

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА
ННІ «ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ»
КАФЕДРА МАТЕРІАЛІВ РЕАКТОРОБУДУВАННЯ ТА ФІЗИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Пояснювальна записка

до дипломної роботи
БАКАЛАВРА

на тему:

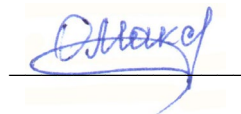
**Дослідження характеристик проходження іонів космічного
випромінювання через алюмінієві сплави з використанням коду ПЗ SRIM**
**Characterization of space radiation ions passing through aluminum alloys using
the SRIM software code**

Виконав: студент 4 курсу навчання
за ОПІ бакалавр
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: Прикладна фізика

СЕРАФИМОВИЧ Дмитро Євгенович



Керівник к.ф.-м.н., доцент
МАКСАКОВА Ольга Василівна



Рецензент к.ф.-м.н., доцент

Пилип КУЗНЄЦОВ



Харків – 2024 рік

АНОТАЦІЯ

Дмитро Серафимович. – Дослідження характеристик проходження іонів космічного випромінювання через алюмінієві сплави з використанням коду ПЗ SRIM. – рукопис. Дипломна робота бакалавра з прикладної фізики – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків, 2024. 41 с., 24 рис., 15 джерел.

У дипломній роботі досліджується проходження іонів космічного випромінювання через алюмінієві сплави за допомогою програмного забезпечення SRIM. Мета роботи – визначити характеристики проходження іонного випромінювання через алюмінієві сплави Al – Mn, Al – Cu – Mg(Д16Т), Al – Si – Fe(АЛ2)

У першій частині роботи проведено літературний огляд сучасних досліджень у сфері використання алюмінієвих сплавів в авіаційній та космічній техніці. Описано основні види сплавів, їх фізичні властивості та застосування.

Друга частина роботи зосереджена на експериментальному дослідженні проходження іонів Kr^+ , Bi^+ , Fe^{2+} з енергіями 26.7-80.1 MeV через алюмінієві сплави. Для моделювання використовувався код SRIM 2013 Pro, що дозволяє точно визначити розподіл іонів по глибині зразка і втрати енергії на іонізацію.

Результати дослідження показали, що алюмінієві сплави ефективно поглинають енергію іонного випромінювання на певній глибині, що робить їх перспективними для використання у конструкціях, які повинні забезпечувати захист від космічного випромінювання. Встановлено, що втрати енергії на іонізацію залежать від енергії випромінювання і маси іонів, причому найбільші втрати спостерігаються для надважких іонів Bi^+ .

Ключові слова: космічні промені, алюмінієві сплави, SRIM, іонізація, характеристики проходження.

ABSTRACT

Dmytro Serafymovych. – Characterization of space radiation ions passing through aluminum alloys using the SRIM software code. Thesis of bachelor in applied physics – V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2024. 41 p., 23 fig., 15 ref.

The thesis investigates the passage of cosmic radiation ions through aluminum alloys using SRIM software. The aim of the work is to determine the characteristics of ion radiation passage through aluminum alloys Al – Mn, Al – Cu – Mg (D16T), and Al – Si – Fe (AL2).

The first part of the work includes a literature review of current research on the use of aluminum alloys in aviation and space technology. It describes the main types of alloys, their physical properties, and applications.

The second part focuses on an experimental study of the passage of Kr^+ , Bi^+ , and Fe^{2+} ions with energies of 26.7-80.1 MeV through aluminum alloys. SRIM 2013 Pro software was used for modeling, allowing precise determination of ion distribution by sample depth and energy loss to ionization.

The results showed that aluminum alloys effectively absorb the energy of ion radiation at a certain depth, making them promising for use in structures that need to provide protection from cosmic radiation. It was found that energy loss to ionization depends on the radiation energy and ion mass, with the highest losses observed for super heavy Bi^+ ions.

Keywords: cosmic rays, aluminum alloys, SRIM, ionization, passage characteristics.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1	
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ	6
1.1 Загальні положення та класифікація алюмінієвих сплавів.....	6
1.2 Сплави на основі Al – Cu.....	8
1.3 Сплави на основі Al – Mg та Al – Mn.....	11
1.4 Сплави на основі Al – Si.....	15
РОЗДІЛ 2	
ОБ’ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ.ПРОХОДЖЕННЯ ІОНІВ КОСМІЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЧЕРЕЗ АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ..	19
2.1 Сучасний стан досліджень у проходженні іонів крізь алюмінієві сплави.....	19
2.2 Опис досліджуваних алюмінієвих сплавів.....	22
2.3 Особливості використовуваного в роботі іонного випромінювання..	24
2.4 ПЗ SRIM 2013 Pro для моделювання проходження пучків крізь речовину. Вхідні параметри для теоретичних розрахунків.....	25
3 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОХОДЖЕННЯ ІОНІВ КРІЗЬ АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ.....	30
3.1. Характеристики проходження іонів для сплаву Al – 1.6Mn	30
3.2. Характеристики проходження іонів для сплаву Al – 4Cu – 1.8Mg	34
3.3 Характеристики проходження іонів для сплаву Al – 10Si – 1.5Fe	36
ВИСНОВКИ	39
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	40

ВСТУП

Дослідження опромінення іонами алюмінієвих сплавів є актуальним через широке використання цих матеріалів у різних галузях, серед яких авіаційна та космічна є одними з найбільш потужних та стрімко розвиваючих[1]. Алюмінієві сплави мають низьку вагу, високу міцність та гарну корозійну стійкість, що робить їх ідеальними для застосування у конструкціях, які піддаються впливу космічного випромінювання.

Загалом у даному напрямку є роботи, які присвячені іонно-імплантаційній (II) обробці іонами різних марок алюмінію. Сенс їх полягає у введенні в приповерхневу область алюмінієвого сплаву іонів азоту, криптону, вісмуту тощо. Такі дії дозволяють збільшити мікротвердість та міцність матеріалу за рахунок утворення хімічних з'єднань та інтерметалідних фаз у приповерхневих шарах матеріалу. Також інтерес представляє дослідження процесу електронного гальмування іонів, що вносить вклад у виникнення радіаційних дефектів, які підсилюють дифузійні процеси. Є дослідження в ядерній енергетиці, де йони імітують пошкодження нейтронами реакторних алюмінієвих сплавів для виготовлення ТВЕЛІВ (марка 6063). Публікаційна статистика в журналах з матеріалознавства та ядерної енергетики свідчить про науковий інтерес до досліджень алюмінієвих сплавів та вказує на їх важливість та актуальність.

Метою даної роботи є дослідження проходження іонів космічного випромінювання крізь алюмінієві сплави систем Al – Mn, Al – Cu – Mg, Al – Si – Fe та визначення основних характеристик. У якості інструменту моделювання використано програмне забезпечення SRIM 2013 Pro, яке має розширений програмний пакет для розрахунку взаємодії налітаючих іонів з атомами мішені.

Результати даної роботи можуть бути використані в інших наукових роботах або в галузі інженерії для проектування захисних покриттів космічних апаратів.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

1.1 Загальні положення та класифікація алюмінієвих сплавів

Алюмінієві сплави можна вважати одними з найбільш універсальних та широкоживаних матеріалів сучасності[1]. На сьогодні відбувається їх активне використання в різних галузях промисловості: від автомобілебудування та авіації до електроніки та будівництва. Висока ефективність цих сплавів забезпечується наступними перевагами, а саме, легкість, міцність, корозійна стійкість та відмінні технологічні властивості. Ці матеріали володіють високим ступенем оброблюваності та можуть бути легко відлитими, кованими, пресованими, що робить їх ідеальними для виготовлення різноманітних виробів з складною геометрією.

Головні легуючі елементи в алюмінієвих сплавах утворюють з алюмінієм евтектичні системи. До таких елементів відносять: Zn, Li, Ge, Si, Cu, Ag, Mg. Наприклад, цинк можуть додавати як основний або другорядний елемент до ливарних сплавів, щоб збільшити їх твердорозчинну міцність. Однак, і в такого способу є обмеження, що пов'язані з малими значеннями об'ємного фактору та відсутності інтерметалідів у подвійному сплаві. На практиці для легування сплавів використовують Cu, Si, Mg, оскільки вони утворюють в системі з Al інтерметаліди (Al-Mg, Al-Cu) та «зручно» розташовані евтектики в сплавах з кремнієм. Ці фактори, а також вагома та контрольована розчинність, дозволяють застосовувати методи зміцнення сплавів, наприклад, дисперсійне твердіння сплавів з використанням старіння та загартування. У якості додаткових легуючих елементів використовують перехідні метали, такі як Ni, Nb, V, Cr, Ti, Mg, Mo. Легування ними дає пластичний сплав з дрібнозернистою

структурою. На додачу, через утворення складних термостійких інтерметалідних розчинів і каркасних структур, підвищується його жароміцність. Більша частина цих хімічних елементів з II – V групи системи Менделєєва має незначну граничну розчинність у твердому алюмінії. Ці метали використовують у сплавах в якості невеликих добавок, щоб поліпшити їх фізичні властивості та оброблюваність в процесі виготовлення напівфабрикатів. Основні взаємозв'язки між різними системами деформівних сплавів зображені на рисунку 1.1.

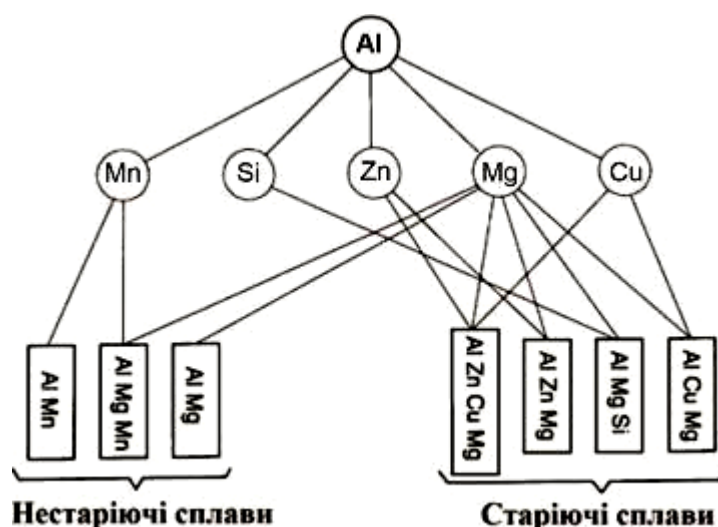


Рис. 1.1. Легуючі взаємозв'язки між основними деформівними алюмінієвими сплавами [6]

Набули широкого використання у промисловості ливарні алюмінієві сплави, які мають невелику густину за високого показника питомої міцності. Параметри міцності таких сплавів можуть змінюватися у широкому діапазоні: 150 – 450 МПа для межі міцності та 90 – 250 МПа для межі плинності (при відносній деформації $\delta = 1 - 20\%$). При цьому максимальні робочі температури знаходяться в діапазоні 573 – 623 К.

У залежності від того, яким способом потрібно отримати напівфабрикати для виготовлення виробів, алюмінієві сплави ділять на **ливарні** (casting alloys) та **деформаційні** (wrought alloys). Також є **спеціальні** сплави, які отримуються

методами порошкової металургії, та поділяються на: спечені алюмінієві порошки та спечені алюмінієві сплави. У свою чергу, ливарні та деформівні сплави поділяють на такі, що можливо зміцнити термообробкою та такі, що не піддаються зміцненню. До деформівних сплавів, що не зміцнюються термічною обробкою можна віднести системи Al – Mg та Al – Mn. Вони характеризуються хорошою стійкістю до корозії та зварюваністю, а тому використовуються для виготовлення штампованих виробів. До деформівних сплавів, які зміцнюються термообробкою, відносять: дюралюміни (Al – Cu – Mn, Al – Cu – Mg), авіалі (Al – Mg – Si) та інші ковкі та високоміцні сплави алюмінію (Al – Mg – Si – Cu, Al – Zn – Mg, Al – Zn – Mg – Cu). Їх гартують, охолоджують у воді, а потім піддають штучному чи природному старінню.

Маркують алюмінієві сплави залежно від їх хімічного складу, назви, технологічного методу отримання напівфабрикатів, властивостей і виду термічної чи механічної обробки. Існує і міжнародна система маркування (IADS), де кожному сплаву призначаються послідовно 4 цифри (xxxx), де перша показує основний легувальний елементі, а інші, залежно від серії сплаву, обираються в інтервалі цифр 1 – 8 [1].

1.2 Сплави на основі Al – Cu

Сплави на основі Al – Cu є найбільш застосовуваними алюмінієвими сплавами. Наприклад, у цивільній авіації частка їх використання сягає 45% від усіх алюмінієвих сплавів. Це пов'язано з їх високою міцністю порівняно з іншими сплавами на основі Al. Сплави Al – Cu грають значну роль у зниженні ваги, економії енергії та зниженні витрат в аерокосмічному та військовому секторах, суднобудуванні і автомобілебудуванні [2].

Для аналізу утворення структури ливарних сплавів алюмінію з міддю використовують діаграму стану Al – θ (CuAl₂) до утворення θ сполук CuAl₂ з вмістом міді приблизно 50%, показану на рисунку 1.2.

З діаграми можна побачити, що у твердому стані в системі існує значна гранична розчинність, яка швидко зменшується зі зниженням температури. Така особливість вказує, що дані можливо піддавати термічній обробці, зокрема, застосовувати методи старіння та гартування.

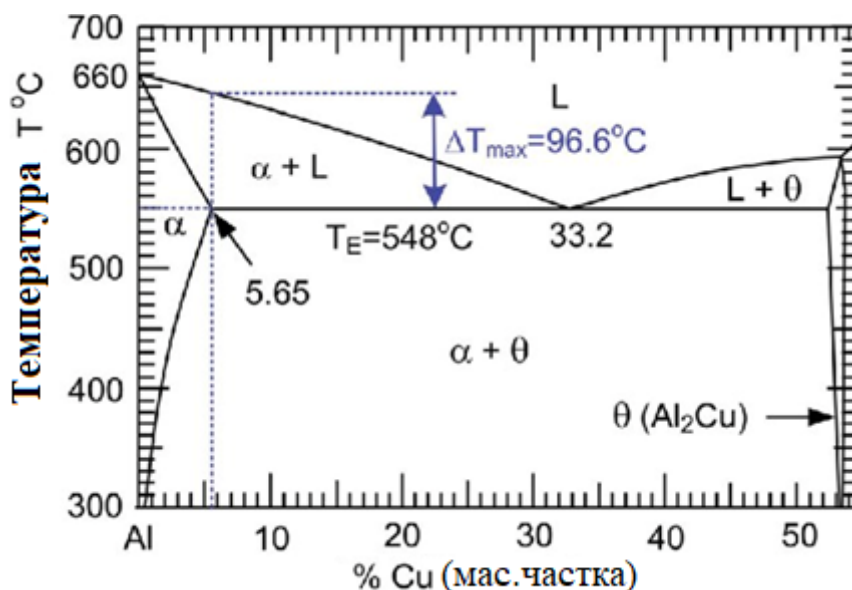


Рис.1.2 Фазова діаграма стану системи Al–Cu [3]

До того ж евтектика має крихку та тверду сполуки CuAl_2 у відношенні 1:2, відповідно, сплави з нею та найкращими ливарними властивостями будуть непридатними до використання, оскільки вони мають високу крихкість. Чим більше концентрація міді у ливарному сплаві алюмінію, тим більшою є зайва крихкість, зумовлена наявністю фаз CuAl_2 . При отриманні сплавів Al – Cu з певними механічними властивостями ливарні технологічні властивості можуть погіршуватися. Причиною цього є велике значення граничної розчинності та невелика температура плавлення евтектики, які зумовлюють низьку рідкоплинність, утворення гарячих тріщин та пористість [1].

Отже, можна зробити висновок, що сплави Al – Cu придатні до термічної обробки шляхом гартування та старіння, що пов'язано з особливостями їх твердого стану. Зміцнення в них відбувається за рахунок фаз CuAl_2 ,

концентрація яких зростає з масовою часткою міді у сплаві. Сплави системи Al – Cu мають не тільки високу міцність, а й жаростійкість. Також слід враховувати концентрацію міді, оскільки її надлишок створює зайву крихкість. Слід сказати, що усі сплави на основі системи Al – Cu сильно схильні до корозії, тому потребують заходів захисту з використанням анодування або напилення різних антикорозійних покриттів. Крім того, вони легко ріжуться та зварюються аргоном.

Представником дюралей є термічно зміцнюваний деформаційний сплав Al 2024 (аналог Д16Т) з вмістом міді в межах 3.8 – 4.9 %. Хімічний склад становить комбінацію елементів $Al - Cu - Mg - Mn - Fe - Si$ та має багатофазну структуру зливка, що складається з фаз $(Mn,Fe)_3SiAl_{12}$, Mg_2Si , $CuAl_2$ та Al_2CuMg , а також іноді $(Fe,Mn)Al_3$ чи $(Mn,Fe)Al_6$. Мікроскопічне зображення сплаву представлено на рисунку 1.3, малий осад в алюмінієвій матриці, що з'явився при поступовому повільному охолодженні.

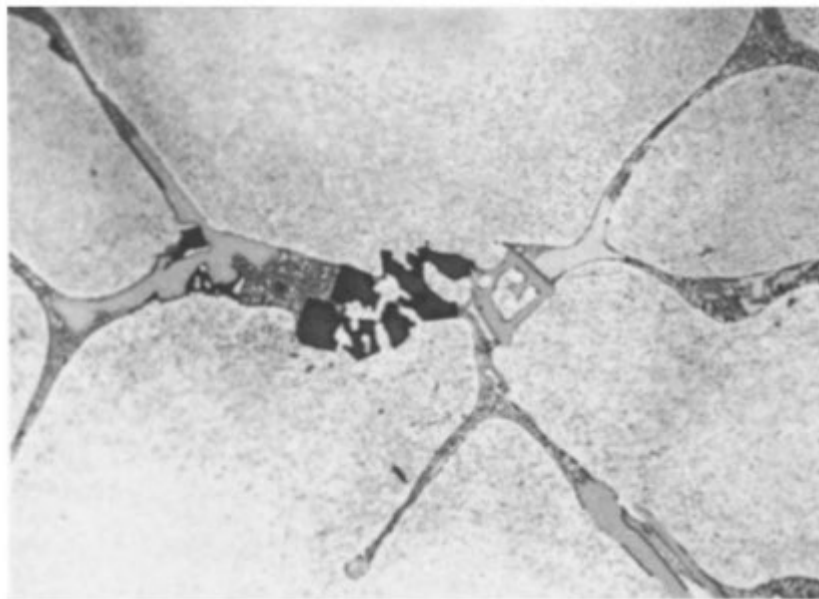


Рис. 1.3. Складна багатофазна структура сплаву 2024 [4]

Відомо, що при нагріванні сплаву розчиняється велика частина міді та магнію, а марганець випадає в осад у вигляді дисперсоїду $Cu_2Mn_3Al_{20}$. Тому зерна цього сплаву, утворені під час термічної обробки, є помітно витягнутими

та сплюснутими. Пруток Д16Т діаметром від 50 до 100 мм при кімнатній температурі матиме наступні фізичні та механічні характеристики: густина 2770 кг/м^3 , температура плавлення $650 \text{ }^\circ\text{C}$, модуль пружності $E = 73 \text{ ГПа}$, межа плинності $\sigma_T = 300 \text{ МПа}$, відносне подовження $\delta = 8 - 10 \%$, твердість по Бринелю 105 НВ [4].

1.3 Сплави на основі Al – Mg та Al – Mn

Сплави на основі алюмінію з додаванням магнію (Al – Mg) є важливою групою матеріалів, відомою своєю високою корозійною стійкістю порівняно з мідними сплавами та відмінними механічними властивостями. Зазвичай вміст магнію становить від 0.8 до 5%. Відомі комерційні сплави включають серії 5000 (наприклад, 5052, 5083, 5754). Al – Mg сплави не піддаються зміцненню термічною обробкою (старінням), оскільки вони зміцнюються головним чином завдяки твердорозчинному зміцненню. Однак вони добре піддаються холодній обробці, що дозволяє додатково підвищити їхню міцність. Встановлено, що міцність сплаву збільшується за збільшенням вмісту Mg, зокрема, якщо вміст становить 8 – 12 %, то межа плинності $\sigma_T = 400 \text{ МПа}$, однак, його пластичність помітно знижується. Діаграма стану системи Al – Mg зображена на рисунку 1.4. Видно, що при концентрації магнію 36 мас.% виділяється інтерметалідна β -фаза Al_3Mg_2 , що сприяє структурному зміцненню. Цю фазу стабілізують шляхом тривалого відпалу, обробкою високим тиском або температурами, які перевищують $450 \text{ }^\circ\text{C}$ (евтектична температура на фазовій діаграмі T_E) та призводять до спікання в рідкому стані [5].

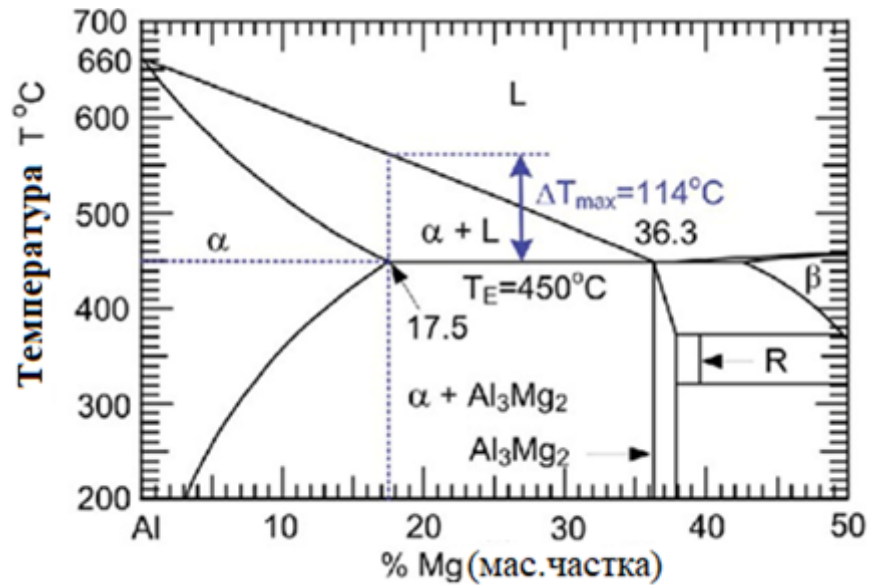


Рис.1.4. Фазова діаграма стану системи Al – Mg [5].

Найбільшого поширення серед Al – Mg сплавів у повітряно-космічній галузі набув сплав 5083 (вітчизняний аналог АМг6), що має різну ступінь деформаційного зміцнення. Мікроскопічне зображення його структури представлено на рисунку 1.5. Очевидно, що мікроструктура сплаву є відносно крупнозернистою із середнім розміром зерна 350 мкм.

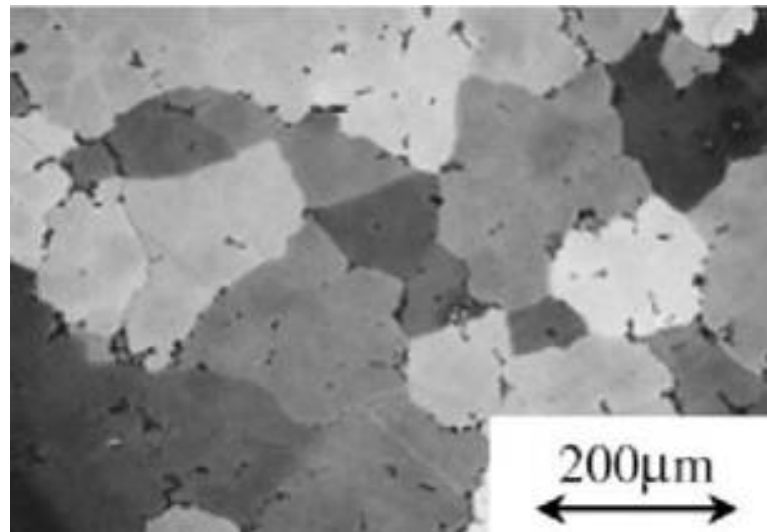


Рис.1.5. Зображення мікроструктури сплаву 5083(АМг6), отримане за допомогою оптичного мікроскопа [6]

Даний сплав активно використовують для виготовлення багатьох напівфабрикатів, наприклад, профілів, листів, труб різних розмірів, ковких та штампових деталей різного призначення. Завдяки своїй технологічності його також використовують для виготовлення більшості конструкційних елементів ракет-носіїв, зокрема, аеродинамічних обтічників, корпусів відсіків змінного тиску, паливних баків ракет, відсіків для екіпажу, тощо. Висока корозійна стійкість сплавів системи Al – Mg робить можливим використання деталей у корозійно-активних агресивних середовищах (азотний тетроксид – компонент ракетного палива, висока вологість та морська корозія) [1].

Для покращення властивостей цих сплавів використовують так звані синергетичні технології обробки[13]. Це може бути послідовне та одночасне використання методу пластичної деформації, ультразвукові коливання або лазерне випромінювання. Такі дії дозволяють збільшити міцність та межу плинності у 2,0 – 2,5 разів, а також роботу руйнування за збереження пластичних властивостей. АМг6 має невелику міцність у порівнянні з алюмінієвими сплавами, що зміцнюються термообробкою. Відповідно, його потрібно комбінувати з іншими матеріалами, оскільки в іншому випадку збільшується маса конструкції [1].

Якщо порівнювати сплави системи Al – Mg та Al – Cu, то існують деякі конкурентні системи, зокрема, Al – Cu – Mg і Al – Cu – Zn – Mg (1201 та 1915), які мають більш високу міцність ніж АМг6, але гіршу стійкість до корозії (навіть якщо вони леговані магнієм чи марганцем). Тому їх можна використовувати як альтернативу для сплаву 5083, наприклад, для виготовлення обтічників для ракет, які не знаходитимуться у агресивному корозійному середовищі.

Сплави на основі алюмінію з додаванням марганцю (Al – Mn) широко використовуються в будівництві, виготовленні теплообмінників, кулерів, покрівельних матеріалів, фасадних панелей та упаковки для харчових

продуктів, де потрібні хороша корозійна стійкість і пластичність при помірній міцності[12]. Вони, як і Al – Mg, не піддаються зміцненню термічною обробкою, але добре реагують на холодну обробку. Основний механізм їх зміцнення, твердорозчинний, подібний до механізму системи Al – Mg. Для підвищення даних сплавів пластичності проводять низькотемпературний відпал при 200 – 290 °С. Температура кування та штампування становить 420 – 470 °С за охолодження на повітрі.

Марганець, розчиняючись у матриці алюмінію, утворює тверді розчини (див. рисунок 1.6). За нормальної температури в алюмінію розчиняється близько 0,05% марганцю. З підвищенням температури розчинність марганцю зростає та досягає максимального значення 1,4 % за температури 658 °С.

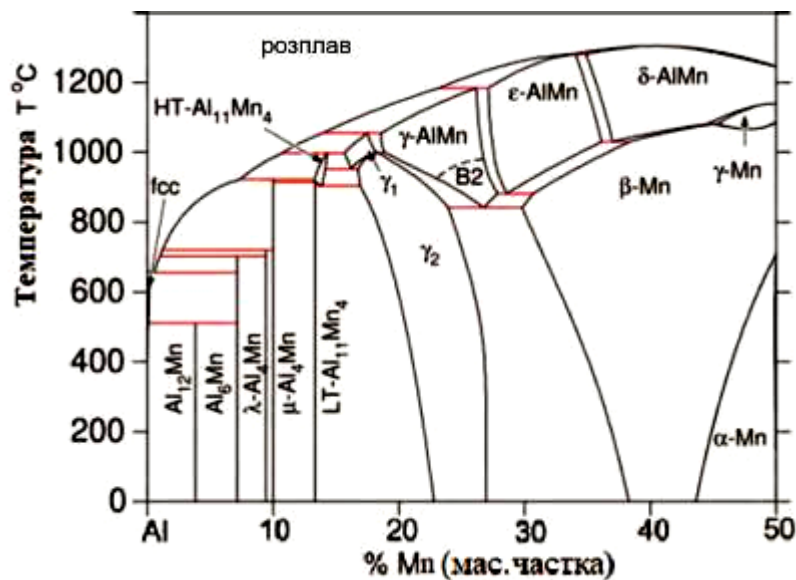


Рис.1.6. Фазова діаграма стану системи Al – Mn [7]

Одним із представників марганцевих сплавів алюмінію є популярний сплав 3003, який складається з марганцю доданого до чистого алюмінію 1100 (99,00%). Відомо, що домінуючими фазами є $(Mn,Fe)Al_6$ та $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$. Мікроскопічне зображення литої структури сплаву представлено на рис. 1.7.



Рис.1.7. Мікроскопічне зображення розподілу фаз $(\text{Mn,Fe})\text{Al}_6$ (світлі області) та $(\text{Fe,Mn})_3\text{SiAl}_{12}$ (темні області) у дендритних проміжках сплаву 3003 [4]

Очевидно, що у литій структурі переважаючою є фаза $(\text{Mn,Fe})\text{Al}_6$ (світлі області), однак нагрівання під час лиття викликає утворення фази $(\text{Fe,Mn})_3\text{SiAl}_{12}$ (темні області) в результаті уповільненої перитектичної реакції. Марганець також перенасичує твердий розчин із центром первинних дендритів і згодом випадає в осад у вигляді дисперсоїду. Зерна, утворені відпалом зміцненого матеріалу набувають форми видовженого овалу (є більш довгими та сплюсненими) головним чином через дисперсоїд. Частина марганцю залишається у твердому розчині. Кілька сплавів цього класу також містять магній, який через свою спорідненість із Si має тенденцію зміщувати співвідношення фаз до $(\text{Mn,Fe})\text{Al}_6$ [4].

1.4 Сплави на основі системи Al – Si

Слави системи Al – Si або силуміни мають хороші ливарні технологічні властивості та є найбільш поширеними ливарними алюмінієвими сплавами. що Діаграма фазового стану системи Al – Si показана на рисунку 1.8. Видно, що

нонваріантна точка ($\text{Si} = 11,7 \text{ мас. \%}$) має зсув до чистого Al, відповідно, можна зробити висновок, що основа евтектики – це альфа твердий розчин ($\alpha + \text{Si}$) матрично-каркасного типу.

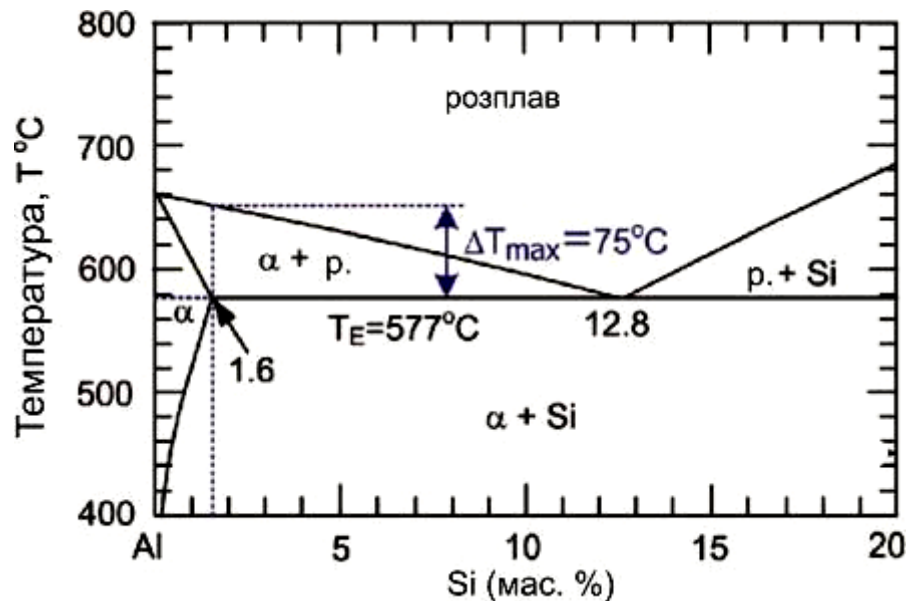


Рис.1.8 Діаграма стану Al – Si [1]

Бінарна система Al – Si утворює просту евтектику з обмеженою твердою розчинністю на обох кінцях. Евтектика виникає при 580°C за вмісту кремнію 11,7 мас. %. При температурі евтектики тверді розчини алюмінію та кремнію містять 1,65 мас. % Si та близько 0,5 мас. % Al відповідно. Інші інтерметаліди у бінарній системі не існуватимуть. Якщо ж відсоток кремнію у евтектиці призводить до великих утворень, то буде спостерігатися зменшення пластичності матеріалу зі збільшенням частки евтектики. Щоб уникнути даної проблеми, систему Al – Si додатково модифікують Na або Sr (із вмістом елементів не більше 0,02 мас. %), що призводить до тонкого розподілу частинок кремнію в доевтектичних сплавах. Крім того, фосфор (0,01 мас. %) може бути доданий як зародкоутворювач для заевтектичних сплавів [1; 4].

Задля отримання евтектичного сплаву з найкращими ливарними властивостями (наприклад, АЛ2) додають невелику кількість крихкого кремнію до евтектики та модифікують структуру. Популярними є і доевтектичні сплави

АЛ4, АЛ9, АЛ15 з масовою часткою кремнію у межах 5 – 9%; заевтектичні сплави типу АК2 використовують менше. У простих силумінів через мале значення $C_p = 1,65\%$ та відсутності інтерметалідних фаз ефект зміцнення від вторинних фаз не суттєвий і не має сенсу у практичному використанні. Тому прості силуміни або подвійні сплави є термічно не зміцнюваними і мають погані міцнісні властивості. Щоб зміцнити подвійний сплав, під час гартування й штучного старіння у нього додають магній та мідь (спільно чи окремо). Відповідно, одержують новий клас сплавів – *спеціальні силуміни*, які мають інтерметаліди змінної розчинності у твердому стані. Таке легування призводить до ефективного зміцнення сплаву під час термообробки ($\sigma_b = 250 - 330$ МПа, $\sigma_T = 190 - 280$ МПа при $\delta = 3 - 6\%$). Шкідливі домішки заліза у системі Al – Si, що зумовлені недосконалістю технологічного процесу отримання спеціальних силумінів, утворюють крихкі пластини складних сполук $\beta\text{-FeSi}$, які різко знижують пластичність. Ефект має найбільший вплив у термічно зміцнюваних сплавах силумінах. Додавання 0,2 – 0,5 мас. % марганця вирішує цю проблему наступним чином: замість $\beta\text{-FeSi}$ виникають компактні рівновісні поліедри фази $\alpha\text{-Al-FeSiMn}$, які значно менше впливають на пластичність. Механічні властивості сплавів Al – Si сильно залежать від способу їхнього лиття. Якщо відливати у кокіль або під тиском, то σ_b та σ_T збільшуються на декілька десятків МПа за одночасного зростання пластичних властивостей матеріалу. При литті у піщану форму властивості погіршуються внаслідок процесу рекристалізації та швидкості утворення зародків. Кокіль виконаний із металу, тому він швидше розсіює теплову енергію, відповідно, швидше охолоджує рідкий сплав. Внаслідок цього швидкість утворення зародків кристалізації перевищує швидкість їх росту і тому спостерігається мілкозерниста структура, яка, у свою чергу, призводить до збільшення міцності та пластичності. Крім того, треба враховувати і велику концентрацію додаткових легуючих елементів у твердому

розчині, що дає змогу використовувати технологію штучного старіння без попереднього гартування [1; 3; 4].

Зазвичай сплави Al – Si містять від 3 до 25 % кремнію, до 50 % можуть містити сплави, які використовуються у порошковій металургії.

Прикладом подвійного сплаву Al – Si або спеціальним силуміном є сплав АЛ2 або АК12. Він має невеликі механічні властивості, які залежать від технології лиття та величини поперечного перерізу злитка, швидкості охолодження, тощо, та містить від 10 до 13 % кремнію згідно з ГОСТ 1583-93. Його механічні характеристики наступні: $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$, $\sigma_{\text{в}} = 120 - 220 \text{ МПа}$, $E = 70 \text{ ГПа}$ при $\delta = 0,5 - 1,0 \%$. Також АЛ2 властиві високі ливарні властивості, найбільша рідкоплинність (серед алюмінієвих сплавів) та мала ймовірність утворення пустот та тріщин. Додатки магнію й марганцю сприяють збільшенню і так високої корозійної стійкості [1].

Представниками системи Al – Si є також доевтектичні спеціальні силуміни, зокрема, АЛ4, АЛ9, АЛ34, АЛ35. Шляхом додавання невеликих добавок магнію та зменшення кількості кремнію, досягають зміцнення та зменшення крихкості АЛ4, АЛ9. Дані сплави є потрійними системами Al – Si – Mg, де міцність забезпечується головним чином за допомогою сполук Mg_2Si , які, наприклад, у сплаві АЛ4 утворюється після гартування при температурі 535°C та штучного старіння при 175°C протягом 15 годин. Якщо швидкість кристалізації велика у випадку лиття під тиском чи в кокіль та концентрація кремнію не велика, то використовують сплави без модифікування. Коли технологічний процес вимагає лиття у виплавні або піщані форми, треба модифікувати сплави, при цьому міцність може змінюватись на порядок, ніж без модифікування [1].

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ.ПРОХОДЖЕННЯ ІОНІВ КОСМІЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЧЕРЕЗ АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ

2.1 Сучасний стан досліджень у проходженні іонів крізь алюмінієві сплави

Перед тим, як почати дослідження моделювання проходження пучка іонів космічного випромінювання крізь алюмінієві сплави, загальна характеристика та аналіз літератури яких були надані в розділі 1, варто охарактеризувати ситуацію в цій області зараз та оцінити її актуальність.

Наприклад, в роботі [8] досліджено вплив ефекту іонно-імплантаційної обробки N_2^+ іонами алюмінієвих сплавів 1160 (Al – 90,9 ÷ 94,7 %), 1190 (Al – 91,095 ÷ 94 %) і 1420 (Al – 90,55 ÷ 92,9 %) на їх мікротвердість, напруження II роду та мікроструктуру. Виявлено, що мікротвердість та міцність імплантованих сплавів 1160 та 1420 зросла до 400 МПа, глибина іонного зміцнення становить близько 50 мкм. Глибше відбувається різке зниження механічних характеристик до 80 – 110 МПа. Однак для сплаву 1190 виявлене зменшення поверхневої твердості внаслідок рекристалізаційних процесів під час імплантації. Таким чином, автори дійшли висновку, що іонна імплантація може бути рекомендована для зміцнення виробів із алюмінієвих сплавів в залежності від їх умов експлуатації. Однак, для якісної промислової реалізації цього процесу потрібне серйозне проектне планування обладнання для імплантації та технологічних режимів.

Подібні результати були отримані у роботі [9] при опроміненні сплавів Al – Cu, Al – Cu – Zn, Al – Cu – Mg та Al – Mn іонами Ne^+ , Kr^+ та Bi^+ в діапазоні енергій 26 – 710 MeV. Були виявлені зміни структури, фазового складу та механічних властивостей зазначених сплавів, які пов'язані з електронним

гальмуванням іонів, що роблять основний внесок при виникненні підсилюючих дифузійних процесів у мішенях (радіаційних дефектів). Встановлено, що зі збільшенням флюєнсу іонної імплантації відбувається збільшення мікротвердості у результаті виділення мікродисперсійних S-, τ - та θ -фаз. Зміна структури та властивостей алюмінієвих сплавів були зумовлені електронним гальмуванням іонів, які сприяють виникненню дефектів ґратки та дифузійним процесам переповзання дислокацій з подальшим виокремленням зміцнюючих фаз у поверхневих шарах.

Незважаючи на те, що основний інтерес в ядерній промисловості викликає нейтронне опромінення, використання іонного випромінювання має свої переваги, а саме: 1) іонне випромінювання накопичує пошкодження на порядки швидше за нейтронне, 2) легкий контроль параметрів опромінення, 3) комерційна доступність опромінення та доступність в обробці зразків. Разом з тим, іонне опромінювання має серйозні недоліки, зокрема, 1) нерівномірність опромінення, 2) зміна хімічного складу мішені внаслідок імплантації чужорідних атомів, 3) обмежена глибина пошкодження (поверхнєве опромінення).

Вагомим дослідженням, що поєднує теоретичні розрахунки з практичними результатами, є робота Z. Ungarish зі співавторами [10], де проведено симуляцію нейтронного опромінення алюмінієвого сплаву 6063 за допомогою іонів Si^+ енергією 1,1 MeV та досліджено вплив опромінення на структуру та властивості сплаву. Профілі глибини проникнення іонів у сплав, отримані за допомогою ПЗ SRIM та енергодисперсійного аналізу, представлено на рисунку 2.1. Очевидно, що пікова концентрація імплантованого кремнію становить ~ 6 ат. % на глибині ~ 1100 нм. Твердість і розрахункова межа міцності на розрив опроміненого поверхневого шару, отримані за допомогою вимірювань наноіндентування, зросли на ~ 65 % порівняно з неопроміненим зразком. Виявлено залежність теоретичного показника “зміщення на атом” (dpa) від

механічних властивостей сплаву. Загалом, показано, що іонне опромінення є дієвим методом, який слід використовувати для дослідження пошкоджень від опромінення, допомагаючи зрозуміти мікроструктурні зміни, які також можуть бути створені нейтронним опроміненням.

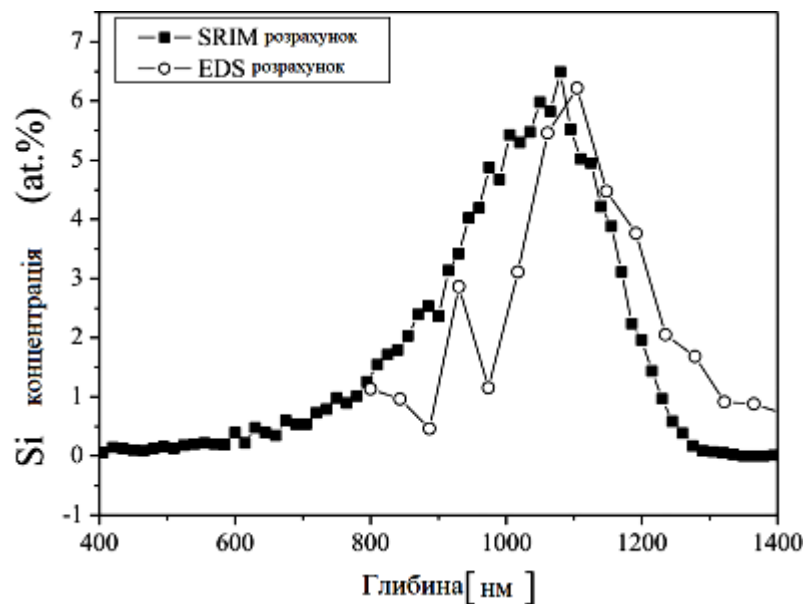


Рис.2.1 Профіль глибини проникнення іонів Si^+ у Al6063 [10]

Таким чином, опромінення іонами різних алюмінієвих сплавів є важливим напрямком у сучасному матеріалознавстві, який дозволяє модифікувати їх властивості для ряду інженерних та промислових застосувань. Наукові дослідження показують, що іонно-імплантаційна обробка може значно змінювати механічні та мікроструктурні характеристики сплавів, що доводить її перспективність для зміцнення матеріалів. Хоча в науковій літературі існують роботи присвячені дослідженню впливу іонного опромінення на алюмінієві сплави [8-10], однак, для промислової реалізації цього процесу потрібні глибокі та детальні дослідження, а також розробка відповідного експериментального обладнання, що забезпечить рівномірне та контрольоване опромінення з мінімізацією недоліків.

2.2 Опис досліджуваних алюмінієвих сплавів

У даній роботі проведено моделювання проходження пучків іонів космічного випромінювання через наступні системи алюмінієвих сплавів: Al – Mn, Al – Cu та Al – Si.

Досліджений термічно не зміцнюваний Al – Mn сплав 3003 містив 1,6 % марганцю відносно загальної маси. Вище зазначено, що марганець розчиняється у матрицях алюмінію та утворює тверді розчини фаз $Al_{12}Mn$, Al_6Mn , λ – Al_4Mn та інші до твердої фази α -Mn при 50 % масової частки. Значення 1,6 % від масової частки пояснюється тим, що при даному значенні на діаграмі стану Al – Mn (див. рис 1.6), речовина знаходиться на межі переходу до вищезгаданих фаз. Тобто, моделювання буде проводитися на алюмінієвому сплаві високої чистоти з невеликою домішкою марганцю, який зберігає свою початкову кристалічну структуру. За робочі температури прийнято такі, при яких не відбувається фазових переходів системи, що досліджується, але відбуваються зміни в областях проходження іонного випромінювання. Головною причиною такого вибору масової частки Mn є параметричні обмеження ПЗ SRIM 2013 Pro. Дане програмне забезпечення не розраховане для моделювання неоднорідних речовин, тобто, програмою не враховує наявність інтерметалідних фаз у сплаві. Як наслідок, задля уникнення проблем при моделюванні та отримання достовірних розрахунків, було розглянуто розчин марганцю у твердому алюмінії. Основні фізичні властивості дослідженого сплаву наступні: густина за кімнатної температури складає 2777 кг/м^3 , межа міцності при розтягненні $\sigma_B = 110 - 160 \text{ МПа}$ при відносному подовженні $\delta = 20 \%$.

Дослідження системи 3003 зумовлено її активним застосуванням у будівництві кулерів, фасадних панелей, теплообмінників систем охолодження, використанням у харчовій промисловості, тощо. Сплав має гарну корозійну стійкість і помірні показники міцності при гарній пластичності. Системи Al –

Mn гарно піддаються холодній обробці, добре зварюються аргоном та паяються.

Досліджений термічно зміцнюваний сплав Д16Т системи Al – Cu – Mg містив 4 % міді та 1,8 % магнію. Легування такою кількістю міді збільшує міцність, а магнію – корозійну стійкість та пластичність сплаву. Оскільки концентрація міді відносно мала, то і концентрація фаз CuAl_2 також не є великою. Обрана оптимальна концентрація, оскільки із літературного огляду відомо, що велика масова частка міді призводить до крихкості, а для ефекту зміцнення вистачить до 10 %. Сплав Д16Т є представником дюралей – деформаційний термічно зміцнюваний сплав. Основні фізичні властивості дослідженого сплаву наступні: густина за кімнатної температури дорівнює 2770 кг/м^3 , межа міцності при розтягненні $\sigma_B = 300 \text{ МПа}$, модуль пружності $E = 73 \text{ ГПа}$ при відносному подовженні $\delta = 9 \%$. Він легко оброблюється, що дозволяє виготовляти з нього деталі складних форм. Також його зручно зварювати як і Al – Mn сплав 3003. Однією з важливих областей використання сплаву Д16Т є повітряно-космічна та автомобілебудівна (див. підрозділ 1.2) для виготовлення фюзеляжів та крил літаків, лонжеронів, елементів шасі, кріпильних деталей та інших конструкцій.

Досліджений подвійний евтектичний AL2 сплав Al – Si – Fe містив 10 % кремнію та 1,5 % заліза. Його механічні властивості перш за все залежать від технології лиття сплаву. Основні фізичні властивості дослідженого сплаву наступні: густина за кімнатної температури складає 2650 кг/м^3 , межа міцності при розтягненні $\sigma_B = 120 - 220 \text{ МПа}$, модуль пружності $E = 70 \text{ ГПа}$ при відносному подовженні $\delta = 0,5-1,0 \%$. Сплав має гарні ливарні властивості, рідкоплинність та опір до утворення порожнин і тріщин. Використовується у авіабудуванні для виготовлення структурних елементів, зокрема, крил, фюзеляжів, компонентів шасі, паливних баків, обтічників, тощо.

Вибір вищезазначених сплавів пов'язаний з їх великою популярністю у різних індустріальних галузях, від будівництва літаків, автомобілів, суден, до харчової промисловості. Однак у даному дослідженні приділяється особлива увага до ефективного використання обраних сплавів у ракетно-космічному та авіаційному секторах. Оскільки літальні апарати, знаходячись у верхніх шарах атмосфери, піддаються космічному опромінюванню, його вплив на алюмінієві сплави (що є їх невід'ємними складовими) є актуальним та важливим завданням.

2.3 Особливості використаного в роботі іонного випромінювання

Космічні промені – це протони, електрони, ядра атомів, які зародилися в космічному просторі та прискорились до енергій від 10^{-3} до 10^{11} Гев. До них відносять також і субкосмічні частинки, рентгенівське та γ -випромінювання. Космічне випромінювання поділяють на первинне та вторинне. Цей поділ пов'язаний з тим, що ці дві групи мають різну природу походження. Перший вид променів приходить на Землю безпосередньо із космосу, досягаючи верхніх шарів атмосфери нашої планети, а другий – це потік електронів та піонів, які утворилися в атмосфері Землі від потоку перших [11].

Не менш важливим та цікавим в контексті даної роботи є ядерний склад космічних променів. Вимірювання складу ізотопів ядер у первинному космічному випромінюванні є складною задачею, оскільки для цього потрібно визначити масу налітаючих частинок. Під час експериментальних досліджень її визначають за допомогою черенковського лічильника, зіставляючи втрати енергії зі швидкістю (за порівняно невеликих енергій). Ядра розділяють на групи відповідно до їх властивостей, тому не потрібно розглядати кожне ядро з власним z окремо. Перша та друга групи – протони ($z = 1$) і альфа-частинки ($z = 2$). Протони складають близько 92 % космічних променів, а альфа-частинки

– 6 %. Третя група (L) [$z = 3 \dots 5$] – легкі ядра, кількість яких у первинних променях перевищує їх кількість у зорях та міжзоряному газі. Четверта група (M) [$z = 6 \dots 9$] – ядра середньої атомної маси. Їх кількість однакова як у космічних променях, так і у Всесвіті. П'ята та шоста групи (V і VH) [$z = 10 \dots 20$, $z > 20$] – важкі та надважкі ядра. Їх частка в променях дуже мала, оскільки розпадаються при взаємодії з міжзоряними протонами на більш легкі ядра [11].

У даній роботі для моделювання проходження пучків космічних променів використовувались іони $\text{Kr}^+(z = 36)$, $\text{Bi}^+(z = 83)$, $\text{Fe}^{2+}(z = 26)$ енергіями у діапазоні 26,7 – 80,1 МеВ. Зазначений вибір іонів та їх енергій пов'язаний тим, що ПЗ SRIM добре працює з важкими іонами, а отримані результати є досить точними, особливо щодо розподілу іонів по глибині зразка (зникають аномальні піки).

2.4 ПЗ SRIM 2013 Pro для моделювання проходження пучків крізь речовину. Вхідні параметри для теоретичних розрахунків

Для розрахунку пробігу іонів у твердих речовинах використовують різні програми комп'ютерного моделювання, наприклад, Geant4 та SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter). У даному дослідженні було використано ПЗ SRIM 2013 Pro як потужну програму комп'ютерної імітації моделюючих процесів, що лежить в основі реальних технологій. Програма моделює проходження іонів з енергіями до 2 ГеВ через кристалічну речовину або газ за допомогою методу Монте-Карло без урахування непружних ядерних взаємодій [14].

У ній доступні наступні моделі взаємодії налітаючих частинок з атомами мішені. (1) *Гальмування іонів та їх пробіг у мішенях* (Ion Stopping and Range in Targets): SRIM обчислює втрату енергії іонів у матеріалі. Це включає швидкі розрахунки, які створюють таблиці гальмівних здатностей, пробігу та розподілу

блукання для будь-якого іона при довільній енергії в мішені. Програма виконує ці розрахунки для складних багатошарових (до 8) матеріалів. (2) *Іонна імплантація* (Ion Implantation): іонні пучки використовуються для модифікації зразків шляхом введення атомів, що змінює хімічні та електронні властивості мішені. Іонний пучок також спричиняє пошкодження твердих мішеней шляхом зміщення атомів. Більшість кінетичних ефектів, пов'язаних з фізикою таких взаємодій, враховані в пакеті SRIM. (3) *Розпилення іонів* (Sputtering): іонний пучок може вибивати атоми з мішені, енергія іона має бути більше поверхневої енергії зв'язку. (4) *Проходження іонів* (Ion Transmission): Іонні пучки проходять через змішані шари/гази, як це, наприклад, відбувається в іонізаційних камерах або блоках для зменшення енергії іонного пучка.

Інтерфейс ПЗ SRIM показано на рисунку 2.2.



Рис.2.2 Головне меню програмного пакету SRIM 2013

Доступно три основних програми програмного пакета – Stopping/Range Tables, TRIM Calculation та Experimental Stopping Powers. Перша програма дозволяє побудувати таблиці гальмівних здатностей, пробігу та розподілу блукання для будь-якого іона при довільній енергії в мішені. Третя – експериментальні гальмівні здатності; при натисканні видає інформацію з бази

даних SRIM про експериментальні значення гальмівних здатностей для різних комбінацій іонів та мішеней. Дана програма корисна для визначення оптимальних умов введення іонів у матеріал, або ви можете скористатися першою програмою, щоб розрахувати для власного матеріалу.

Практичний інтерес представляє програма TRIM (Transport of Ions in Matter), оскільки має доволі широку спеціалізацію. Вона здатна прораховувати усі вищезгадані моделі взаємодії налітаючих частинок з атомами мішені. Розглянемо основні елементи задання вхідних параметрів моделювання, що представлені на рисунку 2.3.

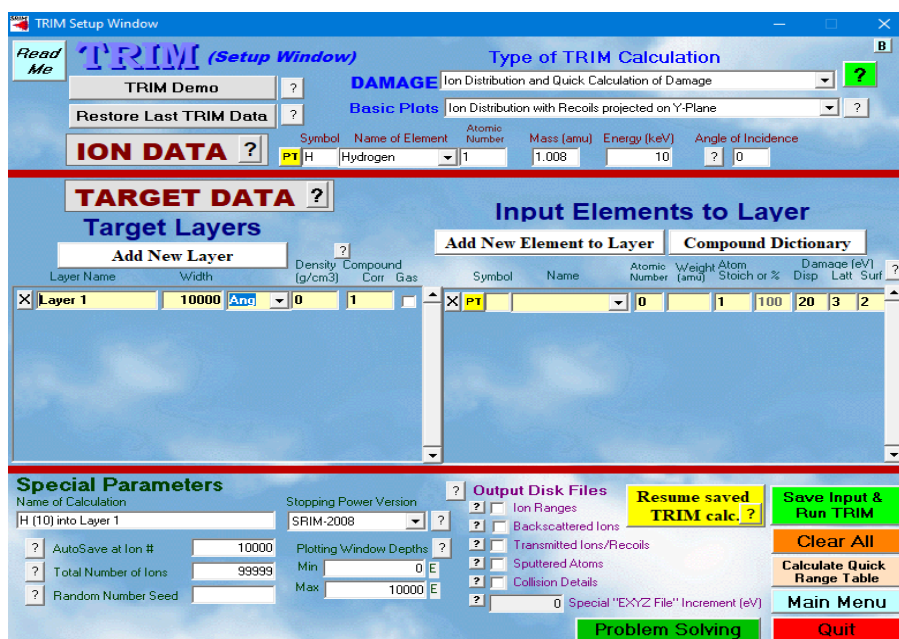


Рис.2.3. Головне вікно TRIM

У розділі ION DATA задається тип бомбардуючого іона (кнопка P1), його енергія (в KeV) і кут падіння на матеріал (angle of incidence). Система координат TRIM влаштована таким чином, що вісь OY напрямлена всередину мішені перпендикулярно до її поверхні, осі OX, OZ – в латеральній площині.

У розділі TARGET DATA задаються характеристики мішені: кількість шарів та їх хімічний склад. Для того, щоб додати шар речовини потрібно

натиснути клавішу Add New Layer. Після цього можна дати назву шару в полі Layer name, задати його товщину Width в ангстремах, мікрометрах, тощо, визначити густину Density, увести поправку на утворення хімічних з'єднань Compound Correction. Якщо потрібно працювати з газоподібними мішенями, наприклад, розглядати осцилятори, то потрібно обрати пункт Gas.

Мішень можна скласти двома способами – створити із окремих речовин або скористатися каталогом Compound Dictionary, де є готові зразки.

У розділі Special Parameters налаштовується кількість розрахункових іонів Total Number of Ion (чим більше їх, тим краща точність) та інтервал збереження результатів (мінімум 500).

У розділі Output disk files обираються файли, які потрібно зберегти (за замовчуванням зберігаються в головну теку SRIM).

Введення вхідних даних у TRIM на прикладі дослідження сплаву Al – 1.6Mn показано на рисунку 2.4.

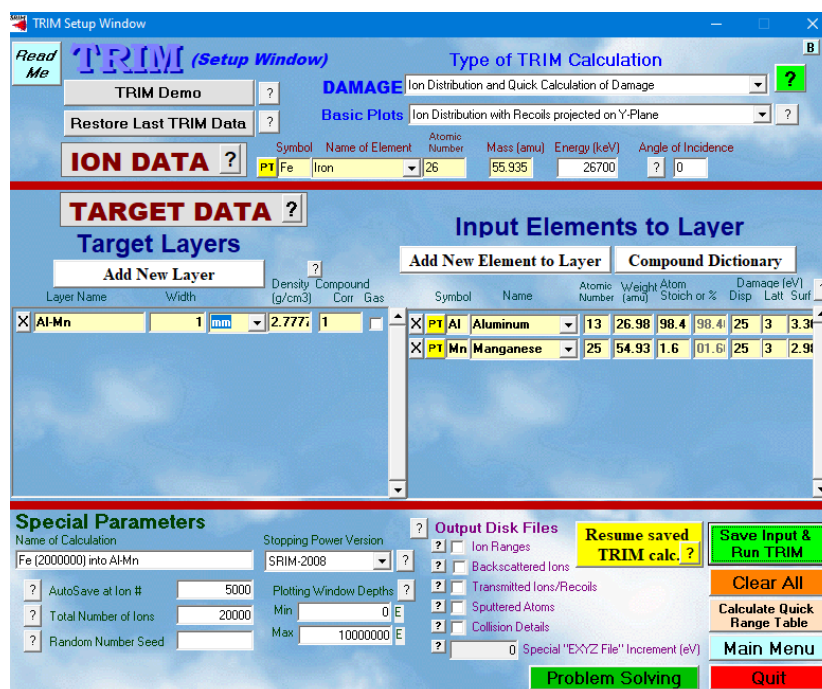


Рис.2.4. Вікно програми з вхідними параметрами моделювання для сплаву

Al – 1.6Mn

Для отримання характеристик проходження пучка були виконані такі дії. У вкладці DAMAGE у правому верхньому куті обираємо пункт Ion Distribution and Quick Calculation of Damage, пункт Basic Plots залишаємо без змін. Далі потрібно обрати тип налітаючого іона Ion Data. Для цього натискаємо на кнопку PT та обираємо його із таблиці, задаємо енергію, масу і кут падіння. Потім будуємо мішень Target Data. У випадку сплаву в нас буде один шар з заданою товщиною. У полі Input Elements to Layer натискаємо на Add New Element to Layer. Після, аналогічно як для іонів, обираємо елементи з таблиці та задаємо масове співвідношення компонентів.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОХОДЖЕННЯ ІОНІВ КРІЗЬ АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ

Моделювання проводилося за допомогою програмного пакета SRIM 2013 Pro для алюмінієвих сплавів Al – 1.6Mn, Al – 4Cu – 1.8Mg (Д16Т), Al – 10Si – 1.5Fe (АЛ2). Використовувалися VH ($z > 20$) іони космічних променів Kr^+ , Bi^+ , Fe^{2+} з енергіями 26,7 MeV, 53,4MeV та 80,1 MeV для кожного типу іона. Кожен зразок сплаву складався з одного шару з заданим на ньому стехіометрією між хімічними елементами. Товщина шару становила 1 мм, з огляду на максимальну глибину проникнення іонів, було обрано діапазон будування графіків глибини проникнення до 20 мкм, чого було більш ніж достатньо. Розрахунки проводились для 10 000 іонів для визначення характеристик проходження та 200 іонів для візуалізації їх траєкторії.

3.1 Характеристики проходження іонів для сплаву Al – 1.6Mn

Загальний вигляд траєкторії руху іонів Kr^+ крізь Al – 1.6Mn сплав для енергій 26,7 MeV, 53,4MeV, та 80,1 MeV, а також детальні графіки глибини їх проникнення та розподіл по глибині показано на рисунках 3.1 та 3.2. За представленими даними встановлено, що зі збільшенням енергії налітаючих іонів збільшується і максимальна глибина проникнення. Є кілька основних причин, чому так відбувається. *По-перше*, чим більше іони розігнані, тим вищу кінетичну енергію вони мають. Вища кінетична енергія означає, що іони можуть подолати більше зіткнень з атомами в сплаві, тобто, вони мають достатньо енергії для проникнення вглиб ґратки. *По-друге*, на низьких енергіях (тобто малих швидкостях) основним механізмом гальмування іонів є взаємодія з електронами матеріалу, що призводить до втрат енергії через збудження та іонізацію атомів.

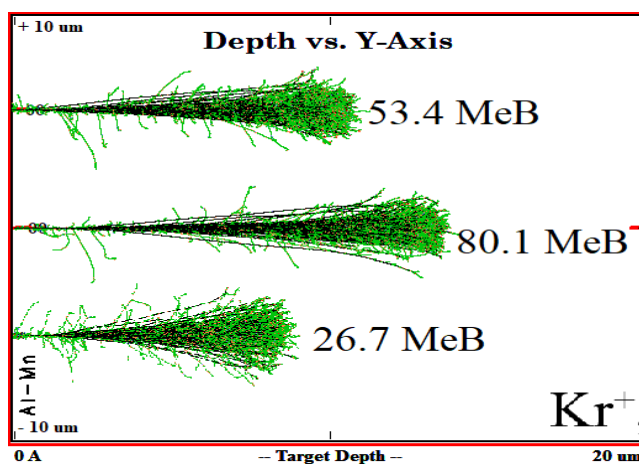


Рис.3.1 Каскади атомів Al (зелений) та Mn (жовтий) у сплаві Al – 1.6Mn.
Трасекторії руху іонів Kr⁺ – чорні лінії

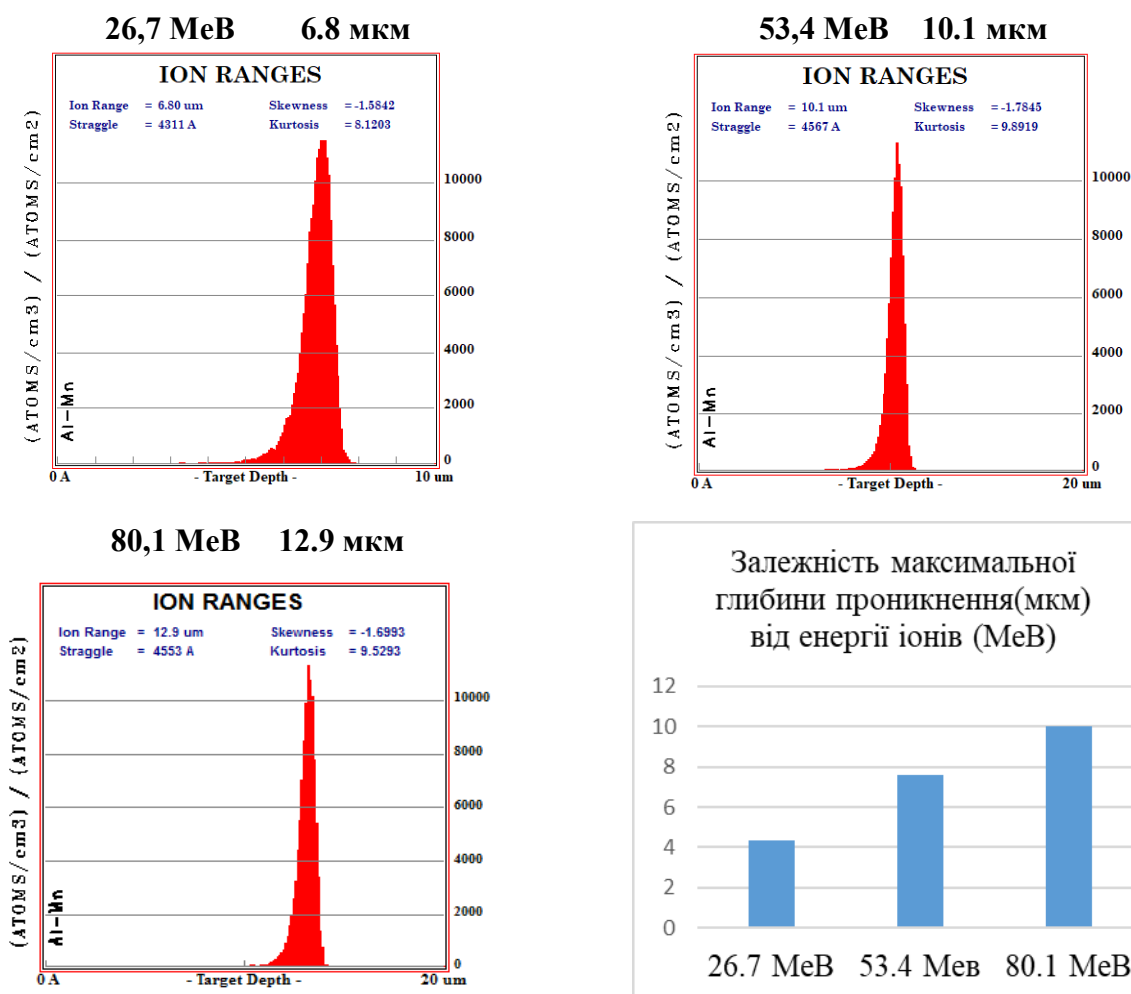


Рис.3.2 Графіки розподілу іонів Kr⁺ у сплаві у Al – 1.6Mn для різних енергій

Моделювання траєкторій для іонів Bi^+ та Fe^{2+} енергій 26,7 MeV, 53,4 MeV, 80,1 MeV дає аналогічні до рисунку 3.1. каскади та траєкторії проходження іонів для сплаву Al – Mn, які відрізнятимуться лише глибиною проникнення, графіки залежності яких представлені на рисунку 3.3.

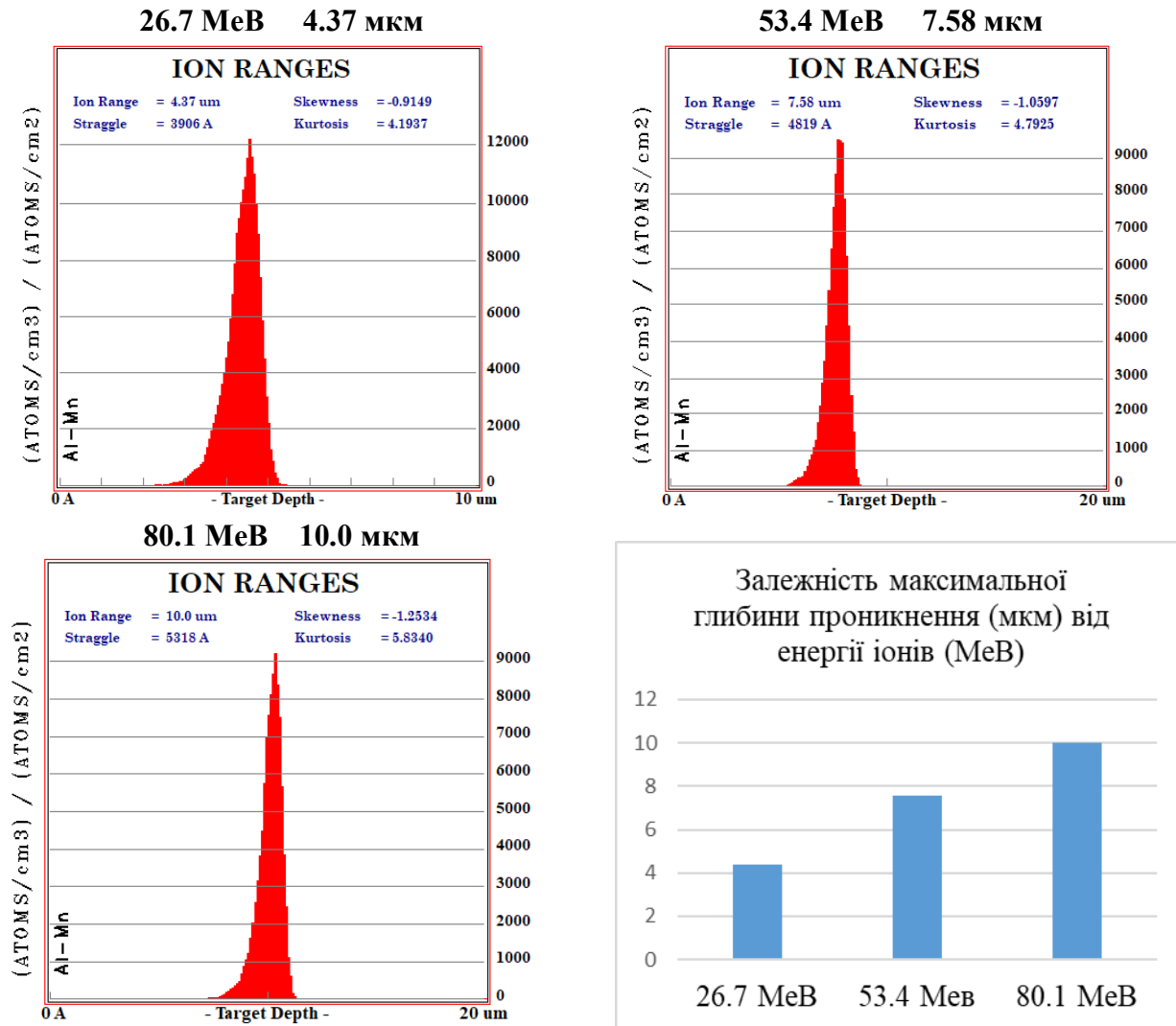


Рис.3.3 Графіки розподілу іонів Bi^+ у сплаві у Al – 1.6Mn для різних енергій

Виявлено, що для іонів Bi^+ максимальна глибина проникнення іонів не перевищує 10 мкм, хоча вони повинні мати більшу кінетичну енергію. Однак, слід враховувати, що на малих швидкостях іони починають взаємодіяти з електронними оболонками атомів, тому втрачають енергію швидше. Наочно цей факт продемонстровано на рисунку 3.4 для іонів Bi^+ мінімальної та

максимальної енергій. Цей ефект особливо виражений для надважких іонів. Очевидно, що для іонів енергії 26,7 MeV втрата найбільша, ніж для іонів енергії 80,1 MeV, що говорить про електронне гальмування на малих швидкостях.

26,7 MeV

80,1 MeV

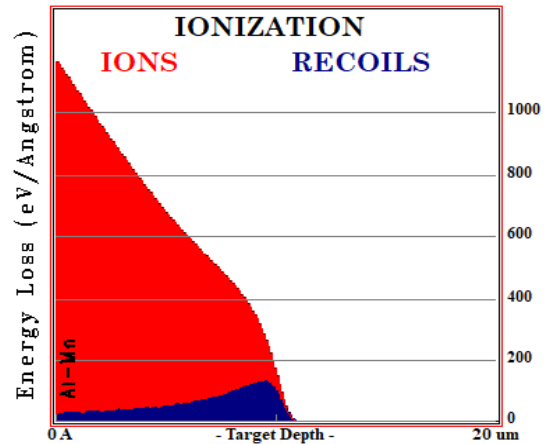
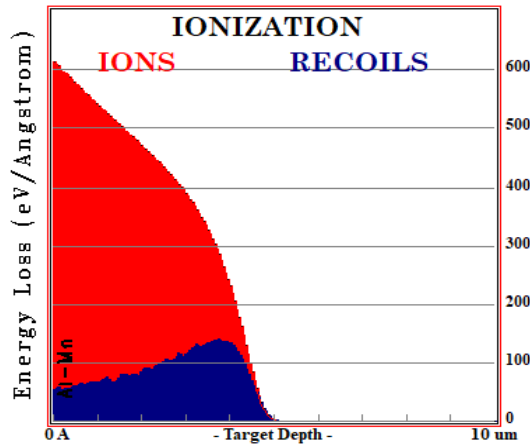


Рис.3.4 Втрата енергії іонів Bi^+ на іонізацію атомів мішені (синій колір)

За теоретичними розрахунками найбільшу глибину проникнення у сплав Al – 1.6Mn мали легкі іони Fe^{2+} (див. рисунок 3.5). Іони заліза є найлегшими у порівнянні з попередніми, тому, відповідно, мали більші швидкості та були менш схильними до іонізаційних втрат.

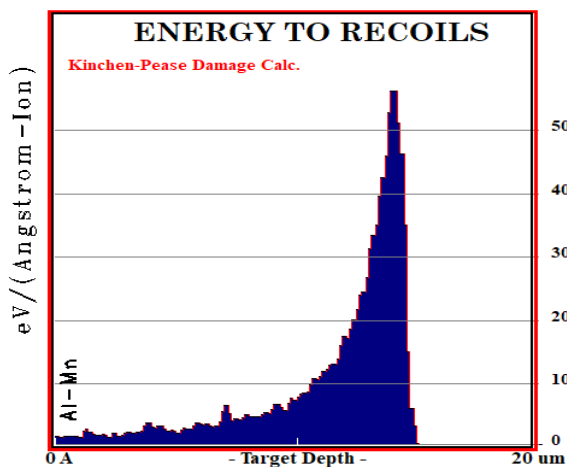


Рис.3.5 Енергія іонів Fe^{2+} , що пішла на кінетичну енергію атомів віддачі Al та Mn

Варто відзначити, що у іонів Fe^{2+} були найменші втрати кінетичної енергії на атоми віддачі.

3.2 Характеристики проходження іонів для сплаву Al – 4Cu – 1.8Mg

Для сплаву Д16Т системи Al – Cu – Mg із вмістом міді 4 % та магнію 1.8 % були отримані каскади атомів віддачі та траєкторії руху налітаючих іонів Fe^{2+} , що показані на рисунку 3.6, та графіки розподілу іонів криптону в залежності від глибини, що подані на рисунку 3.7. Для інших досліджених іонів вигляд траєкторій та розподіл іонів має аналогічний вигляд.

Якщо порівняти значення для максимальних глибин проникнення іонів Kr^+ , то можна побачити їх невелику різницю (близько 0.35 мкм). Вона зумовлена тим, що сплави мають майже однакову густину при кімнатній температурі 2770 кг/м³. Аналогічна ситуація спостерігається для іонів Fe^{2+} та Bi^+ . Пробіги незначно відрізняються завдяки внеску цільності: Д16Т має більшу густину, завдяки вмісту міді (4 %) та магнію (1.8 %), ніж Al – 1.6Mn, який містить 1.6 % марганцю. Відповідно, більш щільний сплав створює більший опір проходженню іонів Kr^+ , Fe^{2+} та Bi^+ .

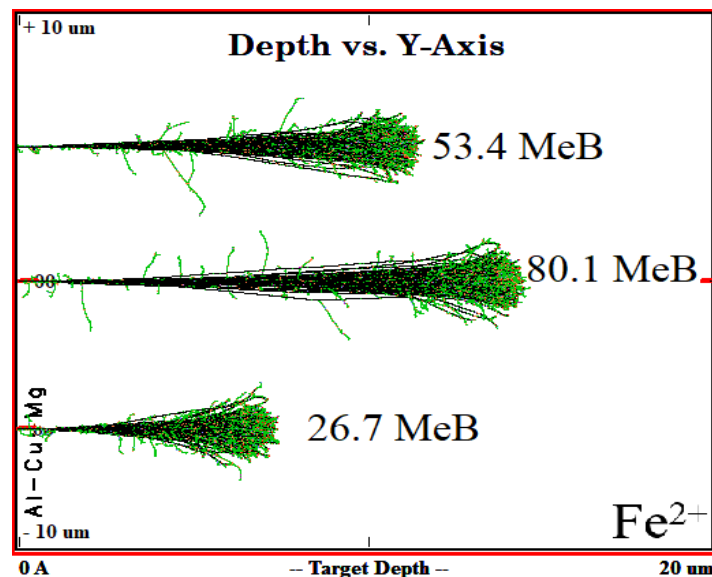
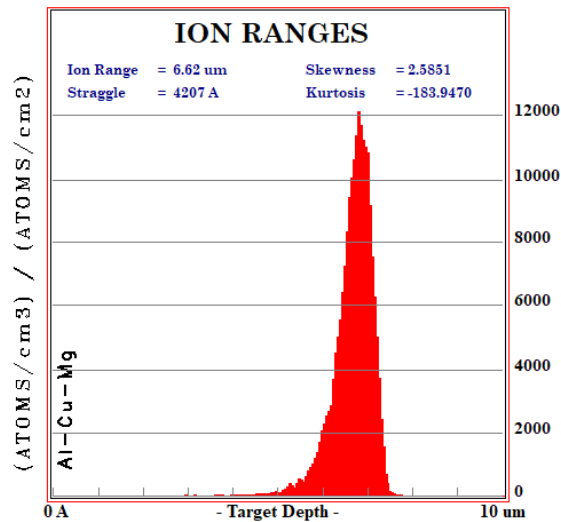
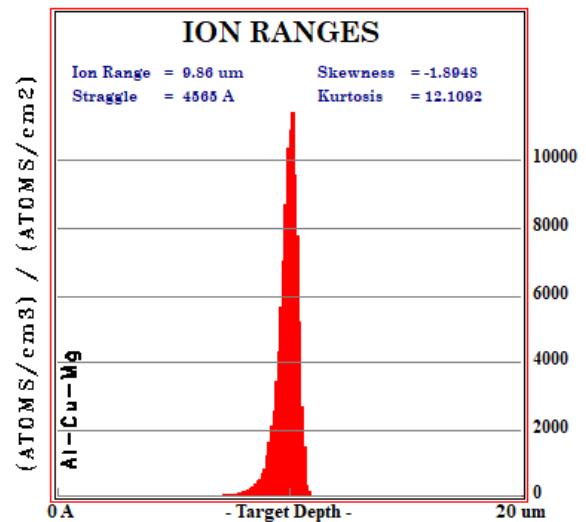


Рис.3.6. Каскади атомів Al (зелений), Cu (жовтий) та Mg (фіолетовий) у сплаві Al – 4Cu – 1.8Mg. Траєкторії руху іонів Fe^{2+} – чорні лінії

26.7 MeB 6.62 мкм



53.4 MeB 9.86 мкм



80.1 MeB 12.5 мкм

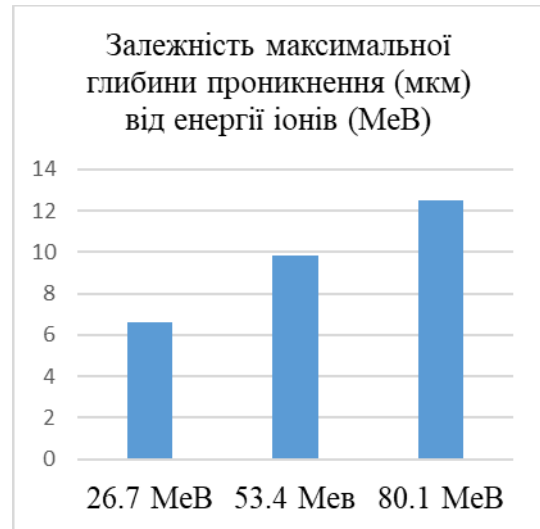
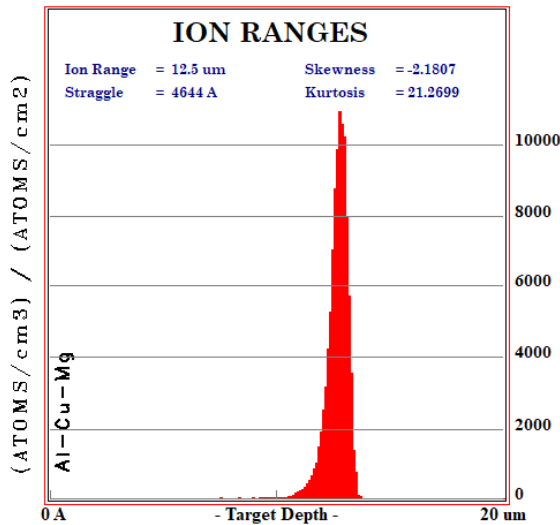


Рис.3.7 Графіки розподілу іонів Kr^+ у сплаві у $Al - 4Cu - 1.8Mg$ (Д16Т) для різних енергій

Графіки залежності втрати іонів енергії 26,7 MeB на іонізацію атомів мішені для сплаву $Al - 4Cu - 1.8Mg$ показано на рисунку 3.8. Очевидно, що втрати енергії іонів на кінетичну енергію атомів віддачі як у попередньому сплаві найбільші для важких іонів Bi^+ . Пояснення виявленого явища залишається аналогічним: для повільних іонів діють гальмівні сили, пов'язані з іонізацією атомів. Відповідно, чим менше швидкість іона тим сильніше він схильний до опору власному руху.

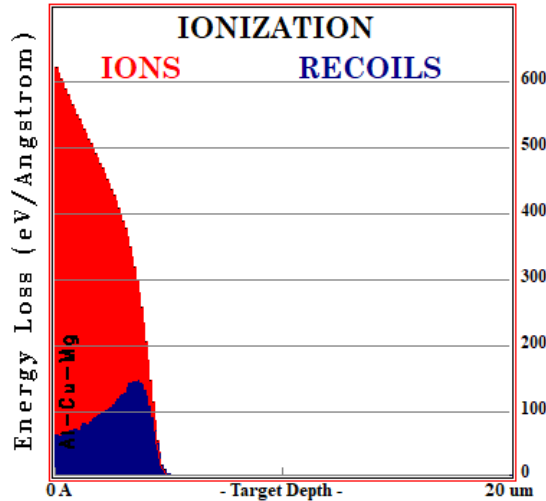
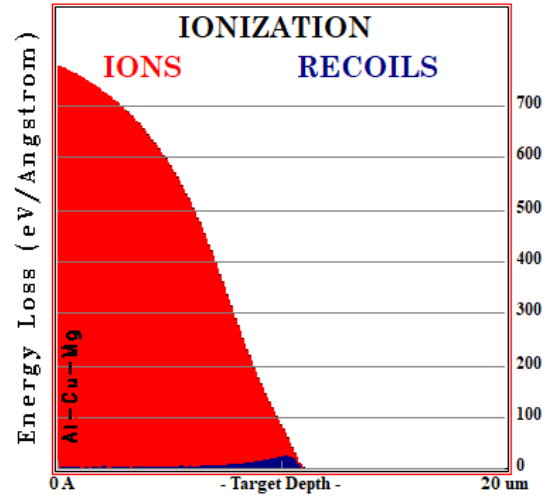
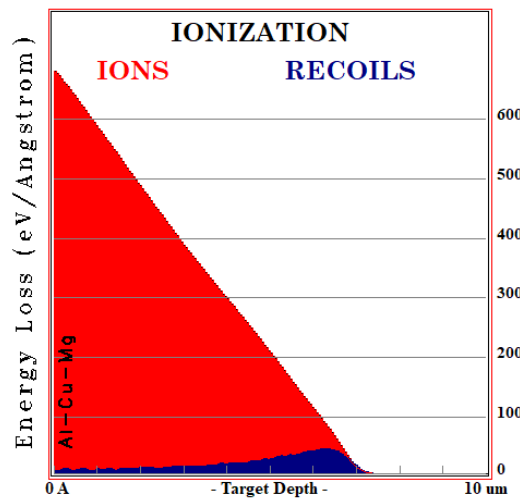
Bi⁺ 26.7 MeV**Fe²⁺ 26.7 MeV****Kr⁺ 26.7 MeV**

Рис.3.8 Втрата енергії іонів 26.7 MeV на іонізацію атомів мішені (синій колір)

Нелінійну залежність можна пояснити тим, що на більших глибинах основним механізмом втрати енергії може ставати пружне розсіювання на ядрах атомів, відповідно, це змінює характер втрат енергії і вони є нелінійними.

3.3 Характеристики проходження іонів для сплаву Al – 10Si – 1.5Fe

Сплав Al – 10Si – 1.5Fe (AL2), що містить 10 % кремнію та 1.5 % заліза були отримані каскади атомів віддачі та траєкторії руху налітаючих іонів Bi⁺, що представлені на рис. 3.9, та 3D графіки для розподілу за глибиною матеріалу, що показані на рисунку 3.10. Очевидно, що значення максимальних глибин проникнення незначно відрізняються від результатів отриманих для

іонів Bi^+ у сплаві $\text{Al} - \text{Mn}$, однак існуюча незначна різниця густин сплавів впливає на експериментально отримані результати. Це в свою чергу засвідчує чіткість обраного методу до розрахункових (вхідних) параметрів та високу точність отриманих розрахунків.

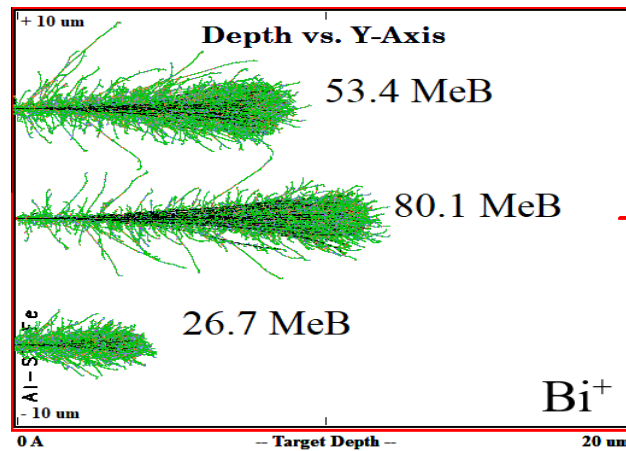
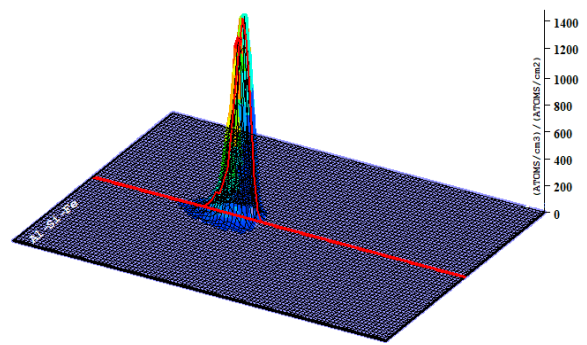
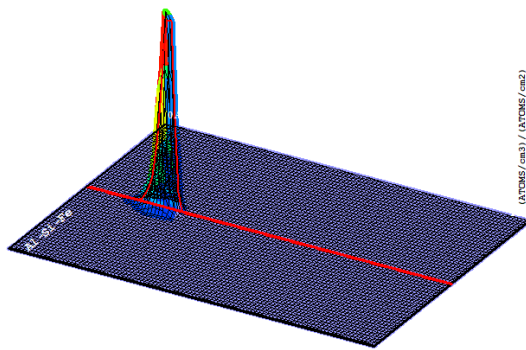


Рис.3.9. . Каскади атомів Al (зелений), Si (жовтий) та Fe (фіолетовий) у сплаві $\text{Al} - 4\text{Cu} - 1.8\text{Mg}$. Траєкторії руху іонів Bi^+ – чорні лінії

26.7 MeV 4.39 мкм

53.4 MeV 7.91 мкм



80.1 MeV 10.0 мкм

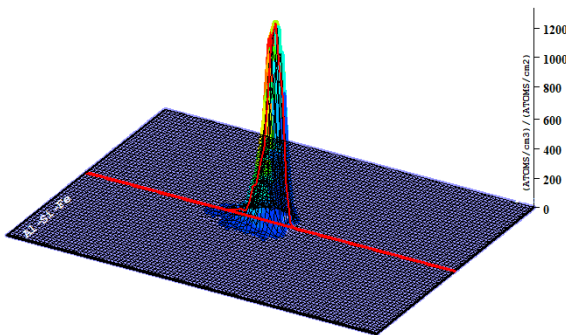


Рис.3.10 Розподіл іонів Bi^+ у сплаві $\text{Al} - 10\text{Si} - 1.5\text{Fe}$ для різних енергій

У ході проведення розрахунків також було встановлено, що іони Bi^+ енергією 80,1 MeV створюють найбільшу пікову кількість вакансій відносно кількості іонів, що графічно продемонстровано на рисунку 3.11.

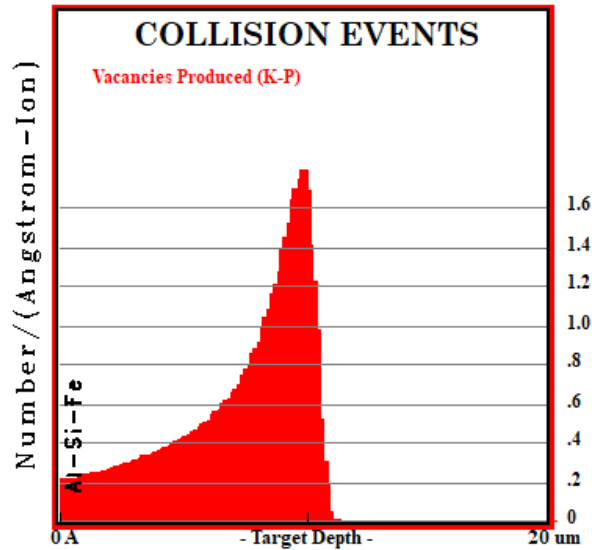


Рис.3.11 Кількість вакансій, що виникають при проходженні іонів Bi^+ через сплав $\text{Al} - 10\text{Si} - 1.5\text{Fe}$

Виявлене явище можна пояснити тим, що іони вісмуту мають значно більшу масу порівняно з іншими іонами, такими як іони криптону або заліза. Велика маса означає, що при зіткненні з атомами решітки сплаву $\text{Al} - 10\text{Si} - 1.5\text{Fe}$ вони передають значну кількість енергії, що призводить до утворення великої кількості дефектів. Скоріше за все це процеси іонізації та пружного розсіювання.

Отримані теоретичні розрахунки засвідчують, що алюмінієві сплави можуть ефективно захищати від космічного випромінювання на певній глибині[15], залежно від енергії іонів. Це важливо для розробки матеріалів та конструкцій, які використовуються в авіаційній та космічній техніці, де необхідно забезпечити надійний захист від іонного випромінювання.

ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу літературних джерел визначено, що алюмінієві сплави є широкоживаними матеріалами у різних галузях промисловості, однак, у ракетно-космічному та авіаційному секторах вони посідають особливе місце як базовий матеріал важливих елементів та деталей, що потребує ефективного використання та захисту від космічного випромінювання.

2. У результаті проведеного моделювання встановлено, що максимальна глибина проникнення іонів Kr^+ , Fe^{2+} , Bi^+ крізь алюмінієві сплави $Al - 1.6Mn$, $Al - 4Cu - 1.Mg$ та $Al - 10Si - 1.5Fe$ збільшується зі зростанням їх енергії від 26,7 до 80,1 MeV. Для енергії 26.7 MeV глибина проникнення складає 4.37 мкм, для 53.4 MeV – 7.58 мкм, а для 80.1 MeV – 10 мкм для іонів Bi^+ у сплаві у $Al - 1.6Mn$. Також виявлено, що для надважких іонів Bi^+ втрати енергії на іонізацію є найбільшими. Додатково дослідження підтвердило, що характеристики проникнення іонів у алюмінієві сплави залежать не лише від енергії випромінювання, але й від складу самих сплавів. Наприклад, присутність марганцю в сплавах сприяє утворенню твердих розчинів фаз, які можуть впливати на процеси іонного випромінювання.

3. Результати проведеного моделювання можуть бути використані для подальшого вдосконалення алюмінієвих сплавів, які застосовуються в умовах інтенсивного іонного випромінювання, та розробки нових матеріалів з поліпшеними захисними властивостями.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Калініна Н., Бондаренко О. Використання алюмінієвих сплавів в авіаційній та ракетно-космічній техніці : Навч. посіб. Дніпро : РВВ ДНУ, 2011. 64 с.
2. Densification, Microstructure, and Mechanical Properties of Additively Manufactured 2124 Al–Cu Alloy by Selective Laser Melting / J. Deng et. al. Materials. 2020. Vol. 13, No. 19. p. 4423. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13194423> (дата звернення: 09.06.2024).
3. A criterion to find crack-resistant aluminium alloys to avoid solidification cracking / Soysal T. et. al. Science and Technology of Welding and Joining. 2020. p. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1080/13621718.2020.1843260> (дата звернення: 09.06.2024).
4. Aluminum: Properties and physical metallurgy / ed. by H. J. E, A. Association, A. S. f. Metals. Metals Park, Ohio : American Society for Metals. 424 p.
5. Hydrogen Production Properties of Aluminum–Magnesium Alloy Presenting β -Phase Al₃Mg₂ / L. Cuzacq et. al. Metals. 2023. Vol. 13, No. 11. p. 1868. URL: <https://doi.org/10.3390/met13111868> (дата звернення: 08.06.2024).
6. Corrosion and Mechanical Properties of Recycled 5083 Aluminum Alloy by Solid State Recycling / Y. Chino et. al. MATERIALS TRANSACTIONS. 2003. Vol. 44, No. 7. p. 1284–1289. URL: <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.1284> (дата звернення: 09.06.2024).
7. Grain Boundary Mediated Displacive–Diffusional Formation of τ -Phase MnAl / J. M. K. Wieszorek et. al. Metallurgical and Materials Transactions A. 2010. Vol. 42, No. 3. p. 594–604. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0308-1> (дата звернення: 08.06.2024).
8. Effect of ion implantation on the properties of implantable aluminum alloys / O. Yu Usanova et. al. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. p. 022074.

URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022074> (дата звернення: 09.06.2024).

9. Effect of High Energy Ion Implantation on the Structure and Mechanical Properties of Aluminium Alloys / V. M. Anishchik et. al. *Acta Physica Polonica A*. 2017. Vol. 132, No. 2. p. 291–294. URL: <https://doi.org/10.12693/aphyspola.132.291> (дата звернення: 09.06.2024).

10. Comprehensive Study on Microstructure and Mechanical Properties of Si Ion Irradiated Al 6063 / Z. Ungarish et. al.. *Journal of Nuclear Materials*. 2021. Vol. 544. p. 152678. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152678> (дата звернення: 09.06.2024).

11. Introduction to Cosmic Rays / J. Chirinos *AIP Conf. Proc.* 2009. Vol. 1123. p. 39–47. URL: <https://doi.org/10.1063/1.3141375> (дата звернення: 09.06.2024).

12. Hartmann E. C. Structural Application of Aluminum Alloys. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1937. Т. 102, № 1. С. 1369–1384. URL: <https://doi.org/10.1061/taceat.0004831> (дата звернення: 8.06.2024).

13. Cao Y., Lados D. A. Friction Stir Processing in Wrought and Cast Aluminum Alloys. *Materials Science Forum*. 2013. Т. 765. С. 741–745. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.765.741> (дата звернення: 08.06.2024).

14. James Ziegler - SRIM & TRIM. James Ziegler - SRIM & TRIM. URL: <http://www.srim.org/> (дата звернення: 08.06.2024).

15. Nanna M. E., Bierwagen G. P. Mg-rich coatings: A new paradigm for Cr-free corrosion protection of Al aerospace alloys. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2004. Т. 1, № 2. С. 69–80. URL: <https://doi.org/10.1007/s11998-004-0001-7> (дата звернення: 08.06.2024).