

УДК 621.9.048 : 539.213

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-2-63-70

Электроискровые покрытия из аморфного и нанокристаллического сплавов на основе железа

© 2016 г. **И.С. Кузнецов**

Орловский государственный аграрный университет

Статья поступила в редакцию 24.12.15 г., доработана 24.01.16 г., подписана в печать 05.02.16 г.

Представлены результаты исследований износостойких электроискровых покрытий (ЭИП), полученных электроискровой обработкой стальной подложки. В качестве электродных материалов использовались аморфный сплав марки 2НСР ($\text{Fe}_{78}\text{B}_{12}\text{Si}_9\text{Ni}_1$) и нанокристаллический сплав 5БДСР ($\text{Fe}_{78,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$), имеющие в основе железо. Анализ структуры ЭИП с использованием сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского излучения показал, что покрытие из сплава 2НСР в целом аморфно, а покрытие из сплава 5БДСР имеет нанокристаллическую структуру, представляющую собой аморфную матрицу с нанокристаллами α -Fe. Микротвердость ЭИП из сплава 2НСР составила 7279 МПа при толщине 30 мкм, а из 5БДСР – 10147 МПа при толщине 33 мкм, что примерно в 1,5 раза больше толщины ЭИП из сплава ВК6-ОМ. Триботехнические испытания показали, что на стадии установившегося изнашивания износостойкость ЭИП из сплава 2НСР в 4 раза выше, чем у покрытий из 5БДСР, однако на стадии приработки его скорость изнашивания в 1,3 раза больше. В ходе эксплуатационных испытаний установлено, что покрытие из нанокристаллического сплава 5БДСР позволяет повысить ресурс режущих деталей машин, работающих в условиях абразивного изнашивания, не менее чем в 1,4 раза.

Ключевые слова: электроискровая обработка, электроискровое покрытие, аморфный сплав, нанокристаллический сплав, микротвердость, износостойкость.

Кузнецов И.С. – канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры «Надежность и ремонт машин» Орловского государственного аграрного университета (302019, г. Орел, ул. Генерала Родина, 69, ауд. 2-205). E-mail: ivan-654@yandex.ru.

Для цитирования: Кузнецов И.С. Электроискровые покрытия из аморфного и нанокристаллического сплавов на основе железа // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 2. С. 63–70.

DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-2-63-70.

Kuznetsov I.S.

Electrospark coatings of amorphous and nanocrystalline iron-based alloys

The article presents the results of the study covering wear resistant electrospark coatings (ESC) made with electrospark deposition of a steel substrate. The iron based amorphous alloy 2NSR ($\text{Fe}_{78}\text{B}_{12}\text{Si}_9\text{Ni}_1$) and nanocrystalline alloy 5BDSR ($\text{Fe}_{78,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$) were used as electrode materials. The ESC structure analysis with scanning electron microscopy and X-rays determined that the 2NSR alloy coating is generally amorphous, while the 5BDSR alloy coating has a nanocrystalline structure that is an amorphous matrix with nanocrystals α -Fe. The microhardness of 2NSR alloy electrospark coating was 7279 MPa at a thickness of 30 microns, and 5BDSR — 10147 MPa at a thickness of 33 microns, that is about 1.5 times thicker than the VK6-OM alloy coating. Tribotechnical tests revealed that the 2NSR alloy electrospark coating has wear resistance 4 times higher than that of 5BDSR at the stage of steady wearing. However, its wear rate was 1,3 times higher at the stage of running. Performance tests found that the coating made of 5BDSR nanocrystalline alloy extends the life cycle of cutting machine parts running in abrasive wear conditions by at least 1,4 times.

Keywords: electrospark deposition, electrospark coating, amorphous alloy, nanocrystalline alloy, microhardness, wear resistance.

Kuznetsov I.S. – Ph.D. (Eng), Senior Teacher of the Department «Reliability and repair of cars», Orel State Agrarian University (302019, Russia, Orel, Gen. Rodina str., 69). E-mail: Ivan-654@yandex.ru.

Citation: Kuznetsov I.S. Elektroiskrovyye pokrytiya iz amorfnoy i nanokristallicheskogo splavov na osnove zheleza. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2016. No. 2. С. 63–70. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-2-63-70.

Введение

В настоящее время сложно себе представить область техники, где не применялись бы технологии нанесения износостойких покрытий. Одним из перспективных методов их создания, в значительной мере лишенным многих недостатков и получившим в последнее время широкое распространение, является электроискровая обработка.

С ее помощью можно наносить защитные покрытия толщиной до 0,5 мм и микротвердостью от 8 до 12 ГПа [1, 2].

Одним из путей увеличения износостойкости электроискровых покрытий (ЭИП) является создание в них нанокристаллической или аморфной структуры, что обеспечивает повышение твердо-

сти, пластичности, качества и эксплуатационных характеристик ЭИП [1–11]. Так, для получения покрытий с нанокристаллической структурой используются композиционные керамические материалы, изготовленные самораспространяющимся высокотемпературным синтезом, упрочненные путем целенаправленного легирования реакционных смесей нанодисперсными компонентами диоксида циркония или оксида алюминия [12, 13]. В работе [14] в качестве электродного материала предлагается использовать твердый сплав, в котором для замедления роста зерна применяется нанодисперсный порошок оксида алюминия, существенно повышающий твердость ЭИП.

В настоящее время большое количество материалов, имеющих аморфную или нанокристаллическую структуру, производятся в виде лент толщиной 50 мкм, получаемых быстрой закалкой из жидкого состояния со скоростью 10^6 К/с [15–17]. Их уникальные теплофизические и механические свойства могут позволить существенно повысить производительность процесса, улучшить качество и эксплуатационные характеристики ЭИП [18].

Целью работы является исследование свойств и характеристик электроискровых покрытий из аморфного (АС) и нанокристаллического (НКС) сплавов.

Методика исследований

Для исследований ЭИП были изготовлены специальные образцы в виде прямоугольных пластин размером $30 \times 40 \times 3$ мм из стали марки 65Г ГОСТ 14959. Их поверхности предварительно шлифовали до достижения $R_a \leq 0,32$ мкм, затем промывали в ацетоне и просушивали на воздухе. После этого ручным инструментом установки UR-121 сборными электродами на них наносились ЭИП [18] из АС марки 2НСР ($\text{Fe}_{78}\text{B}_{12}\text{Si}_9\text{Ni}_1$) и НКС марки 5БДСР ($\text{Fe}_{78,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$) с соблюдением следующих режимов: $W_{\text{и}} = 0,08 \div 0,16$ Дж; $I = 12,5 \div 17,5$ А; $U = 53 \div 73$ В; $f = 100$ Гц; $t_{\text{уд}} = t_{\text{к.р}}$, мин/см².

Структуру исследовали на электронном микроскопе «Hitachi» ТМ-1000. Изучались внешняя поверхность ЭИП и поперечные шлифы, которые подготавливались согласно ГОСТ 2789-73. Снятие дифрактограмм осуществляли на приборе ХМД-300 по рентгенооптической схеме Дебая—Шеррера (размер пучка $0,2 \times 6,0$ мм, $\text{CuK}\alpha$ -излучение (1,54 А), интервал $2\theta = 20^\circ \div 100^\circ$).

Микротвердость оценивали по ГОСТ 9450-76

при нагрузке 50 г методом вдавливания алмазных наконечников на компьютеризированном микротвердометре ПМТ-3М-01. Измерение шероховатости ЭИП осуществляли по ГОСТ 2789-73 на профилометре модели 171621.

Износостойкость ЭИП определяли на машине трения МТУ-01, оснащенной комплексом ZetLab для регистрации момента трения, по схеме контакта торцев вращающихся контробразцов и неподвижного образца с ЭИП. Испытания осуществляли в течение 21 ч при контактном давлении 0,2 МПа и относительной скорости скольжения 1,0 м/с. В качестве смазочной среды применяли масло индустриальное И-20А с добавками кварцевого песка с дисперсностью 3 мкм. Износ определяли гравиметрическим методом с использованием весов Sartorius Competence CP 64.

Эксплуатационные испытания изучаемых покрытий проводили на режущих поверхностях «пальцев» Р230.21.000, DQ11499, H213405 и KG 35 соответственно зерноуборочных комбайнов ACROS 530, John Deere 1175, John Deere WTS 9560 и New Holland CX 840.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования с помощью сканирующей электронной микроскопии позволяют констатировать, что ЭИП из аморфных (марки 2НСР) и нанокристаллических (5БДСР) сплавов не обладают слоистой структурой, характерной для покрытий, полученных электродами из сталей 65Г, У8 и У9. Переходная зона между покрытием и подложкой имеет нечеткую границу раздела (рис. 1).

Исследования поверхности ЭИП из АС показали, что при приближении удельного времени обработки к порогу хрупкого разрушения на ней появляются сетки микротрещин и следы выкрашивания, которые свидетельствуют о росте растягивающих напряжений (рис. 2).

По результатам исследований покрытия при помощи электронной микроскопии можно сделать вывод, что оно имеет гомогенную структуру до глубины 1 мкм, но в переходной зоне между ЭИП и подложкой имеются кристаллические включения, образовавшиеся от перемешивания двух материалов. Однако этот метод не позволяет судить об отсутствии упорядочения в наноразмерных объемах.

Выполнив анализ структуры ЭИП рентгеновским излучением, был получен ряд дифрактограмм. Из рис. 3, а видно, что на дифрактограмме

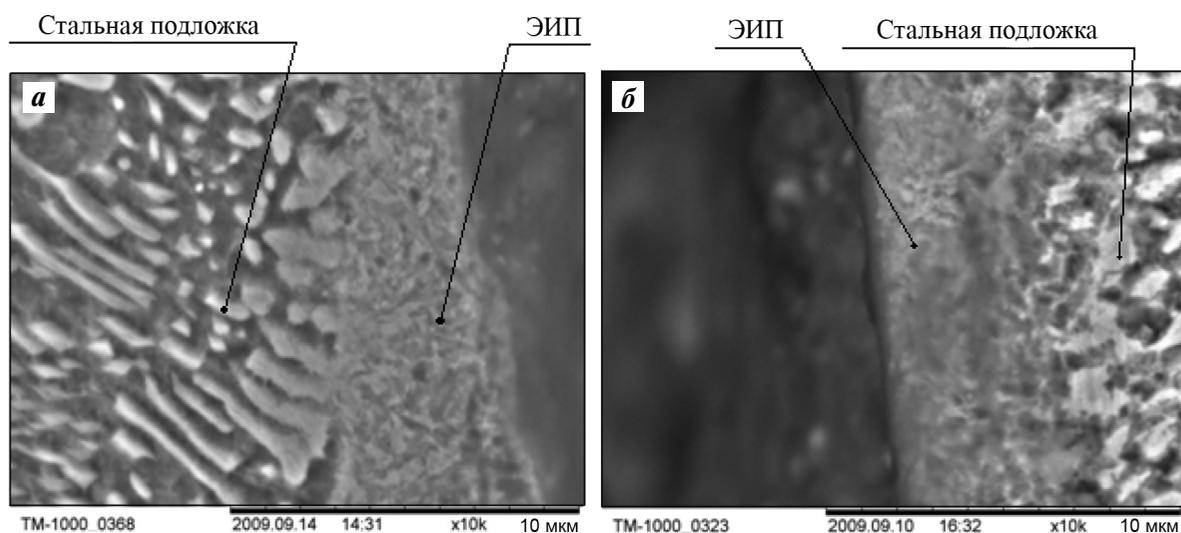


Рис. 1. Структура ЭИП, полученных электродами из сплавов марок 2НСР (а) и 5БДСР (б)

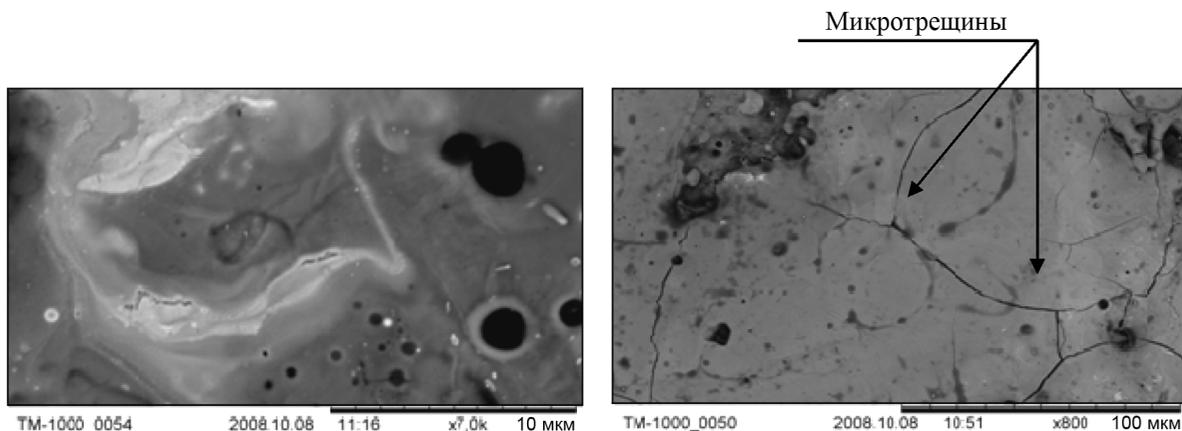


Рис. 2. Поверхность ЭИП, полученных электродом из аморфного сплава 2НСР

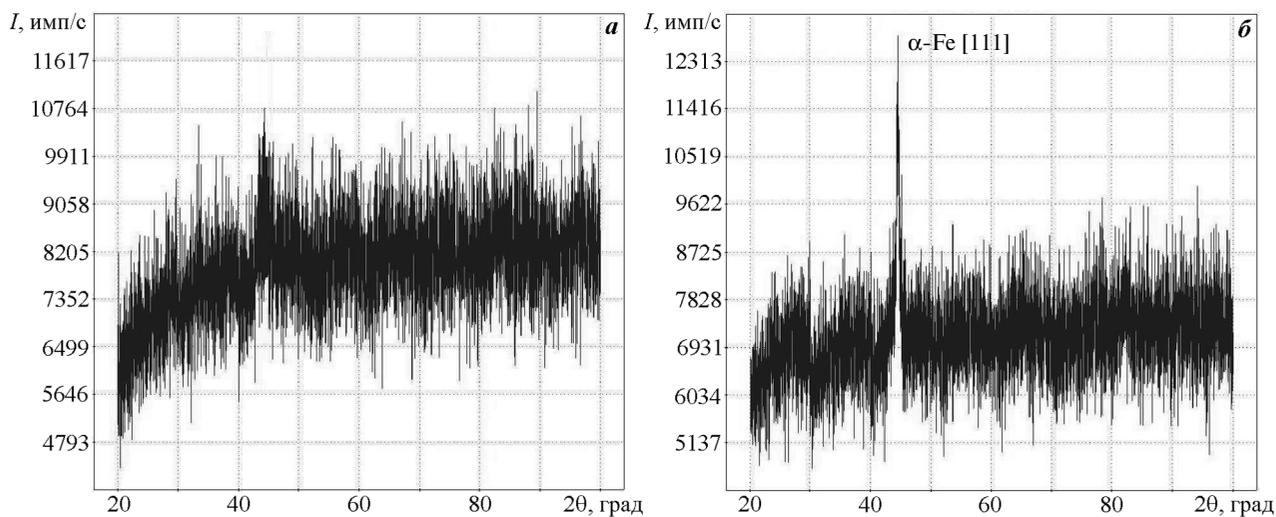


Рис. 3. Дифрактограммы ЭИП, полученных обработкой стальной подложки (Сталь 65Г) электродами из сплавов марок 2НСР (а) и 5БДСР (б)

покрытия из АС нет явно выраженных рефлексов, характеризующих кристаллические фазы, а для ЭИП из НКС при $2\theta = 44^\circ\text{--}46^\circ$ имеется отражение от кристаллической фазы (рис. 3, б). Учитывая, что кристаллы $\alpha\text{-Fe}$ дают узкие отражения именно в указанном интервале углов, можно утверждать, что именно они и присутствуют в ЭИП марки 5БДСР.

Как известно из работ [19—21], нагрев АС и НКС, применяемых нами в качестве электродных материалов, приведет к образованию в них сначала твердого раствора $\alpha\text{-Fe}$, а впоследствии — соединений Fe_3B , Fe_2B , $(\text{Fe,Nb})_2\text{B}$ и FeNbB . Таким образом, можно сделать вывод, что ЭИП, полученные из сплава марки 2НСР, аморфны, а покрытие из сплава 5БДСР имеет дулексную структуру, которая представляет собой аморфную матрицу с нанокристаллами $\alpha\text{-Fe}$.

В ходе исследований были получены экспериментальные зависимости толщины (h) ЭИП от удельного времени обработки (рис. 4) и по ним установлены порог хрупкого разрушения и критическая его величина. При электроискровой обработке на режиме $W_{\text{и}} = 0,16$ Дж, $I = 17,5$ А, $U = 73$ В максимальная толщина ЭИП из АС составила 30 мкм, а из НКС — 33 мкм, что примерно в 1,5 раза больше, чем толщина покрытия из сплава ВК6-ОМ, полученного в тех же условиях.

Из приведенных данных видно, что порог хрупкого разрушения, обозначенный пунктирной линией на рис. 4, для покрытий из АС равен $2,5$ мин/см², а для ЭИП из НКС он немного ниже — $2,1$ мин/см², что можно объяснить наличием кристаллов $\alpha\text{-Fe}$, способствующих возникновению термических и усталостных напряжений [19, 21]. Также снижению порога хрупкого разрушения способствуют деформации теплового расширения и напряжения, возникающие при охлаждении продуктов электрической эрозии [20]. При обработке на низкоэнергетическом режиме работы установки ($W_{\text{и}} = 0,09$ Дж, $I = 12,5$ А, $U = 53$ В, $f = 100$ Гц) такого эффекта не наблюдается, и достижение порога хрупкого разрушения не приводит к снижению толщины покрытия.

Микротвердость ЭИП, полученных при $W_{\text{и}} = 0,16$ Дж, $I = 17,5$ А, $U = 73$ В, имеет значительное рассеивание по величине. Максимальное значение $H_{\text{и}}$ для покрытий из АС составило 9142 МПа, минимальное — 6338 МПа (среднее — 7279 МПа), а для покрытий из НКС — соответственно 11357 и 8461 МПа (среднее — 10147 МПа). При этом во многих

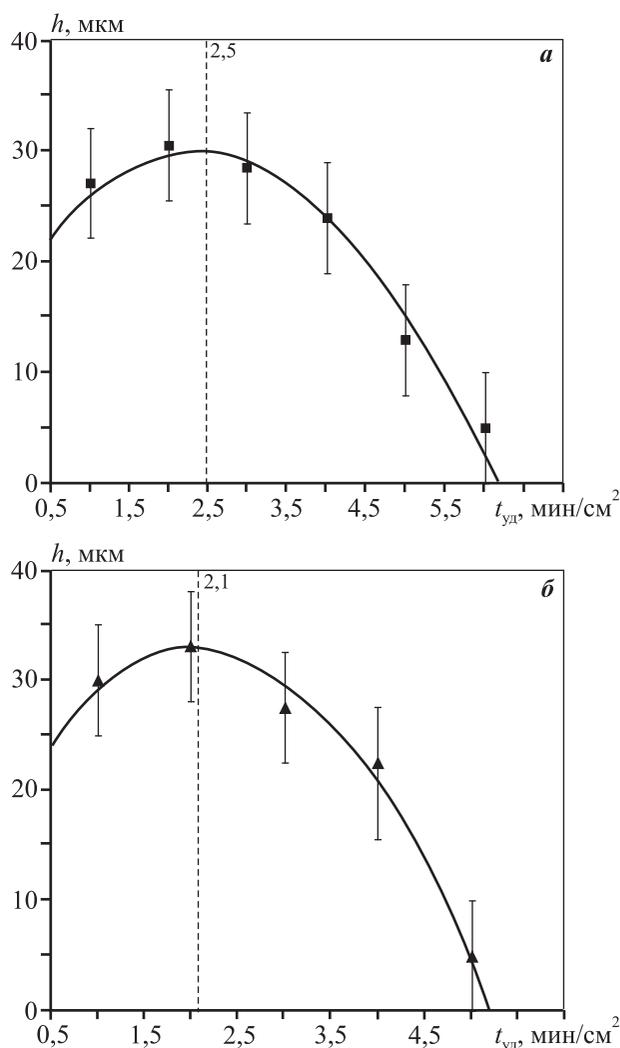


Рис. 4. Зависимость толщины ЭИП от удельного времени обработки подложки из стали 65Г электродами из сплавов 2НСР (а) и 5БДСР (б)

случаях наблюдался эффект продавливания отпечатков, когда на их гранях образуются радиальные трещины. Большинство отпечатков от индентора имеют в своем основании характерную «корону», которая определяется относительной величиной пластически деформированного объема металла (рис. 5) [18, 19].

Исследования шероховатости поверхности ЭИП, полученных при $W_{\text{и}} = 0,16$ Дж, $I = 17,5$ А, $U = 73$ В, показывают, что покрытие из АС имеет шероховатость $R_a = 4,0$ мкм, а из НКС — $3,57$ мкм. При этом отметим, что после образования первого сплошного слоя ЭИП с увеличением удельного времени обработки шероховатость практически не изменяется, но при наступлении критического порога хрупкого разрушения она снижается на $0,5$ мкм.

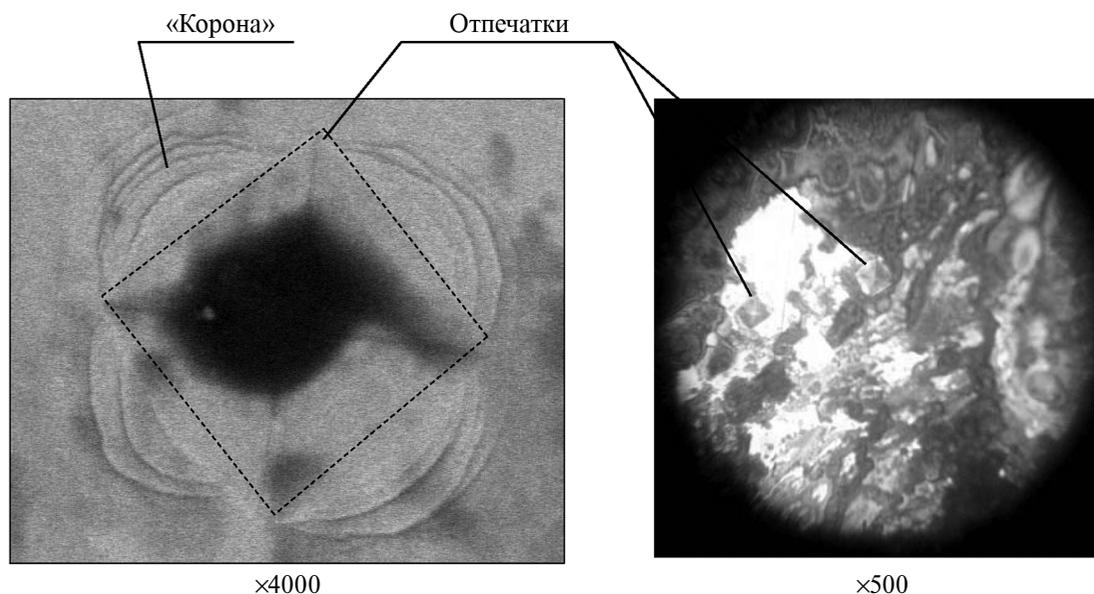


Рис. 5. Отпечаток индентора в ЭИП из НКС марки 5БДСР при разных увеличениях

Для определения триботехнических характеристик электроискровых покрытий по экспериментальным данным были получены зависимости износа от продолжительности испытаний, для чего был выполнен регрессионный анализ функцией логарифмической регрессии:

$$i_1(t) = 1,273 \cdot 10^{-3} \ln(t + 9,4 \cdot 10^{-2}) + 3,003 \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

$$i_2(t) = 4,455 \cdot 10^{-4} \ln(t + 3,473 \cdot 10^{-4}) + 3,548 \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

Значения стандартного отклонения экспериментальных значений износа от линии регрессии составляет не более $0,4 \cdot 10^{-3}$ г, коэффициент корреляции не менее 0,818. На рис. 6 представлены графические зависимости $i(t)$.

Дифференцируя регрессионные уравнения (1) и (2), были построены зависимости скорости изнашивания (w) от продолжительности испытаний для стадий приработки и установившегося изнашивания, приведенные на рис. 7. Видно, что на стадии приработки большая скорость изнашивания наблюдается у ЭИП из АС, но при наступлении стадии установившегося изнашивания она падает и становится ниже, чем у ЭИП из НКС. Это обусловлено повышенной шероховатостью и сравнительно невысокой микротвердостью ЭИП из сплава 2НСР (7,28 ГПа). В этих условиях данное покрытие имеет более высокую износостойкость $u_2 = 2,0 \cdot 10^4$ с/г, так как в нем изначально имеется аморфная структура, а участки из кристаллов Fe_3B , Fe_3Si и $\alpha-Fe(Si)$, образовавшиеся в процессе приработки из-за повышения температу-

ры в местах контакта выступов шероховатости, удаляются с ЭИП в ходе изнашивания [4].

При приработке поверхностный слой покрытия из НКС, имеющий атомы Nb, обладает меньшим

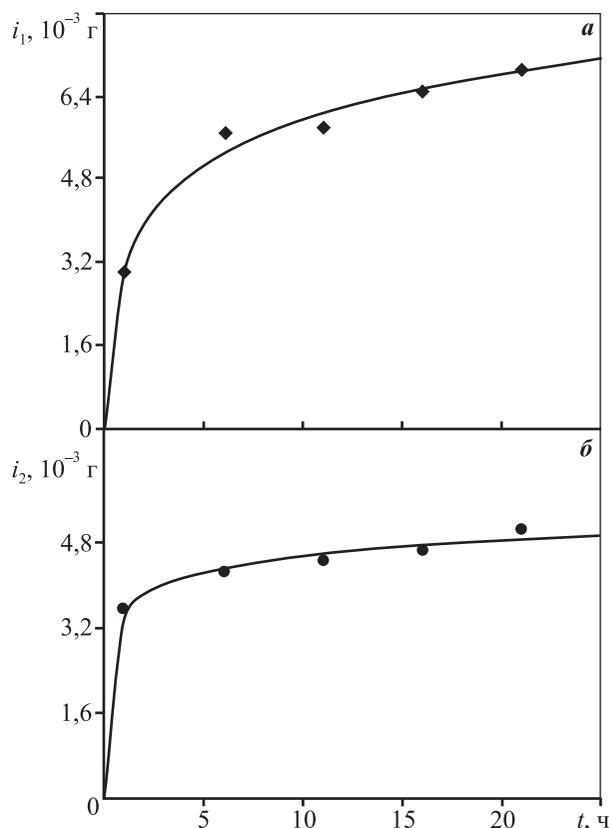


Рис. 6. Зависимость износа от продолжительности испытания ЭИП из сплава марки 5БДСР (а) и 2НСР (б)

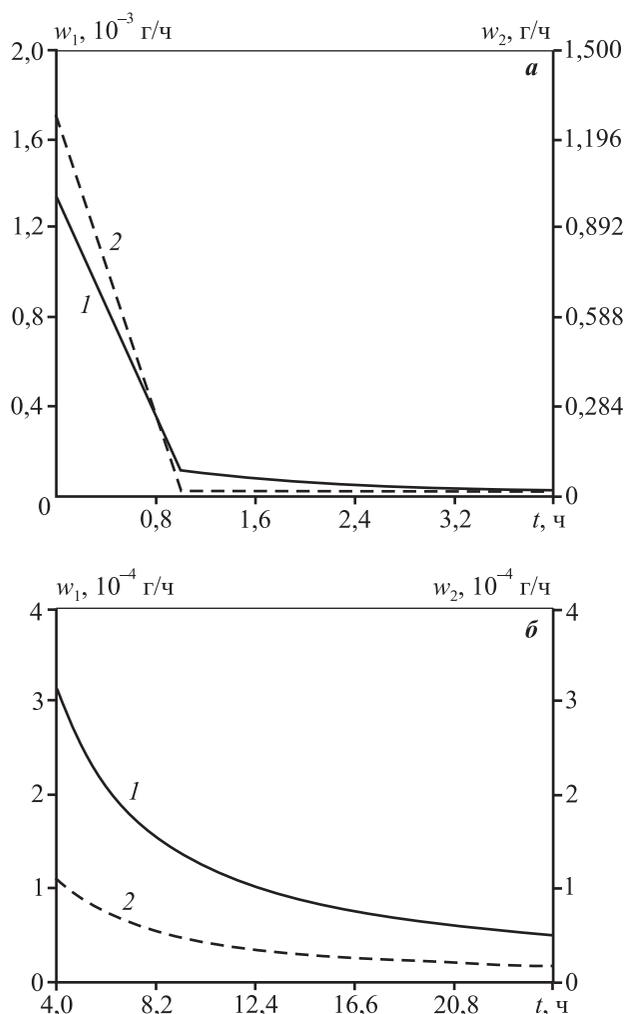


Рис. 7. Зависимость скорости изнашивания ЭИП от продолжительности испытаний на стадиях приработки (а) и установившегося изнашивания (б) 1 – покрытие из НКС марки 5БДСР; 2 – из АС марки 2НСР

количеством закристаллизовавшихся участков из кубических кристаллов Fe_3V , Fe_3Si , способствующих его разрушению. Это объясняет сравнительно низкую скорость изнашивания при приработке. Стадия установившегося изнашивания для этого ЭИП характеризуется сравнительно невысокой

износостойкостью $u_1 = 0,55 \cdot 10^4$ с/г, так как покрытие из НКС имеет нанокристаллическую структуру, представляющую собой аморфную матрицу с нанокристаллами α -Fe. Такой структуре даже при стабильных температурных условиях, характерных установившемуся изнашиванию, свойственна хоть и небольшая, но разница удельных атомных объемов аморфной и нанокристаллической фаз, что способствует образованию небольших растягивающих напряжений. Триботехнические свойства изучаемых ЭИП приведены в таблице. Для сравнения там же представлены триботехнические свойства ЭИП из часто используемого сплава марки ВК6-ОМ.

Проанализировав результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы и предложить рекомендации по использованию покрытий из рассматриваемых материалов:

- ЭИП из АС марки 2НСР, имеющее микротвердость 7,28 ГПа, целесообразно использовать для упрочнения рабочих поверхностей деталей, применяющихся в парах трения;

- ЭИП из НКС марки 5БДСР с $H_\mu = 10,15$ ГПа и высокой скоростью изнашивания контрообразца будет эффективно для упрочнения деталей машин или рабочих органов, эксплуатация которых проходит в среде свободного абразива либо при контакте с ним.

Триботехнические исследования позволили разработать и предложить производству технологию упрочнения ЭИО «пальцев» режущего аппарата жаток наиболее распространенных современных зерноуборочных комбайнов. Данные режущие детали работают в условиях абразивного изнашивания, поэтому их упрочнение производится электродами из НКС марки 5БДСР.

Суть метода в том, что на режущую поверхность, обращенную к сегменту ножа, электродом из сплава марки 5БДСР наносится износостойкое ЭИП. Ширина следа, оставленного электродом,

Триботехнические свойства электроискровых покрытий

Марка сплава ЭИП	Скорость изнашивания $w_{cp}, 10^{-5}$ г/с		Износостойкость $u_{cp}, 10^4$ с/г		Момент трения M , Н·м	
	ЭИП	Контрообразец	ЭИП	Контрообразец	Стадия приработки	Стадия установившегося изнашивания
5БДСР	18,0	25,0	0,55	0,40	0,017	0,008
2НСР	5,0	6,0	2,0	1,67	0,020	0,008
ВК6ОМ	16,0	31,0	0,625	0,32	0,026	0,010

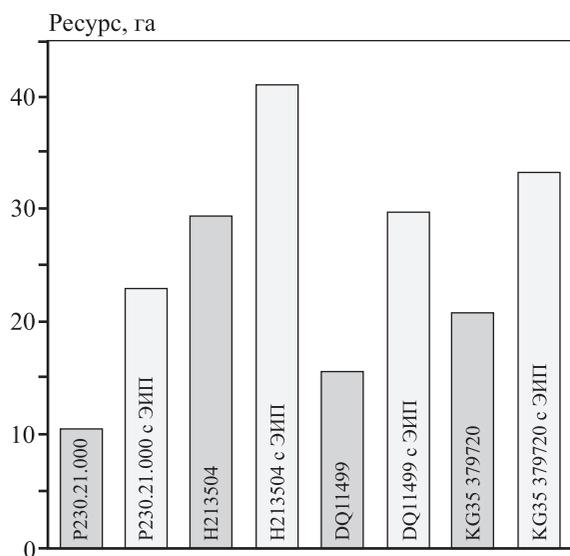


Рис. 8. Ресурс деталей, участвующих в эксплуатационных испытаниях

должна составлять от 1,5 до 2 мм, а толщина покрытия — от 25 до 30 мкм.

Результаты эксплуатационных испытаний показали, что при упрочнении режущих поверхностей покрытиями из НКС ресурс пальцев увеличивается в 1,4–2,0 раза (рис. 8).

Заключение

В ходе проведенных исследований установлено, что электроискровая обработка стальной подложки электродами из аморфного сплава марки 2НСР и нанокристаллического марки 5БДСР позволяет получать покрытия твердостью 7279 и 10147 МПа, толщиной 30 и 33 мкм соответственно. Эксплуатационные испытания показали, что упрочнение режущих поверхностей ЭИП из НКС повышает ресурс режущих деталей в 1,4–2,0 раза.

Литература

- Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Kudryashov A.E. Effect of WC—CO electrode structure on the rate of electrospark coating deposition // *Metallurgist*. 2012. Vol. 55. No. 9–10. P. 628–633.
- Levashov E.A., Pogozhev Y. S., Sviridova T.A., Zamulaeva E.I., Petrzhhik M.I., Kudryashov A.E. Formation of protective coatings on steel Kh12MF by the force of the sequential electric spark treatment by boride and carbon-containing electrodes // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2014. Vol. 55. No. 2. P. 205–211.
- Kolomeichenko A.V., Kuznetsov I.S., Kravchenko I.N. Investigation of the thickness and microhardness of electrospark coatings of amorphous and nanocrystalline alloys // *Welding Int.* 2015. Vol. 29. No. 10. P. 823–825.

- Kolomeichenko A.V., Kuznetsov I.S. Tribotechnical properties the electrospark coating of amorphous and nanocrystalline alloys based on iron // *Friction Wear*. 2014. Vol. 35. No. 6. P. 501–504.
- Cadney S., Brochu M. Formation of amorphous $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ coatings via the electrospark deposition process // *Intermetal*. 2008. Vol. 16. No. 4. P. 518–523.
- Brochu M., Heard D.W., Milligan J., Cadney S. Bulk nanostructure and amorphous metallic components using the electrospark welding process // *Assembly Automation*. 2010. Vol. 30. No. 3. P. 248–256.
- Milligan J., Heard D.W., Brochu M. Formation of nanostructured weldments in the Al—Si system using electrospark welding // *Appl. Surf. Sci.* 2010. Vol. 256. No. 12. P. 4009–4016.
- Cadney S., Goodall G., Kim G., Moran A., Brochu M. The transformation of an al-based crystalline electrode material to an amorphous deposit via the electrospark welding process // *J. Alloys Compounds*. 2009. Vol. 476. No. 1–2. P. 147–151.
- Brochu M., Portillo G. Grain refinement during rapid solidification of aluminumzirconium alloys using electrospark deposition // *Mater. Trans.* 2013. Vol. 54. No. 6. P. 934–939.
- Tariq N.H., Hasan B.A., Shakil M., Akhter J.I., Haq M.A., Awan N.A. Electron beam brazing of $Zr_{62}Al_{13}Ni_7Cu_{18}$ bulk metallic glass with Ti metal // *Vacuum*. 2014. Vol. 101. P. 98–101.
- Heard D.W., Brochu M. Development of a nanostructure microstructure in the Al—Ni system using the electrospark deposition process // *J. Mater. Process. Technol.* 2010. Vol. 210. No. 6–7, P. 892–898.
- Аксенов Л.Б., Петров В.М., Кудряшов А.Е., Галышев А.А. Сравнительная износостойкость покрытий электроискрового легирования с применением СВС-электродов с нанодисперсными модификаторами // *Металлообработка*. 2010. No. 3. С. 15–19.
- Левашов Е.А., Погужев Ю.С., Кудряшов А.Е., Рупасов С.И., Левина В.В. Дисперсно-упрочненные наночастицами композиционные материалы на основе TiC—Ni для электроискрового легирования // *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия*. 2008. No. 2. С. 17–24.
- Николенко С.В., Пячин С.А., Бурков А.А. Формирование электроискровых покрытий из твердого сплава ВК8 с добавкой Al_2O_3 // *Изв. вузов. Цв. металлургия*. 2011. No. 1. С. 58–62.
- Vereshchagin M.N., Goranskii G.G., Kukareko V.A. Structure and tribological properties of amorphous alloys based on iron and nickel // *Friction Wear*. 2012. Vol. 33. No. 3. P. 181–183.
- Lyuzgin, D.V., Inoue A. Obtaining and nanocrystallization of metallic glasses (review). Pt. I // *Mater. Technol.* 2008. No. 11. P. 41–50.
- Glezer A.M., Plotnikova M.P., Shalimova A.V., Dobatkin S.V. Severe plastic deformation of amorphous alloys: i. structure and mechanical properties // *Bull. RAS. Physics*. 2009. Vol. 73. No. 9. P. 1233–1239.

18. Кузнецов И.С. Электроискровая технология упрочнения деталей режущего аппарата жаток электродами из аморфных и нанокристаллических сплавов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саранск: Мордовский гос. ун-т им. Н.П. Огарева, 2013.
19. Шурыгина Н.А., Глезер А.М., Пермякова И.Е., Блинова Е.Н. Влияние нанокристаллизации на механические и магнитные свойства сплава типа FINEMET ($\text{Fe}_{78.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$) // Изв. РАН. Сер. физическая. 2012. Т. 76. No. 1. С. 52—59.
20. Гончукова Н.О., Ратушняк С.Л., Толочко О.В. Связь нанокристаллизации и структурной релаксации в сплаве $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_9$ // Физика и химия стекла. 2011. Т. 37. No. 4. С. 488—500.
21. Ратушняк С.Л., Гончукова Н.О. Связь между началом кристаллизации и внутренними напряжениями в аморфных сплавах на основе железа // Физика и химия стекла. 2012. Т. 38. No. 6. С. 926—930.

References

1. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Kudryashov A.E. Effect of WC—CO electrode structure on the rate of electrospark coating deposition. *Metallurgist*. 2012. Vol. 55. No. 9-10, P. 628—633.
2. Levashov E.A., Pogozhev Y.S., Sviridova T.A., Zamulaeva E.I., Petrzhik M.I., Kudryashov A.E. Formation of protective coatings on steel Kh12MF by the force of the sequential electric spark treatment by boride and carbon-containing electrodes. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2014. Vol. 55. No. 2, P. 205—211.
3. Kolomeichenko A.V., Kuznetsov I.S., Kravchenko I.N. Investigation of the thickness and microhardness of electrospark coatings of amorphous and nanocrystalline alloys. *Welding Int.* 2015. Vol. 29. No. 10. P. 823—825.
4. Kolomeichenko A.V., Kuznetsov I.S. Tribotechnical properties the electrospark coating of amorphous and nanocrystalline alloys based on iron. *Friction Wear*. 2014. Vol. 35. No. 6. P. 501—504.
5. Cadney S., Brochu M. Formation of amorphous $\text{Zr}_{41.2}\text{Ti}_{13.8}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{12.5}\text{Be}_{22.5}$ coatings via the electrospark deposition process. *Intermetall*. 2008. Vol. 16. No. 4. P. 518—523.
6. Brochu M., Heard D.W., Milligan J., Cadney S. Bulk nanostructure and amorphous metallic components using the electrospark welding process. *Assembly Automation*. 2010. Vol. 30. No. 3. P. 248—256.
7. Milligan J., Heard D.W., Brochu M. Formation of nanostructured weldments in the Al-Si system using electrospark welding. *Appl. Surface Sci.* 2010. Vol. 256. No. 12. P. 4009—4016.
8. Cadney S., Goodall G., Kim G., Moran A., Brochu M. The transformation of an Al-based crystalline electrode material to an amorphous deposit via the electrospark welding process. *J. Alloys Compounds*. 2009. Vol. 476. No. 1-2. P. 147—151.
9. Brochu M., Portillo G. Grain refinement during rapid solidification of aluminumzirconium alloys using electrospark deposition. *Mater. Trans.* 2013. Vol. 54. No. 6. P. 934—939.
10. Tariq N.H., Hasan B.A., Shakil M., Akhter J.I., Haq M.A., Awan N.A. Electron beam brazing of $\text{Zr}_{62}\text{Al}_{13}\text{Ni}_7\text{Cu}_{18}$ bulk metallic glass with Ti metal. *Vacuum*. 2014. Vol. 101. P. 98—101.
11. Heard D.W., Brochu M. Development of a nanostructure microstructure in the Al-Ni system using the electrospark deposition process. *J. Mater. Process. Technol.* 2010. Vol. 210. No. 6-7. P. 892—898.
12. Aksenov L.B., Petrov V.M., Kudryashov A.E., Galyshev A.A. Sravnitel'naya iznosostoikost' pokrytii elektroiskrovogo legirovaniya s primeneniem SVS-elektrodov s nanodispersnymi modifikatorami [Comparative wear resistance of coatings of electrospark doping with application of SHS-electrodes with nanodispersed modifiers]. *Metalloobrabotka*. 2010. No. 3. P. 15—19.
13. Levashov E.A., Pogozhev Y.S., Kudryashov A.E., Rupasov S.I., Levin V.V. Dispersno-uprochnennye nanochastitsami kompozitsionnye materialy na osnove Ti—Ni dlya elektroiskrovogo legirovaniya [Dispersion-hardened by nanoparticles the composite materials based on Ti—Ni for electrospark doping]. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2008. No. 2. P. 17—24.
14. Nikolenko S.V., Pyachin S.A., Burkov A.A. Formation of electrospark coatings of the VK8 hard alloy with the Al_2O_3 additive. *R. J. Non-Ferr. Met.* 2011. Vol. 52. No. 1. P. 56—61.
15. Vereshchagin M.N., Goranskii G.G., Kukareko V.A. Structure and tribological properties of amorphous alloys based on iron and nickel. *Friction Wear*. 2012. Vol. 33. No. 3. P. 181—183.
16. Lyuzgin D.V., Inoue A. Obtaining and nanocrystallization of metallic glasses (review) Pt. I. *Mater. Technol.* 2008. No. 11. P. 41—50.
17. Glezer A.M., Plotnikova M.P., Shalimova A.V., Dobatkin S.V. Severe plastic deformation of amorphous alloys: i. structure and mechanical properties. *Bull. RAS. Physics*. 2009. Vol. 73. No. 9. P. 1233—1239.
18. Kuznetsov I.S. Jelektroiskrovaja tehnologija uprochneniya detalej rezhushhego apparata zhatok jelektrodami iz amorfnyh i nanokristallicheskih splavov [Electrospark technology of strengthening of reaper cutting apparatus details by electrodes from amorphous nanocrystalline alloys]: Diss. Cand. Sci. (Eng.). Saransk: Mordovskij Gosudarstvennyj Universitet, 2013.
19. Shurygina N.A., Glezer A.M., Permyakova I.E., Blinova E.N. Vliyanie nanokristallizatsii na mehanicheskie i magnitnye svojstva splava tipa FINEMET ($\text{Fe}_{78.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$) [Effect of nanocrystallization on the mechanical and magnetic properties of FINEMET-type alloy ($\text{Fe}_{78.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$)]. *Izvestiya RAN. Ser. Fizika*. 2012. Vol. 76. No. 1. P. 52—59.
20. Gonchukova N.O., Ratushnyak S.L., Tolochko O.V. Svjaz' nanokristallizatsii i strukturnoj relaksatsii v splave $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_9$ [Relation between nanocrystallization and structural relaxation in the $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_9$ alloy]. *Fizika i khimiya stekla*. 2011. Vol. 37. No. 4. P. 488—500.
21. Ratushnyak S.L., Gonchukova N.O. Cvyaz' mezhdu nachalom kristallizatsii i vnutrennimi napryazheniyami v amorfnykh splavakh na osnove zheleza [The connection between the onset of crystallization and inner tension in amorphous alloys based on iron]. *Fizika i khimiya stekla*. 2012. Vol. 38. No. 6. P. 926—930.