

эффектом упрочнения металлической компоненты в металлопластмассовых композитах.

Применение полимерных композитов ИММС-А и ИОНХ-1 для изготовления вкладыша шаровой опоры цилиндра подвески карьерного самосвала БелАЗ взамен МПК ДХ-1 в сочетании с использованием пластичной смазки с наноразмерными добавками позволит увеличить ресурс узла в 5,9 – 6,2 раза.

#### Литература

1. Витязь, П.А. Наноструктурные материалы и перспективы их применения // Наноструктурные материалы – 2004: Беларусь – Россия: Мат. III Междунар. семинара. Минск 12 – 14 октября 2004 г. / П.А. Витязь. – Минск: ИТМО, 2004. – С. 7 – 10.
2. Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения (обзор) / В.А. Струк [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2002. – Т. 7. – № 3. – С. 53 – 65.
3. Применение наноразмерных алмазоприграфитовых присадок для повышения триботехнических свойств элементов пар трения / П.А. Витязь [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 10. – С. 19 – 22.
4. Триботехнические свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс / под ред. Г.В. Сагалаева, Н.Л. Шембель. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 64 с.
5. Цеев, Н.А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме: справ. / Н.А. Цеев, В.В. Козелькин, А.А. Гурьев. – М.: Машиностроение, 1991. – 192 с.
6. Полимерные материалы для подшипников скольжения, смазываемых водой (обзор) / Б.М. Гинзбург [и др.] // ЖИХ. – 2006. – Т. 79. – № 5. – С. 705 – 716.

УДК 621.762:71

## ВЛИЯНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВА Fe-Al

**А.В. Белый**

*ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск;*

**В.А. Кукареко**

*ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», Минск;*

**Н.Н. Попок**

*УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк;*

**К.Й. Чой**

*ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», Могилев*

**Введение.** Интерметаллиды системы Fe-Al являются перспективным триботехническим материалом для узлов трения, работающих в экстремальных условиях высоких контактных давлений и агрессивных сред. Вместе с тем в исходном состоянии сплав FeAl наряду с хорошей коррозионной стойкостью и жаростойкостью не обладает требуемыми прочност-

ными свойствами и триботехническими характеристиками. В связи с этим обработка ионами азота интерметаллида FeAl может служить весьма перспективным способом повышения физико-механических характеристик его поверхностных слоев.

**Цель работы:** исследовать влияние режимов ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние, микротвердость и триботехнические свойства интерметаллического соединения FeAl.

**Методика исследования.** Исследование проводилось на образцах ( $\varnothing 10$  мм, высота 7 мм), вырезанных из отливки сплава FeAl (Fe – 49,9 %; Al – 50,0 %; Zr – 0,05 %; В – 0,05 ат.%). Ионно-лучевая обработка осуществлялась с помощью ионного источника с замкнутым дрейфом электронов. Имплантация проводилась при энергии ионов азота 3 кэВ, плотности ионного тока  $2 \text{ мА}\cdot\text{см}^{-2}$ . Флюенс падающих ионов составлял  $\approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ . Температура образцов в процессе обработки поддерживалась при 670, 720, 770, 820 и 870 К. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н. Триботехнические испытания по схеме возвратно-поступательного перемещения проводили на автоматизированном трибометре АТВП, оснащенный устройством для измерения коэффициента трения. В качестве контртела использовалась пластина из закаленной стали У8 (HV = 8000 МПа). Испытания проводили в условиях трения без смазочного материала при номинальном давлении  $p = 1,5 \text{ МПа}$ . Средняя скорость перемещения образца относительно контртела составляла  $\approx 0,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеновском дифрактометре ДРОИ-3.0 в монохроматизированном  $\text{CoK}_\alpha$  излучении, при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Для расшифровки фазового состава использовалась картотека PDF.

**Результаты исследования и их обсуждение.** В исходном состоянии сплав FeAl имеет примитивную кубическую решетку (Pm3m) с параметром  $a = 0,2895 \text{ нм}$  и упорядоченным расположением атомов Fe и Al (рис. 1). Размер зерна сплава составляет  $D_z = 200 - 300 \text{ мкм}$ . Твердость сплава HV = 3500 МПа. В результате обработки сплава FeAl интенсивными потоками ионов азота ( $j = 2 \text{ мА}\cdot\text{см}^{-2}$ ;  $D = 3 \cdot 10^{19} \text{ ион}\cdot\text{см}^{-2}$ ) при температуре 720 К микротвердость поверхностного слоя увеличивается до 7200 МПа (рис. 2). В модифицированном при 720 К азотом слое регистрируется выделение наноразмерных нитридных частиц AlN с гексагональной кристаллической решеткой (P6<sub>3</sub>mc) и параметрами  $a = 0,3111 \text{ нм}$  и  $c = 0,4979 \text{ нм}$ ;  $c/a = 1,6003$ , а также наноразмерных частиц  $\alpha$ -Fe. Толщина азотированного слоя не превышает 10 мкм. Повышение температуры ионно-лучевой обработки до 770 К приводит к укрупнению ультрадисперсных частиц нитридов алюминия AlN с гексагональной решеткой P6<sub>3</sub>mc.

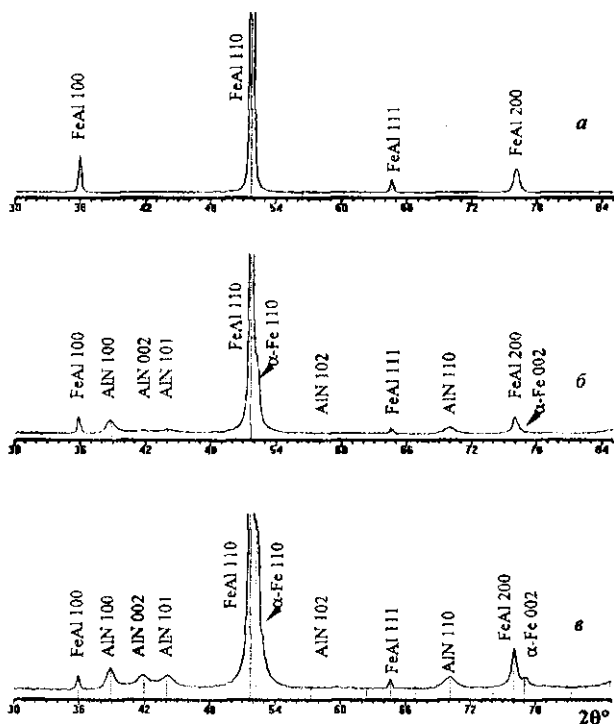


Рис. 1. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ( $\text{CoK}\alpha$ ) от поверхностных слоев сплава FeAl, прошедшего обработку по различным режимам: *a* – исходное состояние; *б* – обработка  $N^1$  при 770 К; *в* – то же при 870 К

Кроме этого, в слое регистрируется образование частиц  $\alpha\text{-Fe}$  (см. рис. 1, б). Толщина слоя возрастает до 15 мкм (рис. 3), а его микротвердость составляет  $H_{0,48} = 11800$  МПа. Образование частиц  $\alpha\text{-Fe}$  связано с обеднением матричной фазы алюминием в окрестностях выделившихся при имплантации частиц AlN и формированием в этих областях  $\alpha\text{-Fe}$  с ОЦК кристаллической решеткой. Возможным механизмом образования наноразмерных частиц AlN и  $\alpha\text{-Fe}$  в процессе азотирования может являться реакция прерывистого распада [1], инициируемая образованием частиц AlN. Ионно-лучевая обработка сплава при 870 К приводит к увеличению толщины азотированного слоя до 20 – 25 мкм. Микротвердость слоя составляет 10200 МПа. В слое содержатся частицы AlN и  $\alpha\text{-Fe}$ .

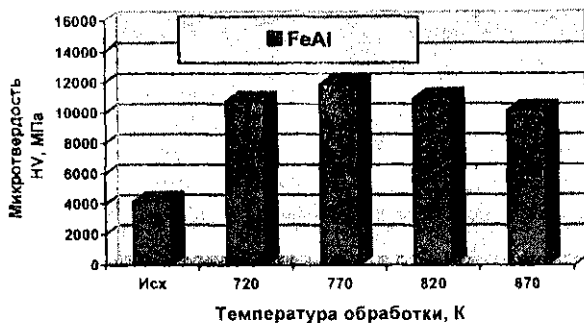


Рис. 2. Микротвердость интерметаллического сплава FeAl, подвергнутого ионно-лучевому азотированию по различным режимам

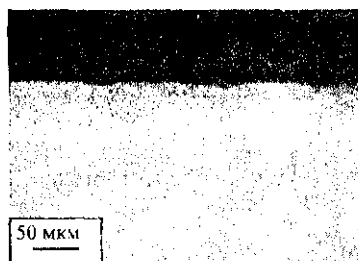


Рис. 3. Микроструктура сплава FeAl, модифицированного ионами азота при 770 К

Результаты триботехнических испытаний образцов сплава FeAl, проведенных в условиях трения без смазки с использованием контртела из закаленной стали У8 (давление испытаний  $p \approx 1,5$  МПа), представлены на рис. 4. Можно видеть, что в исходном состоянии сплав FeAl характеризуется сравнительно низкой износостойкостью. В частности, интенсивность весового изнашивания сплава FeAl составляет  $I_q = 100,0 \cdot 10^{-3}$  мг/м. Коэффициент трения сплава находится в пределах  $f \approx 0,7$ . Ионно-лучевая обработка азотом при 720 К приводит к снижению весового износа на начальных стадиях испытаний. Однако после истирания модифицированного азотом слоя (путь трения  $\sim 800$  м) интенсивность изнашивания сплава резко возрастает и выходит на уровень значений исходного неимплантированного состояния. Средняя интенсивность изнашивания на начальной стадии испытаний составляет  $I_q = 7,7 \cdot 10^{-3}$  мг/м. Коэффициент трения сплава на начальных

стадиях испытаний составляет  $f = 0,9 - 1,0$ , однако по мере истирания слоя значения  $f$  снижаются и выходят на уровень  $0,7 - 0,75$ . Ионно-лучевая обработка сплава FeAl при температурах 770 и 820 К приводит к существенному снижению его весового износа и величина  $I_q$  сплава уменьшается до значений  $7,1 \cdot 10^{-3}$  и  $5,2 \cdot 10^{-3}$  мг/м соответственно. Значения коэффициента трения сплава, обработанного при 770 - 820 К, находятся на уровне  $f = 0,9 - 1,0$ . Увеличение температуры ионно-лучевой обработки до 870 К приводит к дальнейшему возрастанию износостойкости модифицированного азотом слоя и некоторому увеличению коэффициента трения до  $f \cong 1,0$ . В частности, интенсивность весового изнашивания образцов сплава обработанного при 870 К составляет  $4,0 \cdot 10^{-3}$  мг/м. На стадиях износа модифицированного слоя поверхность трения испытываемых образцов гладкая и с характерным блеском. После изнашивания имплантированного слоя на поверхности трения появляются бороздчатые следы, характерные для адгезионного взаимодействия.

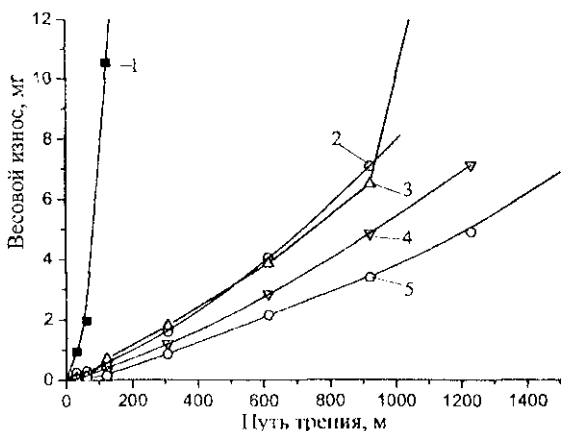


Рис. 4. Зависимости весового износа интерметаллического сплава FeAl, обработанного по различным режимам: 1 — исходное состояние (механическая шлифовка); 2 — то же + ионная имплантация  $N^+$  при 720 К; 3 — то же при 770 К; 4 — то же при 820 К; 5 — то же при 870 К

**Заключение.** Исследованы структура, фазовый состав и триботехнические свойства интерметаллического сплава FeAl, подвергнутого ионно-лучевому азотированию при температурах 670 - 870 К. Показано, что ионно-лучевая обработка сплава приводит к образованию модифицированных азотом слоев толщиной до 20 - 25 мкм и микротвердостью до 11800 МПа.

В азотированных слоях зарегистрировано выделение частиц нитридной фазы AlN с гексагональной решеткой и частиц  $\alpha$ -Fe. Показано, что выделение нитрида алюминия приводит к увеличению износостойкости сплава FeAl в 15 – 25 раз.

#### Литература

1. Белый, А.В. *Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота* / А.В. Белый, В.А. Кукарко, А. Патеюк. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 244 с.

УДК 336.792.3:621.891

### УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

С.Г. Чулкин, А.П. Гаршин, Ф.А. Осокин  
ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет», Россия

**Введение.** Процесс создания машиностроительной керамики за последние десять лет вышел за рамки лабораторных исследований. Главное преимущество керамических материалов по сравнению с лучшими сталями и сплавами состоит в большей стойкости их к изнашиванию, особенно в интенсивных условиях эксплуатации (при высоких температурах – вплоть до 2000 К), в коррозионно-активных и абразивных средах. Однако сложность технологии изготовления изделий из керамических материалов, к которым относится и реакционно-спеченный материал на основе карбида кремния (SiC-материал), сдерживает широкое его применение в машиностроении.

В связи с этим представляется необходимым продолжить исследования в области технологии получения, конструирования и трибологии SiC-материалов, позволяющие определять оптимальные условия их эксплуатации и тем самым расширить диапазон использования этих материалов в машиностроении.

Статья посвящена рассмотрению установки для исследования трибологических свойств указанных выше материалов.