

„ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор Інституту проблем
матеріалознавства ім. І. М. Францевича
НАН України
чл.-кор. НАН України

Геннадій БАГЛЮК



2025р.

ВИСНОВОК

про наукову і практичну цінність дисертаційної роботи здобувача лабораторії «Контактних явищ і паяння неметалевих матеріалів» відділу № 25 “Фізико-хімії і технології тугоплавких оксидів” Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України Дурова Олексія Вікторовича на тему: “Змочування та контактна взаємодія в системах, що містять діоксиди елементів IVb групи (TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2) та металевий розплав”, подану на здобуття наукового ступеня доктора хімічних наук за спеціальністю 02.00.04 – фізична хімія.

ВИТЯГ

з протоколу № 05/II -5 засідання секції “Фізико-хімія і технології наноструктурних і функціональних матеріалів”

Вченої ради Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України
від 26 травня 2025р.

БУЛИ ПРИСУТНІ члени секції Вченої ради:

д.т.н. А.В. Рагуля, д.х.н. М.В.Буланова, д.ф.-м.н. В.І. Івашенко, д.ф.-м.н. Є.А.Єлісєєв, д.х.н. О.А.Корнієнко, д.х.н. Л.М.Куліков, д.х.н. А.А. Бондар, д.х.н. В.С.Судавцова, д.ф.-м.н. Г.Ю.Бородянська, к.х.н. О.В.Чудінович, к.ф.-м.н. А.І.Євтушенко, к.ф.-м.н. І.І.Білан, к.ф.-м.н. І.В. Кондакова та ін.

СЛУХАЛИ:

Доповідь **Олексія ДУРОВА** по матеріалах докторської дисертації за темою:

“Змочування та контактна взаємодія в системах, що містять діоксиди елементів IVb групи (TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2) та металевий розплав”

Дуров О.В. у своїй доповіді виклав основні результати проведених досліджень за темою, сформулював актуальність, наукову новизну, практичну цінність результатів і висновки. По доповіді було задано 9 запитань, на які Дуров О.В. давав обґрунтовані та вичерпні відповіді.

З рецензіями на дисертаційну роботу виступили д.х.н. Валентина СУДАВЦОВА, д.т.н. Анатолій ВЕРХОВЛЮК, д.х.н. Сергій Лакиза, зазначивши наступне: Олексій Дуров отримав диплом про здобуття вищої освіти у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» (ЛТ № 012469). Науковий поступ Олексій Дурова почався з захисту кандидатської дисертації на тему “Змочування та контактна взаємодія матеріалів на основі діоксиду цирконію з металевими розплавами” зі спеціальності 02.00.21 “Хімія твердого тіла” в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. У період з 2005 по 2024 роки активно займався науковими дослідженнями в області високотемпературної капілярності та паяння неметалевих матеріалів, що підтверджується фаховими науковими публікаціями. Тема докторської дисертації була затверджена на засіданні вченої ради Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України від 10 червня 2010 р. (протокол № 6).

В обговоренні дисертаційної роботи взяли участь Рагуля А.В., Буланова М.В., Корнієнко О.А., Куліков Л.М., Бондар А.А., Судацова В.С.

УХВАЛИЛИ: у результаті обговорення доповіді Дурова О.В. за матеріалами дисертаційної роботи секція **ЗАТВЕРДИЛА** наступне:

Заключення

по дисертаційній роботі Дурова Олексія Вікторовича

“Змочування та контактна взаємодія в системах, що містять діоксиди елементів IVb групи (TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2) та металевий розплав”

Актуальність теми. Своєрідні властивості TiO_2 , ZrO_2 і HfO_2 обумовлюють як науковий інтерес до матеріалів на їх основі, так і застосування в різних областях.

Завдяки особливостям структури TiO_2 здатен втрачати кисень з утворенням значної кількості дефектів різних типів, що істотно впливає на властивості матеріалу.

Через низьку міцність TiO_2 -кераміка мало використовується як конструкційна, проте знаходить широке застосування в якості функціонального матеріалу: газових датчиках і сенсорах, в каталізаторах (у тому числі як носій металевих частинок), варисторах з відносно низькою напругою пробою. TiO_2 характеризується біосумісністю, тому він є перспективним матеріалом імплантів, високий коефіцієнт заломлення TiO_2 обумовлює його застосування в оптичних покриттях, в ювелірній справі. Багато з цих застосувань передбачають щільний контакт TiO_2 з металом: струмопідводи датчиків та варисторів, покриття в імплантах, кріплення оптичних та ювелірних виробів. Взаємодія TiO_2 з металами досліджена для багатьох систем в різних умовах, проте переважна більшість робіт присвячена мікромасштабним процесам у контексті розробки каталізаторів або тонкоплівкових технологій. Взаємодія у макромасштабах розглянута у обмеженій кількості робіт, а контакт розплавленого металу з TiO_2 докладно вивчався лише для алюмінію або сплавів на його основі. Деякі ефекти сильніше проявляються у макромасштабах, коли можна провести більш точні вимірювання параметрів взаємодії (в тому числі безпосередньо під час експериментів), тому дослідження змочування матеріалів на основі TiO_2 металевими розплавами є актуальним з точки зору отримання нових даних щодо взаємодії в цих системах та розробки технологій з'єднання.

ZrO_2 характеризується хімічною інертністю, високою рухливістю аніонів. Додавання структурно близьких оксидів до ZrO_2 дозволяє регулювати властивості матеріалів на його основі, зокрема отримувати кераміку з підвищеною міцністю та термостійкістю. Рухливість аніонів сприяє високотемпературній електропровідності, тому матеріали з ZrO_2 застосовуються для виготовлення нагрівачів, датчиків кисню, паливних комірок, електролізерів. ZrO_2 -кераміка має низькі коефіцієнти тертя і теплопровідності, підбором складу і параметрів виготовлення можна значно підвищити її міцність і в'язкість руйнування, тому вона широко використовується як конструкційний матеріал для виготовлення деталей двигунів, насосів, філь'єр, лез, протезів. Також ZrO_2 застосовують як вогнетрив, в електроніці, ювелірній справі, термобар'єрних покриттях. Значна частина цих застосувань передбачає щільний контакт з металом: вогнетриви для переплавлення металевих розплавів, контакти нагрівачів та електрохімічних пристроїв, з'єднання конструкційної кераміки, одним з найзручніших способів отримання яких є паяння металевими припоями. Тому питання контактної взаємодії ZrO_2 з металами вивчені досить докладно, проте мало розглянуті роль стехіометрії у міжфазних процесах для систем ZrO_2 -метал, взаємозв'язок електрофізичних явищ та міжфазної взаємодії, можливості отримання високотемпературних та жаростійких з'єднань ZrO_2 з металом. Ці аспекти потрібно вивчити окремо.

Через ефект лантаноїдного стиснення, гафній є хімічним аналогом цирконію, відповідно, властивості HfO_2 і ZrO_2 дуже схожі. Однак температури фазових переходів HfO_2 , значно вищі, що покращує його термостійкість і робить перспективною заміною ZrO_2 в таких областях, як виготовлення термобар'єрних покриттів. Завдяки кращим електрофізичним властивостям, HfO_2 замінює ZrO_2 в електрохімічних пристроях. Висока діелектрична проникність, широка заборонена зона, малі струми витоку, стійкість до пробою дозволяють використовувати HfO_2 як ізолятор (в конденсаторах, метал-кисень-напівпровідникових транзисторах, мемрісторах тощо). Завдяки високому поглинанню повільних нейтронів HfO_2 застосовують в ядерній техніці, оптичні властивості обумовлюють використання HfO_2 в оптиці і ювелірній справі. Значна частина виробів, що містять HfO_2 , потребує щільного контакту оксиду з металом: електроди,

покриття на металах, з'єднання конструкційної кераміки або закріплення ювелірних кристалів тощо. Оскільки матеріали на основі HfO_2 є відносно новими, їх взаємодія з металами досліджена дуже мало. Розробці методів з'єднання HfO_2 -кераміки присвячена обмежена кількість робіт, хоча потреба в цих технологіях існує. Отже необхідне широке дослідження змочування та контактної взаємодії в системах HfO_2 -метал (зокрема в контексті порівняння HfO_2 та ZrO_2 , випробування різних методів з'єднання матеріалів на основі HfO_2).

Таким чином, вивчення міжфазної взаємодії в системах, де TiO_2 , ZrO_2 або HfO_2 контактують з розплавленими металами, актуальне для розуміння природи цих процесів, розробки методів з'єднання керамік на основі TiO_2 , ZrO_2 або HfO_2 , отже становить фундаментальний та практичний інтерес для використання конструкційної та функціональної кераміки різноманітного призначення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Інституті проблема матеріалознавства імені І.М. Францевича Національної академії наук України в рамках основних завдань фундаментальних і прикладних досліджень за держбюджетними темами III-34-07 (Ц) «Дослідження фізико-хімічних властивостей та створення нових припоїв (в тому числі без свинцевих) і технології паяння неметалевих (керамічних) матеріалів, вуглеграфітів та скла з використанням екзотермічних хімічних реакцій у міжфазній області; високих (1600 – 1800 °C) температур формування з'єднань; мартенситного перетворення для регулювання терморозширення металевої основи з отриманням деталей приладо- та машинобудування, а також космічної техніки» № держреєстрації 0107U002939 (2007 – 2011 pp.); III-2-10 «Розвиток фізико-хімічних (теоретичних) основ - термодинаміки, уявлень на атомно-електронному рівні явищ високотемпературного змочування, ефекту дезмочування, кінетики розтікання в системах металеві розплави/тверді тіла» № держреєстрації 0110U002348 (2010 – 2012 pp.); III-32-12 (Ц) «Розвиток теоретичних, технологічних та конструкційних засад з'єднання неметалевих матеріалів – оксидних (зокрема ZrO_2 та HfO_2), сегнетоелектриків, кубічного BN та ін. паянням розплавленими припоями, твердофазним зварюванням, металокисневою технологією з розробкою нових припоїв (що містять Nb, Ta, Pt, Pd), та отримання деталей для експлуатації в жорстких умовах – високі температура, навантаження, вібрація» № держреєстрації 0112U002096 (2012 – 2016 pp.); III-3-14 «Розвиток наукових основ високотемпературної капілярності з можливим застосуванням обчислення з перших принципів адгезії та ступеню змочування, експериментальне дослідження адгезійної взаємодії оксидів металів IVa групи періодичної системи (SiO_2 , GeO_2 , SnO_2) на межі з металами та вивчення електрофізичних властивостей контакту» № держреєстрації 0114U002427 (2014 – 2016 pp.); III-32-17 (Ц) «Розвиток наукових основ і технологій з'єднання-паяння неметалевих матеріалів з металами в контактних системах Al-кварцове скло, Cu-AlN, кубічного BN-, алмаз- метали та інші зі значною різницею коефіцієнтів терморозширення розплавленими припоями, твердофазним зварюванням, металокисневою технологією з розробкою нових припоїв та методів паяння і отримання окремих вузлів та виробів для приладів різного призначення - інструментів та конструкційних матеріалів з надтвердих речовин» № держреєстрації 0117U002200 (2017 - 2021 pp.); III-2-18 «Дослідження електрокапілярних та адгезійних явищ в системах металічний розплав — напівпровідниковий оксид при високих температурах та отримання паяних з'єднань металевих електродів з поверхнею оксиду» № держреєстрації 0118U003064 (2018 – 2020 pp.); III-9-21 «Дослідження впливу домішок електронегативних та комплексоутворюючих елементів на капілярні та адгезивні властивості металевих розплавів в контакті зі сполуками з іонно-ковалентним та ковалентним типом хімічного зв'язку» № держреєстрації 0121U108719 (2021 – 2023 pp.); III-5-24 «Дослідження фізико-хімічних властивостей припоїв на основі багатокомпонентних систем із різних металів і розробка технологій паяння керамічних матеріалів (оксидів, нітридів, боридів), алмазу та просочення, отримання паяних виробів і інструменту з надтвердих матеріалів» № держреєстрації 0124U000985 (2024 – 2026 pp.).

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є встановлення закономірностей та особливостей змочування і контактної взаємодії в системах, що складаються з твердого оксиду *d*-елемента IV групи Періодичної системи і металевого розплаву. Використання отриманих

результатів для розробки та вдосконалення ефективних методів отримання з'єднань матеріалів на основі TiO_2 , ZrO_2 або HfO_2 з керамічними та металевими деталями методом паяння металевими припоями.

Для досягнення вказаної мети необхідне вирішення наступних *задач*:

- дослідити змочування TiO_2 і HfO_2 розплавами чистих металів, встановити загальні закономірності процесів на межах розділу фаз, зокрема впливу спорідненості чистих металів до кисню;
- в рамках хімічної теорії змочування дослідити можливості керування змочуванням TiO_2 і HfO_2 металевими розплавами шляхом введення у розплав хімічно активного компонента (Ti , Zr , V або Nb) та взаємодію на міжфазних границях. Вивчити вплив концентрації активної добавки, часу витримки на характеристики процесу змочування. Випробувати для паяння матеріалів на основі TiO_2 та HfO_2 стандартні методи, розробити спеціальні припої та режими паяння;
- дослідити кінетику процесу розповсюдження області з дефіцитом кисню у об'ємі HfO_2 -кераміки при контакті з металевим розплавом, що містить адгезійно-активний компонент (Ti) методом безпосереднього спостереження. Пояснити отримані результати з точки зору теорії дифузійних процесів;
- дослідити особливості взаємодії HfO_2 з розплавами благородних металів (Pt , Pd) у вакуумі, пояснити ефекти, пов'язані зі стехіометрією підкладок. Дослідити вплив нестехіометрії HfO_2 і ZrO_2 на змочування інертними металевими розплавами в умовах, коли забезпечений постійний відтік кисню з твердого оксиду;
- дослідити вплив нестехіометрії ZrO_2 на морфологію тонких плівок металів, що вкривають його поверхню, при відпалі у вакуумі, розглянути роль температури і тривалості відпалу. Дослідити вплив пропускання струму через систему оксид-метал на змочування TiO_2 , ZrO_2 або HfO_2 металевими розплавами та роль стехіометрії оксидів у спостережуваних ефектах;
- вивчити змочування TiO_2 -, ZrO_2 - і HfO_2 -кераміки розплавами системи Ag-Cu-O на повітрі, встановити вплив складу розплаву, часу витримки, пропускання струму, описати процеси, що відбуваються в цих системах. Розглянути можливість використання сплавів Ag-Cu-O для отримання паяних з'єднань кераміки з металом на повітрі;
- розглянути можливість отримання високотемпературних, у тому числі жаростійких, з'єднань ZrO_2 -кераміки з металевими матеріалами. Випробувати для паяння та металізації ZrO_2 тугоплавкі сплави, зокрема жаростійкі інтерметаліди системи Ti-Al .

Об'єкт досліджень: крайові кути змочування твердих TiO_2 , ZrO_2 і HfO_2 металевими розплавами та процеси, що відбуваються на межах розділу оксид/метал і в об'ємах контактних фаз, роль стехіометрії, з'єднання кераміки на основі TiO_2 , ZrO_2 або HfO_2 .

Предмет досліджень: змочування, мікроструктура контактних областей оксид-метал, методи з'єднання кераміки на основі TiO_2 , ZrO_2 або HfO_2 , зокрема з металевими матеріалами, морфологія тонких плівок.

Методи досліджень: вимірювання крайових кутів змочування методом лежачої краплі, оптична і електронна мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, вимірювання міцності при зсуві.

Наукова новизна отриманих результатів. *Вперше* проведено систематичне дослідження крайових кутів змочування монокристалічного TiO_2 розплавами чистих металів (Al , Cu , Ag , Au , Ge , Si , Sn , Pd , Ni , Co , Fe) в широких інтервалах температур, суттєву роль відіграє спорідненість металу до кисню. Спостерігалось формування другої рідкої фази в системах TiO_2 / Fe та TiO_2 / Co , яке пояснено окисненням металів киснем з TiO_2 та подальшою взаємодією утворених FeO або CoO з підкладкою.

Досліджено змочування TiO_2 -кераміки розплавами, що містять адгезійно-активні компоненти (Ag-Cu-Ti , Ag-Cu-Zr , Cu-Zr , Ni-Nb , Ni-V , Cu-Ni-Nb , Cu-Ni-V). Показано, що введення активних добавок суттєво покращує змочування, зокрема, при додаванні Ti до сплаву Ag-Cu крайовий кут змінюється зі 120° до 11° . Ti та Zr взаємодіють з TiO_2 надто інтенсивно з формуванням пухких перехідних шарів, що знижують міцність контакту. Тому для паяння TiO_2 доцільно використовувати менш активні сплави, що містять V або Nb .

Систематично досліджено змочування HfO_2 розплавами чистих металів (Sn, Al, Cu, Ag, Au, Si, Ge, Pd, Pt, Ni, Co, Fe, Ti, Zr, V). Суттєву роль відіграє спорідненість металу до кисню. Спостерігалася взаємодія HfO_2 з Fe, Pd, Pt, яка сприяла покращенню змочування, що підтверджено мікроструктурними та рентгенівськими дослідженнями.

Досліджено змочування HfO_2 -кераміки розплавами системи Ag-Cu-Ti та стандартним припоєм Cu-Sn-Pb-Ti. Показано, що ці припої можуть бути використані при паянні HfO_2 -кераміки до самої себе та до сталі.

За методом безпосереднього спостереження вивчено процес розповсюдження зони з дефіцитом кисню в об'ємі HfO_2 -кераміки при контакті з активними металевими розплавами. Підтверджено дифузійну природу процесів, показано, що для ZrO_2 та HfO_2 вони аналогічні, різниця у впливі температури пояснена з точки зору відомих відмінностей матеріалів.

Вивчено вплив постійного відтоку кисню з ZrO_2 та HfO_2 , що забезпечувався контактом з активним металевим розплавом, на змочування інертними металами та сплавами (Pt, Cu, Ni, Ge, Si, Cu-Ga, Cu-Ge тощо). Виявлено, що дефіцит кисню у підкладці сприяє розтіканню інертних металевих розплавів по її поверхні завдяки розчиненню в них «надлишкових» Zr або Hf.

Вивчено вплив стехіометрії діоксиду цирконію на морфологію нанесених на його поверхню тонких плівок Pt, Pd, Ni, Cu після відпалу в вакуумі. Показано, що дефіцит кисню у підкладці перешкоджає фрагментації плівки.

Досліджено вплив пропускання електричного струму через системи оксид-метал на крайові кути змочування HfO_2 , TiO_2 і ZrO_2 металевими розплавами для різних систем ($\text{ZrO}_2/\text{Cu}/\text{ZrO}_2$, $\text{ZrO}_2/\text{Cu}/\text{Mo}$, $\text{ZrO}_2/\text{Cu}/\text{Ga}/\text{ZrO}_2$, $\text{ZrO}_2/\text{Ni}/\text{ZrO}_2$, $\text{ZrO}_2/\text{Ni}/\text{Cr}/\text{ZrO}_2$, $\text{TiO}_2/\text{Cu}/\text{TiO}_2$, $\text{TiO}_2/\text{Cu}/\text{Mo}$, $\text{HfO}_2/\text{Cu}/\text{HfO}_2$, $\text{HfO}_2/\text{Ni}/\text{HfO}_2$, $\text{HfO}_2/\text{Ni}/\text{Cr}/\text{HfO}_2$). Показано, що пропускання струму дуже суттєво впливає на змочування (досягалося повне розтікання). Процес залежить від полярності підключення електродів, сили струму, спорідненості металів до цирконію або гафнію, температури.

Вивчено змочування TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 , а також Al_2O_3 , BaTiO_3 , AlPO_4 , CaF_2 розплавами системи Ag-Cu-O на повітрі. Показано, що на змочування впливає адсорбція окисленої міді на міжфазних поверхнях, зокрема суцільність адсорбційного шару, яка може бути порушена через взаємодію CuO з оксидом підкладки. Виявлено формування другої рідкої фази внаслідок взаємодії між TiO_2 та окисленою міддю. Вперше вивчено вплив пропускання струму крізь міжфазну межу на контактну взаємодію розплавів системи Ag-Cu-O з ZrO_2 , TiO_2 , HfO_2 на повітрі. Показано, що пропускання струму може суттєво впливати на змочування. Вперше отримано відносно міцні (близько 40 МПа) паяні з'єднання ніобію з ZrO_2 -керамікою метал-кисневим паянням на повітрі.

Досліджено можливість отримання високотемпературних з'єднань ZrO_2 -кераміки. Розроблено методи паяння ZrO_2 розплавом Ni-Cr-Ti, контактено-реактивного паяння до ніобію через нікель, металізації за допомогою інтерметаліду TiAl_3 .

Практичне значення одержаних роботи. Розроблені методи паяння та металізації матеріалів на основі TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 можуть бути використані в технологіях виготовлення деталей, що містять нероз'ємні з'єднання цих матеріалів, у тому числі високотемпературні, зокрема в конструкціях двигунів, насосів, лезового інструменту, де необхідні міцні з'єднання оксидної кераміки з металом, високотемпературних електрохімічних пристроях для забезпечення контакту твердих оксидних електролітів з електродами, нанесення металевих покриттів.

Дані щодо змочування та контактної взаємодії мають цінність, як довідкові при дослідженнях процесів у системах, що містять метал та оксид, розробці технологій з'єднання, підборі складу вогнетривів.

Особистий внесок здобувача. Формулювання мети, вибір об'єктів дослідження, та постановку задач проведено дисертантом разом з науковим консультантом академіком НАН України, д.т.н., професором [Ю.В. Найдічем]. Розробку конструкцій зразків і оснащення для проведення досліджень в умовах контакту інертного і активного сплавів з однієї підкладкою або пропускання струму крізь міжфазну поверхню, підготовку зразків, експериментальне дослідження змочування різних матеріалів металевими розплавами, зокрема в умовах

пропускання струму крізь межу розділу фаз, виготовлення шліфів для мікроскопічних досліджень, дослідження структури міжфазних поверхонь і тонких плівок методами оптичної мікроскопії, розробку складів припоїв, конструкції з'єднань, проведення операції паяння виконано дисертантом самостійно. Дослідження методами скануючої електронної мікроскопії (SEM) і рентгенографії виконано разом з к.ф.-м.н. О.Ю. Ковалем (відділ 22 ІПМ НАНУ), д.ф.-м.н. М.В. Карпецьом (відділ 58 ІПМ НАНУ), випробування міцності зразків при зсуві, обробку та аналіз отриманих результатів, напилення металевих плівок на оксидні підкладки виконано разом з к.х.н. Б.Д. Костюком. Ряд експериментів по змочування проведено разом з д.х.н. В.П. Красовським, к.х.н. Т.В. Сидоренко, В.В. Полянською, Т.В. Стецюк. Вихідні матеріали (монокристали, кераміка) отримано у к.х.н. В.Н. Павлікова (відділ 4 ІПМ НАНУ), д.х.н. О.В. Шевченка (відділ 25 ІПМ НАНУ), д.х.н. О.В. Дуднік (відділ 25 ІПМ НАНУ).

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, які подані в дисертаційній роботі, були представлені на вітчизняних та міжнародних науково-технічних конференціях: «*Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности*», м. Харків (2009 р.); Міжнародна конференція *HighMatTech*, м. Київ (2009, 2011 р.); II Міжнародна конференція «*Реальність та перспективи матеріалознавства*», м. Переяслав-Хмельницький (2011 р.); «*Металофізика і новітні технології*», м. Київ (2011 р.); «*Порошкова металургія: її сьогодні і завтра*», м. Київ (2012 р.); Міжнародна конференція *E-MRS FALL MEETING*, м. Варшава, Польща (2012, 2013, 2014, 2015 р.); Міжнародна конференція «*Матеріали і покриття в екстремальних умовах: дослідження, застосування, екологічно чисті технології виробництва і утилізації виробів*» *MEE'2014*, м. Київ (2014 р.); Міжнародних конференціях «*International Brazing & Soldering Conference*», *IBSC-2015*, м. Лос-Анжелес, США (2015 р.) і *IBSC-2018*, м. Новий Орлеан, США (2018 р.).

НАДІЙНІСТЬ І ОБГРУНТОВАНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ВИСНОВКІВ

Наукові положення та висновки дисертації Дурова О.В. є надійними та обґрунтованими. Вони базуються на значному обсязі результатів власних досліджень і їх всебічному аналізі, ґрунтовному описі літературних даних, підтверджується публікаціями у фахових вітчизняних та міжнародних наукових виданнях, обговоренням результатів досліджень на українських та міжнародних конференціях, застосуванням комплексу фізико-хімічних методів, які взаємно доповнюють один одного.

За матеріалами дисертації опубліковано 40 наукових друкованих праць, а саме: 11 статей в наукових виданнях, проіндексованих у базі Scopus (11 – Q2, Q3), 10 статей у фахових хімічних журналах України, 6 в інших наукових виданнях та 13 тез доповідей на національних і міжнародних конференціях.

Список друкованих праць

1. **Durov O.V.**, Sydorenko T.V. Non-stoichiometry, Electrowetting and Contact Interaction of Zirconia, Titania or Hafnia with Metal Melts. *J. of Mater Eng and Perform.* 2020, 29, 4854-4863; (SCOPUS, Q2, doi.org/10.1007/s11665-020-04606-2). (**Особистий внесок здобувача(далі ОВ):** експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
2. **Durov O.**, Stetsyuk T., Umanskyi O., Krasovskyy V., Poliarus O. Study of regularities and features of simultaneous contact interaction of active and inert metal melts with zirconia. *Composite Interfaces.* 2025, 32:3, 349-361. (SCOPUS, Q2, 10.1080/09276440.2024.2417161). (**ОВ:** експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
3. **Durov O.V.**, Stetsyuk T.V., Krasovskyy V.P. Mutual Influence of Contact Processes in the Simultaneous Interaction of Active and Inert Metal Melts with ZrO₂ Ceramics. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* 2024, 62:11-12, 745-756. (SCOPUS, Q3, doi.org/10.1007/s11106-024-00432-

- 6). (**OB**: експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
4. **Durov O.V.**, Kostyuk B.D., Sydorenko T.V., Poluyanskaya V.V. The Influence of Zirconia Stoichiometry on the Morphology of Thin Metal Films Deposited on its Surface After Annealing in Vacuum. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2021, 60:3-4, 198-203; (SCOPUS, **Q3**, doi.org/10.1007/s11106-021-00228-y). (**OB**: експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
 5. **Durov O.V.**, Sydorenko T.V., Koval O.Y. Brazing of ZrO₂ Ceramics with Metallic Fillers Using Electrical Current. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2021, 60:5-6, 318-322; (SCOPUS, **Q3**, doi.org/10.1007/s11106-021-00242-0). (**OB**: експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
 6. **Durov A.**, Карпец М., Sidorenko T., Kostyuk B., Naydich J. The Role of Stoichiometry in Contact Interaction of Zirconia with Metal Melts. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2017, 55:9-10, 612-616. (SCOPUS, **Q3**, doi.org/10.1007/s11106-017-9846-z). (**OB**: експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
 7. **Durov O.V.**, Naidich Yu.V., Sydorenko T.V. Effect of Electric Current Passing Through the Interface on the Wetting of the ZrO₂ Ceramics with Silver-Copper-Oxygen melt in Air. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2015, 54:3-4, 201-203. (SCOPUS, **Q3**, doi.org/10.1007/s11106-015-9699-2). (**OB**: експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
 8. **Durov A.** Wetting of Hafnium Dioxide by Pure Metals. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2011, 50:7-8, 552-556. (SCOPUS, **Q3**, doi.org/10.1007/s11106-011-9358-1). (**OB**: експериментальне дослідження, обробка результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
 9. **Durov O.V.**, Stetsyuk T.V. Morphology of titanium, zirconium and hafnium nanofilms deposited onto zirconia ceramic at annealing in vacuum. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2024, 25:2, 255-262. (SCOPUS, **Q3**, doi.org/10.15330/pcss.25.2.255-262).
 10. **Durov O.V.**, Stetsyuk T.V. Morphology of titanium nanofilms onto sapphire at annealing in vacuum. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2025, 26:1, 78-83. (SCOPUS, **Q3**, doi.org/10.15330/pcss.26.1.78-83). (**OB**: дослідження мікроструктур, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті).
 11. **Durov A. V.**, Gab I.I., Stetsyuk T. V. Application of niobium and niobium-containing alloys to join ceramic materials. *Welding international*. 2012, 26:2, 138-142. (SCOPUS, **Q3**, doi.org/10.1080/09507116.2011.600054). (**OB**: експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів).
 12. **Дуров А.В.**, Коваль А.Ю. Исследование смачивания диоксида гафния сплавами системы серебро-медь-титан. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2011, 33, 577-582. (**Q3**). (**OB**: експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
 13. **Дуров А.В.**, Найдич Ю.В., Красовский В.П. Кинетика дестехиометризации ZrO₂- и HfO₂-керамик при контакте с активными металлическими расплавами. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2019, 52, 8–14. (**OB**: участь у експериментальному дослідженні, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
 14. **Дуров А.В.** Контактное взаимодействие металлов с диоксидом титана. Обзор. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2017, 50, 105-143. (**OB**: підбір та аналіз літературних даних).
 15. **Дуров А.В.**, Сидоренко Т.В. Влияние пропускания электрического тока на смачивание ZrO₂-керамики металлами в вакууме. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2016, 49, 113-118. (**OB**: експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
 16. **Дуров А.В.** Роль стехиометрии в процессах смачивания и контактного взаимодействия для системы расплав никеля–диоксид циркония. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2015,

- 48, 49-54. (**ОБ:** експериментальне дослідження, обробка результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
17. **Дуров О.В.**, Костюк Б.Д., Сидоренко Т.В. Влияние стехиометрии диоксида циркония на морфологию нанесенных на его поверхность тонких пленок благородных металлов после отжига. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2014, 47, 84-88. (**ОБ:** дослідження мікроструктур, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
18. **Дуров А.В.** Пайка керамик TiO_2 и HfO_2 . *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2012, 45, 104-109. (**ОБ:** аналіз літературних даних, експериментальне дослідження, обробка результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
19. Найдич Ю. В., **Дуров А.В.**, Сидоренко Т. В., Карпец М. В., Коваль А. Ю., Красовский В. П., Цебрий Р.И., Заславський О.М. Смачивание и контактное взаимодействие в системах неметаллический материал – сплавы серебро-медь-кислород. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2011, 44, 14-29. (**ОБ:** підготовка експериментальних зразків, дослідження мікроструктур, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті).
20. **Дуров А.В.**, Сидоренко Т.В., Коваль А.Ю. Смачивание рутила некоторыми чистыми металлами и сплавами серебро-медь-титан. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2010, 43, 72-76. (**ОБ:** експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів та написання тексту статті).
21. **Дуров А.В.**, Бойко В.Ю. Металлизация оксидной керамики с помощью интерметаллида Al_3Ti . *Адгезия расплавов и пайка материалов*, 2009, 42, 90-94. (**ОБ:** експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
22. **Durov O.V.**, Sydorenko T.V., Koval O.Y. Influence of Electric Current Passing Through Interface on Wetting of Zirconia with Metals. *Proceedings of International Brazing & Soldering Conference (IBSC -2018)*. 2018, 317-322. (**ОБ:** експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
23. Naidich Yu.V., Krasovsky V.P., **Durov O.V.**, Sydorenko T.V. Wettability and brazing of ionocovalent ceramic materials by metal alloys containing electronegative elements. *Proc. of 6th Int. Brazing and Soldering conf. — Long Beach, CA, USA*. 2015, 40-48. (**ОБ:** підготовка експериментальних зразків, дослідження мікроструктур, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
24. **Durov O.V.**, Sydorenko T.V. Wetting of some nonstoichiometric oxide ceramic materials by liquid metals. *E-MRS FALL MEETING: proceedings. — Warsaw, Poland*. 2013, 121-127. (**ОБ:** експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
25. **Durov O.V.**, Sydorenko T.V. Wetting of some nonstoichiometric oxide ceramic materials by liquid metals. *Proceedings E-MRS FALL MEETING*. 2012, 184-189. (**ОБ:** експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
26. **Дуров О.В.**, Сидоренко Т.В., Коваль А.Ю. Дослідження процесу змочування диоксиду титану деякими металічними розплавами. *Реальність та перспективи матеріалознавства: матеріали II-ї конференції, Переяслав-Хмельницький*. 2011, 68-72. (**ОБ:** експериментальне дослідження, обробка та обговорення результатів, написання тексту статті та підготовка ілюстрацій).
27. Сидоренко Т.В., **Дуров О.В.**, Найдіч Ю.В. Вплив середовища на процеси змочування металічними розплавами деяких керамічних матеріалів. *Збірник наук. праць ХДУ «Теорія і практика сучасної хімічної технології», Херсон*. 2010, 89-92. (**ОБ:** підготовка експериментальних зразків, обробка результатів).
28. **Durov O.V.**, Sydorenko T.V., Koval O.Y. Possibility of ZrO_2 -ceramic with metal filler brazing using electrical current pass. *6th Internat. Conf. HighMathTech 2019, October 28-30, 2019, Kyiv, Ukraine*. Abstract, p. 175.

29. **Durov O.V.**, Kostyuk B.D., Sydorenko T.V., Poluyanskaya V.V. Effect of zirconia stoichiometry on interaction with thin metal films at annealing in vacuum. *6th Internat. Conf. HighMathTech 2019, October 28-30, 2019, Kyiv, Ukraine*. Abstract, p. 168.
30. **Durov O.V.**, Sydorenko T.V., Naidich Yu.V. Non-stoichiometry, electrowetting and contact interaction of zirconia, titania or hafnia with metal melts. *EUROMAT-2019, September 1-5, 2019, Stockholm, Sweden*. Abstract book, p. 2087.
31. **Durov O.V.**, Naidich Yu.V., Sydorenko T.V., Karpets M.V., Koval O.Yu. Wetting and Contact Interaction of Iron Triad Metal Melts to Rutile. *E-MRS FALL MEETING, 2015, Warsaw, Poland*. Aabstracts, p. 88.
32. **Durov O.V.**, Kostyuk B.D., Sidorenko T.V. Influence of zircomia stoichiometry on structure of noble metals thin films on its surface after heating. *E-MRS FALL MEETING, 2014, Warsaw, Poland*. Aabstracts, p. 24.
33. **Дуров А.В.**, Найдич Ю.В., Сидоренко Т.В. Влияние электрического тока, пропущенного через межфазную границу, на смачивание оксидной керамики. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применения, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», (МЕЕ'2014). Киев: Тезисы докладов конференции, 2014. С. 71.
34. **Дуров А.В.**, Найдич Ю.В., Карпец М.В. Смачивание нестехиометрического ZrO_2 никелем. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применения, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», (МЕЕ'2014). Киев: Тезисы докладов конференции, 2014. С. 48.
35. **Durov O.V.**, Naidich Y.V., Sydorenko T.V. Influence of an electric current passing through the interface on wetting of the ceramic with silver-copper-oxygen melt on the air. *E-MRS FALL MEETING, 2013, Warsaw, Poland*. Aabstracts, p. 11.
36. **Дуров А.В.**, Найдич Ю.В., Сидоренко Т.В. Смачиваемость оксидов TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 расплавами системы серебро-медь-кислород. *Порошковая металлургия: її сьогодні і завтра*. Київ: Тези доповідей, 2012. С. 16.
37. Naidich Y.V., **Durov O.V.**, Sydorenko T.V. Characteristic of wetting process some nonstoichiometric oxide ceramic materials by liquid metals. *E-MRS FALL MEETING, 2012, Warsaw, Poland*. Aabstracts, p. 17.
38. **Дуров А.В.**, Найдич Ю.В., Карпец М.В. Смачивание и контактное взаимодействие в системах TiO_2 -металл и HfO_2 -металл. *HighMatTech-2011*. Киев: Тезисы докладов конференции. 2011. С. 83
39. Найдич Ю.В., Габ И.И., Стецюк Т.В., Костюк Б.Д., **Дуров А.В.**, Куркова Д.И. Пайка и сварка давлением оксидной и нитридной керамики с использованием ниобия и ниобийсодержащих сплавов. *HighMatTech-2009*. Киев: Тезисы докладов конференции, 2009. С. 358.
40. Найдич Ю.В., Габ И.И., Костюк Б.Д., **Дуров А.В.**, Стецюк Т.В. Разработка способов соединения керамических материалов с использованием ниобия и сплавов, содержащих ниобий. «Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности». Харьков: Тезисы докладов конференции, 2009. С. 46-47.

Дисертація Дурова О.В. є закінченою науково-дослідною роботою з обґрунтованими результатами та висновками.

ПОСТАНОВА СЕКЦІЇ

В результаті проведеного обговорення представлених результатів дисертаційного дослідження і зазначених рецензентами висновків встановлено, що дисертаційна робота Дурова О.В. “Змочування та контактна взаємодія в системах, що містять діоксиди елементів IVb групи (TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2) та металевий розплав” є завершеним комплексним науковим дослідженням, за актуальністю, науковим рівнем та практичним значенням відповідає всім вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора хімічних наук.

Секція рекомендує представлену роботу до захисту зі спеціальності 02.00.04 “Фізична хімія” в спеціалізованій вченій раді Д 26.207.02 при Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

Голова секції Вченої ради
Академік НАН України



Андрій РАГУЛЯ

Секретар секції Вченої ради
канд. фіз.-мат. наук



Ірина.КОНДАКОВА