

**Лопата Л.А.,\***  
**Николайчук В.Я.,\*\***  
**Барановский В.Н.,\*\*\***  
**Чиграй СЛ.,\*\*\*\***

\*ИПП НАН Украины,  
г. Киев, Украина

\*\*Винницкий национальный аграрный  
университет,

г. Винница, Украина

\*\*\*Тернопольский национальный  
технический университет им. И. Пулюя,  
г. Тернополь, Украина

\*\*\*\*Национальный технический  
университет Украины «КПИ»,  
г. Киев, Украина

**E-mail:** beryuza@ukr.net

## СОЗДАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ ПРИПЕКАНИЕМ

УДК 621.793.620.172

Рассмотрены основные этапы создания покрытий электроконтактным припеканием порошков (ЭКПП) самофлюсующихся сплавов (СФС). Для оценки эффективности ЭКПП СФС исследовались: комплекс свойств системы «основа-покрытие» (адгезионная и когезионная прочность, упругие свойства); структурные особенности полученных покрытий, зоны диффузионного взаимодействия (ДЗ) и термического влияния (ЗТВ); физико-механические свойства (пористость покрытий, микротвердость, износостойкость) полученных покрытий. Показано, что процесс электроконтактного припекания позволяет получать покрытия из порошков из СФС с прочностью сцепления 180-200 МПа, пористостью не более 5 %, износостойкостью в 2,3 - 3,18 раза выше, чем стали 45, закаленной до твердости 46 - 48 HRC<sub>3</sub>.

**Ключевые слова:** покрытия, износостойкость, порошки, самофлюсующиеся сплавы, электроконтактное припекание, прочность сцепления, диффузионная зона, зона термического влияния.

### Актуальность исследований

Актуальной задачей современного материаловедения является повышение уровня функциональных свойств покрытий из востребованного промышленностью и сравнительно дешевого класса порошковых материалов, как самофлюсующиеся сплавы на основе Fe и Ni, главной особенностью которых является самофлюсуемость, что позволяет обходиться без специальных защитных сред и флюсов. Повысить качество и свойства покрытий из порошков СФС возможно путем изменения состава порошка СФС или технологии его нанесения (рис. 1).

Получить износостойкие высокопрочные композиционные покрытия на основе порошков самофлюсующихся сплавов можно путем использования низкоэнергетического и высокопроизводительного метода нанесения покрытия - электроконтактного припекания (ЭКП) [1]. По сравнению с наплавкой в процессе нанесения покрытия ЭКПП сохраняются состав и свойства наносимого порошка (табл. 1).

По сравнению с традиционными методами газотермического напыления этот метод обеспечивает низкую пористость (< 3 ... 5 %) и повышенную прочность сцепления с основой (180-220 МПа) [7]. Исследованиям электроконтактных методов нанесения покрытий посвящены разработки ученых в области контактной сварки, наплавки, наварки и припекания: Рыкалина Н.Н., Гельмана А.С., Клименко Ю.В., Поляченко А.В., Дорожкина Н.Н., Верещагина В.А., Жорника В.И. [7]. Однако, в работах по электроконтактному припеканию (ЭКП) отсутствуют систематические исследования особенностей структуры, состава и свойств получаемых покрытий во взаимосвязи с параметрами процесса ЭКПП, то есть отсутствует материаловедческий аспект.

### Цель исследований

Создание износостойких высокопрочных покрытий на основе порошков СФС электроконтактным припеканием (ЭКП) за счет установления взаимосвязи технологических параметров ЭКП со структурой, составом и свойствами покрытий и управление ими путем моделирования процесса электроконтактного спекания.



Самофлюсующиеся порошки (СФП) являются важным классом материалов для получения защитных покрытий (ЗП) и представляют собой многокомпонентные гетерогенные системы на основе Ni, Co, Fe с твердыми дисперсными включениями карбидов, боридов, силицидов. Согласно фазового рентгеновского анализа СФС порошки на основе Fe представляют собой твердый раствор на основе  $\alpha$  - железа, эвтектику, содержащую  $Me_3(Si, B)$  и избыточные фазы (карбиды  $Me_3C$  и бориды  $Me_2B$ ), а порошки СФС на основе Ni содержат:  $\gamma$ -твердый никелевый раствор, карбиды хрома  $Cr_{23}C_6$  и  $Cr_7C_3$ , бориды хрома CrB и никеля  $Ni_3B$ . Главная особенность СФП — самофлюсуемость, т.е. способность раскислять оксиды, которые всплывают в виде легкоплавкого шлака на поверхность. Это позволяет обходиться без специальных защитных сред и флюсов. В исследованиях использовались наиболее распространенные самофлюсующиеся порошки (СФП) на основе железа - ПГ-С1 и на основе никеля - ПГ-СРЗ, в том числе с износостойкими добавками, в частности порошка ферросплава углеродистого - ФХ-800.

Процесс формирования покрытий при ЭКПП включает:

1) формирование (уплотнение порошкового слоя) под давлением  $P \geq 10$  МПа при температурах от  $T_{ком}$  до  $0,1 - 0,2 T_{пл}$ ;

2) спекание под давлением  $P \geq 20 - 40$  МПа при пропускании электрического тока  $T \leq 0,6 - 0,8 T_{пл}$ ;

3) припекание спеченного порошкового слоя к основе при  $P \geq 40 - 100$  МПа и  $T \leq 0,8 - 0,9 T_{пл}$ ;

Для оценки эффективности ЭКП СФП исследовались: комплекс свойств системы «основа-покрытие» (адгезионная и когезионная прочность, упругие свойства); структурные особенности полученных покрытий, зоны диффузионного взаимодействия и термического влияния; физико-механические свойства (пористость покрытий, микротвердость, износостойкость). Высокая прочность сцепления покрытий  $\sigma_{сц}$  с основой (180 - 220 МПа) обеспечивается за счет образованием со стороны основы широкой диффузионной зоны толщиной до 0,02 мм за счет диффузии никеля Ni и хрома Cr в основу (рис. 2). Глубина диффузии хрома Cr в основу (15 мкм) в системе «покрытие - основа сталь 45» вдвое превышает глубину диффузии никеля Ni (7 мкм), что связано с образованием неограниченных твердых растворов в системе Fe-Cr. Добавки в порошки СФС феррохрома углеродистого не влияют на глубину диффузии хрома.

На границе покрытие - деталь не имеет места наличие жидкой фазы (рис. 2). Это свидетельствует о том, что, в отличие от наплавки, при ЭКПП не имеет место перегрев и зона перемешивания материала покрытия с металлом детали. Покрытие состоит из равномерной карбидной эвтектики и твердого раствора.

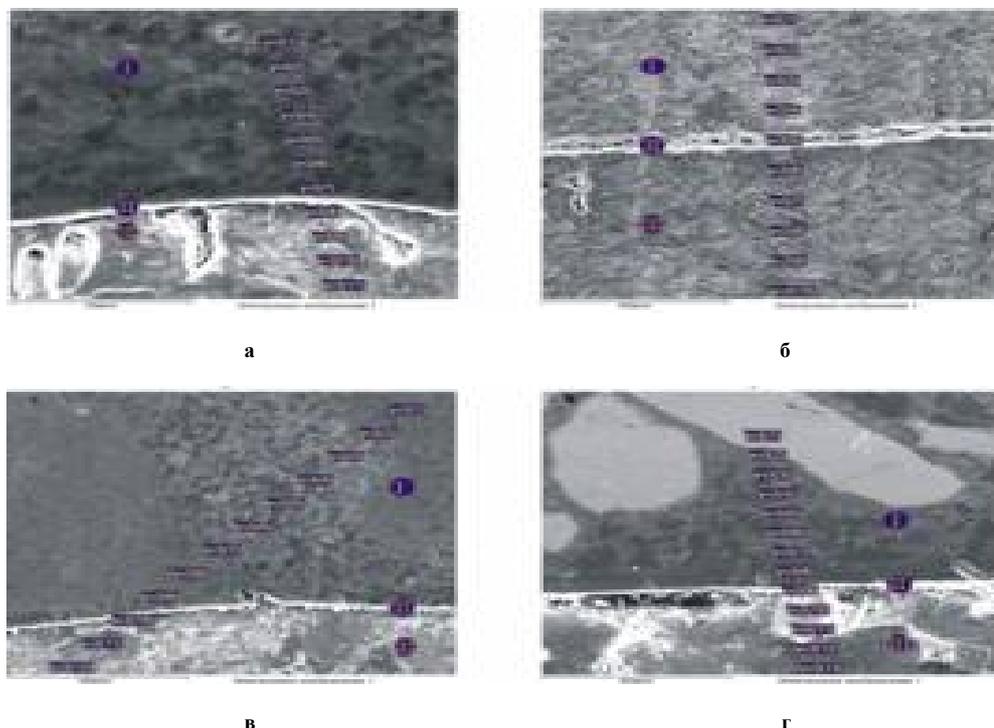


Рис. 2 – Микроструктура покрытий, полученных ЭКПП:

а, б – ПГ - СРЗ;

в – ПГ - С1;

г – 70 % ПГ - С1 и 30 % ФХ - 800

Рентгенографическое изучение фазового состава покрытий показывает, что при оптимальных режимах ЭКПП в спеченном слое в основном сохраняются карбиды  $Cr_7C_3$  и  $Cr_{23}C_6$  присутствующие в исходном порошке, что свидетельствует о сохранении наследственных свойств материала покрытия при электроконтактном припекании.

Структура частиц порошка СФС состоит из карбидов, высоколегированного раствора углерода и легирующих элементов в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железе, и незначительно легированного мартенсита и продуктов его распада. Основой структуры покрытия из самофлюсующегося никелевого сплава является  $\gamma$ -твердый раствор элементов в никеле. Структурными составляющими являются эвтектики  $\gamma + Ni_3V$  и  $\gamma + Ni_3V + Cr_nC_m$  и отдельные частицы карбидов и боридов хрома.

Основные особенности структурообразования покрытий при ЭКПП СФС с добавками ФХ-800 заключаются в следующем. Высокая скорость нагрева и охлаждения при приложении давления к слою порошка приводит к растрескиванию карбидных частиц (рис. 3). Уже при температурах 1270 ... 1320 К отчетливо наблюдается растворение карбидных частиц, происходящее по границам зерен феррохрома. При повышении температуры до 1370 ... 1470 °К происходит увеличение диффузионных зон и уменьшение количества частиц феррохрома в исследуемом объеме покрытия. Наиболее интенсивно растворяются мелкие карбиды (размером менее 0,2 мкм). Эффект измельчения карбидной фазы позволяет получать спеченные слои с равномерно распределенными карбидными включениями, что способствует увеличению износостойкости покрытий. Карбидные частицы имеют специфическую остроугольную форму (рис. 3), что свидетельствует о сохранении исходных свойств и структуры материала покрытия при электроконтактном припекании.



Рис. 3 – Фрактограмма покрытия, полученного ЭКПП шихты из 60 % ПГ-С1 и 40 % ФХ – 800; 1 – участок разрушения частиц ФХ - 800

Таким образом, введение в состав покрытий из гранулированных порошков СФС (ПГ-С1, ПГ-СР3 и др.) феррохрома углеродистого ФХ-800 и импульсное температурно-силовое воздействие в процессе формирования покрытия, увеличивающее диспергирование частиц твердой фазы, способствует увеличению микротвердости, а следовательно и износостойкости покрытий, что позволяет увеличивать срок службы деталей с покрытиями.

Наличие на межфазной границе «покрытие-основа» диффузионной зоны (ДЗ) до 0,02 мм (рис. 2) и минимальной зоны термической влияния (ЗТВ) до 1,8 мм (рис. 4, а) характеризуется изменением микротвердости (рис. 4, б). Для сравнения следует отметить, что при газопламенной наплавке зона термического влияния составляет 24 ... 30 мм, при плазменной наплавке - 4...8 мм, при электродуговой наплавке - 2 ... 10 мм (табл. 1). Размеры зоны термического влияния (ЗТВ), ее структура и свойства зависят от термического цикла процесса припекания (рис. 4, в). Дополнительное охлаждение приводит к уменьшению величины ЗТВ и сохранению ее высокой твердости. При максимальном токе и минимальном времени нагрева (при малых энергозатратах) размеры ЗТВ минимальны при максимальной твердости.

Твердость ЗТВ также зависит от проникновения легирующих элементов покрытия (Cr, Ni и др.) в поверхность детали в результате диффузии. Структура ЗТВ меняется от мартенситной (HRC 50-52) вблизи линии соединения покрытия и детали до трооститной (HRC 43-45) на участке, предшествующем основному металлу.

Пористость покрытий при ЭКПП СФС приближается к пористости компактного материала (рис. 5, а).

Износостойкость полученных покрытий в 2,3-3,18 раза выше, чем стали 45, закаленной до твердости 46-48 HRC<sub>3</sub> (рис. 5, б).

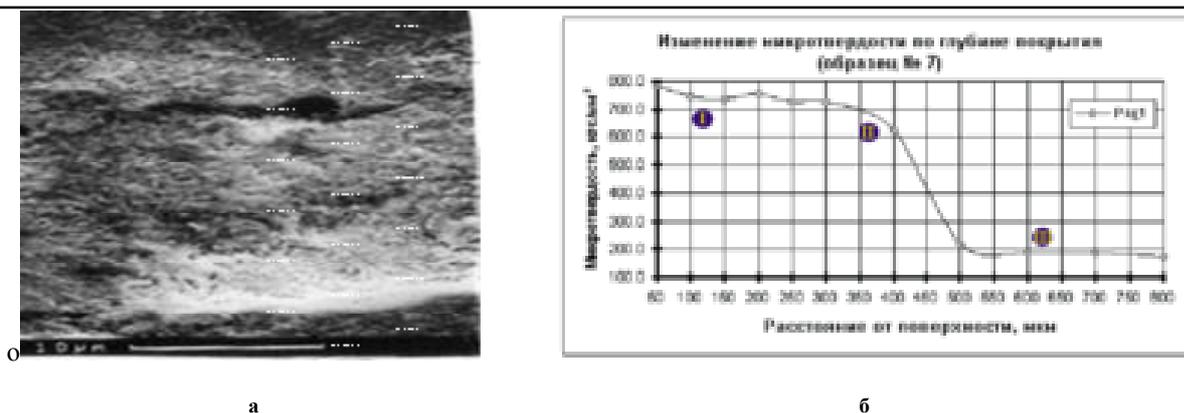


Рис. 3 – Характеристика ЭКПП ПР-С1+ФХ-800:  
 а – ЗТВ (x100);  
 б – изменение микротвердости;  
 в – термический цикл

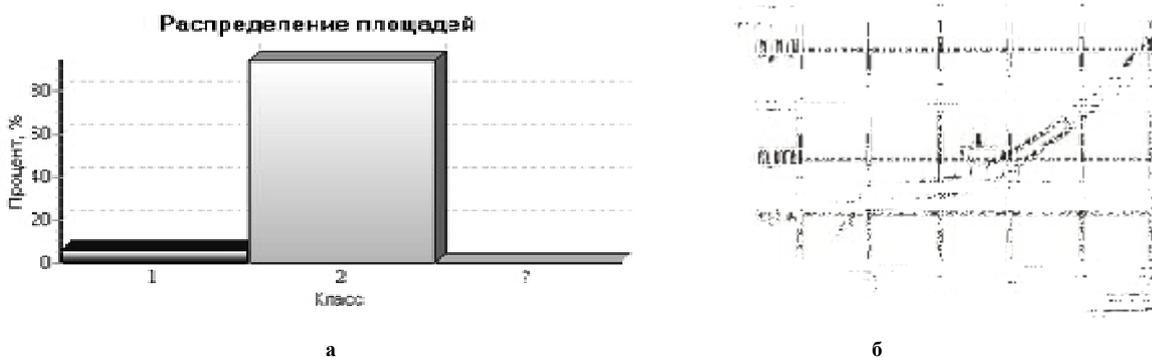


Рис. 5 – Результаты количественного стереологического анализа пористости покрытий из порошков СФС полученные ЭКПП (а) и зависимость интенсивности изнашивания покрытий из ПГ-С1 (1) и ПГ-СР3 (2) от нагрузки (б)

Таблица 1

**Свойства покрытий полученных ЭКПП СФС**

Материал покрытия	Пористость, $P$ , %	Прочность сцепления $\sigma_{сц}$ , МПа
ПГ-С1	1,5	200
ПГ-С1+ФХ800	3	180
ПГ-СР3	2	220
ПГ-СР3+ФХ	-	-

Свойства (табл. 2) покрытий из СФС, полученных ЭКП определяются технологическими параметрами (ТП) процесса (табл.3). В результате исследований влияния на свойства покрытий ТП получена регулировочная характеристика процесса получения покрытий из порошков СФС ЭКП (рис. 6).

Оптимальные параметры процесса ЭКП СФС

Материал покрытия	Параметры процесса			
	P, МПа	I, кА	время, с	
			импульса	паузы
ПГ - С1	40	10-12	0,02	0,02
ПГ - СР3	35	13-14	0,02	0,02
ПГ - С1 + ФХ -800	45	12-16	0,04	0,04

На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана технология создания износостойких высокопрочных композиционных покрытий на основе порошков СФС с низкой пористостью (1 ... 5 %) и высокой адгезионной и когезионной прочностью (180 ... 220 МПа) методом ЭКП при оптимальных ТП: токе – 8 ... 16 кА; давлении – 30 ... 40 МПа, длительности импульсов тока и пауз между ними - 0,04с. Область оптимальных ТП зависит от содержания ФХ-800.

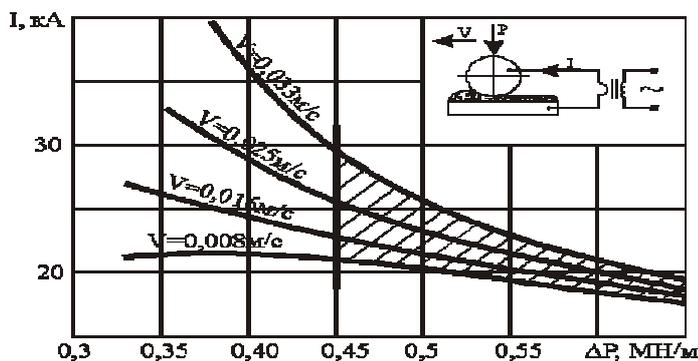


Рис. 6 – Регулировочная характеристика процесса создания покрытий из порошков СФС ЭКП ( $\sigma_{св} = 150 \dots 180$  МПа, HRC = 51 ... 53)

### Выводы

Импульсное температурно-силовое воздействие в процессе формирования покрытия при ЭКП приводит к диспергированию частиц твердой фазы, что способствует увеличению микротвердости и износостойкости. Износостойкость полученных покрытий в 2,3-3,18 раза выше, чем стали 45, закаленной до твердости 46-48 HRC<sub>3</sub>. Разработанная технология получения покрытий из порошков СФС ЭКП предопределяет снижение стоимости изготовления и восстановления деталей сельскохозяйственной техники за счет замены более дорогой легированной стали на сталь Ст.3 или сталь 45 с покрытиями из порошков СФС и повышение ресурса деталей в 3-5 раз.

### Литература

1. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф.И. Пантелеенко – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
2. Чижов В.Н. К выбору компонентов смеси для электроконтактного нанесения износостойких покрытий / В.Н. Чижов, А.В. Бодякин – М., 1991 – С. 14-15.
3. Корж В.Н. Лопата Л.А., Николайчук В.Я., Хомяковский Ю.Л. Татаров А.В. Предпосылки управления качеством формируемого покрытия и соединения его с деталью при электроконтактном припекании // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузове машинобудування, автоматизація: Збірник наукових праць / Кіровоградський національний технічний університет (КНТУ) – Кіровоград, 2010 – Вип. 23 – С. 339-344.
4. Лопата Л.А. Упрочнение никель-хромовых сплавов электроконтактным припеканием композиционных порошков системы (NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>). / Л.А. Лопата, В.Н. Корж, Ю.В. Волков, В.Я. Николайчук // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте: международ. науч.-техн. семинар, 26-28 февраля 2014 г.: тезисы докл. - Свалява-Карпаты, АТМ Украины. – К.: 2014. – С. 139-141.
5. Николайчук В.Я. Определение оптимальных режимов процесса электроконтактного припекания порошковых покрытий / В.Я. Николайчук, А.В. Дудан, Е.Е. Кожевникова, Л.А. Лопата // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. – 2015. – № 3. – С. 39-44.

Поступила в редакцію 02.12.2015

**Lopata L.A., Nikolaychuk V.Ya., Baranovskiy V.N., Chigray S.L. Creating a wear-resistant composite coating powder-based self-fluxing alloys electrocontact sintering.**

The main directions of improving the quality and properties of the coatings from powders SPS by changing the composition of the powder or SPS technology of its application. It is proposed to obtain high-strength wear-resistant composite coating powder based self-fluxing alloys and high-performance low-power electric-sintering method (EPC). The basic steps for creating coatings electrocontact sintering powders (EKPP) self-fluxing alloys (SPS). To evaluate the effectiveness of the SPS EKPP we studied: the properties of the complex system of "base-coat" (adhesive and cohesive strength, elastic properties); structural features of the resulting coatings, diffusion interaction zone (DMZ) and the heat affected zone (HAZ); physico-mechanical properties (porosity coatings, microhardness, wear resistance) the resulting coatings. It is shown that the electric contact co-firing process allows to obtain a coating of powder of SPS with the adhesive strength of 180 - 200 MPa, a porosity of not more than 5 %, durability in 2,3 - 3,18 times higher than 45 steel hardened to a hardness of 46-48 HRC3 .

Introduction of the coating of the granular powders SPS carbon ferrochrome and impulse-force effect of temperature during formation of the coating increases the dispersion of solid particles, increases the microhardness and hence the wear resistance of coatings, which allows to increase the lifetime of coated parts. The properties of the coatings of the SPS received EPC defined process parameters: current strength, pressure, time and the existing momentum of the current pause between pulses. As a result of studies on the effect on the properties of the coatings obtained by the TP control characteristic of the production of coatings from powders SPS EPC. On the basis of theoretical and experimental researches technology of creation of wear proof высокопрочных composition coverages is worked out on the basis of powders of CFC by the method of ЭКП. The worked out technology of receipt of coverages from powders of CFC ЭКП predetermines the decline of cost of making and renewal of details of agricultural technique due to substituting of more expensive alloy steel by steel of steel 45 with coverages from powders of CFC and increase of resource of details in 3-5 times.

**Keywords:** coatings, wear resistance, powders, self-fluxing alloys and electriccontact sintering, adhesive strength, diffusion zone, the heat affected zone.

**References**

1. Panteleenko F.I. Samoflyusuyushiesya diffuzionno-legirovannye poroshki na zheleznoy osnove i zaschitnye pokrytiya iz nih. Mn.: Up "Tehnoprint", 2001. 300 c.
2. Chizhov V.N., Bodyakin A.V. K vyboru komponentov smesi dlya elektrokontaktного nanesheniya iznosostoykikh pokrytiy. M., 1991. C. 14–15.
3. Korzh V.N., Lopata L.A., Nikolaychuk V.Ya., Homyakovskiy Yu.L., Tatarov A.V. Predposylki upravleniya kachestvom formiruемого pokrytiya i soedineniya ego s detalyu pri elektrokontaktным pripekaniy /Tehnika v silskogospodarskomu vyrobnyctvi, galuzeve machynobuduvannya, avtomatyzaciya: Zbirnyk naukovykh prac. Kirovogradsky nacionalny tehnichny universitet (KNTU). Kirovograd, 2010.V. 23. C. 339–344.
4. Lopata L.A., Korzh V.N., Volkov Yu.V., Nikolaychuk V.Ya. Uprochnenie Ni-Cr spлавov elektrokontaktным pripekaniem kompozicionnykh poroshkov sistema (NiCr–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>). Sovremennyye problemy podgotovki proizvodstva, zagotovitel'nogo proizvodstva, obrabotki, zboriki i remonta v promyshlennosti i na transporte: mezhdun. nauch. - tehn. Seminar, 26–28 fevr. 2014. Tezisy dokl.– Svalyava - Karpaty, ATM Ukrainy. Kiev, 2014. C. 139–141.
5. Nikolaychuk V.Ya., Dudan E.E., Kozhevnikova L.A., Lopata L.A. Opredelenie optimalnykh rezhymov processa elektrokontaktного pripekaniya porochkovykh pokrytiy. Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Promyshlennost. Prikladnyye nauki. Mashinovedenie I mashinostroenie. 2015. N 3. C. 39–44.