

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СПЛАВА НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ-МЕДЬ С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Е.В. Яковлев, А.Б. Марков

*Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический 2/3, 634055 Томск, Россия, yakovev@lve.hcei.tsc.ru*

Представлены результаты исследований по формированию поверхностного сплава нержавеющей стали-медь с помощью низкоэнергетического сильноточного электронного пучка (НСЭП). Показано, что формируется гомогенный поверхностный сплав. Установлено, что концентрация меди в поверхностном слое сплава растет после облучения НСЭП. В результате формирования поверхностного сплава удалось многократно увеличить износостойкость медных образцов (до 7.5 раз) по сравнению с исходными образцами.

Введение

Во многих случаях сдерживающими факторами для использования меди и ее сплавов в различных областях промышленности являются склонность к износу и коррозии. В данной работе для улучшения износостойкости был сформирован поверхностный сплав нержавеющей стали-медь и исследованы его свойства.

Материал и методика исследования

Формирование поверхностного сплава осуществлялось на электронно-пучковой машине «РИТМ-СП» (Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия), которая на одной вакуумной камере объединяет магнетронную распылительную систему и источник низкоэнергетических (10-30 кэВ) сильноточных (до 25 кА) электронных пучков микросекундной длительности импульса [1]. В качестве подложек использовали диски из меди вакуумной плавки, исходная шероховатость поверхности образцов составляла $R_a = 0.2$ мкм. Поверхностный сплав формировался путем чередования операций напыления пленки нержавеющей стали на медную подложку и последующего облучения системы пленка-подложка НСЭП. Толщина пленок составляла 1 мкм.

Исследованы морфология и топография поверхности образцов, а также ее элементный состав. Трибологические испытания проводили по схеме «pin-on-disc». В качестве контртела использовали шарик из стали 100Cr6 радиусом 3 мм при нагрузке 2 Н.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование морфологии образцов с поверхностным сплавом показало, что формируется бездефектная поверхность с единичными кратерами (рис. 1). Шероховатость образцов с поверхностным сплавом растет с увеличением плотности энергии. Минимальное значение шероховатости 0.3 ± 0.1 мкм наблюдалось при плотности энергии 3.6 и 4 Дж/см². При 4.3 и 5.2 Дж/см² шероховатость составляла 0.9 ± 0.1 и 1.1 ± 0.1 мкм, соответственно. Максимальное значение шероховатости 1.2 ± 0.2 мкм наблюдалось при плотности энергии НСЭП 5.9 Дж/см².

Исследование элементного состава методом

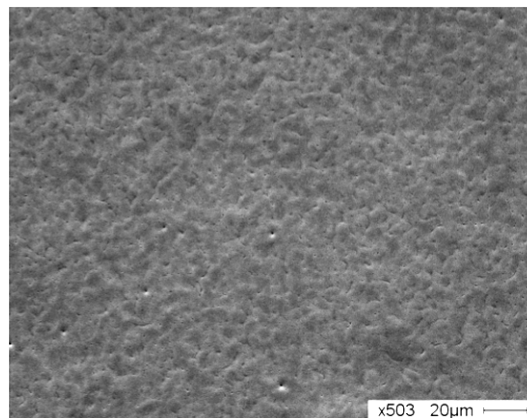


Рис. 1. РЭМ изображения поверхности образцов с поверхностным сплавом нержавеющей стали-медь, сформированным НСЭП с плотностью энергии 3.6 Дж/см²

элементного картирования показало, что при всех рассматриваемых плотностях энергии формируется поверхностный сплав с равномерным распределением легирующих компонентов по поверхности. На рис. 2 представлены зависимости концентрации элементов в поверхностном сплаве для разных плотностей энергии НСЭП. Концентрация меди и железа для системы пленка нержавеющей стали толщиной 1 мкм на медной подложке (без облучения НСЭП), составляет 23.6 и 55.1 ат.% соответственно. При формировании поверхностного сплава в приповерхностном слое происходит увеличение концентрации меди вследствие интенсивного жидкофазного перемешивания материалов пленки и подложки, однако, зависимость концентрации меди и железа от плотности энергии НСЭП немонотонна. При плотности энергии 5.2 Дж/см² концентрация меди на поверхности достигает максимума – 76.5 ат.%, а концентрация железа, соответственно, минимума 16.6 ат.%. При плотности энергии 5.9 Дж/см², концентрация меди в поверхностном слое несколько снижается.

Результаты трибологических испытаний образцов со сформированным поверхностным сплавом, а также образцов со стандартным покрытием пленка (1 мкм)-подложка, представлены на рис. 3. Видно, что коэффициент износа для исходного медного образца составляет $2.7 \cdot 10^{-4}$

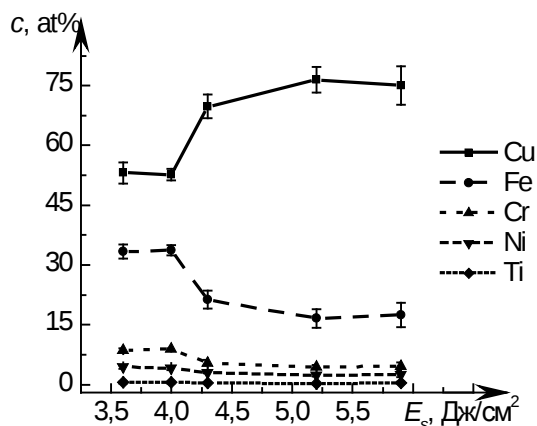


Рис. 2. Зависимость концентрации элементов на поверхности образцов с поверхностным сплавом нержавеющей сталь-медь от плотности энергии НСЭП

мм³/(Н·м). Для стандартного покрытия пленка-подложка коэффициент износа уменьшается до $1.9 \cdot 10^{-4}$ мм³/(Н·м). Формирование поверхностного сплава нержавеющей сталь-медь приводит к существенно более значительному повышению износостойкости образцов. Так, для плотностей энергии НСЭП 3.6 и 4 Дж/см² коэффициент износа составляет $0.65 \cdot 10^{-4}$ и $0.7 \cdot 10^{-4}$ мм³/(Н·м), что в 4 раза меньше по сравнению с исходным образцом. С увеличением плотности энергии НСЭП до 5.9 Дж/см², износостойкость достигает максимального значения $0.35 \cdot 10^{-4}$ мм³/(Н·м), а коэффициент износа более чем в 7.5 раз меньше коэффициента износа исходных медных образцов.

Исследования с помощью АСМ показали, что при формировании поверхностного сплава на поверхности образцов формируется нанокристаллический слой, размер кристаллитов в котором изменяется в пределах 70-500 нм. Формирование нанокристаллического состояния поверхности является одной из существенных причин резкого роста износостойкости сформированного поверхностного сплава.

Заключение

Проведены исследования морфологии, топографии, элементного состава поверхности, а так-

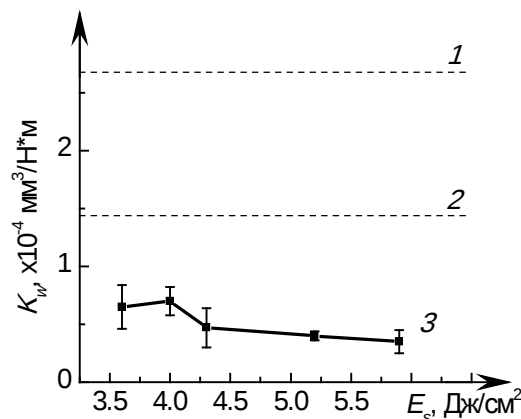


Рис. 3. Зависимость коэффициента износа образцов с поверхностным сплавом нержавеющей сталь-медь от плотности энергии НСЭП. Линия 1 – для исходной меди; линия 2 – для системы пленка SS (1 мкм) – Cu подложка; кривая 3 – для поверхностного сплава

же износостойкости сформированных поверхностных сплавов нержавеющей сталь (пленка)-медь (подложка). Показано, что вдоль всей поверхности образца формируется однородный поверхностный сплав. В результате формирования поверхностного сплава нержавеющей сталь-медь происходит многократное увеличение износостойкости сформированных образцов (до 7.5 раз) по сравнению с исходными образцами. Кроме того, установлено, что износостойкость поверхностного сплава более чем в 5 раз превосходит износостойкость стандартного покрытия пленка-подложка. Одной из главных причин резкого роста износостойкости сформированного поверхностного сплава является нанокристаллизация поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00920 А

Список литературы

1. Марков А.Б., Миков А.В., Озур Г.Е. и др.// ПТЭ. 2011. № 6. С. 122-126.

FORMATION OF STAINLESS STEEL-COPPER SURFACE ALLOY WITH A LOW-ENERGY HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM

Evgeniy Yakovlev, Alexey Markov
Institute of High Current Electronics SB RAS,
2/3 Akademicheskoy Avenue, 634055 Tomsk, Russia, yakovlev@lve.hcei.tsc.ru

Investigation of morphology, topography, and element concentration of formed stainless steel (film) – copper (substrate) surface alloys has been carried out. It has been shown that homogeneous surface alloy on a whole surface was observed after irradiation with a low-energy high-current electron beam (LEHCEB). Experiments shown that surface roughness rises with an increase in energy density of a LEHCEB. The rise of copper concentration in the surface layer with increase in LEHCEB energy density was observed also. Wear resistance tests appeared the dramatic increase in wear resistance (up to 7.5 times higher) of formed surface alloy compared with the initial sample whereas common coating provides 30% enhancement of wear resistance only. It has been suggested that the substantial rise of wear resistance takes place owing to surface nanocrystallization of SS-Cu alloy.