

УДК 539.26

ВПЛИВ ВІДПАЛУ НА ФАЗОВИЙ СКЛАД УЩІЛЬНЮВАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ АФС (АЛЮМОФОСФАТНОЇ СПОЛУКИ)

*БОЛЬШАКОВ В. І.¹, д. т. н, проф.,
ВЕСЕЛОВА С. І.², к. ф.-м. н., доц.,
ЗАГОРОДНИЙ О. Б.^{3*}, асист.*

¹Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Кафедра фізики, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 756-33-82, e-mail: siveselova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6696-3385

^{3*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: zagorodniy.a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

Анотація. Постановка проблеми. Дослідження рентгенофазовим методом складу ущільнювального покриття на основі алюмофосфатів та впливу відпалу на його фазовий склад. **Методика.** Проведено рентгеноструктурні дослідження фазового складу ущільнювального покриття на основі АФС (алюмофосфатної сполуки) та вплив відпалу на його фазовий склад. Рентгенограми для структурного аналізу отримані на дифрактометрі ДРОН-4-07 із використанням відфільтрованого мідного випромінювання на вторинному пучку. Реєстрація дифрактограм і первинна обробка здійснювалися за допомогою програмного комплексу PDOS із виведенням дифрактограм на екран монітора. Використання опції у режимі „лупа” дозволило ідентифікувати слабкі інтерференційні лінії, що підвищило точність методу якісного рентгенофазового аналізу. **Результати.** Встановлено, що основу покриття складає рентгеноаморфна фаза і що відпал не впливає значно на фазовий склад кристалічних фаз. Визначено межу температури відпалу для покриття. **Наукова новизна** полягає в отриманні покриття з АФС методом плазмового напилювання, вивченні його складу та використанні для підвищення ККД компресора газотурбінного двигуна. **Практична значимість.** Проектуючи компресор газотурбінного двигуна (ГТД), прагнуть створити мінімально можливі радіальні та осеві зазори між ротором і статором, що запобігають перегітканню газових потоків з області з вищим тиском в область із меншим тиском. Величина зазорів істотно впливає на характеристики компресора і двигуна в цілому, а саме, на ККД компресора, тягу двигуна і питому витрату палива. Для забезпечення працездатності ущільнення при мінімальних і навіть нульових зазорах корпус компресора повинен мати спеціальне м'яке покриття, яке легко приробляється, котре наносять на його внутрішню поверхню. Лопатки компресора під час його роботи при торканні покриття прорізають у канавки, не спричинюючи стопоріння і руйнування ротора. Тому розробка нових складів ущільнювальних покриттів, що забезпечують надійну роботу компресора ГТД, вельми актуальна.

Ключові слова: рентгеноструктурний аналіз фазового складу; покриття, що отримане плазмовим напилюванням; вплив відпалу на фазовий склад; газотурбінний двигун

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ УПЛОТНИТЕЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ АФС (АЛЮМОФОСФАТНОГО СОЕДИНЕНИЯ)

*БОЛЬШАКОВ В. И.¹, д. т. н, проф.,
ВЕСЕЛОВА С. И.², к. ф.-м. н., доц.,
ЗАГОРОДНИЙ А. Б.³, асист.*

¹ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение “Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Кафедра физики, Государственное высшее учебное заведение “Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 756-33-82, e-mail: siveselova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6696-3385

^{3*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение “Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: zagorodniy.a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

Аннотация. Постановка проблемы. Исследование рентгенофазовым методом состава уплотнительного покрытия на основе алюмофосфатов и влияния отжига на его фазовый состав. **Методика.** Проведены рентгеноструктурные исследования фазового состава уплотнительного покрытия на основе АФС (алюмофосфатного соединения) и влияния отжига на его фазовый состав. Рентгенограммы для структурного анализа получены на дифрактометре ДРОН-4-07 с использованием отфильтрованного медного излучения на вторичном пучке. Регистрация дифрактограмм и первичная обработка осуществлялись с помощью программного комплекса PDOS с выводом дифрактограмм на экран монитора. Использование опции в режиме „лупа” позволило идентифицировать слабые интерференционные линии, что повысило точность метода качественного рентгенофазового анализа. **Результаты.** Установлено, что основу покрытия составляет рентгеноаморфная фаза и что отжиг не влияет значительно на фазовый состав кристаллических фаз. Определена граница температуры отжига для покрытия. **Научная новизна** заключается в получении покрытия на основе АФС методом плазменного напыления, изучении его состава и использовании для повышения КПД компрессора газотурбинного двигателя. **Практическая значимость.** При проектировании компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) стремятся создать минимально возможные радиальные и осевые зазоры между ротором и статором, предотвращающие перетекание газовых потоков из области с более высоким давлением в область с меньшим давлением. Величина зазоров существенно влияет на характеристики компрессора и двигателя в целом, а именно, на КПД компрессора, тягу двигателя и удельный расход топлива. Для обеспечения работоспособности уплотнения при минимальных и даже нулевых зазорах корпус компрессора должен иметь специальное мягкое, легко прирабатываемое покрытие, которое наносят на его внутреннюю поверхность. Лопатки компрессора, в процессе его работы, при касании покрытия прорезают в нем канавки, не приводя к стопорению и разрушению ротора. Поэтому разработка новых составов уплотнительных покрытий, обеспечивающих надежную работу компрессора ГТД, весьма актуальна.

Ключевые слова: рентгеноструктурный анализ фазового состава; покрытие, полученное методом плазменного напыления; влияние отжига на фазовый состав; газотурбинный двигатель

EFFECT OF ANNEALING ON THE PHASE COMPOSITION OF THE SEALING COATINGS BASED ON APC (ALUMINOPHOSPHATE COMPOUND)

*BOLSHAKOV V. I.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
VESELOVA S. I.², Cand. Sc. (Tech.), Ass. of Prof.,
ZAHORODNIY A. B.³, assistant*

¹ Department of Materials Science, State Higher Education Establishment Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Department of Physics, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", ul. Chernyshevsky, 24-A, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine Tel. 38 (056) 756-33-82, e-mail: siveselova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6696-3385

^{3*} Department of Materials Science and Processing, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", ul. Chernyshevsky, 24-A, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine Tel. 38 (0562) 47-39-45, e-mail: zagorodniy.a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

Annotation. Raising of problem. Studying by the X-ray method the composition of the sealing coatings based on aluminophosphates and the effect of annealing on its phase composition. **Methodology.** The X-ray studies of the phase composition of the sealing coatings based on APC (aluminophosphate compounds) and the effect of annealing on its phase composition were carried out. The roentgenograms for structural analysis were obtained on a DRON-4-07 diffractometer using the filtered copper radiation on the secondary beam. Registration of diffraction patterns and primary processing were carried out using the complex PDOS software with display the diffraction patterns on the screen. Using the “loop” option allowed to identify the weak interferential lines, which enhanced the accuracy of high-quality X-ray diffraction method. **Results.** It is found that the base coating is X-ray amorphous phase and the annealing does not significantly affect on the phase composition of crystal’s phases. The boundary of the annealing temperature for the coating is defined. **Scientific novelty.** Scientific novelty consists in obtaining the coverage based on APC by plasma spraying method, studying of its composition and usability to increase the efficiency ratio of the compressor the gas turbine engine. **Practical significance.** By designing a compressor of gas turbine engine (GTE) it tends to create the smallest possible radial and axial clearances between the rotor and the stator, which prevents the flow of gases from an area of higher pressure to lower pressure. Gap dimensions significantly affect the features of compressor as a whole, such as compressor efficiency ratio, engine thrust and fuel unit consumption. To ensure the operability of sealing with minimum or even zero clearance the compressor housing should have a special soft and easily burned-in coating which is applied to it’s inner surface. Compressor blades in the course of its work, cut the grooves when touching the cover without causing the locking and destruction of the rotor. Therefore, the development of new compounds of sealing coatings which ensure the reliable operation of the GTE compressor are highly relevant.

Keywords: X-ray analysis of the phase composition; coating obtained by plasma spraying; the effect of annealing on phase composition; gas turbine engine

Вступ

У виробництві осьових компресорів газотурбінних двигунів необхідна стабільність мінімальних зазорів між ротором та статором. Для цього використовують спеціальні ущільнювальні покриття. До них висувають подвійні вимоги: достатнє зчеплення з поверхнею статора і мала робота врізання, необхідна для збереження працездатності лопаток під час роботи двигуна. Склад таких покриттів зазвичай включає метал і тверде мастило. Напилювання цих різномірних матеріалів здійснюється плазмовим методом. Для визначення властивостей покриття проводили комплекс досліджень, серед яких визначення фазового складу покриття як у початковому стані, так і після термообробки. На основі АФС співробітники лабораторії плазмового напилювання запропонували і отримали ущільнювальне покриття, реакція синтезу якого наведена у праці [7].

Результати досліджень та їх обговорення

Фазовий склад матеріалів – вихідного у вигляді порошку після грануляції і твердого покриттів – визначали методом РФА на дифрактометрі ДРОН-4-07 із використанням відфільтрованого мідного випромінювання. Реєстрацію дифрактограм і первинну обробку здійснювали за допомогою програмного комплексу PDOS із виведенням дифрактограм на екран монітора. На рисунку 1 наведено ділянку дифрактограми покриття до (а) і після (б) відпалу.

Ідентифікація ліній з низькою інтенсивністю проводилася в режимі „лупа” на декількох ділянках із відповідним їх масштабуванням.

На підставі РФА можна стверджувати, що матеріали, отримані на основі алюмофосфатів, мають гетерофазну кристалічну будову. Основу матеріалу складає рентгеноаморфна фаза, частка якої у покритті складає 70 %. Наявність рентгеноаморфної фази підтверджується присутністю фону на рентгенограмах, які є результатом некогерентного розсіювання рентгенівських променів від неупорядкованої структурної складової зразків.

Проведено порівняльний аналіз кількісного змісту кожної з фаз у покритті порівняно з вихідним матеріалом. Фазовий склад у порошку й твердому покритті, можна вважати, якісно практично не змінився.

Верхня межа робочих температур покриття визначається температурами розм'якшення

(плавлення) в'язких складових у випадку їх використання без заповнювачів. Установлено, що після відпалу покриття при 650 °С протягом 3 годин на поверхні покриття утворюється міцна плівка, яка створює стискальні напруження всередині покриття, поверхня якого була випуклою, в результаті чого температура всередині підвищується до температури плавлення алюмінію 659 °С. Частковий перехід алюмінію в рідку фазу супроводжується збільшенням його об'єму. Розплавлений метал витісняється з покриття на поверхню та кристалізується у вигляді стовпчастих утворень алюмінію, – підтверджено рентгеноструктурним дослідженням структури стовпчастих утворень.

Репером наведено положення лінії (102) нітриду бору BN, яку можна спостерігати у режимі „Лупа”.

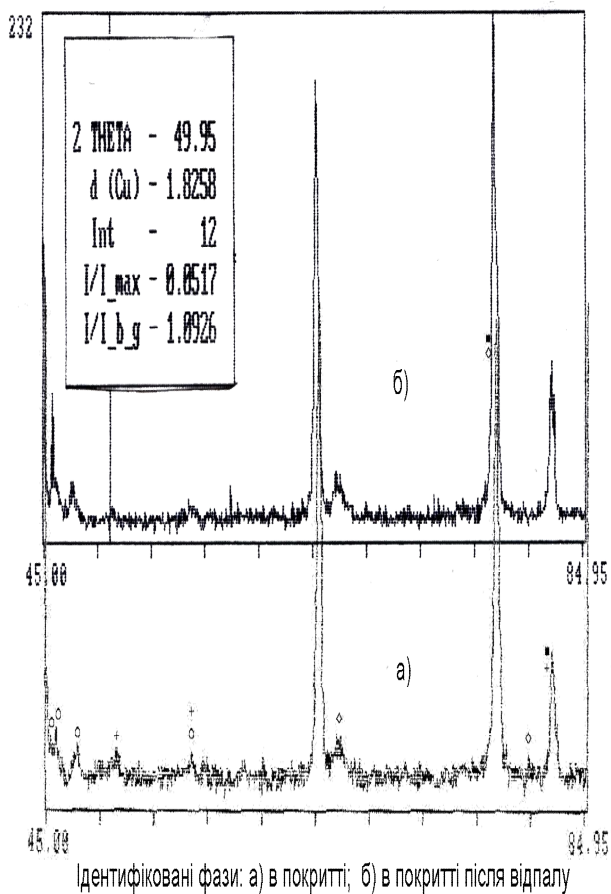
Фазовий склад покриття був також досліджений після його відпалу протягом 3 годин за температури 550 °С (рис. 1 б). Покриття на основі фосфатних зв'язаних досліджені також авторами праць [3; 5; 6].

Ми встановили наявність у покритті фаз із гексагональними кристалічними решітками: поліфосфату $Al(PO_3)_3$, ортофосфату $AlPO_4$, нітриду бору BN та алюмінію з ГЦК структурою.

Гексагональна модифікація нітриду бору має шарову графітоподібну будову. Відношення вісей $c/a = 2.6601$ більше, ніж у строго щільно упакованій гексагональній решітці (1,63), тому щільна упаковка утворюється у базисних площинах із загальною системою ковзання (0001). Деформація відбувається тільки базисним ковзанням, тому наявність нітриду бору в ущільнювальному покритті на базі алюмофосфатів викликає зменшення коефіцієнта тертя та зазорів під час експлуатації двигунів і є корисною. Нітрид бору має декілька кристалічних модифікацій. За даними публікації [2], гексагональна форма нітриду бору (BN_r), стійка фаза до тисків у 50 ГПа та високих температур, має білий колір.

Термічне розкладення фосфатів докладне вивчене авторами праць [11; 13] в алюмофосфатному в'язучому з відношенням $P_2O_5/Al_2O_3 = 2,3$. Схема синтезу примірників для отримання ущільнювального покриття відрізняється від умов створення алюмофосфатного в'язучого [9; 10; 12].

На поверхні покриття після його відпалу на повітрі за температури 550 °С утворилася тонка напівморфна (склоподібна) плівка гексагональної фази $Al(PO_3)_3$, з відношенням $c/a = 0,8402$, показник заломлення якої дорівнює 1,499 [8]. Про це свідчать інтерференційні смуги, які виникають на поверхні шару тонкої плівки і спостерігаються у відбитих променях (рис. 2).



Ідентифіковані фази: а) в покритті; б) в покритті після відпалу

■ ГЦК Al ◇ гексагон AlPO₄
 + гексагон BN ○ гексагон Al(PO₃)₃

Рис.1. Ділянка дифрактограми ущільнювального покриття: а – в початковому стані, б – після його відпалу за 550 °С / Area of diffractogram of compression coverag: in the initial state, b – after annealing at 550 °С

Якість рентгенограми після відпалу погіршилась, тому що плівка частково поглинає розсіяні зразком рентгенівські промені. Особливо це помітно на порівняно слабких лініях інтерференції нітриду бору. Необхідно зазначити, що при однакових технологічних режимах отримання зразків покриття в них можливі незначні коливання кількості нітриду бору.

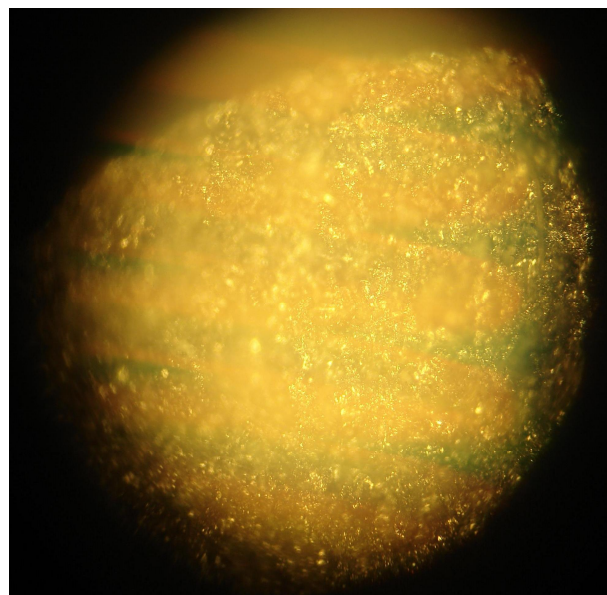


Рис. 2. Рельєф поверхні покриття після його відпалу за температури 550 °С. Збільшення × 100 / Relief of surface of coverage after his annealing at a temperature 550 °С. Increase × 100

У таблиці наведено дані рентгенівського фазового аналізу покриття після його відпалу протягом 3 годин за температури 550 °С.

Таблиця

Порівняння експериментальних і табличних значень d/n та I / Comparison of experimental and tabular values d/n and I

№ з/п	Експериментальні дані			Табличні дані				Фаза	№ картки ASTM
	2θ	I	d/n	d/n	HKL	I/I ₁	Тип ґрат		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	21,25	168	4,2005	4,28	100	25	Гексаг.	AlPO ₄	10-0423
2	21,75	79	4,0860	3,984	101	6	Гексаг.	AlPO ₄	10-0423
3	26,85*	42	3,3203	3,328	213	40	Гексаг.	Al(PO ₃) ₃	15-0364
4	28,40*	43	3,1425	3,158	300	5	Гексаг.	Al(PO ₃) ₃	15-0364
5	38,55	1048	2,3353	2,338 2,328	111 113	100 40	ГЦК Гексаг.	Al Al(PO ₃) ₃	4-0787 15-0364
6	44,80	469	2,0230 2,041	2,024 2,041	200 223	47 30	ГЦК Гексаг.	Al Al(PO ₃) ₃	4-0787 15-0364
7	45,65*	66	1,9873	1,9949 1,995	202 313	630	Гексаг. Гексаг.	AlPO ₄ Al(PO ₃) ₃	10-0423 15-0364
8	47,10*	26	1,9294	1,934	214	40	Гексаг.	Al(PO ₃) ₃	15-0364
9	55,95*	15	1,6434	1,649	404	30	Гексаг.	Al(PO ₃) ₃	15-0364
10	65,15	203	1,4318	1,431 1,445	220 610	22 12	ГЦК Гексаг.	Al Al(PO ₃) ₃	4-0787 15-0364
11	66,70*	24	1,4023	1,393 1,389	214 206	12 12	Гексаг.	AlPO ₄	10-0423
12	78,35	161	1,2204	1,221	311	24	ГЦК	Al	4-0787
13	82,55	59	1,1686	1,169 1,1603	222 31	7 4	ГЦК Гексаг.	Al AlPO ₄	4-0787 10-0423

* широкі інтерференційні рефлекси невеликої інтенсивності.

Порівняльний аналіз інтенсивності ліній установлених фаз у вихідному покритті й після відпалу показав таке: вміст поліфосфату $Al(PO_3)_3$ у кристалічній формі збільшився приблизно в 1,4 раза (зміна інтенсивності лінії (300) дорівнює $43/31 = 1,39$ і лінії (313) дорівнює $60/39 = 1,54$), а вміст алюмінію, який перебуває у кристалічному стані, за інтенсивністю ліній (200), відношення яких $469/416 = 1,13$, та ліній (220), відношення яких $203/216 = 0,99$, практично не змінився.

Фосфат алюмінію $AlPO_4$ може існувати як в аморфному, так і у кристалічному стані. Гексагональна модифікація фосфату алюмінію стійка до температур $580^\circ C$, має білий колір в аморфному стані і не офарблена в кристалічному, показник заломлення якої $n = 1,532$ [8]. Не встановлено кількісної зміни цієї фази у покритті після відпалу.

Отже, під час відпалу з аморфної фази додатково утворився у кристалічній формі поліфосфат $Al(PO_3)_3$ з гексагональною кристалічною решіткою, стійкий до температур $800^\circ C$. Ця фаза має ланцюгову структуру, в котрій тетраедри PO_4 пов'язані у нескінченні ланцюги $(PO_3)_n$ [4]. На рентгенограмі спостерігається поширення ліній інтерференції цієї фази, що

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Бритун В. Ф. Мартенситные превращения в углероде и нитриде бора / В. Ф. Бритун, А. В. Курдюмов // Сверхтвердые материалы. Получение, структура, свойства. – 2001. – № 2. – С. 3–14.

Britun V. F., Kurdyumov A. V. *Martensitnye prevrashcheniya v uglehode i nitride bora*. [Martensitic transformation in carbon and boron nitride]. Superhard materials. Preparation, structure and properties, 2001. No 2. Pp. 3–14. (in Russian).

2. Бромберг А. В. Алюмохромфосфатное связующее / А. В. Бромберг, А. Г. Касаткина, В. А. Копейкин и др. // Неорганические материалы. – 1969. – № 4. – С. 1566–1572.

Bromberg A. V., Kasatkina A. G., Kopejkin V. A. & oth. *Alyumohromfosfatnoe svyazuyushchee* [Alumohromfosfatic connective]. Inorganic materials, 1969. No. 4. Pp. 1566–1572. (in Russian).

3. Верещагин В. И. Покрyтия на основе фосфатных связующих / В. И. Верещагин, Вас. В. Гузеев, Вит. В. Гузеев // Стекло и керамика. – 2000. – № 6. – С. 28–29.

Vereshchagin V. I., Guzeev Vas. V., Guzeev Vit. V. *Pokrytiya na osnove fosfatnyh svyazuyushchih* [Coatings based phosphate binders]. Glass and keramika, 2000. № 6. Pp. 28–29. (in Russian).
<http://portal.tru.ru/SHARED/v/VVER/publications?p=10>

4. Г. Реми. Курс неорганической химии / Г. Реми. – Москва : Изд. иностр. лит., 1963.

G. Remi. *Kurs neorganicheskoy himii* [Course of inorganic chemistry]. Moscow : Foreign Lit. Publ., 1963. (in Russian).
<http://chemteq.ru/assets/files/books/inorganic%20chemistry/2048.djvu>

свідчить про її утворення у дрібно дисперсному стані під час відпалу. Дифракційну картину у вигляді вузьких рефлексів поряд із розмитими можуть давати також шарові з'єднання з паралельним розташуванням шарів у вигляді наноплівки з дальнім порядком у шарах. Білий та прозорий колір кристалічних фаз, що утворилися у покритті, не дозволяє застосувати мікроструктурний аналіз для отримання інформації щодо розташування та розмірів фаз у покритті. Основу покриття після відпалу, як і у початковому зразку, складає рентгеноаморфна фаза, частка якої дещо зменшилась (до 65 %).

Висновки

1. Фазовий склад покриття в результаті відпалу за температури $550^\circ C$ практично не змінився порівняно з вихідним покриттям. Відзначено незначне збільшення вмісту поліфосфату $Al(PO_3)_3$.

2. Визначено верхню межу температури відпалу запропонованого ущільнювального покриття.

3. У покритті сформувалися фази у кристалічному стані з ізоструктурними кристалічними решітками. Можливе утворення кристалічних фаз із розгалуженою структурою каркасного типу.

5. Верещагин В. И. Покрyтия на основе фосфатных связующих / В. И. Верещагин, Вас. В. Гузеев, Вит. В. Гузеев // Стекло и керамика. – 2000. – № 6. – С. 17–19.

Vereshchagin V. I., Guzeev Vas. V., Guzeev Vit. V. *Pokrytiya na osnove fosfatnyh svyazuyushchih* [Coatings based phosphate binders]. Glass and keramika, 2000. No. 6. Pp. 17–19. (in Russian).

6. Гузеев В. В. Защитные покрытия на основе фосфатных связующих / В. В. Гузеев, Т. Н. Гузеева // Сб. матер. V междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы и технологии на рубеже веков». – Пенза, 2000. – С. 47.

Guzeev V. V., Guzeeva T. N. *Zashchitnye pokrytiya na osnove fosfatnyh svyazuyushchih*. Sb. materialov V mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Novyye materialy i tekhnologii na rubezhe vekov». [Protective coatings based phosphate binders]. Coll. V materials of international scientific-technical conference "New materials and technologies in the turn of the century". Penza, 2000. Pp. 47. (in Russian).

7. Загородний А. Б. Рентгенофазовый анализ защитного покрытия на основе полифосфатов, полученного плазменным напылением / А. Б. Загородний, В. И. Журавель, В. Н. Волчук, С. И. Веселова, А. В. Лясота, В. И. Любушкин // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск : ГВУЗ ПГАСА, 2012. – Вып. 64. – С. 315–318.

Zagorodnij A. B., Zhuravel' V. I., Volchuk V. N., Veselova S. I., Lyasota A. V., Lyubushkin V. I. *Rentgenofazovyy analiz zashchitnogo pokrytiya na osnove polifosfatov, poluchennogo plazmennym napyleniem* [XRD analysis of protective coatings based on polyphosphates obtained by plasma spraying]. Construction, materials,

mechanical engineering. Dnepropetrovsk : SHEI PSAEB Publ., 2012. No. 64. Pp. 31–318. (in Russian).

<https://docviewer.yandex.ua/?url=http%3A%2F%2Fpgasa.dp.ua%2Fa%2Finternational%2520conferences%2Fstarodubov%22Farchive%2Freferats%2520of%2520starodubov%25202012-64.pdf&name=referats%20of%20starodubov%202012-64.pdf&lang=ru&c=56694332fe3f&page=1>

8. Копейкин В. А. Огнеупорные растворы на фосфатных связующих / В. А. Копейкин, В. С. Климентьева, Б. Л. Красный. – Москва : Metallurgiya, 1986. – С. 102.

Kopejkin V. A., Kliment'eva V. S., Krasnyj B. L. *Ogneupornye rastvory na fosfatnyh svyazuyushchih*. [Refractory solutions on phosphate binders]. Moscow : Metallurgy Publ., 1986. Pp. 102. (in Russian).

http://lib.omgtu.ru/?id=EC&o=Search&base%5B%5D=E_O_MSTU&query=%28%27I%3D66/K65-447746%29&lf=1&rc=1&fmt=full

9. Копейкин В. А. Образование аморфной фазы при цементации материалов на основе алюмофосфатного связующего / В. А. Копейкин, А. И. Кудряшова, Л. Н. Кузьминская, И. Л. Рашкован, И. В. Танаев // Неорганические материалы, 1967. – Т. 111. – № 4. – С. 737–739.

Kopejkin V. A., Kudryashova A. I., Kuz'minskaya L. N., Rashkovan I. L., Tanaev I. V. *Obrazovanie amorfnoj fazy pri cementacii materialov na osnove alyumosfatnogo svyazuyushchego* [The formation of the amorphous phase during cementation materials based alyumosfatnogo binder]. Inorganic materialy. 1967. Vol. 111, no. 4. Pp. 737–739. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. Д. В. Лаухіним (Україна); д-ром техн. наук, доц. В. Н. Волчуком (Україна)

Надійшла до редколегії 13.11.2015

Прийнята до друку 14.11.2015

10. Пет'ков В. И., Дорохова Г. И., Орлова А. И. Кристаллография. 2001. Т. 46. № 1. С. 76–81.

Pet'kov V. I., Dorohova G. I., Orlova A. I. *Kristallografiya* [Kristallografiya]. 2001. Vol. 46, no. 1. Pp. 76–81. (in Russian).

11. Рашкован И. Л. К вопросу о термических превращениях алюмофосфатного связующего / И. Л. Рашкован, В. А. Копейкин и др. // Неорганические материалы. – 1966. – Т. 3. – № 2. – С. 541–549.

Rashkovan I. L., Kopejkin V. A. & oth. *K voprosu o termicheskikh prevrashcheniyah alyumofosfatnogo svyazuyushchego* [On the issue of thermal transformations of the binder aluminophosphate]. Inorganic materials, 1966. Vol. 3, no. 2. Pp. 541–549. (in Russian).

12. Рашкован И. Л. Образование аморфной фазы при цементации материалов на основе алюмофосфатного связующего / И. Л. Рашкован, В. А. Копейкин и др. // Неорганические материалы. – 1967. – Т. 3. – № 4. – С. 737–739.

Rashkovan I. L., Kopejkin V. A. & oth. *Obrazovanie amorfnoj fazy pri cementacii materialov na osnove alyumofosfatnogo svyazuyushcheg* [The formation of the amorphous phase during cementation materials based on aluminophosphate inorganic binder materials]. Inorganic materials, 1967. Vol. 3, no. 4. Pp. 737–739. (in Russian).

13. Dachuan Chen, Liping He, Shouping Shang. Study on aluminum phosphate binder and related Al₂O₃-Si ceramic coating. J. Mater. Sci. and Eng. A 348. 2003. Pp. 29–35. (in English).

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509302006433>