

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Полярус Олени Миколаївни** на тему:
**«Фізико-хімічні принципи вибору структурних складових композиційних матеріалів
на основі систем NiAl/NiTi - MeB₂ з підвищеними зносо- та корозійною стійкістю»**,
поданої на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство»
Технічні науки (13 Механічна інженерія)

Актуальність обраної теми дисертації

Дисертаційна робота Полярус О. М., що подана до захисту, спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми в галузі матеріалознавства, що стосується прогнозування та керуваності структурно-фазового складу, технології, експлуатаційних характеристик нових композиційних матеріалів на основі систем «інтерметалід NiAl(NiTi) – MeB₂», призначених для умов роботи на тертя та знос без змащування в широкому діапазоні температур та дії агресивного середовища.

Дисертаційна робота Полярус О. М. пов'язана з виконанням наступних науково-дослідних робіт в рамках наукових програм Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України: III-33-12 (Ц) «Розробка принципів структурної інженерії зносостійких (на основі твердих сплавів) покриттів нового покоління з використанням електрофізичних методів поверхневої обробки» (0112U2099, 2012-2016); III-15-13 «Розробка фізико-хімічних принципів створення композиційних матеріалів систем (Ni, Fe) Al-Me (IV)-B2 та покриттів із них з підвищеною корозійною стійкістю та зносостійкістю» (0113U000314, 2013-2015); I-2-15 «Розробка нових композиційних матеріалів та покриттів із них з підвищеними жаро- та зносостійкістю для захисту деталей авіаційної та наземної техніки» (0115U007090, 2015р); IV-6-16 «Розробка 4 нових композиційних матеріалів на основі інтерметалідів для захисту деталей суднобудівельної промисловості та гідроенергетичного обладнання від корозії та кавітаційного зношування» (0116U004895, 2016р); III-20-16 «Розробка технологічних принципів отримання нових зносо- й корозійностійких газотермічних та електроіскрових покриттів системи NiAl-CrB2 і дослідження їх поведінки в умовах високих (до T=1000°C) температур» (0116U004774, 2016-2018); II-8-16 (Р) «Розробка композиційних матеріалів системи TiCrB2-NiAlCr та технології нанесення захисних покриттів із них на деталі, що працюють в екстремальних умовах» (0116U002996, 2016-2020); I-3-17 «Нові композиційні матеріали та покриття для захисту деталей гідроенергетичного обладнання від кавітаційного та корозійного зношування» (0117U006185, 2017р); II-7-17 «Перспективні композиційні матеріали на основі інтерметалідів систем Ni-Al, Ni-Ti, Ti-Al, Fe-Al для захисту деталей двигунів автомобільної, авіаційної та гідроенергетичної промисловості» (0117U006184, 2017-2018 рр.); III-34-17 (Ц) «Розробка фізико-хімічних принципів створення нових композиційних порошкових матеріалів на основі самофлюсівних сплавів систем Ni(Fe)CrBSiC з добавками тугоплавких сполук титану та хрому для газотермічних та електроіскрових покриттів з підвищеною зносостійкістю» (0117U002452, 2017- 2021); III-11-19 «Розробка технологічних принципів отримання нових композиційних матеріалів на основі інтерметалідів NiAl(Ti) для захисту деталей гідроенергетичного обладнання від дії агресивних водних середовищ, корозійного та гідроабразивного зношування» (0119U100661, 2019-2021); III-3-22 «Технологічні основи формування нових композиційних матеріалів і покриттів на основі боридів титану, хрому, алюмінію для роботи в умовах агресивних корозійних середовищ» (0122U001218, 2022-2024), які затверджені відповідними розпорядженнями Президії НАН України та постановами Бюро ВФТІМ НАН України.

Науково-технічні роботи, що виконувались у межах перелічених наукових тем, є свідченням задоволеності науково-дослідних робіт з даного напрямку, і, відповідно, вказують на актуальність дисертаційного дослідження Полярус О. М.

З погляду на основні особливості з розробки зносостійких композиційних матеріалів та покриттів авторкою в дисертації було узагальнено результати робіт таких вчених, як Борисов Ю.С., Косторнов А.Г., Скороход В.В., Олікер В.Ю., Панасюк А.Д., Лавренко В.А., Ковальченко М.С.,

Подчерняєва І.О., Штерн М.Б., Фролов Г.О., а також закордонні вчені, зокрема Д. Віттенбергер (Whittenberger J.D.), М. Рамазані (Ramazani, M), А. Пассероне (Passerone, A), К. Ванг (Wang Q.W.), А. Шокаті (Shokati A.A.), Р. Мірта (Mitra R.), С. Кумар (Kumar S.), Р. Дарола (Darolia, R.), М. Хендерсон (Henderson M.B.) та ін.

Як відомо, захист деталей газотурбінних двигунів (ГТД) та розробка нових матеріалів є надзвичайно важливими через постійне зростання вимог, що висувуються для подовження терміну роботи двигунів. Ці питання вирішуються шляхом розробки нових композиційних матеріалів, а також порошків з них для подальшого нанесення захисних покриттів.

Дисертантка Полярус О. М. проаналізувала, що у теперішній час широко застосовуються серійні порошки для нанесення захисних покриттів фірм Castolin Eutectic (Німеччина) або Oerlikon (Sulzer) Metko (США) на основі оксидів, карбідів, силіцидів, карбонітридів та інших.

Однак недоліком таких порошків є висока вартість та часом обмеженість використання у високотемпературних вузлах тертя. Ще одним недоліком використання таких серійних порошків є те, що вони є механічною сумішшю. Перелічені негативні фактори призводитимуть до сегрегації частинок порошку в процесі напилення.

Поряд з цим авторка також показала, що основним матеріалом для захисту ГТД від дії високих температур є інтерметалід NiAl та матеріали на його основі.

Проте недоліком при використанні даного матеріалу у вузлах тертя є те, що він починає деформуватись при температурах вище 550°C. Це призводить до руйнування сформованої оксидної плівки Al₂O₃, подальшого схоплювання контактних поверхонь тертя та, як наслідок, реалізації адгезійного механізму зношування, який є неприпустимим.

Наведені аргументи стали підґрунтям для формулювання дисертанткою Полярус О. М. актуальної науково-технічної проблеми, що полягала у підвищенні зносо- та корозійної стійкості покриттів в умовах тертя ковзання без мастила в широкому діапазоні температур (20-800°C) та агресивної дії водних середовищ шляхом розробки та апробації нових підходів щодо створення композиційних матеріалів на основі систем «інтерметалід NiAl(NiTi) – MeB₂» з керованим структурно-фазовим складом.

Вирішення сформульованої дисертанткою Полярус О. М. науково-технічної проблеми відкриває шляхи для запобігання реалізації адгезійного механізму зношування, руйнування та схоплювання контактних поверхонь тертя, що забезпечує захист деталей газотурбінних двигунів та збільшує терміни їх роботи.

Наведені факти характеризують тему рецензованої дисертації як актуальну, та підтверджують її відповідність вимогам за ознакою «актуальність обраної теми дисертації».

Оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна

Обґрунтованість наукових положень дисертаційного дослідження Полярус О. М., їх переконливість, ґрунтовність висновків та рекомендацій, виконаних за результатами роботи, обумовлені використанням для їх одержання великої кількості різнопланових методів досліджень та найсучаснішого експериментального обладнання. Серед них використовувався системний підхід до комплексу експериментальних напрямів досліджень на основі аналізу й узагальнення виконаних розробок з використання матеріалів і технологічних процесів їх одержання.

У роботі було використано обширний комплекс найсучасніших методів та обладнання для виконання широкомасштабних експериментальних досліджень.

Достовірність одержаних у дисертаційній роботі результатів, положень, висновків і рекомендацій підтверджено співпадінням результатів, отриманих різними методами, застосуванням сучасного високоточного експериментального обладнання, а також апробацією результатів досліджень в умовах виробництва, про що свідчить затверджена технічна документація, яку наведено у «Додатках» до дисертації.

Результати різнопланових досліджень, що отримані авторкою з використанням перелічених методів, надали надійну і взаємоузгоджену інформацію про особливості структуроутворення та комплексу властивостей високоефективних композиційних матеріалів на основі систем «інтерметалід NiAl(NiTi) – MeB₂» з керованим структурно-фазовим складом, одержаних за розробленими технологіями, відпрацьованими в процесі виконання дисертації.

Обґрунтовані положення і висновки рецензованої роботи не вступають у протиріччя з фундаментальними основами матеріалознавства, порошкової металургії, металознавства та термічної обробки металів.

Вирішення поставленої науково-технічної проблеми дозволило Полярус О. М. одержати низку нових результатів, що являть собою *наукову новизну* дисертації. Вважаю за необхідне наголосити на найважливіших положеннях, які отримані вперше:

1. *Вперше* науково обґрунтовано фізико-хімічні принципи вибору структурних складових композиційних матеріалів на основі систем $\text{NiAl}(\text{Ti})\text{-MeB}_2$ ($\text{Me} = \text{Ti, Cr, Zr}$) для підвищення зносо- та корозійної стійкості шляхом дослідження процесів змочування та фазоутворення при міжфазній взаємодії компонентів, вивчення механізмів зношування в широкому діапазоні температур, швидкостей та навантажень, а також в умовах дії агресивних середовищ.

2. *Вперше* запропоновано та науково обґрунтовано технологічні підходи створення нових композиційних порошкових матеріалів (КПМ) на основі інтерметалідів NiAl та NiTi з добавками тугоплавких боридів, які полягають в консолідації порошків $\text{NiAl}(\text{Ti})\text{-MeB}_2$ шляхом рідкофазного спікання або гарячого пресування з подальшим подрібненням. Саме такий підхід дозволяє запобігти сегрегації під час нанесення газотермічних покриттів, що привело до суттєвого підвищення зносо- та корозійної стійкості покриттів порівняно з вихідними інтерметалідами.

3. *Вперше* встановлено, що для систем $\text{NiAl-Ti}(\text{Zr})\text{B}_2$ спостерігається формування контактних кутів змочування 15° та 22° відповідно, а контактна зона взаємодії характеризується утворенням взаємних обмежених твердих розчинів. Інтерметалід NiAl повністю розтікається по поверхні дибориду хрому CrB_2 ($\Theta=0^\circ$), а в зоні контакту в результаті хімічної взаємодії утворюється борид NiCrB . Утворення таких боридних фаз на межі дибориду хрому та інтерметаліду позитивно впливає на роботу композиту в умовах високих температур завдяки зменшенню напруженості між матрицею та CrB_2 , яка виникає внаслідок великої різниці коефіцієнтів термічного розширення вихідних компонентів.

4. *Вперше* встановлено механізми високотемпературного окиснення розроблених композитів систем $\text{NiAl-Ti}(\text{Cr, Zr})\text{B}_2$, які полягають в селективному окисненні боридів та інтерметаліду. На поверхні інтерметаліду утворюється тонкий шар щільного оксиду алюмінію, який екранує доступ кисню до інтерметаліду і зупиняє подальший процес його окиснення. На боридних зернах утворюються складні оксиди бору та відповідного металу. Ці оксиди мають дискретну структуру, тому їх окиснення з часом не припиняється, що призводить до "об'ємного" ефекту. Найбільш інтенсивно при цьому окиснюються бориди цирконію та титану з утворенням на їх поверхнях оксидів товщиною 480 та 460 нм відповідно.

5. *Вперше* встановлено зміну механізму зношування в інтерметаліді NiAl з адгезійного на оксидний завдяки введенню добавок $\text{Cr}(\text{Ti, Zr})\text{B}_2$, що призвело до суттєвого підвищення зносостійкості газотермічних композиційних покриттів майже в 2 рази в порівнянні із вихідним NiAl . Встановлено, що добавки диборидів титану, хрому і цирконію в інтерметалід NiAl з одного боку сприяють формуванню шару оксидів на поверхнях зерен боридів, які виконують роль твердого мастила, а з іншого боку – підвищують міцність покриття за рахунок зниження пластичних деформацій.

6. *Вперше* проведено високотемпературні трибівипробування оксидних покриттів ZrO_2 (YSZ), TiO_2 , Cr_2O_3 в парі з інтерметалідним покриттям NiAl . Встановлено, що найбільш ефективним з точки зору зносостійкості є покриття Cr_2O_3 . Отримані дані корелюють з результатами трибівипробувань розроблених композиційних покриттів, що дозволяє рекомендувати їх в якості зносостійких для використання у високотемпературних вузлах тертя.

7. *Вперше* для композитів систем NiAl-MeB_2 проведено дослідження "Scratch tests", що моделюють процеси абразивного зношування. Встановлено, що, завдяки дисперсному зміцненню боридами інтерметаліду, при дряпанні не відбувається руйнування попередньо сформованої оксидної плівки, як на боридних зернах, так і на матриці NiAl . На відміну від цього для вихідного NiAl характерним є відшарування сформованого на поверхні оксиду алюмінію в процесі випробувань.

8. *Вперше* встановлено механізм високотемпературного термоерозійного зношування композиційних матеріалів на основі NiAl з добавками диборидів, який полягає в тому, що для розроблених КМ процес деформації поверхні ускладнений завдяки наявності боридних зерен, які

перешкоджають введенню частинок абразиву в матеріал при їх зіткненні з поверхнею композиту, при цьому величина зносу розроблених композиційних матеріалів у 1,5-2 рази менша в порівнянні зі зразками зі сталі 12Х18Н10Т та ливарним жароміцним сплавом ЖС 26.

9. *Вперше* встановлено механізм корозійної стійкості композитів NiTi-CrB_2 , який полягає в тому, що в процесі отримання композитів систем NiTi-CrB_2 та NiTi-ZrB_2 внаслідок інтенсивної хімічної взаємодії між вихідними компонентами утворюється додатково борид TiB_2 , а вихідний інтерметалід NiTi перетворюється на Ni_3Ti , який характеризується більшою корозійною стійкістю порівняно із NiTi . Експериментально встановлено, що розроблений композит $\text{NiTi-30\%CrB}_2$ практично не кородує при тривалій витримці у морській воді, має в 1,3 рази вищу кавітаційну стійкість і в 1,7 рази вищу гідроабразивну стійкість порівняно зі сталями, що використовуються у теперішній час.

З моєї точки зору, вищенаведене позитивно характеризує наукові напрацювання дисертантки Полярус О. М. і свідчить про вагомість отриманих результатів та узагальнень, що дозволило одержати реальні можливості їх практичного застосування.

Значимість результатів дисертаційної роботи для науки і практики

Наукова та практична значимість дисертації Полярус О. М. полягає в тому, що авторка на основі виконаних досліджень встановила технологічні режими отримання композиційних порошкових матеріалів систем $\text{NiAl}(\text{NiTi})\text{-MeB}_2$ для нанесення газотермічних покриттів з високим рівнем зносо- та корозійної стійкості. За результатами високотемпературних триботехнічних випробувань встановлено, що розроблені композиційні покриття мають майже в 2 рази вищу зносостійкість в порівнянні з вихідним інтерметалідом.

Інноваційний науковий підхід дисертантки дозволив отримати вагомі практичні здобутки. Так, в результаті промислово-технічних випробувань на АТ "Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – ІНЖИНІРІНГ" газотермічних композиційних покриттів $\text{NiAl-15-30мас\%CrB}_2(\text{TiB}_2, \text{ZrB}_2)$, нанесених на опірні шийки відцентрованого секційного насосу ЦНС 180-1900-3Т-М, встановлено, що стійкість поверхні валу з розробленими покриттями збільшилась залежно від складу матеріалу в 1,3-1,8 рази порівняно з матеріалами, що застосовуються зараз.

Окрім цього в результаті комплексних випробувань експериментальних зразків композиційних матеріалів $\text{NiTi-30мас\%CrB}_2(\text{TiB}_2, \text{ZrB}_2)$ на корозійну та гідроабразивну стійкість на ТОВ "Композиційні системи" (Запоріжжя) встановлено, що розроблені матеріали відповідають вимогам, які висуваються до поверхонь, що зазнають значного корозійного, кавітаційного та гідроабразивного зношування, а саме: раковини, відлущування і відколи відсутні.

Не менш значущим є те, що у процесі виробничих випробувань встановлено, що стійкість розроблених матеріалів у морській воді у 1,5 – 1,8 рази порівняно з матеріалами, які застосовують у теперішній час. За результатами промислово-технічного випробування на ТОВ "ТРІЗ ЛТД" (Суми) захисних втулок масляних ущільнень відцентрованого насоса з нанесеними на його поверхню газотермічними покриттями з композиційних порошків $\text{NiAl-15-30мас\%CrB}_2(\text{TiB}_2, \text{ZrB}_2)$ встановлено, що нанесені покриття відповідають вимогам до якісних показників поверхонь тертя, а саме: відлущування, пори, раковини і відколи відсутні, шорсткість в межах вимог робочих креслень і допустимих значень, а стійкість поверхонь захисних втулок із розробленими покриттями збільшилась в 1,2-1,3 рази порівнянні із втулками, що застосовуються на сьогодні.

Вважаю за необхідне зазначити, що важливим практичним напрацюванням дисертантки є результати проведених стендових випробувань у ДП "Конструкторське бюро "Південне" ім. М. К. Янгеля" лопаток турбокомпресору турбореактивного двоконтурного двигуна, торці яких були зміцнені покриттям $\text{NiAl-15\%CrB}_2$. Випробування показали, що їх зносостійкість за $T=500^\circ\text{C}$ в 1,5-1,8 разів вища, порівняно з лопатками, типовими для даної конструкції.

Дисертанткою Полярус О. М. видано рекомендації щодо застосування розроблених композиційних матеріалів. Розроблені композиційні матеріали $\text{NiTi-30мас\%CrB}_2(\text{TiB}_2, \text{ZrB}_2)$ можуть бути рекомендовані для застосування у гідроенергетичній промисловості, як компактні матеріали, так і покриття на їх основі для захисту деталей, що працюють в умовах дії агресивних водних середовищ, зокрема, морської води.

Розроблені композиційні порошкові матеріали $\text{NiAl-15-30мас\%CrB}_2(\text{TiB}_2, \text{ZrB}_2)$ можуть бути рекомендовані для нанесення газотермічних покриттів на вали відцентрованих секційних насосів,

що працюють в умовах високотемпературного зношування без мастила, а також для нанесення покриттів на захисні втулки масляних ущільнень відцентрованих насосів, що працюють в умовах механічного, абразивного, кавітаційного, втомлювального та інших видах зношування.

Вищевказане переконливо свідчить про високу наукову та практичну значимість виконаного Полярус О. М. дисертаційного дослідження.

На мою думку різнобічні дослідження, наукові та практичні результати яких представлено у дисертації, відрізняються системністю, коректністю та обґрунтованістю накопиченого фактажу, який отримано із застосуванням сучасних методів досліджень та обладнання, і підтверджених практичною апробацією в умовах промислового виробництва.

Повнота викладу основних результатів дисертації

Основні результати рецензованої дисертаційної роботи Полярус О. М. опубліковані у 51 наукових публікаціях, з них 17 статей – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, з яких 9 мають квартиль Q1 та Q2, решта – Q3 та Q4; 9 статей у виданнях, що входять до Переліку наукових фахових видань України категорій А і Б; 3 статті у наукових виданнях, не включених до Переліку фахових; 22 публікації за матеріалами доповідей на міжнародних наукових та науково-технічних конференціях.

Всі опубліковані праці за темою дисертації виконані автором особисто та у співавторстві.

Загалом вимоги стосовно повноти публікацій та апробації результатів дисертації Полярус О. М. виконано у повному обсязі.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертація Полярус О. М. складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 354 сторінки, з них – 221 аркуш основного тексту; дисертація містить 113 рисунків, 10 таблиць, 19 формул, 8 додатків на 43 аркушах. Список використаних джерел нараховує 461 найменування.

Вступ дисертації достатньо повно розкриває сутність та сучасний стан науково-технічної проблеми, аргументи, що зумовили її постановку; авторкою обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, наведено зв'язок роботи з науковими програмами і темами, мету роботи, завдання, об'єкт, предмет і методи досліджень, сформульовано наукову новизну, визначено практичну значимість одержаних результатів, наведено особистий внесок здобувача, апробацію результатів досліджень, публікації за темою дисертації та структуру роботи.

У **першому розділі** дисертантка Полярус О. М. докладно висвітлює сучасний стан питання та узагальнення щодо відомих розробок і тенденцій технологій нанесення покриттів. Зроблено глибокий аналіз інформаційних джерел стосовно розробки нових композиційних матеріалів з метою підвищення експлуатаційних властивостей робочих вузлів деталей авіаційної та гідроенергетичної промисловості.

Авторкою дисертації показано, що вивчення та розробка інтерметалідів, композиційних матеріалів і покриттів на їх основі — це важлива галузь матеріалознавства, яка охоплює широкий спектр застосувань, при цьому розробка нових композиційних матеріалів на основі інтерметаліду NiAl з добавками тугоплавких сполук, зокрема боридів, є важливим напрямком для створення класу зносостійких матеріалів високотемпературного призначення. Дисертанткою зазначено, що інтерметалід NiTi є високоефективним матеріалом для застосування в агресивних середовищах, таких як морська вода та хімічні реактори, завдяки своїй чудовій корозійній стійкості та механічним властивостям. Завдяки своїй здатності утворювати захисну оксидну плівку та стійкості до хлоридної корозії, цей сплав має потенціал для подальшого використання в різноманітних галузях, де необхідна висока надійність матеріалів.

Аналіз літературних джерел дозволив Полярус О. М. сформулювати 2 комплексних завдання: першим завданням дисертаційної роботи було розробити нові зносо- та корозійностійкі композиційні матеріали для нанесення захисних газотермічних покриттів для лопаток ГТД з підвищеними експлуатаційними характеристиками, а саме: ущільнюючі зносостійкі композиційні покриття для пар тертя "корпус турбіни/компресора – торець лопатки" та композиційні покриття на профіль лопатки для захисту від абразивного (вентилятор) та термоабразивного (компресор) зношування.

Другим завданням дисертаційної роботи було розробити нові композиційні матеріали і покриття на їх основі з високим рівнем корозійної та кавітаційної стійкості для захисту різноманітних деталей суднобудівельної промисловості та гідроенергетичного обладнання, тощо від гідро-абразивного зношування, а також від агресивної дії водних середовищ. Зокрема деталями або обладнанням для застосування розроблених матеріалів можуть бути відцентрові насоси, конус гідроциклону, лопатки мінігідротурбін та інше.

Як завершення розділу 1, проаналізувавши та узагальнюючи сучасні тенденції технологій нанесення покриттів, шляхом критичного аналізу дисертанткою було зроблено висновок, що на сьогодні виникла необхідність у комплексному дослідженні та розробці нових композиційних матеріалів та покриттів з керованим комплексом експлуатаційних властивостей, які реалізуються при роботі в умовах високих температур та агресивних середовищах.

Таким чином здобувачка Полярус О. М. концентрується на головному напрямку дисертаційного дослідження і на шляхах вирішення поставлених завдань.

Мені видається, що глибокий аналіз літературних вітчизняних і закордонних джерел інформації та наступні узагальнення аналітичних даних дозволили здобувачці Полярус О. М. переконливо обґрунтувати доцільність та затребуваність у виконанні досліджень з означеної теми, сформувати структурну схему дисертаційної роботи, визначити мету і завдання та окреслити шляхи їх реалізації.

У другому розділі дисертації здобувачка Полярус О. М. висвітлює узагальнену методологію виконання дисертаційної роботи. Автором сформовано методологічний підхід до виконання досліджень, який дозволив визначити послідовність проведення експериментів, спрямованих на досягнення сформульованої мети роботи.

У розділі 2 подається опис використаних в роботі матеріалів, наведено їх детальну характеристику, викладено методики дослідження, описано експериментальні установки.

Надалі у розділі 2 авторка подає описи сучасних методик і відповідного обладнання для досліджень.

Окремо дисертантка зупинилась на технологічних аспектах і показала, що покриття з розроблених композиційних порошкових матеріалів наносили на сталеві зразки методами плазмового та детонаційного напилення. Плазмове напилення здійснювали на установці УПУ-3Д у відкритій атмосфері з використанням в якості плазмоутворюючого газу суміші аргону і водню. Детонаційне напилення покриттів здійснювали за допомогою детонаційно-газової установки "Дніпро - 5 МА".

В рамках роботи проводили оптимізацію технологічних параметрів газотермічного напилення покриттів залежно від співвідношення металевої та тугоплавкої складових в КМ.

Поряд із стандартним дослідницьким обладнанням авторка використовувала оригінальне експериментальне устаткування. Так, триботехнічні випробування проводили в умовах тертя-ковзання без мастила на машині тертя МТ-68, розробленій в ПІМ НАН України при $T=500^{\circ}\text{C}$ та 800°C за схемою "pin-on-disc" в парі з контртілом – покриттям NiAl. Режими випробувань: навантаження в зоні контакту $P=8\text{ МПа}$, швидкість ковзання $V=1,5-1,8\text{ м/с}$, дистанція тертя $S=1000\text{ м}$. Температура в зоні тертя контролювалася вольфрам-регієвою термопарою ВР-5/20. Лінійний і ваговий знос покриттів визначався шляхом встановлення різниці між висотою і вагою зразків до і після тестування, використовуючи електронний штангенциркуль ШЦ-150-0.1 ГТО (ISO 3599-76) і аналітичні ваги ВЛР-200 (ISO 9001:2008).

Також в цьому розділі дисертантка подає детальну інформацію про обладнання і методики тонких досліджень з використанням мікроскопів Themis TEM FEI та Tecnaі G2 F20 (200kV) із блоком сканування (STEM), детектором висококутового кільцевого темного поля (HAADF) фірми Fishione та інтегрованою системою рентгенівської енергодисперсійної спектроскопії (EDS) EDAX. Тонкі фольги для TEM досліджень вирізали за допомогою скануючих мікроскопів Thermo Scios2 Dual-Beam SEM/FIB та FEI Quanta 3D – 200 Dual Beam FIB Omniprobe. 15 Дослідження характеру високотемпературного окиснення розроблених КМ проводили при $T = 500^{\circ}\text{C}$, 800°C і 1000°C на повітрі в електропечі опору камерній лабораторній ЧОЛІ 2.3.1.3/11І2 протягом 1 хв і 90 хв. Мікроструктуру і Оже-аналіз композиційних матеріалів після окиснення досліджували на мікроаналізаторі JEOL JAMP - 9500F.

Окрім цього в розділі 2 дисертантка Полярус О. М. також подає ґрунтовний опис методик високотемпературного диференційно-термічного аналізу, корозійної стійкості у морській воді, кавітаційної стійкості матеріалів, досліджень гідроабразивної стійкості покриттів.

Підсумовуючи відомості, що представлені у розділі 2, слід зазначити, що авторкою дисертації Полярус О. М. обґрунтовано та скомпоновано комплексну методику розгалужених експериментальних досліджень, що має у своєму складі низку найсучасніших тонких, стандартних та оригінальних методів досліджень з використанням різноманітного експериментального устаткування.

З моєї точки зору, розділ 2 дисертації Полярус О. М. є надзвичайно значущим розділом, який розкриває обґрунтований напрям досліджень та методи вирішення задач, поставлених у роботі.

Вказане демонструє послідовний та системний підхід авторки до вирішення важливої науково-технічної проблеми, що поставлена у дисертації.

Застосований в дисертаційній роботі комплексний методологічний підхід до проведення досліджень з використанням сучасних апробованих методик і обладнання для проведення експериментів, технологічного контролю процесів виготовлення матеріалів і нанесення захисних покриттів, точної обробки експериментальних даних підвищує достовірність отриманих результатів досліджень.

На мою думку, сформована дисертанткою Полярус О. М. методика проведення всебічних досліджень, що викладена у розділі 2, забезпечила одержання достовірних та коректних результатів.

Вважаю, що загалом розділ 2 дисертації Полярус О. М. свідчить про логічні та чіткі напрямки реалізації поставленої мети роботи, та підтверджує здатність авторки ставити і послідовно розв'язувати складні наукові завдання, застосовувати найсучасніші методики та обладнання, співставляти і аналізувати одержані результати, робити на їх основі коректні висновки, що демонструє системний підхід до вирішення складних задач.

У третьому розділі дисертації здобувачка Полярус О. М. зосереджується дослідженні змочування та контактної взаємодії в системах "інтерметалід NiAl/NiTi – тугоплавка сполука TiB₂/CrB₂/ZrB₂" та розробці компактних композиційних матеріалів систем NiAl(NiTi)-Ti(Cr,Zr)B₂, дослідженню особливостей їх фазо- та структуроутворення, характеру високотемпературного окиснення та визначенню фізико-механічних властивостей.

Як показала авторка, результати змочування та контактної взаємодії в системах NiAl-MeB₂ для інтерметаліду NiAl характерним є його розтікання по поверхні дибориду цирконію з утворенням кута змочування 22°, а по поверхні дибориду титану – 15°. При цьому в зонах взаємодії для даних систем не відбувається інтенсивної взаємодії між компонентами з утворенням нових фаз і вони складаються з підкладки з диборидів цирконію та титану відповідно, та інтерметалідної краплі з утворенням взаємних обмежених твердих розчинів.

Дисертанткою було визначено, що для системи NiAl-CrB₂ характерним є утворення нульових кутів змочування, при цьому в зоні взаємодії зафіксовано формування нової боридної фази, як результат хімічної взаємодії між вихідними компонентами.

Далі у розділі 3 здобувачкою було визначено, що при розтіканні NiTi по поверхні дибориду титану фіксуються максимальні кути змочування 30°, розтікання інтерметаліду по поверхні дибориду цирконію характеризується утворенням контактних кутів змочування 17°, для системи з диборидом хрому, величина контактних кутів змочування є мінімальною і дорівнює 3°. При цьому зона взаємодії системи NiTi-TiB₂ характеризується наявністю лише інтерметалідної краплі та тугоплавкої підкладки.

Окрім цього дисертанткою було встановлено, що для систем NiTi-ZrB₂ та NiTi-CrB₂ характерним є виникнення активної хімічної взаємодії між вихідними компонентами та, як результат - утворення нових фаз TiB₂ та Ni₃Ti.

Слід підкреслити, що застосовуючи системний підхід до вирішення поставлених завдань, дисертантка Полярус О. М. одержала взаємоузгоджені результати досліджень, що підкреслює достовірність отриманих даних.

На мій погляд, одержані результати являють собою надзвичайно важливий фактичний матеріал з погляду отримання високоякісних матеріалів і покриттів.

Мені видається, що наведені у розділі 3 результати та зроблені висновки показують цінність отриманого фактажу і ґрунтовних висновків не тільки у науковому, але і у прикладному плані, коли стає можливим цілеспрямовано формувати структуру композиційних матеріалів та прогнозувати їх функціональні характеристики.

Четвертий розділ дисертації Полярус О. М. присвячений більш детальним дослідженням фізико-хімічної сумісності інтерметаліду NiAl з боридами титану, цирконію та хрому, для чого було проведено високотемпературний диференціально-термічний аналіз (ВДТА) шихти з відповідних порошкових сумішей.

В результаті проведення ВДТА дисертанткою Полярус О. М. отримано компактні композиційні матеріали NiAl-15% ZrB₂, NiAl-15%TiB₂, NiAl-15% CrB₂. Показано, що мікроструктура всіх отриманих в результаті спікання композитів є гетерофазною і представляє собою інтерметалідну NiAl-матрицю, в якій рівномірно розподілені зерна боридів титану, цирконію та хрому, а для системи NiAl-CrB₂, як і у випадку зі змочуванням, спостерігається утворення нової боридної фази.

Дослідження характеристик агрегатної твердості розроблених авторкою композитів за Віккерсом показало, що найнижчі значення твердості відповідають вихідному інтерметаліду і становлять 276 МПа (HV20), що корелює з літературними даними. Для розроблених композитних матеріалів значення твердості в 1,2-1,6 разів перевищують даний показник для інтерметаліду. Отримані результати також були підтверджені розрахунками мікротвердості (γ) та мікротвердості (σ).

Виконані дисертанткою дослідження високотемпературного окиснення розроблених композитів на повітрі при T=500°C, 800°C та 1000°C і витримці впродовж 90 хв. та 1 хв. показали, що всі окиснюються за однаковим механізмом, а саме селективно. При цьому інтерметалідна матриця NiAl окиснюється до утворення на поверхні шару Al₂O₃, який захищає її від подальшого окиснення. В той самий час окиснення боридів продовжується, через це на поверхні зразків утворюється «яскраво виражений об'ємний ефект».

Результати проведених Оже-досліджень окиснених композитів впродовж 1 хв. дозволили встановити, що інтенсивніше окиснюються борид цирконію та титану, при цьому товщини утворених на їх поверхні оксидів становить 480 нм та 460 нм відповідно, а мінімальна швидкість окиснення зафіксована для дибориду хрому, де товщина оксидів становить 158 нм. Утворення таких оксидів саме на боридних зернах чинитиме позитивний вплив на зносостійкість матеріалів при високотемпературних трибовипробуваннях, коли такі оксиди виступатимуть в ролі твердого мастила і запобігатимуть інтенсивному схоплюванню контактних пар тертя в процесі експлуатації.

Не менш важливим фактом є проведені дисертанткою Полярус О. М. дослідження, які моделюють процес абразивного зношування. В результаті було встановлено, що для вихідного інтерметаліду характерним є 160 руйнування сформованої на його поверхні оксидної плівки Al₂O₃ та її відшарування. Згідно МРСА, в місцях відшарування фіксуються тільки елементи, що відповідають інтерметаліду NiAl. Для композиційного матеріалу характерним є збереження сформованої на матриці плівки Al₂O₃. Це пояснюється тим, що для композиту характерним є дисперсне зміцнення утвореної захисної плівки і її повне збереження по всій поверхні композиту.

Серед комплексу досліджень, виконаних авторкою дисертації, слід зазначити проведені експерименти на термоерозійну стійкість. Дослідження показали, що найінтенсивніше процес зношування протікає під час випробування сталевих зразків. Інтенсивність зношування ливарного жароміцного сплаву ЖС 26 дещо менша порівняно зі сталлю. Найбільші значення зносостійкості показали розроблені композиційні матеріали системи NiAl-CrB₂.

Як переконливо проілюструвала дисертантка, величина зносу розроблених композиційних матеріалів у 1,5-2,0 рази менша порівняно зі сталевим зразком та сплавом ЖС 26, що є важливим фактом з практичної точки зору.

Окрім цього авторкою було встановлено, що при зміні кута атаки при термоерозійних випробуваннях для нікелевого сплаву ЖС 26 характерним є інтенсивне деформування зразка з формуванням на поверхні хвилюватого рельєфу із зануренням частинок абразиву на висхідних ділянках. У той час, як для розроблених композитів процес деформації поверхні ускладнений завдяки наявності зміцнюючої боридної фази, що є позитивним фактором для експлуатації нових матеріалів.

Представлений дисертанткою аналіз результатів показує, що цей розділ дисертації Полярус О. М. займає одну з ключових позицій з погляду не тільки наукової цінності доробку авторки дисертації, але і з точки зору рекомендацій виробникам та розробникам нових ефективних композиційних матеріалів.

П'ятий розділ дисертації Полярус О. М. присвячений важливим технологічним аспектам дисертації, а саме, розробці композиційних порошкових матеріалів на основі алюмінію нікелю для нанесення зносостійких газотермічних покриттів.

В результаті виконаних авторкою досліджень було розроблено технологічні параметри отримання композиційних матеріалів на основі систем NiAl-MeB_2 за трьома технологіями (конгломеруванням на органічній зв'язці, гарячим пресуванням та рідкофазним спіканням з подальшим подрібненням спечених заготовок) для нанесення газотермічних покриттів.

Для підтвердження ефективності розроблених технологічних параметрів одержання нових композиційних матеріалів на основі систем NiAl-MeB_2 дисертантка виконала різнопланові дослідження їх структури, фазового складу і властивостей. Розглядалися наступні системи: $\text{NiAl-15 \% CrB}_2$, $\text{NiAl-15 \% TiB}_2$ та $\text{NiAl-15 \% ZrB}_2$.

Здобувачка продемонструвала, що структура отриманих покриттів за технологію конгломерування не відповідає заявленню 15% дибориду хрому у складі покриття. Це дисертантка пояснила тим, що в процесі напilenня в результаті вигорання полімерної зв'язки, виникає сегрегація частинок і малі частинки порошку боридів виносяться із потоку плазми. В результаті в покритті залишається лише 8% тугоплавкої складової. Для покриттів, отриманих з гарячепресованих порошків кількість тугоплавкої складової знаходиться у межах 12%. Для покриттів, отриманих зі спечених порошків, кількість боридної фази становить 15%. Це відбувається завдяки тому, що кожна частинка є композитом.

Встановлений авторкою дисертації фактаж переконує у важливості отриманих результатів і висновків не тільки у науковому, але й у прикладному плані, що дозволяє позитивно охарактеризувати дисертантку Полярус О. М. як ретельну науковицю, яка чітко окреслює та успішно вирішує найскладніші наукові завдання і реалізує їх на практиці.

Мені видається, що наведені у розділі 5 дисертації результати ілюструють такий важливий і невід'ємний бік роботи, як практичне значення напрацювань здобувачки Полярус О. М.

Шостий розділ дисертації Полярус О. М. описує порівняльні триботехнічні дослідження вихідного інтерметалідного покриття та розроблених композиційних з 5, 15 та 30% зміцнюючої боридної фази.

Авторка показала, що при високотемпературних трибовипробуваннях покриттів пари тертя інтерметалід-інтерметалід відбувається схоплювання контактних поверхонь та реалізується абразивно-адгезійний механізм зношування. При цьому, як результат, фіксуються максимальні значення інтенсивності зношування. Як свідчать результати експериментальних досліджень, введення 15% дибориду хрому демонструє найвищі результати зносостійкості покриття, а подальше збільшення кількості дибориду хрому до 30% викликає крихкість покриття, що є негативним фактором.

Здобувачка Полярус О. М. виконала детальний аналіз оксидних фаз, утворених на поверхні тертя композиційних покриттів та проілюструвала, що оксиди можуть бути присутні у вигляді окремих частинок, які є нанорозмірними і рівномірно розподілені вздовж поверхні тертя.

Дисертантка переконливо показала, що утворені оксиди виконують роль твердого мастила. Окрім цього оксиди можуть скупчуватись на дефектних ділянках покриття, утворюючи «третє тіло». В результаті не відбувається схоплювання поверхонь контактних пар тертя та спостерігається підвищення зносостійкості для розроблених покриттів. Узагальнюючи отримані результати на тертя та знос, авторка дисертації запропонувала схему механізму зношування композиційних покриттів при високотемпературних трибовипробуваннях.

Далі здобувачка зосереджується на проведенні високотемпературних випробувань покриттів з оксидів цирконію, титану і хрому в парі з покриттям NiAl . Як показали результати випробувань, найвищу зносостійкість демонструє покриття з оксиду хрому. Крім того було зафіксовано утворення комплексних оксидних плівок Al_2O_3 та Cr_2O_3 через трансфер оксиду алюмінію з поверхні контртіла в процесі трибовипробувань, що ілюструє явище масопереносу при терті.

Одержані дисертанткою результати повністю корелюють з результатами високотемпературних трибовипробувань розроблених композиційних покриттів, де чітко спостерігаються максимальні значення зносостійкості як для покриття NiAl-15%CrB₂, так і для відповідного оксидного покриття Cr₂O₃.

На мою думку, представлені у цьому розділі результати всебічних та глибоких досліджень триботехнічної поведінки розроблених авторкою дисертації композиційних покриттів показують їх безумовну перспективність для широкого практичного застосування.

Сьомий розділ дисертації Полярус О. М. присвячений аналізу результатів досліджень корозійної та кавітаційної стійкості композиційних матеріалів на основі інтерметаліду NiAl та NiTi у агресивних водних середовищах.

Виконані авторкою дослідження електрохімічної стійкості композитів системи NiAl-CrB₂ у морській воді показали, що цей матеріал не відповідає вимогам, що висуваються до корозійностійких матеріалів. Такий висновок був підтверджений результатами Оже-спектрального аналізу поверхні композиту після довготривалої витримки у морській воді, який засвідчив, що як на матриці, так і на боридних зернах фіксуються «об'ємні» шари оксидів нікелю і алюмінію. Тобто через ефекти Піллінга-Бедвордса відбувається повне «заростання» поверхні матеріалу оксидами нікелю, які екранують при цьому тугоплавкі зерна CrB₂. Через це внесок дибориду хрому в підвищення корозійної стійкості нівелюється, а відтак, як обґрунтовує дисертантка, треба так обирати матрицю, щоб подібні ефекти були відсутні.

Поряд з цим, випробування інтерметаліду NiTi та композитів на його основі в умовах електрохімічної корозії показали, що додавання до інтерметалідної матриці більш корозійностійкого бориду, призводить до суттєвого підвищення зносостійкості даної матриці.

Підтвердженням такого висновку стали отримані результати Оже-спектрального аналізу поверхонь розроблених композитів після їх тривалої витримки в морській воді, які однозначно показали, що цей матеріал не піддається корозії.

Надалі в розділі 7 авторка дисертації зосереджується на дослідженнях кавітаційного зношування розроблених матеріалів. Випробування композиційних матеріалів на основі інтерметаліду NiTi в умовах кавітаційного зношування показали, що розроблений композит має значно вищу кавітаційну стійкість в порівнянні з вихідним інтерметалідом та сталлю, а величини інтенсивності зношування є набагато меншими навіть після 30 годин випробувань.

Не менш важливими результатами здобувачки Полярус О. М. стали отримані дані з досліджень композиційних покриттів на гідроабразивну стійкість. Ці результати переконливо показали, що для розроблених покриттів характерним є не тільки відсутність будь-якої пошкоджуваності, але й повний захист сталеві підкладки від її спрацювання.

У додатках до дисертації, що рецензується, представлено затверджену технічну документацію, яка підтверджує застосування наукових напрацювань на практиці, це, насамперед: акти технічних випробувань на промислових підприємствах України, а саме: ТОВ «Композиційні системи», м. Запоріжжя (акт від 10.10.2023 р.), ТОВ «ГРІЗ ЛТД», м. Суми (акт від 20.01.2022 р.), АТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – ІНЖИНІРІНГ», м. Суми (акт від 11.10.2023 р.), ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро (акт від 18.06.2015 р.); затверджені технічні умови: Технічні умови ТУ У 25.6-05416930-049-023(1):2025 «Композиційні порошкові матеріали системи інтерметалід NiTi-диборид хрому для детонаційного напilenня», Технічні умови ТУ У 25.6 -05416930-049-024(1):2025 «Композиційні порошкові матеріали системи інтерметалід NiAl-диборид титану/хрому/цирконію для газотермічного напilenня». Результати технічних випробувань показали, що корозійна, абразивна та зносостійкість розроблених композиційних матеріалів та покриттів у 1,2–2,0 рази вища порівняно з матеріалами, що застосовують у теперішній час. Як показали результати технічних випробувань, розроблені композиційні матеріали і покриття можуть бути рекомендовані для застосування на відповідальних деталях, що працюють на тертя та зношування у важких умовах експлуатації.

Зауваження по дисертаційній роботі

Окрім викладених вище позитивних якостей рецензованої дисертації Полярус О. М. слід зробити наступні зауваження по роботі:

1. У розділі 2 дисертації авторка подає характеристику методологічних аспектів роботи. Серед іншого в цьому розділі наведено багато пронумерованих формул.

Втім, ця нумерація формул є зайвою, оскільки вона застосовується лише для формул, які згадуються в тексті. Без згадувань у тексті формули наводяться без нумерації.

2. Наприкінці розділу 2 представлений рис. 2.4 - Схема установки для гідроабразивного зношування. Однак, на жаль, не описано принцип роботи цієї установки, та чомусь зазначено, що вона розроблена у «відділі 49», що не є потрібним для опису її роботи.

3. На жаль, відсутні висновки до розділу 2, як значущого та такого важливого розділу як методологічне забезпечення дисертаційної роботи.

4. У розділі 3 наведено рис. 3.3 – Мікроструктура та хімічний аналіз зони взаємодії в системі ZrB_2 -NiAl.

Проте, навіряд чи у підписувачому підпису треба наводити таблицю хімічного складу, в якій до того ж в «шапці» біля фаз 1, 2, 3 помилково не вказані одиниці вимірювань; ат. % треба було поставити тут.

Допільно було б таблицю хімічного складу фаз 1, 2 та 3 давати вже в описі цього рис. 3.3.

Схожа ситуація має місце у представленні деяких рисунків розділу 4, де також таблиці з хімічним складом присутні у підписувачих підписах до рисунків.

5. На жаль, табл. 3.1 одиниці вимірювання наведені тільки для значень мікротвердості, а решта наведених величин одиниць вимірювання не мають.

6. На жаль, при наведенні результатів чисельних експериментів, представлених у розділі 3, що описують, зокрема, контактну взаємодію та особливості фазоутворення в системах NiAl(NiTi)- MeB_2 , відсутнє обґрунтування отриманих даних.

Авторка лише констатує, що отримано те і те. Наприклад, дисертантка пише: «Результати змочування в системах NiTi- MeB_2 показали, що при розтіканні NiTi по поверхні дибориду титану фіксуються максимальні кути змочування 30° , розтікання інтерметаліду по поверхні дибориду цирконію характеризується утворенням контактних кутів змочування 17° , для системи з диборидом хрому, величина контактних кутів змочування є мінімальною і дорівнює 3° ».

Однак, на жаль, відсутнє обґрунтування того, через що фіксуються такі кути змочування, з чим пов'язана різниця у величинах кутів змочування, на що це впливає тощо.

7. У кінці розділу 4 у висновку №4 вказано, що «...окиснення боридів продовжується, в результаті чого на поверхні зразків утворюється «яскраво виражений об'ємний ефект». Що означає «яскраво виражений об'ємний ефект», в чому він проявляється?

8. У розділі 5, авторка наводить табл. 5.3 – «Оптимальні технологічні режими детонаційного наплення покриттів».

Втім, на жаль, залишилось незрозумілим що було обрано критеріями оптимізації. Як саме проводилась оптимізація технологічних режимів? Як параметри оптимізації варіювались, змінюючи при цьому характеристики покриття? Чи застосовувалась математичне моделювання процесу детонаційного наплення?

9. Розділ 6 дисертації присвячений дослідженням трибологічної поведінки композиційних покриттів систем NiAl-Ti(Cr,Zr) B_2 за умов випробувань в парі з контртілом зі сталі P18, за температур 500 та $800^\circ C$, при навантаженні $P=8$ МПа і швидкості обертання $V=1,4$ м/с.

Проте, на жаль, авторка не обґрунтувала вибір матеріалу контртіла і саме цих умов трибовипробувань.

10. У розділі 7 на рис. 7.2 представлено мікроструктуру та Оже-аналіз поверхні композиційного матеріалу системи NiAl-Cr B_2 в морській воді після витримки впродовж 30 годин та вказано, що швидкість травлення складала 8 нм/хв. Важливим було би пояснити яким чином фіксувалась така швидкість травлення.

11. Дуже важливим у роботі є практичне значення результатів наукових досліджень, а саме, дисертантка надає відомості щодо дослідно-виробничої перевірки результатів дисертаційної роботи на ряді підприємств України, про що свідчать відповідні акти, наведені у Додатках.

Це дуже важливий технічний ефект, який досягнуто завдяки використанню наукових напрацювань здобувачки для практичних цілей.

На мою думку, дисертаційна робота була би підсилена, якби окрім актів технічних випробувань був би представлений розрахований принаймні очікуваний економічний ефект від впровадження наукового доробку дисертантки.

Загальні висновки по дисертації

Дисертація Полярус О. М. є завершеною науковою працею, при виконанні якої були одержані нові науково обґрунтовані результати, що у сукупності вирішують актуальну науково-технічну проблему - підвищення зносо- та корозійної стійкості покриттів в умовах тертя ковзання без мастила в широкому діапазоні температур (20–800°С) та агресивної дії водних середовищ шляхом розробки та апробації нових підходів щодо створення композиційних матеріалів на основі систем «інтерметалід NiAl(NiTi)–MeB₂» з керуванням структурно-фазовим складом.

Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані у наукових фахових виданнях України і міжнародних виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science, та широко апробовані на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях.

Матеріали і напрацювання, що входили до кандидатської дисертації Полярус О. М., не використовуються у представленій докторській дисертації.

Зміст автореферату дисертаційної роботи Полярус О. М. є ідентичним до основних положень дисертації.

Вважаю, що дисертаційна робота «Фізико-хімічні принципи вибору структурних складових композиційних матеріалів на основі систем NiAl/NiTi – MeB₂ з підвищеними зносо- та корозійною стійкістю» повністю відповідає паспорту спеціальності 05.02.01– „Матеріалознавство”. Технічні науки (13 Механічна інженерія), та вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567 зі змінами, внесеними згідно Постанов Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015, №567 від 27.07.2016, №943 від 20.11.2019 та №607 від 15.07.2020, щодо докторських дисертацій, а її авторка – **Полярус Олена Миколаївна** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за означеною спеціальністю.

Офіційний опонент,

професор, доктор технічних наук,
професор кафедри технології поліграфічного виробництва
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Т. А. Роїк

Підпис професора, д.т.н. Т. А. Роїк засвідчую:
Вчений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського



В. В. Холявко