МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра загальної та прикладної фізики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему: **«РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ НАНОМАТЕРІАЛІВ У ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ»**

Виконав студентка: 2 курсу, групи 8.1054-дн
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали
(шифр і назва спеціальності)
предметної спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітньої програми Прикладна фізика
О.О. Максименко
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент кафедри загальної та прикладної фізики, доцент, кандидат фізико-математичних наук Яновський О.С.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент професор кафедри фізичного матеріалознавства НУ «Запорізька політехніка», професор, доктор фіз.-мат. наук Смоляков О.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Математичний

Кафедра Загальної та прикладної фізики

Рівень вищої освіти Магістр

Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Освітня програма Прикладна фізика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри загальної та прикладної фізики, професор кафедри, д. п. н., доцент

_____ **Андрєєв А.М.**

(підпис)

«___»_____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Максименко Олені Олександрівні

(прізвище, ім'я та по-батькові)

1. Тема роботи Радіаційна стійкість наноматеріалів у лінійному прискорювачі

керівник роботи Яновський Олександр Сергійович, к.ф.-м.н., доцент

(прізвище, ім'я та по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 28 » лютого 2025 року № 326-С

2. Строк подання студентом роботи 02.02.2026 року

3. Вихідні дані до роботи 1. Постановка задачі.

2. Перелік питань до дослідження.

3. Перелік літератури.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Основні теоретичні відомості про наноматеріали та лінійний прискорювач
2. Аналіз дії різного випромінювання на наноматеріали та їх радіаційна стійкість
3. Експериментальна частина дослідження (розрахунково-аналітична)
4. Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): презентація.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Яновський О.С., кандидат фіз.-мат. наук, доцент		
2	Яновський О.С., кандидат фіз.-мат. наук, доцент		
3	Яновський О.С., кандидат фіз.-мат. наук, доцент		
4	Яновський О.С., кандидат фіз.-мат. наук, доцент		

7. Дата видачі завдання 19.02.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка плану роботи	03.03.2025-15.03.2025	виконано
2.	Збір вихідних даних	15.03.2025-15.04.2025	виконано
3.	Обробка методичних та теоретичних	01.05.2025-15.06.2025	виконано
	джерел		
4.	Розробка першого та другого розділу	15.06.2025-15.11.2025	виконано
5.	Розробка третього та четвертого розділу	15.06.2025-15.11.2025	виконано
6.	Оформлення та нормоконтроль	05.01.2026-10.02.2026	виконано
	кваліфікаційної роботи		
7.	Захист кваліфікаційної роботи	19.02.2026	виконано

Студентка _____ О. О. Максименко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ О.С. Яновський
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ О.С. Яновський
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра «Радіаційна стійкість наноматеріалів у лінійному прискорювачі»: 67 с., 17 рис., 14 джерел.

КЛІНІЧНІ ЛІНІЙНІ ПРИСКОРЮВАЧІ, ВОЛЬФРАМ, НАНОМАТЕРІАЛИ, РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ, КОЛІМАТОРИ, ДЕГРАДАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ, ІОНІЗУЮЧЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ.

Об'єкт дослідження: процес радіаційного впливу на наноматеріали конструкційних елементів лінійного прискорювача.

Мета роботи: проаналізувати фізичні механізми радіаційного пошкодження наноструктурованих матеріалів та оцінити їхню стійкість до дії високоенергетичного електронного та фотонного випромінювання у медичному лінійному прискорювачі, дослідження радіаційної стійкості наноматеріалів у умовах дії іонізуючого випромінювання медичного лінійного прискорювача та визначення можливостей підвищення їхньої стабільності й ефективності для застосування у променевій терапії.

Методи дослідження: аналітичний, теоретичний, моделювання, порівняльний аналіз, узагальнення експериментальних даних.

Наукова новизна роботи полягає у дослідженні механізмів радіаційної деградації вольфраму в умовах роботи лінійного прискорювача на основі розрахунково-аналітичного аналізу експериментальних даних, отриманих під час опромінення вольфрамових коліматорів та представлених у сучасних наукових джерелах. На основі аналізу фізико-механічних та радіаційних властивостей матеріалу узагальнено дані щодо ефективності використання вольфраму в колімуючих системах лінійних прискорювачів, а також обґрунтовано доцільність застосування наноструктурованого вольфраму як перспективного матеріалу для коліматорів з підвищеною радіаційною стійкістю.

Практичне дослідження полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані при виборі матеріалів для підвищення довговічності елементів лінійного прискорювача, а також під час проєктування нових радіаційно-стійких компонентів на основі наноструктурованих матеріалів.

SUMMARY

Master's qualification thesis **Radiation Resistance of Nanomaterials in a Linear Accelerator"**: 67 pages, 17 figures, 14 references.

CLINICAL LINEAR ACCELERATORS, TUNGSTEN, NANOMATERIALS, RADIATION RESISTANCE, COLLIMATORS, MATERIAL DEGRADATION, IONIZING RADIATION.

Object of research: the process of radiation impact on nanomaterials of structural elements of a linear accelerator.

Purpose of the work: to analyze the physical mechanisms of radiation damage in nanostructured materials and to assess their resistance to high-energy electron and photon radiation in a medical linear accelerator; to investigate the radiation resistance of nanomaterials under exposure to ionizing radiation in a medical linear accelerator; and to determine possibilities for improving their stability and efficiency for use in radiation therapy.

Research methods: analytical and theoretical approaches, modeling, comparative analysis, and generalization of experimental data.

Scientific novelty of the work lies in the study of the mechanisms of radiation degradation of tungsten under linear accelerator operating conditions, based on a computational-analytical analysis of experimental data obtained during irradiation of tungsten collimators and presented in contemporary scientific sources.

Based on the analysis of the physical-mechanical and radiation properties of the material, data on the effectiveness of tungsten use in the collimating systems of linear accelerators have been summarized. The feasibility of using nanostructured tungsten as a promising material for collimators with enhanced radiation resistance has also been substantiated.

Practical significance of the study lies in the fact that the obtained results can be used in the selection of materials to increase the durability of linear accelerator

components, as well as in the design of new radiation-resistant components based on nanostructured materials.

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
РЕФЕРАТ 4
SUMMARY 5
ВСТУП..... 9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ НАНОМАТЕРІАЛІВ 11
1.1 Поняття, характеристика та класифікація наноматеріалів. 11
1.2 Фізико-хімічні властивості наноматеріалів..... 14
1.3 Радіаційні процеси у наноматеріалах..... 16
2 ЛІНІЙНИЙ ПРИСКОРЮВАЧ, ВИДИ ВИПРОМІНЮВАННЯ У ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ ТА ЇХ ВЗАЄМОДІЯ З ВОЛЬФРАМОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ. 19
2.1 Лінійний прискорювач та принцип дії..... 19
2.2 Фотонне випромінювання у лінійному прискорювачі..... 23
2.3 Електронне випромінювання (розсіяні електрони) 26
2.4 Нейтронне випромінення (побічне) 28
2.5 Вольфрамові матеріали як елементи лінійних прискорювачів, радіаційна стійкість..... 31
3 РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ НАНОМАТЕРІАЛІВ У УМОВАХ ДІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛП..... 33
3.1 Переваги наноматеріалів над макроматеріалами..... 33
3.2 Радіаційна поведінка вольфрамових наноматеріалів 36
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ДОСЛІДЖЕННЯ: ВЛАСТИВОСТІ РАДІАЦІЙНОГО ЗАХИСТУ БАГАТОПЕЛЮСТКОВИХ КОЛІМАТОРНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВОЛЬФРАМОВИХ СПЛАВІВ У ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ. 39
4.1 Матеріали та методи 42
4.2 Парціальний поперечний переріз взаємодії фотонів..... 42
4.3 Коефіцієнт масового ослаблення..... 42
4.4 Невизначеності 43
4.5 Результати та обговорення..... 43
4.5.1. Парціальні перерізи взаємодії фотонів 43
4.5.2. Коефіцієнти масового затухання (MAC) та лінійні коефіцієнти затухання (LAC) 46
4.5.3. Ефективний атомний номер (Z_{eff}) та електронна густина (N_{eff}) 48

4.5.4. Довжина вільного пробігу (MFP), шар половинного значення (HVL) та шар десятого значення (TVL) 49
4.5.5. Фактори накопичення експозиції (EBF) 52
4.5.6. Ефективність радіаційного захисту (ЕРЗ) % 57
4.5.7 . Перерізи видалення швидких нейтронів (FNRCS) 59
4.5.8. Що показало дослідження 61
4.5.9. Порівняння результатів дослідження з наноструктурованим вольфрамом 63
ВИСНОВКИ 64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ ТА ЛІТЕРАТУРА 66

ВСТУП

У сучасних реаліях сьогодення онкологічні захворювання залишаються однією з ключових глобальних проблем людства. Зростання захворюваності, ускладнена діагностика на ранніх етапах, вплив воєнних дій, стресових факторів, екологічних умов та старіння населення — усе це формує нагальну потребу в ефективних, точних та безпечних методах лікування.

У таких умовах променева терапія посідає одне з провідних місць у комплексному лікуванні онкопатологій, охоплюючи понад 70% пацієнтів із діагнозом «рак» хоча б на одному з етапів терапії.

Технологічний прогрес останніх десятиліть суттєво змінив підходи до променевого лікування. На передній план вийшли високоточні системи, серед яких **медичний лінійний прискорювач (ЛП)** є основним інструментом сучасної радіотерапії. ЛП забезпечує формування терапевтичного пучка з міліметровою точністю, дозволяючи максимально точно підводити дозу до злоякісного утворення та мінімізувати опромінення здорових тканин. Умови, у яких працюють такі апарати, є технічно складними: високі енергії фотонів, електронів, а інколи й нейтронів формують інтенсивні радіаційні поля.

Сучасні лінійні прискорювачі забезпечують міліметрову точність доставки дози, що дозволяє максимально уражати пухлинну тканину та мінімізувати вплив на здорові органи. Разом із розвитком технологій радіотерапії **зростають вимоги до матеріалів**, з яких виготовлено ключові компоненти прискорювача: мішені, **коліматори**, захисні елементи та модулі формування пучка. Ці деталі працюють в екстремальних умовах інтенсивного фотонного, електронного та у високих енергіях, нейтронного випромінювання. Саме тому **радіаційна стійкість матеріалів** є критично важливою для безпеки та ефективності лікування.

Особливу увагу привертають **наноматеріали**, які завдяки своїй структурі демонструють унікальні фізико-хімічні властивості та **підвищену стійкість до радіаційних пошкоджень**. Наноструктуровані матеріали здатні краще поглинати та розсіювати енергію частинок, швидше відновлювати дефекти та зберігати механічну стабільність навіть при колосальних радіаційних навантаженнях. Це робить їх перспективними кандидатами для використання у вузлових елементах лінійних прискорювачів.

Застосування наноматеріалів дозволяє не лише подовжити ресурс роботи прискорювача, а й підвищити точність формування пучка, що напряму впливає на **якість та результативність лікування онкологічних пацієнтів**. Покращення стабільності та довговічності колімуючих і мішеневих систем сприяє більш точному наведення дози на пухлину, зменшує побічні ефекти та підвищує шанси на успішне лікування.

Таким чином, дослідження радіаційної стійкості наноматеріалів у умовах дії медичного лінійного прискорювача **має високу наукову та практичну значущість.** Воно знаходиться на перетині сучасної онкології, фізики та нанотехнологій, сприяючи розвитку нових рішень для підвищення ефективності та безпеки променевої терапії.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ НАНОМАТЕРІАЛІВ

1.1 Поняття, характеристика та класифікація наноматеріалів.

Розвиток фундаментальних і прикладних уявлень про наноматеріали та нанотехнології вже у найближчі роки може призвести до кардинальних змін у багатьох сферах людської діяльності: в матеріалознавстві, енергетиці, електроніці, інформатиці, машинобудуванні, медицині, сільському господарстві, екології. Поряд з комп'ютерно-інформаційними та біотехнологіями, нанотехнології є фундаментом науково-технічної революції в XXI сторіччі. Що ж таке наноматеріали:

Наноматеріали – матеріали, що містять структурні елементи, геометричні розміри яких хоча б в одному вимірі не перевищують 100 нм, і які володіють якісно новими властивостями, функціональними характеристиками. та експлуатаційними характеристиками (Рис.1).

Наноструктурні матеріали, або наноматеріали – це різновид матеріалів, яким саме присутність специфічних нанорозмірних елементів структури (морфологічних одиниць) надає особливі властивості, які відсутні у аналогів без наноструктури.
Основними характеристиками наноматеріалів є дисперсність (розмір наночастинок) та морфологія (форма наночастинок), які залежать від таких параметрів як розмірність, форма, ступінь анізотропії, загальна питома поверхня.

Для розкриття моєї теми найважливіші характеристики наноматеріалів є розмірність і структура, бо вони напряму визначають радіаційну стійкість.

Матеріали, в основі яких лежать різні нанорозмірні структури, володіють комплексом властивостей, що відрізняються від властивостей об'ємних матеріалів того ж хімічного складу. Основною причиною зміни властивостей є виникнення численних міжфазних границь. Наприклад, якщо розмір зерен становить ≈ 6нм , то міжфазні границі завтовшки ~1 нм займають 50% об'єму матеріалу. Отже, для отримання матеріалу з новими властивостями необхідно наноструктурувати його.

До наноматеріалів доцільно відносити лише ті матеріали, які містять цілеспрямовано створені специфічні угруповання атомів (молекул) або структурні елементи нанометрових розмірів, завдяки яким і створюється якісно новий об'єкт, що істотно відрізняється за властивостями від об'єктів, які не мають таких

структурних елементів (навіть якщо хімічний склад перших і других повністю тотожний).

На даний час існує декілька підходів до класифікації наноматеріалів: − за складом: неорганічні – кераміка, метали, сплави, і органічні – металорганічні та металополімерні; − за агрегатним станом: аерозолі, аерогелі, емульсії, золі, гелі, кластери, нанокристаліти, нанокомпозити тощо; − за розміром (геометричними параметрами структури) – наночастинки, кластери, нанокристаліти тощо; та за мірністю.

Одним з найбільш поширених є геометричний принцип (мірність). Він також пов'язаний з тим, що геометричні параметри наноматеріалів істотно впливають на їх властивості. За геометричним принципом нанооб'єкти класифікують за кількістю вимірів, в яких об'єкт має макроскопічні розміри, тобто за розмірністю D: нуль-, одно-, дво-, тримірний – 0D, 1D, 2D, 3D.

Розмірність належить до найважливіших факторів, що визначають електричні та оптичні властивості нанооб'єктів і матеріалів, які з них складаються.

Нанооб’єкти нульмірні (0D) (квантові точки) – це наночастинки (кластери, колоїди, нанокристали і фулерени), що містять від декількох десятків до декількох тисяч атомів, 52 згрупованих в зв’язки або ансамблі у формі клітини. У цьому випадку частинка має нанометрові розміри в усіх трьох напрямках. Наночастинка – це нульмірний нанооб’єкт, у якого всі характерні лінійні розміри не перевищують 100 нм. Як правило, наночастинки мають сферичну форму і, якщо вони мають яскраво виражене упорядковане розташування атомів (чи іонів), то їх називають нанокристалітами. Слід зазначити, якщо наночастинка має складну форму і будову, то в якості характерного параметра виступає не її лінійний розмір, а розмір структурного елемента. В такому випадку частинки називають наноструктурами, а їхні лінійні розміри можуть значно перевищувати 100 нм. Наночастинки з вираженою дискретністю енергетичних рівнів часто називають «квантовими точками» або «штучними атомами», найчастіше вони мають склад типових напівпровідникових матеріалів.

Нанооб’єкти одномірні (1D) (квантові нитки) – вуглецеві нанотрубки і нановолокна, нанострижні, нанодроти, тобто циліндричні об’єкти з одним виміром в декілька мікрон і двома нанометровими. У даному випадку один характерний

розмір об’єкта, принаймні на порядок перевищує два інші. Прикладом одномірних нанооб’єктів є нанонитки, або нанодроти – так називають протяжні наноструктури з діаметром менше 10 нм. При такому порядку величин об’єкт починає проявляти особливі, квантові властивості. Розміри звичайного дроту в багато разів більше відстаней між атомами, тому електрони вільно переміщуються в усіх напрямках. У нанопроволоці електрони здатні вільно рухатися лише в одному напрямку – вздовж дроту, але не поперек, тому що її діаметр всього лише в кілька разів перевищує відстань між атомами.

Нанооб’єкти двомірні (2D) (квантові площини) – покриття або плівки товщиною декілька нанометрів на поверхні масивного матеріалу (підкладці). У цьому випадку лише один вимір – товщина має нанометрові розміри, два інших є макроскопічними. 53 Прикладом двомірних нанооб’єктів є наноплівки. Завдяки дуже малій товщині (всього в одну або дві молекули) вони пропускають світло і непомітні для ока. Полімерні нанопокриття із полістиролу та інших полімерів надійно захищають багато предметів, що використовуються в побуті, – екрани комп’ютерів, віконця стільникових телефонів, лінзи окулярів.

Тримірні нанооб'єкти (3D) – об’єкти мікро - і макросвіту, що складаються з нанорозмірних частинок (аерогелі, ксерогелі), або нанопористі структури, нанокристалічні структури і сплави. Системи, що мають $D < 3$, називають низькорозмірними. Їх фізико-хімічні властивості можуть кардинально відрізнятися від об'ємних (3D). Крім того, існують об'єкти з дробовою (нецілочисельною) розмірністю ($1 < D < 2$ на площині і $2 < D < 3$ в об’ємі). Вони називаються фрактальними і також мають ряд характерних особливостей.

Для розробки нових поколінь наноматеріалів та розвитку нанотехнологій необхідний сильний взаємозв'язок між фундаментальними та прикладними дослідженнями. Серед областей застосування, де необхідно створювати нові функціональні та конструкційні наноматеріали на основі фундаментальних досліджень, можна виділити енергетику, електроніку, авіацію та космос, медицину та біотехнології, що швидко розвиваються.

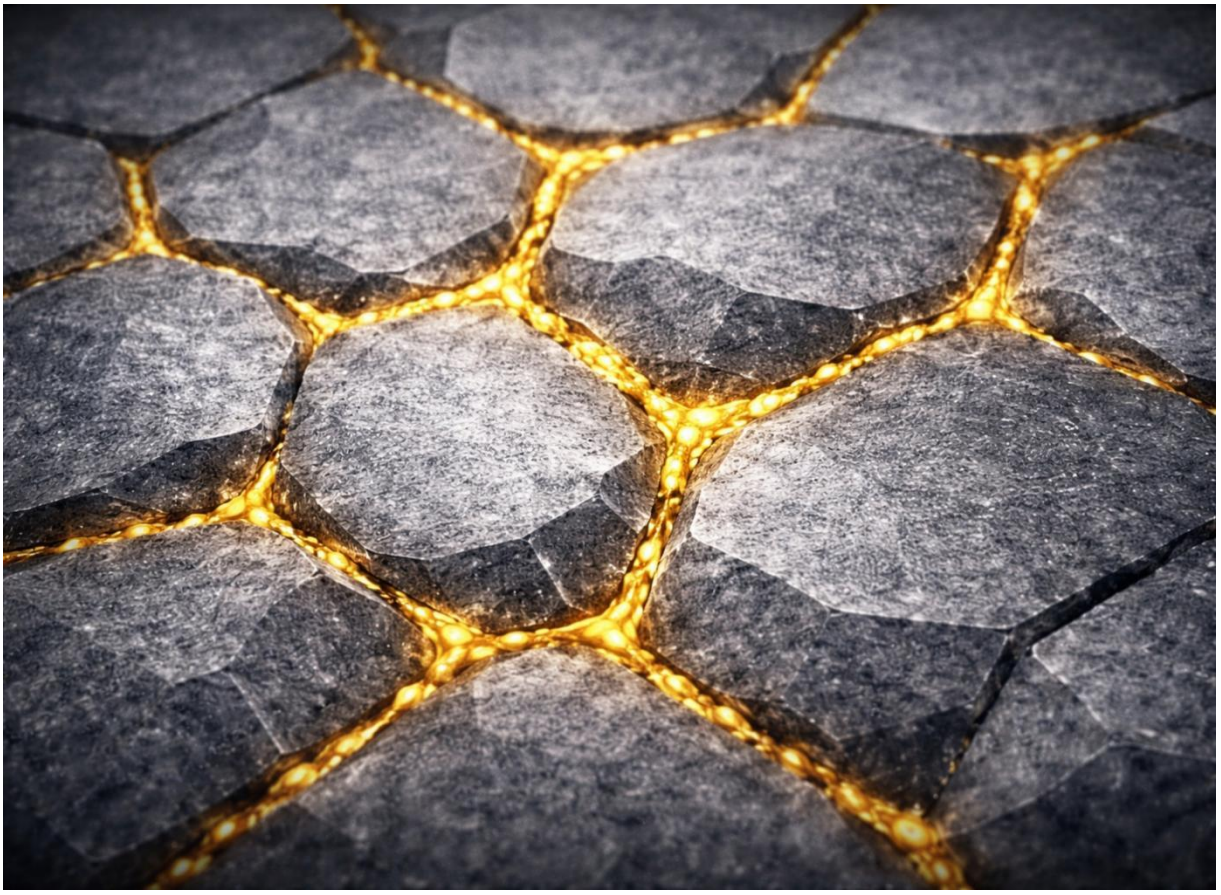


Рис.1 Наноматеріал

1.2 Фізико-хімічні властивості наноматеріалів

Фізико-хімічні характеристики наноструктур включають їх розмір, форму та структуру, що зумовлюють унікальні властивості, такі як висока питома поверхня, квантові ефекти та змінена реакційна здатність. Це призводить до відмінностей від макроскопічних аналогів, зокрема, у магнітних, оптичних, каталітичних та механічних властивостях.

Наноматеріали характеризуються унікальними фізико-хімічними властивостями, що істотно відрізняють їх від об’ємних (масивних) матеріалів того самого хімічного складу. Зменшення розміру частинок до нанорівня (1–100 нм) призводить до появи нових ефектів, пов’язаних із квантовим обмеженням, збільшенням питомої поверхні та зміною енергетичної структури.

Ці властивості зумовлюють підвищену реакційну здатність, механічну стабільність та особливу поведінку наноматеріалів у радіаційних умовах.

Висока питома поверхня. Однією з найважливіших характеристик наноматеріалів є надзвичайно велике співвідношення площі поверхні до об’єму. Це забезпечує:

- інтенсифікацію поверхневих реакцій;

- підвищену сорбційну здатність;
- прискорення дифузії та рекомбінації дефектів;
- зміну термодинамічних властивостей, зокрема енергії поверхні.

Висока питома поверхня відіграє ключову роль у радіаційній стійкості, оскільки поверхня слугує ефективним «поглиначем» точкових дефектів, що утворюються внаслідок опромінення. Це означає, що вакансії та міжвузлові атоми, які зазвичай накопичуються у масивних (мікрокристалічних) зразках і призводять до радіаційного зміцнення та крихкості, у наноструктурованих матеріалах швидко мігрують до меж зерен і там рекомбінують.

Квантово-розмірні ефекти. У наночастинках електрони та інші носії заряду потрапляють в умови просторової локалізації. Це спричиняє:

- зміни ширини забороненої зони матеріалу;
- дискретизацію енергетичних рівнів;
- зміну електропровідності та теплопровідності;
- появу нових оптичних властивостей (плазмонні ефекти, зсув спектрів поглинання та випромінювання).

Ці зміни визначають специфічну реакцію наноматеріалів на дію іонізуючого випромінювання.

Механічні властивості. Зменшення зерен до нанорозмірів призводить до:

- підвищення твердості (ефект Холла–Петча);
- зростання міцності;
- зменшення кількості дислокацій та збільшення їх рухливості;
- високої стійкості до пластичних деформацій.

Це робить наноматеріали перспективними для роботи в умовах інтенсивних радіаційних навантажень, оскільки вони здатні зберігати форму та структуру навіть при значних дефектах.

Електричні та теплові властивості. У наноматеріалах спостерігається:

- зміна електропровідності через квантове обмеження;
- збільшена кількість поверхневих станів, що впливають на транспорт заряду;
- зміна теплопровідності через розсіяння фононів на межах зерен;
- зростання електронних збурень при опроміненні.

Ці властивості визначають механізми поглинання енергії частинок у лінійному прискорювачі.

Хімічна активність. Наноматеріали мають:

- підвищену хімічну реакційну здатність;
- змінену енергію активації хімічних процесів;
- здатність каталізувати реакції;
- більшу чутливість до окиснення та поверхневих взаємодій.

Це важливо для матеріалів, що працюють у радіаційному середовищі, оскільки хімічні зміни можуть посилювати або, навпаки, зменшувати пошкодження.

Структурна неоднорідність. Наноструктуровані матеріали мають велику кількість:

- меж зерен;
- міжфазних границь;
- кластерів атомів.

Ці елементи відіграють роль «пасток» для вакансій і міжвузлових атомів, що значно підвищує радіаційну стійкість наноматеріалу порівняно з макроструктурами.

Таким чином, унікальні фізико-хімічні властивості наноматеріалів — зокрема висока питома поверхня, квантово-розмірні ефекти та структурна неоднорідність — визначають їхню підвищену стійкість до радіаційних пошкоджень і роблять їх перспективними для застосування у високорадіаційних умовах медичного лінійного прискорювача.

1.3 Радіаційні процеси у наноматеріалах

Радіаційні процеси в наноматеріалах визначаються взаємодією іонізуючого випромінювання з атомною та електронною підсистемами речовини. Особливості цих процесів у наноструктурованих матеріалах значно відрізняються від макроскопічних аналогів завдяки малим розмірам зерен, великій питомій поверхні та підвищеній кількості меж зерен і дефектів. Усі ці фактори впливають на механізми утворення, міграції та рекомбінації радіаційно-індукованих дефектів.

Іонізаційні процеси

Іонізаційна взаємодія відбувається при передачі енергії від фотонів, електронів або заряджених частинок до електронної підсистеми наноматеріалу.

Основні наслідки:

- утворення електронно-діркових пар;
- локальні електронні збудження;
- поява зміни електропровідності;
- можливі електронні релаксаційні процеси та теплові флуктуації.

У наноматеріалах іонізаційні втрати енергії можуть бути більшими через високу щільність поверхневих станів та короткі шляхи розсіяння електронів.

Неіонізаційні втрати (displacement damage)

Неіонізаційна передача енергії призводить до вибивання атомів із вузлів кристалічної ґратки. Це основний механізм радіаційного руйнування:

- утворення вакансій (порожніх вузлів);
- поява міжвузлових атомів**;**
- формування каскадів зміщень**,** коли первинний вибитий атом вибиває інші атоми;
- утворення дислокацій, кластерів дефектів та аморфізованих зон**.**

У наноматеріалах ці дефекти мігрують значно швидше, а межі зерен виконують роль «пасток», що зменшує накопичення пошкоджень.

Теплові та релаксаційні процеси

При дії інтенсивного випромінювання виникає локальне нагрівання нанорегіонів, що спричиняє:

- активацію дифузійних процесів;
- прискорену рекомбінацію дефектів;
- часткове відновлення структури.

Завдяки малому розміру зерен теплова релаксація в наноматеріалах відбувається швидше, ніж у масивних структурах.

Радіаційно-індуковані фазові та структурні зміни

У деяких наноматеріалах опромінення може викликати:

- зміни фазового стану;
- перехід до аморфної фази;
- зсув меж зерен;

- зародження нових дефектних кластерів;
- зміни у мікроструктурі, що впливають на механічні та електричні властивості.

Наноструктуровані матеріали показують стабільнішу поведінку завдяки здатності швидко відновлювати пошкоджену структуру.

Переваги наноматеріалів у радіаційному середовищі

Основними факторами підвищеної радіаційної стійкості є:

- короткі шляхи міграції дефектів;
- велика кількість меж зерен, де дефекти рекомбінують;
- менший об’єм окремих зерен, де складно сформувати великі дефектні кластери;
- ефективне розсіяння енергії частинок.

Ці властивості дають змогу наноматеріалам краще протистояти опроміненню, ніж традиційним матеріалам.

Таким чином, радіаційні процеси в наноматеріалах визначаються поєднанням іонізаційних та неіонізаційних механізмів, але завдяки структурній неоднорідності й високій питомій поверхні наноматеріали демонструють підвищену здатність до відновлення після радіаційних пошкоджень, що робить їх перспективними для використання у лінійних прискорювачах.

2 ЛІНІЙНИЙ ПРИСКОРЮВАЧ, ВИДИ ВИПРОМІНЮВАННЯ У ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ ТА ЇХ ВЗАЄМОДІЯ З ВОЛЬФРАМОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ.

2.1 Лінійний прискорювач та принцип дії

Лінійний прискорювач – це високотехнологічний апарат для променевої терапії, який дозволяє максимально точно впливати на пухлину, захищаючи здорові тканини, він забезпечує високоточне опромінення з мінімальним впливом на здорові тканини (рис.2). Його робота ґрунтується на прискоренні електронів у змінному електромагнітному полі надвисокої частоти.

У лінійному прискорювачі електрони, тобто негативно заряджені частинки, прискорюються за допомогою високочастотного випромінювання і можуть безпосередньо використовуватися для опромінення пухлин.

- Основні елементи лінійного прискорювача

Лінійний прискорювач складається з таких ключових компонентів:

✓ Джерело електронів (катод)

Виконує термоелектронну емісію та створює початковий електронний пучок.

✓ Ускорююча структура (хвилевод)

Система резонаторів або секцій, у яких електрони прискорюються під дією СВЧ-поля у діапозоні близько 3 ГГц.

Може працювати в режимі стоячих або біжучих хвиль.

✓ Генератор СВЧ-випромінювання (магнетрон або клістрон)

Створює електромагнітне поле, що забезпечує прискорення електронів у хвилеводі.

✓ Магнітна система (вигинальні та фокусувальні магніти)

Спрямовує електронний пучок у потрібному напрямку, зазвичай під кутом 90° до терапевтичної головки.

✓ Мішень (вольфрамова)

Використовується у фотонному режимі. Електрони, потрапляючи в мішень, гальмуються, утворюючи гальмівне рентгенівське випромінювання.

✓ Терапевтична головка, яка включає:

- первинний коліматор (виконаний повністю з вольфраму або його сплавів) — задає початкову геометрію променя;

Це елемент, який формує форму та розмір пучка фотонного випромінювання, щоб опромінення точно попадало в пухлину і не пошкоджувало навколишні тканини.

-флеттенінг-фільтр (у фотонному режимі) — вирівнює профіль пучка;

-вторинні коліматори — формують поле опромінення;

-багатолистковий коліматор (MLC) (композиція на основі вольфраму) — точне індивідуальне формування поля за допомогою вольфрамових пластин. Складається з десятків рухомих вольфрамових пластин, ці листи зсуваються, щоб сформувати будь-яку складну форму поля опромінення. Матеріал його пластин повинен забезпечувати надзвичайно високий рівень радіаційного захисту, оскільки коліматор розташований безпосередньо на шляху високодозового потоку фотонів. Саме тому для виготовлення пластинок традиційно застосовують вольфрам — матеріал з однією з найбільших щільностей серед доступних металів, а відповідно й з високою здатністю до поглинання та ослаблення випромінювання.

Висока атомна маса та щільність вольфраму дають змогу ефективно запобігати проходженню випромінення крізь пелюстки, тим самим захищаючи апаратні компоненти лінійного прискорювача та мінімізуючи небажане опромінення пацієнта поза межами цільового об’єму. Завдяки цьому багатолистковий коліматор забезпечує точне формування лікувального поля, одночасно виконуючи функцію надійного радіаційного бар’єра.

✓ Гантрі

Поворотна частина, що дозволяє опромінювати пацієнта з різних кутів.

Обертання гантрі дозволяє реалізовувати сучасні методики променевої терапії (IMRT, VMAT), забезпечуючи:

• рівномірний розподіл дози в пухлині;

• мінімізацію опромінення здорових тканин;

• підвищення точності лікування.

Гантрі працює у синхронізації з рухомим терапевтичним столом та системою планування лікування, що забезпечує високоточне тривимірне опромінення.

Основні елементи лінійного прискорювача (Рис.3).



Рис.2

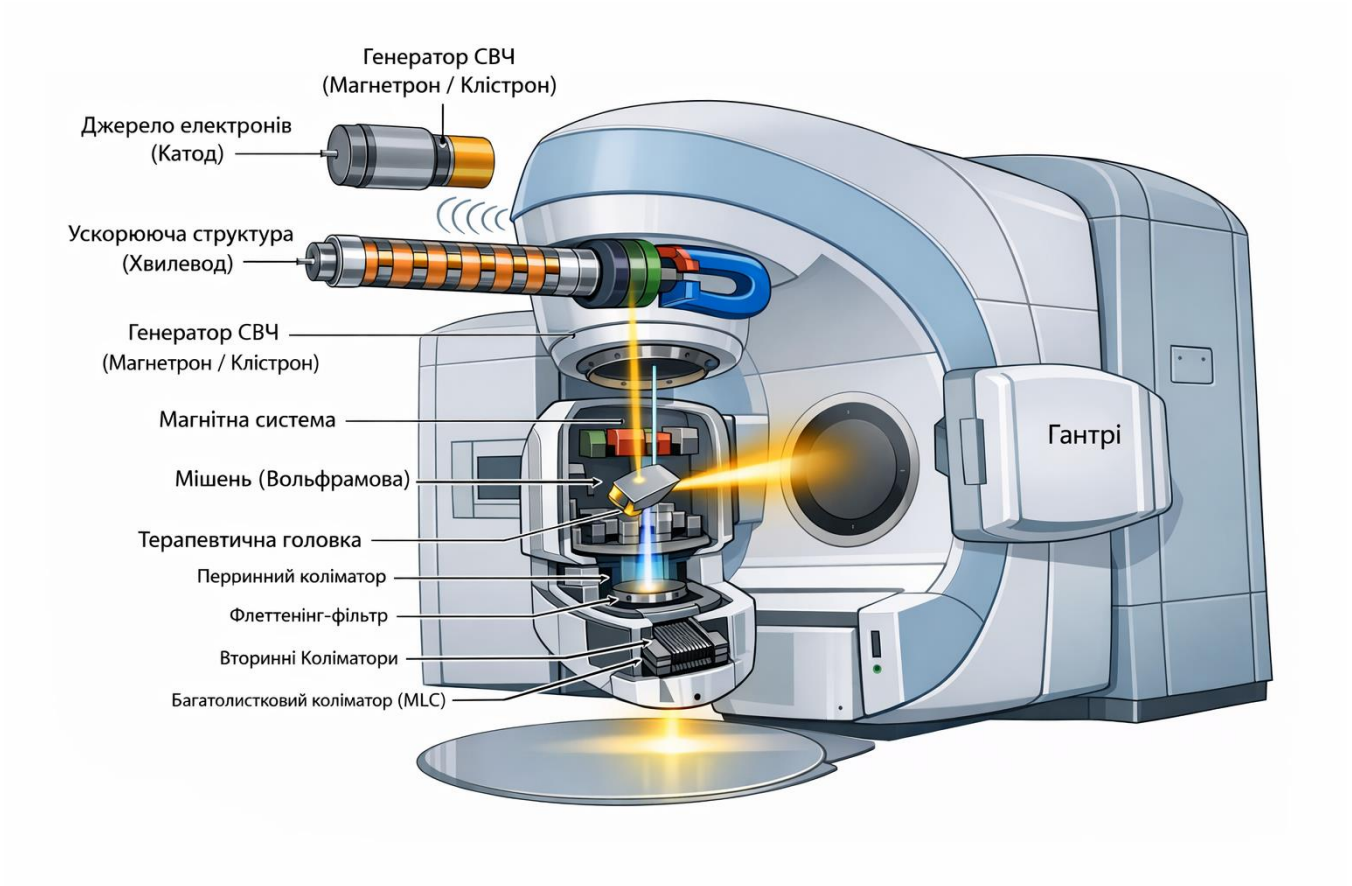


Рис.3

- <u>Принцип роботи лінійного прискорювача</u>

✓ Емісія

З катода вивільняються електрони та вводяться у прискорюючу структуру.

✓ Прискорення

У хвилеводі електрони багаторазово прискорюються змінним електромагнітним полем СВЧ-діапазону.

Їх кінетична енергія зростає до 4–25 МеВ.

✓ Формування типу пучка

В електронному режимі прискорені електрони потрапляють безпосередньо в терапевтичну головку.

У фотонному режимі пучок спрямовується на вольфрамову мішень, де утворюються фотони (гальмівне випромінювання).

✓ Формування терапевтичного поля

Пучок проходить через систему коліматорів та дозиметричних камер, де задається його форма, інтенсивність і розмір.

✓ Доставка дози пацієнту

Гантрі обертається навколо пацієнта, забезпечуючи оптимальний розподіл дози.

Забезпечуючи безперервну модуляцію інтенсивності пучка, що дозволяє точно повторити контури пухлини в тривимірному просторі.

Коли прискорені електрони зіштовхуються з перешкодою (мішенню), виготовленою з важкого металу, найчастіше вольфраму, це супроводжується виробленням високоенергетичного рентгенівського випромінювання. Чим потужніше фотонне випромінювання, тим більша глибина його проникнення в тканини.

Після зіткнення з мішенню промінь проходить через первинний коліматор, який визначає максимальну площу зони опромінення, і фільтр, що забезпечує однорідність випромінювання. Потім форма отриманого пучка променів підлаштовується під параметри пухлинного вогнища, що забезпечує його точне опромінення. Це досягається за допомогою багатолистовий коліматора (мультиколіматора).

Багатолистовий коліматор (БПК) повністю вбудований до радіаційної головки. Він формує пучок з високою роздільною здатністю та повністю інтегрований з лінійним прискорювачем (вбудований до радіаційної головки). Така інтеграція забезпечує найбільшу в класі відстань від гентрі до ізоцентру. Ця характеристика має особливе значення при виконанні ізоцентричних ротаційних методик опромінення. Конструктивні особливості коліматора дозволяють

створювати необхідні фігурні поля будь-яких геометричних форм з високою просторовою роздільною здатністю. Контроль положення пелюсток здійснюється за допомогою спеціальної камери. За рахунок цього досягається висока надійність і відтворюваність роботи БПК. Коліматор задовольняє потреби сучасних методик з використанням високої роздільної здатності як стереотаксичних, так і радіотерапевтичних з модуляцією інтенсивності (Рис. 4).

У медичному лінійному прискорювачі основним видом випромінювання, що формується для променевої терапії, є високоенергетичне фотонне (рентгенівське) випромінювання, яке утворюється під час гальмування прискорених електронів у вольфрамовій мішені. Саме фотони взаємодіють з конструкційними елементами прискорювача, зокрема з вольфрамовими коліматорами та наноструктурованими вольфрамовими елементами, що визначає їх радіаційну стійкість.

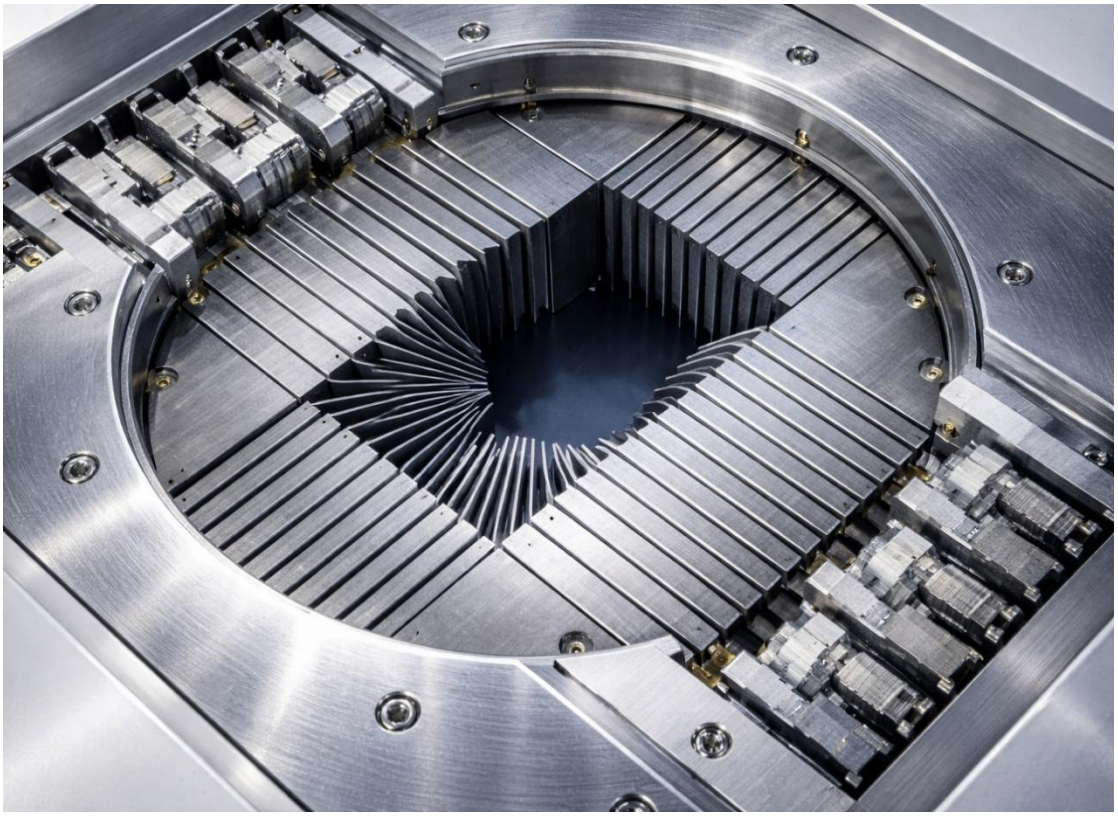


Рис. 4 Багатолистовий коліматор (БПК)

2.2 Фотонне випромінювання у лінійному прискорювачі

Гальмівне фотонне випромінювання — це електромагнітне випромінювання, що виникає, коли заряджена частинка (наприклад, електрон) сповільнюється або змінює свою траєкторію в результаті зіткнення з іншими зарядженими частинками,

зазвичай з атомними ядрами. Цей процес забирає частину енергії зарядженої частинки, перетворюючи її на фотони (світло, рентгенівське або гамма-випромінювання).

Заряджена частинка, що рухається рівномірно, не випромінює електромагнітних хвиль. Створені нею електричне і магнітне поля залишаються близькими і не відриваються від частинки, утворюючи незалежну хвилю.

Випромінювання з'являється тоді, коли заряджена частинка рухається із прискоренням. Однією з причин прискореного руху може бути зіткнення з іншою частинкою, в результаті якого міняється траєкторія руху. Таке випромінювання називають гальмівним, бо воно забирає із собою частину енергії зарядженої частинки, додатково гальмуючи її. Зокрема гальмівне випромінювання виникає при зіткненні пучка електронів з речовиною електрода.

Гальмівним називають лише випромінювання, що утворюється через прискорення у електричному полі. Випромінювання, що виникає через прискорення в магнітному полі називається магнітногальмівним. Таким є синхротронне або циклотронне випромінювання.

Гальмівне випромінювання електрона. (Рис.5)

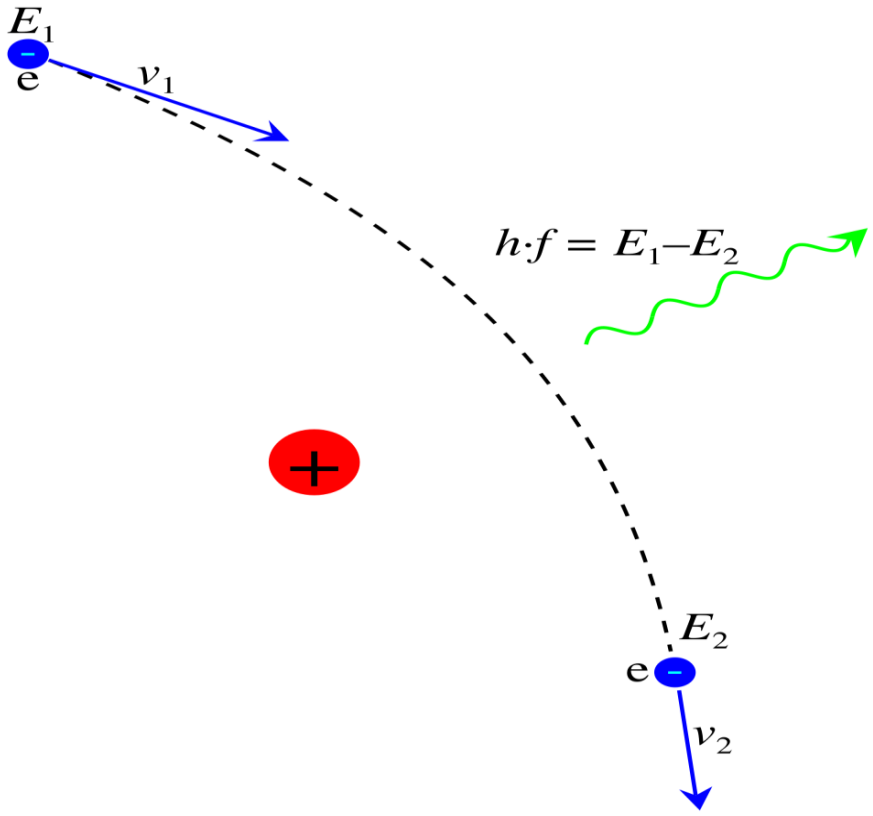


Рисунок 5. Гальмівне випромінювання електрона.

Механізм утворення фотонів у ЛП.

Основним процесом генерації фотонів є гальмівне випромінювання (Bremsstrahlung). Коли прискорені електрони потрапляють у сильне електричне поле атомів мішені, вони раптово змінюють швидкість і напрямок руху, внаслідок чого частина їх кінетичної енергії перетворюється в електромагнітне випромінювання.

Процес супроводжується:

- широким спектром фотонів від сотень кеВ до десятків МеВ;
- нерівномірним кутовим розподілом (переважно вперед за напрямком пучка);
- високою інтенсивністю у напрямку осі опромінення.

Ці фотони слугують основою для формування лікувального променя у режимах 6 МВ, 10 МВ, 15 МВ тощо.

Фізичні взаємодії фотонів з матеріалом.

Основними механізмами взаємодії фотонів із наноматеріалами є:

- ✓ Фотоелектричний ефект

Поглинання фотона атомом із викиданням електрона.

Для наноматеріалів можливе підсилення ефекту через збільшену площу поверхні.

- ✓ Комптонівське розсіяння

Найпоширеніший процес у діапазоні 1–10 МеВ. Фотон втрачає частину енергії, вибиваючи електрон та змінюючи напрямок. Це призводить до:

- появи вторинних електронів;
- локальних іонізаційних процесів;
- зміни електронної структури наноматеріалів.

- ✓ Народження пар

Переважає при енергіях понад 10 МеВ. Фотон перетворюється на електрон-позитронну пару в полі ядра. Утворені частинки зумовлюють додаткові радіаційні пошкодження.

Вплив фотонів на наноматеріали.

Фотонне випромінювання викликає:

- іонізаційні процеси, що змінюють електронні властивості;
- локальне нагрівання, яке прискорює релаксацію дефектів;
- появу електронно-діркових пар, що впливає на провідність;

- утворення точкових дефектів, зокрема вакансій.

У наноструктурованих матеріалах ці процеси модулюються їх фізико-хімічними властивостями:

- межі зерен швидко поглинають дефекти,
- короткі шляхи дифузії сприяють рекомбінації,
- квантово-розмірні ефекти впливають на електронні збудження.

Завдяки цьому наноматеріали часто демонструють підвищену стійкість до фотонного опромінення порівняно з макроматеріалами.

Значення фотонного випромінювання для конструкції ЛП.

Фотонне поле впливає на:

- мішень (вольфрамову пластину);
- первинний та вторинний коліматори;
- багатолистові коліматори (MLC);
- фільтри та компенсатори.

Саме тому радіаційна стійкість матеріалів у зоні фотонного пучка є критично важливою для:

- стабільності роботи прискорювача;
- точності формування дози;
- безпеки пацієнтів.

Фотонне випромінювання лінійного прискорювача є ключовим джерелом іонізаційних процесів у наноматеріалах, визначає їх структурні зміни та формує основне радіаційне навантаження на елементи прискорювача, що підкреслює важливість дослідження їх стійкості до фотонного впливу.

Фотони енергією 6–18 МеВ взаємодіють із вольфрамом через фотоелектричний ефект, комптонівське розсіяння та процеси утворення пар. Ці взаємодії призводять до утворення вторинних електронів, які локально змінюють структуру матеріалу, викликають утворення вакансій, міжвузлових атомів та інших дефектів. У наноструктурованому вольфрамі такі дефекти ефективніше рекомбінують на границях зерен, що підвищує його радіаційну стійкість у порівнянні з макроструктурним матеріалом.

2.3 Електронне випромінювання (розсіяні електрони)

Електронне випромінювання у голові медичного лінійного прискорювача виникає внаслідок часткового розсіяння та відбиття прискорених електронів під час їх взаємодії з мішенню та конструктивними елементами променевої головки. Незважаючи на те, що основний електронний пучок спрямований у мішень для генерації фотонів, частина електронів зазнає зворотного розсіяння або багаторазових відбиттів, що формує потік розсіяних електронів. Саме ці електрони є джерелом додаткових радіаційних навантажень на матеріали коліматорів, фільтрів, захисних блоків та інших компонентів прискорювача.

Джерела розсіяних електронів у лінійному прискорювачі.

Розсіяні електрони утворюються внаслідок:

- еластичного та нееластичного розсіяння електронів на атомах мішені, особливо при роботі в фотонному режимі;
- зворотного розсіяння (backscattering) з поверхні вольфрамової мішені;
- взаємодії електронів з елементами первинного та вторинного коліматора;
- ударів електронів у дрібні конструктивні деталі та порожнини променевої головки.

Енергії таких електронів зазвичай знаходяться у діапазоні 6–18 МеВ, що достатньо для формування радіаційне зміщення (displacement damage) у матеріалах.

Механізми взаємодії електронів з матеріалом

Взаємодія електронів із наноматеріалами відбувається за двома ключовими механізмами:

Електрони з високою швидкістю іонізують атоми, утворюючи електронно-діркові пари та локальні електронні збудження.

Наслідки:

- зміни в електронній структурі;
- локальне збільшення температури;
- модифікація електропровідності наноматеріалу.

Неіонізаційні втрати (displacement damage)

Під час зіткнення електрон може передати енергію атому ядра і вибити його з вузла ґратки. Це призводить до:

- утворення вакансій;
- появи міжвузлових атомів;

- формування первинних та вторинних каскадів зміщень;
- створення дислокацій та мікродефектів.

Цей механізм є найбільш небезпечним для конструктивних елементів лінійного прискорювача.

Особливості впливу електронів на наноматеріали

Наноматеріали мають низку властивостей, які змінюють характер електронно-індукованих пошкоджень:

- короткі шляхи дифузії дефектів підвищують швидкість рекомбінації;
- межі зерен та поверхневі області слугують ефективними пастками для вакансій;
- низька щільність дислокацій у нанозернах ускладнює формування довгоживучих дефектних кластерів;
- структурна неоднорідність сприяє розсіянню енергії електронів.

У підсумку наноматеріали часто демонструють кращу стійкість до електронного опромінення, ніж матеріали більших розмірів.

Значення електронного випромінювання для конструкції ЛП

Розсіяні електрони чинять радіаційний вплив на:

- мішень і її підкладку;
- первинний та вторинний коліматори;
- багатолистовий коліматор (MLC);
- фільтри, компенсатори та захисні екрани;
- електронні вузли, що знаходяться в зоні розсіяння.

Тривалий вплив електронів сприяє накопиченню дефектів, зниженню механічної міцності та деградації функціональних властивостей матеріалів.

Розсіяні електрони у лінійному прискорювачі є важливим джерелом іонізаційних та displacement-пошкоджень у наноматеріалах. Завдяки великій кількості меж зерен та підвищеній рухливості дефектів наноматеріали демонструють помітно вищу стійкість до електронного опромінення порівняно з традиційними матеріалами.

2.4 Нейтронне випромінення (побічне)

Нейтронне випромінювання у медичному лінійному прискорювачі є побічним,оскільки воно не генерується цілеспрямовано для лікування, а виникає

лише при роботі прискорювача на високих енергіях — понад 10 МеВ. У цьому режимі фотони, що утворюються внаслідок гальмівного процесу, взаємодіють з ядрами важких елементів (переважно вольфраму) у мішені та коліматорах, запускаючи фотоядерні реакції, результатом яких є утворення нейтронів.

Механізм утворення побічних нейтронів

Основним процесом є реакція типу:

$\gamma + ядро \rightarrow ядро \rightarrow ядро' + n^*$

Це означає, що фотон високої енергії вибиває нейтрон із ядра. Ці реакції найінтенсивніші у таких матеріалах:

- вольфрам (W),
- свинець (Pb),
- дубний та танталові сплави,
- інші матеріали з великим атомним номером Z.

Оскільки у променевій головці ЛП велика частина елементів виготовлена саме з вольфраму, це робить нейтронне випромінювання невід'ємною складовою роботи прискорювачів з енергіями 10–18 МВ.

Характеристики побічних нейтронів

Побічні нейтрони мають широкий спектр енергій:

- теплові нейтрони (<0,5 еВ),
- епітеплові (0,5 еВ – 10 кеВ),
- швидкі (10 кеВ – 10 МеВ),
- високоенергетичні нейтрони (>10 МеВ).

Саме швидкі та високоенергетичні нейтрони найнебезпечніші для матеріалів, оскільки вони здатні вибивати атоми з кристалічної ґратки з великими енергіями.

Механізми взаємодії нейтронів з матеріалами

На відміну від фотонів і електронів, нейтрони не мають електричного заряду, тому вони взаємодіють безпосередньо з ядрами атомів, що призводить до потужних структурних змін.

Основні процеси:

- Упружне розсіяння

Нейтрон передає частину своєї енергії ядру → вибиває його з вузла ґратки → формує первинний дефект.

- Неупружне розсіяння

Ядро поглинає нейтрон, переходить у збуджений стан, після чого може викидати:

- протон,
- альфа-частинку,
- ще один нейтрон.

- Радіаційні каскади зміщень

Один швидкий нейтрон може створити:

- тисячі вакансій,
- міжвузлових атомів,
- дислокаційних петель,
- аморфізовані області.

Це найбільш руйнівний механізм для матеріалів ЛП.

- вплив нейтронів на наноматеріали

Наноматеріали мають певні переваги у стійкості до нейтронів завдяки:

- великій кількості меж зерен, де дефекти рекомбінують;
- коротким дифузійним шляхам;
- малим розмірам зон, у яких можуть розвиватися каскади.

Однак нейтронне випромінювання залишається найсильнішим фактором руйнування наноструктур, оскільки:

- каскади зміщень можуть перекривати межі зерен;
- утворюються довгоживучі дефекти;
- спостерігається часткова аморфізація;
- можливе зниження теплопровідності та механічної міцності.

У конструктивних елементах ЛП (мішень, первинний коліматор, багатолистовий коліматор) нейтронно-індуковані дефекти є одними з ключових чинників деградації.

- значення побічного нейтронного випромінювання для конструкції ЛП

Побічні нейтрони впливають на:

- вольфрамову мішень,
- коліматори та підкладки,
- захисні блоки,
- електроніку, яка може деградувати під дією нейтронів,

- наноматеріали, що застосовуються у високорадіаційних зонах.

Тривала дія нейтронів знижує довговічність та ефективність елементів прискорювача, тому дослідження стійкості наноматеріалів у цьому контексті є критично важливим.

Побічне нейтронне випромінювання у лінійному прискорювачі є найбільш руйнівним типом випромінювання для наноматеріалів, оскільки викликає масштабні каскади зміщень і глибокі структурні дефекти. Незважаючи на підвищену здатність наноматеріалів до рекомбінації пошкоджень, нейтрони залишаються головним фактором деградації елементів лінійного прискорювача при енергіях понад 10 МВ.

Фотонне випромінювання є основним у клінічній практиці та використовується для лікування глибоко розташованих пухлин завдяки його великій проникній здатності. Електронне випромінювання застосовується переважно для опромінення поверхневих новоутворень, оскільки має обмежену глибину проникнення та різке спадання дози. Нейтронне випромінювання в медичних лінійних прискорювачах не використовується як лікувальне, а виникає побічно при роботі на енергіях понад 10 МеВ унаслідок фотоядерних реакцій. Таким чином, у клінічній практиці основними лікувальними режимами є фотонний та електронний, тоді як нейтронний компонент розглядається як супутній фактор радіаційного навантаження на конструкційні матеріали та систему захисту.

2.5 Вольфрамові матеріали, як елементи лінійних прискорювачів, радіаційна стійкість

Вольфрам (W) є одним із ключових конструкційним матеріалом для більшості сучасних прискорювальних систем, зокрема медичних лінійних прискорювачів, завдяки унікальним фізико-хімічним властивостям:

- надвисока температура плавлення (3422 °C);
- велика густина (19,3 г/см³);
- висока міцність і термостійкість;
- стійкість до ерозії, випаровування та накопичення дефектів;
- високому атомному номеру (Z=74);
- вираженій радіаційній стійкості.

У лінійних прискорювачах вольфрам використовується: у мішені (таргет), у яку

спрямовується електронний пучок для утворення гальмівного γ-випромінювання, у коліматорах — для формування точного променя під час терапевтичного опромінення (у вигляді щільних листів), у захисних елементах і екранах, що поглинають надлишкове випромінювання.

Під час тривалої роботи прискорювача вольфрамова мішень зазнає інтенсивного потоку частинок, і тому її радіаційна стійкість є вирішальним параметром.
Звичайний вольфрам поступово деградує через накопичення дефектів, тоді як вольфрамові наноматеріали демонструють суттєво кращу поведінку.

Отже, вольфрамові матеріали є ключовим елементом сучасних прискорювальних систем, поєднуючи високу радіаційну, термічну та механічну стабільність. Хоча вольфрам залишається незамінним елементом сучасних прискорювальних систем завдяки своїм фундаментальним властивостям, перехід до використання його наноструктурованих форм є критично важливим кроком. Це дозволяє не лише підвищити радіаційну та термічну стабільність компонентів, а й значно подовжити експлуатаційний ресурс медичного обладнання в умовах екстремальних навантажень.

3 РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ НАНОМАТЕРІАЛІВ У УМОВАХ ДІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛПІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА

3.1 Переваги наноматеріалів над макроматеріалами

Наноматеріали демонструють значно вищу радіаційну стійкість порівняно з макроматеріалами завдяки своїй унікальній структурі, розмірам зерен та фізичним механізмам розсіювання і релаксації дефектів, що виникають під дією випромінювання лінійного прискорювача.

1. Зменшений розмір зерен.

У наноматеріалах характерні розміри зерен становлять 1–100 нм. Такі дрібні зерна створюють велику площу меж зерен, які стають «пастками» або «стоками» для радіаційних дефектів (вакансій, міжвузлових атомів).

Макроматеріали: зерна великі (мікрометри-сотні мікрометрів), радіаційні дефекти (вакансії, міжвузлові атоми) накопичуються всередині зерен, дефекти повільно рекомбінують →зростає крихкість, радіаційне розпухання та аморфізація.

Перевага:

→ дефекти швидко переходять до меж зерен і рекомбінують → менше накопичення пошкоджень → підвищена радіаційна стійкість.

2. Висока щільність меж зерен і дислокацій.

У макроматеріалах дефекти накопичуються всередині кристалу, викликаючи набряк, крихкість, зниження міцності.

У наноматеріалах — навпаки — висока кількість меж поглинає ці дефекти і перешкоджає формуванню радіаційних порожнин.

Перевага:

→ матеріал не деградує під дією пучка електронів чи фотонів ЛП.

3. Менша довжина дифузійного шляху для дефектів

У наноструктурах дефекту потрібно пройти кілька нанометрів до межі зерна, тоді як у макроструктурах — десятки або сотні мікрометрів.

Перевага:

→ дефекти не встигають накопичитися → знижується радіаційне розпухання та аморфізація.

4. Ефект зміцнення та підвищення твердості

Через дрібне зерно наноматеріали часто демонструють ефект Холла–Петча:

менший розмір зерна → більша міцність.

Перевага:

→ наноматеріал менше руйнується під дією високоенергетичних пучків ЛП.

5. Можливість інженерного налаштування структури

Наноматеріали дозволяють додавати легуючі наночастинки. У наноматеріалах через велику площу поверхні значна частина цих пар може мігрувати і «захоплюватись» поверхневими станами або межами зерен, що спричиняє локальні зміни:

- електропровідності;
- потенціалу поверхні;
- локальних електричних полів.

Це важливо, бо навіть незначні зміни мікропотенціалів можуть впливати на теплові, механічні та електронні властивості наноструктур.

6. Дислокаційні петлі та їх ріст

У макроматеріалах дислокаційні петлі можуть розростатися до десятків нанометрів.

У наноматеріалах:

- петлі виникають, але їх ріст блокується межами зерен,
- вони частіше рекомбінують,
- утворюються дрібніші та менш стабільні структури.

При тривалому опроміненні навіть наногратка насичується дефектами й втрачає здатність «самолікуватися».

7. Радіаційна аморфізація

Одним із найнебезпечніших механізмів деградації є утворення локальних аморфних областей - аморфні зони внаслідок каскадів. Після удару первинної вибитої частинки виникає каскад:

У наноматеріалі каскад зазвичай менший і «розбивається» об межі зерен, але при великих потоках:

- каскади можуть зливатися;
- утворюються мікроаморфні ділянки;
- відбувається локальне «розпушення» структури;
- теплопровідність падає.

Перевага наноматеріалів у тому, що аморфні області:

- менші;
- стабілізуються рідше;
- частіше руйнуються під дією теплових флуктуацій.

Однак навіть вони не повністю захищені від аморфізації при нейтронах > 1–2 МеВ.

8.Деградація через каскади зміщень

- Нейтронна радіація у ЛП (>10 МВ) запускає масивні каскади зміщень.
- Енергія РКА у вольфрамі (A ≈ 184) навіть при помірних енергіях нейтронів формує потужні каскади.
- Розвиток каскаду у макро- і наноматеріалах:

У макроматеріалах каскад розвивається без бар'єрів і може охоплювати десятки нанометрів. У наноматеріалах: каскад обмежується розміром зерна, межі зерен поглинають енергію каскаду, дефекти більш рівномірно розподіляються.

Це значно зменшує масштаб деградації.

9.Термічні радіаційні ефекти

Опромінення створює локальні «теплові піки», коли енергія вивільняється в об'ємі кілька нанометрів.

У наноматеріалах:

- піки мають більший вплив через менший об'єм зерна;
- тепло швидше розсіюється завдяки міжзерновим межам;
- тривалі піки можуть спричинити рекристалізацію або спікання нанозерен.

10. Механізми довготривалої деградації

Навіть якщо окремі дефекти швидко рекомбінують, тривале опромінення призводить до: зниження теплопровідності, дефекти розсіюють фонони, підвищення крихкості через накопичення залишкових напружень.

Радіаційні механізми деградації наноматеріалів включають іонізаційні процеси, утворення точкових дефектів, дислокаційних петель, каскадів зміщень і радіаційної аморфізації. Хоча наноматеріали завдяки своїй структурі значно стійкіші, ніж макроматеріали, тривале опромінення у полі лінійного прискорювача здатне поступово змінювати їх електронні, механічні та теплові властивості. Розуміння цих механізмів дозволяє правильно обирати тип наноматеріалу, його зернистість та параметри для застосування в зоні інтенсивного випромінення ЛП.

3.2 Радіаційна поведінка вольфрамових наноматеріалів

Вольфрамові наноматеріали поєднують у собі унікальні властивості базового металу (високий атомний номер, тугоплавкість, стійкість до теплових навантажень) із перевагами наноструктури — дрібним зерном, розвиненою поверхнею та великою кількістю меж. Саме тому в умовах змішаного радіаційного поля лінійного прискорювача вони демонструють особливу, значною мірою відмінну від макроматеріалів поведінку.

• Як нановольфрам сприймає енергію випромінення

Завдяки великому атомному номеру вольфрам поглинає значну частину енергії фотонів і генерує вторинні електрони.

У наноструктурованому стані ця енергія розсіюється рівномірніше**,** а виниклі порушення швидше «згладжуються», тому:

- структура не встигає накопичити великі зони пошкоджень;
- дефекти не групуються у великі кластери;
- матеріал не деградує так швидко, як його макрозернистий аналог.

Це створює ефект «самозахисту» наноструктури.

• Межі зерен як природний бар’єр для радіації

У наноструктурованому вольфрамі межі зерен відіграють роль активних пасток для дефектів.

Це означає, що:

✓ вакансії та міжвузлові атоми швидко рекомбінують;

✓ більшість радіаційних пошкоджень “гаситься” на ранніх етапах;

✓ не відбувається розвитку довготривалих дислокаційних петель;

✓ структура самоочищається після дії радіації.

Фактично, межі зерен працюють як «внутрішня система ремонту» наноматеріалу.

• Поведінка під дією фотонного випромінення

Фотони створюють іонізаційні процеси, але для нановольфраму це не є суттєвою загрозою, тому що:

- вторинні електрони швидко розсіюються,
- заряд не встигає накопичуватися на зернах,
- локальні нагрівання миттєво поглинаються сусідніми структурами.

Тому фотонне поле ЛП лише мінімально впливає на наноструктуру вольфраму.

• Поведінка при опроміненні електронами

Швидкі електрони можуть вибивати атоми, але:

✓ енергії цих процесів недостатньо для великих каскадів;

✓ дефекти «гаснуться» межами зерен;

✓ механічна міцність практично не падає.

Нановольфрам у цьому випадку поводиться значно стабільніше, ніж звичайний вольфрам.

• Реакція наноструктурованого вольфраму на нейтрони

Нейтрони — найбільш небезпечний компонент поля ЛП.

Саме вони запускають масивні каскади зміщень у вольфрамі.

У наноструктурованому вольфрамі ці каскади:

- стають коротшими;
- не встигають розгалужуватися;
- зупиняються межами зерен;
- залишають після себе менше довгоживучих дефектів.

Навіть при великих дозах нейтронів наноструктура деградує **повільніше**, ніж макроматеріал, хоча при надвисоких потоках можливі:

⚠ зменшення теплопровідності;

⚠ часткове спікання найдрібніших зерен;

⚠ локальна аморфізація деяких ділянок.

• Стійкість ключових властивостей нановольфраму

Завдяки дрібнозернистій структурі зберігаються:

✓ **механічна міцність** — дислокації не можуть свободно рухатися;

✓ **теплова стійкість** — тепло розсіюється швидше;

✓ **електронна стабільність** — квантово-розмірні ефекти пригнічують іонізаційні переходи;

✓ **стійкість до каскадів** — межі зерен обмежують поширення радіаційних хвиль.

Сукупно це формує високу тривалу надійність матеріалу у зоні інтенсивного випромінення.

• Чому нановольфрам виграє у порівнянні з макроструктурованим вольфрамом.

Наноматеріал має низку реальних переваг у радіаційних умовах:

- менше накопичує дефектів;
- краще переносить теплові піки;
- повільніше старіє під дією радіації;
- демонструє стабільність властивостей навіть після багаторазових циклів опромінення;
- забезпечує довший ресурс роботи елементів ЛП (мішені, коліматорів, MLC).

Вольфрамові наноматеріали демонструють унікальну радіаційну поведінку: поглинають енергію випромінення без суттєвої деградації, ефективно «самовідновлюють» свою структуру завдяки межам зерен і значно краще протистоять впливу фотонів, електронів і навіть нейтронів. Саме тому нановольфрам є одним із найбільш перспективних матеріалів для використання у конструктивних елементах лінійних прискорювачів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ДОСЛІДЖЕННЯ: ВЛАСТИВОСТІ РАДІАЦІЙНОГО ЗАХИСТУ БАГАТОПЕЛЮСТКОВИХ КОЛІМАТОРНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВОЛЬФРАМОВИХ СПЛАВІВ У ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ.

Експериментальна частина має розрахунково-аналітичний характер і базується на узагальненні експериментальних даних з наукових джерел.

Дослідження властивостей радіаційного захисту вольфрамових (W) сплавів є важливим для мінімізації витоків радіації в багатолистових коліматорах (MLC). У цій роботі оцінюються властивості радіаційного захисту шести різних матеріалів вольфрамового сплаву MLC при енергіях фотонів від 0,015 до 15 МеВ за допомогою програмного забезпечення XCOM та Phy-X / PSD. Результати, частковий перехресний розділ взаємодії фотонів варіюється в залежності від енергії фотонів та елементного складу сплавів. Зразок S6 з 97 % W демонструє найвищі масові та лінійні коефіцієнти загасання. Ефективний атомний номер (Z_eff) та електронна щільність (N_eff) змінюються в залежності від енергії та складу, при цьому S6 показує найвищий Z_eff. Середній вільний шлях, половинний шар та десятий шар досягають максимуму при проміжних енергіях. Зразок S6 також демонструє найнижчий фактор накопичення експозиції та найвищу ефективність захисту від радіації %, включаючи клінічні гамма-промені Co-60 та FFF 6 MB рентгенівські промені. Це дослідження буде корисним для проектування MLC.

Розрахунки виконано у широкому діапазоні енергій фотонів від 0,015 до 15 МеВ із застосуванням програмного забезпечення XCOM та Phy-X/PSD, що базуються на експериментальних ядерно-фізичних даних.

Лінійний прискорювач (ЛПН) – це широко використовувана машина для лікування раку. Рак є однією з провідних причин смерті у світі. Прогнозується, що до 2050 року буде зареєстровано понад 35 мільйонів нових випадків раку, що на 77% більше, ніж у 2022 році, за оцінками, 20 мільйонів випадків. Наразі методи променевої терапії відіграють вирішальну роль у лікуванні різних видів раку та приблизно 50% онкологічних пацієнтів потребують променевої терапії. Радіотерапія використовує високоенергетичне іонізуюче випромінювання , таке як частинки протони, електрони, альфа-частинки тощо, або електромагнітне

випромінювання – рентгенівські та гамма-промені – для впливу на ракові клітини та їх знищення. Вона включає зовнішню променеву терапію (ЗПТ), яка доставляє випромінювання ззовні організму за допомогою електрично керованого пристрою, який називається ЛПН, або на основі радіоактивного джерела Co^{60}. З іншого боку, внутрішня променева терапія (ІВТ) або брахітерапія передбачає інвазивну та часто болісну процедуру розміщення радіоактивних джерел всередину або поблизу пухлини, що робить її менш придатною для пухлин у глибших або менш доступних ділянках. На противагу цьому, сучасний апарат для телетерапії LINAC або Co^{60} складається з багатопелюсткового коліматора (MLC) і відіграє ключову роль в екрануванні та модуляції променя, дозволяючи регулювати та формувати дозу опромінення відповідно до контурів пухлини. Такий точний контроль підвищує точність лікування, доставляючи вищі дози до пухлини, захищаючи здорові тканини.

Однак, витік радіації в багатопелюсткових коліматорах (MLC) є критичною проблемою, оскільки навіть невелика кількість ненавмисного випромінювання, що проходить через або між листками, може опромінювати здорові тканини. Цей витік знижує точність лікування, потенційно збільшуючи побічні ефекти або довгострокові ризики для пацієнтів. У кількох дослідженнях у літературі пропонуються різні конструкції MLC для мінімізації міжпелюсткового витоку, але зменшення витоку випромінювання через листки MLC залишається обмеженим. Як правило, багатопелюсткові коліматори (MLC) виготовляються з вольфрамового сплаву та складаються з кількох листків (наприклад, 120 та 160). Цей матеріал обраний завдяки його високій щільності та сильним властивостям ослаблення випромінювання, які є важливими для формування променя випромінювання при мінімізації витоку. Однак, для ефективного контролю витоку радіації через листки MLC (масивного багатопелюсткового коліматора) важливо розуміти ефективність екранування різних вольфрамових сплавів багатопелюсткового коліматора. Ці знання допомагають забезпечити оптимальний захист і мінімізувати радіаційний вплив на навколишні здорові тканини під час лікування.

Ефективність радіаційного екранування будь-якого матеріалу зазвичай оцінюється за кількома радіологічними властивостями , такими як: парціальний

переріз взаємодії фотонів (PPICS), коефіцієнт масового ослаблення (μ/ρ) (MAC), лінійний коефіцієнт ослаблення (μ) (LAC), шар половинного значення (HVL), шар десятого значення (TVL), ефективний атомний номер (Z_{eff}), електронна густина (N_{eff}), довжина вільного пробігу (MFP), коефіцієнт накопичення експозиції (EBF), ефективність радіаційного захисту (RPE%) та переріз видалення швидких нейтронів (FNRCS).

PPICS кількісно визначає ймовірність певних взаємодій фотонів з речовиною. MAC відноситься до зменшення інтенсивності фотонів на одиницю маси матеріалів. LAC вимірює швидкість, з якою фотонний промінь ослабляється під час проходження через матеріал. HVL - це товщина матеріалу, яка зменшує інтенсивність фотонного променя вдвічі, тоді як TVL зменшує її в десять разів. Z_{eff} представляє середній атомний номер складу матеріалу, що впливає на його взаємодію з випромінюванням, а N_{eff} стосується кількості електронів на одиницю маси. MFP – це середня відстань, яку фотон проходить у матеріалі до взаємодії. З іншого боку, EBF враховує розсіяне випромінювання на додаток до первинного випромінювання. Ефективність радіаційного захисту (RPE%) дає змогу оцінити найкращі захисні матеріали. Нарешті, FNRCS – це міра ймовірності того, що швидкий нейтрон буде видалений з пучка внаслідок таких взаємодій, як розсіювання або поглинання в матеріалі. Література багата на дослідження ефективності екранування різних вольфрамових сплавів, які визнані чудовими матеріалами для радіаційного екранування. Однак ефективність екранування випромінювання вольфрамовими сплавами, що використовуються спеціально в багатопелюсткових коліматорах (MLC), ще не була ретельно оцінена. Тому метою цієї роботи було оцінити ефективність екранування випромінювання шести різних вольфрамових сплавів MLC у діапазоні енергії фотонів від 0,015 МеВ до 15 МеВ. Ця загальна мета була досягнута завдяки таким конкретним завданням:

1. Визначити, як змінюються властивості радіаційного екранування залежно від елементного складу вольфрамових сплавів та енергії фотонів?
2. Визначити найефективніший вольфрамовий сплав для екранування MLC?
3. Оцінити переваги використання наноструктурних вольфрамових сплавів для оптимізації радіаційного захисту в багатопелюсткових коліматорах (MLC).

Загальний результат цього дослідження буде корисним для оптимізації

радіаційного екранування в багатопелюсткових коліматорах, підвищення безпеки пацієнтів та точності лікування шляхом визначення найефективнішого вольфрамового сплаву.

4.1 Матеріали та методи

Елементарна маса за масовою часткою та густини шести різних багатопелюсткових коліматорних сплавів отримані з опублікованої літератури. Це S1 (W:0,905, Ni:0,065, Fe:0,03; ρ = 17 г/см ^{3}), S2 (W:0,905, Ni:0,07, Cu:0,025; ρ = 17 г/см ^{3}), S3 (W:0,93, Ni:0,05, Fe:0,02; ρ = 17,5 г/см 3). ^{3}), S4 (W:0,93, Ni:0,042, Fe:0,016; ρ = 17,5 г/см ^{3}), S5 (W:0,95, Ni:0,034, Fe:0,016; ρ = 18 г/см ^{3}), S6 (W:0,97, Ni:0,016, Fe:0,008, Cu:0,006; ρ = 18,5 г/см³). *Усі шість досліджених зразків зазвичай містять вольфрам як основний елемент завдяки його унікальним властивостям, як обговорювалося у вступі. Однак масова частка за вагою варіюється. Хоча як S2, так і S6 мають вольфрам як домінуючий компонент, S6 має вищий вміст вольфраму (W = 0,97) та вищу щільність (18,5 г/см³) порівняно з S2 (17 г/см³), зі значно меншою кількістю нікелю та заліза, ніж S2* . Основні парціальні перерізи радіаційної взаємодії розраховуються за допомогою бази даних перерізів взаємодії фотонів XCOM . А інші радіологічні параметри, такі як коефіцієнт ослаблення маси, коефіцієнт лінійного ослаблення, шар половинного значення, шар десятого значення, середня довжина вільного пробігу та коефіцієнт нарощування експозиції, розраховувалися за допомогою програмного забезпечення Phy-X PSD.

4.2 Парціальний поперечний переріз взаємодії фотонів

Парціальний поперечний переріз взаємодії фотонів кількісно визначає ймовірність певної взаємодії, такої як фотоелектричний ефект , комптонівське розсіювання або народження пари, що відбувається між фотоном і матеріалом. Він виражається як площа та змінюється залежно від енергії фотона та складу матеріалу, де:

- $\sigma_{\text{Фотоелектричне поглинання}}$ − парціальний поперечний переріз для PEA
- $\sigma_{\text{комптонівське розсіювання}}$ − парціальний поперечний переріз для CS
- $\sigma_{\text{утворення пар}}$ − це парціальний поперечний переріз для ПП

4.3 Коефіцієнт масового ослаблення

Коефіцієнт масового ослаблення (μ/ρ) – це фундаментальна величина, яка

використовується для опису того, як фотони (рентгенівські або гамма-промені) взаємодіють з речовиною. Він характеризує ймовірність взаємодії фотонів на одиницю маси матеріалу, головним чином враховуючи різні процеси взаємодії, включаючи фотоелектричний ефект , комптонівське розсіювання, процес утворення пар. Одиницею вимірювання коефіцієнта масового ослаблення є $см^2/г$. Коефіцієнт масового ослаблення пов'язаний з лінійним коефіцієнтом ослаблення μ наступним співвідношенням:

μ/ρ = масовий коефіцієнт ослаблення де:

μ – коефіцієнт лінійного ослаблення, частка фотонів, ослаблених на одиницю товщини матеріалу, в одиницях $см^{-1}$, ρ– – густина матеріалу (г/см3).

4.4 Невизначеності

Невизначеності, пов'язані з цим дослідженням, пов'язані з програмним забезпеченням, яке використовувалося для збору даних, і до них належать: програмне забезпечення XCOM та Phy-X PSD. База даних XCOM надає поперечні перерізи для ізольованих нейтральних атомів, без урахування молекулярних або твердотільних ефектів, які можуть змінювати поперечні перерізи поблизу країв поглинання . Такі процеси, як розсіювання Дельбрюка, двофотонне комптонівське розсіювання, утворення фотомезонів та ядерні фотоефекти в діапазоні 5–30 МеВ, опущені, разом з коефіцієнтами поглинання енергії, які описують перетворення енергії фотонів у кінетичну енергію вторинних фотоелектричних, комптонівських та парних електронів. Онлайн-програмне забезпечення Phy-X/PSD працює на віддаленому сервері з процесором Intel® Core™ i7-2600 з частотою 3,40 ГГц, 1 ГБ оперативної пам'яті та Ubuntu 14.04.3 LTS. Воно працює з використанням NodeJS версії 8.4.0, що обслуговується Nginx 1.15.8, з 256-бітним шифруванням Positive SSL для безпеки. Дані, отримані за допомогою Phy-X PSD, добре узгоджуються з опублікованою літературою.

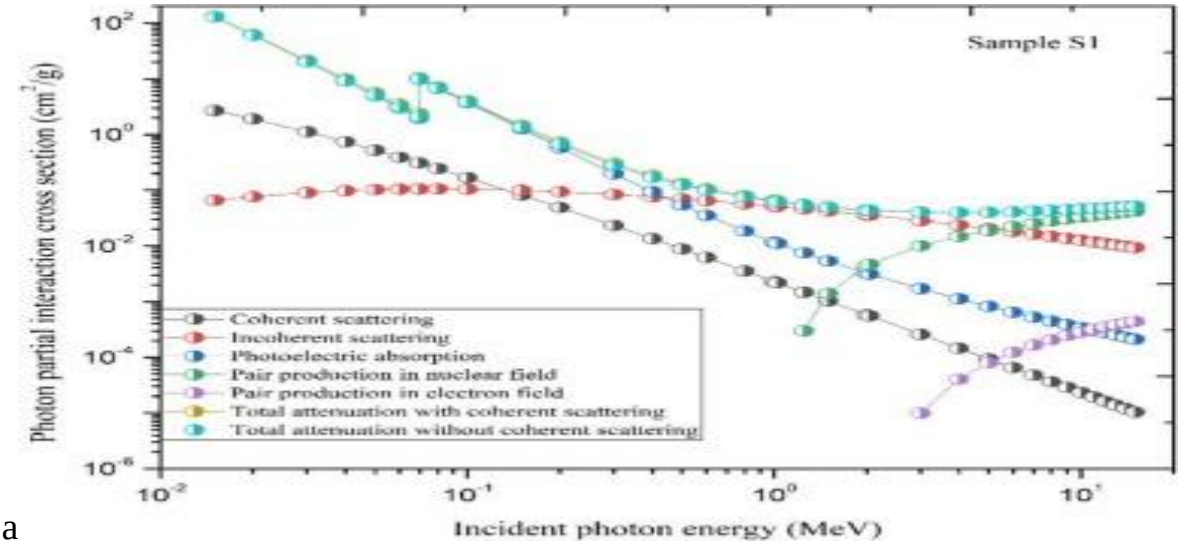
4.5 Результати та обговорення

4.5.1. Парціальні перерізи взаємодії фотонів

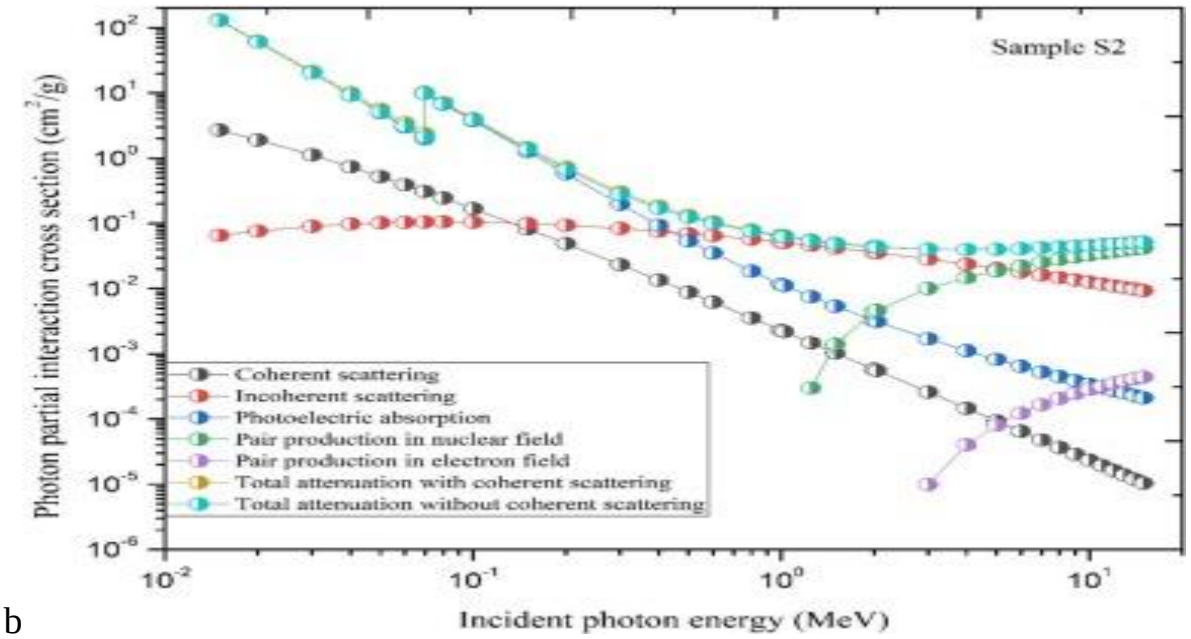
Парціальні перерізи взаємодії фотонів (PPICS) для шести різних зразків вольфрамових сплавів (S1, S2, S3, S4, S5 та S6) проілюстровано на 6 (a-f), показуючи, як поведінка взаємодії змінюється залежно від рівнів енергії фотонів від 0,015 до 15 МеВ, а також відмінності в елементарному складі сплавів. Серед

цих зразків S6 має найвище загальне значення PPICS (136,8 см² / г), тоді як S1 має найнижче (132 см² / г) у всьому діапазоні енергій рис. 1 (a та f). Ця варіація пояснюється вищим вмістом вольфраму у зразку S6 (97% за вагою) порівняно з S1 (90,5% за вагою). Перерізи взаємодії фотонів змінюються з енергією, при цьому фотоелектричне поглинання (ФПВ) домінує в діапазоні 0,015–0,4 МеВ, комптонівське розсіювання (КР) – в діапазоні 0,5–5 МеВ, а утворення пар (УП) – від 6 до 15 МеВ, що вносить свій внесок у загальний переріз ослаблення.

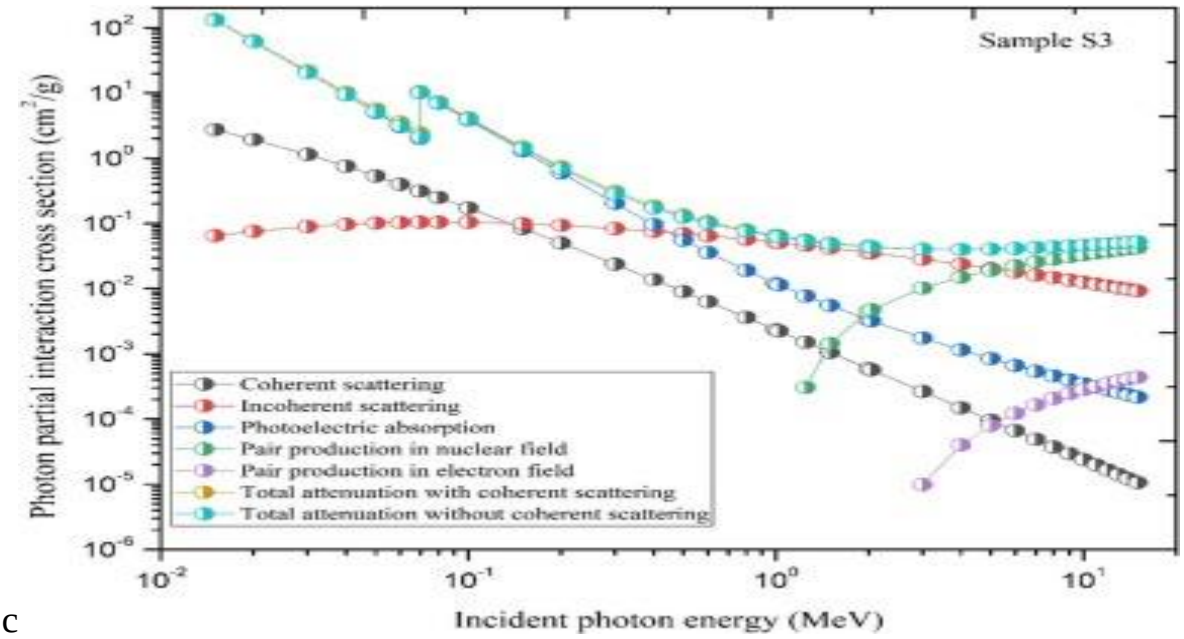
Зразок S6 має найвищі загальні значення ППІКС, з максимальним внеском від ФПВ при 0,015 МеВ (133,9 см² / г), КР при 0,5 МеВ (0,06904 см² / г) та УПВ при 15 МеВ (0,0433 см² / г) (рис. f). На противагу цьому, S1 має найнижчі значення PPICS, з максимальним PEA при 0,015 МеВ (129,2 см² / г), CS при 0,5 МеВ (0,0699 см² / г) та PP при 15 МеВ (0,04182 см² / г) (рис. 1). Зразки S2, S3, S4 та S5 мають значення PPICS між значеннями S1 та S6, як показано на рис. 1 (b–e). Також спостерігається, що внесок CS у загальний PPICS суттєво не відрізняється між зразками S6 та S1, ймовірно, через слабку залежність процесу CS від атомного номера (Z)/ Крім того, для всіх зразків спостерігається різкий пік поглинання при 69,5 КеВ, що відповідає K-краю вольфраму, характерному для процесу PEA. При енергіях фотонів нижче 0,4 МеВ загальні значення PPICS вищі, тоді як у проміжному діапазоні енергій 0,5–5 МеВ значення залишаються відносно постійними. Понад 6 МеВ спостерігається незначне збільшення перерізів взаємодії, як показано на рис. 1 (a-f). Ці зміни зумовлені домінуванням процесів PEA, CS та PP. Процес PEA залежить від (Z^3 / E^3) , де Z – атомний номер, а E – енергія фотона. На CS впливає густина електронів, а PP пропорційний Z^2. Оскільки вольфрам є основним елементом у всіх досліджуваних сплавах (з вмістом вольфраму >90,5% та Z = 74), картини PPICS подібні для всіх зразків. Зрештою, загальне значення PPICS для зразка S6 при 0,015 МеВ становить 136,8 см² / г, що на 18,421% вище, ніж для чистого свинцю (111,6 см² / г) і лише на 1,511% нижче, ніж для чистого вольфраму (138,9 см² / г) при тому ж енергетичному рівні. Отже, зразок S6 пропонує вищу ймовірність взаємодії з вхідними фотонами , що робить його найефективнішим серед досліджуваних вольфрамових сплавів з точки зору ослаблення фотонів.


Sample S1
Photon partial interaction cross section (cm²/g)
Incident photon energy (MeV)
Coherent scattering
Incoherent scattering
Photoelectric absorption
Pair production in nuclear field
Pair production in electron field
Total attenuation with coherent scattering
Total attenuation without coherent scattering

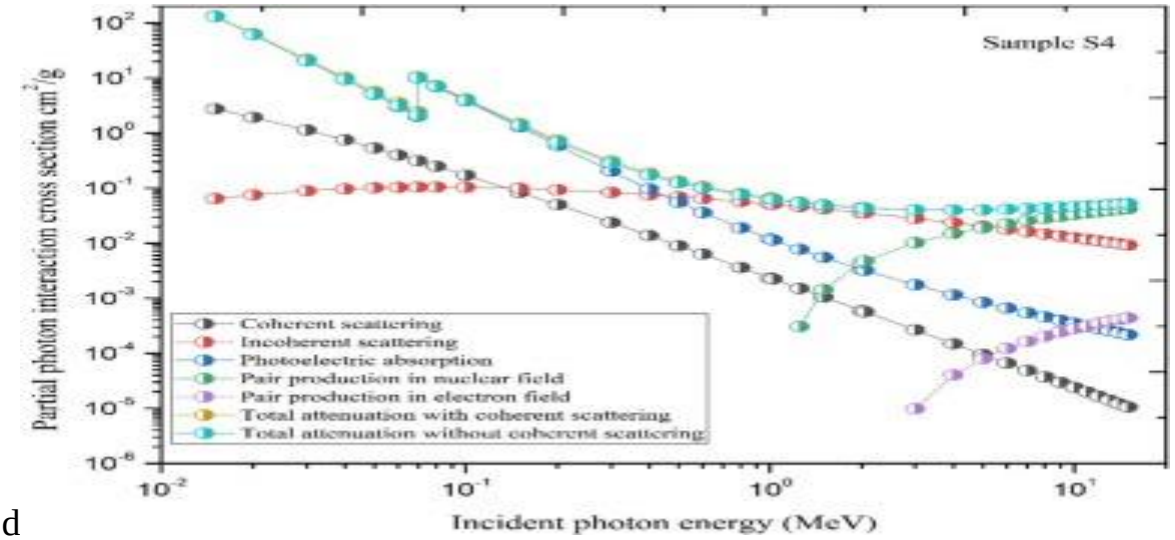
a


Sample S2
Photon partial interaction cross section (cm²/g)
Incident photon energy (MeV)
Coherent scattering
Incoherent scattering
Photoelectric absorption
Pair production in nuclear field
Pair production in electron field
Total attenuation with coherent scattering
Total attenuation without coherent scattering

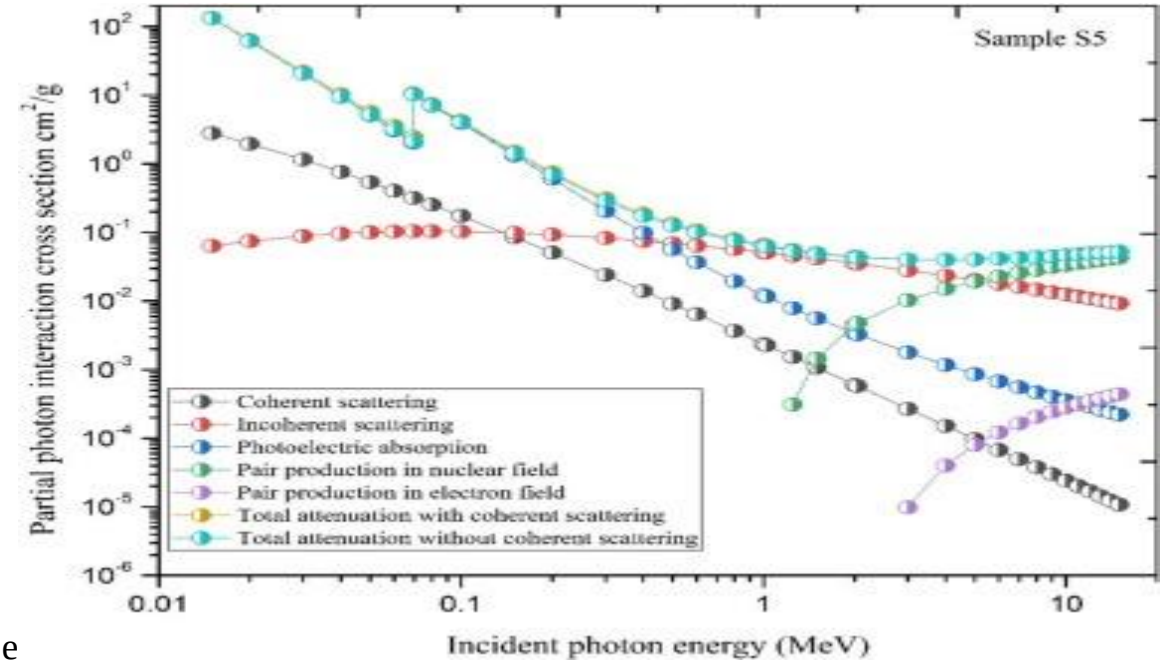
b


Sample S3
Photon partial interaction cross section (cm²/g)
Incident photon energy (MeV)
Coherent scattering
Incoherent scattering
Photoelectric absorption
Pair production in nuclear field
Pair production in electron field
Total attenuation with coherent scattering
Total attenuation without coherent scattering

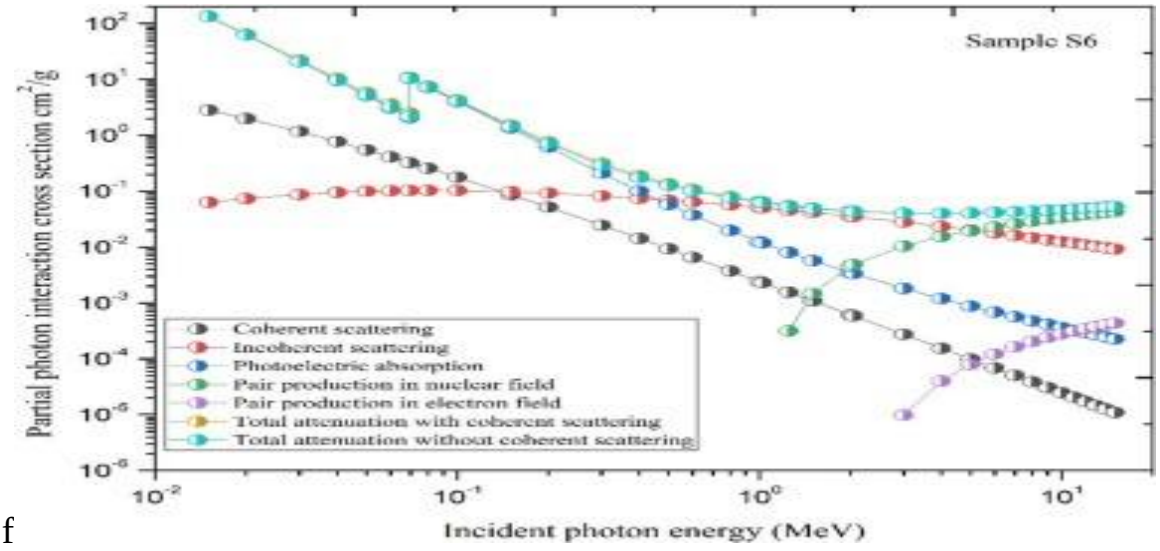
c



d



e



f

Рис. 6. (a-f). Парціальні поперечні перерізи взаємодії фотонів вольфрамових сплавів .

4.5.2. Коефіцієнти масового ослаблення (MAC) та лінійні коефіцієнти ослаблення (LAC)

Значення MAC та LAC для вольфрамових сплавів (S1-S6) показано на рис. 2 та 3 , що ілюструють їх зміну залежно від енергії фотонів (0,015–15 МеВ) та складу сплаву . Як MAC, так і LAC є найвищими при нижчих енергіях фотонів (<0,4 МеВ), досягають свого мінімуму при 4 МеВ, а потім знову зростають, коли енергія фотонів перевищує 6 МеВ. Пік спостерігається при 80 кеВ, що пояснюється K-краєм вольфраму при 69,5 кеВ. Ці тенденції, ймовірно, зумовлені різними поперечними перерізами взаємодії фотонів, як обговорювалося раніше. Подібно до попередніх висновків, зразок S6, багатий на вольфрам (97% за вагою), демонструє найвищі значення MAC та LAC, тоді як зразок S1 (90,5% вольфраму) показує нижчі значення. Наприклад, S6 має максимальну LAC 2529,906 $см^{-1}$ при 0,015 МеВ та мінімальну 0,7433 $см^{-1}$ при 4 МеВ (Рис.7). Аналогічно, LAC S1 досягає піку при 2244,093 $см^{-1}$ при 0,015 МеВ та падає до 0,67612 $см^{-1}$ при 4 МеВ (рис. 8). Коефіцієнти вищі при нижчих енергіях фотонів (<4 МеВ), залишаються відносно постійними між 0,5–5 МеВ та демонструють незначне збільшення при вищих енергіях фотонів (>6 МеВ), що відображає різну ймовірність фотоелектричного поглинання, комптонівського розсіювання та утворення пар. Примітно, що максимальне значення LAC для S6 при 0,015 МеВ близьке до значення чистого вольфраму (2680,466 $см^{-1}$) , зі зниженням лише на 5,616 %. Таким чином, зразок S6 демонструє найвищі значення MAC та LAC, особливо при нижчих енергіях фотонів.

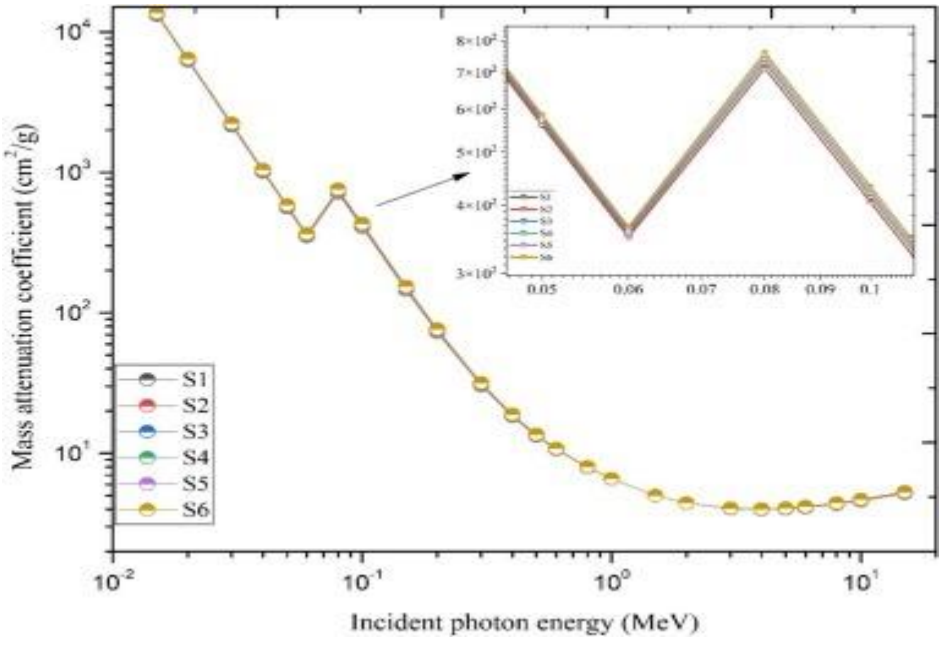


Рис. 7. Коефіцієнти ослаблення за масою вольфрамових сплавів.

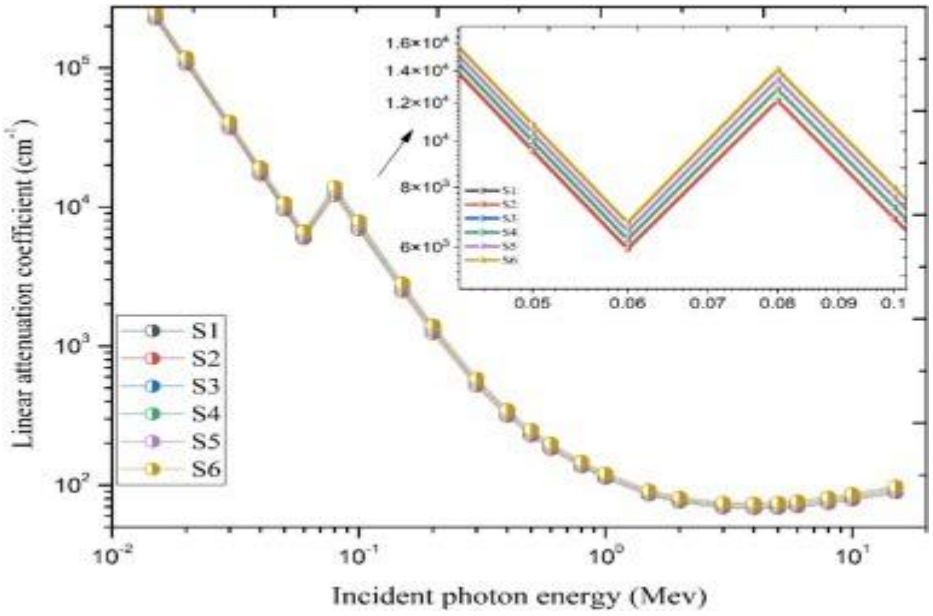


Рис. 8. Лінійні коефіцієнти ослаблення вольфрамових сплавів.

4.5.3. Ефективний атомний номер (Z_{eff}) та електронна густина (N_{eff})

На рис. 9 та 10 показано зміни Z_{eff} та N_{eff} для різних вольфрамових сплавів (S1-S6) у діапазоні енергій 0,015–15 МеВ, що демонструє значну залежність від енергії та складу сплаву. Зі збільшенням енергії як Z_{eff} так і N_{eff} поступово зростають, досягаючи піку при 80 МеВ, потім зменшуються до мінімуму при 1,5 МеВ, після чого спостерігається незначне збільшення при вищих енергіях. Найбільш помітні зміни відбуваються при нижчих енергіях (<0,4 МеВ), з мінімальними змінами між 0,5–5 МеВ та незначним збільшенням понад 1,5 МеВ. Ці тенденції відповідають домінуючим процесам взаємодії фотонів: фотоелектричному ефекту при низьких енергіях, комптонівському розсіюванню у проміжному діапазоні та утворенню пар при високих енергіях. Різкі зміни при 80 МеВ пояснюються ефектом K-краю вольфраму W. При 80 МеВ зразок S6 демонструє найвище значення Z_{eff} (73,659) та найнижче значення N_{eff} (2,567 × 10^{2-} ^{3e}/г), тоді як зразок S2 має найнижче значення Z_{eff} (72,840), а зразок S1 має найвище значення N_{eff} (2,881 ×$^{10^{2-}}$ ^{3}е/г). Різниця в значеннях N_{eff} зумовлена варіаціями елементного складу, оскільки N_{eff} обернено пропорційний середній атомній масі. Для порівняння, зразок S6 має значення Z_{eff} на 0,460% нижче, ніж у чистого W, тоді як його N_{eff} на 6,074% вище, ніж у чистого W. Зразок S6 демонструє дещо нижче значення Z_{eff} та значно вище значення N_{eff}, ніж у чистого вольфраму, що вказує на підвищену електронну густину при збереженні порівнянних атомних взаємодій.

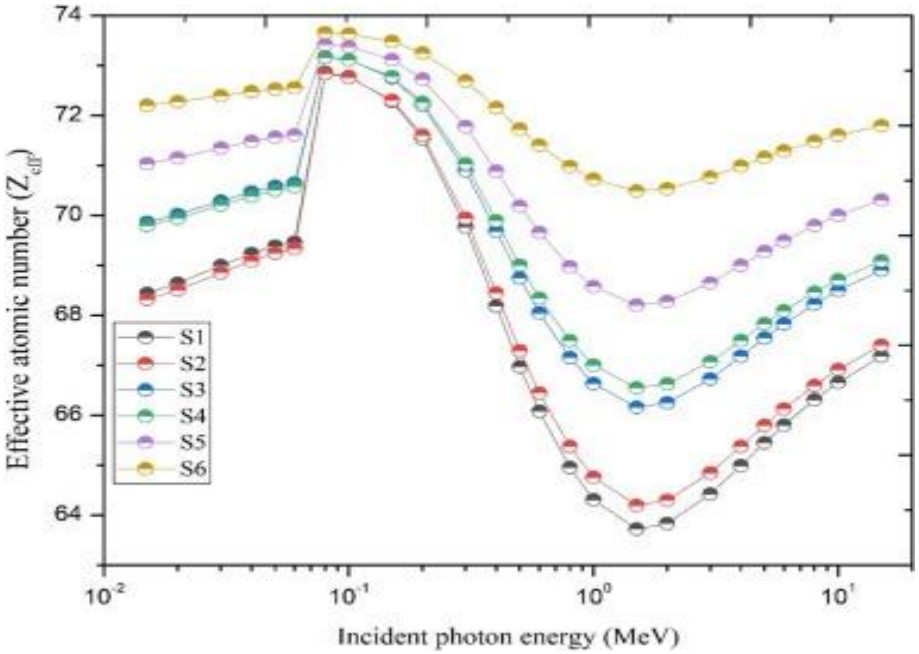


Рис. 9. Ефективні атомні номери вольфрамових сплавів.

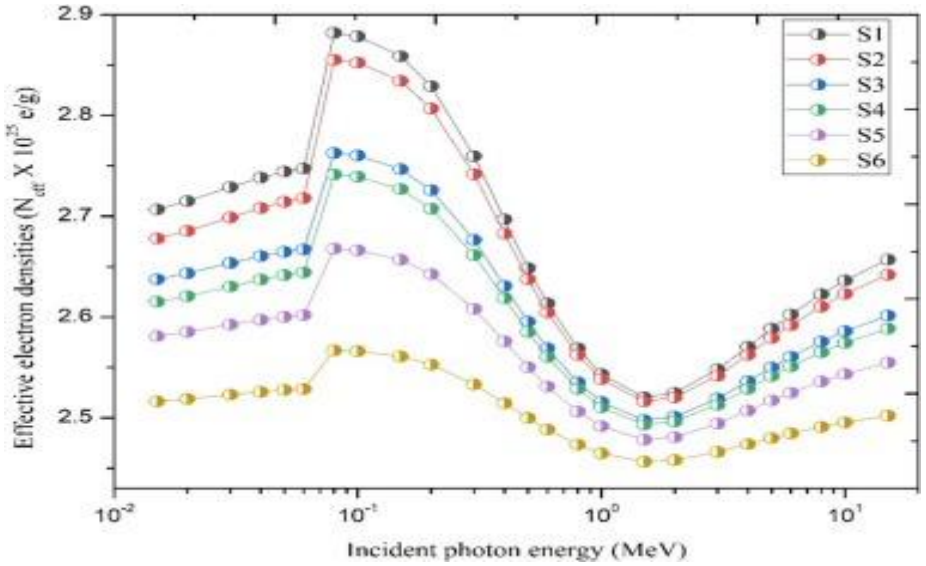


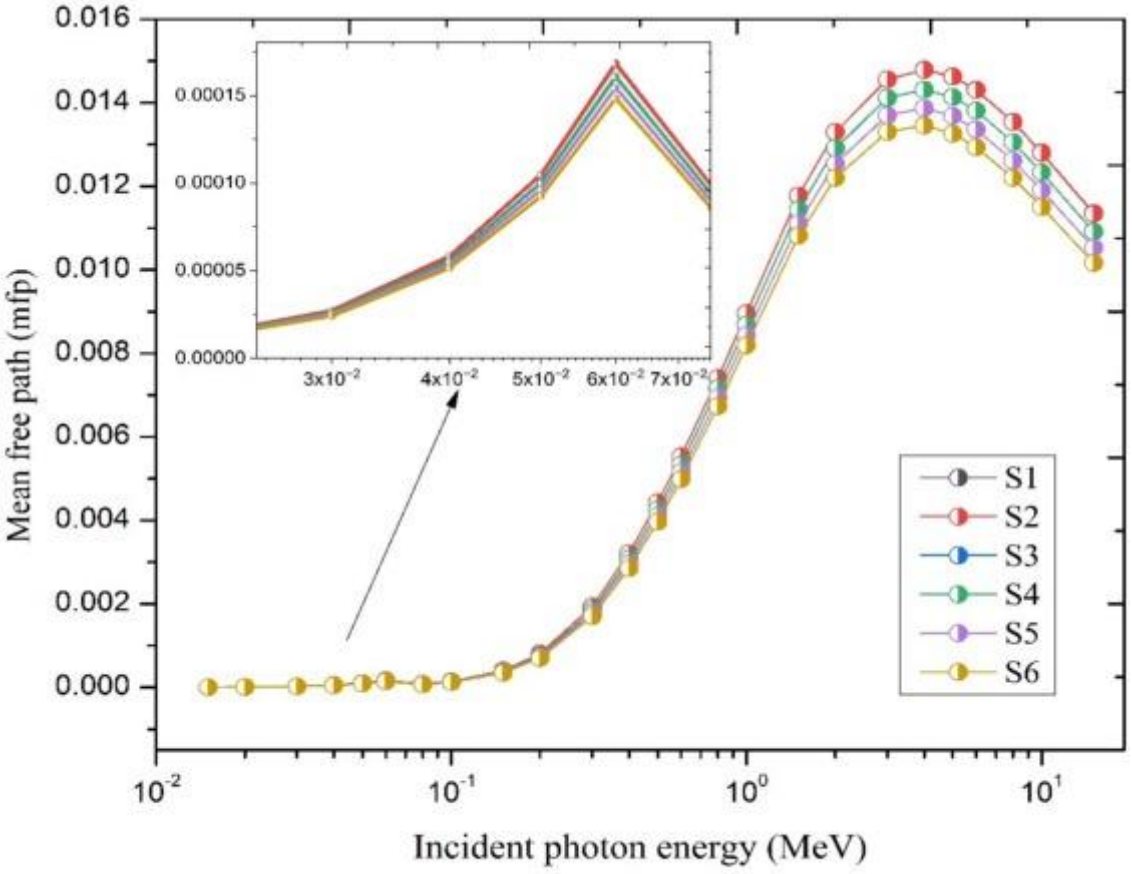
Рис. 10. Густина електронів у вольфрамових сплавах.

4.5.4. Довжина вільного пробігу (MFP), шар половинного значення (HVL) та шар десятого значення (TVL)

На рис. 11 та 12 (a, b) показано, як параметри MFP, HVL та TVL змінюються залежно від енергії та елементного складу вольфрамових сплавів (S1-S6). При нижчих енергіях (<0,1 МеВ) між сплавами існують мінімальні відмінності, але зі збільшенням енергії ці параметри зростають, досягаючи піку при 4 МеВ, де домінує CS. Після цієї точки параметри знижуються через початок PP. На проміжному енергетичному рівні збільшення CS призводить до більшого розсіяного випромінювання, що призводить до вищих значень HVL, TVL та MFP. При 4 МеВ зразок S6 демонструє максимальні HVL (0,933 см), TVL (3,098 см) та MFP (1,345 см). Для порівняння, значення високої пружності (HVL) для інших

сплавів такі: S1: 1,025 $см^{-1}$, S2: 1,0249 $см^{-1}$, S3: 0,991 $см^{-1}$, S4: 0,970 $см^{-1}$ та S5: 0,961 $см^{-1}$, що відповідає значенням потужності фотонів (MFP) для S1: 1,479 $см^{-1}$, S2: 1,478 $см^{-1}$, S3: 1,430 $см^{-1}$, S4: 1,399 $см^{-1}$ та S5: 1,3868 $см^{-1}$ при 4 МеВ.

Таким чином, ми робимо висновок, що фотони частіше взаємодіють зі сплавами, що містять вищий ваговий відсоток вольфраму. Порівняно з чистим W, значення HVL, TVL та MFP зразка S6 на 31,799 %, 56,132 % та 56,208 % нижчі при 4 МеВ відповідно, що вказує на те, що нижчі значення відповідають більшому ослабленню фотонів.



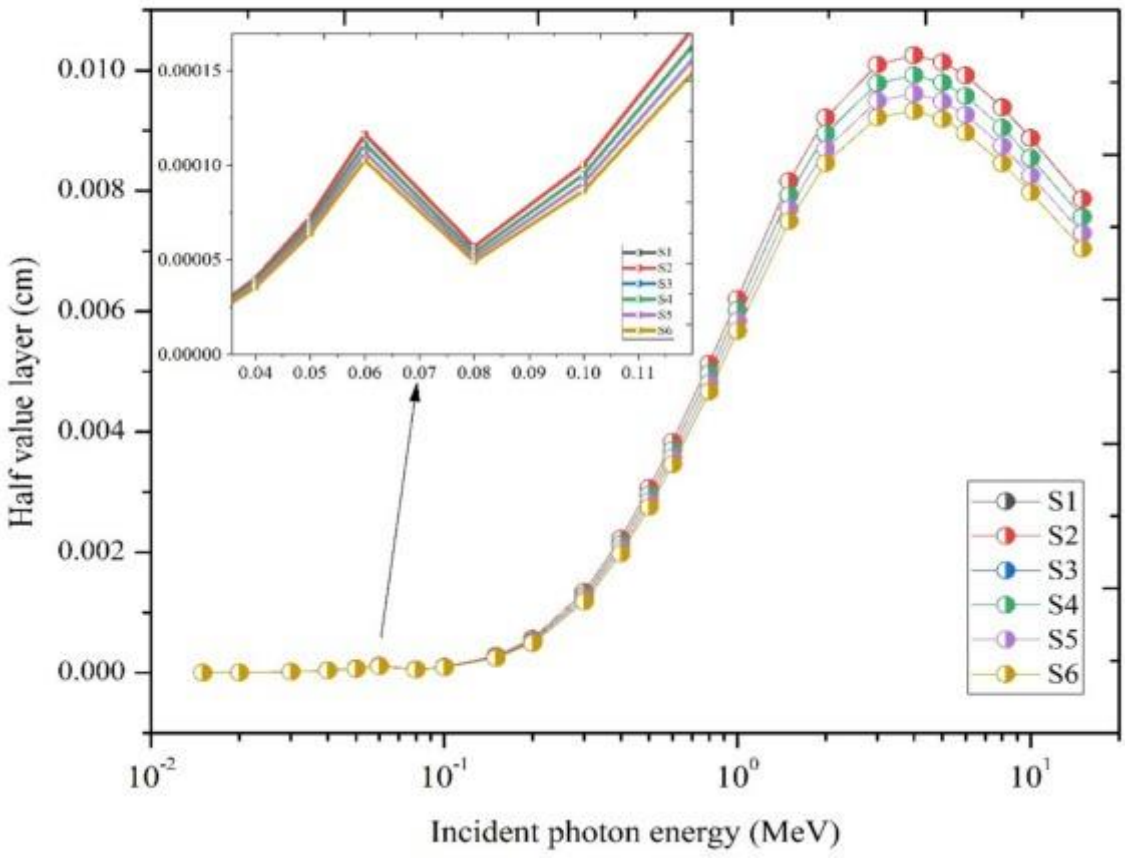


Рис. 11. Середня довжина вільного пробігу вольфрамових сплавів.

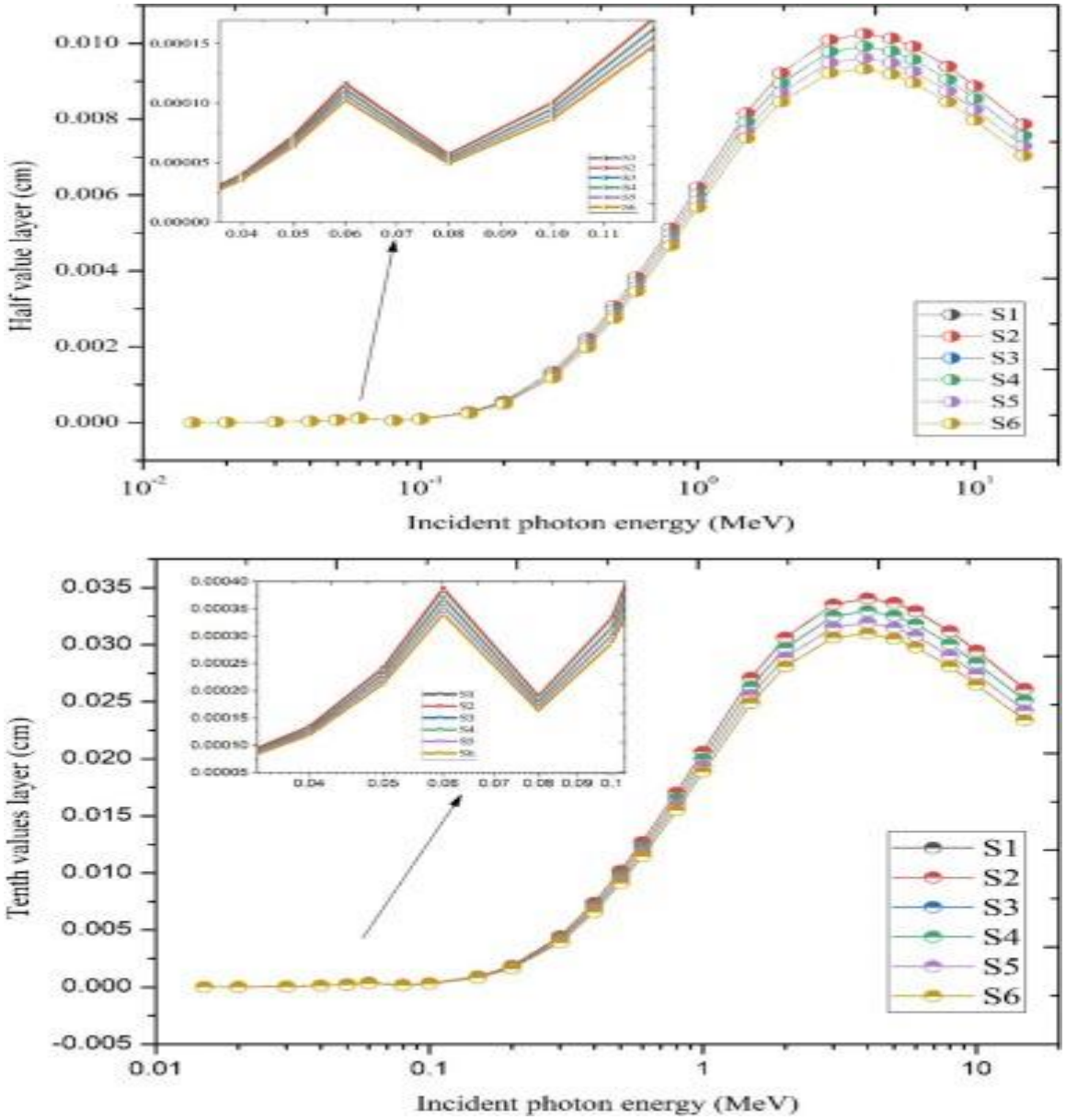
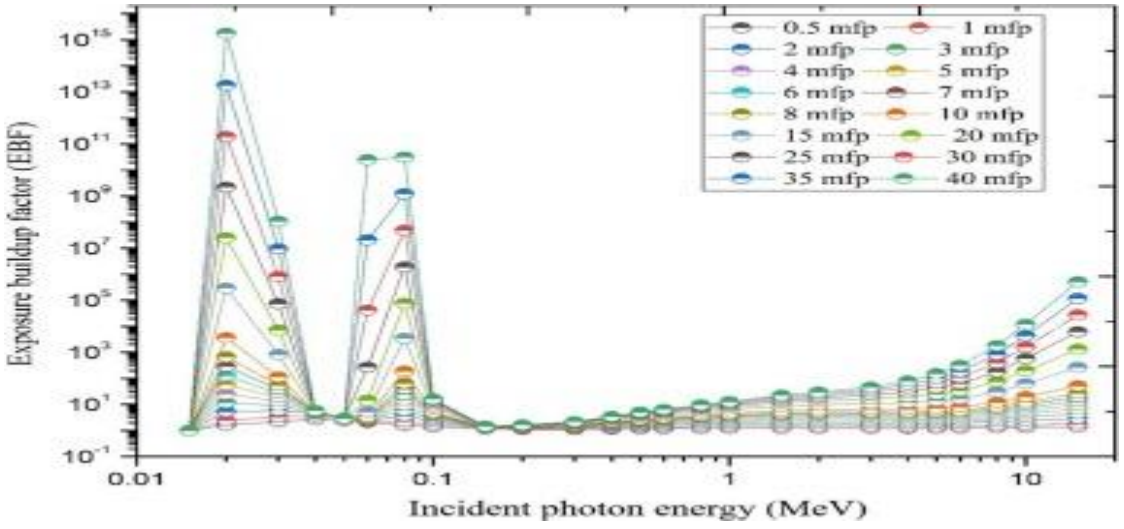
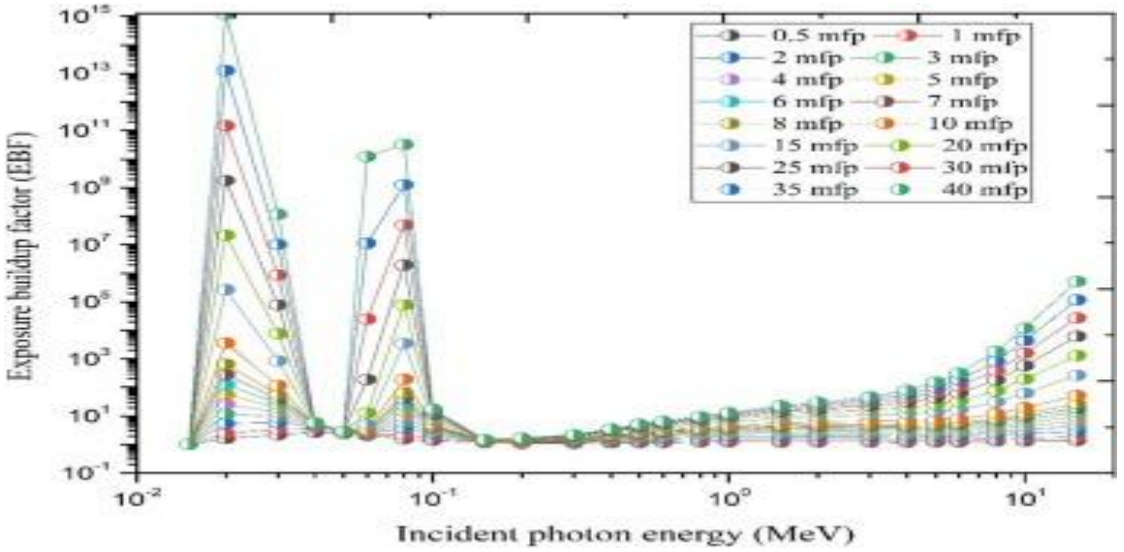


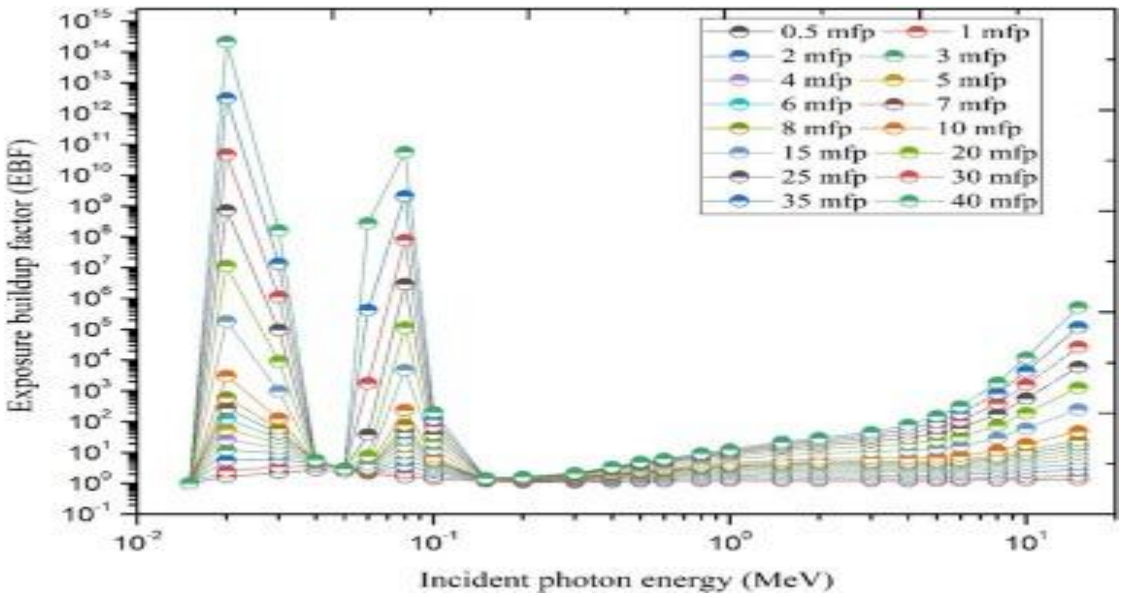
Рис. 12. (a, b)**.** Шар половинного та десятого значень вольфрамових сплавів.

4.5.5. Фактори накопичення експозиції (EBF)

На рис. 13 (a–f) показано зміну коефіцієнтів нарощування експозиції (EBF) як функції енергії фотонів (0,015–15 МеВ) та глибини проникнення (до 40 mfp). Спочатку значення EBF низькі, але зі збільшенням енергії з'являються два гострі піки при 30 МеВ та 80 МеВ, після чого відбувається різке зниження, досягаючи майже мінімуму при 0,15 МеВ. Після цього EBF знову починає зростати. Ці піки зумовлені краями L та K вольфрамового елемента. При вищих енергіях спостерігається тенденція до зростання EBF завдяки процесу утворення пар (PP). Ці закономірності узгоджуються для всіх зразків (S1–S6) і пояснюються внеском процесів взаємодії фотонів, включаючи PEA, CS та PP. Максимальні значення EBF спостерігалися для всіх зразків при 40 mfp. Зі збільшенням глибини проникнення EBF також зростає через багаторазове розсіювання фотонів.


0.5 mfp
1 mfp
2 mfp
3 mfp
4 mfp
5 mfp
6 mfp
7 mfp
8 mfp
10 mfp
15 mfp
20 mfp
25 mfp
30 mfp
35 mfp
40 mfp
Exposure buildup factor (EBF)
Incident photon energy (MeV)


0.5 mfp
1 mfp
2 mfp
3 mfp
4 mfp
5 mfp
6 mfp
7 mfp
8 mfp
10 mfp
15 mfp
20 mfp
25 mfp
30 mfp
35 mfp
40 mfp
Exposure buildup factor (EBF)
Incident photon energy (MeV)


0.5 mfp
1 mfp
2 mfp
3 mfp
4 mfp
5 mfp
6 mfp
7 mfp
8 mfp
10 mfp
15 mfp
20 mfp
25 mfp
30 mfp
35 mfp
40 mfp
Exposure buildup factor (EBF)
Incident photon energy (MeV)

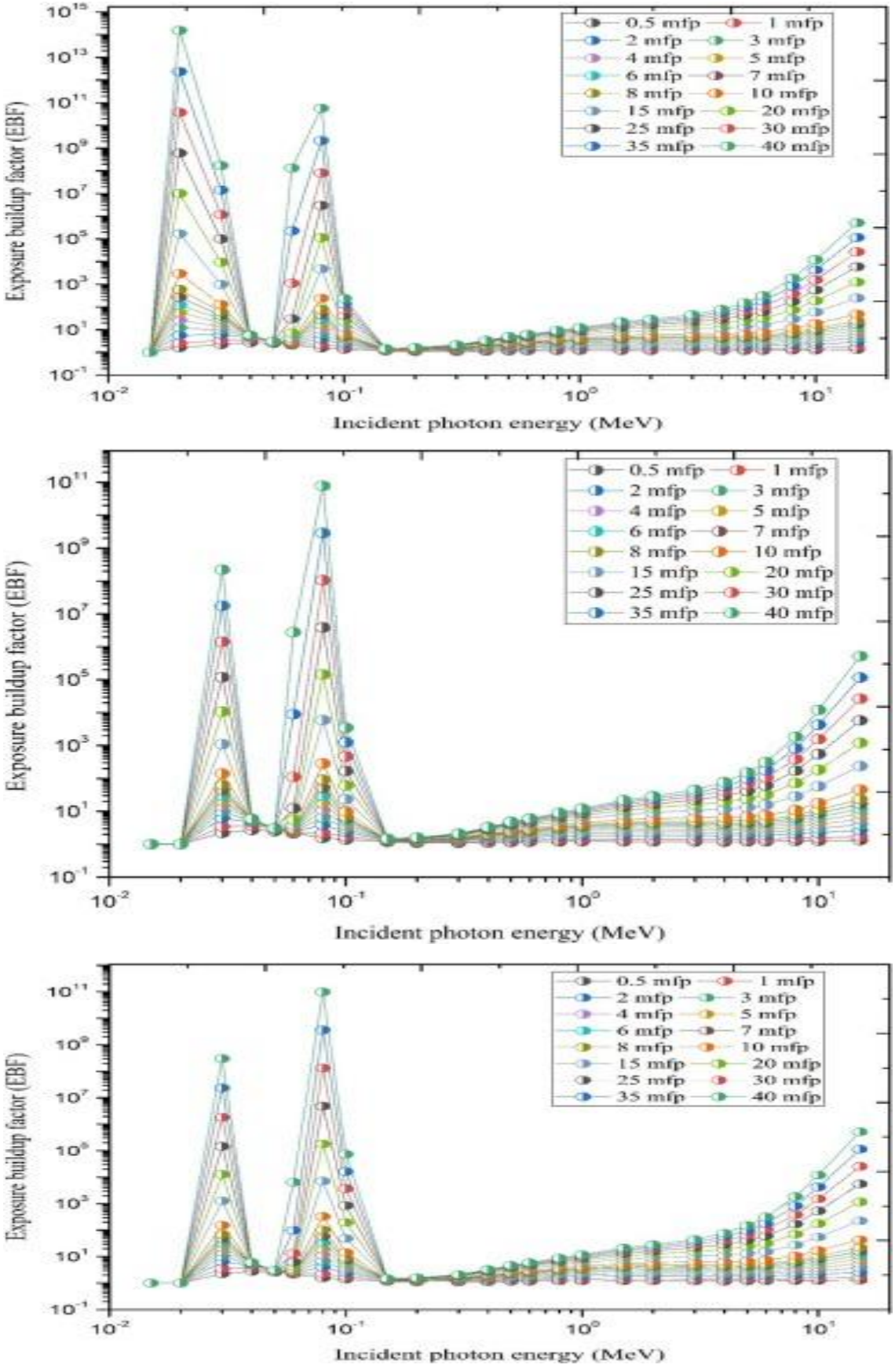
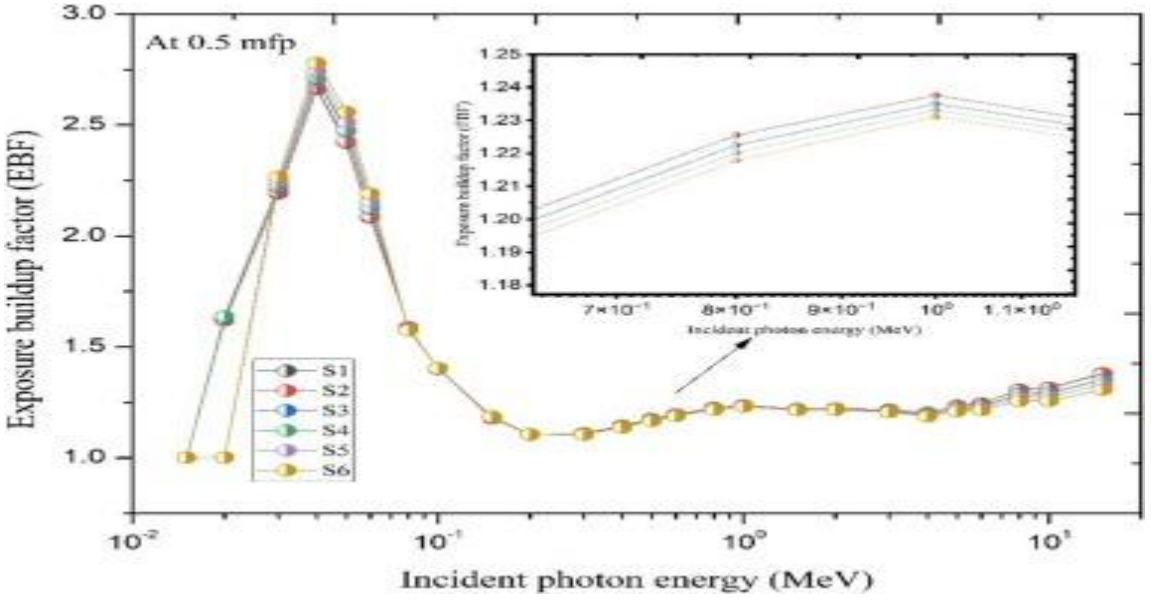
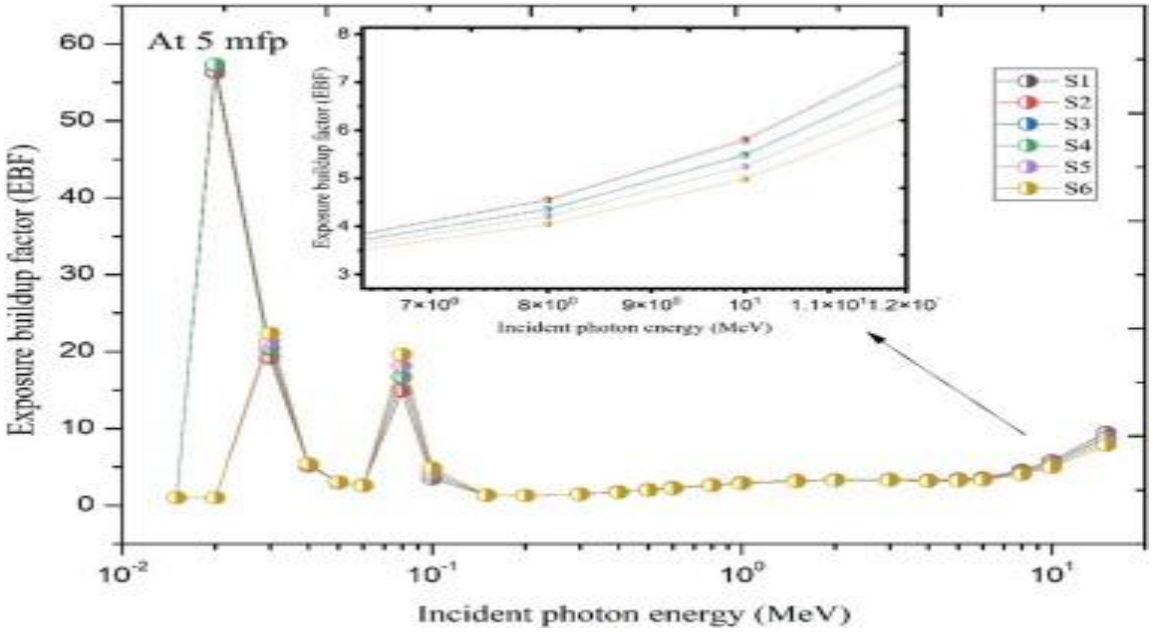


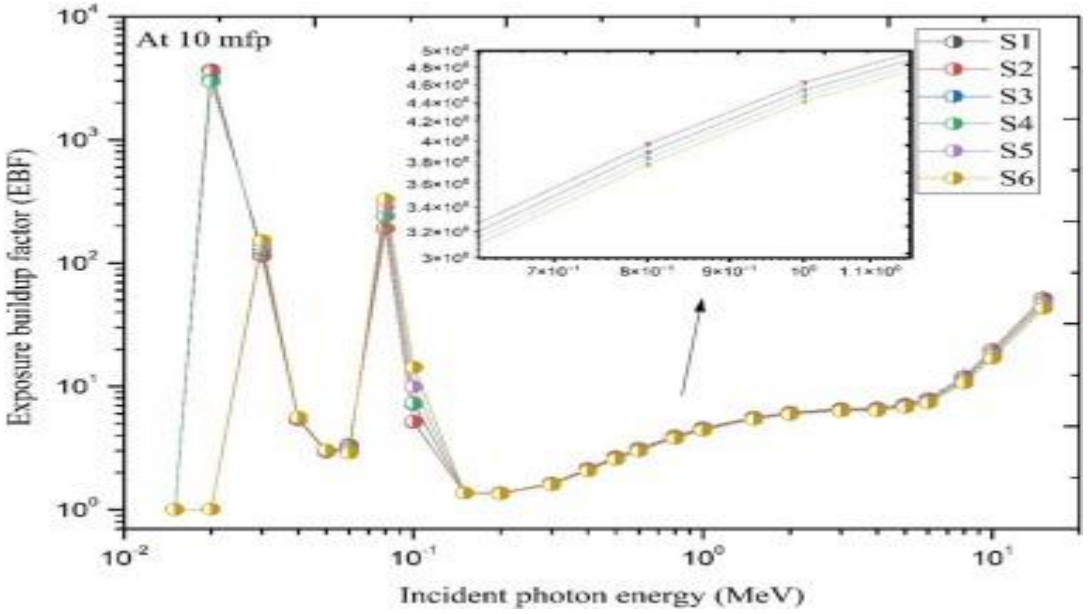
Рис. 13 **(** a-f)**.** Коефіцієнти нарощування експозиції як функція глибини проникнення до 40 mfp.

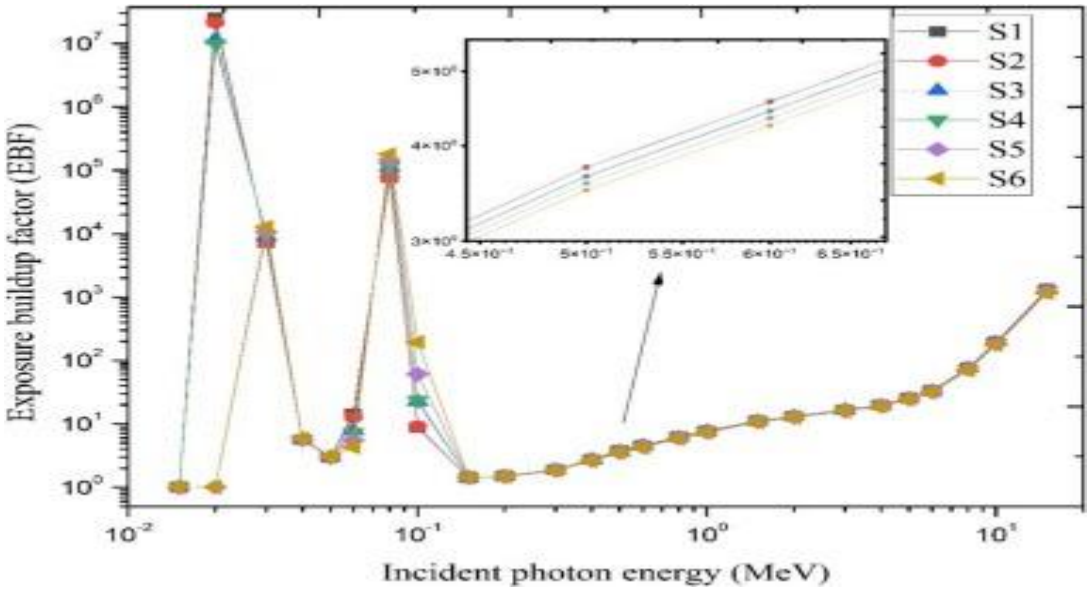
14 (a–f) показано вплив хімічного складу на EBF. Зразок S6 показав найнижчі значення EBF, тоді як зразок S1 показав найвищі. Це вказує на те, що зразок S6 поглинув більше фотонів порівняно з іншими дослідженими зразками, головним

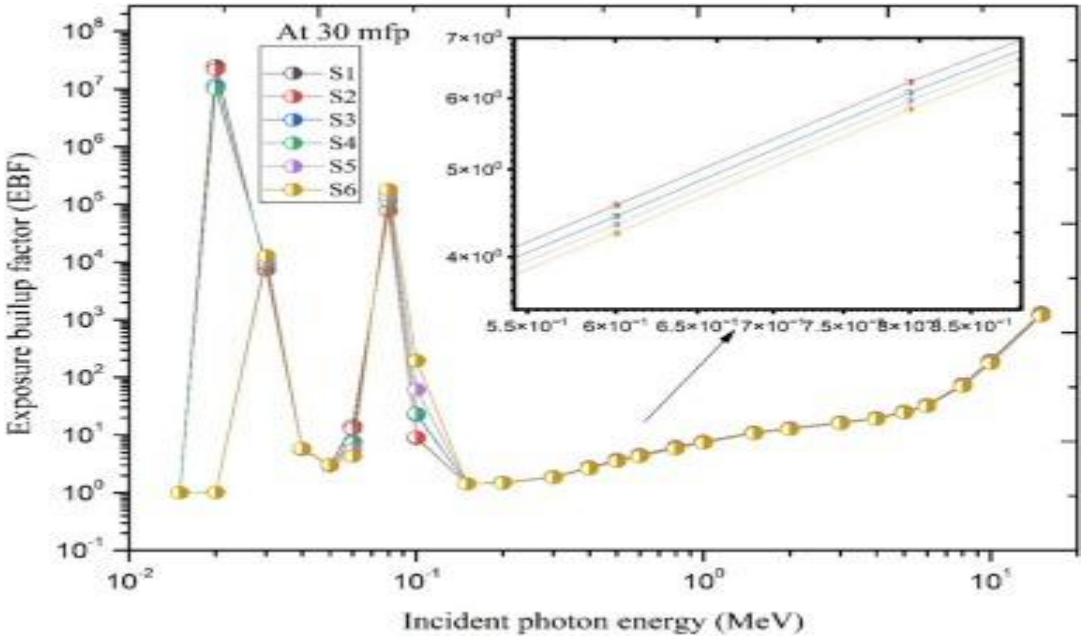
чином через вищий вміст вольфраму. Крім того, зразок вольфрамового сплаву S6 мав найвищий еквівалентний атомний номер (Z_{eff}), що пов'язано з нижчими значеннями EBF. Це відбувається тому, що елементи з вищим атомним номером ефективніше взаємодіють з первинним випромінюванням , що призводить до більшого поглинання фотонів внаслідок фотоефекту (PEA) та утворення пар (PP**).** Навпаки, сплави з більшою часткою елементів з низьким атомним номером демонструють вищі значення EBF, оскільки ці елементи розсіюють більше фотонів і сприяють процесу накопичення фотонів. Нарешті, серед досліджених зразків S6 показав мінімальні значення EBF при найнижчих енергіях фотонів і при меншій глибині проникнення 0,5 mfp.






At 10 mfp
S1
S2
S3
S4
S5
S6
Exposure buildup factor (EBF)
Incident photon energy (MeV)


S1
S2
S3
S4
S5
S6
Exposure buildup factor (EBF)
Incident photon energy (MeV)


At 30 mfp
S1
S2
S3
S4
S5
S6
Exposure builup factor (EBF)
Incident photon energy (MeV)

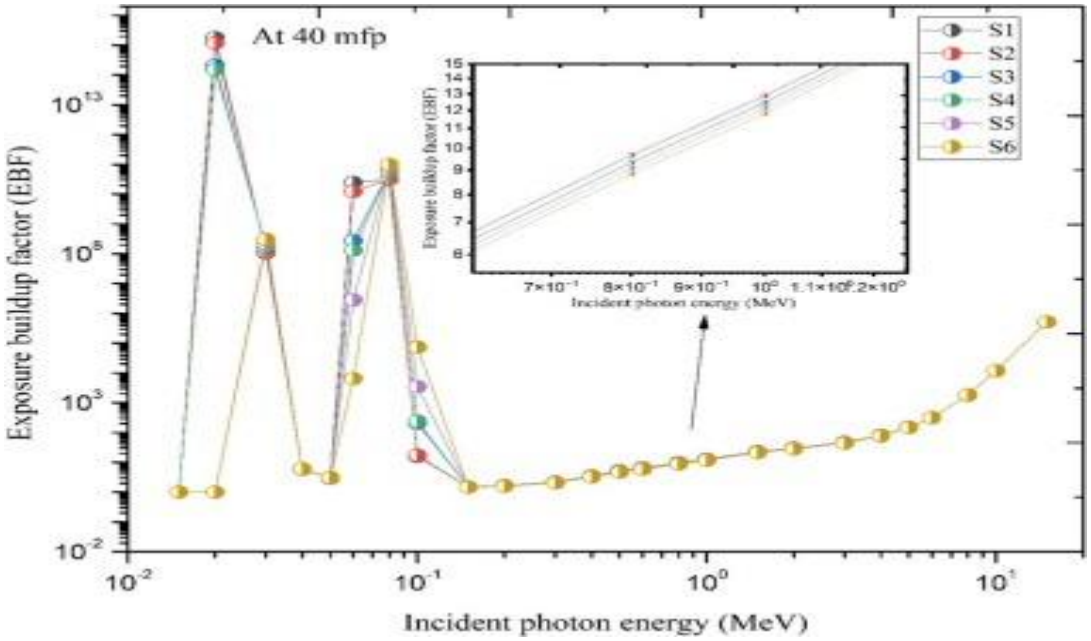


Рис. 14 (a–f). EBF як функція хімічного складу.

4.5.6. Ефективність радіаційного захисту (ЕРЗ) %

Зміна ефективності радіаційного захисту (RPE) у % вольфрамових сплавів як функція енергії фотонів показано на рис. 14. Серед досліджуваних сплавів зразок S6 демонструє найвищу ефективність екранування в діапазоні енергій 0,2–15 МеВ. При енергіях падаючих фотонів нижче 200 кеВ усі досліджувані зразки забезпечують максимальний RPE % (рис. 14). Після цього він зменшується для всіх зразків і досягає мінімального значення 49,138 % при 4 МеВ для зразка S1. У діапазоні енергій фотонів 3–6 МеВ спостерігається плоска реакція у RPE % усіх зразків. Наприклад, відносна різниця в 2,587 % була відзначена для зразка S6 між енергіями 3–6 МеВ. Зі збільшенням енергії понад 6 МеВ RPE % усіх зразків поступово зростає. Таку поведінку можна пояснити домінуванням різних процесів взаємодії фотонів на певних енергетичних рівнях. Зокрема, при проміжних енергіях ефективність екранування зразків знижується через розсіювання фотонів, спричинене переважно процесом комптонівського розсіювання (КС), як обговорювалося раніше. При нижчих енергіях фотонів ефективність екранування підвищується завдяки вищій ймовірності фотоелектричного поглинання (РЕА), де первинні фотони легко поглинаються матеріалом. І навпаки, при вищих енергіях фотонів домінує утворення пар (ПП), що призводить до значного поглинання первинних фотонів, що також підвищує ефективність екранування.

Крім того, на рис. 15 та 16 представлено відсоток RPE вольфрамових сплавів для клінічно значущих енергій фотонів . Зразок S6 забезпечує кращу ефективність

екранування від гамма-променів Co ^{60} та рентгенівського випромінювання MV (6,6 FFF, 10,10FF, 15 та 18). Відсоток RPE зразків S6 для рентгенівського пучка 6 FFF був вищим порівняно з рентгенівським пучком 6 FF з відносною різницею у % 2,234. Але при подальшому збільшенні енергії він стає незначним (0,089 % для рентгенівського пучка 10 FFF проти 10 FF). З іншого боку, для рентгенівських променів 15 та 18 MV відсоток RPE зростає через домінування процесу PP. Цю вищу продуктивність зразка S6 можна пояснити його складом, щільністю та властивостями взаємодії, що призводить до вищого ступеня поглинання фотонів, особливо для діапазонів енергії, що використовуються в клінічному лінійному прискорювачі в умовах променевої терапії .

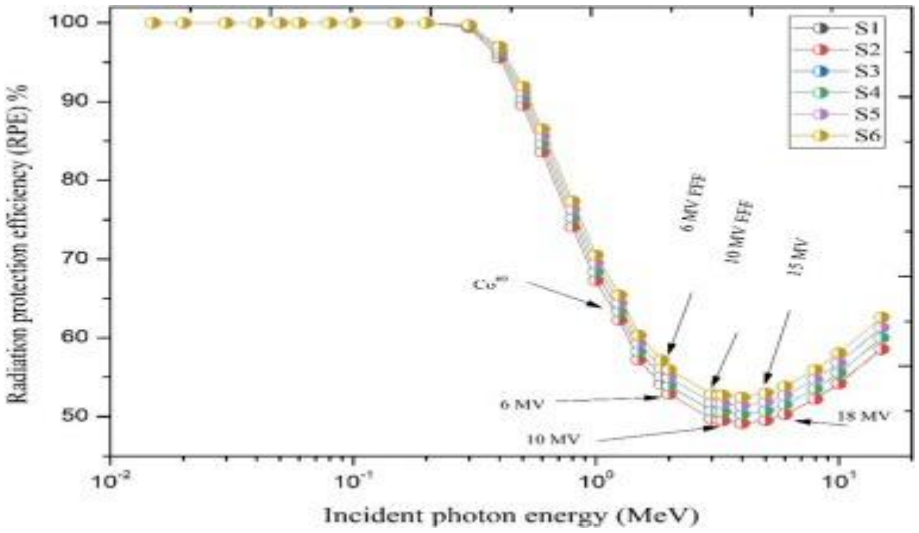


Рис. 15. Зразки ефективності радіаційного захисту (%), що відображають показники.

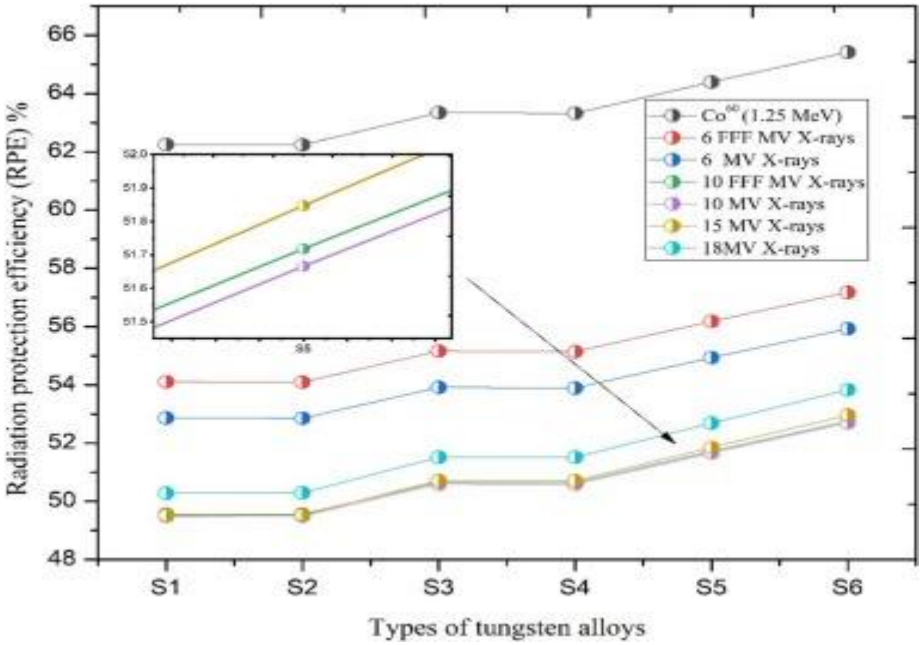


Рис. 16. Ефективність радіаційного захисту від гамма-випромінювання та клінічного рентгенівського випромінювання.

4.5.7 . Перерізи видалення швидких нейтронів (FNRCS)

Значення FNRCS досліджуваних вольфрамових сплавів представлені на рис. 17. Зразок S4 показав найвище значення 21,236 $см^{-1}$, тоді як зразок S2 показав найнижче значення 19,975 $см^{-1}$. Значення FNRCS для інших зразків становили 20,114, 20,314, 20,589 та 20,825 $см^{-1}$ для S1, S3, S5 та S6 відповідно. Для порівняння, чистий вольфрам та свинець мали значення FNRCS 21,2 $см^{-1}$ та 11,8 $см^{-1}$ відповідно. Зразок S4 показав значення, близьке до значення чистого вольфраму. Таким чином, зразок вольфрамового сплаву S4 виявляється ефективним поглиначем нейтронів . З іншого боку, найкращий поглинач фотонів, зразок S6, продемонстрував кращі властивості ослаблення нейтронів порівняно з чистим свинцем, але дещо поступався чистому вольфраму, з відносною різницею (RD%) 1,8%.

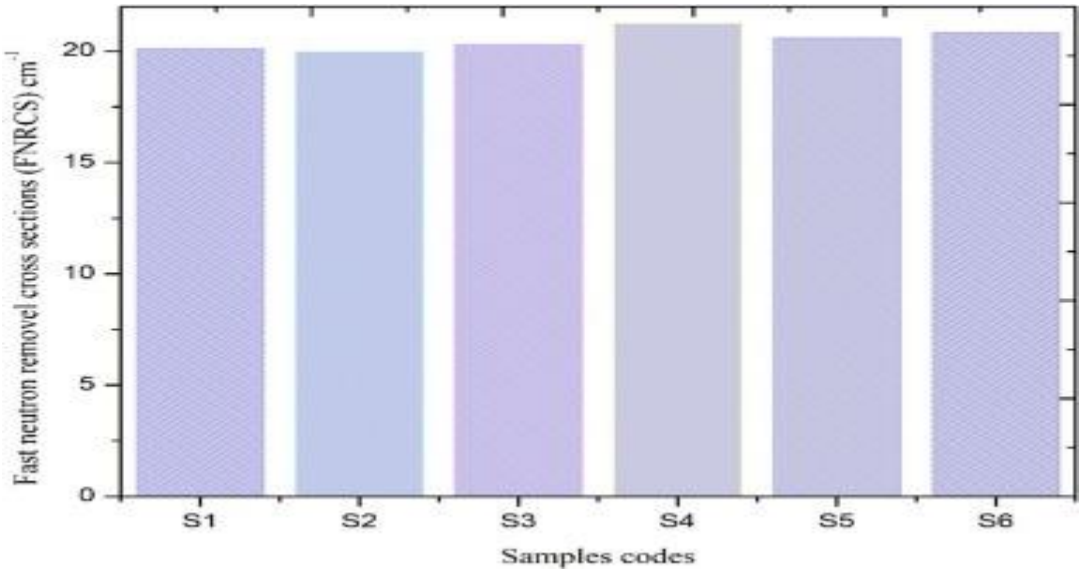


Рис. 17. Поперечні перерізи видалення швидких нейтронів з вольфрамових сплавів.

Висновок:

Ефективність екранування від випромінювання шести вольфрамових сплавів, що використовуються в клінічних багатопелюсткових коліматорах лінійного прискорювача (MLC), була успішно оцінена в діапазоні енергій фотонів від 0,015 до 15 МеВ шляхом аналізу параметрів їх радіаційної взаємодії. Результати підсумовані наступним чином:

- ➢Парціальні поперечні перерізи взаємодії фотонів вольфрамових сплавів (S1-S6) демонстрували енергетично залежні зміни, причому процеси PEA, CS та PP були

домінуючими факторами, що внесли вклад у загальний поперечний переріз ослаблення.

- ➢Зразок S6, що містив найвищий вміст вольфраму (97% за вагою), продемонстрував найвищі значення MAC та LAC. Сплави з нижчим вмістом вольфраму (наприклад, S1 з 90,5% вольфраму) мали відповідно нижчі значення MAC та LAC, що підкреслює чудову захисну здатність сплаву S6.
- ➢Значення Zeff та Neff суттєво змінювалися залежно від енергії фотонів та складу сплаву , причому багатий на вольфрам сплав S6 показав найвище значення Zeff та найнижче значення Neff. Ефект K-краю при 69,5 кеВ мав помітний вплив на ці параметри.
- ➢MFP, HVL та TVL також змінювалися залежно від енергії фотонів, досягаючи піку на проміжних енергіях через посилене розсіювання фотонів через комптонівські взаємодії.
- ➢На EBF впливали енергія, глибина проникнення та склад сплаву. Сплави з вищими еквівалентними атомними номерами (Zeff) демонстрували нижчі значення EBF. Зразок S6 мав найнижчі значення EBF та найвищий Zeff, що робить його чудовим поглиначем гамма-випромінювання.
- ➢Загалом, зразок S6 продемонстрував кращий відсоток RPE, а потім S5, S4, S3, S2 та S1 у всьому діапазоні енергії фотонів, особливо для гамма-променів Co60 та рентгенівських пучків FFF 6 MV, що робить його високоефективним матеріалом для багатопелюсткових коліматорів у радіотерапевтичних застосуваннях. Зокрема, для рентгенівських лінійних прискорювачів FFF 6 MV (SRS, SRT та SBRT) та методів IMRT на основі Co60.
- ➢ Зразок вольфрамового сплаву S4 продемонстрував чудові властивості ослаблення нейтронів, майже дорівнюючи характеристикам чистого вольфраму та перевершуючи чистий свинець.

Основну увагу приділили оцінці радіаційній стійкості шести різних складів вольфрамових сплавів, що використовуються в багатопелюсткових коліматорах (MLC) для лінійних прискорювачів. У ній аналізуються такі параметри, як поперечні перерізи взаємодії парціальних фотонів, коефіцієнти масового та лінійного ослаблення, ефективний атомний номер, густина електронів, довжина

вільного пробігу, шар половинного значення, шар десятого значення, коефіцієнт нарощування експозиції та ефективність радіаційного захисту цих вольфрамових сплавів. У дослідженні зразок сплаву, багатого на вольфрам S6 (97% вольфраму), визначено як найефективніший захисний матеріал серед протестованих. **Однак у порівнянні з наноструктурованим вольфрамом він програє.**

4.5.8. Що показало дослідження

В статті оцінюють шість різних сплавів на основі вольфраму для багатопелюсткових коліматорів (MLC), і обчислюють їхні радіаційні властивості (ататенюація, ослаблення фотонів) для фотонів з енергії від 0,015 до 15 MeV.

Використання W-сплавів обґрунтоване їхньою високою густиною та ефектом масового ослаблення: чим більша густина та поверхнева щільність, тим краща здатність матеріалу екранувати випромінювання. (Це загальний принцип екранування, який також обговорюється у джерелах про вольфрам як щит.)

Отже: традиційні W-сплави для коліматорів мають високу ослаблювальну здатність, фізичну міцність, механічну стабільність — їх властивості достатні, щоб зробити багатопелюстковий коліматор радіаційно стійким для випромінювання в прискорювачі.

Чому ж наноматеріали на основі вольфраму можуть бути «краще» — і що показують дослідження та наукові статті.

Ось основні потенційні переваги наноструктурованого/спеціалізованого W-матеріалу (або W-карбіду / нанокомпозитів), що виділяють дослідження:

- Наприклад, у роботі Tungsten carbide for radiation shielding: A comprehensive review зазначено, що цементовані вольфрам-карбіди (cWC) мають високу щільність, механічну міцність, термічну стабільність і часто — кращі або порівнянні з традиційним W-металом характеристики поглинання для γ-та нейтронного випромінювання.
- Вуглець у карбіді може додатково сприяти модерації (уповільненню) нейтронів або впливати на взаємодії, що дає перевагу при складних спектрах випромінювання (не лише фотони, а мікшовані потоки).
- Крім того, сучасні підходи використовують наноструктуровані W-алої (або навіть високоентропійні W-сплави / нанокристалічні плівки), які демонструють **високу радіаційну стійкість в лінійному прискорювачі**: при

іонному або нейтронному опроміненні вони мають менший рівень накопичення дефектів, меншу рекристалізацію, кращу стійкість до механічних змін, ніж грубий метал. Наприклад, у дослідженні Outstanding Radiation Resistance of Tungsten-based High Entropy Alloys показано, що W-based HEA з нанокристалічною структурою після 8 dpa опромінення майже не утворює великих кластерів дефектів і майже не втрачає механічної твердості

- У новішій роботі Large-scale machine-learning molecular dynamics simulation of primary radiation damage in tungsten моделювання показує, що у тонких фольгах чи наноструктурованих шарах W первинне ураження радіацією веде до утворення меншої кількості великих дефектних кластерів, порівняно з «bulk» W — тобто наноструктура може суттєво змінити характер пошкодження.

Отже, наноматеріали на основі W (карбіди, нанокристали, нанокомпозити, плівки) можуть давати **комбінацію**: високу щільність і гідну атенюацію, але водночас — **кращі «внутрішні» властивості**: стійкість до дефектів, більш стабільну структуру під радіацією, меншу крихкість, кращу термостійкість, можливу перевагу при комбінованих потоках (нейтрони + γ), а також більшу гнучкість у формоутворенні (якщо це плівки або композити).

У чому наноматеріали можуть перевершити традиційні W-сплави для коліматора (в контексті моєї задачі)

Якщо ми впровадимо наноструктурований W (або W-карбід, або нанокомпозит) у коліматор лінійного прискорювача:

- можемо зменшити пошкодження структури під дією радіації, що подовжить термін служби коліматора;
- підвищити стійкість до теплового та радіаційного шоку (важливо для роботи прискорювача / сильних променів);
- зменшить ризик радіаційної крихкості, розтріскування, деформацій під навантаженням;
- можеш зберегти (або навіть покращити) властивості поглинання випромінювання (або — для карбідів/композитів — навіть отримати кращу універсальність при різних видах випромінювання).

4.5.9. Порівняння результатів дослідження з наноструктурованим вольфрамом

Було досліджено шість вольфрамових сплавів для багатопелюсткових коліматорів у лінійному прискорювачі, де зразок S6 продемонстрував найкращі параметри ослаблення (найвищі MAC/LAC та найменші HVL/TVL) в енергетичному діапазоні 0,015–15 MeV. Це узгоджується з отриманими в даній роботі результатами, де матеріали з найбільшою щільністю та вмістом W показують найефективніше гамма-ослаблення. Водночас при переході від традиційних сплавів до наноструктурованого вольфраму не відбувається суттєвих змін у величинах MAC, LAC, Zeff, Neff, оскільки ці параметри визначаються передусім атомним номером і щільністю матеріалу. Отже, при однаковій густині наноструктурований W має подібні фотон-екранувальні характеристики до сплавів, що розглянуті у роботі.

Разом з тим, наукові дослідження демонструють суттєві переваги наноструктурованого вольфраму саме з точки зору **радіаційної та тепломеханічної стійкості**. Завдяки великій кількості меж зерен, які виконують роль «пасток» (sinks) для вакансій та міжвузлових дефектів, наноструктурований W проявляє знижене накопичення дефектів, меншу радіаційну крихкість та повільнішу рекристалізацію порівняно з грубозернистими сплавами. Це є критично важливим для багатопелюсткових коліматорів, де матеріал піддається тривалим потокам високоенергетичного випромінення та циклічним тепловим навантаженням. Дослідження показують, що наноструктурні та градієнтні W-шари демонструють підвищену стійкість до теплового шоку та меншу ерозію поверхні під опроміненням ,що збільшує довговічність коліматорних елементів.

Отже, хоча фотонно-екранувальні властивості наноструктурованого та традиційного вольфраму є порівнянними при однаковій щільності, наноструктурований W забезпечує **помітно кращу радіаційну стабільність, зниження накопичення дефектів та вищу зносостійкість**, що робить його перспективним матеріалом для підвищення ресурсу та надійності елементів MLC у лінійних прискорювачах.

ВИСНОВКИ

У межах експериментальної (розрахунково-аналітичної) частини магістерської роботи проведено комплексну оцінку радіаційно-захисних властивостей шести вольфрамових сплавів, що застосовуються в багатолисткових коліматорах медичних лінійних прискорювачів, у діапазоні енергій фотонів від 0,015 до 15 МеВ.

Отримані результати показали, що ефективність ослаблення фотонного випромінювання суттєво залежить від елементного складу матеріалу, його густини та структурних особливостей. Зі збільшенням масової частки вольфраму та формуванням більш однорідної наноструктурованої матриці підвищуються коефіцієнти ослаблення, ефективний атомний номер та загальна ефективність радіаційного захисту.

Аналіз парціальних поперечних перерізів взаємодії фотонів підтвердив енергетичну залежність механізмів радіаційної взаємодії, зокрема фотоелектричного ефекту, комптонівського розсіювання та народження електрон–позитронних пар, що є характерним для наноструктурованих матеріалів у широкому діапазоні енергій.

Встановлено, що зразок S6, який характеризується найвищим вмістом вольфраму та найбільшою густиною, демонструє максимальні значення масового і лінійного коефіцієнтів ослаблення, ефективного атомного номера та електронної густини, а також мінімальні значення половинного і десятого шарів ослаблення. Це свідчить про його підвищену радіаційну стійкість, що є ключовою властивістю наноматеріалів у умовах інтенсивного опромінення.

Крім того, низький коефіцієнт накопичення експозиції та висока ефективність радіаційного захисту зразка S6 підтверджують, що наноструктуровані вольфрамові сплави є перспективними матеріалами для використання в елементах лінійного прискорювача, зокрема в багатолисткових коліматорах, з метою мінімізації витоків випромінювання та підвищення точності променевої терапії.

Таким чином, результати моєї роботи підтверджують доцільність застосування наноматеріалів на основі вольфраму в конструкційних елементах медичних лінійних прискорювачів, оскільки їх наноструктура забезпечує

підвищену радіаційну стійкість та стабільність властивостей під дією іонізуючого випромінювання.

Наноматеріали на основі вольфраму технологічно більш ефективні для точних і високонавантажених елементів, тоді як макроматеріали залишаються оптимальними для більш масивних конструкцій

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ ТА ЛІТЕРАТУРА

1. Трохимчук П. П. *Радіаційна фізика твердого тіла : курс лекцій* / П. П. Трохимчук. — Луцьк : Вежа, 2007. — 394 с.
2. Подопригора Н. В., Садовий М. І., Трифонова О. М. *Фізика твердого тіла : навч. посіб.* — Кіровоград : КДПУ ім. В. Винниченка, 2013.
3. Пилипенко М. І. *Радіаційна онкологія : навчальний посібник для студентів-медиків, лікарів-інтернів, лікарів-онкологів усіх профілів* / М. І. Пилипенко. — Харків : ХНМУ, 2018. — 538 с.
4. Почерняєва В. Ф. *Радіаційна медицина : підр.* / В. Ф. Почерняєва. — 2021.
5. Пилипенко М. І. *Вибрані лекції з радіології.* — Харків : Інститут медичної радіології ім. С. П. Григор'єва НАМН України, ХНМУ, 2012. — 200 с.
6. Ткач О. П. *Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні : навч. посіб.* — Суми : Сумський державний університет, 2014. — 127 с.
7. Волков С. В., Ковальчук Є. П., Огенко В. М., Решетняк О. В. *Наносистеми. Наноматеріали.* — Київ : Наукова думка, 2008. — 424 с.
8. Мудрий С. І. *Фізика кластерів та наносистем : навч. посіб.* — Львів : ЛНУ, 2010. — 450 с.
9. Сливко Е. І., Мельнікова О. З., Іванченко О. З., Біляк Н. С. *Медична і біологічна фізика : навч. посіб. для студ. спец. 222 «Медицина»* — Запоріжжя : ЗДМУ, 2018. — 291 с.
10. Богорад В. І., Литвинська Т. В., Макаровська О. А., Носовський А. В., Тріпайло Р. Ф. *Вимоги з безпеки під час використання лінійних прискорювачів.*
11. Кондир А. І. *Наноматеріалознавство і нанотехнології : навч. посіб.* — Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2016. — 450 с.
12. Gilie B. J. *Машини на кобальті-60 та медичні лінійні прискорювачі: конкуруючі технології для зовнішньої променевої терапії.* (Наукова стаття): — 2017. — Vol. 29.

13. Jamal Abualroos N. *Матеріал на основі вольфраму як перспективний новий матеріал для екранування гамма-випромінювання без свинцю в ядерній медицині.* (Наукова стаття), 2020.
14. Al-Buriahi M. S., Tonguc B. T., Mutlu C. *Radiation shielding properties of some tungsten alloys for multileaf collimators: A Monte Carlo study* // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* — 2025. — Vol. 562. — Art. 165608. — DOI: doi.org