

УДК 533.9:539.4.015.2

DOI: 10.17223/00213411/63/10/174

*Н.Н. КОВАЛЬ, Ю.Ф. ИВАНОВ, В.Н. ДЕВЯТКОВ, В.В. ШУГУРОВ, А.Д. ТЕРЕСОВ, Е.А. ПЕТРИКОВА***РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСНОГО ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО МЕТОДА
МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ***

Обнаружены закономерности модификации элементного и фазового состава и дефектной субструктуры, механических и трибологических свойств углеродистой стали при комбинированной обработке в едином вакуумном цикле. Проведено формирование в едином вакуумном пространстве пленок Si+Nb, толщиной 1 мкм каждая, на образцах из стали 40X на установке «КОМПЛЕКС» магнетронным (Si) и электродуговым (Nb) методами с плазменным ассистированием. Высокоскоростное плавление системы пленка (Si+Nb) / сталь 40X-подложка осуществлялось интенсивным импульсным электронным пучком. Выявлен режим облучения системы пленка (Si+Nb) / (сталь 40X)-подложка (50 Дж/см², 200 мкс, 3 имп.), позволяющий сформировать поверхностный слой, характеризующийся высокой твердостью, равной 9600 МПа (в 3.3 раза превышающей твердость стали 40X в исходном (феррито-перлитная структура) состоянии), и износостойкостью, более чем в 15 раз превышающей износостойкость исходной стали 40X. Показано, что высокие прочностные и трибологические свойства стали обусловлены образованием частиц упрочняющей фазы (Nb₅Si₃ и Nb_{3.61}Si_{0.39}, Nb₀₈Fe₀₂, SiC, NbO₂) и сравнительно большой (до 30 мкм) толщиной упрочненного слоя.

Ключевые слова: электронно-ионно-плазменная обработка, модификация поверхности в едином вакуумном пространстве, система пленка / подложка, структура, свойства.

Введение

Последние исследования показали перспективность модификации поверхности металлов и сплавов путем комбинированной обработки – напыления тонких пленок различных элементов с последующим перемешиванием под действием высокоэнергетических импульсных электронных пучков [1, 2]. Результатом такой обработки является градиентная структура поверхностного слоя с плавным изменением концентрации легирующих элементов по глубине, что позволяет значительно повысить прочностные и трибологические характеристики материала.

Существенным недостатком такого метода модифицирования поверхности является неравномерный характер формирующихся структур, который восстанавливается до равновесного при длительной эксплуатации при повышенных температурах. В связи с этим востребованным является технология обработки материалов, которая позволяет повысить их служебные характеристики (твердость, прочность, износостойкость и др.) за счет описанных выше процессов, сохранив при этом термическую стабильность структуры. В этом направлении активно ведутся работы, в которых уделяется особое внимание многокомпонентным (трех- и более элементным) покрытиям, обладающим сложной многофазной нанокристаллической или аморфной структурой и имеющим уникальные свойства, такие, как сверхтвердость (≥ 40 ГПа) [3], стойкость к окислению при высоких температурах (> 1000 °C) [4], низкий коэффициент трения (≤ 0.1) [5].

В работах [5–8] показано, что одними из перспективных классов термически стабильных соединений (в том числе и в воздушной атмосфере) являются силициды тугоплавких металлов (Nb, Mo, Zr, Cr, Ti), которые обладают высокой температурой плавления, низкой диффузионной подвижностью кислорода в их кристаллических решетках. Силициды переходных металлов рассматриваются в последнее время как кандидаты для замены никелевых суперсплавов при изготовлении лопаток газовых турбин. Силициды ниобия и титана являются интересными как с научной, так и с технологической точки зрения ввиду их высокой температуры плавления, сопротивлению высокотемпературной ползучести и низкой плотности по сравнению с теми же никелевыми суперсплавами. В системе Nb–Si существует три стабильных силицида [9] – Nb₃Si, стабильность которого ограничивается температурным интервалом 1700–1980 °C, а ниже 1700 °C данный силицид распадается на Nb и силицид Nb₅Si₃, последний из которых обладает максимальной температурой плавления 2520 °C, силицид NbSi₂ имеет температуру плавления 1927 °C. Однако описанные силицид-

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (проекты № 19-08-00248 и 19-48-700010).

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>