НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є.О. Патона

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри ФМТО
Мирослав КАРПЕЦЬ
«___»_____20__ р.

Магістерська дисертація

за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві»
зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

на тему: «Вплив матеріалу підкладки на морфологію, електрофізичні та трибологічні властивості тонкоплівкового аморфного вуглецю»

Виконав:
студент 2 курсу, групи ФМ-31мп
Шкоденко К.В. _____

Науковий керівник:
доцент, к.т.н. Орлов А.К. _____

Консультант з розділу охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях:
зав. каф. ПГМ, д.т.н., професор Левченко О.В. _____

Консультант з розділу розробка стартап -проєкту:
доцент, к.е.н. Нараєвський С.В. _____

Консультант з нормоконтролю:
ст.викл. Шаповалова Н.А. _____

Рецензент:
доцент Лук'яненко І.В. _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Мирослав КАРПЕЦЬ

«____»____20___р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Шкоденко Костянтину Володимировичу

1. Тема дисертації «Вплив матеріалу підкладки на морфологію, електрофізичні та трибологічні властивості тонкоплівкового аморфного вуглецю», науковий керівник дисертації Орлов Андрій Костянтинович к.т.н., доц. каф. затверджені наказом по університету від 08.11.2024р. № 5021-с

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження нанорозмірні плівкові вуглецеві аморфні матеріали, осаджені на підкладки з полірованого монокристалічного Si(100), ситалу та скла методом електродугового розпорошення в вакуумі

4. Вихідні дані наукова та технічна література; Результати з приладів для використаних методів

5. Перелік завдань, які потрібно розробити проаналізувати та розрахувати експерементальні дані, отримані в ході дослідження; зробити загальні висновки по впливу матеріалу підкладки на властивості аморфного вуглецю

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу презентація у форматі Power Point

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Шаповалова Н.А. ст.викл.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О.В. зав. каф., д.т.н., професор		
Розробка стартап - проєкту	Нараєвський С.В. доцент, к.е.н.,		

9. Дата видачі завдання 02.09.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літературних джерел за тематикою дослідження	02.09.2024 р. – 18.09.2024 р.	
2	Вибір методу синтезу аморфного вуглецю та підготовка обладнання	19.09.2024 р. – 25.09.2023 р.	
3	Осадження аморфних вуглецевих плівок на підкладки та термічна обробка	20.09.2024 р. – 10.10.2024 р.	
4	Оптичні, трибологічні та рентгеноструктурні дослідження одержаних вуглецевих плівок	11.10.2024 р. – 19.10.2024 р.	
5	Резистометричні дослідження аморфних вуглецевих плівок на різних підкладках	12.10.2024 р. – 18.10.2024 р.	
6	Формування розділу «Охорона праці» та «Розробка стартап-проєкту»	19.11.2024 р. – 07.12.2024 р.	
7	Оформлення магістерської дисертації та презентації для захисту	07.12.2024 р. – 08.12.2024 р.	
8	Попередній захист магістерської дисертації	10.12.2024 р.	
9	Захист магістерської дисертації	17.12.2024 р.	

Студент Костянтин ШКОДЕНКО

Науковий керівник Андрій ОРЛОВ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 71 сторінка, 27 рисунків, 4 формула, 44 літературних джерела.

АДГЕЗІЯ, АМОРФНИЙ ВУГЛЕЦЬ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ТОНКОПЛІВКОВІ МАТЕРІАЛИ, РЕЗИСТОМЕТРІЯ

Об’єкт досліджень: нанорозмірні плівкові вуглецеві аморфні матеріали, осаджені на підкладки з полірованого монокристалічного Si(100), ситалу та скла методом електродугового розпорошення в вакуумі.

Предмет дослідження: термічна стабільність та адгезійна міцність аморфних вуглецевих плівок на різних підкладках в умовах низькотемпературного відпалу.

Мета роботи: дослідити вплив матеріалу підкладки на термічну стабільність, зміну морфології поверхні та адгезійної міцності після термічної обробки аморфних вуглецевих тонкоплівкових матеріалів.

Методи дослідження: чотирьохзондова резистометрія, оптична мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія, рентгеноструктурний фазовий аналіз.

Результати досліджень та їх новизна: термічна обробка аморфного вуглецю за температури 200 °С суттєво зменшує електроопір, збільшує адгезію, не впливаючи на морфологію поверхні.

Сфера застосування: мікро- та наноелектроніка, захисне покриття в агресивних середовищах, фотовольтаїка.

ABSTRACT

Master dissertation: 71 pages, 27 figures, 4 formula, 44 references.

ADHESION, AMORPHOUS CARBON, HEAT TREATMENT, THIN FILM MATERIALS, RESISTOMETRY

Object of research: nanoscale amorphous carbon film materials deposited on Si(100), sital and glass substrates by the method of electric arc sputtering.

Subject of research: thermal stability of amorphous carbon films on various substrates.

Purpose of the study: to identify the influence of the substrate on thermal stability, change in surface morphology and adhesion to the substrate after heat treatment of amorphous carbon thin film materials.

Research methods: resistivity, optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray structural phase analysis.

Research results and novelty: thermal treatment of amorous carbon at a temperature of 200 °C significantly reduces electrical resistance, increases adhesion, without affecting the surface morphology.

Field of application: micro- and nanoelectronics, protective coating in aggressive environments, photovoltaics.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 8
ВСТУП 9
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ 10
1.1 Властивості та застосування тонкоплівкових вуглецевих матеріалів 10
1.2 Структура та гібридизація аморфних вуглецевих плівок 12
1.3 Синтез нанорозмірних вуглецевих плівкових матеріалів 14
1.4 Трибологічні властивості тонкоплівкового вуглецю 15
1.5 Методи модифікації структури аморфного вуглецю 16
1.6 Висновки до розділу 1 17
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ 18
2.1 Об’єкти дослідження 18
2.2 Синтез тонкоплівкового аморфного вуглецю методом електродугового розпорошення 18
2.3 Термічна обробка вуглецевих плівок 20
2.4 Чотирьохзондова резистометрія 21
2.5 Оптична мікроскопія 22
2.6 Скануюча електронна мікроскопія 23
2.7 Трибологічні дослідження методом скретч тесту 24
2.8 Рентгеноструктурний фазовий аналіз 25
2.9 Висновки до розділу 2 27
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ 28
3.1 Зміна провідних властивостей після термічної обробки вуглецевих аморфних наноматеріалів 28
3.2 Вплив типу підкладки на морфологію поверхні аморфного вуглецю 29
3.3 Дослідження трибологічних властивостей аморфних вуглецевих плівок на різних підкладках 33
3.4 Результати рентгеноструктурного фазового аналізу аморфних вуглецевих матеріалів після термічної обробки 36

3.5 Висновки до розділу 3 37
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 39
4.1 Аналіз параметрів приміщення лабораторії матеріалознавства 39
4.2 Освітлення в лабораторії матеріалознавства 40
4.2.1 Характеристика природнього освітлення лабораторії матеріалознавства 40
4.2.2 Характеристика штучного освітлення лабораторії матеріалознавства 41
4.3 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ) 42
4.3.1 Небезпечні чинники при роботі з установкою ВУП-5 43
4.3.2 Безпека при роботі з електричними приладами в лабораторії матеріалознавства 45
4.3.3 Вплив шуму та вібрацій в лабораторії матеріалознавства 46
4.3.4 Мікроклімат робочої зони в лабораторії матеріалознавства 46
4.4 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці 48
4.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях 49
4.5.1 Пожежна безпека в лабораторії матеріалознавства 49
4.5.2 Алгоритм дії у випадку повітряної тривоги під час роботи в лабораторії матеріалознавства 50
4.6 Висновки до розділу 4 51
5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ 53
5.1 Опис ідеї стартап проєкту 53
5.2 Аналіз техніко-економічних переваг ідеї 54
5.3 Технологічний аудит ідеї проєкту 55
5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску проєкту 56
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап проєкту 63
5.6 Висновки до розділу 5 64
ВИСНОВКИ 65
CONCLUSION 66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ 67

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

sp, sp^2, sp^3 – гібридизація електронних орбіталей;

DLC – diamond like carbon (алмазоподібний вуглець);

a-C – аморфний вуглець;

ta-C – тетрагональний аморфний вуглець;

a-C:H – аморфний вуглець насичений воднем;

ta-C:H – тетрагональний аморфний вуглець насичений воднем;

ВЕР – вакуумне електродугове розпорошення;

СЕМ – скануюча електронна мікроскопія;

НДР – науково-дослідна робота;

КПО – коефіцієнт природного освітлення;

ШНВФ – шкідливі та небезпечні виробничі фактори.

ВСТУП

Аморфні вуглецеві тонкоплівкові матеріали займають важливе місце в сучасних технологіях, зокрема, у ролі захисного та функціонального покриття завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям. Такі покриття отримали значне поширення завдяки своїм механічним властивостям, корозійній стійкості, а також електричним властивостям, що робить їх перспективними для використання у таких галузях промисловості як медична, та галузях науки, як матеріалознавство. Властивості аморфного вуглецю обумовлені співвідношенням sp^2 та sp^3 гібридизації атомів, що визначає його електронну структуру. Вміст *sp* гібридизованих атомів в матеріалі, а отже і його фізичні властивості, тісно пов'язані з методами осадження та подальшої модифікації тонкоплівкових матеріалів. Зважаючи на широке застосування аморфного вуглецю, цей матеріал досліджують на різних металічних і неметалічних підкладках. Одна з проблем, пов’язана з осадженням аморфного вуглецю полягає в непрогнозованій зміні структури, та морфології поверхні матеріалу після термічної обробки. Саме тому метою даної роботи є дослідження впливу матеріалу підкладки на термічну стабільність аморфного нанорозмірного вуглецю.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Властивості та застосування тонкоплівкових вуглецевих матеріалів

Серед тонкоплівкових вуглецевих матеріалів особливої уваги заслуговує аморфний вуглець. Аморфний вуглець, або алмазоподібний вуглець (Diamond like carbon – DLC) – перспективний матеріал завдяки своїм властивостям (рис. 1.1), таким як низький коефіцієнт тертя, висока твердість та міцність, зносостійкість, біосумісність, висока хімічна інертність, а також унікальні оптичні та електричні характеристики [1 – 3]. Тонкоплівковий аморфний вуглець з sp^2 та sp^3 гібридизованими атомами (*a*-C) зазвичай використовуються як покриття, або проміжний шар. Властивості аморфного вуглецю напряму пов'язують з високим вмістом sp^3 гібридизованих атомів, який може досягати 86 %. Вуглецеві матеріали з високим вмістом sp^3 гібридизованих атомів ще називають тетрагональний аморфний вуглець (*ta*-C) [4].

Рисунок 1.1 – Властивості аморфних вуглецевих матеріалів

Аморфні вуглецеві тонкі плівки мають надзвичайно високу твердість та міцність, що співставно з твердістю та міцністю алмазу. А саме, для *a*-C з переважним вмістом sp^2, твердість складає (10-20) ГПа, модуль пружності (100-200) ГПа, а для *ta*-C значення твердості та модулю пружності досягають 80 ГПа та 500 ГПа відповідно, що менше за значення алмазу, але більше за значення чистого масивного графіту в десятки разів [5].

Покриття з аморфного вуглецю, завдяки своїм трибологічним властивостям, таким як низький коефіцієнт тертя, та висока стійкість до механічного зношування, широко використовуються для захисту металевих покриттів. Серед прикладів застосовування в якості захисного покриття магнітних поверхонь жорстких дисків [6]. Маючи товщину плівки не більше 3 нм, таке покриття захищає магнітну поверхню від зношування, зберігаючи функціональність пристрою.

Завдяки корозійній стійкості аморфного вуглецю, та його термічній стійкості можливе використання для захисту від зношування окремих деталей двигунів внутрішнього згоряння. Виготовлені поршні, з нанесеним шаром аморфного вуглецю мають до 80 % більшу зносостійкість [7], що дозволяє значно збільшити їх ресурс.

Також аморфні вуглецеві матеріали активно застосовують в медицині. Оскільки вуглець має високу біосумісність, *ta*-C покриття на поверхні імплантів покращує проростання біологічних тканин до імплантів. Крім того, під час взаємодії з кров'ю, на поверхні вуглецю, утворюється шар протеїну, що запобігає утворенню тромбів [8].

Окрім використання в якості захисного покриття, цей матеріал також використовується в системах накопичення енергії. Зокрема, тонке покриття з аморфного вуглецю нанесеного на TiO_2 аноди в літій-іонних акумуляторах дозволяє покращити характеристики батареї. Аморфний вуглець, завдяки пористій структурі, має кращу адсорбцію електронів, що полегшує проходження електронів між електролітом та TiO_2 анодом, завдяки більшій локальній концентрації електронів [9]. Також покриття з *ta*-C, завдяки електричним та

оптичним властивостям, активно використовується в фотовольтаїці, як шар, що запобігає відбиванню світла. Адсорбція променів дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії пристрою [10].

1.2 Структура та гібридизація аморфних вуглецевих плівок

В залежності від електронної структури аморфного вуглецю властивості радикально змінюються. Тому вуглецеві аморфні матеріали зазвичай поділяють за вмістом та типом *sp* гібридизованих атомів, наявністю водню та легування іншими елементами (рис. 1.2). Аморфний вуглець в основному складається з sp^2 (структура графіту) та sp^3 (структура алмазу) гібридизованих атомів. Вуглецеві матеріали з вмістом sp^3 атомів < 50 % відносять до *a*-C, тоді як плівки з вмістом sp^3 > 50% до *ta*-C [11]. Подібна категоризація є і для аморфного вуглецю насиченого воднем *a*-C:H та *ta*-C:H, вміст водню в якому має перевищувати 5 %. Така класифікація необхідна для зазначення типу вуглецевої плівки, враховуючи сильний взаємозв'язок складу і властивостей [12].

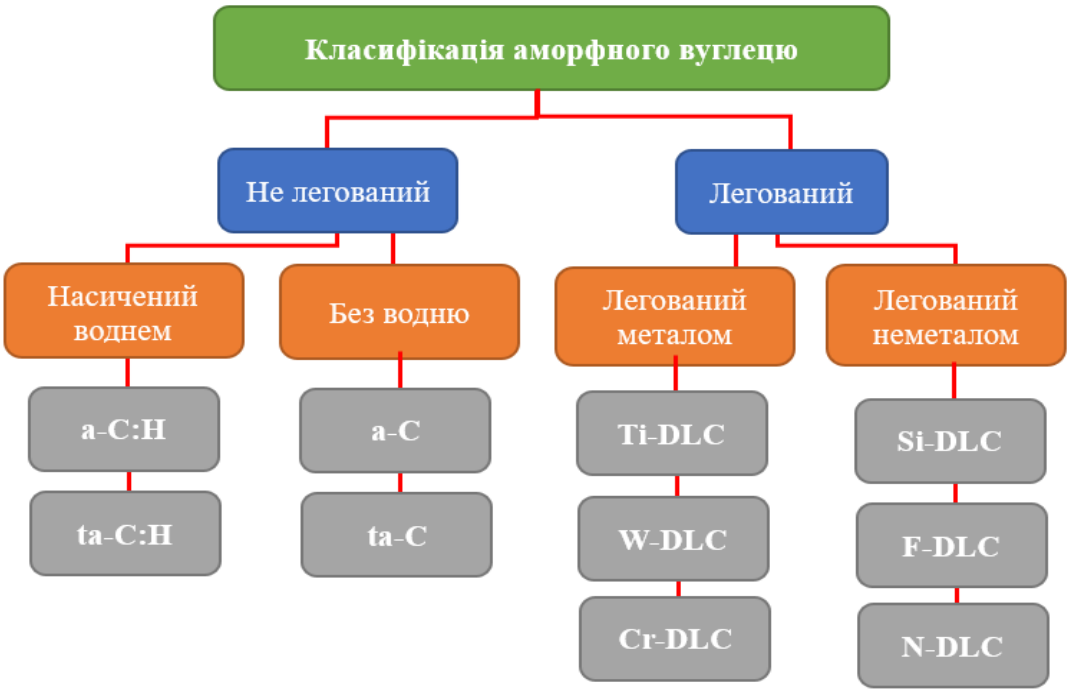


Рисунок 1.2 – Загальна класифікація аморфних вуглецевих плівок

На рис. 1.3 наведена потрійна діаграма стану аморфних вуглецевих матеріалів. В нижньому правому куті рисунка, вміст водню настільки високий, що матеріал не тверда вуглецева плівка не утворюється [13]. У центрі діаграми знаходиться область матеріалу *a*-C:H, яка зазвичай виробляється шляхом осадження плазмового хімічного осадження в вакуумі атомів водню та вуглецю. Насичені воднем тонкі плівки *a*-C:H можуть містити від 20 % до 25 % вмісту H до надзвичайно високого, з вмістом H приблизно 60 % від загальної кількості атомів.

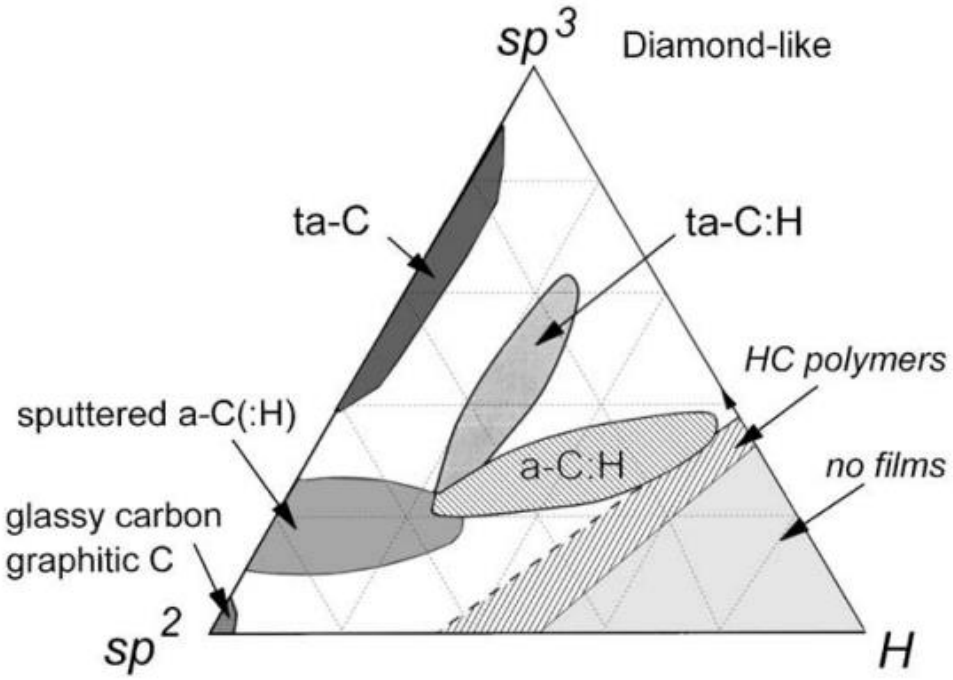


Рисунок 1.3 – Потрійна діаграма стану зв’язків в аморфних вуглецево-водневих сполуках [14]

Осаджена тонка плівка аморфного вуглецю має декілька шарів, які відрізняються властивостями. Зазвичай вирізняють 2 або 3 шари відповідно до їх розподілу за товщиною плівки: змішаний, суцільний, та поверхневий шари. Першим є шар що розміщений на межі поділу з підкладкою та насичений матеріалом підкладки, над ним знаходиться суцільний, щільний шар вуглецю, що має найбільший вміст sp^3 гібридизованих атомів [14].

Ця шарувата структура аморфного вуглецю зберігається при змінах параметрів осадження плівки, та термічній обробці, проте концентрації самих гібридизованих атомів при цьому змінюються [15].

1.3 Синтез нанорозмірних вуглецевих плівкових матеріалів

Для синтезу тонкоплівкового аморфного вуглецю використовують такі методи осадження в вакуумі як магнетронне розпорошення, іонно променеве розпорошення, електродугове розпорошення, та інші [16]. Використання того чи іншого методу обумовлене не лише перевагами та недоліками обраного методу синтезу, а й призначення вуглецевих матеріалів отриманих після осадження, оскільки метод синтезу сильно впливає на гібридизацію атомів в матеріалі [17].

Метод магнетронного розпорошення є поширеним при необхідності отримання аморфних вуглецевих матеріалів, оскільки забезпечує гомогенність отриманої плівки з високою адгезією до підкладки. Проте цей метод вимагає відносно складного процесу підготовки. Оскільки для рівномірного розпорошення необхідна мішень правильної геометричної форми, що часто важко досягнути, при використанні мішені з графіту [18].

Метод іонно-променевого розпорошення полягає в використанні високоенергетичного променю іонів аргону Ar^+, які вибивають атоми з мішені, які згодом осаджуються на підкладку. Кут падіння іонного променю на підкладку та його інтенсивність впливає на кінцеві властивості одержаної вуглецевої плівки. При використанні даного методу, на структуру осадженої плівки також впливає температура підкладки та її теплопровідні властивості [19]. Таким чином використання даного методу дає можливість контролювати структуру вуглецевої плівки, варіюючи температуру підкладки, що однак створює проблеми які полягають в тонкому налаштуванні енергії та кута падіння іонів для отримання структури з переважним вмістом sp^3 гібридизації. Також одним з недоліків іонно-променевого розпорошення є синтез

вуглецевої плівки з меншою однорідністю *sp* гібридизованих атомів в об’ємі матеріалу, що пов’язана з розпорошенням окремих кластерів атомів [20].

Серед відомих методів осадження вуглецевих аморфних плівок з парової фази, найкраще себе показав метод вакуумного електродугового розпорошення (ВЕР), та його різновиди. На відміну від описаних вище методів він забезпечує формування вуглецевих плівок з покращеними властивостями, такими як, густина, термічна стабільність, зносостійкість та загальний вміст sp^3 гібридизованих атомів [21]. ВЕР є найпродуктивнішим методом отримання аморфних вуглецевих плівок, та має безліч модифікацій. В якості матеріалу катодів можна використовувати графіт.

1.4 Трибологічні властивості тонкоплівкового вуглецю

Одна з ключових проблем, що виникають при синтезі тонкої плівки з аморфного вуглецю, полягає в її адгезії до підкладки. Ця проблема може суттєво вплинути на ефективність та довговічність покриття. Для вирішення цієї задачі в науковій практиці використовують кілька різних підходів, серед яких можна виділити попередню обробку підкладки або ж нанесення проміжного шару. Важливо зазначити, що до матеріалів підкладки, які демонструють хорошу адгезію до вуглецю, відносять такі метали, як сталь, алюміній, а також кремній. Більшість досліджень концентрується саме на використанні проміжного металевого шару на основі Ti, для забезпечення кращої адгезії до підкладки. Додатково, плазмова обробка поверхні підкладки також виявилася ефективним методом, що дозволяє покращити адгезію плівки, сприяючи утворенню більш міцного зв'язку між аморфним вуглецем та підкладкою [22].

Крім того, велике значення для трибологічних властивостей вуглецю має і процес осадження. Наприклад, вуглецеві плівки, отримані методом катодно-дугового осадження з багатошаровою структурою мають дещо кращу адгезію та трибологічні властивості в порівнянні з плівками аморфного вуглецю, які складаються з одного суцільного шару [23]. Однак, незважаючи на відомі підходи

і технології, залишається серйозним викликом забезпечення адгезії тонкоплівкового аморфного вуглецю на неметалевих підкладках.

1.5 Методи модифікації структури аморфного вуглецю

Плівки аморфного вуглецю мають дуже широке застосування, тому для кожної задачі можуть використовувати різні методи обробки після синтезу, для покращення бажаних властивостей не змінюючи процес осадження. Серед методів модифікації структури тонкоплівкового аморфного вуглецю найбільше уваги приділяють іонній імплантації та термічній обробці.

Іонна імплантація аморфного вуглецю іонами Xe^+ дозволяє зменшити електроопір матеріалу навіть при 50 кеВ. Той же результат продемонстрований при імплантації C^+ іонами. В обох випадках, іонна імплантація впливає на вміст sp^2 та sp^3 гібридизованих атомів, на користь sp^2 гібридизації. Однак зони з більшим вмістом sp^2 гібридизації утворюються кластерами, що призводить до неоднорідності матеріалу [24].

Інший поширений метод модифікації аморфного вуглецю – термічна обробка. За температур відпалу до 450 ℃ не спостерігається суттєвого зміщення атомів вуглецю, натомість відбувається зміна співвідношення гібридизації вуглецю [25, 26].

За температури 150 ℃ та 200 ℃ не спостерігається значних змін структури. Після відпалу за вищих температур 250 ℃ – 300 ℃ починається зміна концентрації sp^2 та sp^3 гібридизованих атомів. Кількість sp^2 вуглецю збільшується, за рахунок зменшення sp^3. За температур відпалу 350 ℃ та 450 ℃ продовжується зміна співвідношення sp^2 та sp^3 вуглецю в бік збільшення sp^2. При цьому на поверхні зразка збільшується кількість вуглецю, з одночасним зменшенням його в об’ємі [27].

Порівнюючи вплив термічної обробки на електронну структуру вуглецю з іонним бомбардуванням, можна зазначити, що останній метод значно сильніше

впливає на зміну гібридизації атомів вуглецю, однак має ряд недоліків, як неоднорідність *sp* гібридизованих атомів в матеріалі [28].

1.6 Висновки до розділу 1

1. Тонкі плівки аморфного вуглецю мають високий потенціал застосування в якості захисних і функціональних покриттів, завдяки своїм механічним та електрофізичним властивостям.

2. Аморфний вуглець здебільшого складається з sp^2 та sp^3 гібридизованих атомів. Переважний вміст вуглецю тої чи іншої гібридизації, а також їх розподіл обумовлює фізичні властивості.

3. Існує декілька методів отримання аморфного вуглецю, зокрема магнетронне осадження та електродугове розпорошення. Метод осадження напряму впливає на вміст гібридизації, та відповідно властивості матеріалу.

4. Адгезія аморфних вуглецевих плівкових матеріалів напряму залежить від структури шарів, які формуються з різним співвідношенням sp^2 та sp^3 гібридизованих атомів.

5. Для модифікації структури осаджених плівок аморфного вуглецю може застосовуватися термічна обробка, іонна імплантацію та інші види модифікацій.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Об’єкти дослідження

В даній роботі досліджувалися нанорозмірні плівкові матеріали з аморфного вуглецю, отримані методом електродугового розпорошення в вакуумі (10^{-2} Па), на підкладки з монокристалічного кремнію Si(100) легованого бором, керамічні підкладки Sital, та підкладки зі скла. Підкладки були нарізані розмірами 10 мм на 10 мм та очищені механічно. Товщина осадженого шару вуглецю контролювалась кількістю циклів розпорошення (рис 2.1). Кількість циклів осадження і відповідно товщина матеріалу підбиралась так, щоб забезпечити найменшу розбіжність в товщині при відтворенні процесу осадження.

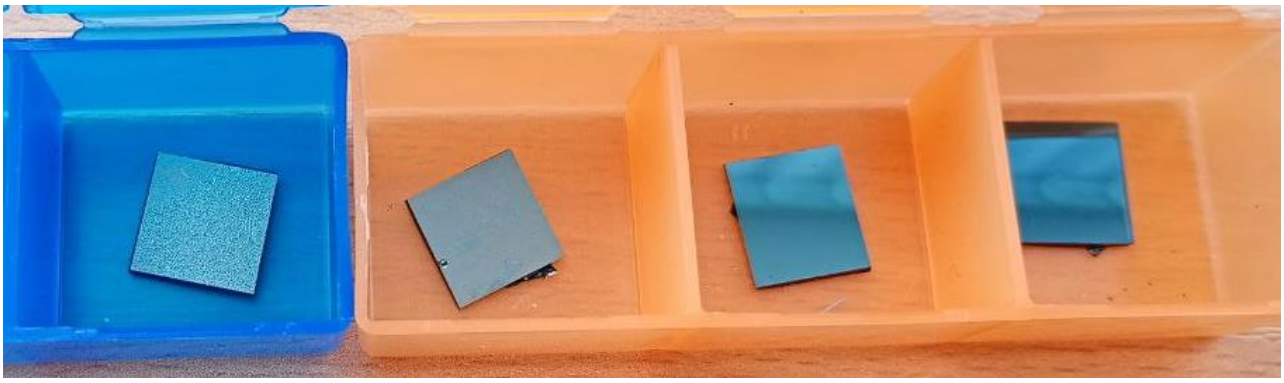


Рисунок 2.1 – Типовий вигляд зразків з аморфним вуглецевим покриттям

2.2 Синтез тонкоплівкового аморфного вуглецю методом електродугового розпорошення

Електродугове розпорошення – один з методів осадження тонких плівок в вакуумі, яке відбувається шляхом розпорошення електроду з провідного матеріалу на підкладку, під час дугового розряду [33]. Цей метод дозволяє осаджувати плівки з рівномірно розподіленими *sp* гібридизованими атомами. Принцип роботи методу може відрізнятись в залежності від установки, але

зазвичай це 2 графітових електроди з малою площею контакту, до яких прикладають високий струм. В точці контакту електродів виникає електродуговий розряд.

В даній роботі в якості електродів використовуватись графітові циліндричні стержні діаметром 6 мм, заточені до центру, що були закріплені на штативі в вакуумній камері установки ВУП-5 (рис. 2.2), на відстані 95 мм від підкладки. Зазвичай для осадження аморфного вуглецю на ВУП-5 використовують графітові електроди закріплені на шарнірному механізмі, контакт між якими під час випаровування матеріалу забезпечується гравітацією. Однак при цьому важко забезпечити стабільний процес осадження. Тому в даній роботі використовувався модифікований метод, в якому напруга на електродах фіксована, а відстань між електродами контролювалась вручну та циклічно змінювалась, для запобігання перегріву графіту. На рис. 2.3 показана схема роботи обладнання для осадження вуглецевих тонкоплівкових матеріалів в вакуумі.

Рисунок 2.2 – Вакуумний універсальний пост ВУП-5

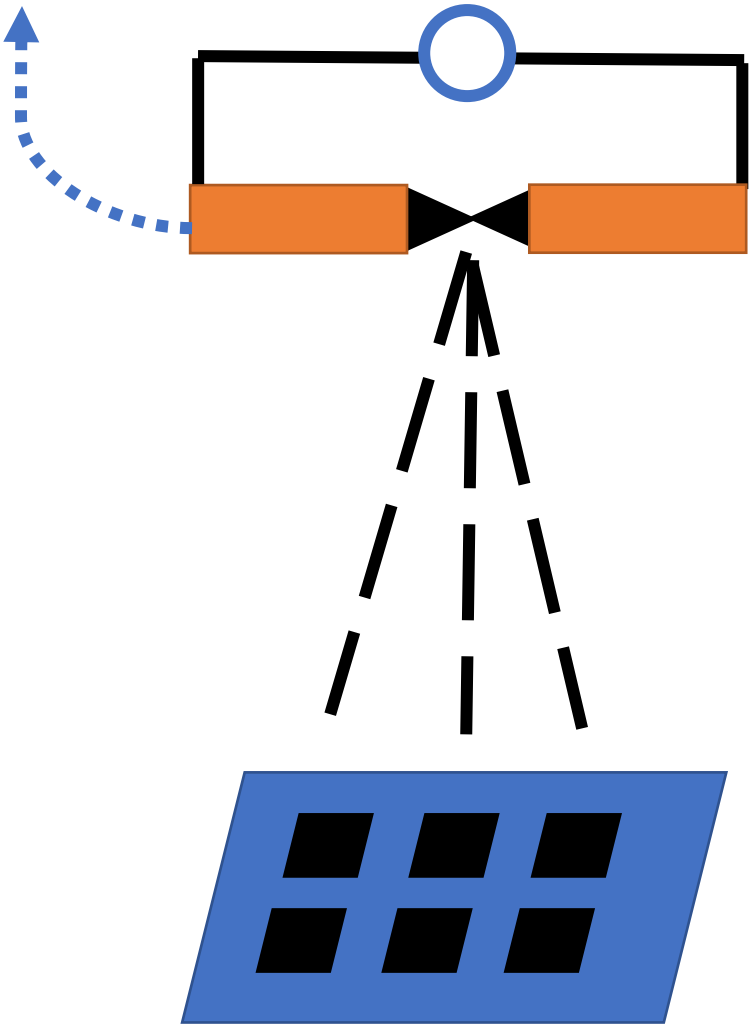


Рисунок 2.3 – Схема осадження вуглецевих тонкоплівкових матеріалів в вакуумі

2.3 Термічна обробка вуглецевих плівок

Термічна обробка нанорозмірних плівок аморфного вуглецю проводилась в вакуумній камері, за тиску 10^{-4} Па. Зразки були встановлені на поверхні керамічного столика з резистивним нагрівачем, на який подавалась змінна напруга (10 – 50) В. Плівкові матеріали піддавалися відпалу за температури (100 – 400) °С впродовж години з охолодженням в вакуумі, а також нагрів до 600 °С без витримки з охолодженням в вакуумі. На рис. 2.4 показано вигляд вакуумної камери для ізотермічного відпалу досліджуваних зразків.

Рисунок 2.4 – Вакуумна камера для термічної обробки тонкоплівкових матеріалів

Швидкість нагріву становила 1 °C за секунду. Контроль температури здійснювався за допомогою термопари, яка була встановлена на поверхні зразка, та поверхні нагрівального столика.

2.4 Чотирьохзондова резистометрія

Питомий електричний опір є одним з найбільш чутливих індикаторів змін в структурі матеріалу, оскільки електроопір пов’язаний з щільністю матеріалу, та його провідністю. Для вимірювання питомого електроопору використовують метод резистометрії. Електроопір ρ розраховують за формулою (2.1):

$$\rho = 4{,}53 \cdot d\left(\frac{V}{I}\right), \tag{2.1}$$

де d – товщина плівки;

V – напруга на щупах вольтметра;

I – сила струму яку подають на зразок.

Метод чотирьохзондової резистометрії – один з методів вимірювання питомого електроопору для тонкоплівкових матеріалів. Особливості методу вимірювання полягають в тому, що струм подається на 2 крайніх щупа, а зміна напруги вимірюється – на 2-х внутрішніх. Схематичне зображення вигляду методу показано на рис. 2.5.

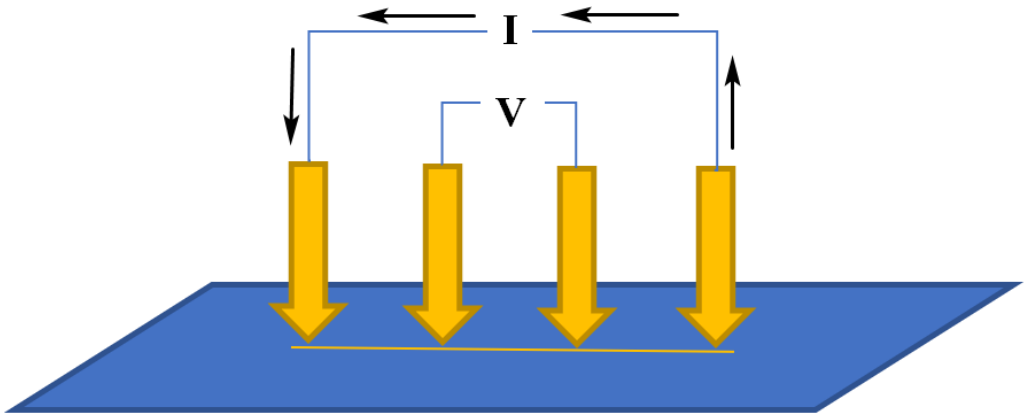


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення роботи методу чотирьохзондової резистометрії

В даній роботі методом чотирьохзондової резистометрії вимірювали питомий електроопір вуглецевих нанорозмірних плівок осаджених на підкладки з кремнію у вихідному стані, та після відпалу за температури 100 °С – 400 °С впродовж години з охолодженням в вакуумі. Вимірювання проводилось декілька разів на кожному зразку, з кроком в 2 мм. Струм на крайніх контактах складав 4,53 мА, відстань між вольфрамовими щупами 1,6 мм, навантаження на кожен щуп складало 25 грам.

2.5 Оптична мікроскопія

Оптичні мікроскопи використовуються для дослідження об’єктів більших за довжину хвилі видимого світла. Оптичний мікроскоп в цілому складається з об’єктиву – набір лінз, що відповідають за оптичне збільшення зразка

дослідження, та окуляру, що фокусує зображення (може також мати збільшення). Загальне оптичне збільшення є добутком збільшення окуляру та об’єктиву. А розмір об’єктів дослідження визначається або з поля зору мікроскопу та його оптичного збільшення, або за допомогою калібрувальної лінійки.

В даній роботі, для дослідження поверхні вуглецевих плівок в вихідному стані, та після термічної обробки використовувався оптичний мікроскоп iScope Euromex з об’єктивами ×20 і ×50, та загальним збільшення ×200 та ×500 (рис. 2.6).

Рисунок 2.6 – Оптичний мікроскоп iScope Euromex [29]

2.6 Скануюча електронна мікроскопія

На відміну від оптичного мікроскопу, скануючий електронний мікроскоп (СЕМ) має роздільну здатність до 10 нм, що дозволяє досліджувати вже наноструктуру матеріалу. Робота більшості СЕМ полягає в тому щоб зафіксувати за допомогою детектора вторинні електрони, що дифрагували від матеріалу об’єкта дослідження (рис. 2.7). Первинні електрони для цього генеруються джерелом (електронна гармата). Електрони, що вилетіли з гармати

фокусуються на поверхні зразка в точку, та зміщуються крок за кроком для побудови зображення [30].

В даній роботі для дослідження поверхні вуглецевих аморфних плівок використовувався СЕМ, зі збільшення до 10000 разів. Прискорююча напруга складала 30 кВ. Кут нахилу падіння електронного променю складав 45° для плівок осаджених на кремній, 40° осаджених для ситалу, та 50° для осаджених на скло.

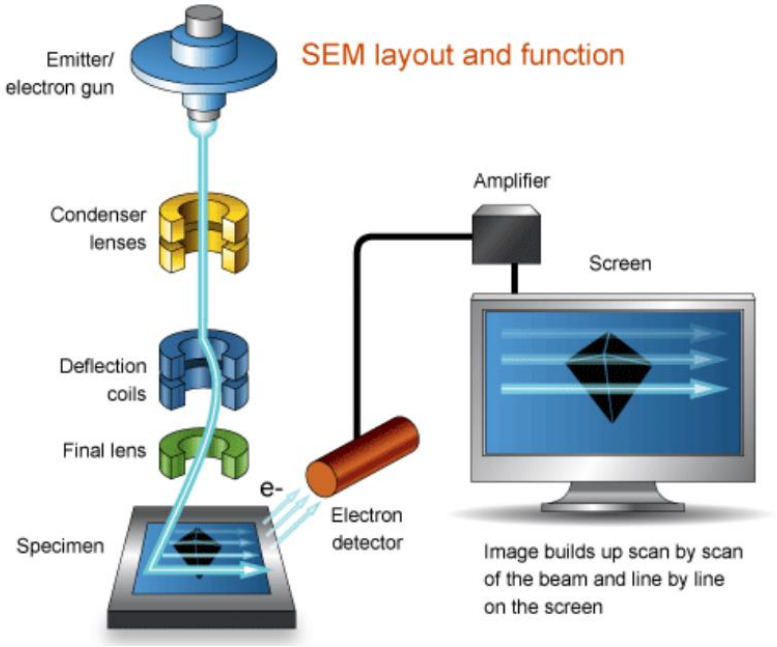


Рисунок 2.7 – Схема роботи скануючого електронного мікроскопа [30]

2.7 Трибологічні дослідження методом скретч тесту

Трибологічні дослідження тонкоплівкових матеріалів дають змогу зрозуміти їх зносостійкість та адгезію до підкладки. Скретч тест використовують для оцінки адгезії та характеру пошкоджень матеріалу під зовнішнім механічним навантаженням [31]. Суть методу полягає в використанні індентора з твердого матеріалу який під фіксованим, або лінійно змінюваним навантаження проводять вздовж поверхні матеріалу (рис. 2.8).

В даній роботі навантаження індентора лінійно збільшувалось до середини подряпини, де складало 1 г, та зменшувалось до 0 в кінці подряпини. Зазвичай

адгезію плівки до підкладки цим методом визначають спираючись на навантаження на індентор, за якого плівка руйнується. Однак через нанорозмірну товщину аморфної вуглецевої плівки, навіть з найменшим навантаженням плівка руйнувалась щойно індентор починав рух. Тому, натомість був застосований інший підхід. Було обрано навантаження, за якого плівка гарантовано руйнувалась, та робили 2 подряпини. Перша була потрібна для виставлення індентора на поверхню підкладки. Індентор починав рух з під плівки, руйнуючи її. За площею зруйнованої частини плівки, яка після індентування протиралась, для усунення всіх відлущених часточок, оцінювалось значення адгезії.

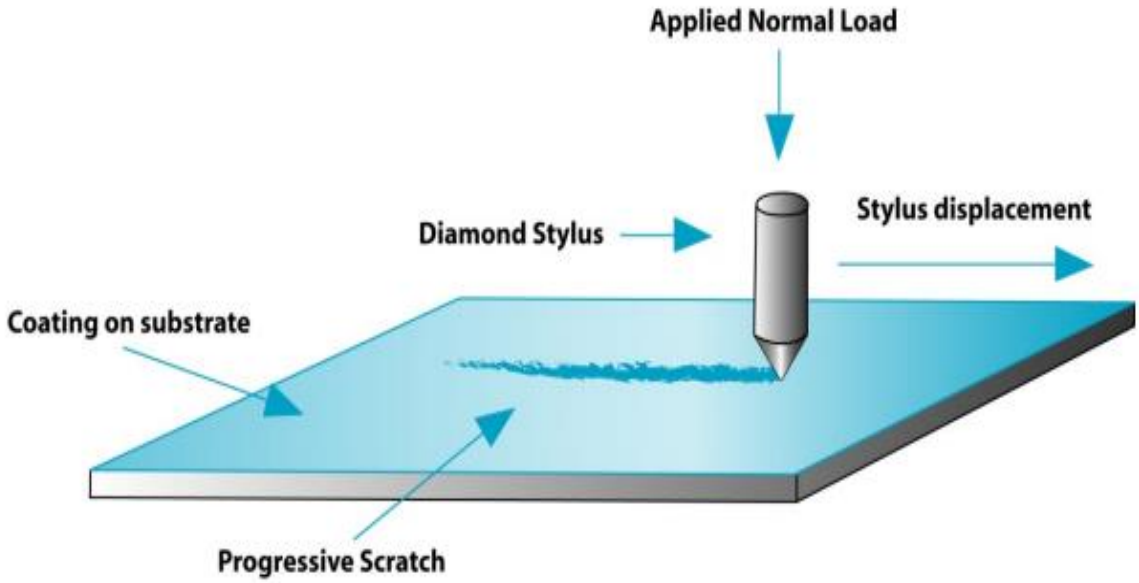


Рисунок 2.8 – Схематичне зображення роботи скретч тесту [31]

2.8 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Рентгенівська дифракція є загальноприйнятним методом дослідження кристалічної структури матеріалів. Метод базується на дифракції рентгенівських променів на кристалічній гратці матеріалу. Рентгенівські промені генеруються катодно-променевою лампою, фільтруються для отримання монохроматичного випромінювання та фокусуються на зразок (рис. 2.9). Для немонокристалічних матеріалів використовують метод порошкової дифракції. В цьому випадку,

зафіксовані значення інтенсивності детектора представляють як імпульси за секунду в кожному положенню детектора за джерела випромінювання, та будують графік залежності кута 2θ від інтенсивності сигналу [32]. Головна умова, при якій відбувається дифракція рентгенівського променю, це закон Вульфа – Брегга (формула 2.2):

$$n\lambda = 2dsin\theta, \tag{2.2}$$

де n – ціле число;

λ – довжина хвилі рентгенівських променів;

d – міжплощинна відстань;

θ – кут дифракції.

В даній роботі для дослідження можливої кристалізації тонкоплівкового вуглецю після термічної обробки використовувався рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima-IV (рис. 2.10). Зйомка проводилася за геометрією ковзаючого променя. В якості джерела рентгенівського випромінювання використовувалось джерело мідного випромінювання з довжиною хвилі 1,5405 Å (Cu-K_α). Крок складав 0,02°, з витримкою в точці 2 секунди, на кутах зйомки 2θ від 10° до 70°. Обрані кути зйомки дозволяють дослідити аморфну частину матеріалу, та виявити можливу кристалізацію аморфного вуглецю.

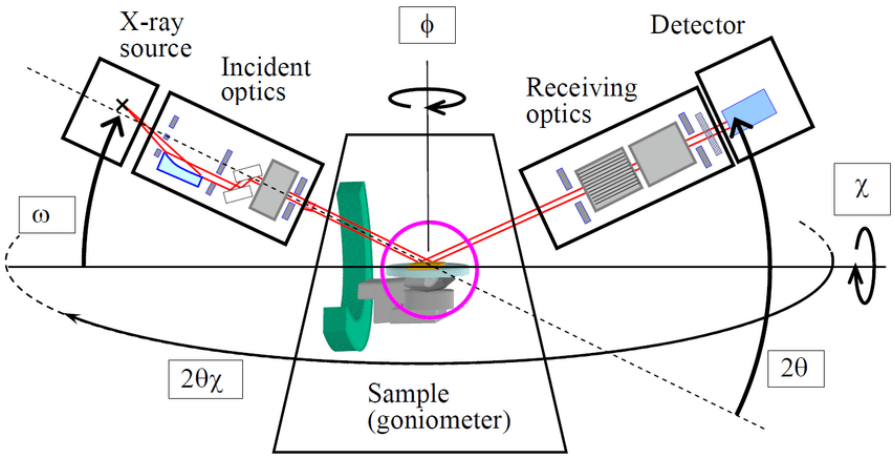


Рисунок 2.9 – Схема роботи рентгенівського дифрактометра [23]

Рисунок 2.10 – Дифрактометр Rigaku Ultima IV [34]

2.9 Висновки до розділу 2

1. Нанорозмірні тонкоплівкові вуглецеві матеріали було отримано методом електродугового розпорошення на підкладки з кремнію, ситалу та скла. Товщина матеріалу контролювалась кількістю циклів розпорошення.

2. Аморфні вуглецеві матеріали було піддано термічній обробці в вакуумі, а саме відпал за температур 100 °С– 400 °С впродовж години з охолодженням в вакуумі, а також нагрів до 600 °С без витримки з охолодженням в вакуумі. Температура контролювалась за допомогою термопари.

3. Для дослідження термічної стабільності аморфних вуглецевих плівок було використано сучасні фізичні методи дослідження, серед яких рентгеноструктурний фазовий аналіз, для спостереження можливої кристалізації матеріалу, оптична та електронна мікроскопія, для вивчення морфології поверхні, скретч тест для дослідження адгезії матеріалу до підкладки, та метод чотирьохзондової резистометрії, для дослідження зміни провідних властивостей.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Зміна провідних властивостей після термічної обробки вуглецевих аморфних наноматеріалів

Електропровідні властивості вуглецевих аморфних плівок визначали за допомогою методу чотирьохзондової резистометрії. Оскільки для розрахунку питомого електроопору необхідне значення товщини плівки, які не були визначені, тому для оцінки електропровідності брались значення товщини аморфної плівки в 100 нм. Результати вимірювання представлені на рис. 3.1.

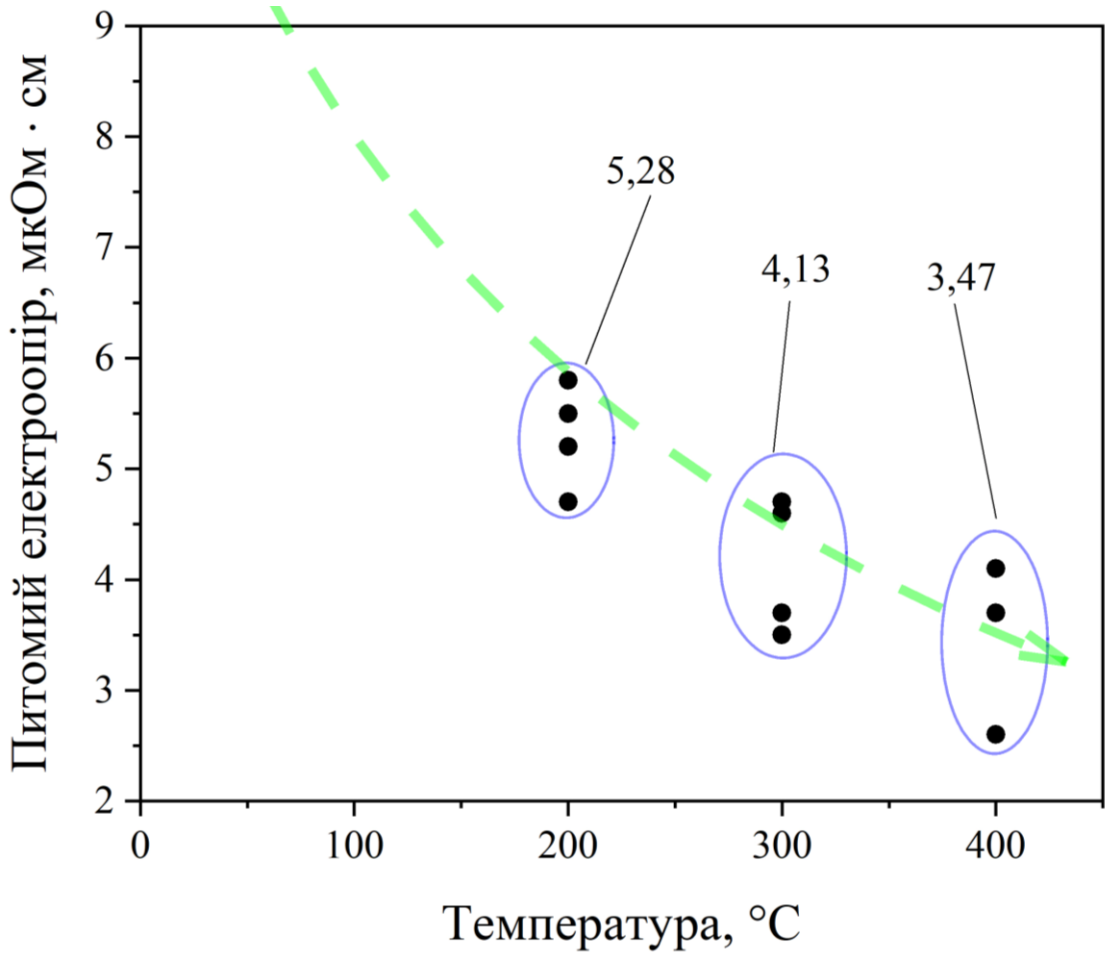
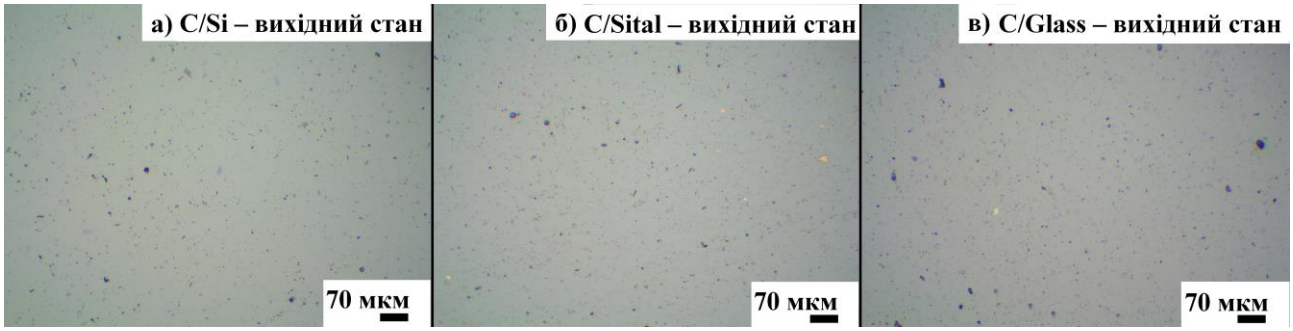


Рисунок 3.1 – Питомий електроопір вуглецевих плівок осаджених на підкладку з кремнію у вихідному стані та після відпалу за температур (100 – 400) °C

Отримати точні значення електроопору для вуглецевих аморфних плівок осаджених на підкладки з кремнію у вихідному стані та після відпалу за температури 100 °С впродовж години, неможливо, оскільки значення опору перевищують межі показу приладу. Після відпалу за температури 200 °С розраховане середнє значення електроопору дорівнює 5,28 мкОм · см. При збільшенні температури відпалу електроопір продовжує зменшуватись, та становить 5,02 мкОм · см після відпалу за температури 300 °С та 4,1 мкОм · см за температури відпалу 400 °С. Зміна опору може бути пов'язана зі зміною електронної структури атомів вуглецю. В той же час розбіжність значень електроопору більша для плівки відпаленої за вищих температур. Це може бути пов'язано з початком відшарування за температури 300 °С та збільшенням неоднорідності плівки.

3.2 Вплив типу підкладки на морфологію поверхні аморфного вуглецю

За допомогою оптичної мікроскопії та СЕМ була досліджена поверхня аморфних вуглецевих плівок. За результатами оптичної мікроскопії у вихідному стані плівки осаджені на підкладки з кремнію, ситалу та скла не мають суттєвих відмінностей (рис. 3.2). Поверхня вуглецю на даних типах підкладок є гладкою з дзеркальною поверхнею, з включеннями мікроскопічних фрагментів графіту, який потрапив на плівку під час розпорошення та мають металевий блиск.

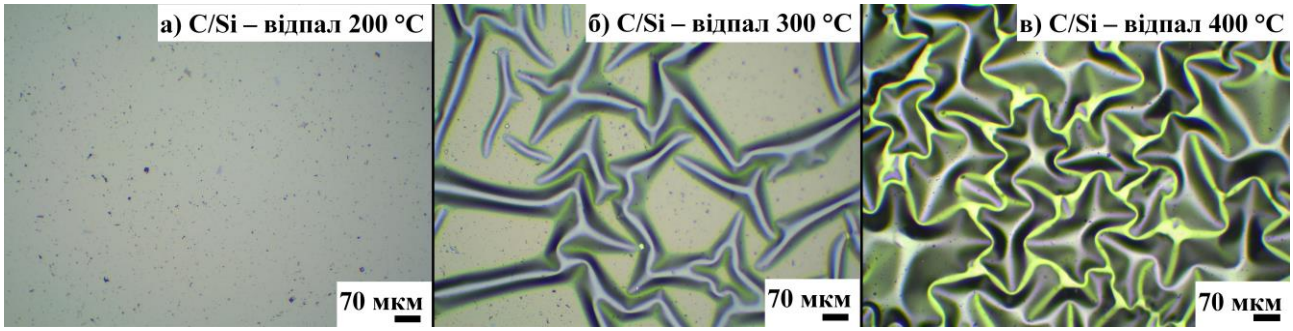


а – кремній вихідний стан; б – ситал вихідний стан; в – скло кремній вихідний стан

Рисунок 3.2 – Поверхня аморфних вуглецевих плівок на різних підкладках

Після відпалу вуглецевих плівок протягом години за температури 200 °С – 400 °С поверхня матеріалу суттєво змінюється, що можна спостерігати на рис. 3.3. Після відпалу за температури 200 °С видимих змін не відбувається, однак відпал за температури 300 °С призводить до зморщення поверхні, яка починає відшаровуватись від підкладки. Після відпалу за температури 400 °С продовжується процес відшарування вуглецевої плівки від підкладки.

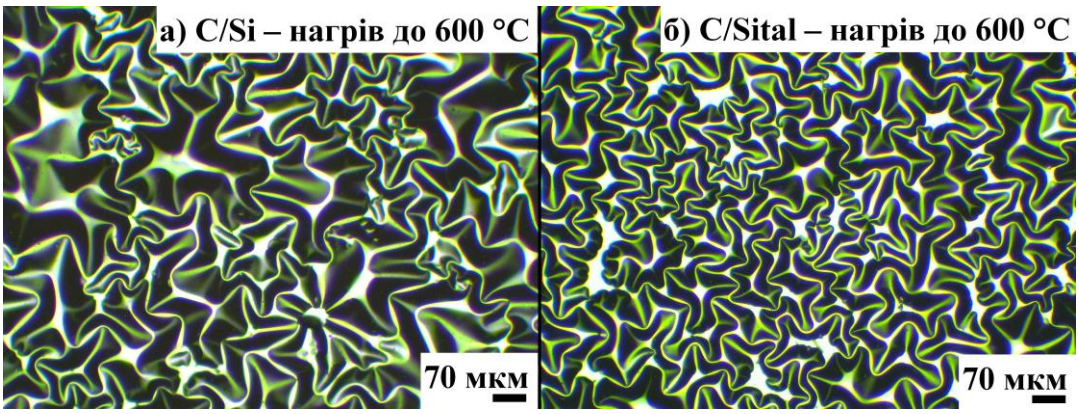
Процес відшарування плівки від підкладки відбувається на всіх типах підкладок. На рис. 3.4 показано поверхню вуглецевих нанорозмірних матеріалів на підкладках з кремнію та ситалу після нагріву до 600 °С без витримки, в результаті якого плівка повністю відшарувалась від підкладки.



а – відпал 200 °С; б – відпал 300 °С; в – відпал 400 °С

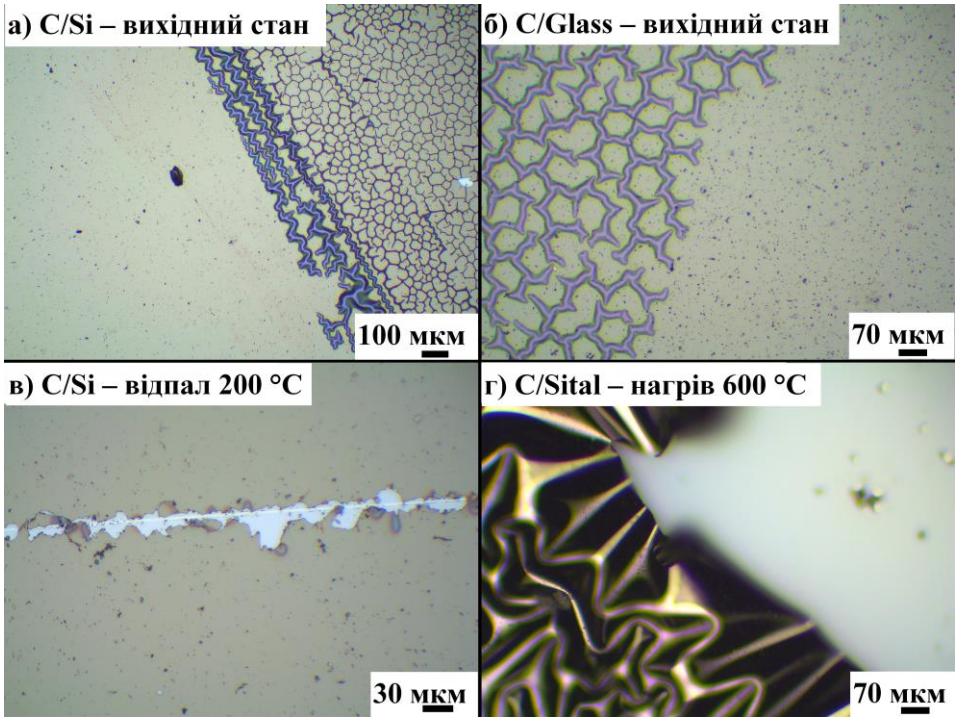
Рисунок 3.3 – Поверхня аморфних вуглецевих плівок на підкладках з кремнію після відпалу впродовж 1 години за температури (200 – 400) °С

Процес відшарування плівки також може бути викликаний іншими факторами, такими як непідготовлена, забруднена поверхня (рис. 3.5). На рис. 3.5, а показано вуглецеву плівку осаджену на частково очищену поверхню кремнію, в результаті чого, частина плівки осаджена на забруднену вуглеводнями та оксидами підкладку почала відшаровуватись у вихідному стані. Схожий результат продемонстрований для скла, на поверхні якого знаходяться мікродиперсні частинки (рис. 3.5, б). Після витримки на повітрі, почалось відшарування плівки аморфного вуглецю від підкладки.



а – кремній нагрів до 600 °С; б – ситал нагрів до 600 °С

Рисунок 3.4 – Поверхня аморфних вуглецевих плівок на підкладках з кремнію та ситалу після нагріву до 600 °С без витримки



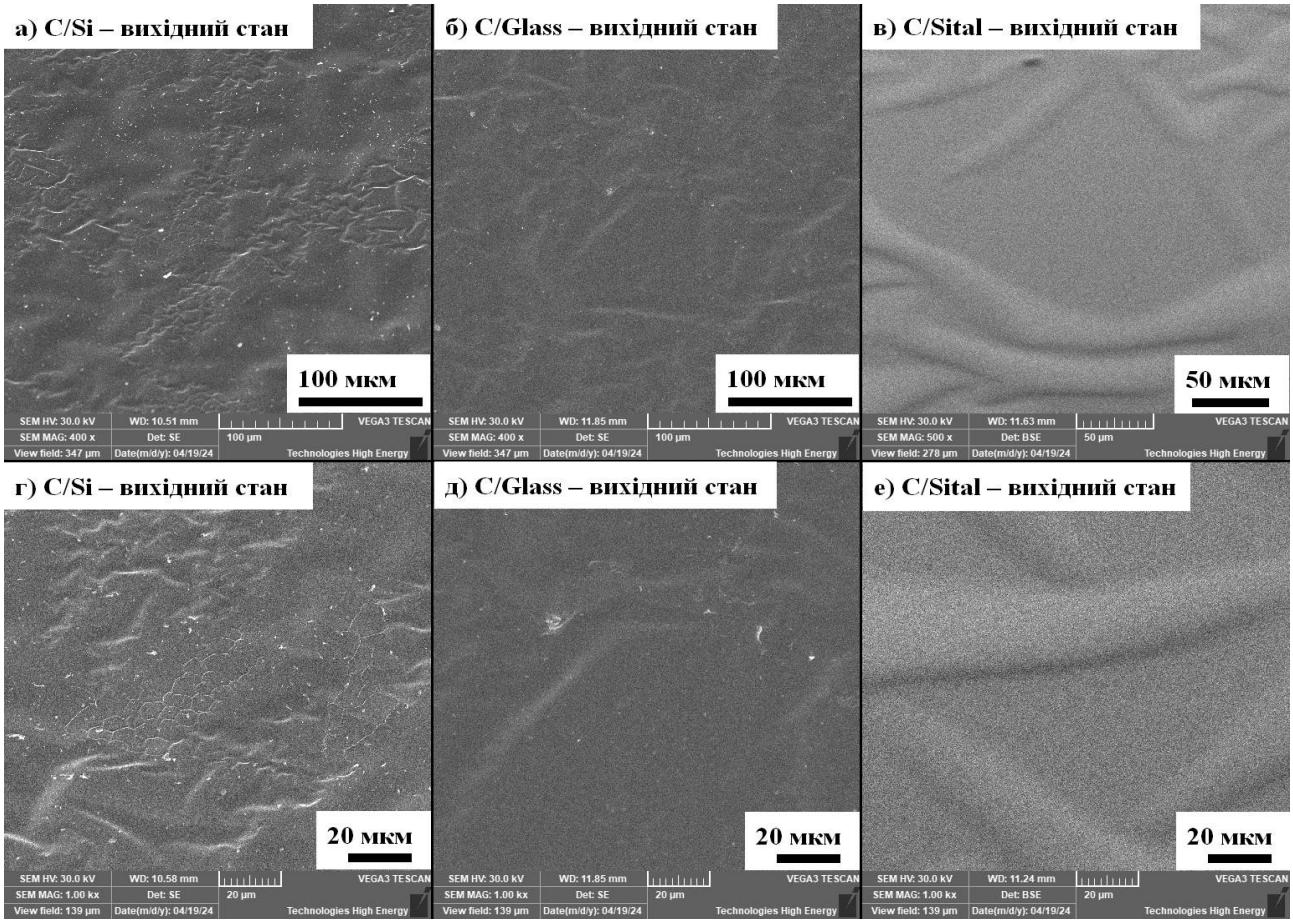
а – відшарування вуглецю на підкладці з кремнію; б – відшарування вуглецю на підкладці з скла; в – відламування фрагментів вуглецевої плівки після скретч тесту; г – край відшарованої плівки аморфного вуглецю

Рисунок 3.5 – Поверхня вуглецевих нанорозмірних матеріалів на підкладках з кремнію, ситалу та скла

На рис. 3.5, в показано як в результаті скретч тесту вуглецева плівка відламується окремими фрагментами, що може свідчити про її крихкість. В той

час як на рис. 3.5, г продемонстровано що поява рельєфу на поверхні плівки є результатом відшарування.

Для більш детального аналізу зміни морфології поверхні був використаний СЕМ. На рис. 3.6 показано результати зйомки поверхні аморфних вуглецевих плівок на підкладках з кремнію, ситалу та скла у вихідних станах. На всіх представлених зразках спостерігається зморщення поверхні. Плівка осадження на підкладку з кремнію, має найменші зморшки (рис. 3.6, а, г), а плівка осадження на ситал, має найбільші зморшки (рис. 3.6, в, е).



а – підкладка з кремнію; б – підкладка з скла; в – підкладка з ситалу;
г – підкладка з кремнію; д – підкладка з скла; е – підкладка з ситалу

Рисунок 3.6 – Зображення аморфного вуглецю на підкладках з кремнію, ситалу та скла у вихідних станах

За допомогою СЕМ також вдалось зафіксувати наявність тріщин на поверхні аморфного вуглецю осадженого на підкладку з кремнію, після відпалу

за температури 300 °С (рис. 3.7). Поява тріщин могла бути спровокована трибологічними дослідженнями. Як видно на зображені, після відшарування вуглецевої плівки, матеріал стає достатньо крихким, щоб зруйнуватись в місцях де відшарування було найбільш виражене.

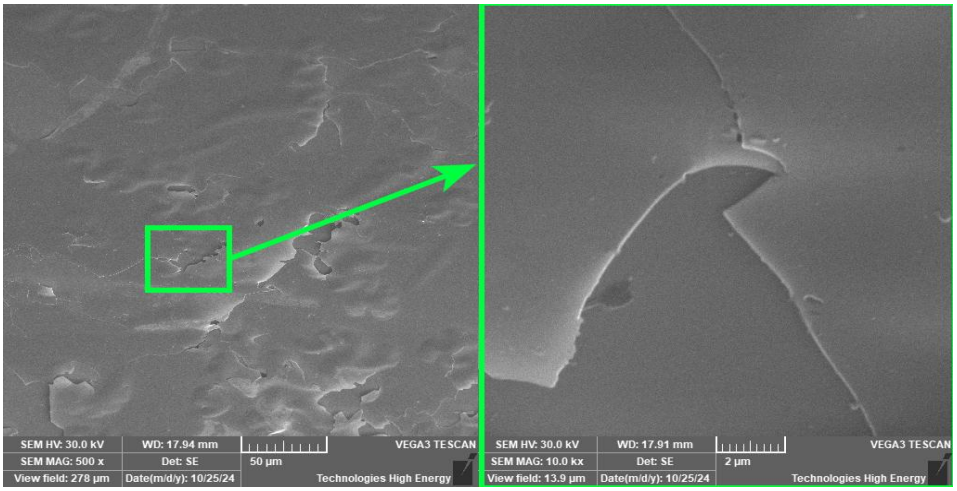


Рисунок 3.7 – Зображення аморфного вуглецю на підкладці з кремнію після відпалу за температури 300 °С

3.3 Дослідження трибологічних властивостей аморфних вуглецевих плівок на різних підкладках

Для оцінки адгезійної міцності вуглецевої аморфної нанорозмірної плівки до підкладки використовувався скретч тест. За результатами дослідження були отримані графіки залежності сили тертя від пройденої індентором відстані та зображення матеріалу після проведеного дослідження. На рис. 3.8 представлено залежність навантаження від кроку індентора для аморфної плівки вуглецю нанесеного на підкладку з кремнію у вихідному стані. На графіку залежності сили тертя від пройденої індентором відстані спостерігаються характерні періодичні піки, положення яких відповідає відлущенню частини плівки.

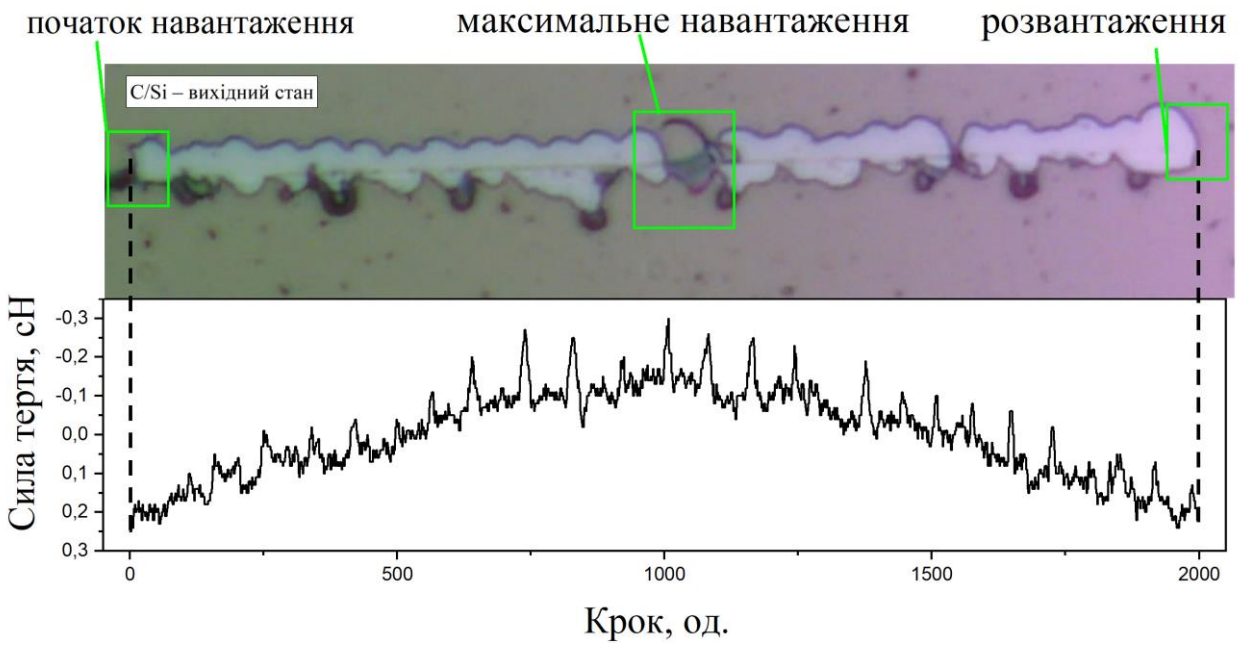


Рисунок 3.8 – Крива сили тертя та зображення подряпини після скретч тесту плівки аморфного вуглецю осадженого на кремній у вихідному стані

На рис. 3.9 показано розрахунок площі відшарованої частини плівки аморфного вуглецю нанесеного на скло. Було отримано площу в відносних одиницях, яка для плівки на склі у вихідному стані дорівнює 624,5 од.

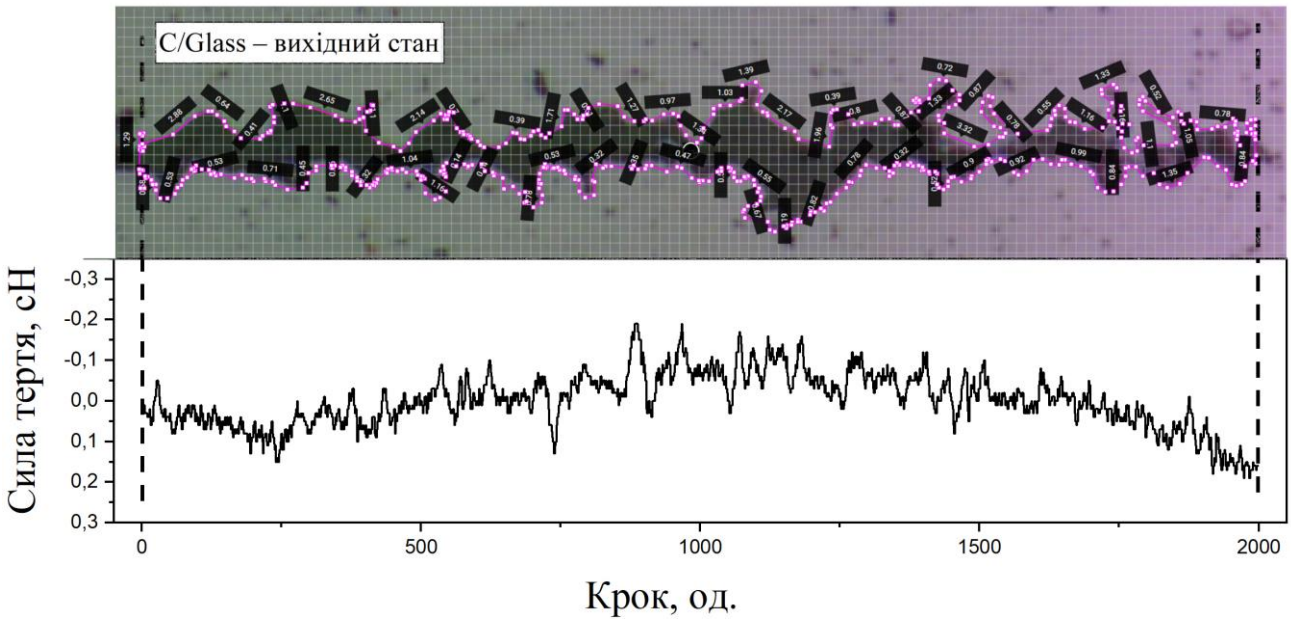
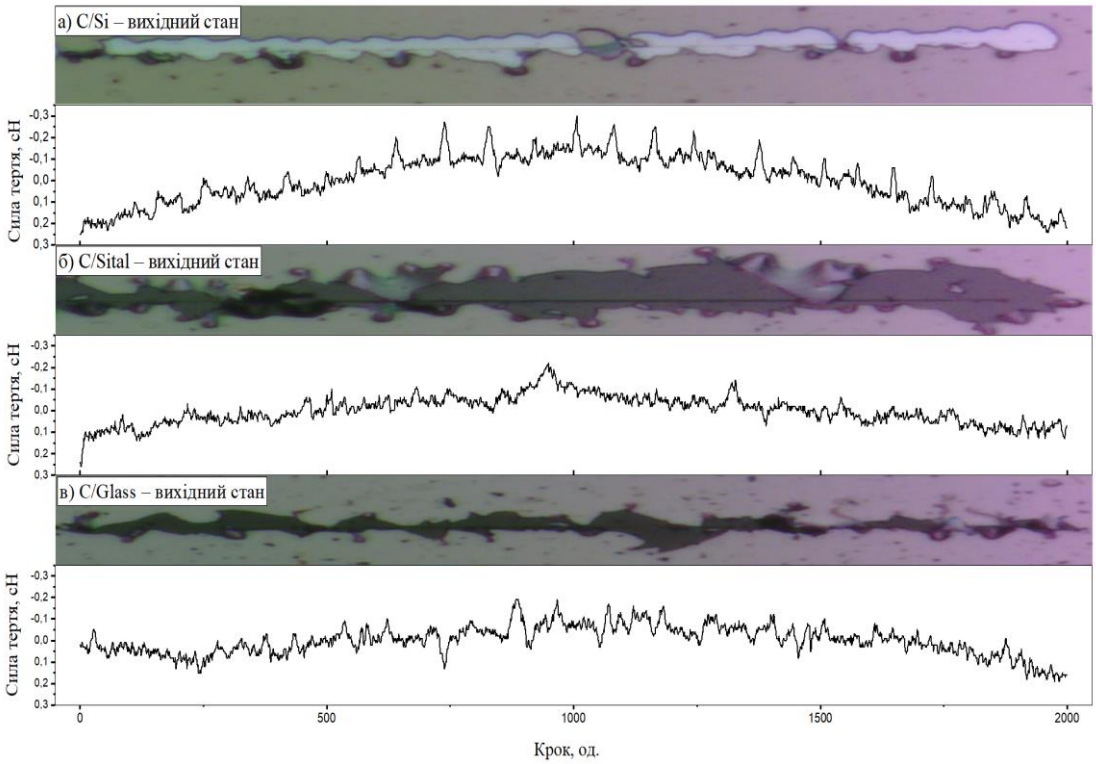


Рисунок 3.9 – Крива сили тертя та зображення подряпини після скретч тесту плівки аморфного вуглецю осадженого на скло у вихідному стані, з обчисленою площею відшарованої частини плівки

Виконуючи обчислення площі для зразків осаджених на підкладки з скла, ситалу та кремнію, було отримано наступні значення (рис. 3.10). Площа відшарованої частини *a*-C плівки у вихідному стані на кремнію має значення 321,48 од. (рис. 3.10, а). Це значення менше для плівки осадженої на ситал (рис. 3.10, б) та скло (рис. 3.10, в), та дорівнює 1236,17 од. і 624,5 од. відповідно. Ці результати вказують на те що у вихідному стані, адгезія аморфної вуглецевої плівки найкраща до підкладки з кремнію.

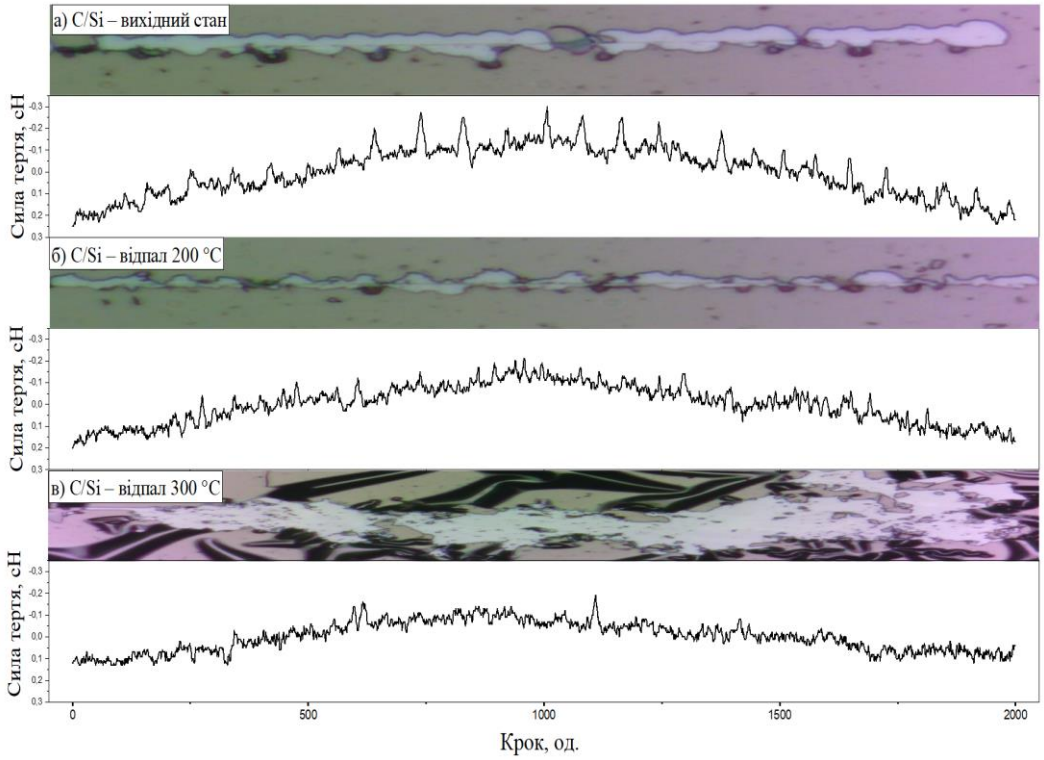


а – підкладка з кремнію; б – підкладка з ситалу; в – підкладка з скла

Рисунок 3.10 – Крива сили тертя та зображення подряпини після скретч тесту плівки аморфного вуглецю осадженого на підкладки з кремнію, ситалу та скла у вихідному стані

Порівнюючи значення адгезії для аморфних вуглецевих матеріалів, осаджених на підкладку з кремнію у вихідному стані, та після відпалу (рис. 3.11), було встановлено збільшення адгезії вуглецевої плівки до підкладки після відпалу за 200 °C впродовж години (рис. 3.11, б), обчислена площа відшарованої частини плівки при цьому дорівнює 260,2 одиниць. Після відпалу за температури

300 °C це значення вже дорівнює 944,59 од. (рис. 3.11, в), що може бути пов’язано з початком відшарування плівки після відпалу за цієї температури.

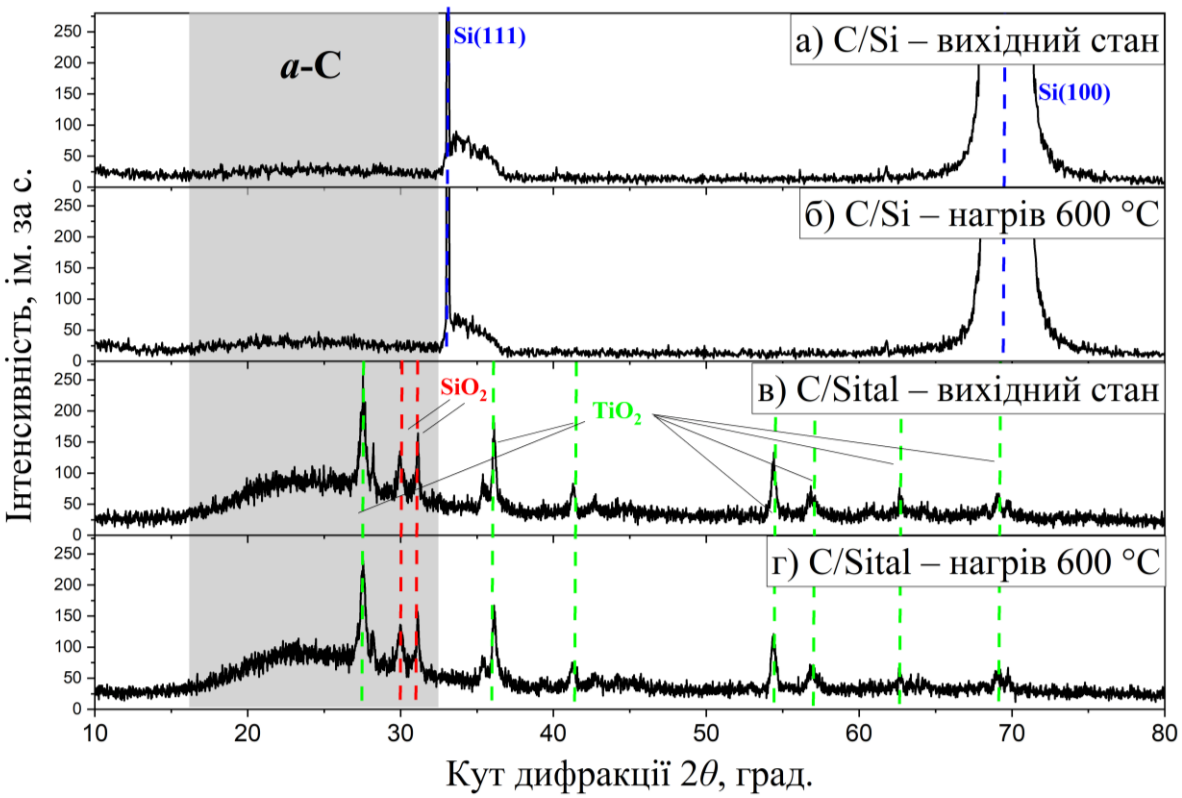


а – вихідний стан; б – відпал за температури 200 °C ; в – відпал за температури 300 °C

Рисунок 3.11 – Крива сили тертя та зображення подряпини після скретч тесту плівки аморфного вуглецю осадженого на підкладки з кремнію у вихідному стані та після відпалу за різних температур

3.4 Результати рентгеноструктурного фазового аналізу аморфних вуглецевих матеріалів після термічної обробки

Аморфні матеріали, такі як тонкі вуглецеві плівки дають характерне гало, на малих кутах, замість чітких рефлексів. Рентгеноструктурний аналіз був обраний методом дослідження, для спостереження можливої кристалізації аморфного вуглецю після термічної обробки. Проте, як видно на графіку (рис. 3.12), кристалізація після нагріву не спостерігається.



а – кремній вихідний стан; б – кремній нагрів до 600 °С ; в – ситал вихідний стан; г – ситал нагрів до 600 °С

Рисунок 3.12 – Дифрактограми тонких плівок аморфного вуглецю на різних підкладках після осадження та нагріву до температури 600 °С

Аморфне гало вуглецю в усіх випадках спостерігається на кутах 15° – 30°. Для зразку з підкладкою з ситалу, відносна інтенсивність вулгецю вища, за інтенсивність з підкладкою кремнію. Це може бути пов’язано з накладанням аморфного гало від Не спостерігається появи рефлексів від кристалічних структур вуглецю. Це може свідчити про недостатню температуру нагріву для кристалізації плівки.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Виявлено, що при відпалі за температур вище 200 °С з часом витримки 1 годину відбувається значне зниження показників електричного опору в

досліджуваних аморфних вуглецевих матеріалах, яке посилюється зі збільшенням температури відпалу.

2. Результати оптичної мікроскопії відображають суттєву зміну поверхні. Найбільше це явище спостерігається при температурі термічної обробки вище 300 °C, при яких відбувається значне відшарування матеріалу від підкладки,. Результати скануючої електронної мікроскопії підтверджують відповідні результати оптичної мікроскопії, відображаючи наявність тріщин в місцях вираженого відшарування матеріалу від підкладки.

3. Трибологічні дослідження аморфного вуглецю відображають суттєву різницю крихкості матеріалу за вищих температур термічної обробки та різницю адгезії матеріалу тонкого вуглецевого покриття до різних матеріалів підкладки.

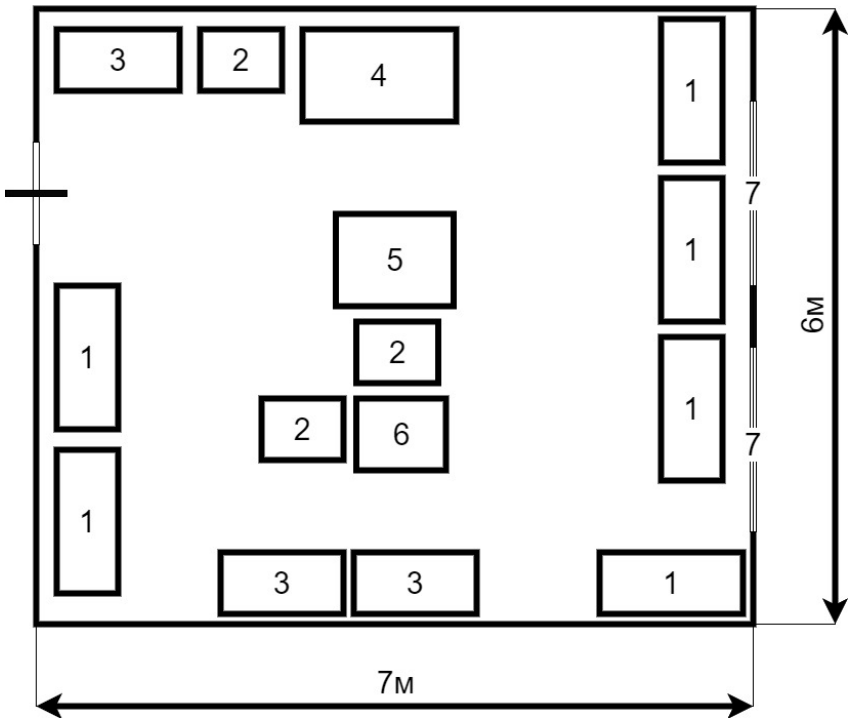
4. З результатів рентгеноструктурних досліджень можна спостерігати відсутність кристалізації аморфного вуглецю за температури 600 °C на підкладках з кремнію та ситалу, та відсутність зміщення аморфного гало від вуглецю.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Основною метою охорони праці є забезпечення безпечних і комфортних умов для виконання трудових обов'язків, захист працівників від потенційних загроз, професійних захворювань і небезпек, а також запобігання аварійним ситуаціям та ефективне усунення їхніх наслідків, тобто право на безпечну працю, що гарантується законами України та іншими нормативно-правовими і технічними актами.

4.1 Аналіз параметрів приміщення лабораторії матеріалознавства

Науково-дослідна робота виконувалась у лабораторії матеріалознавства. План лабораторії представлено на рис. 4.1.



1 – робочий стіл; 2 – стелажі з обладнанням для дослідів; 3 – шафа для зразків; 4 – установка ВУП-5 (робоче місце); 5 – камера вакуумного відпалу; 6 – обладнання для іонної обробки; 7 – вікна

Рисунок 4.1 – Схема лабораторії матеріалознавства

Геометричні параметри лабораторії мають наступні значення: ширина 6 м, довжина 7 м, висота стелі 2,7 м. Площа приміщення становить 42 м^2, а об'єм приміщення 113,4 м^3. Кількість працівників у лабораторії становить 3 людини, отже, площа що припадає на 1 людину становить 14 м^2, а об'єм 37,8 м^3. Ці розраховані параметри задовольняють вимоги санітарних норм, встановлених у ДсанПіН 3.3.2-007-98 [35].

4.2 Освітлення в лабораторії матеріалознавства

Важливим для виконання будь-яких видів робіт є забезпечення комфортного освітлення робочого місця. Виконання роботи в погано освітленому приміщенні може призвести до втоми очей, зниження продуктивності, концентрації та в результаті навіть травматичних випадків. В першу чергу це стосується освітлення робочої зони. Правильно освітлене робоче місце дозволяє уникнути навантаженню на очі, та сприяє покращенню уваги в виконанні поставлених задач.

4.2.1 Характеристика природнього освітлення лабораторії матеріалознавства

Коефіцієнт природного освітлення (КПО) дозволяє виміряти ступінь освітленості всередині приміщення в порівнянні з освітленістю на вулиці. Для розрахунку зазвичай використовується наступна формула значення КПО (e_n) (4.1) [36]:

$$en = e_n \cdot mn, \tag{4.1}$$

де en – значення КПО для робіт середньої точності;

e_n – нормоване значення КПО;

mn – коефіцієнт світлового клімату.

Оскільки у лабораторії матеріалознавства вікна розташовані на південній стороні, для розрахунку використовується значення множника що дорівнює 0,85. Для робіт середньої точності, КПО складає 1,5 %. Спираючись на ці данні, отримане значення КПО для лабораторії становить 1,275 (e_n = 1,5 · 0,85 = 1,275).

Комбінація природного і штучного світла формує систему освітлення лабораторного приміщення. Бічні вікна, розташовані з півдня, пропускають сонячні промені, що суттєво знижує потребу використання штучних джерел світла. Рівномірно встановлені по території приміщення люмінесцентні лампи ЛБ-40 доповнюють денне освітлення, забезпечуючи необхідну освітленість. Завдяки такому поєднанню створюються оптимальні умови для зорової роботи, що зменшує втому очей та підвищує комфорт персоналу.

4.2.2 Характеристика штучного освітлення лабораторії матеріалознавства

Освітлення в приміщенні лабораторії матеріалознавства забезпечується 12 люмінесцентними лампами типу ЛБ-40. Для оцінки якості штучного освітлення можна скористатися розрахунком нормованої освітленості, враховуючи коефіцієнт використання світлового потоку. Нормовану освітленість можна розраховати за формулою (4.2) [37]:

$$E = \frac{F \cdot N \cdot n \cdot \eta}{K \cdot S \cdot Z}, \tag{4.2}$$

де E – нормована освітленість, лк;

F – світловий потік;

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світлового потоку;

K – коефіцієнт запасу;

S – площа приміщення, що освітлюється, м^2;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення.

Розрахункові параметри, що необхідні для визначення освітленості у приміщенні лабораторії, наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахункові параметри для визначення нормованої освітленості в приміщені лабораторії

Світловий потік, F, лм	3200
Коефіцієнт запасу, K	1,5
Коефіцієнт нерівномірності, Z	1,1
Кількість світильників, N	6
Площа приміщення, S, м^2	42
Кількість ламп у світильнику, n	2
Коефіцієнт використання світлового потоку, η	0,56

Підставляючи дані з табл. 4.1 в формулу 4.2 отримуємо наступний результат $E = \frac{3200 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 0,56}{1,5 \cdot 45 \cdot 1,1} = 310$ лк.

Таким чином, для лабораторії матеріалознавства, розраховане значення нормованої освітленості складає 310 лк. Згідно вимог ДБН В.2.5-28-2006 [44], освітленість робочого приміщення повинна бути не менше 300 лк. Отримане значення відповідає встановленій нормі, що свідчить що штучне освітлення є достатнім для даної лабораторії відповідно вимогам.

4.3 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)

Лабораторія, в якій відбувалось виконання даної науково-дослідної роботи передбачає можливий вплив наступних факторів ризику:

– небезпека ураження електричним струмом;

– теплові ураження;

– шум;

– вібрації.

Інформацію щодо потенційних шкідливі і небезпечних виробничих факторів, які пов’язані насамперед з обладнанням, використання якого необхідного для проведення НДР (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Шкідливі фактори при виконанні науково-дослідної роботи

Операція	Устаткування	Потенційні небезпеки
Підготовка зразків	Алмазний різак	Травмування
Термічна обробка зразків	Установка ВУП-5	Ураження електричним струмом. Ураження теплом. Шкідливий вплив шуму та вібрацій
Обробка результатів	Комп’ютер	Ураження електричним струмом

Варто відзначити, що перед проведенням науково-дослідних робіт у лабораторії проводиться інструктаж з техніки безпеки. Це необхідно для ознайомлення працівників із можливими небезпеками, шкідливими факторами та інформування стосовно відповідних заходів для запобігання нещасним випадкам.

4.3.1 Небезпечні чинники при роботі з установкою ВУП-5

Вакуумна установка ВУП-5 є спеціалізованим обладнанням, що потребує від оператора досвіду роботи з подібною технікою, досконалого знання правил безпеки та точного дотримання вимог експлуатації. Панель управління цієї установки надає ключову інформацію, зокрема про рівень води в системі охолодження, температуру в камері, герметичність та інші критично важливі параметри. Живлення ВУП-5 здійснюється від електромережі з напругою 380 В.

Пошкодження кабелів чи електричних компонентів обладнання може становити серйозну загрозу ураження струмом. Для запобігання таким ризикам установка оснащена системою заземлення, а її підключення до мережі виконується через автоматичні вимикачі. Деякі елементи, як-от нагрівальний стіл і дифузійний вакуумний насос, під час роботи нагріваються до температур вище (400 – 500) °С, що створює небезпеку опіків. Для охолодження цих компонентів використовується система подачі холодної води з системи загального постачання. У разі несправності системи охолодження або при припиненні водообігу у установці автоматично відключається живлення, щоб уникнути перегріву. Відкачування повітря з вакуумної камери здійснюється через гнучкий гумовий шланг, з'єднаний із вихідним патрубком механічного форвакуумного насоса і виведений за межі приміщення. Це забезпечує безпеку лабораторії, запобігаючи проникненню інертних газів і потенційно шкідливих парів.

Коректна експлуатація вакуумної установки ВУП-5 є критично важливою для її стабільної роботи та зниження ризиків виникнення небезпечних ситуацій. Запуск і зупинка установки мають виконуватись відповідно до чітко визначеної процедури. Послідовність дій для запуску установки:

а) провести візуальний огляд на наявність пошкоджень обладнання;

б) увімкнути систему водяного охолодження;

в) підключити електроживлення та активувати установку;

г) запустити механічний насос попереднього вакууму (форвакуумний);

д) увімкнути високовакуумний насос (дифузійний);

е) провести відкачування повітря з вакуумної камери та створити необхідний високий вакуум.

Послідовність дій для вимкнення установки:

а) відключити нагрівальні елементи предметного столика;

б) зупинити дифузійний насос після охолодження зразка до 100 °С;

в) вимкнути форвакуумний насос після охолодження дифузійного насоса до 60 °С;

г) зупинити роботу установки;

д) знеструмити установку;

е) відключити систему водяного охолодження.

Після завершення роботи обладнання в камері підтримується низький рівень вакууму. Це дозволяє уникнути небажаного контакту атмосфери з елементами обладнання, що знаходяться всередині.

4.3.2 Безпека при роботі з електричними приладами в лабораторії матеріалознавства

Поняття "електробезпека" охоплює комплекс заходів, спрямованих на захист персоналу від ураження електричним струмом, що може спричинити серйозні електротравми. Основну загрозу становлять контакти з неізольованими провідниками або незаземленим обладнанням, які можуть призвести до пошкодження м’яких тканин і нервової системи, у тому числі з фатальними наслідками [38].

Приміщення класифікують за рівнем потенційної електричної небезпеки на:

а) звичайні приміщення (без підвищеної небезпеки);

б) приміщення з підвищеною небезпекою;

в) особливо небезпечні приміщення.

Приміщення лабораторії, де проводилась дана науково-дослідна робота належить до приміщень із підвищеним рівнем небезпеки. Це зумовлено наявністю комп’ютерного обладнання для обробки експериментальних даних та установки ВУП-5. Для мінімізації ризиків ураження електричним струмом у лабораторії реалізовано низку заходів: Розташування електричного щитка біля входу до приміщення забезпечує швидкий доступ до вимкнення живлення у разі небезпеки. Усі електропристрої, зокрема установка ВУП-5, підключені через ізольовані провідники з надійним заземленням, що захищає від електротравм. Живлення лабораторного обладнання здійснюється через автоматичні запобіжники, які миттєво реагують на коротке замикання або інциденти з

ураженням струмом, створюючи безпечні умови роботи. Робочі місця організовано так, щоб звести до мінімуму можливість випадкового контакту з небезпечними елементами техніки. Ці заходи значно знижують імовірність виникнення небезпечних ситуацій під час експлуатації обладнання в лабораторії.

4.3.3 Вплив шуму та вібрацій в лабораторії матеріалознавства

Шум і вібрації суттєво впливають на здоров’я працівників і комфорт у робочому середовищі. Надмірний рівень шуму може призводити до погіршення слуху, розладів нервової системи, а також негативно позначатися на психологічному та емоційному стані. Довготривалий вплив вібрацій може спричиняти порушення функцій м’язів і опорно-рухового апарату. У процесі виконання науково-дослідних робіт обладнання, зокрема установка ВУП-5, генерує шум і вібрації. Основними джерелами шуму є система охолодження та вакуумні насоси, що забезпечують створення вакууму в камері. Критично небезпечним рівнем шуму для людини є 120 дБА, що може спричинити фізичні ушкодження органів слуху та його втрату. Під час роботи установки ВУП-5 рівень шуму становить 52 дБА, що відповідає нормам ДСН 3.3.6.037-99 [39]. Під час роботи насосів виникають значні вібрації, які можуть негативно впливати як на здоров’я працівників, так і на саму установку. Для мінімізації цих ризиків насос встановлюють на гумову віброізоляційну підставку, а його з’єднання з установкою виконують за допомогою гнучкого гумового шланга, який гасить вібрації. Завдяки цим заходам рівень вібрацій знижується до безпечного значення, яке відповідає чинним санітарним нормам [40].

4.3.4 Мікроклімат робочої зони в лабораторії матеріалознавства

Якість повітря в робочій зоні є одним з ключових факторів, що впливає на здоров’я та продуктивність співробітників. Забруднене або незбалансоване повітря може стати причиною захворювань, тому його якість постійно контролюють шляхом аналізу мікрокліматичних умов і концентрації шкідливих

речовин. Мікрокліматичні умови – це набір параметрів, що визначають стан повітря у робочій зоні.

До основних характеристик мікроклімату належать [41]:

а) температура повітря, °С;

б) відносна вологість повітря, %;

в) швидкість руху повітря, м/с;

г) інтенсивність інфрачервоного випромінювання від поверхонь обладнання та активних зон технологічних процесів, Вт/м².

Роботи в лабораторіях і на підприємствах класифікуються за категоріями залежно від енерговитрат організму, необхідних для їх виконання. Для кожної категорії встановлено допустимі мікрокліматичні параметри відповідно до норм ДСН 3.3.6.042-99 [42]. У приміщенні лабораторії параметри мікроклімату відповідали вимогам, що наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри мікроклімату приміщення лабораторії матеріалознавства

Категорія робіт середньої важкості, IIа			
Період року	Температура, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	18-20	40-60	0,2
Виміряне значення	18	52	0,2
Теплий	21-23	40-60	0,3
Виміряне значення	21	47	0,3
Висновок щодо відповідності вимогам	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам

Дослідження, що відбувались в приміщені лабораторії матеріалознавства, класифікуються як діяльність категорії IIа. Вона включає операції, що передбачають переміщення малогабаритних предметів вагою до 1 кг у стоячому або сидячому положенні, характеризуючись низьким рівнем фізичного

навантаження. При цьому енерговитрати організму становлять від 160 ккал/год до 210 ккал/год [42]. Аналіз мікрокліматичних умов у лабораторії показав, що робоче середовище відповідає нормативним вимогам, визначеним у ДСН 3.3.6.042-99 [42]. Це забезпечує комфортні умови для виконання досліджень і сприяє підтриманню оптимальної працездатності.

4.4 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

Організація праці на робочому місці — це комплекс заходів, спрямованих на раціональне використання обладнання, інструментів і матеріалів під час виконання трудових завдань [43]. Робоче місце є простором, де працівник здійснює свою професійну діяльність. Дотримання норм і правил організації праці, викладених у ДСанПіН 3.3.2.007-98 [35] та НПАОП 0.00-1.28-10 [44], сприяє підвищенню ефективності роботи і зменшенню впливу шкідливих факторів на здоров’я працівників. Згідно з нормативними документами, організація робочого простору, а також режим праці та відпочинку визначаються залежно від робочої пози (вільної, стоячої або сидячої), у якій виконується діяльність. У рамках виконання науково-дослідної роботи працівники здебільшого перебувають у сидячій позі, оскільки основна частина завдань виконується за допомогою комп’ютера. Оптимальні параметри робочого місця для такого типу діяльності включають [44]:

а) висоту столу 800 мм – 900 мм;

б) ширину столу 1000 мм – 1400 мм;

в) глибину столу 800 мм – 1000 мм;

г) розміри простору для ніг: висота – 600 мм, ширина – 500 мм, глибина на рівні колін – 450 мм, на рівні витягнутої ноги – 650 мм;

г) відстань від екрана ПК до очей: 600 мм;

д) розташування клавіатури: 300 мм від краю столу;

е) коефіцієнт відбиття поверхні столу: 0,6.

Організація робочих місць у лабораторії матеріалознавства відповідає цим стандартам, забезпечуючи комфортні умови для виконання науково-дослідних завдань.

4.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Під час виконання робіт завжди присутня ймовірність виникнення надзвичайних ситуацій, таких як пожежа, пошкодження обладнання, витік шкідливих речовин, вибух, тощо. Враховуючи це, перед початком роботи проводиться аналіз потенційних небезпек і розробляються заходи для їх запобігання та усунення. При цьому беруться до уваги особливості матеріалів, речовин та обладнання, що використовуються, а також особливості робочих процесів [44].

4.5.1 Пожежна безпека в лабораторії матеріалознавства

Під час виконання науково-дослідних робіт у лабораторії матеріалознавства багато уваги приділяється на дотриманні заходів пожежної безпеки. Відповідно до стандарту НАПБ Б.03.002-2007 [42] лабораторія матеріалознавства класифікується як об’єкт категорії "Г". Це пов’язано з наявністю негорючих матеріалів, які можуть нагріватися або розжарюватися, виділяючи значну кількість тепла [42]. Електрообладнання, що використовується для досліджень, є потенційним джерелом загоряння. Такі пожежі належать до класу "Е", і для їх ліквідації рекомендовано застосовувати порошкові або вуглекислотні вогнегасники.

Для забезпечення пожежної безпеки в лабораторії впроваджені такі заходи:

а) встановлена автоматична система пожежного оповіщення, яка подає сигнал у разі виявлення загоряння;

б) горючі речовини зберігаються в герметичних контейнерах з негорючих матеріалів;

в) нагрівальні та небезпечні частини обладнання розташовані на безпечній відстані від легкозаймистих матеріалів;

г) електрообладнання та кабелі забезпечені надійною ізоляцією та підключені до системи заземлення.

У разі пожежі працівники зобов’язані негайно покинути приміщення, дотримуючись маршруту евакуації, який відображено на схемі (рис. 4.2). Дотримання цих правил дозволяє мінімізувати ризик виникнення пожежі та її наслідків.

Задля запобігання пожежам проводяться інструктажі з техніки безпеки під час пожежі та реалізується комплекс заходів, таких як регулярна перевірка вогнегасників, систем пожежної сигналізації, а також електричної проводки та обладнання.

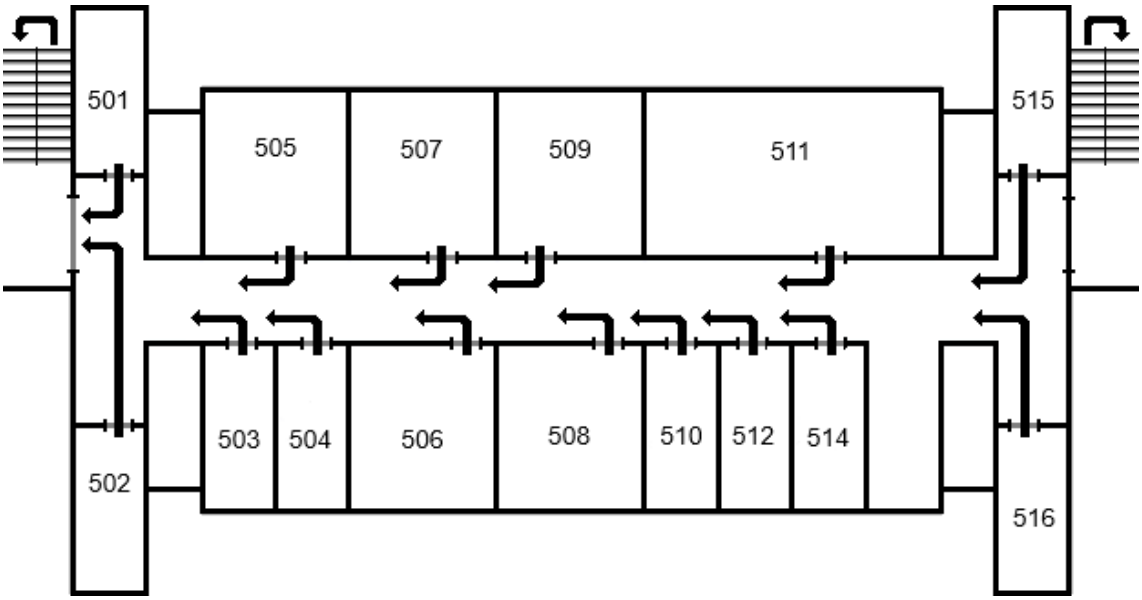


Рисунок 4.2 – План евакуації поверху на якому розташована лабораторія

4.5.2 Алгоритм дії у випадку повітряної тривоги під час роботи в лабораторії матеріалознавства

Згідно з наказом № НУ/129/2022 від 04.08.2022 [45], сигнал "Повітряна тривога" передається через мережу сирен, регіональне радіо та телебачення. Тривалість попередженням про можливі ракетні чи авіаційні атаки становить від

трьох до п’яти хвилин і являється рекомендацією негайно перейти до найближчого укриття. Також можна отримати сповіщення через мобільні додатки "Повітряна тривога" або "Київ цифровий" на телефони.

Дії працівників під час сигналу "Повітряна тривога" наступні [45]:

а) після отримання сигналу:

1) співробітники повинні слідувати вказівкам керівництва та переміщатися до найближчого укриття або захисної споруди;

2) якщо перехід до укриття неможливий, потрібно вибрати найбільш захищене місце в приміщенні, подалі від вікон і зовнішніх стін, і перемістится туди;

3) співробітники повинні уникати виходу на вулицю під час дії сигналу;

б) перебування в укритті чи захисній споруді:

1) співробітники повинні швидко і організовано потрапити до укриття або захисної споруди;

2) у укритті необхідно дотримуватися вказівок і інструкцій цивільного захисту, наданих керівництвом або відповідними органами;

в) після завершення сигналу "Повітряна тривога":

1) співробітники можуть повернутися до роботи тільки після отримання відповідних вказівок від органів цивільного захисту або керівництва;

2) завдання з цивільного захисту мають виконуватись згідно з встановленими інструкціями та вимогами.

4.6 Висновки до розділу 4

1. Проведено аналіз можливих ризиків, які можуть виникнути під час виконання науково-дослідних робіт у лабораторії матеріалознавства.

3. Природне освітлення, яке відбувається завдяки бічними прорізам у стінах приміщення лабораторії не відповідає стандартам комфортних умов праці,

тому в лабораторії використовується комбіноване природне та штучне освітлення для забезпечення належних санітарних умов.

2. Параметри рівня шуму, мікроклімату, рівня вібрацій та організація робочого місця під час наукових досліджень повністю відповідають санітарним вимогам та забезпечують комфортні умови для проведення досліджень.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

5.1 Опис ідеї стартап проєкту

Сучасні виклики у сфері мікроелектроніки та енергозберігаючих технологій спрямовані на підвищення ефективності та надійності пристроїв за допомогою використання інноваційних матеріалів. Головна ідея даного проєкту полягає у розробці тонкоплівкових вуглецевих покриттів, що забезпечують захист і покращення продуктивності компонентів мікроелектроніки та акумуляторних систем. Зокрема, пропонується застосування таких покриттів для захисту жорстких дисків від механічних пошкоджень та зносу, а також для стабілізації анодів у літій-іонних акумуляторах. Продуктом стартапу є тонкоплівкові покриття на основі вуглецю, осаджені методом електродугового осадженння, що забезпечують високу адгезію до підкладок, термічну стабільність та антикорозійні властивості, необхідні для їх успішного використання у сучасних технологічних рішеннях (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Розробка захисних тонкоплівкових покриттів на основі С для використання у мікроелектроніці та сфері зберігання електроенергії	1. Захисне покриття жорстких дисків	Зниження зношення та корозії дисків, покращення захисту від механічних пошкоджень. Покращення зчитування та запису даних завдяки зменшенню тертя
	2. Використання вуглецевих покриттів на анодах в li-ion акумуляторах	Зменшення деградації анода. Підвищення енергетичної щільності забезпечує більшу ємність акумулятора та швидший процес заряджання

5.2 Аналіз техніко-економічних переваг ідеї

Порівняльний аналіз показників, а саме сильні, нейтральні та слабкі сторони цього стартап-проєкту, який спрямований на розробку захисних покриттів пристроїв у мікроелектроніці та сфері зберігання електроенергії, та у порівнянні з головними конкурентами що займаються покриттями у сфері зберігання електроенергії та суміжними виробами, серед яких головні: NEI corporation, Specialty Coating Systems (SCS) та Northvolt, наведено у табл. 5 2.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проєкту

№	Техніко- економічні характеристики ідеї	Потенційні товари				*S	*N	*W
		Цей проєкт	NEI corp.	SCS	Northvolt	(сильна сторона)	(нейтральна сторона)	(слабка сторона)
1	Собівартість продукції	Використання вуглицевих покриттів на анодах в li-ion акумуляторах				+	–	–
2	Затрати на проведеня досліджень					–	+	–
3	Масштабованість					–	+	–
4	Капітальні витрати					–	+	–
5	Вартість матеріалів					+	–	–

** S (сильна сторона), N (нейтральна сторона), W (слабка сторона)*

5.3 Технологічний аудит ідеї проєкту

Аудит технологій, за допомогою яких можна реалізувати ідею цього проєкту, представлено у табл. 5.3. Такий аудит необхідний для визначення ключових технологій для розробки продукції, визначення їх існування та необхідності у розробці чи модернізації а також їх доступність у рамках даного проєкту.

Таблиця 5.3 – Аналіз технологій для реалізації проєкту

№	Ідея проєкту	Технологія	Наявність технології	Доступність технології
1	Аморфні вуглецеві плівки з низьким електроопором	Електродугове осадження плівок	Наявна технологія	Доступна
2		Термічна обробка плівок у вакуумі	Наявна технологія	Доступна
3		Резистометричні дослідження	Наявна технологія	Доступна
4		Структурно-фазові дослідження зразків	Наявна технологія	Доступна
5		Рефлектометрія	Наявна технологія	Доступна

За результатами технологічного аудиту можна стверджувати що технології готові до використання у наявному вигляді та доступні під час виконання стартап-проєкту. Оскільки об'єкт дослідження та основний продукт цього стартап-проєкту це лише окрема частина готового пристрою, для запуску виробництва необхідно провести додаткові дослідження, спрямовані на можливість інтегрування захисник покриттів на основі вуглецю у готові пристрої на комерційній основі.

5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску проєкту

Оцінка потенційного ринкового середовища та характеристика потенційних клієнтів стартап проєкту відображено у табл. 5.4-5.5. Такий аналіз необхідний для визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проєкту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проєкту. Так, головними конкурентами, що виробляють захисні покриття для для використання у мікроелектроніці та сфері зберігання електроенергії, виступають компанії NEI corporation, Specialty Coating Systems (SCS) та Northvolt.

Таблиця 5.4 – Оцінка потенційного ринкового середовища

Показники стану ринку(найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	Більше 10
Загальний обсяг продаж, дол./ум. од. на 2023 рік	Близько 10 млрд доларів у 2023 році
Динаміка ринку	Зростає
Наявність обмежень для входу	Відсутні
Специфічні вимоги до стандартизації чи сертифікації	Присутні вимоги за ISO 9001, ISO 14001, та специфічні технічні стандарти залежно від галузі застосування
Середня рентабельність в галузі, %	15 % – 25 % залежно від сегменту та рівня інтеграції в ланцюг постачання

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап проєкту

Характеристика	Опис
Потреби, що формують ринок	Підвищення ефективності акумуляторів, збільшення їх терміну служби, зниження часу зарядки, покращення захисту компонентів мікроелектроніки
Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Виробники літій-іонних акумуляторів
Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги до покриттів: у виробників акумуляторів важлива стабільність і ефективність у високих навантаженнях, у мікроелектроніці – висока точність і надійність покриттів
Вимоги споживачів до товару	Висока ефективність, довговічність, зниження витрат на обслуговування, енергетична ефективність
Вимоги споживачів до компанії	Стабільність виробничих потужностей, можливість швидко адаптувати виробництво до змін у вимогах ринку, гарантія якості та надійність поставок

Після визначення потенційних груп клієнтів необхідно провести аналіз ринкового середовища, а саме фактори, що сприяють ринковому впровадженню проєкту та фактори, що йому перешкоджають (табл. 5.6). Така оцінка необхідна для визначення реакції компанії на потенційні як і негативні так і позитивні фактори, що дає можливість планування стратегії на зміну умов ринку.

Таблиця 5.6 – Фактори можливих загроз проєкту

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакціякомпанії
Нестабільність ринку в галузі енергетичних технологій та мікроелектроніки	Зменшення попиту на продукцію через зміни в технологіях або ринкових умовах	Покращення технології виробництва та зниження собівартості, виведення нових інноваційних рішень
	Зростання вартості або дефіцит ключових матеріалів для покриттів (вуглецеві матеріали, наноматеріали)	Диверсифікація постачальників, оптимізація витрат на матеріали, розвиток альтернативних технологій
	Висока конкуренція з боку інших компаній, що працюють над подібними рішеннями для акумуляторів і мікроелектроніки	Розвиток унікальних технологій, фокус на якості та ефективності, покращення сервісного обслуговування
	Нові законодавчі або екологічні вимоги, що можуть вимагати значних змін у технологіях виробництва	Адаптація до нових норм, інвестування в сталий розвиток і екологічно чисті технології
	Втрата фінансування або зменшення інвестицій через економічні коливання або невизначеність на ринку	Залучення нових інвесторів, стратегічні партнерства, диверсифікація фінансових джерел

Фактори що сприяють ринковому впровадженню проєкту розглянуті в табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей проєкту

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зниження собівартості продукції	Оптимізація технології виготовлення вуглецевих покриттів і зниження витрат на матеріали або їх заміна без втрати властивостей	Впровадження нових, більш дешевих матеріалів без зниження якості продукції, розширення виробничих потужностей
2	Покращення ефективності акумуляторів	Вдосконалення анодів і покриттів для літій-іонних акумуляторів, що дозволить збільшити їх енергетичну щільність і швидкість зарядки	Розробка нових типів акумуляторів із покращеними характеристиками, розширення ринкових позицій
3	Розвиток нових технологій мікроелектроніки	Створення нових типів вуглецевих покриттів для підвищення швидкості обробки даних і покращення надійності компонентів	Створення стратегічних партнерств із виробниками елементів пам'яті, впровадження інноваційних технологій у серійне виробництво

Для визначення оптимального періоду впровадження продукції та обґрунтування початкового обсягу товару проводиться ступеневий аналіз

ринкової конкуренції. Результати цього аналізу представлені в табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1	2	3
1. Тип конкуренції: олігополія	Ринок тонкоплівкових покриттів для акумуляторів контролюється локальними компаніями, серед яких є популярні у виробників акумуляторів	Необхідність інвестувати в інновації та технології для забезпечення конкурентоспромож ності
2. За рівнем конкурентної боротьби: локальний та національний	Виробництво акумуляторів є глобальним ринком з міжнародними гравцями, орієнтованими на різні континенти та клієнтські бази	Залучення інвестицій та розширення ринку збуту, починаючи з національних ринків і поступово виходячи на міжнародні
3. За галузевою ознакою: внутрішньогал узева	Основна конкуренція зосереджена в галузі виробництва акумуляторів, де існує велика кількість компаній, що займаються інноваціями	Потрібно постійно покращувати технічні характеристики та забезпечувати унікальні рішення для виділення серед конкурентів

Продовження таблиці 5.8

1	2	3
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Компанії конкурують за створення продуктів з кращими характеристиками: ємність акумуляторів, швидкість заряджання, тощо	Розробка нових продуктів з покращеними характеристиками для задоволення потреб ринку та підвищення конкурентоспроможності
5. За характером конкурентних переваг: нецінова	Конкуренція за рахунок технологічних інновацій, якості продукції, патентів, унікальних технічних рішень, а не лише через цінову політику	Інвестиції в інновації, патенти та дослідження для збереження конкурентних переваг без зниження ціни
6. За інтенсивністю: марочна	Велику роль у ринковій боротьбі відіграє впізнаваність брендів на локальному ринку	Розвиток сильної торгової марки і репутації для залучення клієнтів і підвищення впізнаваності на ринку

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проєкту є SWOT-аналіз, який являє собою матрицю аналізу сильних та слабких сторін, загроз та можливостей проєкту, що представлено у табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – SWOT-аналіз проєкту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
− унікальні властивості вуглецевих покриттів: висока міцність, хімічна стійкість, тривалий термін служби; − збільшення ефективності пристроїв: вища енергетична щільність для акумуляторів, підвищена надійність компонентів мікроелектроніки.	− необхідність значних інвестицій у науково-дослідні і тестування нових методів нанесення покритів; − високі витрати на створення інфраструктури для масштабного виробництва і впровадження інновацій.
Можливості:	Загрози:
− участь у міжнародних дослідженнях і програмах, спрямованих на розвиток інноваційних матеріалів; − партнерство з великими компаніями у сфері енергетики та мікроелектроніки; − розширення застосування покриттів у різних галузях.	− швидкий розвиток технологій і поява нових конкурентних продуктів на ринку; − залежність від постачання сировини: можливий дефіцит або зростання вартості вуглецевих матеріалів; − економічна нестабільність або зміни регуляторних вимог у галузі екологічної безпеки.

Таким чином, тонкоплівкові вуглецеві покриття мають великі перспективи для використання у сфері зберігання електроенергії та мікроелектроніці. Важливо відзначити, що існує необхідність у проведені додаткових досліджень для покращення їх властивостей, таких як адгезія до різних матеріалів і підкладок, їх зносостійкість, електричних та оптичних властивостей, на що і націлена дана науково-дослідна робота. Отримані результати під час виконання роботи стверджують про можливість покращення та наступного використання таких плівок у сферах зберігання енергії та мікроелектроніки.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап проєкту

Для розроблення маркетингової програми стартап-проєкту визначаються ключові переваги продукту даного стартап-проєкту у порівнянні з аналогічними продуктами конкурентів, що потенційно вказує на конкурентоспроможність такого продукту (табл. 5.10).

Таблиця 5.10 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Збільшення довговічності пристроїв	Тонкоплівкові вуглецеві покриття забезпечують підвищену стійкість до зношення та корозії	Вища зносостійкість порівняно з традиційними захисними покриттями
2	Покращення ефективності акумуляторів	Зменшення деградації анода, підвищення ємності та швидкості заряджання	Більш тривалий термін служби акумуляторів і вища енергетична щільність
3	Зменшення витрат на технічне обслуговування	Покриття зменшують частоту заміни деталей і потребу в ремонті	Стабільність і надійність у тривалих умовах експлуатації
4	Екологічна безпечність	Використання вуглецю як основи є екологічно чистим і безпечним	Відсутність токсичних матеріалів і відповідність сучасним екологічним стандартам

5.6 Висновки до розділу 5

1. Проведено детальний технологічний аудит запропонованої ідеї стартап-проекту, оцінку ринкових можливостей та загроз. Виявлено потенціал для розвитку запропонованої у даному стартап-проєкті ідеї.

2. Вуглецеві покриття мають високий потенціал для застосування у різних галузях, таких як мікроелектроніка та енергозберігаючі технології. Використання таких покриттів дозволяє покращити термін служби компонентів, зменшити енергоспоживання та підвищити ефективність акумуляторних батарей.

3. Для успішної реалізації проекту необхідне проведення додаткових досліджень, орієнтованих на вдосконалення властивостей таких покриттів, а також розробку для інтеграції їх в кінцеві продукти. Також необхідно провести додаткові дослідження, спрямовані на оптимізацію промислових процесів для масштабного виробництва.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літератури за темою дослідження. Встановлено, що тонкі плівки аморфного вуглецю мають високий потенціал застосування в якості захисних і функціональних покриттів, завдяки своїм механічним та електрофізичним властивостям.

2. Були засвоєні методики осадження аморфних вуглецевих тонкоплівкових матеріалів, методом електродугового розпорошення у вакуумі, термічна обробка тонкоплівкових матеріалів у вакуумі, метод чотирьохдонзової резистометрії, оптичної та електронної мікроскопії, а також метод рентгеноструктурного фазового аналізу.

3. Досліджено вплив матеріалу підкладки на термічну стабільність аморфного вуглецевого покриття.

3.1 Виявлено зміну електропровідності вуглецевої плівки після термічної обробки за температури вище 200 °С.

3.2 Зафіксовано зміну морфології поверхні аморфного вуглецевого покриття, та відшарування від підкладки за температури відпалу вище 300 °С.

3.3 Встановлено відсутність кристалізації аморфного вуглецевого матеріалу після термічної обробки за температури 600 °С.

4. Проведено аналіз можливих ризиків, які можуть виникнути під час виконання науково-дослідних робіт у лабораторії матеріалознавства.

5. Проведено детальний технологічний аудит запропонованої ідеї стартап-проекту, оцінку ринкових можливостей та загроз. Виявлено потенціал для розвитку запропонованої у даному стартап-проєкті ідеї.

CONCLUSION

1. An analysis of the literature on the research topic was carried out. Has been established that amorphous carbon thin films have high potential for use as protective and functional coatings, due to their mechanical and electrophysical properties.

2. Methods of deposition of amorphous carbon thin-film materials, by the method of electric arc sputtering in a vacuum, heat treatment of thin-film materials in a vacuum, the method of four-probe resistivity, optical and electron microscopy, as well as the method of X-ray structural phase analysis were mastered.

3. The influence of the substrate material on the thermal stability of the amorphous carbon coating was studied.

3.1 A change in the electrical conductivity of the carbon film after heat treatment at temperatures above 200 °C was revealed.

3.2 A change in the morphology of the surface of the amorphous carbon coating and delamination from the substrate at annealing temperatures above 300 °C were recorded.

3.3 The absence of crystallization of amorphous carbon material after heat treatment at a temperature of 600 °C was established.

4. An analysis of possible risks that may arise during the implementation of scientific and research work in the materials science laboratory was conducted.

5. A detailed technological audit of the proposed startup project idea was conducted, as well as an assessment of market opportunities and threats. The potential for the development of the idea proposed in this startup project was identified.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. A review on diamond-like carbon films grown by pulsed laser deposition / G. Huang, S.Wang, C. Mi, et. al. // Applied Surface Science. – 2021. – V. 541. – 148573.

2. Amorphous Carbon Films for Electronic Applications / I. Kim, C. Shim, S. Kim, et. al. // Advanced Materials. – 2023. – V. 35. – 2204912.

3. Role of TiC nanocrystalline and interface of TiC and amorphous carbon on corrosion mechanism of titanium doped diamond-like carbon films: Exploration by experimental and first principle calculation / L. Li, T. Hu, Q. Wang, et. al. // Applied Surface Science. – 2021. – V. 542. – 148740.

4. Pailthorpe B. A. Compressive-stress-induced formation of thin-film tetrahedral amorphous carbon / B. A. Pailthorpe, D. Muller, D. R. McKenzie // Physical Review Letters. – 1991. – V. 63. – 773.

5. Lemoine P. Mechanical Characterisation and Properties of DLC Films / P. Lemoine, J. P. Quinn, P. D. Maguire, J. A. McLaughlin // Fundamentals and Applications. Boston, MA, 2008. – P. 83. – 101.

6. Robertson J. Ultrathin carbon coatings for magnetic storage technology / J. Robertson // Thin Solid Films. – 1991. – V. 383. – P. 81-88.

7. Kano M. Overview of DLC-Coated Engine Components / M. Kano // Coating Technology for Vehicle Applications. Cham, 2015. – P. 37–62.

8. Feng W. The Studies of Diamond-Like Carbon Films as Biomaterials: Review / W. Feng, J. Liu, J. Xue // Colloid and Surface Science. – 2014. – V. 63. – 3.

9. Amorphous carbon-coated TiO_2 nanocrystals for improved lithium-ion battery and photocatalytic performance / T. Xia, W. Zhang, Z. Wang et al. // Nano Energy. – 2014. – V. 6. – P. 109-118.

10. Surface plasmon effect in electrodeposited diamond-like carbon films for photovoltaic application / B. Ghosh, S. C. Ray, R. Espinoza-González et al. // Chemical Physics Letters. – 2018. – V. 698. – P. 60-66.

11. Structural, optical and electrical properties of amorphous carbon films deposited by pulsed unbalanced magnetron sputtering / H.Y. Dai, X.R. Cheng, C.F. Wang et al. // Optik. – 2015. – V. 126. – P. 861-864.

12. ISO 20523:2017. Carbon based films – Classification and designations. [Valid from 2017-08-30]. Pub. : iTeh Standards. – 2017. – P. 1-18.

13. Jacob W. On the structure of thin hydrocarbon films / W. Jacob, W. Möller // Applied Physics Letters. – 1993.00 – V. 63. – P. 1771-1773.

14. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon / J. Robertson // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2002. – V. 37. – P. 129-281.

15. Wang S. Structure evolution during deposition and thermal annealing of amorphous carbon ultrathin films investigated by molecular dynamics simulations / S. Wang, K. Komvopoulos // Scientific Reports. – 2020. – V. 10. – 8089.

16. Roy A. A review of plasma-assisted deposition methods for amorphous carbon thin and ultrathin films with a focus on the cathodic vacuum arc technique // A. Roy, S. Wang, K. Komvopoulos // Journal of Materials Research. – 2023. – V. 38. – P. 586-616.

17. Gupta B. K. Micromechanical properties of amorphous carbon coatings deposited by different deposition techniques / B. K. Gupta, B. Bhushan // Thin Solid Films. – 1995. – V. 270. – P. 391-398.

18. Savvides N. Diamondlike amorphous carbon films prepared by magnetron sputtering of graphite / N. Savvides, B. Window. // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 1985. – V. 3. – P. 2386-2390.

19. Probing the Role of Carbon Microstructure on the Thermal Stability and Performance of Ultrathin (<2 nm) Overcoats on $L1_0$ FePt Media for Heat-Assisted Magnetic Recording / S. Kundu, N. Dwivedi, N. Satyanarayana et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2014. – V. 7. – P. 158-165.

20. Sputter deposition of dense diamond-like carbon films at low temperature / J. J. Cuomo, J. P. Doyle, J. Bruley, J. C. Liu // Applied Physics Letters. – 1993. – V. 58. – P. 466-468.

21. Matlak J. Friction properties of amorphous carbon ultrathin films deposited by filtered cathodic vacuum arc and radio-frequency sputtering / J. Matlak, K. Komvopoulos // Thin Solid Films. – 2015. – V. 579. – P. 167-173.

22. Impact of Plasma Pre-Treatment on the Tribological Properties of DLC Coatings on PDMS Substrates / W. Kaczorowski, H. Świątek, K. Łuczak et al. // Materials. – 2021. – V. 14. – 433.

23. Jang Y. Tribological properties of multilayer tetrahedral amorphous carbon coatings deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition / Y. Jang, J. Kim, W. Lee, J. Kim // Friction. – 2021. – V. 9. – P. 1292-1302.

24. Ion implantation in tetrahedral amorphous carbon / D. G. McCulloch, E. G. Gerstner, D. R. McKenzie et al. // Physical Review B. – 1995. – V. 52. – 850.

25. Wang S. Structure evolution during deposition and thermal annealing of amorphous carbon ultrathin films investigated by molecular dynamics simulations / S. Wang, K. Komvopoulos // Scientific Reports. – 2020. – V. 10. – 8089.

26. Monitoring the thermally induced transition from sp3-hybridized into sp2-hybridized carbons / D. Schupfer, F. Badaczewski, J. Peilstocker et. al. // Carbon. – 2021. – V. 172. – P. 214-227.

27. Jackson S. T. Determining hybridization differences for amorphous carbon from the XPS C 1s envelope / S. T. Jackson, R. G. Nuzzo // Applied Surface Science. – 1995. – V. 90. – P. 195-203.

28. A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications / A. Tyagi, R.S. Walia, Q. Murtaza, S. M. Pandey et. al. // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – V. 78. – P. 107-122.

29. iScope [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: https://www.euromex.com/en/products/applications/anatomopathology/university-anatomopathology/iscope/, вільний . – (дата звернення: 20.09.2024). – Назва з екрана.

30. Mohammed A. Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review / A. Mohammed, A. Abdullah // Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX. – 2019. – P. 77-85.

31. Industrial coating scratch and wear evalution [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: https://nanovea.com/industrial-coatings-scratch-and-wear-evaluation/, вільний. – (дата звернення: 20.10.2024). – Назва з екрана.

32. Bunaciu A. A. X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications / A. A. Bunaciu, E. G. Udriştioiu, H. Y. Aboul-Enein // Critical Reviews in Analytical Chemistry. – 2015. – V. 45, – P. 289 – 299.

23. High Resolution X-Ray Diffraction Analyses of (La,Sr)MnO_3/ZnO/Sapphire(0001) Double Heteroepitaxial Films / K. Inaba, S. Kobayashi, K. Uehara et al. // Advances in Materials Physics and Chemistry. – 2012. – V. 3. – P. 72-89.

34. Рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima-IV [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: https://science.kpi.ua/bez-rubriki/rigaku-ultima-iv, вільний. – (дата звернення: 24.06.2024). – Назва з екрану.

35. ДСанПіН 3.3.2-007-98. Організація і обладнання робочих місць. – Чинний від 1998-07-01. – Київ: МОЗ України, 1998. – 35 с.

36. ДБН В.2.5.28-2018. Природне та штучне освітлення. – Чинний від 2019 – 03 – 01. – ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2016. – № 264.

37. Москальова В.М. Охорона праці: Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення / В.М. Москальова //– Рівне: НУВГП , 2009.

38. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидецького. – Львів: Афіша, 2000. – 32 с.

39. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – Чинний від 1999 – 12 – 01. – Київ: Державні Санітарні Норми, 1999. – 10 с.

40. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – Чинний від 1999 – 12 – 01. – Київ: Державні Санітарні Норми, 1999. – № 42.

41. Левченко О.Г. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / О.Г. Левченко // КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 26,1 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 337 с.

42. НАПБ Б.03.002-2007. Визначення категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – Чинний від 2007 – 12 – 03. – Київ: Наказ МНС, 2016. – № 833.

43. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров`я працівників під час роботи з екранними пристроями. – Чинний від 2018 – 05 – 18. – Київ: Державні Нормативні акти з Охорони Праці, 2018. – № 207.

44. НПАОП 0.00-4.33-99 Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій. – Чинний від 1999 – 06 – 30. – Київ: Державні Нормативні акти з Охорони Праці, 1999. – № 112.