

## АНОТАЦІЯ

*Іванов О.О.* Особливості структуроутворення та властивості електродугових покриттів із порошкових дротів на основі системи Fe-Ti-V-C. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство» (13 – «Механічна інженерія»). – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2021.

**Об'єкт дослідження.** Процес отримання зносостійких покриттів на основі системи Fe-Ti-V-C, шляхом наплавлення порошковими електродами.

**Предмет дослідження.** Особливості та закономірності формування структури та властивостей зносостійких покриттів на основі системи Fe-Ti-V-C методом наплавлення порошковими електродами та їх фізико-механічні характеристики.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-дослідницької та науково-практичної задачі, яка полягає у моделюванні та дослідженні особливостей структуроутворення зносостійких покриттів на основі системи Fe-Ti-V-C з додаванням Mo, з використанням чистих порошків металів, та отриманні на основі цієї системи матеріалу з підвищеною стійкістю в умовах абразивної дії.

Проведено аналіз наукової літератури, щодо систем, що застосовуються як основа для електродів, призначених для відновлення та підвищення зносостійкості деталей обладнання, що працює в умовах інтенсивної абразивної дії. Розглянуто сучасний ринок електродів виробників різних країн, що пропонують електроди для відновлення такого обладнання. Встановлено, що більшість науковців та виробників спрямовують дослідження та розробку зносостійких матеріалів на основі системи Fe-Cr-C, яка характеризується високою твердістю, проте така твердість забезпечується за рахунок крихкості структури, яка складається з крупних карбідів хрому та крихкої евтектики. Додатки бору та металів Mo, Ti, V, W, Nb, Ta, в основному, направлені на

формування більш рівноважної структури та підвищення фізико-механічних властивостей структурних складових, при чому, процеси формування структури залишаються незмінними, що залишає актуальним питання пошуку альтернативної системи як основи для виготовлення зносостійких матеріалів.

Розглянуто перспективи дослідження системи Fe-Ti-B-C та її застосування, як основу, для розробки зносостійкого матеріалу з високими показниками фізико-механічних властивостей та стійкістю в умовах підвищеного навантаження. Також встановлено, що застосування вказаної системи доцільне тільки при використанні Ti у вигляді чистого порошку металу, на відміну від поширеного його (та інших карбідоутворюючих та боридоутворюючих металів IV-VI групи періодичної системи хімічних елементів) застосування науковцями та виробниками електродів у вигляді феросплавів. Використання чистих порошоків металів в реакційній суміші Me + B<sub>4</sub>C забезпечує здійснення так званої *in-situ* реакції під час отримання покриття, що є принципово іншим механізмом структуроутворення ніж переплавлення під час застосування феросплавів. Встановлено що фізико-механічні та експлуатаційні властивості таких матеріалів є вищими ніж у матеріалів, отриманих з феросплавів.

Проведено порівняльний аналіз методів отримання зносостійкого покриття, з позицій простоти виконання методу, економічної доцільності, продуктивності, чистоти/якості отриманого покриття. Серед розглянутих поширених та деяких спеціальних методів отримання зносостійкого покриття, як найбільш універсальним, продуктивним, доцільним з позиції досліджень та таким, що забезпечує високу якість покриття, обрано електродугове наплавлення порошоківими електродами, також відоме як FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*).

Розроблено дослідні електроди з реакційною сумішшю Me + B<sub>4</sub>C, де Me суміш чистих порошоків металів (Ti + Mo) 30 %, ат., при концентраціях молібдену (в суміші Ti + Mo): 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 100 %, ат. Проведено дослідження мікроструктури та фазового

складу матеріалів методами скануючої електронної мікроскопії (SEM) та рентгенофазового аналізу, дослідження фізико-механічних властивостей, технологічних параметрів, лабораторні дослідження матеріалів при різних умовах абразивної та ударно-абразивної дії.

Виконано термодинамічне моделювання матеріалів системи Fe-Ti-Mo-B-C та розроблено термодинамічну базу даних даної системи. Моделювання проводилось із застосуванням даних наукової періодики та використанні параметрів, визначених шляхом *ab initio* моделювання, проведеного в межах досліджень даної дисертаційної роботи.

На основі змодельованих даних та їх інтерпретації з експериментальними даними, визначення фізико-механічних властивостей, результатів проведених експериментів визначено дослідний матеріал з найвищими комплексними показниками. На основі даної системи розроблено партію електродів, призначену для відновлення та підвищення зносостійкості обладнання, що працює в умовах змішаної абразивної дії з метою апробації дослідного матеріалу в реальних умовах роботи.

Проведено промислову апробацію розроблених електродів, яка підтвердила результати лабораторних випробувань та техніко-економічну доцільність застосування розроблених порошкових електродів на основі системи Fe-Ti-B-C з додаванням Mo для відновлення та підвищення зносостійкості деталей, що працюють в умовах інтенсивної абразивної дії та високих питомих і циклічних навантажень.

Встановлено, що зносостійкість робочих поверхонь ножів для зняття кори з деревини та секцій шнеків пресу для виробництва будівельної конструкційної кераміки наплавлена розробленими електродами підвищує довговічність у 2,8 та 1,9-2,0 рази, порівняно із деталями, відновленими серійними електродами.

**Ключові слова:** поверхневе зміцнення, структура, мікротвердість, тривала експлуатація, деградація, фізико-механічні характеристики матеріалу, технологія, наплавлення порошковими електродами, зносостійке покриття,

абразивна стійкість, оптично-цифровий контроль, титанові сплави, процес плавлення електрода, тверді сплави, *in-situ*, CALPHAD, карбіди, бориди, формування структури, молибденові сплави, *ab initio*, фазовий склад, довговічність, дрібнодисперсні порошки

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

#### **У виданнях, що внесені до переліку наукометричної бази SCOPUS**

1. Ivanov O., Prysyzhnyuk P., Lutsak D., Matviienkiv O., Aulin V., Improvement of Abrasion Resistance of Production Equipment Wear Parts by Hardfacing with Flux-Cored Wires Containing Boron Carbide/Metal Powder Reaction Mixtures, Management Systems in Production Engineering, 2020, Volume 28, Issue 3, pp. 178-183. DOI 10.2478/mspe-2020-0026

2. Shihab T., Prysyzhnyuk P., Semyanyk I., Andrusyshyn R., Ivanov O., Troshchuk L., Thermodynamic Approach to the Development and Selection of Hardfacing Materials in Energy Industry, Management Systems in Production Engineering, 2020, Volume 28, Issue 2, pp. 84-89. DOI 10.2478/mspe-2020-0013

3. Prysyzhnyuk P., Shlapak L., Ivanov O., Korniy S., Lutsak L., Burda M., Hnatenko I., Yurkiv V., In Situ Formation of Molybdenum Borides at Hardfacing by Arc Welding with Flux-Cored Wires Containing a Reaction Mixture of B<sub>4</sub>C/Mo, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, 4/12 (106), pp. 46-51. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.206568

4. Shihab T., Prysyzhnyuk P., Andrusyshyn R., Lutsak L., Ivanov O., Tsap I., Forming the Structure and the Properties of Electric Arc Coatings Based on High Manganese Steel Alloyed with Titanium and Niobium Carbides, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, 1/12 (103), pp. 38-44. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.194164

### **У міжнародних виданнях, що внесені до наукометричних баз**

5. Prysyzhnyuk P., Ivanov O., Lutsak D., Lutsak L., Wear Resistance Improvement of Equipment for Production of Building Ceramics by Hardfacing with Flux-Coerd Electrodes based on Fe-Ti-B-C System, MAPE, 2020, Volume 3, Issue 1, pp. 263-273. doi:10.2478/mape-2020-0023

### **У фахових виданнях**

6. Іванов О., Присяжнюк П., Луцак Д., Бурда М., Луцак Л., Відновлення Робочих Органів Обладнання для Зняття Кори з Деревини, Проблеми трибології (Problems of Tribology), 2018, № 1, с. 99-105.

7. Ivanov O., Prysyzhnyuk P., Lutsak D., Burda M., Lutsak L., Increasing the durability of working elements of equipment for abrasive-containing masses processing, Problems of Tribology, 2019, 24 (3/93), pp. 14-21. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-14-21>

8. Іванов О., Присяжнюк П., Особливості Формування Структури та Властивостей Поверхневих Шарів Наплавлених Порошковими Дротоми Системи Fe-Ti-B-C, Вісник ХНАДУ, 2020, вип. 91, с. 111-115. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.91.0.111

9. Іванов О., Дослідження структури та властивостей зносостійких покриттів отриманих методом наплавлення порошковими електродами на основі системи Fe-Ti-B-C, Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 2020, вип. 3(34), с. 81-87. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).81-87](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).81-87)

### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

10. Іванов О., Луцак Д., Присяжнюк П., Луцак Л., Зміцнення корпусної частини породоруйнівного інструменту електродуговим наплавленням зносостійкого покриття / 1-ша Міжнародна науково-практична конференція «Підвищення надійності машин і обладнання»: матеріали конференції, м. Кропивницький, 17-19 квітня 2019 року, с. 17-18.

11. Іванов А., Присяжнюк П., Луцак Д., Луцак Л., Сенютович А., Формирование структуры и свойств износостойкого электродугового

покрытия системы Fe-Ti-B-C-Cr / 18-я Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий» 04-08 июня 2018 г., г. Свалява: материалы конференции, Киев, 2018, с. 70-72.

12. Иванов А., Присяжнюк П., Луцак Д., Повышение абразивной износостойкости деталей производственного оборудования наплавлением порошковыми электродами на основе боридов/карбидов металлов / 20-я Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий» 01-05 июня 2020 г., г. Киев: материалы конференции, Киев, 2020, с. 31-34.

13. Иванов О., Грунт О., Присяжнюк П., Особливості електродугового наплавлення калібруючих поверхонь шарошкових доліт порошковими електродами / XII науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Підвищення надійності машин і обладнання» 18-20 квітня 2018 року, м. Кропивницький: збірник тез доповідей, Кропивницький, 2018, с. 54-55.

14. Иванов О., Андрусин Р., Зміцнення бурових доліт наплавленням зносостійкого матеріалу / III Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження» 3-5 квітня 2019 р., Івано-Франківськ: Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції, с. 58.

15. Shihab T., Shlapak L., Prysyzhnyuk P., Ivanov O., Burda M., Increasing of durability of mechanical seals of oil and gas centrifugal pumps using tungsten-free metal-ceramic composites / XVI International Scientific and Engineering Conference “HERVICON + PUMPS” Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, September 8-11, 2020, SumSU, Sumy, Ukraine.

16. Иванов О., Присяжнюк П., Цап І., Зміцнення калібруючих поверхонь бурових доліт електродуговим наплавленням зносостійкого матеріалу / II-га Міжнародна науково-технічна конференція «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу» 24-27 квітня 2018 року, м. Івано-Франківськ: матеріали конференції, с. 226-229.

17. Ivanov O., Formation Features of Titanium Borides and Titanium Carbides at Hardfacing by Flux-Cored Arc Welding Containing a Reaction Mixture of B<sub>4</sub>C/Ti / I International Scientific and Practical Conference «Topical Aspects of Modern Science and Practice» September 21-24, 2020, Frankfurt am Main, Germany, pp. 354-356. DOI - 10.46299/ISG.2020.II.I

## ABSTRACT

*Ivanov O.* Features of structure formation and properties of electric arc coatings from powder wires on the basis of Fe-Ti-B-C system. – Qualified scientific work as a manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 132 – «Material Science» (13 – «Mechanical Engineering»). – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2021.

**The object of the study.** The process of obtaining wear-resistant hardfacing coatings based of the Fe-Ti-B-C system, by surfacing with powder electrodes.

**The subject of the study.** Features and regularities of formation of structure and properties of wear-resistant hardfacing coatings on the basis of Fe Fe-Ti-B-C system obtained by surfacing with powder electrode and their physical and mechanical characteristics.

The dissertation thesis devoted to solving an urgent scientific-research and practical-scientific problem, which consists in modeling and research of structure features formation of wear-resistant hardfacing coatings on the basis of Fe-Ti-B-C system with Mo addition, with the use of pure metals powders, and receiving the material on the basis of such system with increased durability in the conditions of long-term operation abrasive action.

The scientific literature analysis concerning the systems used as a basis for the electrodes intended for restoration and increasing of wear resistance of details of the equipment working in the conditions of the increased abrasive action is carried out. The modern market of electrodes of manufacturers of different countries offering electrodes for restoration of such equipment is considered. It has been found that most scientists and manufacturers direct research and development of wear-resistant materials based on Fe-Cr-C systems, which is characterized by high hardness, but such hardness is provided by the fragility of the structure, which consists of large chromium carbides and brittle eutectic. Additives of boron and metals Mo, Ti, V, W, Nb, Ta are mainly aimed at forming a more equilibrium structure and improving the physical and mechanical properties of structural components, while the processes



of structure formation remain unchanged, which leaves the question of finding an alternative system bases for the manufacture of wear-resistant materials.

Prospects of research of Fe-Ti-B-C system, and its application as a basis for development of wear-resistant material with high indicators of physical and mechanical properties and stability in the conditions of the increased loading are considered. It was also found that the use of this system is appropriate only when using Ti as a pure metal powder, in contrast to its common (and other carbide-forming and boride-forming metals of group IV-VI of the periodic table of chemical elements) by scientists and manufacturers of electrodes in the form of ferro powders. The use of pure metal powders in the reaction mixture  $Me + B_4C$  provides the implementation of the so-called *in-situ* technology during the production of the coating, which is a fundamentally different mechanism of structure formation than remelting during the use of ferro powders. It is established that the physical-mechanical and operational properties of such materials are higher than those obtained from ferropowders.

A comparative analysis of methods of obtaining a wear-resistant coating, from the standpoint of simplicity of the method, economic feasibility, productivity, purity / quality of the obtained coating. Among the considered common and some special methods of obtaining a wear-resistant coating, as the most versatile, productive, feasible from the point of view of research and providing high quality coating, chosen electric arc surfacing with powder electrodes, also known as FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*).

Experimental electrodes with a reaction mixture of  $Me + B_4C$  were developed, where Me is a mixture of pure metal powders (Ti + Mo) 30%, at., At concentrations of molybdenum (in a mixture of Ti + Mo): 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 100 %, at. The study of the microstructure and phase composition of materials by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray phase analysis, study of physical and mechanical properties, technological parameters, laboratory studies of materials under different conditions of abrasive and shock-abrasive action.

Thermodynamic modeling of materials of the Fe-Ti-Mo-B-C system is performed and the thermodynamic database of this system is developed. The modeling was performed using the data of scientific periodicals and using the parameters determined by *ab initio* modeling, conducted within the research of this dissertation.

On the basis of the modeled data and their interpretation with experimental data, definition of physical and mechanical properties, results of the carried-out experiments the research material with the highest complex indicators is defined. Based on this system, a batch of electrodes was developed to restore and increase the wear resistance of equipment operating in conditions of mixed abrasive action in order to test the test material in real operating conditions.

Industrial testing of the developed electrodes was carried out and confirmed the results of laboratory tests and technical and economic feasibility of using the developed powder electrodes based on Fe-Ti-B-C system with the addition of Mo for restoring and increasing of wear resistance of parts in the working conditions of intense abrasive wear and high specific and cyclic loads.

It is established that the wear resistance of the working surfaces of knives for removing bark from wood and sections of press augers for the production of building ceramics deposited with developed electrodes increases the durability by 2,8 and 1,9-2,0 times, compared with parts restored with serial electrodes.

**Keywords:** surface hardening, structure, microhardness, long-term operation, degradation, physicomachanical characteristics of material, technology, flux-cored arc welding, hardfacing coating, abrasion wear resistance, optical and digital control, titanium alloys, electrode melting process, hard alloys, *in-situ*, CALPHAD, carbides, borides, structure formation, molybdenum alloys, *ab initio*, phase composition, durability, fine-sized powders

## **LIST OF PUBLICATIONS ON THE SUBJECT OF THE DISSERTATION**

**Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are  
published**

**In the publications included in the list of the SCOPUS scientometric database**

1. Ivanov O., Prysyzhnyuk P., Lutsak D., Matviienkiv O., Aulin V., Improvement of Abrasion Resistance of Production Equipment Wear Parts by Hardfacing with Flux-Cored Wires Containing Boron Carbide/Metal Powder Reaction Mixtures, Management Systems in Production Engineering, 2020, Volume 28, Issue 3, pp. 178-183. DOI 10.2478/mspe-2020-0026

2. Shihab T., Prysyzhnyuk P., Semyanyk I., Andrusyshyn R., Ivanov O., Troshchuk L., Thermodynamic Approach to the Development and Selection of Hardfacing Materials in Energy Industry, Management Systems in Production Engineering, 2020, Volume 28, Issue 2, pp. 84-89. DOI 10.2478/mspe-2020-0013

3. Prysyzhnyuk P., Shlapak L., Ivanov O., Korniy S., Lutsak L., Burda M., Hnatenko I., Yurkiv V., In Situ Formation of Molybdenum Borides at Hardfacing by Arc Welding with Flux-Cored Wires Containing a Reaction Mixture of B<sub>4</sub>C/Mo, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, 4/12 (106), pp. 46-51. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.206568

4. Shihab T., Prysyzhnyuk P., Andrusyshyn R., Lutsak L., Ivanov O., Tsap I., Forming the Structure and the Properties of Electric Arc Coatings Based on High Manganese Steel Alloyed with Titanium and Niobium Carbides, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, 1/12 (103), pp. 38-44. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.194164

**In international publications included in scientometric databases**

5. Prysyzhnyuk P., Ivanov O., Lutsak D., Lutsak L., Wear Resistance Improvement of Equipment for Production of Building Ceramics by Hardfacing with Flux-Coerd Electrodes based on Fe-Ti-B-C System, MAPE, 2020, Volume 3, Issue 1, pp. 263-273. doi:10.2478/mape-2020-0023

### **In scientific professional publications of Ukraine**

6. Ivanov O., Prysyzhnyuk P., Lutsak D., Burda M., Lutsak L., Vidnovlennia Robochykh Orhaniv Obladnannia dlia Zniattia Kory z Derevyiny, Problemy trybolohii (Problems of Tribology), 2018, № 1, s. 99-105.

7. Ivanov O., Prysyzhnyuk P., Lutsak D., Burda M., Lutsak L., Increasing the durability of working elements of equipment for abrasive-containing masses processing, Problems of Tribology, 2019, 24 (3/93), pp. 14-21. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-14-21>

8. Ivanov O., Prysyzhnyuk P., Osoblyvosti Formuvannia Struktury ta Vlastyvostei Poverkhnevyykh Shariv Naplavlennykh Poroshkovyymi Drotamy Systemy Fe-Ti-B-C, Visnyk KhNADU, 2020, vyp. 91, s. 111-115. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.91.0.111

9. Ivanov O., Doslidzhennia struktury ta vlastyvostei znosostiikykh pokryttiv otrymanykh metodom naplavlennia poroshkovyymi elektrodami na osnovi systemy Fe-Ti-B-C, Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky, 2020, vyp. 3(34), s. 81-87. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).81-87](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).81-87)

### **Published works of approbatory character**

10. Ivanov O., Lutsak D., Prysyzhnyuk P., Lutsak L., Zmitsnennia korpusnoi chastyny porodoruinivnoho instrumentu elektroduhovym naplavlenniam znosostiikoho pokryttia / 1-sha Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia»: materialy konferentsii, m. Kropyvnytskyi, 17-19 kvitnia 2019 roku, s. 17-18.

11. Ivanov A., Prysyzhnyuk P., Lucak D., Lucak L., Senyutovich A., Formirovanie struktury i svojstv iznosostojkogo elektrodugovogo pokrytiya systemy Fe-Ti-B-C-Cr / 18-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Inzheneriya poverhnosti i renovaciya izdelij» 04-08 iyunya 2018 g., g. Svalyava: materialy konferencii, Kiev, 2018, s. 70-72.

12. Ivanov A., Prysyzhnyuk P., Lucak D., Povyshenie abrazivnoj iznosostojkosti detalej proizvodstvennogo oborudovaniya naplavlenniem poroshkovyymi elektrodami na osnove boridov/karbidov metallov / 20-ya

Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Inzheneriya poverhnosti i renovaciya izdelij» 01-05 iyunya 2020 g., g. Kiev: materialy konferencii, Kiev, 2020, s. 31-34.

13. Ivanov O., Hrunty O., Prysyzhnyuk P., Osoblyvosti elektroduhovoho naplavlennia kalibriuichykh poverkhon sharoshkovykh dolit poroshkovyvy elektrodamy / XII naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh «Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia» 18-20 kvitnia 2018 roku, m. Kropyvnytskyi: zbirnyk tez dopovidei, Kropyvnytskyi, 2018, s. 54-55.

14. Ivanov O., Andrusyshyn R., Zmitsnennia burovykh dolit naplavlenniam znosostiikoho materialu / III Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Prykladni naukovo-tekhichni doslidzhennia» 3-5 kvitnia 2019 r., Ivano-Frankivsk: Materialy III mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, s. 58.

15. Shihab T., Shlapak L., Prysyzhnyuk P., Ivanov O., Burda M., Increasing of durability of mechanical seals of oil and gas centrifugal pumps using tungsten-free metal-ceramic composites / XVI International Scientific and Engineering Conference “HERVICON + PUMPS” Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, September 8-11, 2020, SumSU, Sumy, Ukraine.

16. Ivanov O., Prysyzhnyuk P., Tsap I., Zmitsnennia kalibriuichykh poverkhon burovykh dolit elektroduhovym naplavlenniam znosostiikoho materialu / II-ha Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Mashyny, obladnannia i materialy dlia naroshchuvannia vitchyznianoho vydobutku nafty i hazu» 24-27 kvitnia 2018 roku, m. Ivano-Frankivsk: materialy konferentsii, s. 226-229.

17. Ivanov O., Formation Features of Titanium Borides and Titanium Carbides at Hardfacing by Flux-Cored Arc Welding Containing a Reaction Mixture of  $B_4C/Ti$  / I International Scientific and Practical Conference «Topical Aspects of Modern Science and Practice» September 21-24, 2020, Frankfurt am Main, Germany, pp. 354-356. DOI - 10.46299/ISG.2020.II.I