

Wasył I. Pokhmursky  
Mychajło M. Student  
Wołodymyr M. Hwozdetsky  
Hanna W. Pokhmurska



# Druty rdzeniowe serii FMI do natryskiwania łukowego

## Powder wire of FMI series for electroarc spray coating

### Streszczenie

W artykule podano krótki opis opracowanych w Fizyczno-Mechanicznym Instytucie im. G.W. Karpienki Państwowej Akademii Nauk we Lwowie (FMI) drutów proszkowych (DP) do natryskiwania łukowego. Pokazano, że opracowanie i zastosowanie specjalnych drutów rdzeniowych (DR) jako materiałów elektrodowych poszerzyło zastosowanie elektrometalizacji. W wielu przypadkach pozwoliło to na uzyskanie powłok o właściwościach na poziomie najlepszych powłok natryskiwanych innymi metodami natryskiwania cieplnego, na przykład metodą plazmową albo nadźwiękową, przy zachowaniu znacznej przewagi ekonomicznej.

### Abstract

In the present review of the brief description developed in G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine (FMI) arc spray wires. It is shown that development and using of new special arc spray wires as electrode materials, expanded of electrometallization applications. In many cases, it is possible to obtain a coating having the same characteristics as a top-level spray coatings obtained by using of other thermal spraying methods, e.g., plasma or supersonic methods, while maintaining economic advantages.

### Wstęp

Natryskiwanie łukowe zostało opracowane prawie sto lat temu i jest jedną z metod natryskiwania cieplnego w celu powlekania różnych detali. Ta metoda jest w porównaniu z innymi metodami najprostsza, najbardziej wydajna, nie wymaga drogiego sprzętu i można ją łatwo wdrożyć do produkcji. Przez dłuższy czas zasadniczą wadą tej metody był mały asortyment materiałów, ponieważ wykorzystywane były wyłącznie druty odlewane. Dlatego opracowanie drutów proszkowych (DP) jako natryskowych materiałów

pozwoiliło w szerokich ramach zmieniać skład chemiczny powłok, co znacznie rozszerza zakres ich stosowania. W wielu przypadkach możliwe jest uzyskanie powłok o właściwościach porównywalnych z natryskiwanymi metodą plazmową czy nadźwiękową. Jednak koszt przy powlekanii łukowym kształtuje się na poziomie 5÷10 niższym.

Na dzień dzisiejszy druty rdzeniowe (DR) do natryskiwania elektrołukowego produkowane są zarówno za granicą (firmy Metco, Castolin, Tafa, Nanosteel), jak i na Ukrainie. Największy wkład w rozwój natryskiwania drutami rdzeniowymi elektrołukowymi wnieśli specjaliści z Instytutu Elektrosprawalnictwa im. Je.O. Patona Państwowej Akademii Nauk w Kijowie (Y.S. Borysow, A.L. Borysowa, W.N. Korzyk – drut rdzeniowy Amotek [1÷4]), Instytutu Hutniczego w Mariupolu (W.J. Royanow – drut PP-MM [5]) oraz Fizyczno-Mechanicznego Instytutu im. G.W. Karpienki Państwowej Akademii Nauk we Lwowie (W.I. Pokhmursky, M.M. Student

**Prof. dr hab. inż. Wasył I. Pokhmursky, dr hab. inż. Mychajło M. Student, prof. PLw, dr inż. Wołodymyr M. Hwozdetsky** Fizyczno-Mechaniczny Instytut im. G.W. Karpienki Państwowej Akademii Nauk we Lwowie, Ukraina; **dr hab. inż. Hanna W. Pokhmurska, prof. PLw** – Politechnika Lwowska, Ukraina.

– drut rdzeniowy FMI [6÷15]. Powłoki z drutów są wykorzystywane w wielu gałęziach inżynierii, np. do renowacji detali, jak również do ochrony przed ścieraniem i zużyciem ściernym i gazowym, w temperaturze pokojowej i podwyższonej do 700°C do naprawy różnych części maszyn i detali, pracujących w warunkach smarowania granicznego.

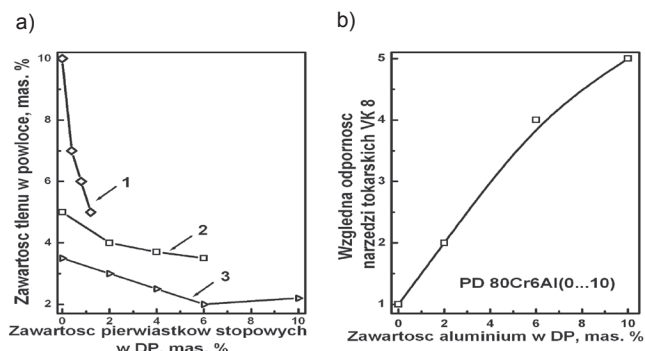
W Fizyczno-Mechanicznym Instytucie im. G.W. Karpienki Państwowej Akademii Nauk we Lwowie opracowano druty proszkowe o średnicy 1,8 mm do natryskiwania elektrołukowego (tabl. I). Partie pilotażowe produkowane są w Instytucie Elektrosprawalnictwa im. Je.O. Patona Państwowej Akademii Nauk w Kijowie. Wyniki badań na temat rozwoju drutów proszkowych, w tym oceny ich mikrostruktury i właściwości do różnych celów i zastosowań przedstawiono w pracach [6÷12]. Opracowane składy chemiczne drutów proszkowych chronione są patentami Ukrainy [13÷17].

## Rozwój powłok z drutów proszkowych

Renowacyjne powłoki stosowane są do naprawy zużytych powierzchni części, np. takich jak wały z wymaganą kolejną obróbką mechaniczną, głównie za pomocą skrawania. Dlatego dla takich powłok najbardziej istotna jest ich wysoka odporność na ścieranie oraz obrabialność przy obróbce mechanicznej. Warunki te są przewidziane przy tworzeniu powłok z twardością, która osiąga 300÷400 HV, a w ich strukturze występuje minimalna zawartość fazy tlenowej.

Minimalną zawartość tlenu w powłoce – na poziomie 2% mas., zapewnia się w mieszaniu przy obecności w proszku na drut rdzeniowy węgla – 0,8%, chromu – 6%, aluminium – 6% (rys. 1).

Wraz ze wzrostem zawartości aluminium zmniejsza się ilość martenzytu, lecz wzrasta zawartość ferrytu w powłoce. W tym przypadku twardość powłoki zmniejsza się, przy jednoczesnym wzroście jej wytrzymałości adhezyjnej. Optymalną twardość powłoki – w zakresie 300÷400 HV uzyskuje się przy obecności w drucie rdzeniowym 6÷12% mas. aluminium. Fazą matrycową (osnową) takiej powłoki jest stopowany chromem i aluminium ferryt. DP ze zwiększoną



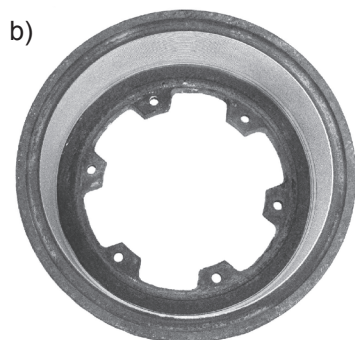
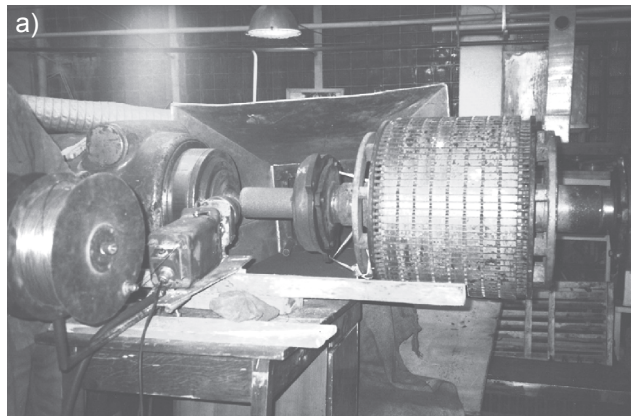
**Rys. 1.** Wpływ ilości węgla, chromu i aluminium w proszku do PD na zawartość tlenu w powłoce (a) oraz względną odporność narzędzi tokarskich VK 8 (b) przy obróbce powłok 80H6Al PD (0 .. 10): 1 – węgiel, 2 – DP 80Cr (0...6), 3 – DP 80 Cr6Al (0...10)  
**Fig. 1.** Influence of amount of carbon, chromium and aluminum in the powder for CW on the amount of oxygen in the coating (a) and the relative resistance of lathe instrument from the alloy VK8 (b) at the treatment of coating 80H6Al PD (0 .. 10): 1 – carbon, 2 – CW 80Cr (0...6), 3 – CW 80 Cr6Al (0...10)

**Tablica I.** Druty rdzeniowe i ich zastosowanie  
**Table I.** Flux cored wires and their application

Gatunek drutu	System stopowania	Właściwości powłok HRC, HV, wytrzymałość kohezyjna i adhezyjna	Zastosowanie
FMI-2	Cr6Al8B3	HRC = 40 HV = 650 Wytrzymałość: - kohezyjna = 130 MPa - adhezyjna = 40 MPa	Renowacje sztyk średnio obciążonych wałów korbowych, rozrządu, ochrona przed zużyciem abrazyjnym sprzętu poligraficznego
FMI -5	50Cr6Al3Mn2Mo2C2	HV = 350 Wytrzymałość: - kohezyjna = 180 MPa - adhezyjna = 40 MPa	Renowacja części łożysk
FMI -6	Cr6Al6B3Ni4	HRC = 40 HV = 1000 Wytrzymałość: - kohezyjna = 60 MPa - adhezyjna = 45 MPa	Ochrona przed zużyciem ściernym-gazowym i korozją gazową w wysokiej temperaturze (700°C)
FMI -7	70Cr6Al6B3W4	HRC = 40 HV = 1150 Wytrzymałość: - kohezyjna = 120 MPa - adhezyjna = 45 MPa	Ochrona przed zużyciem ściernym-gazowym i korozją gazową w wysokiej temperaturze (600°C)
FMI -8	50Cr6Al2Mn2Ti2Mo2	HV = 500 Wytrzymałość: - kohezyjna = 180 MPa - adhezyjna = 40 MPa	Renowacje sztyk, średnio obciążonych wałów korbowych i rozrządu

ilością aluminium były wykorzystywane w energetyce przy renowacji miejsc osadzenia wałów wirników silników elektrycznych, bębnow hamulcowych samochodów ciężarowych itp. (rys. 2).

Dla powłok stosowanych do części działających w warunkach ścierania przedstawia się następujące wymagania: wysoka twardość, niski poziom naprężeń 1. rodzaju i wysoka odporność na ścieranie.



**Rys. 2.** Renowacja wału wirnika silnika elektrycznego (a) oraz bębna hamulcowego samochodu ciężarowego (b)  
**Fig. 2.** Restoration of the motor shaft of the motor rotor (a) and the transport of the brake drum (b)

Okazuje się, że przy zwiększeniu twardości powłok do 700÷800 HV ich odporność na ścieranie wzrasta, a przy twardości większej niż 800 HV – zmniejsza się, co jest związane z tworzeniem i występowaniem mikropęknięć w powłoce. Zużycie powłoki odbywa się względem istniejących pęknięć, głównie na granicach ziarn z późniejszym rozszczepieniem się i naruszeniem spójności. Stwierdzono, że odporność powłoki na zużycie przy badaniach ścierniwej zapewnia twardsze ziarna i twarde tlenki glinu na granicach pomiędzy ziarnami. W związku z tym w tym przypadku powinna być utworzona powłoka, z jednej strony, z wysoką mikroheterogennością, co zapewnia niski poziom naprężeń rozciągających, a z drugiej, z małą grubością warstwy (powłok o wysokiej dyspersji), aby zwiększyć zawartość tlenków w granicach międzyziarnowych.

W badaniach ścierniwej występują odcinki powłok o niskich właściwościach, gdzie obserwowane są ziarna o najniższej twardości i granicy międzyziarnowej. W tym przypadku trzeba wytworzyć powłokę o niskiej i mikroheterogenności i maksymalnej grubości ziarna w celu zminimalizowania liczby granic międzyziarnowych. Powłoki systemu Fe-Cr-B-Al marek PMI są szeroko stosowane do ochrony przed ścieraniem w przemyśle drukarskim (rys. 3).

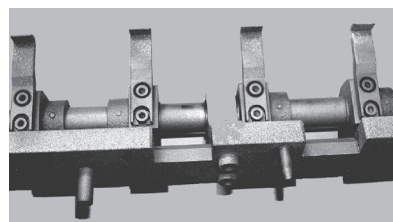
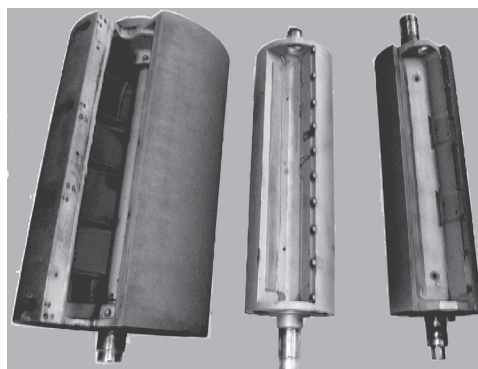
## Powłoki dla elementów pracujących w warunkach granicznego tarcia

Twardość tych powłok musi być nie niższa niż 600 HV. Ich obróbka mechaniczna odbywa się przez szlifowanie do wymaganego wymiaru. W strukturze powłoki często mają miejsce mikropęknięcia, które mogą doprowadzić do zniszczenia powłoki podczas eksploatacji. W celu zapewnienia wymaganych cech do proszku dla powłoki są wprowadzone chrom, węgiel, bor i aluminium w takich ilościach, aby fazą matrycową powłoki był martenzyt. Taka struktura zapewnia minimalny poziom naprężeń rozciągających w powłoce, nie więcej niż 50 MPa.

Przy względnych obciążeniach większych niż 14 MPa w parze tarcia powłoka-przeciwpróbka następuje się katastrofalne zużycie przeciwpróbki. Analiza metalograficzna i rentgenowska umożliwiła ustalenie, że jest to skutkiem obecności pęknięć na powierzchni powłok. Wówczas następuje otwarcie brzegów – powstają karby, które działają jak noże. Odległości pomiędzy pęknięciami wynoszą do 0,3  $\mu$ m i utworzone są z tlenków aluminium i węglików. Ustalono, że pęknięcia z węglików na powierzchni szlifowanej powłok są tworzone przez częściowe rozpuszczenie dużych węglików ze stopionego drutu rdzeniowego.

Aby wyeliminować intensywne zużycie przeciwpróbki w parze tarcia z powłoką, zaproponowano metody optymalizacji powłok, które sprowadzają się do następujących czynności:

1. Zapewnienia warunków zabezpieczających rozpuszczenie węglików w stopie drutu rdzeniowego za pomocą wykorzystania mniejszego rozmiaru węglików w mieszaninie DP lub stosowania większego napięcia łuku przy natryskiwaniu (34÷38 V);
2. Zmniejszenia zawartości powietrza w proszku DP przez jego zgniecenie i dodanie proszku zawierającego



**Rys. 3.** Regenerowane części maszyn drukarskich  
**Fig. 3.** Refurbished parts of printing machines

związek tytanu, który powoduje zajście reakcji w fazie gazowej z tlenem w stopionej strefie, tworząc małe tlenki tytanu, które są o 1÷2 rzędy mniejsze od cząstek  $Al_2O_3$ .

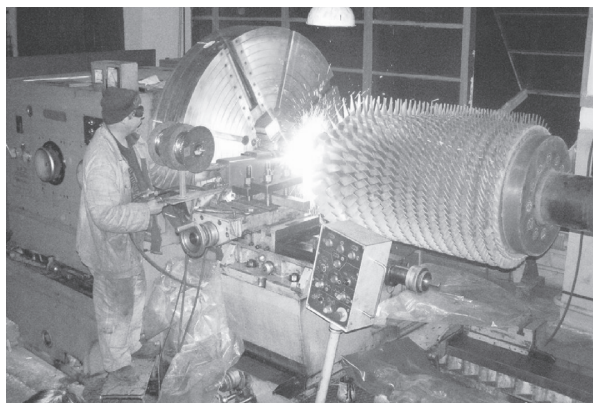
Na wypolerowanej powierzchni powłoki uzyskanej z DP nie znaleziono mikropęknięć, a i chropowatość jej polerowanej powierzchni jest zasadniczo mniejsza. Ponadto, tytan i magnez w składzie drutu rdzeniowego powodują wchłanianie 2÷3% mas. azotu z powietrza, zawartego w porach proszku, dzięki czemu w powłoce tworzone są cząstki azotków tytanu o wymiarach 200÷500 nm.

Dzięki strukturze nierównowagowej i składowi fazowemu powłok przy tarcia mogą być realizowane warunki sprzyjające samoorganizacji warstwy powierzchniowej.

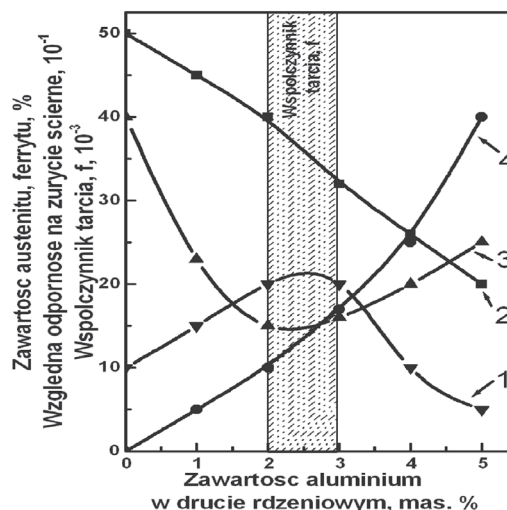
Metodami niskokątowych badań rentgenowskich stwierdzono, że warunki optymalne dla samoorganizacji powierzchni tworzą się w powłoce trójfazowej z fazą matrycową, składającą się z martenzytu (~ 50%), austenitu (~ 30%) i ferrytu (~ 20%). Przy wysokich obciążeniach tarcia z austenitu wydzielają się węgliki  $(Fe, Cr)_{23}C_6$ , a część jest przekształcona w martenzyt odpuszczony przy pochłanianiu ciepła.

W ferrycie wydzieliły się nanocząsteczki grafitu (10÷20 nm). Przy tarcia węgiel dyfunduje na powierzchnie tarcia i tworzy ciągłe warstwy grafitu. Optymalna zawartość ferrytu w strukturze powłoki wynosi 10÷20% mas. Minimalny współczynnik tarcia i zużycia pary ciernej przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Taka zawartość ferrytu w powłoce jest zapewniona dzięki obecności w nich 2÷3% mas. aluminium.

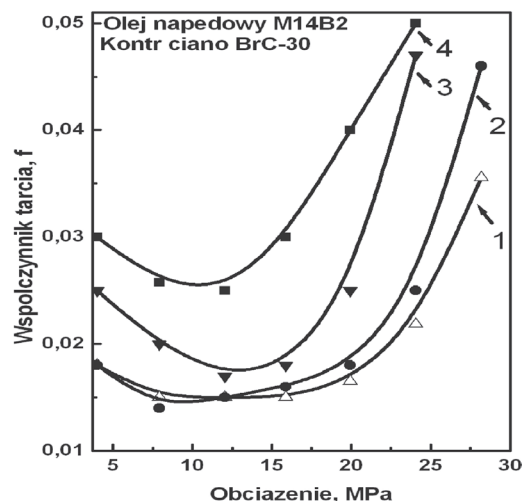
DP serii FMI zostały wykorzystane do renowacji powlekanem natryskowym szyjki wału turbiny i sprężarki wałów pomp gazowych w przedsiębiorstwach naprawczych Ukrgazenergosservis, a także prętów siłowników hydraulicznych urządzeń górniczych (rys. 6).



**Rys. 6.** Powlekanie natryskowe szyjki wału turbiny  
**Fig. 6.** Spray coating on the turbine shaft bearing neck



**Rys. 4.** Wpływ zawartości aluminium w DP 50Ni6Ti2Mo2Al2 na właściwości trybologiczne powłok ze strukturą trójfazową w warunkach smarowania granicznego przy względnym obciążeniu  $P = 7$  MPa: 1 – austenit, 2 – ferryt, 3 – współczynnik tarcia, 4 – względna twardość.  
**Fig. 4.** Effect of aluminum content in PD50Ni6Ti2Mo2Al2 the tribological properties of the coating design phase boundary lubrication conditions in a particular load  $P = 7$  MPa: 1 – austenite, 2 – ferrite, 3 – coefficient of friction, 4 – relative hardness.



**Rys. 5.** Zmiana współczynnika tarcia M14B2 w oleju napędowym w zależności od określonego obciążenia dla węzłów tarcia powłoki z DP – brąz (BrC-30): 1 – 50Cr6AlTi2; 2 – 50Cr6AlTi2+Cr6Al6B3; 3 – stal SzKh 15, HRC 62; 4 – Cr6Al6B3  
**Fig. 5.** The coefficient of friction M14B2 in oil, depending on the specified load to the friction parts with the CW – bronze (BrC-30): 1 – 50Cr6AlTi2; 2 – 50Cr6AlTi2+Cr6Al6B3; 3 – steel SzKh 15, HRC 62; 4 – Cr6Al6B3

## Wnioski

Pokazano, że opracowanie i zastosowanie specjalnych drutów rdzeniowych (DR) jako materiałów elektrodowych poszerzyło zastosowanie elektrometalizacji. W wielu przypadkach pozwoliło to na uzyskanie powłok o właściwościach na poziomie

najlepszych powłok natryskiwanych innymi metodami natryskiwania cieplnego, na przykład metodą plazmową albo naddźwiękową, z zachowaniem przy tym znacznej przewagi ekonomicznej.

## Literatura

- [1] Borysov Y.S., V.N. Korzhik. Amorficzne powłoki gazo termiczne: teoria i praktyka. Spawanie automatyczne. 1995. N 4. s.3÷12.
- [2] Borisowa A.L., I.V. Myts, T. Kaida. Struktura i własności powłok elektro lukowych na osnowie borku żelaza otrzymanych z drutów proszkowych. - Spawanie automatyczne. 1991. N 9. s. 66÷68.
- [3] Borysov Y.S., I.A. Koziakov, V.N. Korzhik. Struktura i właściwości gazo termicznych powł, otrzymanych przy użyciu drutów proszkowych systemów Fe-Cr-B, Fe-Cr-B-C. - Spawanie automatyczne. 1996. N 5. S. 21 - 24.
- [4] Borisov Y.S., A.L. Borisova, I.A. Koziakov. Wpływ warunków natryskiwania na struktury powłok, otrzymanych z drutu proszkowego „Amotek 101”. Spawanie automatyczne. 1996. N 1. S. 21 - 30.
- [5] Royanov V.A. Podstawy teoretyczne tworzenia i wdrożenia przemysłowego ekonomicznie stopowanych drutów proszkowych dla natryskiwania elektro lukowego powłok, odpornych na ścieranie z polepszonymi właściwościami eksploatacyjnymi. - Praca habilitacyjna doktora nauk technicznych. Mińsk, 1990. 36 str.
- [6] Pokhmurskii V.I., M.M.Student, V.M. Dovhunyuk, G.V. Pokhmurska, I.I. Sydorak. Powłoki elektro lukowe dla renowacji i ochrony. Lwow: Fizyko-Mechaniczny Instytut imienia G.W.Karpienki Państwowej Akademii Nauk we Lwowie, 2005. - 190 str.
- [7] Pokhmurskii V.I., M.M. Student, V.M. Dovhunyuk, I.I. Sydorak Zastosowanie metalizacji elektro lukowej drutami proszkowymi systemu Fe-Cr-Al-C dla renowacji detali maszyn. Maszynoznawstwo. 1999. N 1. S. 13-18.
- [8] Student M. M., V. M. Dovhunyuk, I. I. Sydorak, H. V. Pokhmurska. Effect of Friction on Phase Transitions in the Surface Layers of FeCrB + Al Gas-Thermal Coatings.- Materials Science (Springer). 2000. No 4.- P.607-611.
- [9] Dovhunyuk V. M., M. M. Student, I. I. Sydorak, H. V. Pokhmurska Effect of Friction on the Structural and Phase Transformations in the Subsurface Layer of a FeCr+Al+C Gas-Thermal Coating.- Materials Science (Springer). 2000. No 5. s.770÷775.
- [10] Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr based powder wires, A. Pokhmurska, M. Student, E. Bielanska, E.Beltowska, V. Dovhunyuk, Surface & Coating Technology. 2002. V. 151-152. s. 490÷494.
- [11] Triboelektrochemiczne właściwości powlekanie natryskiwanymi lukowo na stopy aluminium, V. Pokhmurskii, V. Dovhunyuk, M. Student, H. Pokhmurska, V. Vynar, I. Sydorak, Inżynieria Powierzchni 2008. № 1. s.9÷13.
- [12] Student M., Yu. Dzioba, V. Hvozdet'skyi, H. Pokhmurska, B. Wielage. High-temperature corrosion of electric-arc coatings sprayed from powder core wires based on the Fe-Cr-B-Al system.- Materials Science (Springer). 2008. No 5. s.693÷699.
- [13] Pat. N 40722 Ukraina, IPC (2009) S23S 4/00, B22F 7/00, B32B 15/00. Druty rdzeniowe do otrzymywania powłok dyspersyjnie wzmocnionych / V.I.Pohmurskyy, M.M.Student, Yu.V.Dzoba, I.Y.Sydorak; FMI Narodowej Akademii Nauk Ukrainy. - U2008 12843; PDI. 11.03.2008, wyd. 27.04.2009, Bull. Numer 8.
- [14] Pat. N 40723 Ukraina, IPC (2009) S23S 4/00, B22F 7/00, B32B 15/00. Druty rdzeniowe do otrzymania powłok, M.M.Student, H.V.Pohmurska Ya.Ya.Sirak, V.M.Hvozdet'skyi. FMI Narodowej Akademii Nauk Ukrainy. U2008 12844; PDI. 11.03.2008, wyd. 27.04.2009, Bull. Numer 8.
- [14] Pat. N 47456 Ukraina, IPC (2009) S23S 6/00. Druty rdzeniowe do elektro lukowego natryskiwania w wysokiej temperaturze dyspersyjne wzmocnione, V.I.Pohmurskyy, M.S.Romaniv, M.M.Student, H.V.Pohmurska, T.M.Harandiyuk, Ya.V.Serivka; FMI Narodowej Akademii Nauk Ukrainy, Bursztyn TPD. - U2009 05524; aPDI. 06.01.2009, wyd. 10.02.2010, Bull. Numer 3.
- [15] Pat. N19967 Ukraina, IPC (2006) S23S 4/00. Sposób wytwarzania powłok kompozytowych, S.I.Markovych, V.I.Pohmurskyy, O.Y.Mazheyko, M.M.Student; FMI Narodowej Akademii Nauk Ukrainy, Kirovograd Narodowy Uniwersytet Techniczny. - U2006 05358; PDI. 16/05/2006, wyd. 15.01.2007, Bull. Numer 1.
- [16] Pat. № 20013 Ukraina, IPC (2006) S23S 4/04, S23S 4/12. Druty rdzeniowe do ochrony od gorącego gazu dla otrzymania powłok kompozytowych, V.I.Pohmurskyy, H.V.Pohmurska, M.M.Student, Yu.V.Dzoba, Ya.Ya.Sirak/ FMI Narodowej Akademii Nauk Ukrainy. U2006 06217; PDI. 06.05.2007, wyd. 15.01.2007, Bull. Numer 1.
- [17] Pat. № 40721 U Ukraina, IPC (2009) S23S 4/00, B22F 7/00, B32B 15/00. Druty rdzeniowe do elektro lukowego natryskiwania, V.I.Pohmurskyy, M.M.Student, Yu.V.Dzoba, I.Y.Sydorak; FMI Narodowej Akademii Nauk Ukrainy. - U2008 12842; PDI. 11.03.2008, wyd. 27.04.2009, Bull. Numer 8.