

# Хімічна та радіаційна дифузія як фактор впливу на озброєння і військову техніку: загрози, наслідки та напрями протидії

## The Chemical and Radiation Diffusion as the Issue of Impact on Weaponry and Military Equipment: Threats, Results and Preventive Measures

**Артем Карпусь**

Corresponding author: ад'юнкт кафедри, e-mail: [karpusark@gmail.com](mailto:karpusark@gmail.com) ORCID ID: 0009-0003-2406-1924

**Алі Кенгерлі**

ад'юнкт кафедри, e-mail: [alikenherli@gmail.com](mailto:alikenherli@gmail.com), ORCID: 0009-0005-5794-6221

**Artem Karpus**

Corresponding author: PhD student, e-mail: [karpusark@gmail.com](mailto:karpusark@gmail.com) ORCID ID: 0009-0003-2406-1924

**Ali Kenherli**

PhD student, e-mail: [alikenherli@gmail.com](mailto:alikenherli@gmail.com), ORCID: 0009-0005-5794-6221

Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: December 19, 2025 | Revised: December 29, 2025 | Accepted: December 31, 2025

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.6.22>

**Мета роботи.** Аналітичне обґрунтування ролі хімічної та радіаційно-стимульованої дифузії як домінуючих механізмів деградації матеріалів озброєння та військової техніки в умовах сучасних бойових дій, а також розроблення науково обґрунтованих превентивних заходів щодо збереження їхньої експлуатаційної надійності та бойової ефективності.

**Метод дослідження.** Теоретичний аналіз та моделювання на основі фундаментальних законів дифузії: закони Фіка (опис дифузійного потоку та градієнту концентрації) та рівняння Арреніуса (залежність швидкості дифузії від температури та енергії активації); аналіз радіаційно-стимульованої дифузії через вакансії та міжвузлові атоми.

**Результати дослідження.** Виявлено критичний вплив дифузійних процесів на ОБТ: водневе окрихчення стволів артилерії та шасі авіації; деградація електроніки (мікросхем, GPS) через радіацію; зміна властивостей мастил та гумових ущільнювачів; втрата захисних властивостей броні через радіаційно-індуковану сегрегацію хрому. Обґрунтовано необхідність прогнозування залишкового ресурсу техніки в зонах бойових дій.

**Теоретична цінність дослідження.** Поглиблення наукових знань про синергетичний ефект спільного впливу хімічної деградації та радіаційного зміцнення на живучість систем ОБТ. Розробка комплексного підходу до оцінки радіаційно-стимульованої дифузії у конструкційних матеріалах (броньові сталі MIL-A-12560 та ін.) в умовах сучасних бойових дій.

**Тип статті:** Дослідницька.

**Purpose.** To analytically substantiate the role of chemical and radiation-stimulated diffusion as dominant mechanisms of material degradation in weaponry and military equipment under modern combat conditions, and to develop evidence-based preventive measures for maintaining their operational reliability and combat effectiveness.

**Method.** The research utilizes theoretical analysis and modeling based on fundamental diffusion laws, including Fick's laws (describing diffusion flux and concentration gradient) and the Arrhenius equation (addressing the dependence of diffusion rate on temperature and activation energy). It also includes an analysis of radiation-stimulated diffusion (RSD) through vacancies and interstitial atoms.

**Findings.** The study identified a critical impact of diffusion processes on WME, specifically: hydrogen embrittlement of artillery barrels and aviation chassis; degradation of electronics (microchips, GPS) due to radiation; changes in the properties of lubricants and rubber seals; and the loss of protective properties of armor due to radiation-induced chromium segregation. It justifies the necessity of predicting the residual resource of equipment in combat zones.

**Theoretical implications.** The research deepens scientific knowledge regarding the synergistic effect of chemical degradation and radiation hardening on the survivability of WME systems. It develops a comprehensive approach to evaluating RSD in structural materials, such as MIL-A-12560 armor steels, under modern combat conditions.

**Paper type.** Research.

**Ключові слова:** озброєння та військова техніка, хімічна дифузія, радіаційно-стимульована дифузія, деградація матеріалів, водневе окрихчення, броньова сталь, радіаційно-індукована сегрегація.

**Key words:** Weaponry and Military Equipment, Chemical Diffusion, Radiation-Stimulated Diffusion, Material Degradation, Hydrogen Embrittlement, Armor Steel, Radiation-Induced Segregation.

### Вступ

Сучасна експлуатація озброєння та військової техніки (ОБТ) здійснюється в умовах екстремальних навантажень і підвищених ризиків впливу небезпечних хімічних речовин (НХР), за яких надійність матеріалів безпосередньо визначає рівень боєздатності підрозділів та успішність виконання ними поставлених завдань. Хімічна та радіаційна дифузія є фундаментальними фізико-хімічними процесами, що зумовлюють деградацію металів, сплавів і полімерних матеріалів. Одним із практичних завдань оборони України є необхідність прогнозування залишкового ресурсу ОБТ, яке експлуатується в зонах інтенсивних бойових дій.

Крім того, важливим науково-практичним завданням є визначення впливу радіаційних і хімічних речовин у процесі дифузії на залишковий ресурс ОБТ.

### **Теоретичні основи дослідження**

Аналіз останніх досліджень і публікацій з проблематики дифузії в конструкційних матеріалах представлений у фундаментальних працях, у яких описано закони Фіка та рівняння Арреніуса. Водночас специфіка впливу радіаційно-стимульованої дифузії (РСД) на броньові сталі (MIL-A-12560), авіаційні компоненти та інші матеріали в сучасних умовах ведення бойових дій потребує додаткового наукового висвітлення. Невирішеною залишається проблема формування комплексного підходу до оцінювання спільного впливу хімічної деградації та радіаційного зміцнення на живучість систем ОБТ, а також визначення шляхів зниження ризиків деградації матеріалів.

**Метою цього дослідження** є аналітичне обґрунтування ролі хімічної та радіаційно-стимульованої дифузії як домінуючих механізмів деградації матеріалів ОБТ в умовах сучасних бойових дій, а також розроблення науково обґрунтованих превентивних заходів щодо збереження їхньої експлуатаційної надійності та бойової ефективності.

### **Постановка проблеми**

Під час експлуатації техніки, що піддається опроміненню (наприклад, у разі роботи в зоні застосування тактичної ядерної зброї або на атомних підводних човнах), усередині металу накопичуються продукти ядерних реакцій, зокрема гелій. Унаслідок РСД атоми гелію агрегуються та формують бульбашки. Прикладом цього є корпуси реакторів атомних підводних човнів (класу "Virginia" або "Borei"), які зазнають постійного нейтронного опромінення [27]. Радіаційна дифузія спричиняє фізичне збільшення об'єму металу (розпухання), що призводить до зміни початкових геометричних розмірів деталей і формування значних внутрішніх напружень, які можуть зумовити втрату герметичності корпусу на великих глибинах [6].

### **Результати та обговорення**

Деградація напівпровідникової електроніки є критичною проблемою для сучасної військової техніки, оскільки дрони, системи ППО, ПТРК та ракети HIMARS значною мірою залежать від надійності мікросхем [8]. Радіаційна дифузія домішок у напівпровідниках під впливом іонізуючого випромінювання призводить до зміни характеристик р-п переходів. Прикладом цього є супутники військового зв'язку та навігації (GPS), які постійно перебувають під впливом космічної радіації. Дифузія атомів усередині транзисторів під дією випромінювання спричиняє появу "струмів витоку" [9]. У результаті цього процесу процесор супутника починає генерувати помилки, що робить наведення високоточної зброї неможливим.

Радіаційний вплив стимулює дифузію радикалів у мастильних матеріалах, що призводить до їхньої полімеризації. Прикладом цього є мастила в редукторах вертольотів, які працюють у зоні радіаційного забруднення (Chornobyl NPP, "Fukushima-1"): унаслідок радіаційної дифузії та супутніх хімічних змін вони перетворюються на густу смолу за лічені години [28]. Загущування мастил призводить до заклинювання механізмів і втрати працездатності агрегатів.

У результаті комплексного впливу на бойову ефективність поєднання хімічної та радіаційної дифузії формує синергетичний ефект, який істотно прискорює знос військової техніки. Втрата захисних властивостей броні внаслідок дифузії вуглецю (декарбюризації) за високих температур під час вибухів або пожеж призводить до розм'якшення верхнього шару броні. За наявності додаткового радіаційного впливу структура сталі зазнає таких змін, що матеріал втрачає здатність витримувати влучання кумулятивних струменів [26, 29]. Для

оптичних приладів дифузія радіоактивних ізотопів або агресивних газів у скло нічних прицілів і тепловізорів спричиняє його “потемніння”. Лінзи втрачають прозорість, що робить системи спостереження (наприклад, на танках Abrams або Leopard) неефективними в нічний час [29].

Для більш детального формулювання теоретичних засад дифузійних процесів у матеріалах доцільно проаналізувати основні положення, що описують ці процеси.

Хімічна дифузія — це переміщення атомів, зумовлене різницею концентрацій (хімічним градієнтом) [1]. Хімічна дифузія відіграє критично важливу роль у військовій галузі — від створення надміцної броні до розвитку процесів деградації озброєння та військової техніки.

Перший закон Фіка є математичним виразом, що описує процеси хімічної дифузії. Саме закон Фіка пояснює, яким чином речовина переміщується із зони високої концентрації в зону низької концентрації, і має такий вигляд:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

- де  $J$  — дифузійний потік (кількість речовин, що проходять через одиницю площі за одиницю часу);
- $D$  — коефіцієнт дифузії (характеризує швидкість проникнення речовини в конкретне середовище);
- $dC/dx$  — градієнт концентрації (різниця концентрацій речовини на певній відстані).

Негативний вплив хімічної дифузії проявляється у погіршенні механічних, термічних і хімічних властивостей матеріалів [18]. Хімічна дифузія використовується в багатьох промислових процесах (наприклад, легування, цементация), однак водночас є однією з головних причин деградації та руйнування матеріалів під час їх експлуатації [22]. Найбільш поширеними проявами є водневе окрихчення, утворення пір, деградація захисних покриттів, корозія, високотемпературне окислення, деградація компонентів у літій-іонних батареях та інші процеси.

**Водневе окрихчення (Hydrogen Embrittlement – HE) [23].** Це один із найбільш небезпечних і водночас добре вивчених проявів дифузії, особливо для високоміцних сталей і титанових сплавів, що входять до складу броні (MIL-A-12560 та MIL-A-46100) озброєння та військової техніки. У стволах важких артилерійських систем (наприклад, PzH 2000 або M777) під час пострілу утворюється хмара газів із високим вмістом водню за умов підвищеного тиску [25]. Дифузія водню в метал ствола призводить до того, що пластична сталь набуває крихких властивостей, подібних до скла. Це може спричинити “втому металу” значно раніше розрахункового терміну, а в гіршому випадку — розрив ствола під час чергового пострілу. Іншим сценарієм є ситуація, коли деталь витримує пікове навантаження, але руйнується на фрагменти через кілька годин у стані спокою [29].

Замість поглинання енергії снаряда або уламка шляхом пластичної деформації матеріал розколюється на фрагменти. У структурі металу з’являються “флокени” — внутрішні мікротріщини, які є невидимими ззовні, але критично послаблюють захисні властивості. Атоми водню (H) мають малий розмір і легко дифундують у кристалічну ґратку металу, накопичуючись у дефектах структури (вакансіях, межах зерен, дислокаціях) [21]. Акумуляція водню знижує пластичність і в’язкість металу, роблячи його крихким. Це може призвести до раптового, катастрофічного руйнування компонента під статичним або динамічним навантаженням у процесі експлуатації. У ряді випадків руйнування компонента відбувається за напружень, нижчих за межу текучості матеріалу.

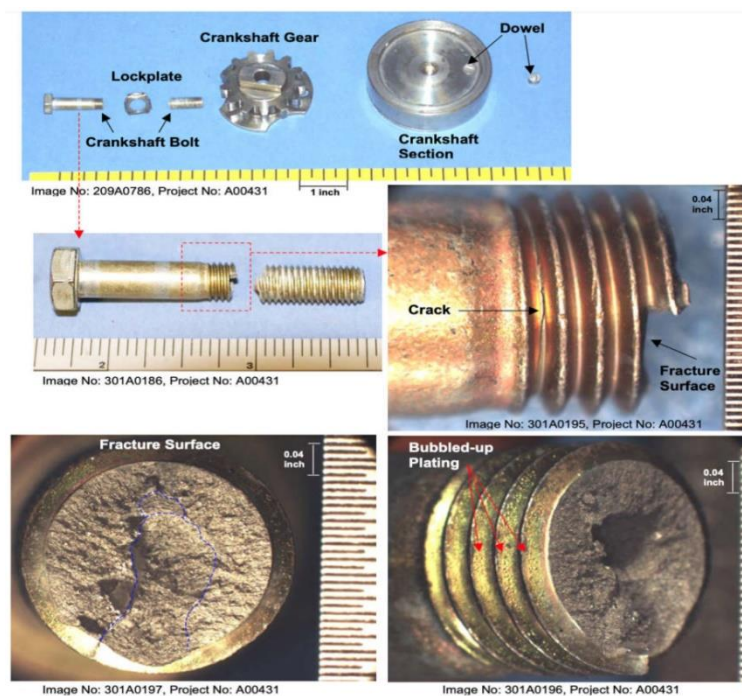
Особливо критичним водневе окрихчення є для стволів артилерії та вогнепальної зброї. Саме в ракетно-артилерійському озброєнні високі тиски та температури під час пострілу суттєво прискорюють дифузію водню, що може призвести до розриву ствола [29]. Не менш

уразливими є шасі авіаційної техніки: стійки шасі виготовляються з надміцних сталей, які є найбільш чутливими до водневого окрихнення, що становить серйозну загрозу для подальшої експлуатації літальних апаратів, рис. 1. Навіть мікроскопічна кількість водню може спричинити катастрофічне руйнування під час посадки [29].



**Рисунок 1** – Негативний вплив водневого окрихнення на шасі авіаційної техніки

У ракетних двигунах, вузлах кріплення авіаційних бомб та агрегатах бронетехніки застосовуються болти класу міцності 10.9 або 12.9., рис. 2. Водневе окрихнення спричиняє їхнє раптове самовільне руйнування (“затримане руйнування”) навіть у стані спокою [29].



**Рисунок 2** – Негативний вплив водневого окрихнення на болти класу міцності 10.9 або 12.9.

Деякі види палива або продукти їхнього розпаду сприяють активній дифузії водню в стінки баків та трубопроводів.

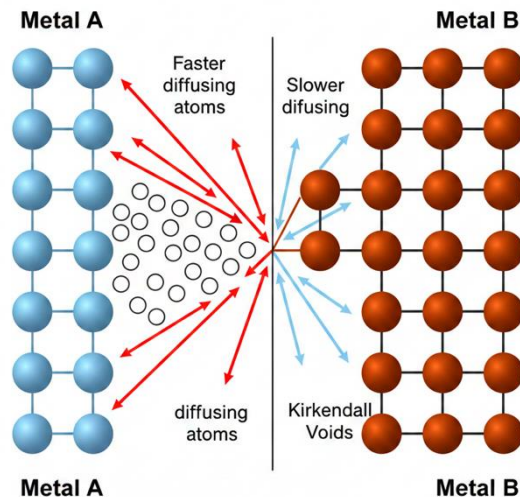
**Таблиця 1 – Приклади впливу водню на різні ОВТ [29]**

Матеріал	Чутливість	Наслідки для техніки
Високоміцна сталь	Дуже висока	Раптовий злам валів, болтів, стійок шасі.
Титан та його сплави	Висока	Утворення гідридів, що робить лопатки турбін крихкими.
Алюмінієві сплави	Середня	Розшарування та корозійне розтріскування корпусів.

### Ефект Кіркендала (Kirkendall Effect) та утворення пір [18].

У процесі інтердифузії двох різних матеріалів (наприклад, у зварних швах, біметалевих з'єднаннях або покриттях) коефіцієнти дифузії атомів можуть істотно відрізнятися. Якщо атоми матеріалу А дифундують у матеріал В швидше, ніж атоми матеріалу В у матеріал А, то в матеріалі А формується надлишковий потік вакансій. Ці вакансії конденсуються з утворенням пор Кіркендала (порожнин) [18], які локалізуються на межі розділу або в безпосередній близькості до неї. Утворення таких пор призводить до зниження міцності та щільності матеріалу, особливо в умовах високотемпературної експлуатації конструкцій.

На рисунку 3 показано, що внаслідок різниці швидкостей дифузії атоми металу А переміщуються швидше, ніж атоми металу В, у результаті чого формується нерівномірний потік речовини. Утворення пор зумовлене тим, що "швидкі" атоми залишають свої кристалічні позиції швидше, ніж "повільні" атоми встигають їх зайняти; у металі при цьому виникають вакансії, які з часом об'єднуються в мікроскопічні пори.

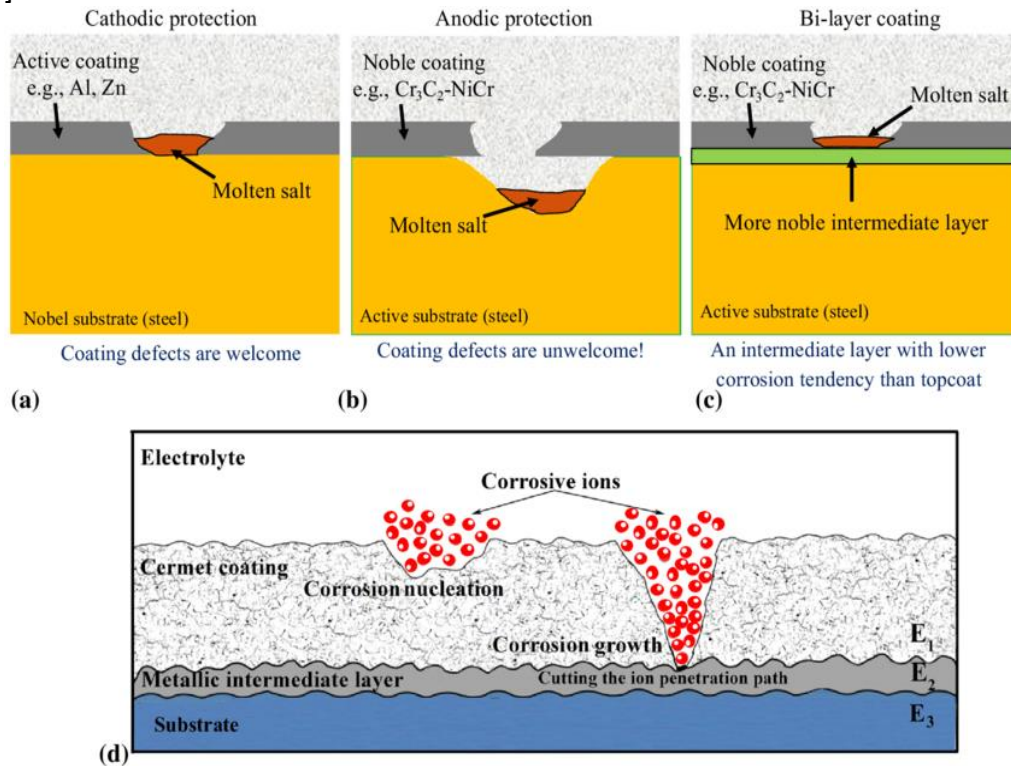


**Рисунок 3 – Ефект Кіркендала [18]**

### Деградація захисних покриттів та з'єднань [25].

Хімічна дифузія є ключовим фактором, що обмежує термін служби захисних покриттів, паяних і зварних швів. Атоми основного матеріалу дифундують у захисне покриття або, навпаки, атоми покриття дифундують в основу. Це призводить до утворення інтерметалідних

фаз (нових хімічних сполук) на межі розділу [25]. У результаті дифузії атомів з основи на поверхню прискорюються процеси окислення або корозії. Утворені інтерметаліди часто є крихкими (наприклад, в електронних паяних з'єднаннях), що робить з'єднання чутливими до механічних і термічних навантажень. Своєю чергою, це явище визначається як окрихчення з'єднань [24].



**Рисунок 4** – Типи пошкоджень покриттів та додаткового захисту залежно від їхнього корозійного потенціалу: *a* – катодний захист, *b* – анодний захист, *c* – двошарове покриття, *d* – вплив корозійного потенціалу у верхньому шарі та шарі сполученого шару матеріалу

#### Корозія та високотемпературне окислення [23].

Атоми кисню, сульфору та інших агресивних елементів дифундують у матеріал або, навпаки, атоми металу дифундують на поверхню, де вступають у хімічну взаємодію із зовнішнім середовищем [23]. Особливо за високотемпературних умов швидкість дифузії зростає експоненційно, що істотно прискорює формування оксидних шарів, які можуть розтріскуватися та відшаровуватися.

В озброєнні та військовій техніці швидкість дифузії критично залежить від температури (під час роботи двигуна або здійснення пострілу), що, своєю чергою, описується рівнянням Арреніуса [29]:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

- де  $Q$  – енергія активації дифузії;  
 $R$  – універсальна газова стала;  
 $T$  – абсолютна температура.

У реактивних двигунах літаків і крилатих ракет (наприклад, двигунах сімейства AL-31 або F135) лопатки турбін працюють за температур, близьких до точки плавлення металу [28]. За таких умов швидкість дифузії кисню та азоту вглиб металу зростає експоненційно. У цьому

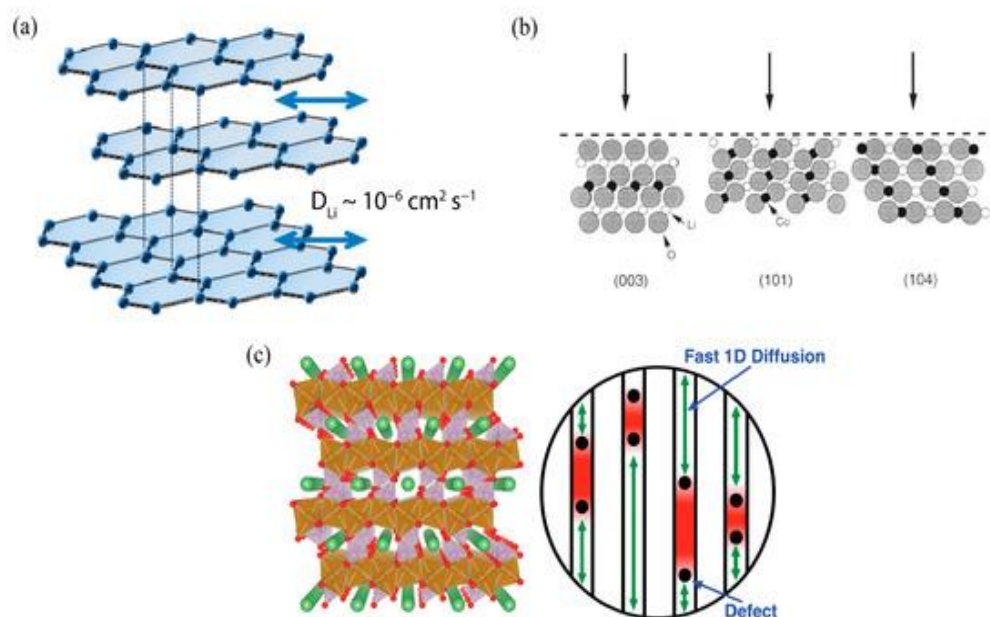
випадку дифузія кисню призводить до утворення внутрішніх оксидів, які знижують міцність монокристалічних лопаток. Якщо захисне керамічне напилення має мікротріщину, дифузія фактично “спалює” лопатку зсередини за лічені години роботи, що може призвести до руйнування двигуна в польоті [28].

Дифузія палива в гумові ущільнювачі та шланги (і навпаки — пластифікаторів із гуми в паливо) змінює фізичні властивості матеріалів. Під час тривалого зберігання техніки на консервації (наприклад, танків Т-64 або БМП на складах) дифузійні процеси призводять до втрати еластичності паливних шлангів [19]. Під час спроби запуску двигуна внаслідок вібрації такі шланги розтріскуються, що може спричинити пожежі в моторно-трансмісійному відділенні.

Дифузія молекул води через ущільнювачі призводить до конденсації на лінзах за умов перепадів температур. Крім того, під дією іонізуючого випромінювання в склі дифундують дефекти (“центри забарвлення”), що зумовлює зниження прозорості оптики (танки, БМП, ПТРК та інше).

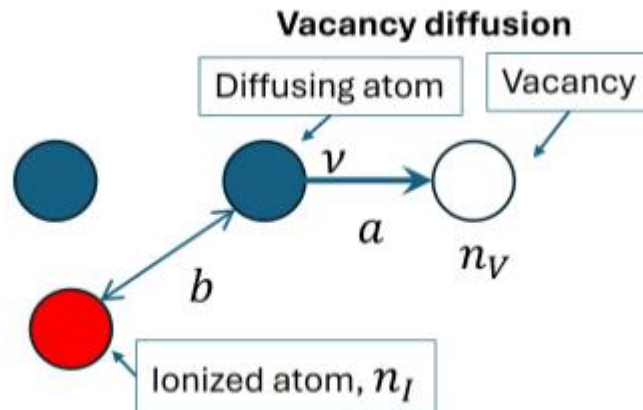
#### Деградація компонентів у батареях (літій-іонних) [24].

У сучасних накопичувачах енергії дифузія є основою їх функціонування, проте водночас виступає однією з головних причин деградації. Багаторазове дифузійне впровадження та вивільнення (інтеркаляція) [24] іонів (наприклад, літію) в матеріал електрода призводить до істотних змін об’єму частинок. Такі об’ємні зміни зумовлюють виникнення внутрішніх напружень, що, своєю чергою, призводить до механічних пошкоджень, руйнування частинок і поступової втрати ємності батареї з часом.



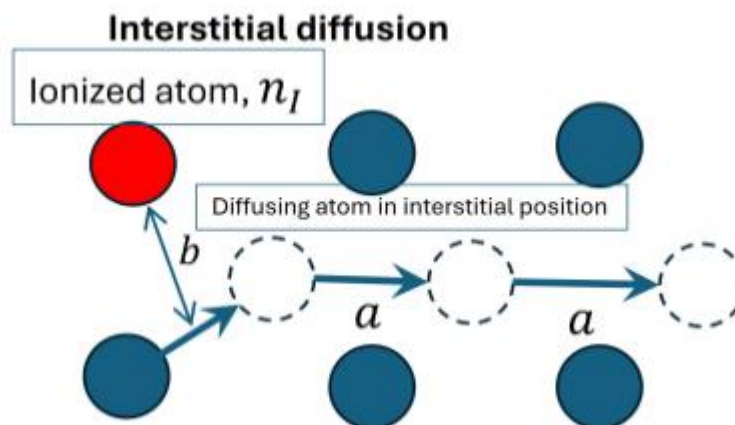
**Рисунок 5** – Анізотропія дифузійного коефіцієнта іонів літію в кристалічних електродах: *a* – графіт, *b* – літій-кобальт-оксидний акумулятор (LCO,  $\text{LiCoO}_2$ ), *c* – літій-залізо-фосфатний акумулятор (LFC,  $\text{LiFePO}_4$ ) [24]

**Радіаційно-стимульована дифузія** прискорює рух атомів за рахунок генерації значної кількості дефектів під дією опромінення [2, 3]. У багатьох випадках РСД має негативний вплив на експлуатаційні властивості різних конструкційних матеріалів. Радіаційно-стимульована дифузія може порушувати стехіометрію та кристалічну структуру матеріалів [3]. Це відбувається внаслідок того, що опромінення спричиняє утворення пар дефектів (вакансій і міжвузлових атомів), які істотно прискорюють дифузію атомів у кристалічній ґратці.



**Рисунок 6** – Дифузія, опосередкована вакансіями (Vacancy mediated diffusion)

На рисунку 6 показано, яким чином іонізований атом створює кулонівське відштовхування, що сприяє переміщенню сусідніх іонів у вакантні ділянки. Де  $n_I$  та  $n_V$  позначають концентрації іонізованих атомів і вакансій,  $b$  – відстань між ними,  $a$  – середню відстань, на яку переміщується іон (крок стрибка) [6].



**Рисунок 7** – Міжвузлова дифузія (Interstitial diffusion) [6]

На рисунку 7 ілюструється, як дифузія іонів відбувається через міжвузлові положення під впливом електричних сил [6], спричинених іонізованими атомами, що утворилися внаслідок опромінення. Де  $n_I$  та  $n_V$  позначають концентрації іонізованих атомів і вакансій,  $b$  – відстань,  $a$  – середню відстань, на яку переміщується іон (крок стрибка) [6].

Загальний ефективний коефіцієнт самодифузії за умов РСД може бути записаний як сума двох компонентів, зумовлених наявністю вакансій і міжвузлових атомів:

$$D' = D_u c_u + D_i c_i \quad (3)$$

- де  $D'$  – ефективний коефіцієнт самодифузії під опроміненням;  
 $D_u$  та  $D_i$  – коефіцієнт дифузії вакансій та міжвузлових атомів відповідно;  
 $c_u$  та  $c_i$  – коефіцієнт вакансій та міжвузлових атомів відповідно.

Радіаційно-стимульована дифузія та збіднення хрому (Cr) є головними факторами, що сприяють корозійному розтріскуванню під навантаженням, стимульованому опроміненням (Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking, IASCC) [1, 7]. Вони зумовлюють виникнення

механічної та хімічної вразливості матеріалів. Механічна вразливість призводить до радіаційного зміцнення, тобто підвищення твердості основної матриці металу. Оскільки зміцнена матриця поглинає меншу частку пластичної деформації, механічне навантаження концентрується на м'якших і хімічно вразливих межах зерен, що прискорює зародження та розвиток тріщин [1]. На відміну від механічної, хімічна вразливість призводить до збіднення хромом меж зерен, які в подальшому легко піддаються міжкристалітній корозії [7].

Результатом негативного впливу РСД є зміна хімічного складу та структури матеріалів, що зазнають опромінення. Однією з характерних ознак РСД є радіаційно-індукована сегрегація (PIS) [4], яка призводить до прискореної міграції легуючих елементів до стоків дефектів (меж зерен) [3], зокрема хрому (Cr).

Хром (Cr) є одним із ключових елементів, що забезпечують пасивність нержавіючих сталей (утворення захисного оксидного шару  $Cr_2O_3$ ), а також входить до складу сталей, з яких виготовляється броня для озброєння та військової техніки. Хром і нікель є фундаментальними легуючими елементами, які визначають якість, міцність і довговічність критично важливих матеріалів, що застосовуються у військовій техніці — від броні до реактивних двигунів. Їхня синергія забезпечує необхідний баланс твердості (опір проникненню) та в'язкості (опір руйнуванню) [7–9]. Леговані броньові сталі (наприклад, типи MIL-A-12560 та MIL-A-46100) майже завжди містять як хром, так і нікель, оскільки ці елементи виконують взаємодоповнюючі функції:

**Нікель (Ni)** значно підвищує ударну в'язкість (toughness) сталі, особливо за низьких температур. В'язкість є критично важливою для броні, оскільки вона дозволяє матеріалу поглинати енергію удару шляхом пластичної деформації без крихкого руйнування та розтріскування [7, 9].

**Хром (Cr)** підвищує прогартовуваність (здатність сталі тверднути на значну глибину) та твердість (hardness), що є необхідним для протидії проникненню кінетичних снарядів [8]. Крім того, хром сприяє утворенню карбідів, які підвищують зносостійкість матеріалу (наприклад, у стволах гармат) [10].

Наслідком зазначених процесів є локальна зміна хімічного складу (зокрема збіднення хромом меж зерен у нержавіючих сталях), що призводить до втрати корозійної стійкості та підвищеної вразливості до міжкристалітної корозії [2, 3].

У результаті PIS хром мігрує від меж зерен у матрицю матеріалу [4]. На межах зерен формується мікроскопічна зона, у якій вміст хрому може знижуватися нижче 12 % — критичної концентрації для формування стабільної пасивної плівки [3]. Така концентрація не забезпечує основної мети легування хромом сталей, призначених для виготовлення броні. Збіднена зона стає анодом у корозійній парі, що робить її надзвичайно вразливою до дії агресивного теплоносія джерела опромінення.

Таким чином, РСД, ініціюючи PIS, перетворює хімічно стійкий матеріал на матеріал із локалізованими корозійними пастками — межами зерен [3, 4]. Це є однією з ключових проблем довговічності конструкційних матеріалів броні та металевих виробів, що зазнають радіоактивного впливу (ядерні реактори тощо).

За тривалого перебування техніки в зонах із підвищеним радіаційним фоном відбувається PIS: хром дифундує від меж зерен, тоді як фосфор і сірка — до них. Результатом такого перерозподілу є негативний вплив на броню: матеріал стає крихким, схильним до крихкого руйнування, і втрачає корозійну стійкість.

Радіаційно-стимульована дифузія може прискорювати або індукувати утворення нових небажаних фаз (наприклад, крихких осадів), які не формувалися б за робочих температур без опромінення [5]. Такий процес має назву фазового перетворення. В окремих випадках РСД може також призводити до розчинення стабільних осадів і зміни механічних властивостей матеріалу [3], що негативно впливає на експлуатацію озброєння та військової техніки.

Ще одним негативним наслідком РСД є радіаційне розбухання (swelling). Радіаційно-стимульована дифузія сприяє міграції та злиттю вакансій у тривимірні скупчення — порожнини (voids) [2, 3]. Унаслідок цього відбувається збільшення об'єму матеріалу, що викликає внутрішні напруження та деформацію конструкцій. Дефекти, які утворюються в результаті дифузії, взаємодіють із дислокаціями (лінійними дефектами) [1], підвищуючи твердість і міцність матеріалу, але водночас знижуючи його пластичність, тобто спричиняючи окрихнення [3, 4].

Окрім металів, дифузія може критично впливати й на неметалічні матеріали, зокрема кераміку, яка широко застосовується у військовій техніці та озброєнні. Дифузія іонів у кераміці визначає її спікливість, високотемпературну повзучість і термостабільність, що в подальшому впливає на фізико-хімічні властивості виробів [3] та строки їх експлуатації.

Негативний вплив дифузії малих молекул (води, кисню, газів) у полімерах визначає їхню проникність і, відповідно, функціональні властивості як захисних покриттів або мембран. Радіація може спричинити радіаційне старіння полімерів, змінюючи їхню структуру та прискорюючи дифузійні процеси [2], що, своєю чергою, унеможлиблює подальше використання виробів за призначенням.

Дифузія кисню, озону та пластифікаторів у гумотехнічних виробах (ГТВ) призводить до втрати еластичності матеріалу [7]. У військовій техніці це створює загрозу герметичності паливних систем і гідравліки. За умов високих температур у моторних відсіках танків і літаків пластифікатори дифундують із гуми шлангів у мастило [25]. У результаті гума стає жорсткою, з'являються мікротріщини, і за подачі тиску 200–300 бар такий шланг може миттєво розірватися.

Загалом дифузія є механізмом перерозподілу матерії, який може бути використаний для контрольованого покращення властивостей матеріалів (хімічна дифузія) [5] або, навпаки, призводити до їх деградації та виходу з ладу (радіаційна дифузія) не лише в екстремальних умовах, але й у процесі звичайної експлуатації.

Слід враховувати, що вплив радіації на дифузійні процеси істотно залежить від температури [3]. За дуже низьких температур дефекти можуть залишатися практично нерухомими, тоді як за дуже високих температур домінує термічна дифузія, і радіаційний вплив стає менш помітним через швидку анігіляцію дефектів [4]. Отже, дифузійний вплив на процеси деконтамінації в ході ведення операцій залежить від температурних умов як у зимовий, так і в літній періоди.

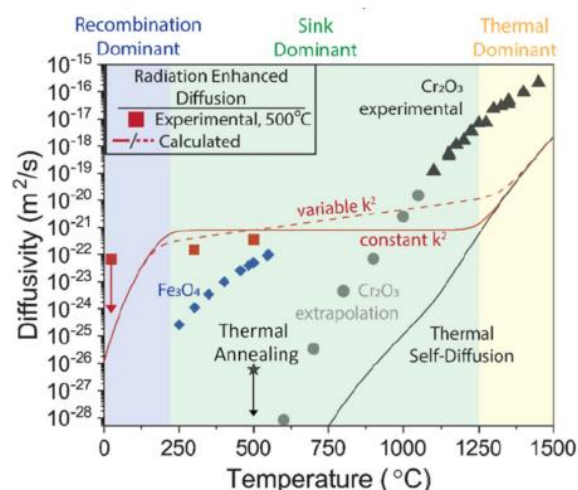


Рисунок 8 – Репрезентативні дані залежності дифузійності від температури [6]

На рисунку 8 наведено експериментальні дані щодо дифузійної здатності (дифузивності). Отримані результати свідчать про передбачену самодифузію кисню, описану за допомогою хімічно-теоретичної моделі. Параметр  $k_2$  у цьому випадку характеризує ефект

стоків вакансій, а швидкість дози наведено як  $2 \cdot 10^{-6}$  зміщень на атом за секунду (dpa/s) для зразків Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Саме сполуки Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> є основними компонентами в сталях, що використовуються для виготовлення броні, озброєння та військової техніки.

### **Превентивні заходи щодо захисту ОБТ від дифузійної деградації**

З урахуванням небезпеки, яку становлять хімічна та фізична дифузія для ОБТ, актуалізується питання захисту від негативних наслідків цих процесів та їхнього впливу на бойові спроможності внаслідок неконтрольованих фізико-хімічних явищ.

До превентивних заходів захисту від водневого окрихчення належать вакуумна дегазація під час виплавки, технологічний відпал (Baking) та заміна гальванічних покриттів на методи напилення [19–21].

Вакуумна дегазація під час виплавки передбачає використання сталей, що пройшли вакуумно-індукційну переплавку (VIM) або вакуумно-дугову переплавку (VAR), що дає змогу мінімізувати початковий вміст водню в матеріалі [20].

Технологічний відпал (Baking) відповідно до ASTM F519 передбачає, що після будь-якого гальванічного процесу (наприклад, кадмування болтів) деталь витримується за температури 190–220 °C протягом 8–24 годин. У результаті відбувається “виштовхування” водню з кристалічної ґратки до того, як він утворить молекулярні пастки [19].

Заміна гальваніки методами напилення забезпечує перехід від рідких електrolітів до іонно-плазмового напилення або механічного цинкування, у процесі яких унеможливується виділення вільного водню [21].

Запобігання виникненню ефекту Кіркендала та дифузійної пористості у вузлах тертя та з’єднаннях досягається шляхом створення бар’єрних шарів і дифузійного легування меж зерен [18]. Створення бар’єрних шарів передбачає введення проміжного шару металу (наприклад, вольфраму або танталу), який має надзвичайно низький коефіцієнт дифузії для обох основних металів [20]. Дифузійне легування меж зерен полягає у введенні мікродомішок (бору, цирконію), які “закупорюють” шляхи швидкої дифузії (межі зерен), сповільнюючи утворення пор Кіркендала [18, 20].

Радіація створює значну кількість точкових дефектів (вакансій і міжвузлових атомів), що в тисячі разів прискорює дифузійні процеси, які за звичайних умов тривали б десятиліттями [9–13]. Глибокими превентивними заходами щодо мінімізації таких ефектів є оптимізація мікроструктури (Nanostructuring) та контроль вмісту фосфору і сурми. Оптимізація мікроструктури (Nanostructuring) дає змогу створювати сталі з великою кількістю дрібнодисперсних часток (наприклад, оксидів), які слугують “пастками” або “стоками” для радіаційних дефектів [9, 11]. Вакансії та міжвузлові атоми аніглюють на цих межах, не встигаючи спричинити глобальну дифузію легуючих елементів. Контроль вмісту фосфору та сурми передбачає зниження концентрації цих шкідливих домішок у сталі до рівня нижче 0,005 %, оскільки саме вони під дією радіаційної дифузії зумовлюють температурний зсув крихкості [13].

З метою запобігання дифузійній деградації літій-іонних акумуляторів та електроніки застосовують нанокompозитні електроди й радіаційне екранування БРЕО (бортового радіоелектронного обладнання) [16]. Використання нанокompозитних електродів дає змогу зменшити розмір частинок активного матеріалу до нанорівня, що скорочує дифузійний шлях і знижує внутрішні напруження. Радіаційне екранування БРЕО базується на застосуванні багат шарових екранів (алюміній-поліетилен-вольфрам), які перешкоджають проникненню нейтронів, що спричиняють дифузійне зміщення домішок у напівпровідниках [15].

Для запобігання деградації полімерів і паливно-мастильних матеріалів застосовують фторкаучуки (Viton), антидифузійні покриття для паливно-мастильних матеріалів та консервацію інертними газами. Фторкаучуки (Viton) характеризуються значно нижчим коефіцієнтом дифузії для агресивних вуглеводнів і кисню. Нанесення антидифузійних

покриттів на стінки паливних баків створює бар'єр, що перешкоджає дифузії легких фракцій палива крізь матеріал стінок, що є особливо актуальним для композитних баків безпілотних літальних апаратів.

Особливо проблемною є дифузія для оптики сучасних танків (Leopard 2, Abrams) та ПТРК (Javelin), які мають підвищену вразливість до проникнення вологи й газів у внутрішні порожнини. Превентивними заходами у цьому випадку є заповнення внутрішнього об'єму сухим азотом під надлишковим тиском та використання церієвого скла [18]. Заповнення сухим азотом під надлишковим тиском формує зворотний градієнт тиску, що перешкоджає дифузії зовнішніх газів усередину. Використання церієвого скла, зокрема введення оксиду церію в оптичне скло, стабілізує його структуру щодо радіаційно-стимульованої дифузії дефектів і забезпечує збереження прозорості в жорстких умовах експлуатації.

## **Висновки**

Проведене дослідження присвячене поглибленому аналізу механізмів хімічної та радіаційно-стимульованої дифузії (РСД) як фундаментальних чинників деградації матеріалів ОБТ. Встановлено, що в умовах сучасних бойових дій ці процеси істотно прискорюють знос вузлів і агрегатів, що безпосередньо впливає на рівень боєздатності підрозділів. Виявлено критичний вплив водневого окрихчення на високоміцні сталі (MIL-A-12560 та інші), яке призводить до раптового руйнування стволів артилерійських систем, шасі авіаційної техніки та болтових з'єднань навіть у стані спокою. Радіаційна дифузія зумовлює "розпухання" металу та радіаційно-індуковану сегрегацію, унаслідок чого броня втрачає хром, стає крихкою та вразливою до корозії. Радіаційно-стимульована дифузія змінює характеристики р-п переходів у напівпровідниках, викликаючи збої в роботі процесорів безпілотних літальних апаратів, систем протиповітряної оборони та навігації GPS. В оптичних системах дифузія дефектів призводить до "потемніння" лінз тепловізорів і нічних прицілів. Під впливом радіації мастильні матеріали в редукторах за лічені години перетворюються на густу смолу, що зумовлює заклинювання механізмів. Дифузійні процеси в гумотехнічних виробах спричиняють втрату еластичності та розриви шлангів під дією робочого тиску.

## **Фінансування**

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

## **Конкуруючі інтереси**

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

## **Список використаних джерел**

1. Кенік, Е. А., & Геймс, М. Дж. (1981). Дослідження радіаційно-індукованої сегрегації в сплавах за допомогою електронного мікрозонда. *Journal of Nuclear Materials*, 100(1-3), 121-133. URL : <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-nuclear-materials>
2. Брюммер, С. М. та ін. (1990). Радіаційно-індукована сегрегація та міжкристалітна корозія в опромінених сплавах на основі нікелю. *Corrosion Science*, 30(2-3), 291-299. URL : <https://www.sciencedirect.com/journal/corrosion-science>
3. Настар, М., & Суассон, Ф. (2012). Моделювання радіаційно-індукованої сегрегації. *Comprehensive Nuclear Materials*, 1, 447-485. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-056033-5.00035-5>
4. Касснер, Т. Ф. та ін. (2007). *Корозійне розтріскування під напругою за участю опромінення аустенітних нержавіючих сталей у компонентах активної зони реакторів LWR* (Звіт OECD/NEA). Париж, Франція: OECD Publishing. URL : <https://www.oecd-neo.org>

5. Скороход, В. В., & Рагуля, А. В. (1994). Спікання з контрольованою швидкістю як метод керування мікроструктурою кераміки та аналогічних спечених матеріалів. *Порошкова металургія (Powder Metallurgy)*, (3–4), 1–10. URL : <https://www.tandfonline.com/toc/ypom20/current>
6. MIL-STD-1501. (н.д.). *Хромуванн та електроосадження*. Вашингтон, округ Колумбія: Міністерство оборони США. URL : <https://quicksearch.dla.mil>
7. Гюндуз, С. (2019). Механічна поведінка зварних з'єднань броньової сталі, виконаних напівавтоматичним дуговим зварюванням із використанням нікель-хромових та низьколегованих присадкових металів. *Journal of Materials Research and Technology*. URL : <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-materials-research-and-technology>
8. Карабаджак, А. (2020). Класифікація сучасних броньових сталей, історія, властивості матеріалів та процедури термічної обробки. *Materials Today: Proceedings*. URL : <https://www.sciencedirect.com/journal/materials-today-proceedings>
9. Девіс, Дж. Р. (Ред.). (2001). *Спеціальний довідник ASM: Нержавіючі сталі*. Матеріалс-Парк, Огайо: ASM International. URL : <https://www.asminternational.org>
10. Сімс, К. Т., Столофф, Н. С., & Хагель, В. К. (Ред.). (1987). *Суперсплави II: Високотемпературні матеріали для аерокосмічної та промислової енергетики*. Нью-Йорк, Нью-Йорк: John Wiley & Sons. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com>
11. Nickel Institute. (н.д.). *Роль нікелю в нержавіючій сталі* (Технічна серія). URL : <https://nickelinstitute.org>
12. Портер, Д. А., Істерлінг, К. Е., & Шариф, М. (2009). *Фазові перетворення в металах і сплавах* (3-тє вид.). Бока-Ратон, Флорида: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439883570>
13. Каллістер, В. Д., мол., & Ретвіш, Д. Г. (2018). *Матеріалознавство та інженерія: Вступ* (10-те вид.). Нью-Йорк, Нью-Йорк: John Wiley & Sons. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com>
14. Шьюмон, П. Г. (1989). *Дифузія в твердих тілах* (2-ге вид.). Воррендейл, Пенсильванія: The Minerals, Metals & Materials Society. URL : <https://www.tms.org>
15. Гангloff, Р. П., & Сомердей, Б. П. (Ред.). (2012). *Газове водневе окрихчення матеріалів в енергетичних технологіях*. Кембридж, Велика Британія: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857093899>
16. Нагумо, М. (2016). *Водневе окрихчення: Основи та моделювання*. Амстердам, Нідерланди: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-00215-9>
17. Механізми водневого окрихчення, водневе окрихчення у високоміцних сталях. (н.д.). *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.03.022>
18. Смігельскас, А. Д., & Кіркендалл, Е. О. (1947). Дифузія цинку в альфа-латуні. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 171, 130–142. URL : <https://www.osti.gov>
19. Даркен, Л. С. (1948). Дифузія, рухливність та їх зв'язок із вільною енергією утворення вакансій. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 175, 184–201.
20. Ван Лоо, Ф. Й. Й. (н.д.). *Ефект Кіркендалла в дифузії в твердому стані*. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-05768-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05768-5_12)
21. Ельзенбаумер, Р., Фат, Б., & Єгер, Б. (н.д.). *Інтерметалічні сполуки в електронній упаковці*. URL : <https://ieeexplore.ieee.org>
22. Рабкін, А., Тейлор, В. Р., & Ван Лоо, Ф. Б. С. (н.д.). *Реактивна взаємна дифузія при твердофазному з'єднанні*. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00145-9)
23. Пехт, М. Г. (2011). *Довідник з деградації літій-іонних акумуляторів: Основи та застосування*. Норвуд, Массачусетс: Artech House. URL : <https://us.artechhouse.com>
24. Люкс, С. Ф. (н.д.). Механізми деградації в літій-іонних акумуляторах. *Journal of Power Sources*. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.020>

25. MIL-STD-1501. (н.д.). *Низьке окрихчення*. Вашингтон, округ Колумбія: Міністерство оборони США. <https://quicksearch.dla.mil>
26. ASTM F519-17. (2017). *Стандартний метод випробування для механічної оцінки водневого окрихчення процесів нанесення покриттів*. Вест-Коншохокен, Пенсильванія: ASTM International. <https://www.astm.org/f0519-17.html>
27. Національний аерокосмічний стандарт. (2018). *NASM 1312-5: Методи випробування кріпильних виробів, метод 5, поширення водневого окрихчення*. Вашингтон, округ Колумбія: Асоціація аерокосмічного інституту.
28. Центр оборонної технічної інформації. (н.д.). *Аналітичні матеріали щодо руйнування авіаційних компонентів внаслідок корозійного розтріскування під напругою (SCC)*. Форт-Бельвюар, Вірджинія: DTIC.
29. ASM International. (н.д.). *Аналіз руйнувань та запобігання*. В *Довідник ASM* (Т. 11). Матеріалс-Парк, Огайо: ASM International. <https://www.asminternational.org>

## References

1. Kenik, E. A., & Himes, M. J. (1981). Radiation-induced segregation in alloys investigated by electron microprobe. *Journal of Nuclear Materials*, 100(1–3), 121–133. <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-nuclear-materials>
2. Bruemmer, S. M., Soran, T. F., & Henager, C. H. (1990). Radiation-induced segregation and intergranular corrosion in irradiated nickel-base alloys. *Corrosion Science*, 30(2–3), 291–299. <https://www.sciencedirect.com/journal/corrosion-science>
3. Nastar, M., & Soisson, F. (2012). Modeling of radiation-induced segregation. In R. J. M. Konings (Ed.), *Comprehensive Nuclear Materials* (Vol. 1, pp. 447–485). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-056033-5.00035-5>
4. Kassner, T. F., et al. (2007). *Irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steels in LWR core components*. OECD Nuclear Energy Agency. <https://www.oecd-nea.org>
5. Skorokhod, V. V., & Ragulya, A. V. (1994). Sintering at controlled rate as a method of microstructure control in ceramics and similar powder-metallurgical materials. *Powder Metallurgy*, (3–4), 1–10. <https://www.tandfonline.com/toc/ypom20/current>
6. U.S. Department of Defense. (н.д.). *MIL-STD-1501: Chromium plating and electrodeposition*. <https://quicksearch.dla.mil>
7. Gündüz, S. (2019). Mechanical behavior of welded joints of armor steel fabricated by semi-automatic arc welding using nickel–chromium and low-alloy filler metals. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-materials-research-and-technology>
8. Karabacak, A. (2020). Classification of modern armor steels: History, material properties and heat treatment procedures. *Materials Today: Proceedings*. <https://www.sciencedirect.com/journal/materials-today-proceedings>
9. Davis, J. R. (Ed.). (2001). *ASM specialty handbook: Stainless steels*. ASM International. <https://www.asminternational.org>
10. Sims, C. T., Stoloff, N. S., & Hagel, W. C. (Eds.). (1987). *Superalloys II: High-temperature materials for aerospace and industrial power*. John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com>
11. Nickel Institute. (н.д.). *Role of nickel in stainless steel*. <https://nickelinstitute.org>
12. Porter, D. A., Easterling, K. E., & Sherif, M. (2009). *Phase transformations in metals and alloys* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439883570>
13. Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com>
14. Shewmon, P. G. (1989). *Diffusion in solids* (2nd ed.). TMS. <https://www.tms.org>
15. Gangloff, R. P., & Somerday, B. P. (Eds.). (2012). *Gaseous hydrogen embrittlement of materials*

- in energy technologies*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857093899>.
16. Nagumo, M. (2016). *Hydrogen embrittlement: Fundamentals and modeling*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-00215-9>.
  17. Lynch, S. P. (2012). Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms. *Acta Materialia*, 60(9), 3513–3530. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.03.022>.
  18. Smigelskas, A. D., & Kirkendall, E. O. (1947). Diffusion of zinc in alpha brass. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 171, 130–142. <https://www.osti.gov>
  19. Darken, L. S. (1948). Diffusion, mobility and their relation to the free energy of vacancy formation. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 175, 184–201. <https://www.osti.gov>
  20. Van Loo, F. J. J. (2004). The Kirkendall effect. *Diffusion in Condensed Matter*. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-05768-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05768-5_12).
  21. Elzenbaumer, R., Fat, B., & Jäger, B. (n.d.). Intermetallic compounds in electronic packaging. <https://ieeexplore.ieee.org>
  22. Rabkin, A., Taylor, W. R., & Van Loo, F. J. J. (2003). Reactive interdiffusion in solid-state bonding. *Acta Materialia*, 51(11), 3387–3397. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00145-9).
  23. Pecht, M. G. (2011). *Battery degradation in lithium-ion batteries: Fundamentals and applications*. Artech House. <https://us.artechhouse.com>
  24. Lux, S. F., Lucas, I. T., Pollak, E., et al. (2012). Mechanisms of lithium-ion battery degradation. *Journal of Power Sources*, 215, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.020>.
  25. U.S. Department of Defense. (n.d.). *MIL-STD-1501: Low embrittlement chromium plating*. <https://quicksearch.dla.mil>.
  26. ASTM International. (2017). *ASTM F519-17: Standard test method for mechanical hydrogen embrittlement evaluation*. <https://www.astm.org/f0519-17.html>
  27. Aerospace Industries Association. (2018). *NASM 1312-5: Fastener test methods—Hydrogen embrittlement*. <https://www.aia-aerospace.org>
  28. Defense Technical Information Center. (n.d.). *Stress corrosion cracking in aircraft components*. <https://discover.dtic.mil>
  29. ASM International. (n.d.). *ASM Handbook, Volume 11: Failure analysis and prevention*. <https://www.asminternational.org>