

Литература

1. Terreault, B. *Physica status solidi* / B. Terreault. – 2007. – Vol. 204. – P. 2129.
2. Bruel, M. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 1996. – Vol. 313.
3. Frantskevich N. V., Frantskevich A. V., Fedotov A. K., Mazanik A. V. // *Journal: Solid State Phenomena*. – 2009. – Vol. 156–158. – P. 91–94.

УДК 620.178.1

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВАКУУМНО-ДУГОВОГО НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ФОСФОРОМ

Хабарова А.В.¹, Лапицкая В.А.^{1,2}, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Куприн А.С.³, Чижик С.А.^{1,2}, Трухан Р.Э.¹, Конеру А.⁴

¹ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³ННЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины
Харьков, Украина

⁴Somnio Global
Новай, США

Аннотация. Приведены результаты исследований свойств вакуумно-дугового никелевого покрытия, легированного фосфором (NiP), толщиной 2 мкм после триботехнических испытаний методом атомно-силовой микроскопии. Испытания проводились при нагрузке от 3,45 до 6,89 мкН за 40 циклов. В результате определены основные характеристики триботехнических свойств – коэффициент $k_{тр}$ и сила трения $F_{тр}$, глубина износа h и удельный объемный износ ω . Установлено, что с увеличением нагрузки коэффициент и сила трения снижаются.

Ключевые слова: вакуумно-дуговое покрытие, NiP, атомно-силовая микроскопия, триботехнические испытания, коэффициент трения.

TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF VACUUM-ARC NICKEL COATING DOPED WITH PHOSPHORUS

Khabarava A.¹, Lapitskaya V.^{1,2}, Kuznetsova T.^{1,2}, Kuprin A.³, Chizik S.^{1,2}, Trukhan R.¹, Koneru A.⁴

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian national technical university
Minsk, Republic of Belarus

³NSC Kharkov Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kharkov, Ukraine

⁴Somnio Global
Novi, USA

Abstract. The results of studies of the properties of a vacuum-arc nickel coating doped with phosphorus (NiP), 2 μm thick after tribotechnical tests by atomic force microscopy are presented. The tests were carried out at a load of 3.45 to 6.89 m μN for 40 cycles. As a result, the main characteristics of the tribotechnical properties were determined – the coefficient k_{fr} and the friction force F_{fr} , the wear depth h , the specific volumetric wear ω . It was found that with an increase in the load, the coefficient and the friction force decrease.

Key words: vacuum arc coating, NiP, atomic force microscopy, tribotechnical tests, coefficient of friction.

Адрес для переписки: Хабарова А.В., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: AV.Khabarova@mail.ru

Введение. Вакуумно-дуговые никелевые покрытия характеризуются хорошей износо- и коррозионностойкостью, высокой твердостью. Легирование фосфором приводит к повышению физико-механических и триботехнических свойств таких покрытий. Наличие на поверхности вакуумно-дуговых никелевых покрытий окисных пленок и различных фаз может создавать хорошие условия для формирования трибопленок [1]. Микротвердость таких покрытий может варьироваться от 2

до 17 ГПа [2]. Однако их применение ограничено недостаточным изучением свойств [1].

Целью работы является определение триботехнических свойств вакуумно-дугового никелевого покрытия, легированного фосфором, методом атомно-силовой микроскопии.

Материалы и методы исследования. Покрытия толщиной 2 мкм с концентрацией фосфора 2 ат. % нанесены на диск из нержавеющей стали 08X18H10T вакуумно-дуговым методом на

установке «Булат-6» с никель-фосфорным катодом содержащим 6 ат. % фосфора.

Исследования триботехнических свойств (силы и коэффициента трения) покрытия проводили на атомно-силовой микроскопе Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме Lateral Force с использованием кантилевера с алмазным острием на кремниевой консоли типа D300 (SCDprobes, Эстония) с жесткостью консоли 38,24 Н/м и радиусом закругления острия 35 нм. Нормальная нагрузка изменялась от 3,45 до 6,89 мкН. Коэффициент и силу трения исследовали на поле 1×1 мкм², 128×128 точек в течение 40 циклов при скорости возвратно-поступательного движения зонда по поверхности 1,99 мкм/с. Метод атомно-силовой микроскопии позволяет учесть микрогеометрию поверхности взаимодействия в нанометровом масштабе и, при непрерывной регистрации угла закручивания кремниевой консоли зонда вокруг своей оси, рассчитать коэффициент ($k_{тр}$) и силу ($F_{тр}$) трения.

Удельный объемный износ ω определяли как отношение объема материала V , удаленного во время испытания, к величине нормальной нагрузки P и расстоянию скольжения зонда s . АСМ-профиль следа износа, полученного в результате многоциклового трения, применяется для расчета объема изношенного материала как произведение площади профиля сечения дорожки износа S на длину дорожки износа l .

Результаты исследования. После проведения многоциклового трения на образце при изменении силы нагружения на зонд произошел износ покрытия, на глубину 188 нм при нагрузке 3,45 мкН и на 305 нм при нагрузке 6,89 мкН (рис. 1, табл. 1).

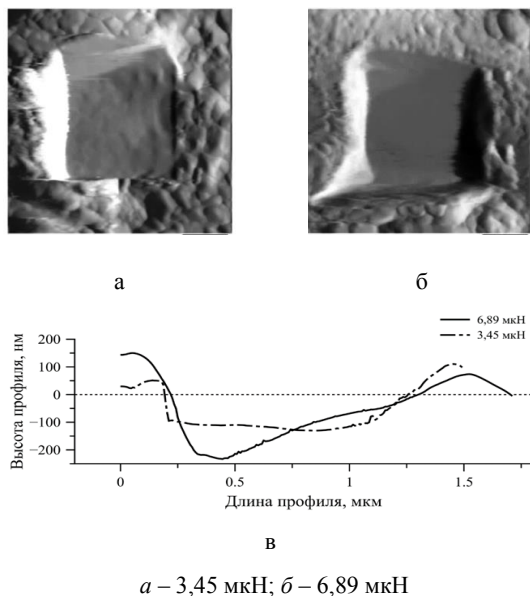


Рисунок 1 – АСМ-изображения (а, б) и профили (в) результатов износа покрытия NiP при изменении силы нагружения на зонд

Рис. 2 показывает изменение коэффициента трения от количества циклов. Установлено, что меньший коэффициент трения 0,14 и сила трения 476,6 нН получены при большей силе нагружения на зонд – 6,89 мкН. При нагрузке 3,45 мкН коэффициент трения равен 0,21, а сила трения – 716,5 нН.

Удельный объемный износ с увеличением нагрузки уменьшается с $5,3 \cdot 10^{-12}$ м³/Н·м до $4,3 \cdot 10^{-12}$ м³/Н·м. Такие значения удельного объемного износа показывают хорошую износостойкость относительно значений, например, полученных на износотойких покрытиях CrN [3]. Удельный объемный износ на покрытии CrN при нагрузке 3,5 мкН составил $4,4 \cdot 10^{-12}$ м³/Н·м. Удельный объемный износ на пленке меди, определенный тем же методом и нагрузке составил $15,3 \cdot 10^{-12}$ м³/Н·м.

Таблица 1. Характеристики покрытия NiP, полученные при трибоиспытаниях

P, мкН	h, нм	$\omega, \cdot 10^{-12}$ м ³ /Н·м	$k_{тр}$	$F_{тр}$, нН
3,45	188	5,3	$0,21 \pm 0,05$	$716,8 \pm 157,1$
6,89	305	4,3	$0,14 \pm 0,03$	$476,1 \pm 96,1$

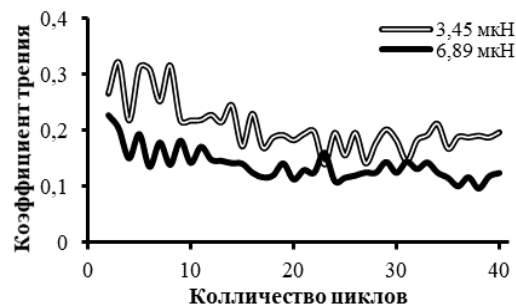


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от количества циклов на покрытии NiP при изменении силы нагружения на зонд

Закключение. В результате триботехнических испытаний вакуумно-дугового никелевого покрытия, легированного фосфором, методом атомно-силовой микроскопии установлено, что меньшие значения коэффициента трения $0,14 \pm 0,03$ и силы трения $476,6 \pm 96,1$ нН получены в процессе многоциклового испытания за 40 циклов при нагрузке 6,89 мкН. Удельный объемный износ составил $4,3 \cdot 10^{-12}$ м³/Н·м. Полученные результаты показывают высокую износостойкость покрытия в микроконтакте, позволяющую расширить область его применения – например, в микроустройствах в качестве защитного покрытия электродов и поверхностей трения, а также как барьерный слой для избежания диффузии атомов между слоями в электрических разъемах и печатных платах [5].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований № Ф20М–083.

Литература

1. Асланян, И. Р. Изнашивание электролитических NiP покрытий при трении скольжения / И. Р. Асланян, Л. Ш. Шустер // Труды ВИАМ. – 2015. – № 3. – С. 52–60.
2. Yan, M. Improved microhardness and wear resistance of the as-deposited electroless Ni-P coating / M. Yan, H. G. Ying, T. Y. Ma // Surface & Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 5909–591.
3. Механические и триботехнические свойства нитридных и оксинитридных покрытий на основе

хрома и циркония, полученных электродуговым испарением / Вархолински Б. [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40. № 2. – С. 209–217.

4. Износ тонких покрытий различной твердости зондовыми методами / Лапицкая В. А. [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 6. – С. 61–67.

5. Ni-P layer system and process for its preparation : пат. FR WO2009115192A2 / J. Barthelmes. – Оpubл. 20.03.2008.

УДК 620.179.14

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 12X18H10T С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ Чернышёв А.В., Шарандо В.И., Кременькова Н.В.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследовано влияние степени пластической деформации и толщины образцов из стали 12X18H10T на амплитуды вносимой ЭДС и ее третьей гармонической составляющей накладного вихревого преобразователя. Частота переменного поля возбуждения составляла 2,5 кГц. Установлено, что максимальная толщина образцов, с достижением которой прекращается изменение амплитуд в обоих случаях, составляет 2–3 мм. С увеличением степени деформации и толщины образца амплитуда вносимой ЭДС возрастает. Амплитуда третьей гармонической составляющей имеет максимум в области деформаций 20–25 %, положение и высота которого определяются толщиной образца.

Ключевые слова: электромагнитный контроль, аустенитная сталь, пластическая деформация, толщина.

INFLUENCE OF THE THICKNESS OF THE PRODUCTS WHEN STUDYING THE PROCESSES OF DEFORMATION OF STEEL 12X18H10T USING THE ELECTROMAGNETIC CONTROL METHOD

Chernyshev A., Sharando V., Kremenkova N.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. Influence of the degree of plastic deformation and the thickness of samples made from steel 12X18H10T on the amplitudes of the introduced EMF and its third harmonic component of the superimposed eddy current transducer was investigated. The frequency of the alternating excitation field was 2.5 kHz. It was found that the maximum thickness of the samples, upon reaching which the change in amplitudes ceases in both cases, is 2–3 mm. With an increase in the degree of deformation and thickness of the sample, the amplitude of the introduced EMF increases. The amplitude of the third harmonic component has a maximum in the range of deformations of 20–25 %, the position and height of which are determined by the thickness of the sample.

Key words: electromagnetic control, austenitic steel, plastic deformation, thickness.

*Адрес для переписки: Чернышёв А.В., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: lab1@iaph.bas-net.by*

В работе [1] рассмотрена возможность изучения процессов пластической деформации стали 12X18H10T с помощью прибора контроля твердости ПКТ-2 [2]. Измерялась амплитуда третьей гармонической составляющей E_3 выходной ЭДС накладного преобразователя. В настоящей работе приведены результаты аналогичных исследований влияния степени пластической деформации на E_3 , но измерения проводились при различных толщинах образцов. Дополнительно проводились измерения амплитуды E вносимой ЭДС того же накладного преобразователя. Частота тока возбуждения преобразователя 2,5 кГц. Он состоял из трех соосных катушек – поля воз-

буждения, измерительной и компенсационной. Наружный диаметр катушек 10 мм. Выходная ЭДС преобразователя в исходном положении (без образца) компенсировалась до нулевого значения.

Образцы были изготовлены следующим образом. Из верхнего слоя стального листа толщиной 10 мм в состоянии поставки были вырезаны пластинки размером 20×20 мм² и прошлифованы до толщин 1,4–1,5 мм. Затем они прокатывались при комнатной температуре в двух взаимно перпендикулярных направлениях с обеспечением последовательного ряда степеней пластической деформации. Измерения проводились на пла-