

Исследование механических свойств покрытия, наносимого методом электроискрового легирования***В. В. Блажеев, П. Г. Иваночкин, А. С. Личковаха**

Описана методика выбора материала электрода, который используется при нанесении электроискровым методом покрытия на поверхностный слой металла. В основе данного подхода — исследование механических свойств покрытия методом наноиндентирования. Построено распределение микротвёрдости покрытия по глубине для ряда исследованных материалов. В качестве второй характеристики материала при индентировании использован индекс пластичности, отражающий структурное состояние материала. Величина H/E также используется для характеристики способности материалов к износу при трении. Для оценки сопротивления материалов пластической деформации была использована качественная сравнительная характеристика — соотношение H^3/E^2 . На основе анализа полученных результатов сделан обоснованный выбор материала электрода, создающий покрытия с достаточно высокими механическими свойствами. Актуальность исследования обоснована преимуществами электроискрового легирования (ЭИЛ), которое является эффективным методом воздействия на поверхностные слои различных деталей.

Ключевые слова: электроискровое легирование, механические свойства, наноиндентирование.

Введение. Прогресс в машиностроении, на транспорте и в других областях тесно связан с проблемой повышения износостойкости узлов трения. В решении данной проблемы важную роль играют материалы с покрытиями. Трибологические характеристики узла определяются напряжённо-деформированным состоянием в области контакта, а также в тонких приповерхностных слоях. Нанесение покрытий и модифицирование поверхностного слоя — наиболее рациональный путь, позволяющий направленно изменять напряжённо-деформированное состояние в приповерхностном слое, деформационно-силовые параметры контактных областей и природу контактного взаимодействия тел [1]. Сегодня это общепризнанный факт.

Одним из перспективных методов целенаправленного воздействия на качество поверхностного слоя является способ электроискрового легирования (ЭИЛ). Привлекательность этого метода обусловлена его универсальностью [2–4], т. е. возможностью обрабатывать материалы практически любой формы с любыми физико-механическими свойствами. Необходимо лишь, чтобы они обладали электрической проводимостью. Тепловые процессы локализуются в тонком поверхностном слое. За счёт этого появляется возможность исключить нежелательные структурные превращения в основном металле, что позволяет уже десятки лет успешно использовать данный метод для получения на металлических поверхностях покрытий различного функционального назначения. При электроискровом легировании происходит перенос материала, используемого в качестве анода, на поверхность обрабатываемой детали, которая в электрической схеме метода является катодом. Использование ЭИЛ способствует повышению надёжности и долговечности узлов трения.

Задачей данной работы является исследование механических свойств покрытий, наносимых методом ЭИЛ с применением ряда доступных материалов и последующий обоснованный выбор материала электрода для создания покрытий с достаточно высокими механическими свойствами.

Основная часть. В качестве анода для нанесения покрытия электроискровым методом использовались следующие материалы: стеллит, стеллит с бронзой (БрАЖ-9), ВК6, ВК6 с бронзой, сталь Ст65Г.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00972).

В качестве катода были использованы ролики из стали 45 с твёрдостью рабочей поверхности по Роквеллу (шкала С) 50–62 (HRC) при шероховатости $R_a = 2,5$ мкм. Ролики с покрытием подготавливались для проведения трибологических испытаний.

Нанесение первого слоя покрытия проводилось на универсальной машине трения ТМ-7 с вращающимся роликом при использовании электроискрового генератора АРТА-5Л. Режимы: сила тока — 160 А, частота импульсов — 2 кГц, длительность импульсов — 60 мкс.

Исследование механических свойств покрытий на микроуровне проводилось с помощью системы анализа механических свойств материалов *NanoTest 600* фирмы *Micro materials Ltd*. Для проведения исследований на комплексе *NanoTest 600* изготавливались образцы (10×10×3 мм) из роликов с покрытием из различных материалов (рис. 1).

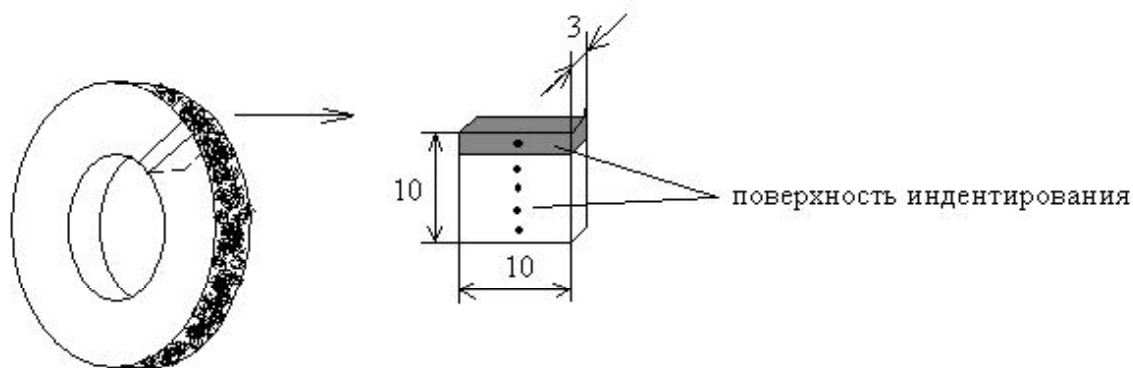


Рис. 1. Образцы для исследования

Для измерения микротвёрдости, модуля упругости и упругого восстановления в системе *NanoTest 600* были использованы микро- и наноинденторы в виде трёхгранной пирамиды Берковича [5].

Исследование микротвёрдости покрытия (рис. 2) показывает, что наибольшие значения твёрдости поверхностного слоя наблюдаются на глубине 20–30 мкм. Столь незначительная глубина увеличения микротвёрдости и существенное её изменение могут быть объяснены лишь следующим образом. Высокая плотность мощности искрового разряда и малая продолжительность периода его активного взаимодействия с материалом не позволяют эрозионному массовому потоку проникать вглубь материала, формируя при этом в приповерхностной зоне модифицированный упрочнённый слой.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что полученный электроискровым легированием первый слой покрытия структурно неоднороден (рис. 2). В нём можно выделить три основные зоны.

Первая — это термодиффузионная зона покрытия и основного металла.

Вторая — нетравящийся (белый) слой — представляет собой твёрдый раствор легирующих или карбидообразующих элементов, входящих в состав электродного материала.

Третий слой, подобный газотермическим покрытиям, сформирован из фрагментов застывшего металла и оксидов.

Структура упрочнённого наружного слоя напоминает строение антифрикционного сплава: частицы мелкодисперсных карбидов включены в сравнительно мягкую основу. Перенесённый материал анода легирует материал детали и, соединяясь с диссоциированным атомарным азотом воздуха и углеродом материала детали, образует диффузионный износостойкий слой. Глубина термического влияния на материал детали составляет 0,8...1,0 мм.

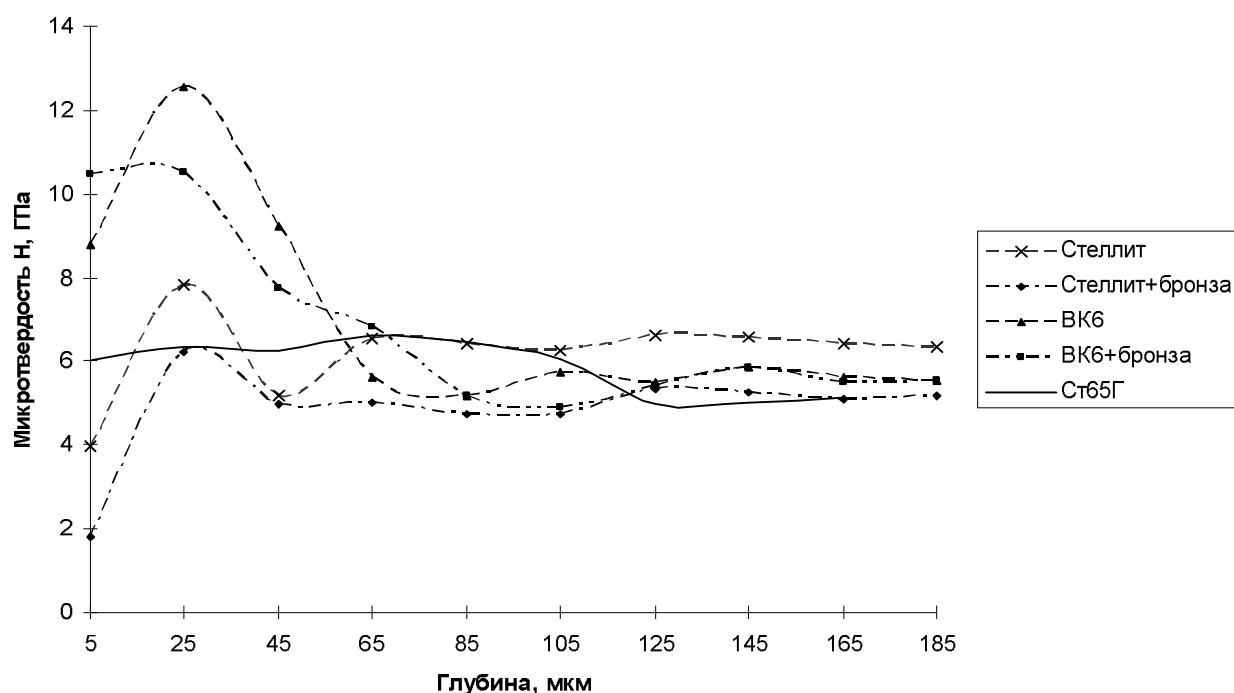


Рис. 2. Зависимость твёрдости различных покрытий от глубины

Полученные данные (рис. 2, 3) свидетельствуют о том, что наибольшие значения микротвёрдости имеют поверхностные слои, обработанные методом ЭИЛ с применением материала анода ВК6 и ВК6 с бронзой. При этом материал Ст65Г практически не изменяет микротвёрдость поверхностного слоя.

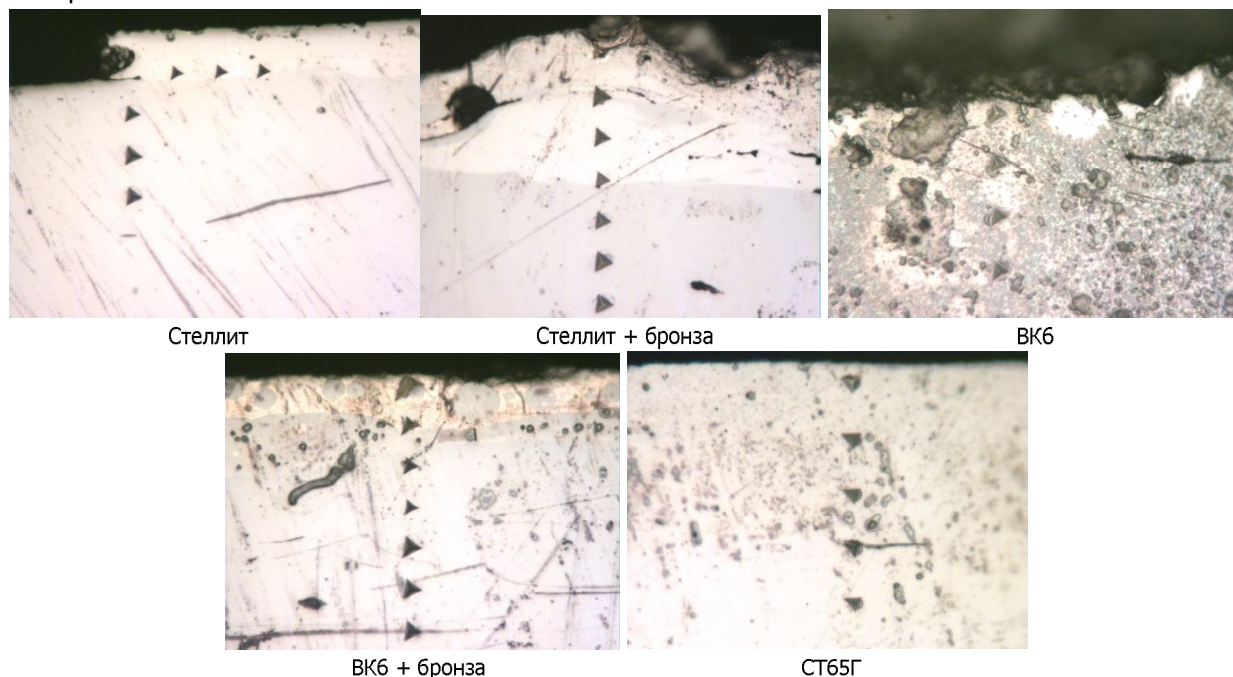


Рис. 3. Оптическое изображение покрытий, нанесённых электродами из различных материалов

Одной из основных характеристик материала при индентировании является отношение его твёрдости H к модулю упругости (модулю Юнга) E , часто называемое индексом пластичности

материала. Величина H/E характеризует способность материала к изменению его размеров и формы в процессе деформации и может служить качественной сравнительной характеристикой сопротивления материала деформированию при механическом нагружении, т. е. отражает его структурное состояние. Величина H/E также используется для характеристики способности материалов к износу при трении.

Графическое изображение полученных результатов (рис. 4) свидетельствует о том, что используемые материалы анода Ст65Г и стеллит позволяют получать на поверхности анода крупнокристаллические соединения, характеризуемые показателем $H/E < 0,04$ [6]. При этом остальные материалы образуют в основном на поверхности обрабатываемой детали мелкокристаллические соединения ($H/E \approx 0,05 \div 0,09$). Для слоёв материалов, имеющих высокие значения индекса пластичности, характерна высокая износостойкость в случае, если этот материал имеет модуль упругости, близкий к модулю Юнга подложки (основного материала) [7, 8]. То есть стеллит с бронзой (БрАЖ-9), ВК6, ВК6 с бронзой, используемые в качестве анода, по-видимому, позволяют получать покрытия, имеющие высокие механические характеристики при работе в условиях различных видов трения.

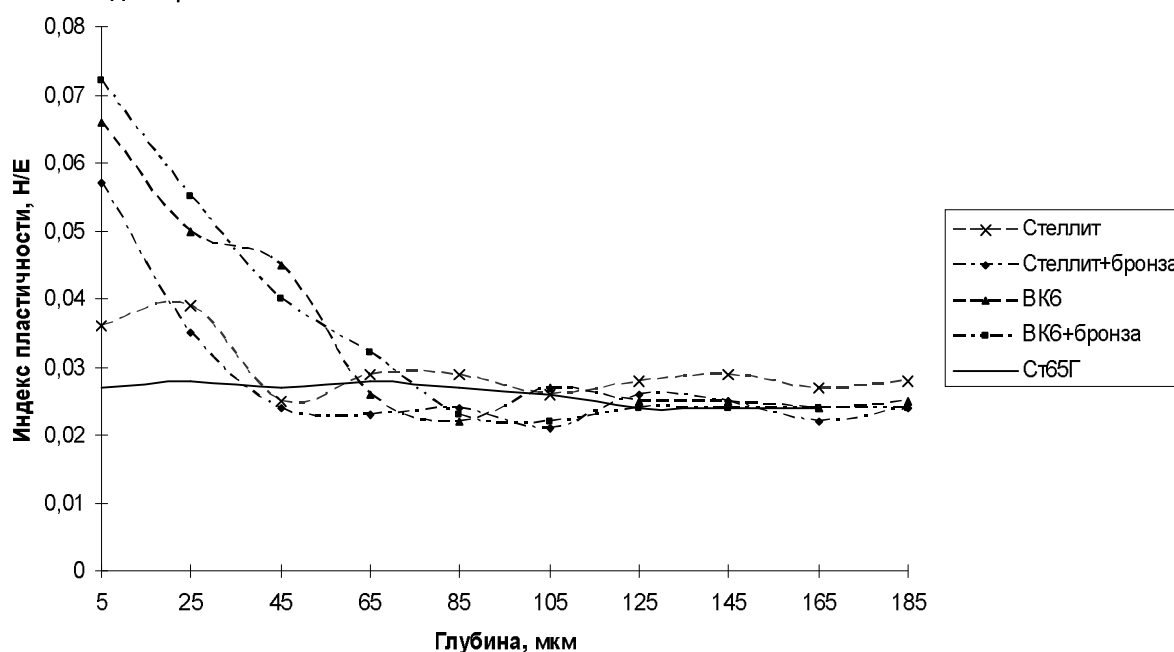


Рис. 4. Изменение индекса пластичности различных покрытий по глубине

Для оценки сопротивления материалов пластической деформации используют качественную сравнительную характеристику — соотношение H^3/E^2 [9]. Для увеличения сопротивления деформации необходимо при высокой твёрдости стремиться к минимально возможному модулю Юнга. Сравнение нанесённых покрытий первого слоя (рис. 5) позволяет сделать вывод о том, что покрытия, нанесённые электродом из ВК6, дают более высокие значения индекса пластичности при достаточно высоком значении отношения H^3/E^2 .

Так, например, известно [10], что у керамических и металлокерамических материалов значение H^3/E^2 обычно не превышает 0,2 ГПа, а значение этого параметра в TiNi практически на

порядок ниже (т. е. 0,02 ГПа). Нанесение на поверхность покрытия ВК6 с бронзой приводит к некоторому увеличению механических свойств в верхней зоне покрытия — соответствующие значения ниже, чем у керамики, однако значительно выше, чем у никелида титана. Градиент механических свойств покрытия Ст65Г минимален.

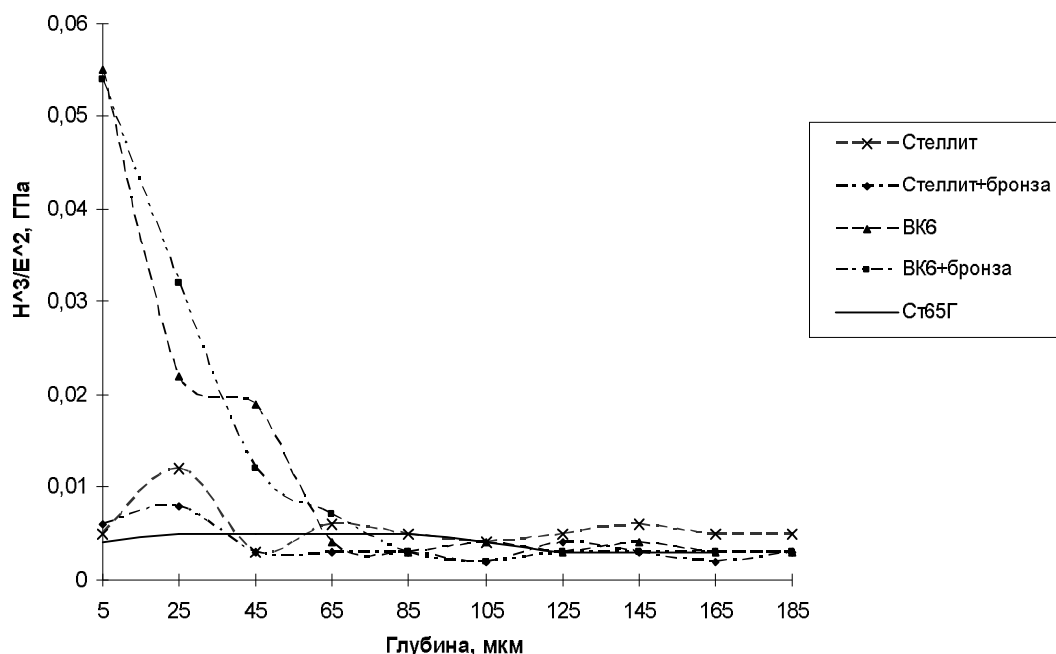


Рис. 5. Изменение показателя H^3/E^2 покрытий по глубине

Заключение. При использовании исследованных материалов полученные электроискровым легированием слои покрытия обладают достаточно высокими механическими свойствами. При этом покрытия, нанесённые электродом из ВК6, демонстрируют более высокие значения практически по всем показателям. Покрытия из ВК6 с бронзой не уступают по этим значениям, однако их градиент по глубине резко изменяется. Таким образом, в качестве материала электродов для нанесения покрытия электроискровым методом целесообразно применять ВК6, расход которого при использовании данного метода нанесения незначителен.

Библиографический список

1. Колесников, В. И. Двухслойные композиции триботехнического назначения для тяжело-нагруженных узлов трения / В. И. Колесников, П. Г. Иваночкин. — Ростов-на-Дону : Рост. гос. ун-т путей сообщ., 2009. — 124 с.
2. Исследование влияния процесса электроискрового легирования на упрочнение поверхностного слоя стали 45 / В. В. Блажеев [и др.] // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2012». — Ростов-на-Дону : Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2012. — Ч. 2. — С. 310–311.
3. Иваночкин, П. Г. Исследование механических свойств нанопокровов, нанесённых электроискровым легированием / П. Г. Иваночкин, А. В. Гольцев // Труды всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2010». — Ростов-на-Дону : Рост. гос. ун-т путей сообщ., 2009. — Ч. 3. — С. 247–248.
4. Коротаев, Д. Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием / Д. Н. Коротаев. — Омск : Сиб. гос. автомобил.-дорож. акад., 2009. — С. 256.
5. Fisher-Creeps, A. Nanoindentation / A. Fisher-Creeps. — New York : Springer, 2002. — 215 p.

6. Идентификация структурного состояния материалов методом автоматического индентирования / В. Ф. Горбань [и др.] // Сб. докл. Харьк. нанотехнол. ассамблеи. — Харьков, 2006. — Т. 1. — С. 52–55.
7. Азаренков, Н. А. Структура и свойства защитных покрытий и модифицированных слоёв материалов / Н. А. Азаренков, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк. — Харьков : Изд-во Харьк. нац. ун-та, 2007. — С. 560.
8. Leyland, A. On the significance of the H/E ratio in wear control: A nanocomposite approach to optimised tribological behaviour / A. Leyland, A. Matthews // *Wear*. — 2000. — Vol. 246, iss. 1–2. — Pp. 1–11.
9. Mayrhofer, P. H. Structure-property relationships in single- and dual-phase nanocrystalline hard coatings / P.-H. Mayrhofer, C. Mitterer, J. Musil // *Surface and Coating Technology*. — 2003. — Vol. 174–175. — Pp. 725–731.
10. Левашов, Е. А. Структура и свойства твёрдых и сверхтвёрдых нанокомпозитных покрытий / Е. А. Левашов, Д. В. Штанский // *Успехи химии*. — 2007. — Т. 76, № 5. — С. 501–509.

Материал поступил в редакцию 13.02.2014.

References

1. Kolesnikov, V. I., Ivanochkin, P. G. Dvukhsloynye kompozitsii tribotekhnicheskogo naznachenii dlia tiazhelonagruzhennykh uzlov treniia. [Double-layer compositions of tribotechnical purpose for heavy-loaded friction units.] Rostov-on-Don : RGUPS, 2009, 124 p. (in Russian).
2. Blazheyev, V. V., et al. Issledovanie vlianiia protsessa elektroiskrovogo legirovaniia na uprochnenie poverkhnostnogo sloia stali 45. Trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport-2012». [Study on the influence of the electric spark deposition process on the hardening of the surface layer of steel 45. Proc. All-Russian Sci.-Pract. Conf. 'Transport 2012'] Rostov-on-Don, RSTU, 2012, pp. 310–311 (in Russian).
3. Ivanochkin, P. G., Goltsev, A. V. Issledovanie mekhanicheskikh svoistv nanopokrytii, nanesennykh elektroiskrovym legirovaniem. Trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport-2010». [The study of the mechanical properties of nano-coatings applied by the electric spark deposition method. Proc. All-Russian Sci.-Pract. Conf. 'Transport 2010'] Rostov-on-Don, RSTU, 2009, pp. 247–248 (in Russian).
4. Korotayev, D. N. Tekhnologicheskie vozmozhnosti formirovaniia iznosostoikikh nanostruktur elektroiskrovym legirovaniem. [Technological possibilities of forming wear-resistant nanostructures using the electric spark deposition method.] Omsk : SibADI, 2009, 256 p. (in Russian).
5. Fisher-Creeps, A. Nanoindentation. Springer, New York, 2002, 215 p.
6. Gorban, V. F., et al. Identifikatsiia strukturnogo sostoiianiia materialov metodom avtomaticheskogo indentirovaniia. Sbornik dokladov Kharkovskoi nanotekhnologicheskoi assamblei. [Identification of the structural condition of the material by automatic indentation. Proc. Kharkov Nanotechnology Congress.] Kharkov, 2006, vol. 1, pp. 52–55 (in Russian).
7. Azarenkov, N. A., Beresnev, V. M., Pogrebnyak, A. D. Struktura i svoistva zashchitnykh pokrytii i modifitsirovannykh sloev materialov. [The structure and properties of coatings and modified layers of materials.] Kharkov : Publ. House of Kharkiv National University, 2007, 560 p. (in Russian).
8. Leyland, A., Matthews, A. On the significance of the H/E ratio in wear control: A nanocomposite approach to optimised tribological behavior. *Wear*, 2000, vol. 246, iss. 1–2, pp. 1–11.
9. Mayrhofer, P. H., Mitterer, C., Musil, C. J. Structure-property relationships in single- and dual-phase nanocrystalline hard coatings. *Surface and Coating Technology*, 2003, vol. 174–175, pp. 725–731.

10. Levashov, E. A. Struktura i svoistva tverdykh i sverkhтверdykh nanokompozitnykh pokrytii. [Structure and properties of hard and superhard nano-composite coatings.] Achievements of Chemistry, 2007, vol. 76, iss. 5, pp. 501–509 (in Russian).

STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE COATING APPLIED BY ELECTROSPARK ALLOYING*

V. V. Blazheyev, P. G. Ivanochkin, A. S. Lichkovakha

A technique for selecting an electrode material used when applying the electrospark method onto a metal surface layer is described. The technique is based on the study of the mechanical properties of the coating by nanoindentation. The coverage microhardness distribution in depth for a number of the investigated materials is developed. As a second characteristic of the material, the plasticity index reflecting the structural state of the material is used during the indentation. Value H/E is also used to describe the capability of materials to frictional wear. A qualitative comparative characteristic — ratio H^3/E^2 was used to assess the resistance of materials to plastic deformation. Based on the analysis of the obtained results, a reasonable choice of the electrode material which creates coatings with sufficiently high mechanical properties is made. The relevance of the study is proved by the advantages of the electrospark alloying (ESA) which is an effective method of impact on the surface layers of the various parts.

Keywords: *electrospark alloying, mechanical properties, nanoindentation.*

* The research is done with the financial support from RFFI (project 12-08-00972).