

УДК 669.15 – 194.3

Зайчук Н.П., Шимчук С.П.

Луцький національний технічний університет

СТРУКТУРНИЙ СТАН БАНДАЖНИХ ПОЛИЧОК ЛОПАТОК АВІАЦІЙНОГО КОМПРЕСОРА З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT3-1 ВІДНОВЛЕНИХ МЕТОДОМ НАПАЙКИ

У статті розглянуто структурний стан та кількісний аналіз на вміст хімічних елементів сплаву VT3-1 після відновлення твердим сплавом на вольфрамівій основі бандажних полицок лопаток компресора авіаційного двигуна. Досліджено структури, що утворюються до та після напайки в ділянках основного сплаву та в ділянках наплавлення. Визначено ширину дифузійного шару при досліджуваних режимах напайки вольфрамівого сплаву реліту. Сплав, структура, кількісний аналіз, зношування, поверхневий шар, мартенсит, реліт.

Сучасний газотурбінний двигун є складною конструкцією, елементи і вузли якої працюють в екстремальних умовах. Робочі лопатки компресора є одними з найбільш навантажених деталей, які визначають ресурс газотурбінних двигунів. Титанові сплави для деталей компресорів почали застосовуватися у вітчизняній практиці з 1957 року в невеликій кількості головним чином в двигунах військового призначення, де вимагалось забезпечити надійну роботу деталей з ресурсом роботи 100...200 годин [1]. За останні роки збільшився об'єм застосування титанових сплавів в компресорах авіадвигунів цивільних літаків тривалого ресурсу роботи. При цьому було потрібно забезпечення надійної роботи деталей протягом 2000 годин і більше.

Збільшення ресурсу деталей з титанових сплавів досягається шляхом [2]:

- підвищення чистоти металу, тобто зниження в сплавах вмісту домішок;
- поліпшення технології виготовлення напівфабрикатів для отримання більш однорідної структури;
- застосування зміцнюючих режимів термічної або термомеханічної обробки деталей;
- вибір раціонального легування при розробці нових більш жароміцних сплавів;
- поверхневе зміцнення деталей.

В сучасних ГТД широко використовують бандажування лопатки турбін. Застосування бандажних полицок дозволяє знизити змінні напруження від вібраційних навантажень і таким чином підвищити загалом ресурс роботи і надійність ГТД. В процесі експлуатації робочих і соплових лопаток в результаті значних контактних напружень в умовах тертя і вібрації в місцях контактування полицок відбувається підвищене зношування контактних поверхонь в порівнянні, наприклад, з пером і замком лопатки. При збільшенні робочих температур і ресурсу сучасних авіадвигунів різко інтенсифікуються процеси, що призводять до пошкодження і руйнування контактних поверхонь лопаток, що обмежує термін їх служби і надійність.

Титанові сплави, не зважаючи на всі їх переваги, мають низькі характеристики зношування, що призводить до необхідності вирішення питань збільшення ресурсу роботи деталей, які виготовляються з даних матеріалів, а також проблеми зміцнення і ремонту зношуваних поверхонь. З науково-практичного досвіду різного роду підрозділів по ремонту авіаційної техніки відомо, що одним найбільш вигідних та ефективних способів ремонту багатьох деталей двигунів є зварювання. Проте результати досліджень механізму зношування контактних поверхонь, дозволяє зробити висновки, що оптимальним варіантом зміцнення робочих лопаток є створення на зоні зношування шару з високожаростійкого і зносостійкого матеріалу, відмінного від матеріалу лопатки, термодинамічно сумісного при температурі експлуатації з матеріалом лопатки.

Метою даних досліджень було визначення впливу напайки зносостійкого матеріалу на структуру поверхонь бандажних полицок лопаток компресора.

Для досягнення поставленої мети в процесі роботи були поставлені наступні завдання:

- дослідити мікроструктуру зразків, виготовлених зі сплаву VT3-1 та зразків з напайкою зносостійкого матеріалу (реліту);
- провести спектральний аналіз хімічного складу зразків, виготовлених із титанового сплаву VT3-1 та хімічного складу напайки;
- на основі отриманих результатів провести порівняльну характеристику досліджуваних зразків та встановити вплив напайки зносостійкого матеріалу на структурний стан поверхні бандажних полицок.

Основою для проведення структурного аналізу служила оптична металографія. Дослідження проводились з допомогою оптичних мікроскопів: МИМ-10 при збільшенні до 500 разів, що дало можливість вивчити та аналізувати стан міжзеренних границь, форму та розмір зерен, а також виділення та розподіл вторинних фаз. Вивчення мікроструктури титанового сплаву ВТЗ-1 проводилось на мікрошліфах з основи, виготовлених різними способами, а також для бандажних полицок, на які було нанесене покриття зносостійкого матеріалу (реліту), на одній полицці покриття якісне, на іншій – дефектне. Структура сплавів вивчалась після хімічного травлення шліфів. Травлення шліфів проводилось реактивом Кроля [2,3] за кімнатної температури з нанесенням краплі травника на поверхню мікрошліфа протягом 10...15с. Після цього травник змивали проточною водою, а шліф висушували фільтрувальним папером.

Сплав ВТЗ-1 відноситься до системи Ti-Al-Cr-Mo-Fe-Si (таблиця 1) і є одним з найбільш освоєних у виробництві сплавів [4]. Після ізотермічного відпалу має ($\alpha+\beta$)-структуру, яка забезпечує високу термічну стабільність і пластичність. Після загартування сплаву ВТЗ-1 з температури 970 С утворюється голчатий α' мартенсит з невеликою кількістю $\beta_{\text{нест.}}$ який розпадається при наступному старінні (600 °С) на дисперсну суміш α - і β -фаз, що призводить до зміцнення сплаву. ВТЗ-1 жароміцний сплав, який призначений для довготривалої роботи при 400...450 С. Сплав у відпаленому стані може працювати при температурі 400 °С необмежену тривалість часу, при температурі 450 С – 3000 годин. Допустимий час роботи термічно зміцненого сплаву при температурі 400 С становить 1000 годин, а при температурі 450 С – 500 годин. Сплав добре зварюється.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву ВТЗ-1, у відсотках

Ti	Al	Mo	Cr	Fe	i
Основа	6,0	2,3	2,0	0,5	,3

Проблеми низької зносостійкості вирішуються напайкою розробленого нового композиційного матеріалу на основі карбіду вольфраму (реліту) та припою ВПр16 в якості в'язучого.

Реліт – литий карбід вольфраму WC-WC₂ (таблиця 2), отримується у вигляді крупних зерен плавкою з подальшим дробленням злитків або розбризуванням розплавів.

Здатність реліту зберігати достатньо високу твердість і чинити опір деформації при високій температурі в поєднанні із задовільною міцністю є важливою перевагою перед іншими інструментальними матеріалами. Він застосовується в основному для зміцнення поверхонь деталей, які працюють при абразивному зношуванні. Його застосування дозволяє в 2...4 рази збільшити термін служби деталей механізмів і машин, які швидко зношуються [5].

Таблиця 2

Хімічний склад реліту, у відсотках

W	C		Домішки, не більше	
	загальний	вільний	Fe	Si
95,5 – 96,0	3,7 – 4,0	0,05, не більше	0,2	0,07

Припій ВПр16 на титановій основі (таблиця 3), виготовляється методом порошкової металургії. Припій забезпечує високу корозійну стійкість паяних з'єднань, мінімальну ерозію, технологічність та жаростійкість міцнісні властивості шва не нижчі від властивостей основних матеріалів.

Таблиця 3

Хімічний склад припою ВПр16, у відсотках

Ti	Cu	Zr	Ni	Домішки, не більше	
				O	Ca
Основа	21,0 – 24,0	11,0 – 14,0	8,0 – 10,0	0,3	0,1

Отриманий матеріал суміщає високу твердість армуючих частин карбіду вольфраму з міцним їх з'єднанням як між собою, так і з підкладкою (титановою деталлю) завдяки матеріалу в'язучого, при взаємодії з якою утворюється міцний металічний зв'язок, який визначає високу

працездатність даного матеріалу.

Для дослідження впливу напайки на структуру і властивості бандажних полицок лопатки вирізались наступні зразки:

- зразок зі сплаву ВТЗ-1 без напайки;
- зразок з бандажної полицки з дефектною напайкою реліту;
- зразок з бандажної полицки з якісною напайкою реліту.

На рис. 1 зображені бандажні полицки після напайки зносостійкого матеріалу.

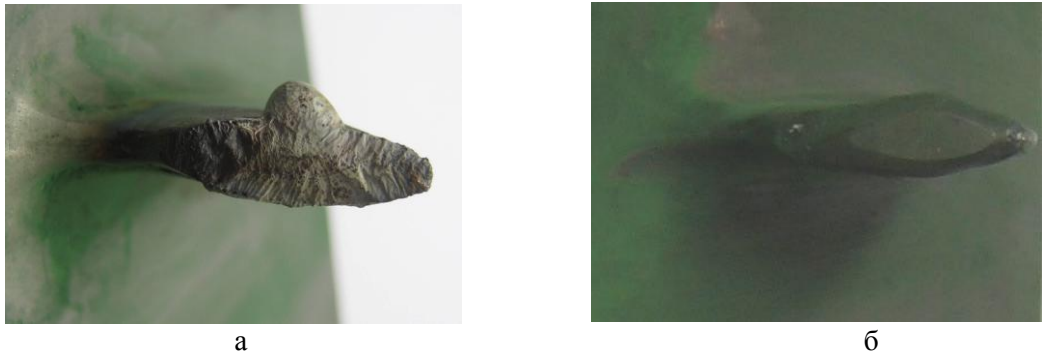


Рис. 1. Бандажні полицки лопатки компресора ГТД з дефектною (а) та якісною (б) напайкою зносостійкого матеріалу

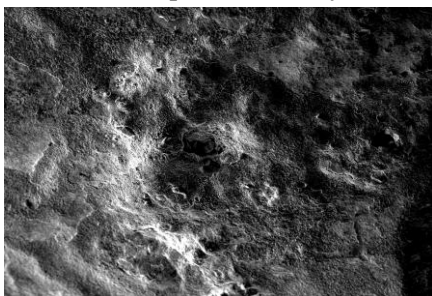
Елементний склад зразків визначали методом рентгенівського мікроаналізу і електронної мікроскопії. На рисунку 1 зображені спектри від титанового сплаву ВТЗ-1. На вставці наведено розрахунок елементного складу сплаву в відсотках від маси. Слід відмітити, що спектри зняті від одного і того ж зразка тільки з різних локальних ділянок. Мікроаналіз показує, що вони майже не відрізняються за елементним складом. Основними складовими поверхні є Ті ~ (86,29...86,71) % і Al ~ (8,08...8,09) %, окрім цього присутні також Мо, Cr, Si і Fe і на окремих ділянках V (таблиця 4).

Таблиця 4

Кількісний аналіз зразка в різних точках при прискорюючому напруженні 20 кВ

Точки	Вміст хімічних елементів, %							
	Al	Si	Ti	V	Cr	Fe	Mo	C
1	8,08	0,77	86,29	0,51	1,66	0,35	2,33	10,00
2	8,08	0,77	86,29	0,51	1,66	0,35	2,33	10,00
3	8,09	0,77	86,71	-	0,75	0,34	2,34	10,00

На рисунку 2 представлені зображення поверхні дефекту покриття. Тут присутні ділянки з різним забарвленням, від дуже темних, сірих і до світлих ділянок, різної шорсткості і форми, а також є подекуди невеликі тріщини (які не проходять на товщину покриття). Дані тріщини виникають у момент швидкого охолодження поверхневого шару покриття після його швидкого розплавлення і через дію стимулюючих сил відбувалося швидке розтріскування поверхні.



а



б

Рис.2. Поверхня дефектної ділянки а – $\times 80$ б – в режимі СОМРО $\times 1000$:
1- сіра, 2 – світла, 3 – зачищена ділянки

В деяких місцях взагалі можна побачити явний контур застиглих деформованих частинок. На поверхні також чітко помітно окремі рівні темні ділянки покриття, що мають явну зернисту структуру. Спостерігається також присутність западин з сильно рельєфним дном і темними і світлими ділянками. Локальний аналіз цих ділянок показує, що вони дуже відрізняються за елементним складом.

На сірих ділянках (рисунок 2, б) в основному присутній Ті (90,94 %) з невеликими добавками Сu (2,09 %), Zr (5,11 %) і незначною кількістю інших елементів. На світлих ділянках (рисунок 2, б) присутній великий спектр елементів (Ті ~ 59,87 %, Сu – 26,51 %, Ni ~ 5,83%, Zr – 5,75 % і в невеликих кількостях Al, V, Cr.

Таблиця 5

Кількісний аналіз зразка на різних ділянках при прискорюючому напруженні 20 кВ

Ділянка	Вміст хімічних елементів, %							
	Al	Ti	V	Cr	Ni	Cu	Zr	Su
сіра	0,47	90,94	0,68	0,29	0,42	2,09	5,11	10,00
світла	1,38	59,87	0,46	0,00	5,83	26,51	5,75	10,00
зачищена	0,72	58,85	0,26	0,07	9,67	20,42	1,02	10,00

Кількісний склад якісної напайки подано у таблиці 6

Таблиця 6

Хімічний склад якісної напайки у відсотках при прискорюючому напруженні 20 кВ

Al	Ti	V	Cr	Ni	Cu	Zr	Сум
0,47	90,94	0,68	0,29	0,42	2,09	5,11	100,00

Можна помітити, що в порівнянні з основою напайка містить знижену кількість Ті, Al і підвищений вміст Сu, Ni, Zr.

Дані металографічні дослідження дали можливість: визначити морфологію, кількість, форму, розміри та розташування структурних складників; дослідити структурні зміни внаслідок дифузійного очищення сплаву при різних температурах; виявити мікроскопічні порушення суцільності металу: тріщини, порожнини, пористість, тощо.

Структура основного титанового сплаву ВТ3-1 (рисунок 3) являє собою двофазний ($\alpha+\beta$)-сплав. Структура титанового сплаву характеризується наявністю зерен вихідної β -фази, оточеної α -фазою. Зерна β -фази дрібні, мають сферичну форму і світле забарвлення. α -фаза виділяється на границях β -фази в процесі охолодження, α -фаза протравилась значно сильніше ніж β -фаза.



Рис. 3. Мікроструктура зразків титанового сплаву ВТ3-1

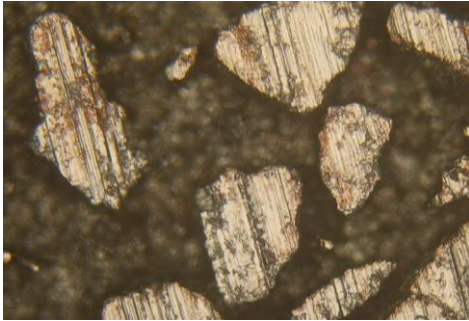
Структура в основному однорідна, хоча помітно деяку неоднорідність: локальні скупчення легуючих елементів або невеликого розміру пори.

Мікроструктура релітової напайки двофазна: світлі крупні зерна карбіду вольфраму и

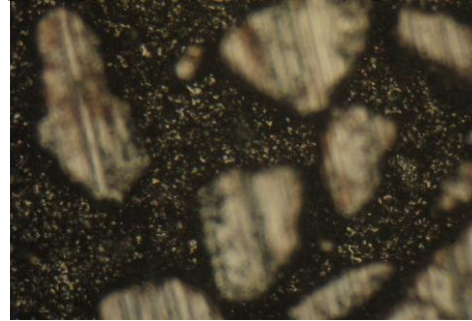
протравлені темні ділянки припою ВПр16. Світлі зерна – локальні скупчення порошку реліту – мають високу твердість і міцність, твердий розчин WC в припої – менш твердий, але більш в'язкий, служить в'язучим (рисунок 4).

Дефектна напайка (рисунок 4) має неоднорідну структуру: великі нерівномірно розподілені зерна реліту, оточені підвищеною кількістю припою. На зернах реліту спостерігаються сліди корозії. З рисунку 4 а видно, що зерна реліту, на відміну від припою не протравились, зважаючи на те, що травлення проводилось реактивом Кролля призначеним для визначення структури титанових сплавів.

На рисунку 4 б видно, що припій має дрібнозернисту структуру, яка складається з β -фази.



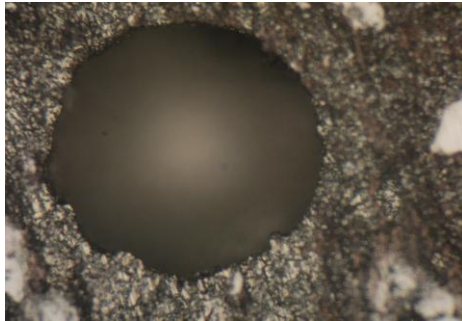
а



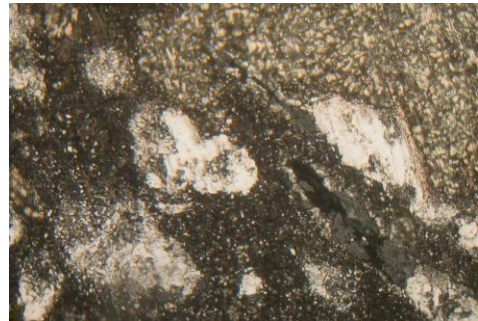
б

Рисунок 4 Мікроструктура релітової напайки

На окремих ділянках дефектної напайки покриття є нещільним (рисунок 5): на фотографії можна помітити присутність ділянки з структурою основного сплаву лопатки ВТ3-1. Також на даній ділянці присутня газова пора. Вона має значні розміри (до 1 мм), гладкі, рівні стінки і краї.



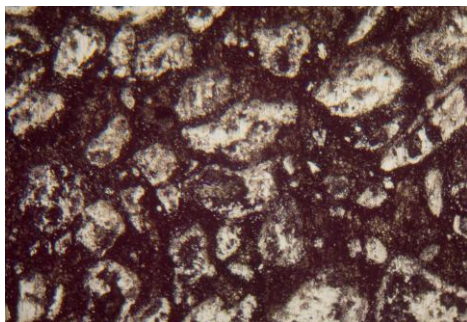
а



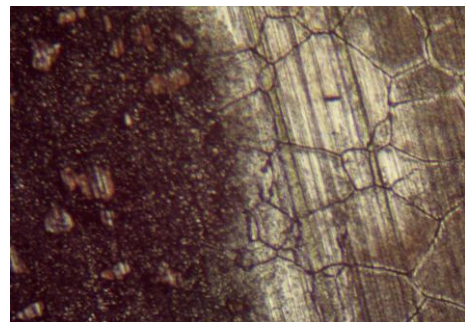
б

Рисунок 5 Мікроструктура дефектної напайки: а – пора, яка присутня на поверхні, б – перехідна зони дефектної напайки

На рисунках 6 а б подано фотографію перехідної зони: напайка – основний метал, для якісної напайки.



а



б

Рис. 6. Мікроструктура якісної напайки: а – основна ділянка напайки; б – перехідна зона

Було досліджено границі переходу від основного металу до напайки. Границя між дефектною напайкою та основним металом (рисунок 5, б) нерівна, характеризується наявністю дефектів (пори, тріщини). Зерна реліту мають різний розмір і розміщені нерівномірно. Покриття зносостійкого матеріалу нещільне, в деяких місцях на поверхні видно зерна основного сплаву. Якісна напайка (рисунок 6) характеризується рівномірним розподілом реліту та достатньою

кількістю припою. Вона покриває всю поверхню досліджуваного зразка утворює щільне якісне бездефектне покриття, яке забезпечує високу твердість та міцність в процесі роботи лопатки.

З рисунку 6 б видно, що перехідна зона між якісною напайкою та основним металом рівна, однорідна та бездефектна. Поблизу границі спостерігається знижена кількість реліту (зерна невеликі нерівномірно розподілені).

Висновки. Актуальністю проблеми дослідження і контролю якості та характеру поверхні матеріалів обумовлена тим, що з контактною дією і контактною деформацією пов'язані службові властивості матеріалів, які працюють в умовах тертя, втоми, схоплювання, зношування.

Результати локального аналізу вказують на однорідність хімічного складу зразка і його відповідність хімічному складу ВТЗ-1 вказаному в ГОСТ 19807-91.

При дослідженні поверхні зразка з напайкою виявлені ділянки з різним забарвленням, різної шорсткості і форми. Також є ділянки у вигляді невеликих за формою застиглих краплин, здуття і "кратерів". Судячи з характеру мікрорельєфу поверхні можна наголосити на наявності дуже високої шорсткості. Така поверхня утворюється очевидно в результаті часткового оплавлення порошку напайки.

Висока шорсткість поверхні напайки є недоліком, який заважатиме реалізації гідродинамічного режиму змазування, проте при граничному змазуванні або при недостатній кількості мастильного матеріалу наявність занадто рівних поверхонь може призвести до підвищення молекулярно-механічного зношування, адгезії, схоплювання та задирання. В процесі припрацьовування відбувається поступовий перехід до встановленої рівноважної (експлуатаційної) шорсткості. Спектральний аналіз зроблений на ділянці напайки вказує на однорідний розподіл хімічних елементів на поверхні зразка. Неоднорідність хімічного складу могла виникнути в результаті порушення технологічного процесу напайки. В результаті чого полочка є непридатною до експлуатації через наявність на деяких ділянках дуже високого вмісту Ті, який має низьку теплопровідність, схильність до налипання та задирання.

Мікроструктуру напайки містить дуже крупні зерна з чіткими границями. Такі зерна утворюються без сумніву під час СВЧ нагрівання та витримки у процесі напайки реліту, оскільки відома схильність титану до швидкого росту зерна при високих температурах. Наявність чітких, широких границь зерен сплаву ВТЗ-1 під дефектною напайкою пояснюється скупченням пор та інших дефектів саме на границях, такі скупчення дефектів травляться сильніше, ніж основний метал. Сплав має голчасту схожу на мартенситну загартовану структуру, яка утворюється внаслідок швидкого охолодження на повітрі після напайки.

Порівнюючи перехідні зони між якісною напайкою та основним металом і між дефектною напайкою та основним сплавом варто відмітити, що якісна напайка має рівний поступовий бездефектний перехід. В той час як границя між дефектною напайкою та основним металом нерівна, характеризується наявністю дефектів (пори, тріщини).

Мікроструктура релітової напайки двофазна: світлі крупні кристали WC и протравлені темні ділянки припою ВПр16. Світлі зерна дуже тверді, дрібнозерниста рівновісна структура припою – менш тверда, але більш в'язка, служить в'язучим. В процесі напайки не відбувається фазових реакцій, що кардинально змінюють склад і структуру армуючих частин. Тому в структурі напаяного шару частки реліту, які забезпечують високу стійкість проти зношування покриття, повинні бути розподілені рівномірно і з'єднані між собою і основним матеріалом припоєм. Дефектна напайка має неоднорідну структуру: великі нерівномірно розподілені зерна реліту, оточені підвищеною кількістю припою. Він має дрібнозернисту структуру, яка складається з β -фази. Важливим фактором, який впливає на утворення газової поверхні, є деякі моменти технології підготовки до проведення напайки. Необхідна ретельна підготовка деталей перед напайкою з обезжирюванням зміцнюваної поверхні, а також перевірка на зразку якості аргону. Якщо в процесі напайки на зразку з'являється окислена поверхня, балон з аргонем треба замінити, так як в ньому міститься великий процент вологи.

Несуцільність може бути отримана при напайці також через недостатність рідкої фази – припою в'язучого. Якщо об'єм проміжків між армуючими частками перевищує об'єм розплавленого припою, то суцільне покриття не може бути отримано. Цей небажаний ефект в виробництві може бути отриманий при напайці сумішшю порошоків реліту і припою, якщо кількість реліту значно перевищує кількість припою. По мірі використання шихти з певної ємності чи при тривалому її невикористанні за рахунок різниці густин порошоків реліту і припою з часом відбувається поступове осідання реліту в нижню частину ємності, тобто відбувається зменшення

долі участі припою в процесі напайки, що може викликати підвищену пористість. Для уникнення даного явища необхідно використовувати невеликі об'єми змішаних компонентів і безпосередньо перед нанесенням на зміцнювану поверхню їх перемішувати.

Якісна напайка на досліджуваному зразку характеризується рівномірним розподілом реліту та достатньою кількістю припою. Вона покриває всю поверхню досліджуваного зразка утворює щільне якісне бездефектне покриття, яке забезпечує високу твердість та міцність в процесі роботи лопатки. Практично на товщині напаяного шару 0,2...0,3 мм від зміцнюваної поверхні розподілення армуючих часточок носить майже рівномірний характер.

1. Гецов А.Б. Детали газових турбин. – Л.: Машиностроение, 1982.– 296 с.
2. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиа-двигателестроении. – М.: Высшая школа, 1999. – 525 с.
3. Мовчан Б.А., Малашенко И.С. Высокотемпературная защита материалов. – Л.: Наука, 1981. – 237 с.
4. Абраимов Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия. – М.: Машиностроение,