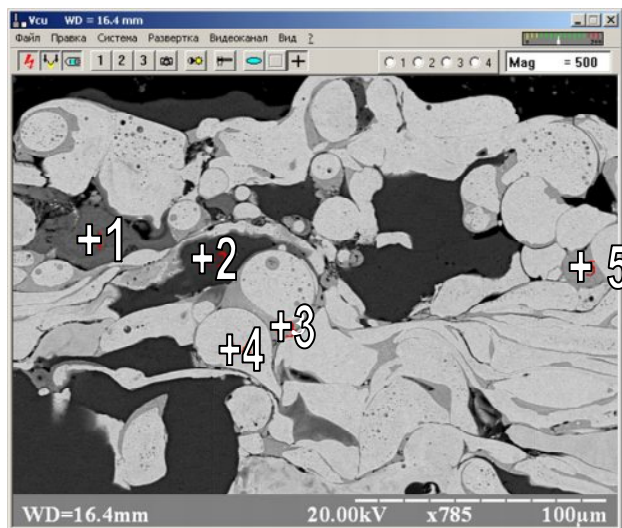


Рисунок 2 – Химический состав плазменного покрытия при напылении порошка системы Fe–Al

Таблица 1 – Химический состав плазменного покрытия при напылении порошка системы Fe–Al

Спектр	Al, %, вес	Fe, %, вес
Спектр1	56.9	43.10
Спектр2	95.22	4.78
Спектр3	1.17	98.83
Спектр4	3.58	96.42

Проведенные исследования на твердость напыленных покрытий отмечают стабильность показаний всех треков склерометрии. Твердость покрытий Fe–Al составляет  $H_{\mu 100}=420$ МПа, а твердость Fe<sub>3</sub>Al  $H_{\mu 100}=270$ МПа. Повышенные значения твердости покрытий Fe–Al обуславливается незначительным наличием оксидов и нитридов алюминия, образовавшихся в процессе формирования покрытия.



На рис. 3, 4 приведені результати испытаний плазменных покриттів на износостойкость.

Согласно кинетике износа (рис. 3) на протяжении первого часа трения происходит притирание материалов, которое сопровождается высшей потерей массы, после чего износ стабилизируется. После первого часа трения плазменных покриттів наблюдается перенос материала покриття на поверхность контртела, что оказывает содействие дальнейшему снижению износа материала и его стабилизации (кривые 1 и 2). По результатам исследований установлено, что износ покриттів Fe–Al на 15-20 % меньше при существенно большей твердости, незначительная разница в износостойкости является результатом повышенной пористости покриття.

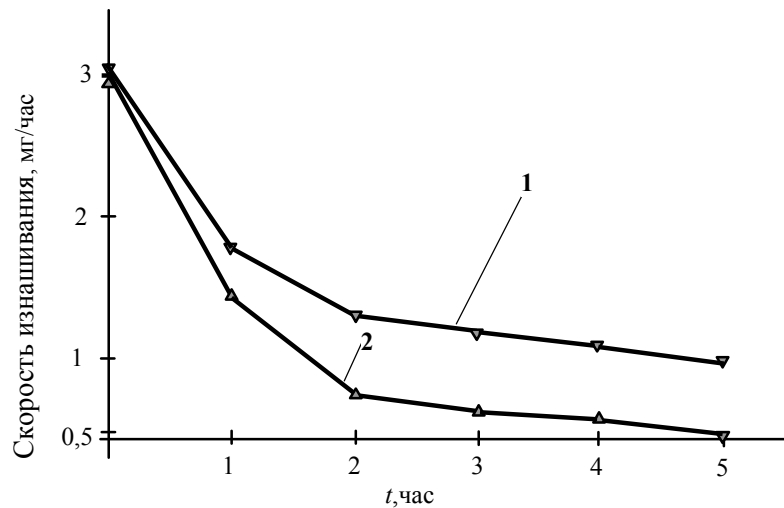


Рисунок 3 – Кинетика изнашивания газотермических покриттів на основе порошков, нагрузка 12Н: 1 – Fe<sub>3</sub>Al; 2 – Fe–Al

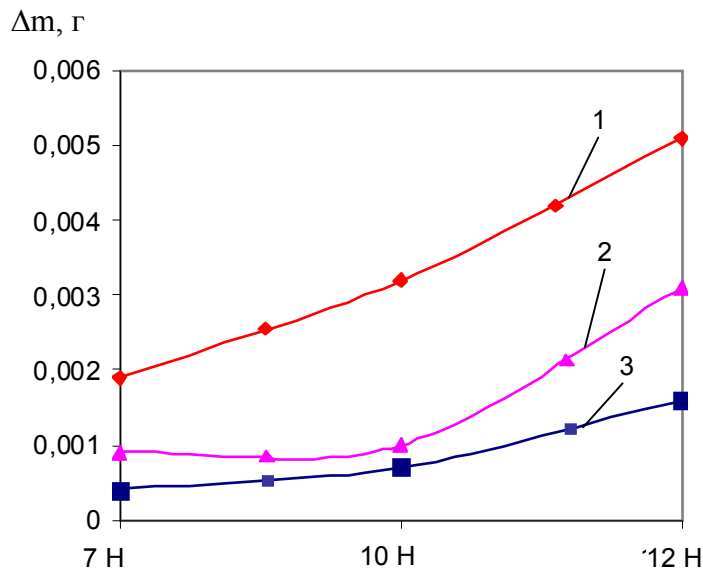


Рисунок 4 – Кинетика потери массы  $\Delta m$ , время испытаний 1 час: 1) покриття бронзы ПГ19М; 2) покриття Fe<sub>3</sub>Al; 3) покриття Fe–Al.

С учетом современных тенденций интенсификации производственных процессов, увеличения рабочих давлений, скоростей, температуры, приводящих к ускоренному изнашиванию деталей, в работе рассматривалась возможность применения плазменных покриттів в качестве антифрикционных материалов. С этой целью были проведены сравнительные исследования покриттів на основе Fe–Al и бронзы. Как известно, газотермические покриття из бронз, имеющие высокие антифрикционные свойства,



имеют и недостатки, такие как относительно низкую твердость, твердость полученного покрытия из порошка бронзы марки ПГ-19М-01 [11], фракция 40-100 мкм в нашем случае составляла  $H_{\mu 100}=150\text{МПа}$ .

Результаты кинетики износа свидетельствуют о повышенных значениях потери массы материала покрытия из бронзы в течение первого часа испытаний, что в принципе обуславливается твердостью материала. Для более качественной оценки процесса износа определялись антифрикционные свойства покрытий путем замера момента трения испытываемой пары, цилиндр (контртело) – плоскость (покрытие). Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Моменты трения плазменных покрытия

<i>Образец</i>	<i>Момент трения Н·мм, при нагрузке на контртело 4Н</i>	<i>Момент трения Н·мм, при нагрузке на контртело 7Н</i>	<i>Момент трения Н·мм, при нагрузке на контртело 10Н</i>
Бронза ПГ19М	39,17	46,59	119,73
Fe–Al	29,38	41,71	111,19
Fe <sub>3</sub> Al	26,79	38,95	102,67

Полученные моменты трения на покрытиях Fe<sub>3</sub>Al и Fe–Al указывают на высокие антифрикционные свойства по сравнению с бронзой, что косвенно подтверждает меньшие значения коэффициента трения.

**Выводы.** На основе анализа фазового состава, среднего размера зерен, определенного методом электронной микроскопии высокого разрешения и химического анализа показана возможность создания покрытий Fe–Al из простых компонентов. Изучены механические свойства покрытий композиции Fe–Al, Fe<sub>3</sub>Al и бронзы ПГ19М в условиях ступенчатого нагружения и износа. Показано, что напыление механической смеси порошков Fe и Al оптимального гранулометрического состава обеспечивает повышение твердости и износостойкости. Установлено, что антифрикционные характеристики покрытий на основе элементов Fe–Al выше чем у бронзы при более высокой твердости. В этой связи, применение плазменных покрытий на основе Fe и Al, может существенно увеличить срок службы венцов зубчатых колес и шестерен, втулок, поршней, электродов машин контактной сварки и других деталей машин, работающих в условиях экстремальных нагрузок. В дальнейшем разработанные покрытия могут быть использованы для деталей, которые эксплуатируются при статических и динамических нагрузках.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банных О. А. Перспективы создания жаропрочных и жаростойких сплавов и интерметаллических соединений / Банных О. А., Поварова К. Б. // Новые металлические материалы. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1989. – С. 29-33.
2. Sikka V. K. Development and commercialization status of Fe<sub>3</sub>Al – based intermetallic alloys / V. K. Sikka, S. Viswanathan, C. G. McKaamey // Struct. Intermetallics. – Champion, Pa., 1993. – Sept. 26-30.
3. Hunt Margaret. The promise of intermetallics / Margaret Hunt. // Mater. Eng. – 1990. – 107, N 3. – P. 36-39.
4. Moriss D. G. Creep resistance in a new alloy based on Fe<sub>3</sub>Al / D. G. Moriss, M. Mazmy, C. Noseda // Scr. Met et Mater. – 1994. – 31, N 2. – P. 173-178.
5. Jain M. Synthesis, processing, deformation of bulk nanophase Fe–28Al–2Cr intermetallic / M. Jain, T. Christman // Acte Met. Et Mater. – 1994. – 43, N 6. – P. 1901-1911.
6. Rawers J. C. Tensile fracture iron – iron aluminide foil composites / J. C. Rawers // Scr. Met. Et Mater. – 1994. – 30, N 6. – P. 701-706.



7. Lawrynowicz D. E. Spray atomization and deposition of fiber reinforced intermetallic matrix composites / D. E. Lawrynowicz, E. J. Lavernia // Scr. Met. Et Mater. – 1994. – 31, N 9. – P. 1277-1281.
8. Кудинов В. В. Теория, технология и оборудование. Нанесение покрытий напылением / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. – М. : Металлургия, 1992. – 432 с.
9. Хансен М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. – Т. 1. – 1952. – 107 с.
10. Селиверстов И. А. Исследование свойств сплавов с покрытиями TiN, полученными методом КИБ / И. А. Селиверстов, И. В. Смирнов, С. А. Русанов // Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины. – 2011. – № 1 (17). – С. 184-187.
11. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / [Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов и др.]. – К. : Машиностроение, 1987. – 544 с.

**Селиверстов І.А., Троцян Г.М., Смирнов І.В., Селиверстова С.Р. ДОСЛІДЖУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ FE-AL**

*З урахуванням сучасних тенденцій інтенсифікації виробничих процесів, збільшення робочого тиску, швидкостей, температури, деталей, що приводять до прискореного зношування, сформовані поверхневі шари покриттів шляхом плазмового напылення терморезаючого порошку  $Fe_3Al$  і порошку, що складається з механічної суміші Fe і Al. Проведений аналіз механічних властивостей плазмових покриттів. Шляхом плазмового напылення отримані покриття Fe–Al з простих компонентів. За результатами дослідження хімічного складу та механічних властивостей композицій Fe–Al,  $Fe_3Al$  та бронзи ПГ19М встановлені основні характеристики, які визначають зносостійкість та тертя плазмових покриттів. Встановлено, що покриття Fe–Al,  $Fe_3Al$  володіють високою зносостійкістю, а по антифрикційних властивостях можуть успішно конкурувати з бронзами.*

*Надалі розроблені покриття можуть бути використані для деталей, які експлуатуються при статичних і динамічних навантаженнях.*

*Ключові слова: механічні властивості, зносостійкість, міцність, напылення, плазмові покриття.*

**Seliverstov I.A., Trotsan G.N., Smirnov I.V., Seliverstova S.R. RESEARCHES OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF PLASMA SPRAY COATINGS ON THE BASIS OF FE–AL.**

*Taking into account the modern tendencies of intensification of production processes, increase of workings pressures, speeds, temperature, resulting in a speed-up wear details, the superficial layers of spray coatings are formed by plasma spray coatings of powder  $Fe_3Al$  and powder, consisting of mechanical mixture of Fe and Al. The analysis of mechanical properties of plasma spray coatings is conducted. By plasma spray coatings of Fe–Al are got from simple components. On results research of chemical composition and mechanical properties of compositions of Fe–Al,  $Fe_3Al$  and bronzes of PG19M is set basic descriptions, determining wear and friction of plasma spray coatings. It is set that coatings of Fe–Al,  $Fe_3Al$  possess high wearproofness, and on anti-friction properties can successfully compete with bronzes.*

*The in future developed coatings can be used for details which are exploited at the static and dynamic loadings.*

*Keywords: mechanical properties, wearproofness, hardness, plasma spray coatings.*

Статтю прийнято  
до редакції 11.05.14.