

А. П. Мурашов<sup>1</sup>  
 Н. В. Вігілянська<sup>1</sup>  
 О. П. Грищенко<sup>1</sup>  
 А. О. Ющенко<sup>1</sup>  
 В. Ф. Горбань<sup>2</sup>

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ІНТЕРМЕТАЛІДУ Fe-Al

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Е. О. Патона НАН України, Київ;

<sup>2</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

*Наведено дослідження механічних характеристик та абразивної стійкості плазмових покриттів на основі інтерметаліду Fe-Al. Покриття отримували методом плазмового напилення з використанням порошків на основі алюмініду заліза систем Fe<sub>3</sub>Al, Fe-AlMg та Fe-TiAl, отриманих методом механохімічного синтезу.*

*Механічні характеристики (твердість та модуль пружності) покриттів визначали методом мікроіндентування. Встановлено, що твердість покриттів лежить у межах 2,9...5,4 ГПа, модуль пружності — 80...100 ГПа.*

*Показано, що газоабразивна стійкість всіх випробуваних покриттів за кімнатної температури перевищує в 1,4...4,3 раза зносостійкість сталі Ст3; при терті об нежорстко закріплені абразивні частинки стійкість покриттів перевищує стійкість сталі Ст3 у 2,1...3,8 раза. В умовах газоабразивного зношування за температури 550 °С стійкість покриттів Fe<sub>3</sub>Al, Fe-AlMg та Fe-TiAl перевищує стійкість сталі Ст3 у 2,2...3,1 раза; стійкість покриттів Fe<sub>3</sub>Al і Fe-TiAl за цих умов перевищує стійкість теплостійких сталей в 1,2...1,5 раза.*

*У всіх випадках найбільшу зносостійкість має покриття Fe<sub>3</sub>Al, що пов'язано з його низькою пористістю та малим вмістом крихких фаз у покритті.*

*Оцінка взаємозв'язку механічних властивостей покриттів зі зносостійкістю показала, що зносостійкість покриттів підвищується зі збільшенням їх модуля пружності.*

*На підставі проведених досліджень показано можливість використання покриттів на основі Fe-Al для захисту та зміцнення деталей та конструкцій, що працюють в умовах абразивного зношування за температур від 20 до 550 °С.*

**Ключові слова:** плазмове напилення, алюмініди заліза, твердість, абразивні частинки, зношування, мікроіндентування, модуль пружності, структура.

### Вступ

У рухомому контакті деталей та вузлів машин з абразивними частинками, особливо за підвищених температур, спостерігається пошкодження робочої поверхні деталі. Форма та механізми руйнування визначаються взаємодією поверхонь тертя з абразивним середовищем, сутність якого полягає у ковзанні частинок, пластичному деформуванні металу, проникненні в місця контакту, руйнуванні поверхневих об'ємів без відділення металу або зі зняттям мікростружки [1].

Для захисту деталей застосовують різні зносостійкі покриття у вигляді наплавов, хіміко-термічних, дифузійних, газотермічних покриттів та ін. [2].

Серед перспективних матеріалів для напилення значний інтерес становлять алюмініди: сплави алюмінію з нікелем, хромом, залізом, титаном та іншими металами [3].

Алюмініди заліза відносяться до найдосліджуваніших інтерметалідів через їх малу питому вагу, легкість оброблення, високу твердість, опір корозії та відносно низьку вартість, що дає можливість використовувати покриття на їх основі для захисту деталей машин і механізмів [4], [5].

У зв'язку з низькою міцністю алюмінідів заліза, особливо за кімнатної температури [3], [4], раціональним шляхом практичного використання їх високої стійкості до зношування є розробка захисних покриттів, зокрема одержаних методами газотермічного напилення (ГТН) з порошків на основі Fe-Al [6], [7].

*Мета роботи* — дослідження механічних властивостей та абразивної зносостійкості плазмових покриттів на основі інтерметаліду Fe-Al.

### Результати дослідження

У роботі наведено результати вимірювання механічних властивостей та випробувань на абразивну та газоабразивну стійкість плазмових покриттів з порошків 86Fe-14Al, 86Fe-14(Al5Mg) та 61Fe-39(62,5Ti37,5Al) мас. %, отриманих методом механохімічного синтезу, склади яких розраховані на отримання в кінцевому продукті інтерметаліду Fe<sub>3</sub>Al [8], [9].

Напилення покриттів проводили на установці плазмового напилення УПУ-8. Умови плазмового напилення, які використано для нанесення покриттів, наведено у роботі [10]. Характеристику отриманих покриттів подано у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика плазмових покриттів

Система покриття	Пористість, об. %	Фазовий склад	Товщина, мкм
Fe <sub>3</sub> Al	1	Fe <sub>3</sub> Al, Fe-Al, сліди Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	500
Fe-AlMg	5	тв. р-р Al в α-Fe, MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , MgFeAlO <sub>4</sub>	
Fe-TiAl	7	Fe <sub>3</sub> Al, Fe, FeTi, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO	

Визначення механічних характеристик (твердості H, модуля пружності E) покриттів проводили методом мікроіндентування за допомогою приладу «Мікрон-Гамма» [11]. Значення характеристик обчислювалося автоматично за стандартом ISO 14577-1: 2015. Результати мікроіндентування подані у табл. 2.

Таблиця 2

Механічні властивості інтерметалідних Fe-Al-покриттів, виміряні методом мікроіндентування

Система покриття	H, ГПа	E, ГПа
Fe <sub>3</sub> Al	3,95 ± 0,4	100 ± 10,5
Fe-AlMg	2,9 ± 0,2	94 ± 4,0
Fe-TiAl	5,36 ± 0,3	80 ± 6,0

З результатів проведених випробувань випливає, що ряди за зростанням значень твердості плазмових покриттів мають вигляд: Fe-AlMg → Fe<sub>3</sub>Al → Fe-TiAl; за зростанням значень модуля пружності: Fe-TiAl → Fe-AlMg → Fe<sub>3</sub>Al.

Для оцінки службових властивостей покриттів з інтерметалідів Fe-Al проводили їхнє випробування на газоабразивну стійкість за кімнатної температури та нагріванні покриттів до 550 °С, а також на стійкість покриттів у разі тертя об нежорстко закріплені абразивні частинки за кімнатної температури. Параметри випробувань вибрано відповідно до умов експлуатації реальних деталей. Лінійне зношування покриттів визначали за допомогою індикатора годинникового типу (похибка вимірювань ± 1 мкм). Для оцінки зносостійкості вибрали зношення, приведені до кілограма використаного абразиву. Для порівняння з конструкційними матеріалами використовувалися зразки зі сталей: Ст3, 30ХГСА та 15Х1М1Ф, що застосовуються для виготовлення деталей та вузлів, що працюють за температури від 20 до 550 °С за абразивного зношення.

Випробування на газоабразивну стійкість за нормальної та підвищеної температури проводили на стенді, створеному на базі установки для струменевоабразивного оброблення. Для нагрівання зразків використовували газополуменевий пальник. Температуру зразка з покриттям визначали за допомогою термопари хромель-копель, встановленої на звороті зразка. Параметри

випробувань: кут атаки абразивних частинок  $10^\circ$ ; швидкість абразивного потоку 200 м/с; тиск стисненого повітря 0,5 МПа (0,15 МПа за  $550^\circ\text{C}$ ); абразивний матеріал електрокорунд нормальний марки 14 А зернистістю 22 F (90 F за  $550^\circ\text{C}$ ).

Для випробувань покриттів на стійкість до абразивного зношування зразків у разі тертя об нежорстко закріплені частинки використовували стенд на базі машини тертя УМТ-1 за схемою Брі-неля–Ховарта. Частота обертання гумового ролика  $n = 635$  об/хв ( $\varnothing 50 \times 15$  мм), зусилля притискання зразка — 44 Н.

Випробування показали, що газоабразивна стійкість всіх досліджених покриттів за кімнатної температури перевищує в 1,4...4,3 раза зносостійкість сталі Ст3 (рис. 1). Найвищу зносостійкість показали зразки з покриттям з порошку  $\text{Fe}_3\text{Al}$  — в 1,5...1,7 раза вище легованих сталей.

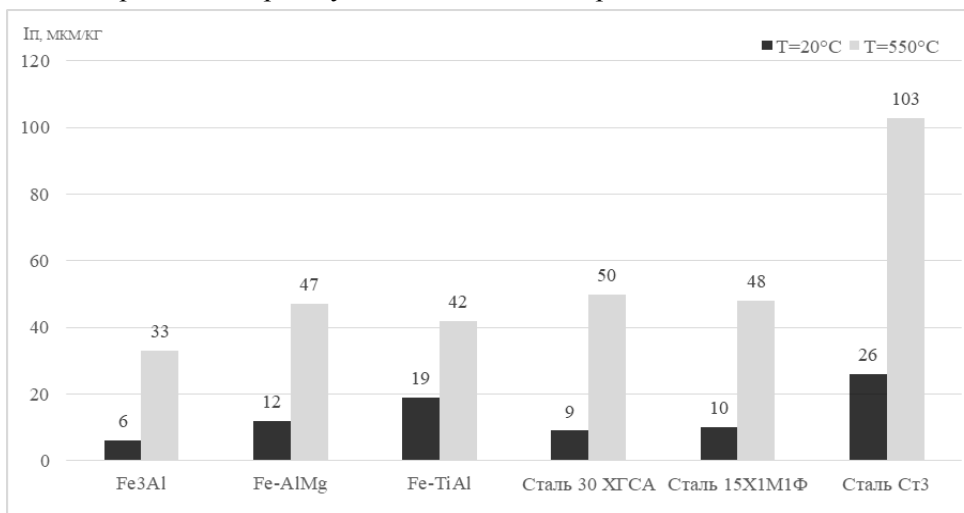


Рис. 1. Інтенсивність газоабразивного зношування зразків із покриттями

Зовнішній вигляд поверхні покриттів після газоабразивного зношування свідчить про відсутність характерних слідів крихкого руйнування або пластичної деформації; без подряпин або мікрорізань (рис. 2).

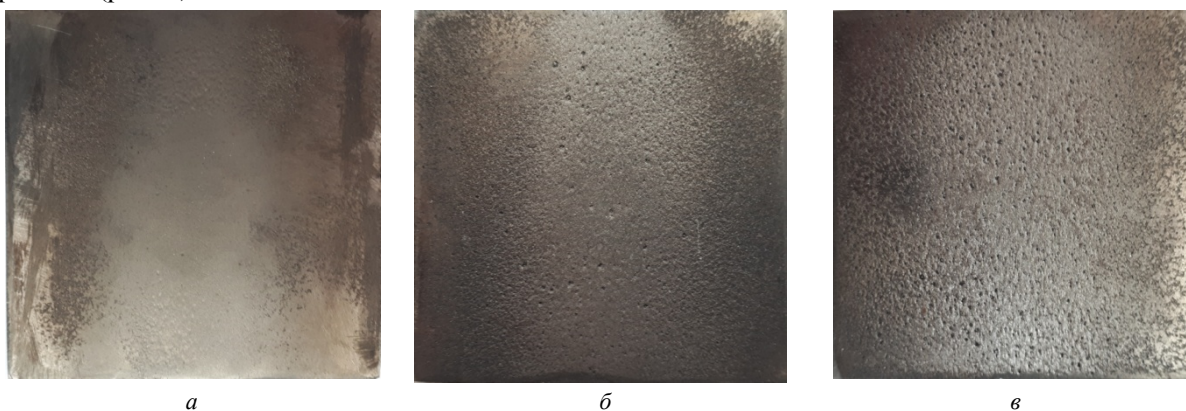


Рис. 2. Поверхня зразків з покриттями після проведення випробувань на газоабразивну зносостійкість за температури  $20^\circ\text{C}$ : а —  $\text{Fe}_3\text{Al}$ ; б — Fe-AlMg; в — Fe-TiAl

Відмічено після зношування високошвидкісним струменем наявність на поверхні покриттів, отриманих з легованих Mg та Ti порошоків, слідів викришування з пластичної матриці твердих фаз: FeTi (20,3 ГПа) та  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  (14 ГПа) під дією абразивних частинок [12], [13]. Поверхня покриття системи  $\text{Fe}_3\text{Al}$  після випробування гладша, через відсутність у покритті твердих фаз.

Газоабразивна зносостійкість покриття  $\text{Fe}_3\text{Al}$  за температури  $550^\circ\text{C}$  вище ніж у теплостійких сталей 30ХГСА та 15Х1М1Ф у 1,5 раза, а сталі Ст3 — у 3,1 раза (рис. 1). Зносостійкість покриттів Fe-AlMg вище ніж сталі Ст3 в 2,2 раза і знаходиться на рівні теплостійких сталей. Зносостійкість покриття Fe-TiAl вище ніж сталі Ст3 в 2,5 раза і вище ніж у легованих сталей в 1,2 раза.

В процесі випробування на тертя об нежорстко закріплені абразивні частинки встановлено, що зносостійкість всіх досліджуваних покриттів вище зносостійкості сталі Ст3 у 2,1...3,8 раза (рис. 3).

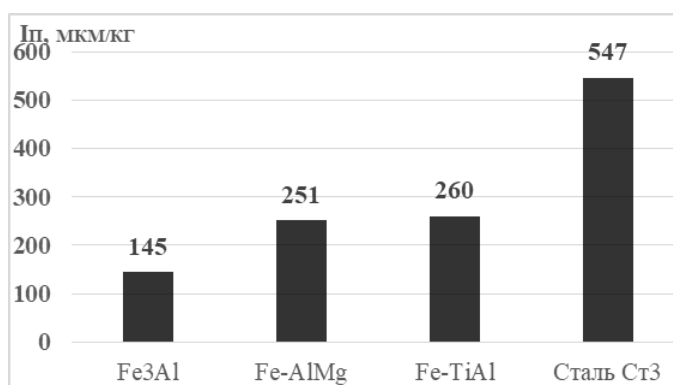


Рис. 3. Інтенсивність зношування зразків з покриттями у разі тертя об нежорстко закріплені абразивні частинки

Під час тертя об нежорстко закріплені абразивні частинки в результаті контакту частинок абразиву колотої форми з поверхнею, що випробовується, виникають високі точкові нормальні напруження. Це призводить до виникнення мікрорізання, з подальшим винесенням матеріалу із зони тертя, що спостерігається на поверхні тертя у вигляді подряпин (рис. 4). Величина зношування при цьому зростає на порядок, порівняно з газоабразивним зношуванням.



Рис. 4. Вид зразків з покриттями після випробування на тертя об нежорстко закріплені абразивні частинки:  
а — Fe<sub>3</sub>Al; б — Fe-AlMg; в — Fe-TiAl

Як і у випадку газоабразивного зношення, у разі тертя об нежорстко закріплені абразивні частинки, покриття системи Fe<sub>3</sub>Al перевищує зносостійкість покриттів Fe-AlMg та Fe-TiAl. На абразивну зносостійкість газотермічних покриттів суттєво впливає наявність у їхній структурі дефектів у вигляді пор. Необхідно зазначити, що покриття Fe<sub>3</sub>A має найменшу пористість серед досліджуваних покриттів та меншу кількість крихких оксидів. У зв'язку з цим покриття Fe<sub>3</sub>Al за стійкістю перевершує покриття з легованих порошоків.

В результаті проведених випробувань встановлена залежність між зносостійкістю покриттів і модулем пружності — чим вищий модуль пружності покриттів, тим вища їхня зносостійкість. Однозначного впливу мікротвердості покриттів на їхню зносостійкість не спостерігається. Це пов'язано, насамперед, з особливістю структурного та фазового стану покриттів, різним вмістом у них оксидів та пор.

### Висновки

Методом мікроіндентування визначено твердість та модуль пружності плазових покриттів на основі алюмініду заліза систем Fe<sub>3</sub>Al, Fe-AlMg, Fe-TiAl. Твердість досліджених покриттів Fe<sub>3</sub>Al, Fe-AlMg та Fe-TiAl становить 3,95, 2,9 та 5,4 ГПа, модуль пружності — 100, 94 та 80 ГПа відповідно.

В результаті випробувань плазових покриттів Fe<sub>3</sub>Al, Fe-AlMg і Fe-TiAl на газоабразивну зносостійкість за нормальної температури встановлено, що зносостійкість покриттів у 1,4...4,3 раза вища за зносостійкість сталі Ст3. За цих самих умов зносостійкість покриття системи Fe<sub>3</sub>Al перевищує зносостійкість сталей 30ХГСА і 15Х1М1Ф в 1,5...1,7 раза.

Газоабразивна зносостійкість покриттів за температури 550 °С перевищує зносостійкість сталі Ст3 в 2,2...3,1 раза. Покриття систем Fe<sub>3</sub>Al і Fe-TiAl за зносостійкістю в умовах підвищеної температури також перевершують теплостійкі сталі в 1,2...1,5 раза.

Під час випробування на тертя об нежорстко закріплені абразивні частинки встановлено, що зносостійкість всіх досліджуваних покриттів вище зносостійкості сталі Ст3 в 2,1...3,8 раза.

Результати проведених досліджень плазмових покриттів на основі алюмініду заліза свідчать про доцільність їхнього застосування для захисту вузлів та механізмів від абразивного впливу за робочих температур 20...550 °С.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] П. Кулу, *Износостойкость порошковых материалов и покрытий*. Таллин: Валгус, 1988.
- [2] V. K. Sikka, S. Viswanathan, and C. G. Mc Kaamey, "Development and commercialization status of Fe<sub>3</sub>Al – based intermetallic alloys," *Struct. Intermetallics: Champion, Pa*, Sept. 26-30, 1993.
- [3] S. C. Deevi, and V. K. Sikka, "Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications," *Intermetallics*, no. 4 (5), pp. 357-375, 1996. [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)00056-9).
- [4] N. S. Stoloff, "Iron aluminides: present status and future prospects," *Materials Science and Engineering*, A258, pp.1-14, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)00909-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)00909-5).
- [5] S. C. Deevi, "Advanced Intermetallic Iron Aluminide Coatings for High Temperature Applications," *Progress in Materials Science*, vol. 118, no.100769, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100769>.
- [6] Ф. Г. Ловшенко, и А. С. Федосенко, «Плазменные покрытия из механически синтезированных композиционных порошков на основе системы "железо-алюминий"»,» *Литьё и металлургия*, № 3, с. 84-92, 2020. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-3-84-92>.
- [7] N. Cinca, and J. M. Guilemany, "Thermal spraying of transition metal aluminides: an overview," *Intermetallics*, vol. 24, pp. 60-72, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.01.020>.
- [8] А. Л. Борисова, И. И. Тимофеева, М. А. Васильковская, А. Н. Бурлаченко, и Т. В. Цымбалистая. «Фазовые и структурные превращения при формировании порошков интерметаллидов системы Fe-Al методом механохимического синтеза»,» *Порошковая металлургия*, № 7-8, с. 135-143, 2015.
- [9] Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова, А. Н. Бурлаченко, Т. В. Цымбалистая, и Ц. Сендеровски, «Структура и свойства легированных порошков на основе интерметаллида Fe<sub>3</sub>Al для газотермического напыления, полученных методом механохимического синтеза»,» *Автоматическая сварка*, № 9, с. 40-47, 2017.
- [10] Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова, Н. В. Вігілянська, О. П. Грищенко, і М. В. Коломицев, «Покриття на основі інтерметалідів Fe-Al, які отримані методами плазмового і надзвукового повітряно-газового плазмового напылення»,» *Автоматичне зварювання*, № 07, с. 32-40, 2020.
- [11] S. A. Firstov, V. F. Gorban, and E. P. Pechkovsky, "New methodological opportunities of modern materials mechanical properties definition by the automatic indentation method," *NAS of Ukraine Science and innovations*, № 6 (5), с. 7-18, 2010.
- [12] Qiaoling Chu et al., "Interfacial Investigation of Explosion-Welded Titanium/Steel Bimetallic Plates," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 29, pp.78-86, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04535-9>.
- [13] Olivier Quénard, Christophe Laurent, Alain Peigney, and Abel Rousset, "Zirconia-spinel composites. Part II: mechanical properties," *Materials Research Bulletin, Elsevier*, vol. 35, pp. 1979-1987, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(00\)00409-8](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(00)00409-8).

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 20.06.2022

**Мурашов Анатолій Петрович** — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, e-mail: annmurash@i.ua ;

**Вігілянська Наталія Вікторівна** — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, e-mail: rewinnataliya@gmail.com ;

**Грищенко Олександр Петрович** — молодший науковий співробітник, e-mail: grinya3679@gmail.com ;

**Ющенко Андрій Олександрович** — молодший науковий співробітник, e-mail: LaoSetL@gmail.com .

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

**Горбань Віктор Федорович** — д-р. техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, e-mail: gorban1944@ukr.net .

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

**A. P. Murashov**<sup>1</sup>  
**N. V. Vigilianska**<sup>1</sup>  
**O. P. Grishchenko**<sup>1</sup>  
**A. O. Yushchenko**<sup>1</sup>  
**V. F. Gorban`**<sup>2</sup>

## **Investigation of the Mechanical Properties and Wear Resistance of Intermetallic FeAl-Based Plasma Sprayed Coatings**

<sup>1</sup>E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv;

<sup>2</sup>Institute for Problems of Material Sciences National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

*Studies of the mechanical characteristics and abrasive resistance of FeAl-based plasma sprayed coatings are presented. Coatings were obtained by plasma spraying method using iron aluminide powders of Fe<sub>3</sub>Al, Fe-AlMg and Fe-TiAl systems. The powders were prepared by mechanochemical synthesis.*

*The mechanical characteristics (hardness and elastic modulus) of the coatings were determined by microindentation method. It has been found that the hardness of the coatings is in the range of 2.9...5.4 GPa, the elastic modulus is in the range of 80...100 GPa.*

*It is shown that the gas-abrasive resistance of all tested coatings at room temperature exceeds the wear resistance of St3 steel 1.4...4.3 times; when dry abrasive/rubber wheel testing the resistance of the coatings exceeds the resistance of St3 2.1...3.8 times. The resistance of Fe<sub>3</sub>Al, Fe-AlMg and Fe-TiAl coatings is higher 2.2...3.1 times than resistance of St3 steel under conditions of gas-abrasive wear at a temperature of 550 °C; the resistance of Fe<sub>3</sub>Al and Fe-TiAl coatings under the same conditions exceeds the resistance of heat-resistant steels 1.2...1.5 times. In all cases Fe<sub>3</sub>Al coating has the highest wear resistance because of low porosity and low content of brittle phases in the coating.*

*An assessment of the relationship between the mechanical properties of coatings and wear resistance showed that the wear resistance of coatings increases with an increasing of their elastic modulus.*

*Based on the results of studies the possibility of using FeAl-based coatings for the protection and hardening of parts and constructions operating under conditions of abrasive wear at temperatures range from 20 to 550 °C is shown.*

**Keywords:** plasma spraying, iron aluminides, hardness, abrasive particles, wear, microindentation, elastic modulus, structure.

**Murashov Anatolii P.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, e-mail: anmurash@i.ua ;

**Vigilianska Nataliia V.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, e-mail: pewinataliya@gmail.com ;

**Grishchenko Oleksandr P.** — Junior Research Fellow, e-mail: grinya3679@gmail.com ;

**Yushchenko Andrii O.** — Junior Research Fellow, e-mail: LaoSetL@gmail.com ;

**Gorban` Viktor F.** — Dr. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Leading Researcher, e-mail: gorban1944@ukr.net