

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Агравала Павла Гяновича
**“Термодинаміка і фазові перетворення в багатокомпонентних
аморфоутворюючих системах перехідних металів”**,
що подається на здобуття наукового ступеня доктора хімічних наук
за спеціальністю 02.00.04 – фізична хімія

Для розв'язання ряду важливих завдань науки і техніки перспективним є термодинамічний метод. Знання термодинамічних властивостей речовин і фаз систем дозволяє розраховувати теплові ефекти і напрям перебігу різних процесів, уточнювати діаграми стану, розширювати уявлення про природу і енергію взаємодії компонентів в них, тощо. За допомогою одержаних цим методом характеристик сплавів стає можливим вибір оптимальних режимів ряду важливих технологічних процесів: аморфізації, розкиснення, легування, зварювання, пайки та ін.

Останнім часом підвищену увагу науковців привертають нові матеріали, які одержують з використанням методу швидкого охолодження, що завдяки реалізації процесу переходу розплаву у твердий стан в екстремально нерівноважних умовах дозволяє отримати аморфні, квазікристалічні і нанокристалічні сплави з унікальними фізичними властивостями.

Сучасний рівень розвитку науки і техніки вимагає створення принципово нових приладів, виробів та пристроїв, для розробки яких перш за все необхідні нові матеріали з унікальними властивостями. Теоретичною базою для отримання сплавів з перспективним для практичного використання комплексом фізико-хімічних, механічних та експлуатаційних характеристик є діаграми стану подвійних або багатокомпонентних систем, які в повній мірі відображають характер взаємодії компонентів. Відомо, що побудова фазових рівноваг в багатокомпонентних системах потребує значного об'єму експериментальних досліджень великої кількості зразків. Внаслідок цього перспективним став метод термодинамічного моделювання діаграм стану систем, який базується на температурно-концентраційних залежностях енергій Гіббса рідких та твердих розчинів. Використання термодинамічних розрахунків також дозволяє оптимізувати кількість необхідних для дослідження сплавів і за рахунок цього значно прискорити роботу з побудови діаграм стану, а також суттєво зменшити витрати вихідних матеріалів.

Актуальність теми

Дослідження методом високотемпературної калориметрії ентальпій змішування розплавів подвійних систем Fe-(Ti, Zr, Hf) і потрійних систем Co-Cu-(Ti, Zr), Cu-Fe-(Ti, Zr, Hf), Cu-Ni-(Ti, Hf), Cu-Ti-(Zr, Hf), Ni-Ti-(Zr, Hf), розрахунок за моделлю асоційованого розчину (MAP) їх термодинамічних властивостей, встановлення закономірностей енергії міжкомпонентної взаємодії, розрахунок метастабільних фазових діаграм за участю переохолоджених розплавів дво-, три-, чотири- і п'ятикомпонентних

систем є актуальними завданнями фізичної хімії металевих систем, як теоретичної основи фізико-хімічного матеріалознавства і суміжних галузей знань, а також важливими для розвитку уявлень про їх природу.

Про актуальність теми дисертації свідчить те, що вона відповідає науковим напрямкам робіт, які проводяться в Лабораторії фізико-хімічних властивостей металевих розплавів Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА) за рахунок коштів державного бюджету: 0106U001621 «Термодинамічне дослідження багатокомпонентних розплавів і моделювання їх об'ємної аморфізації» (2006–2008 рр.); 0112U001245 «Термодинамічне дослідження взаємодії компонентів розплавів аморфоутворюючих систем та розвиток фундаментальних принципів створення аморфних сплавів» (2012–2014 рр.); 0115U003181 «Термодинамічне дослідження багатокомпонентних розплавів перехідних металів для створення кристалічних та аморфних високоентропійних сплавів» (2015–2017 рр.); 0112U006709 «Багатокомпонентні розплави для створення високоентропійних сплавів: термодинамічні властивості, фазові рівноваги, фундаментальні принципи розробки» (2014–2019 рр.), а також в рамках міжнародних наукових програм «Binary Evaluation Program» і «Ternary Evaluation Program», які проводяться Materials Science International Team (Штутгарт, Німеччина).

Для встановлення інтервалів складів і температур, в яких досліджувані розплави проявляють схильність до аморфізації, необхідно було вникнути в природу енергії міжатомної взаємодії в них, встановивши їх термодинамічні властивості, що і визначило основну мету роботи. Для досягнення цієї мети П. Г. Агравалу довелось вирішити ряд наукових завдань: провести довготривалі дослідження методом калориметрії та виконати складну обробку експериментальних даних; визначити парціальні ентальпії змішування IVB-металів в розплавах двокомпонентних систем Fe–(Ti, Zr, Hf) і трикомпонентних систем Co–Cu–(Ti, Zr), Cu–Fe–(Ti, Zr, Hf), Cu–Ni–(Ti, Hf), Cu–Ti–(Zr, Hf) та Ni–Ti–(Zr, Hf), представити їх у вигляді аналітичних залежностей інтегральної ентальпії змішування; вибрати склади асоціатів і по МАР розрахувати їх термодинамічні властивості, а також мольні частки асоціатів при різних температурах. Важливим завданням було встановити термодинамічні властивості розплавів дво- і багатокомпонентних систем, їх залежності від складу, температури і числа компонентів систем та виявити основні фактори, що визначають їх схильність до аморфізації в нерівноважних умовах. Це автор підтвердив ще і розрахунками рівноважних та метастабільних діаграм стану дво- і трикомпонентних систем, що містять перехідні тугоплавкі метали.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Використовуючи метод високотемпературної калориметрії вперше визначено парціальні ентальпії змішування IVB-металів у розплавах трьох бінарних і 11 трикомпонентних систем при 1873 К. Показано, що вони, в основному, є від'ємними і корелюють з відомими даними для обмежуючих бінарних систем.

2. За моделлю Редліха-Кістера-Муджіану описані ентальпії змішування трикомпонентних розплавів систем Co–Cu–(Ti, Zr), Cu–Fe–(Ti, Zr, Hf), Cu–Ni–(Ti, Hf), Cu–Ti–(Zr, Hf) та Ni–Ti–(Zr, Hf) і вперше визначено хід їх ізотерм інтегральної ентальпії змішування ($\Delta_m H$) при 1873 K у всьому концентраційному інтервалі. Мінімуми $\Delta_m H$ трикомпонентних розплавів припадають на двокомпонентні системи, за виключенням системи Ni–Ti–Zr, в якій найбільш сильна енергія міжкомпонентної взаємодії характерна для потрійних рідких сплавів. Логічно було зроблено висновок про переважаючу роль подвійних взаємодій між компонентами.

3. За MAP в широкому інтервалі температур розраховані термодинамічні властивості для досліджених подвійних і потрійних рідких сплавів.

4. Створено базу даних термодинамічних властивостей розплавів системи Co–Cu–Fe–Ni–Ti–Zr–Hf. За її допомогою розраховані термодинамічні характеристики розплавів систем Cu–Ni–Ti–Zr, Cu–Ni–Ti–Hf і Cu–Ni–Ti–Zr–Hf та еквіатомних п'ятикомпонентних розплавів системи Co–Cu–Fe–Ni–Ti–Zr–Hf.

5. За MAP вперше розраховано склади асоційованих розчинів і загальні суми мольних часток асоціатів (ΣX_{assoc}) для широкого інтервалу температур у розплавах розглянутих дво-, три- і чотирикомпонентних систем, а також п'ятикомпонентної системи Cu–Ni–Ti–Zr–Hf, що дозволило визначити їх залежність від температури.

6. Оцінені автором за емпіричним правилом концентраційні області аморфізації розплавів систем Cu–Ti–Zr, Cu–Ni–Ti, Cu–Ni–Zr, Cu–Ni–Hf і Ni–Ti–Zr співставленні з відомими з літератури даними про аморфні сплави. Також були прогнозовані концентраційні області аморфізації розплавів для систем: Co–Cu–Ti, Co–Cu–Zr, Co–Cu–Hf, Cu–Fe–Ti, Cu–Fe–Zr, Cu–Fe–Hf, Cu–Ti–Hf, Cu–Zr–Hf, Ni–Ti–Hf, Ni–Zr–Hf, Cu–Ni–Ti–Hf, Cu–Ni–Ti–Zr, Cu–Ni–Zr–Hf, Cu–Ti–Zr–Hf, Ni–Ti–Zr–Hf та Cu–Ni–Ti–Zr–Hf.

7. Створено термодинамічні описи систем Ti–Zr, Cu–Ti–Hf та Cu–Ti–Zr, розраховано ізо- та політермічні перерізи, проєкції поверхонь ліквідуса та солідуса діаграм стану потрійних систем, схильних до аморфізації.

8. В рамках CALPHAD-методу розроблено базу даних параметрів моделей термодинамічних властивостей розплавів і граничних твердих розчинів системи Co–Cu–Fe–Ni–Ti–Zr–Hf, що дозволяє оптимізувати і спростити пошук складів аморфних сплавів, суттєво зменшивши кількість дослідів.

9. CALPHAD-методом вперше розраховано метастабільні діаграми стану вивчених автором систем, за допомогою яких коректно інтерпретовані відомі з експериментів концентраційні області утворення аморфних сплавів та прогнозовані відповідні для не досліджених в цьому плані систем.

Достовірність отриманих даних забезпечена використанням сучасного атестованого, перевіреного обладнання та надійної методики проведення експерименту. Ці дані пройшли перевірку шляхом їх порівняння з літературними і їх використанням в термодинамічному моделюванні з

наступним співставленням результатів моделювання з великим масивом різнорідних експериментальних даних. **Достовірність та обґрунтованість наукових положень та висновків**, зроблених у роботі, базується на аналізі великого масиву даних і не викликає заперечень. **Достовірність** отриманих експериментальних **даних та висновків** забезпечена використанням дублюючих експериментів і застосуванням класичних методик проведення експерименту і його обрахунку. Для проведення моделювань і розрахунків використано надійні пакети прикладних програм Thermo-Calc і CompuTherm LLC's Pandat. Все зроблено дуже ретельно.

Наукове та практичне значення роботи полягає в отриманні великого масиву термодинамічних даних для розплавів багатоконпонентних та обмежуючих їх систем, які поповнять довідникові видання і будуть використовуватись в базах термодинамічних даних. Вони також знайдуть застосування в роботах пошукового, наукового і прикладного характеру. Вже у самій роботі отриману термодинамічну інформацію використано для розрахунку діаграм стану та пошуку концентраційних областей розплавів з підвищеною схильністю до аморфізації. Отримані результати становлять надійну базу даних для розрахунку термодинамічних властивостей багатоконпонентних систем та для прогнозування концентраційних областей складів розплавів з високою схильністю до аморфізації. Отримані результати можуть знайти застосування у підрозділах Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова, Фізико-технологічного інституту металів та сплавів та ін., де займаються дослідженнями фазових рівноваг та перетворень, аморфізованими та наноматеріалами тощо. Отримані наукові результати можна використати для оптимізації режимів пайки та зварювання мідних, титанових і нікелевих виробів, що може зацікавити науковців Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона.

Розроблені методики дозволять з наукових позицій виконувати пошук аморфних металічних матеріалів, що суттєво здешевить їх і розширить сфери застосування. Вивчення термодинамічних властивостей розплавів стане більш доступним, тому що їх можна буде прогнозувати за MAP, наприклад із термодинамічних даних для подвійних обмежуючих систем.

Повнота викладу основних результатів дисертації

Основні результати і положення дисертації викладено в повному обсязі у 29 наукових статтях і одній монографії. З них 8 статей у журналах 1-го і 2-го квартилів. 20 статей відносяться до таких, які індексуються базами даних Scopus і WebofScience, та ще 5 статей можна віднести до опублікованих у фахових виданнях. Про достатню апробацію роботи на наукових конференціях свідчать 34 тез доповідей. Автореферат за змістом ідентичний дисертації.

Аналіз змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, висновків і списку використаних джерел із 323 найменувань. Повний обсяг роботи складає 452 сторінки. Основна частина дисертації викладена на 336 сторінках, включає 139 рисунків, 46 таблиць і 7 додатків.

Вступ достатньо добре висвітлює актуальність теми, зв'язок роботи з науковими темами, мету і задачі дослідження, об'єкти, предмет та методи дослідження, наукову новизну отриманих результатів і їх практичну цінність, особистий внесок здобувача та інші питання.

Перший розділ присвячено аналізу літературних даних про термодинамічні функції змішування розплавів і склади аморфних сплавів подвійних і потрійних систем, що містять Co, Cu, Fe, Ni, Ti, Zr та Hf, а також іншу необхідну інформацію. Показано, що термодинамічні властивості розплавів більшості розглянутих трикомпонентних систем не досліджені, на відміну від бінарних. Серед сплавів систем Co, Cu, Fe, Ni з Ti, Zr, Hf є такі, що при швидкому гартуванні розплаву утворюють аморфні стрічки, а ряд із них – об'ємні аморфні матеріали. Склади і методи одержання відомих аморфних сплавів наведено в Додатках Б та В і на рисунках, що дає можливість зробити висновки про відсутність системного підходу до їх пошуку. Показано, що сплави вказаних систем перспективні для теоретичного дослідження процесів аморфізації.

У другому розділі наведено методіку проведення експериментів методом калориметрії, загальний підхід до аналізу визначених даних, сучасний опис та моделювання температурно-концентраційних залежностей термодинамічних функцій змішування дво-, три- і багатокомпонентних розплавів в рамках моделі асоційованого розчину і CALPHAD-методу.

У третьому розділі подані результати дослідження ентальпій змішування розплавів систем Fe–Ti, Fe–Zr, Fe–Hf, Co–Cu–Ti, Co–Cu–Zr, Cu–Fe–Ti, Cu–Fe–Zr, Cu–Fe–Hf, Cu–Ni–Ti, Cu–Ni–Hf, Cu–Ti–Zr, Cu–Ti–Hf, Ni–Ti–Zr і Ni–Ti–Hf. Отримані результати були використані для аналізу топології ізотерм інтегральної ентальпії змішування досліджених трикомпонентних розплавів та визначення впливу на них подвійних взаємодій компонентів.

Четвертий розділ присвячено розробці моделей температурно-концентраційних залежностей термодинамічних властивостей розплавів систем Co–Cu–(Ti, Zr), Cu–Fe–(Ti, Zr, Hf), Cu–Ni–(Ti, Zr, Hf), Cu–Ti–(Zr, Hf) та Ni–Ti–(Zr, Hf), а також трьох недосліджених потрійних систем Co–Cu–Hf, (Cu, Ni)–Zr–Hf, і багатокомпонентних систем Cu–Ni–Ti–Hf, Cu–Ni–Ti–Zr, Cu–Ni–Zr–Hf, Cu–Ti–Zr–Hf, Ni–Ti–Zr–Hf і Cu–Ni–Ti–Zr–Hf в рамках моделі асоційованих розчинів. Для цих систем розраховані термодинамічні функції змішування розплавів в рамках моделі асоційованого розчину в широкому інтервалі температур і концентрацій. Знайдено, що значення надлишкових термодинамічних функцій змішування мають переважно від'ємні відхилення від ідеальних розчинів, які, збільшуються за абсолютною величиною зі

зниженням температури. Встановлено, що уздовж всіх променів ізотерми $\Delta_m G$ досягають мінімуму поблизу еквіатомного складу внаслідок великого внеску ідеальної складової мольної енергії Гіббса.

У п'ятому розділі оцінено ступінь ближнього хімічного порядку в розплавах багатоконцентних систем та розраховані концентраційні межі існування областей розплавів з підвищеною здатністю до аморфізації за емпіричним правилом, згідно з яким аморфізація загартуванням з рідини успішно перебігає для розплавів, в яких сумарний вміст асоціатів ΣX_{assoc} є більшим, ніж 0,3 при температурі склування. В даній роботі це правило вперше застосовано для розплавів три-, чотири- і п'ятикомпонентних систем. Це дало можливість розширити межі його ефективного використання з метою оптимізації пошуку складів багатоконцентних металічних стекл. Співставлення оцінених і експериментально визначених областей меж аморфізації розглянутих розплавів вказує на їх кореляцію і дає підстави для використання вищевказаного емпіричного правила і для інших багатоконцентних систем. Отримані результати добре проілюстровано.

У шостому розділі наведені результати застосування CALPHAD-методу для отримання термодинамічного опису систем Ti-Zr, Cu-Ti-Zr та Cu-Ti-Hf. Це дозволило розрахувати діаграми стану цих систем, проєкції поверхонь ліквідуса і солідуса, ізо- та політермічні перерізи, координати нонваріантних реакцій і розробити реакційні схеми.

У сьомому розділі в рамках CALPHAD-методу вперше створено базу даних параметрів моделей термодинамічних властивостей розплавів і граничних твердих розчинів системи Co-Cu-Fe-Ni-Ti-Zr-Hf. Застосовуючи цю базу було розраховано метастабільні діаграми стану вивчених автором систем. Для потрібних систем Cu-Ni-(Ti, Zr, Hf), Cu-Ti-Zr та Ni-Ti-Zr коректно інтерпретовані відомі з експериментів концентраційні області утворення аморфних сплавів та прогнозовані такі області для систем Co-Cu-(Ti, Zr, Hf), Cu-Fe-(Ti, Zr, Hf), Cu-Ti-Hf, Cu-Zr-Hf, Ni-Ti-Hf, Ni-Zr-Hf, Cu-Ni-Ti-Hf, Cu-Ni-Ti-Zr і Cu-Ni-Ti-Zr-Hf.

Показано, що концентраційні області утворення аморфних сплавів, розраховані в даній роботі за двома методами, узгоджуються між собою, що підтверджує коректність теоретичних розрахунків.

Розроблені методики прогнозування концентраційних областей аморфізації і бази параметрів моделей термодинамічних властивостей різних фаз були поширені на чотири- і п'ятикомпонентну системи: Cu-Ni-Ti-Zr, Cu-Ni-Ti-Hf і Cu-Ni-Ti-Zr-Hf. Показано, що прогнозована область аморфізації сплавів систем Cu-Ni-Ti-Zr та Cu-Ni-Ti-Hf розташовується в об'ємі відповідних концентраційних тетраєдрів. Проведені розрахунки задовільно узгоджуються зі складами експериментально отриманих аморфних сплавів.

Для розплавів п'яти політермічних перерізів NiTiZrHf-Cu, CuTiZrHf-Ni, CuNiZrHf-Ti, CuNiTiHf-Zr і CuNiTiZr-Hf п'ятикомпонентної системи Cu-Ni-Ti-Zr-Hf обчислено ділянки аморфізації. Виявлено, що найбільший по

протяжності інтервал аморфізації спостерігається уздовж перерізів NiTiZrHf–Cu і CuTiZrHf–Ni. Автор пояснив це необхідністю мати у розплаві досить високу концентрацію нікелю і міді, перший із яких є дуже сильним акцептором електронів. На основі цього зроблено припущення, що для сплавів таких перерізів, які потрапляють у прогнозований інтервал аморфізації, має виконуватися ще і умова $x_{Cu} + x_{Ni} > 0,15$. Встановлено, також, що відомий високоентропійний сплав CuNiTiZrHf також потрапляє у прогнозовану концентраційну область аморфізації. Тим самим надано підтвердження відомому з літератури експериментальному факту.

Висновки дисертаційної роботи ґрунтуються на великому масиві експериментальних і теоретичних даних, логічно впливають із результатів роботи і об'єктивно відображають її зміст.

До дисертаційної роботи можна зробити такі побажання і зауваження:

1. В огляді літератури фундаментально і всесторонньо проаналізовано стан термодинамічних досліджень і області складів аморфізації для розплавів дво- і трикомпонентних систем. Діаграми стану цих систем є важливими при виборі температур проведення дослідів, кількості і складу асоціатів. Тому доцільно було навести діаграми стану та відомі ізотермічні перерізи систем, для яких в роботі виконані експериментальні дослідження.

2. В науковій новизні більше уваги слід було приділити експериментальним досягненням, яких в роботі досить багато – вперше при дуже високих температурах вивчено термохімічні властивості розплавів трьох бінарних і 11 потрійних систем, які є аморфоутворюючими і важливі в практичному відношенні. Встановлені характеристики дали велику базу даних для створення термодинамічних описів і для розрахунків рівноважних і метастабільних діаграм стану.

3. Довірчі інтервали для парціальних ентальпій змішування Ti і Zr в розплавах подвійних систем Fe–Ti(Zr) занижені, тому що розкид цих експериментальних даних трохи більший. Так, для розплаву з $x_{Ti} = 0,2$ довірчий інтервал має бути ± 10 , а не ± 2 кДж/моль, як наведено в роботі. Це, ймовірно за все, викликано похибками в їх розрахунках, тому що для вивчених в роботі рідких сплавів потрійних систем такої невідповідності немає.

4. Натепер розроблено і використовуються моделі IAP і PAP. Автор вважає, що використовує нову модель, називаючи її MAP, хоча з дисертаційної роботи ясно, що в MAP коефіцієнти активності асоціатів теж приймаються рівними 1. Це означає, що треба все-таки писати MIAP, а не MAP, тоді як розчин можна називати асоційованим.

5. Ізоентальпії змішування розплавів системи Cu–Ti–Zr (рис. 4.13, с. 203), розраховані і визначені експериментально, але вони не дуже добре співпадають між собою, особливо в областях концентрацій біля бінарних систем із досить великою енергією міжатомної взаємодії. Сподіваємось, що це дефекти в рисунках, а не у використаних даних.

6. Цінність змодельованих для розплавів четверних і п'ятикомпонентних систем термодинамічних характеристик була б ще більшою, якби було проведено ще 3-4 досліді методом калориметрії, щоб переконатись, наскільки експериментальні дані по ΔH узгоджуються з розрахованими, бо відомо, що зараз немає універсальної моделі для прогнозування термодинамічних властивостей багатокомпонентних розплавів із аналогічних даних для подвійних і потрійних граничних систем. Хоча і без додаткової експериментальної інформації ясно, що розраховані в роботі термохімічні властивості цих розплавів не повинні суттєво відрізнятись від істинних значень, що було встановлено автором для потрійних систем. Розраховані в дисертаційній роботі термодинамічні дані для багатокомпонентних розплавів в подальшому допоможуть ефективно, з невеликими затратами праці і часу дослідити і уточнити їх.

7. Використовуючи два методи, автор коректно оцінив межі утворення аморфних сплавів як в подвійних, так і в багатокомпонентних системах. Причому, змодельовані області аморфізації добре узгоджуються між собою. Але лише в деяких системах утворюються об'ємні аморфні сплави. Бажано було б для них розглянути ще інші фактори – розмірні, електрохімічні, термічні, структурні, тому що саме вони можуть ефективно знижувати швидкість кристалізації стабільних сполук.

8. В табл. 4.9 і 4.10 (с. 245 і 246) термодинамічні властивості рідких сплавів п'ятикомпонентних систем наведено з завищеною точністю. Треба враховувати те, що вони одержані шляхом розрахунків, хоча і досить точних. Крім того, в назвах цих таблиць записана семикомпонентна система, що не відповідає дійсності. В усіх цих системах компонентами є взагалі 7 перехідних металів, але кожна із них містить 5 компонентів.

9. Склади рідких сплавів потрійних систем, які аморфізуються, бажано наводити для певного перерізу, бо їх області аморфізації обмежені не паралельними лініями, а кривими.

10. Дисертація оформлена добре, але є ряд неточних термінів, русизмів та описок: "фазові діаграми", "мольна доля", "безперервні лінії", "безперервні ряди твердих розчинів", "безперервні описи", "від'ємності", "позитивні, негативні відхилення" тощо.

Проте всі ці недоліки не є суттєвими, оскільки вони не ставлять під сумнів новизну отриманих результатів, висновки та положення, винесені П. Г. Агравалом на захист.

Висновки про наукову роботу в цілому

Дана дисертаційна робота представляє собою закінчене наукове дослідження, яке **відповідає паспорту спеціальності 02.00.04 – фізична хімія**. Автореферат адекватно відображає зміст дисертації. Дана дисертаційна робота робить фундаментальний внесок у розвиток сучасного матеріалознавства і фізичної хімії сплавів. Основний обсяг експериментальних робіт і вирішальний науковий внесок зроблено самим дисертантом. Дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12 та 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р. та № 567 від 27.07.2016 р., № 943 від 20.11.2019, № 607 від 15.07.2020, а дисертант – **Агравал Павло Гянович** – заслуговує присудження наукового ступеня доктора хімічних наук за спеціальністю 02.00.04 – фізична хімія.

Офіційний опонент

провідний науковий співробітник
відділу фізичної хімії неорганічних матеріалів
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України
д.х.н., проф.

В. С. Судавцова

18 квітня 2021 р.

Підпис д.х.н. В. С. Судавцової **ЗАСВІДЧУЮ**

Учений секретар Інституту

канд. фіз.-мат. наук



В. В. Картузов