

УДК 621.793.09

DOI: 10.17223/00213411/62/7/191

*А.Б. МАРКОВ, Е.В. ЯКОВЛЕВ, Д.А. ШЕПЕЛЬ, А.В. СОЛОВЬЕВ, В.И. ПЕТРОВ*

## ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВЫЙ СИНТЕЗ ПОВЕРХНОСТНОГО СПЛАВА ПУТЕМ ОБЛУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО Ni–Al-ПОКРЫТИЯ

Представлены результаты исследований по электронно-пучковому синтезу поверхностного сплава никель-алюминий. Сплав формировался в едином вакуумном цикле, на стальной подложке, путем напыления и последующего однократного облучения многослойной системы Ni (0.5 мкм) – Al (1.5 мкм) – Ni (0.5 мкм) низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком (НСЭП) микросекундной длительности. В работе численным методом был определен оптимальный режим облучения для формирования поверхностного сплава, при котором происходит плавление всех нанесенных пленок. Показано, что за один импульс облучения НСЭП из нанесенных Ni–Al-слоев формируется поверхностный сплав, состоящий, в основном, из высокотемпературной интерметаллической фазы NiAl. Структура поверхностного сплава представляет собой однородную пленку толщиной 2 мкм и расположенные под ней глобулы размером 2×4 мкм, разделенные тонкой прослойкой материала подложки. Установлено, что износостойкость сформированного NiAl поверхностного сплава в 2.7 раза выше по сравнению с исходной стальной подложкой.

**Ключевые слова:** низкоэнергетический сильноточный электронный пучок, поверхностный сплав, поверхностное легирование, сплав никель – алюминий, износостойкость.

### Введение

Широкое применение низкоуглеродистой стали в промышленности при изготовлении различных конструкций, деталей машин и механизмов, обусловлено простотой обработки и относительно низкой стоимостью материала [1]. Однако ее существенными недостатками являются низкие износостойкость, коррозионная стойкость и стойкость к окислению [2]. Один из способов улучшения этих свойств состоит в нанесении покрытий из различных материалов и сплавов. В последнее время большое внимание уделяют композиционным покрытиям из высокотемпературных интерметаллических соединений [1, 2]. Особое место среди этих покрытий занимает интерметаллическое соединение NiAl, которое сочетает свойства, как керамики, так и металла, обладая высокой температурой плавления, теплопроводностью, стойкостью к окислению и высокотемпературной коррозионной стойкостью наряду с низкой массовой плотностью [3]. Все это делает интерметаллид NiAl весьма привлекательным для покрытий деталей, используемых при высоких температурах в агрессивных средах, например турбинных лопаток авиационных двигателей, направляющих лопаток промышленных паровых турбин и т.д. [4].

В настоящее время существует множество методов нанесения интерметаллических покрытий, таких, как электроосаждение [5], осаждение из паровой фазы (PVD) [6], химическое осаждение из паровой фазы (CVD) [7], термическое [8] и холодное напыление [9], механическое легирование [1], индукционный высокоэнергетический нагрев [10], лазерное легирование [11] и, наконец, формирование покрытия путем самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [2]. Все они обладают своими достоинствами и недостатками. Например, при PVD, CVD и термическом распылении рабочая температура процессов нанесения покрытия является относительно высокой и возникают сложности, связанные с неизбежным окислением как материала покрытия, так и подложки [1]. Метод электроосаждения, хотя и считается экономически эффективным, может применяться только для ограниченного числа металлических покрытий [12]. Также при нанесении интерметаллических покрытий существуют трудности, связанные со значительным различием в физических свойствах никеля и алюминия, а также, как правило, и материала подложки, например, их температур плавления и коэффициентов термического расширения. Отдельной проблемой является низкая адгезия покрытия к подложке [11–13].

Частично преодолеть указанные выше трудности позволяют методы, основанные на формировании поверхностных сплавов жидкофазным смешиванием систем пленка – подложка концентрированными потоками энергии, а именно, импульсными интенсивными лазерными [11], электронными [14] и ионными [15] пучками, а также потоками плазмы [16]. Преимуществом данных

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>