

ПОЛІМЕРНИЙ КОМПОЗИТНИЙ ЕЛЕКТРОЛІТ НА ОСНОВІ NASICON ДЛЯ ТВЕРДОТІЛЬНИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

*І. Л. Єфіміш¹, Г. С. Бубела¹, О. А. Сиволожський¹, Н. Г. Стрижакова¹,
Ю. А. Малетін¹, І. В. Лісовський²*

¹ Інститут сорбції та проблем ендоекології НАН України,
вул. Олега Мудрака, 13, м. Київ 03164, Україна;

² Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України,
просп. Академіка Палладіна, 32/34, Київ 03142, Україна
e-mail: irinaefimich@gmail.com

Розроблено та досліджено композитний твердий електроліт на основі фторполімеру Neoflon VT-475, іонної рідини PYR14-TFSI та солі LiTFSI, який призначено для використання в твердотільних літій-іонних акумуляторах. Як літій-провідну добавку в склад електроліту вводили наночастинки $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) зі структурою NASICON, яка забезпечує тривимірні канали для ефективної міграції іонів літію. LATP було синтезовано золь-гель-методом, що дозволило отримати частинки з високою іонною провідністю та стабільною кристалічною структурою. Описано методику виготовлення електроліту, який одержували у вигляді плівки, та його характеристики, у тому числі електрохімічні властивості, які досліджували в лабораторних прототипах акумуляторів із катодом на основі LiFePO_4 (LFP) та анодом $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO), модифікованим LATP. Для покращення міжфазного контакту між твердим електролітом і електродами застосовано рідкофазну терапію. Для цього поверхню електродів додатково просочували полімерним розчином для покращення адгезії та міжфазного контакту. Це дозволило зменшити міжфазний опір, покращити іонний транспорт та забезпечити стабільну роботу за тривалого циклування. Дослідження показали, що розроблені прототипи з композитним твердим електролітом демонструють питому ємність, близьку до ємності зразків із рідким електролітом за струмових навантажень до 4С. Статистика тривалого циклування вказує на високий рівень стабільності, оскільки зменшення питомої ємності не перевищувало 6% після 130 повних циклів заряд – розряд. Розроблений електроліт є перспективним для використання в твердотільних літій-іонних акумуляторах із поліпшеними характеристиками ефективності, безпеки та довговічності, оскільки його структура та склад сприяють зменшенню ризику утворення дендритів, покращенню стабільності міжфазного шару та забезпечують високу іонну провідність навіть за високих навантажень.

Ключові слова: твердотільні літій-іонні акумулятори, полімерний електроліт, LATP.

ВСТУП. Сучасні літій-іонні акумулятори (ЛІА) є основою багатьох технологій енергозабезпечення, зокрема в електротранспорті, портативній електроніці та системах зберігання енергії. Зазвичай ЛІА містять два пористих електроди (анод і катод), розділені сепаратором, із рідким електролітом на основі апротонних органічних розчинників із літій-провідною сіллю [1]. Незважаючи на значні технічні досягнення у цій галузі, наявність рідкого електроліту зумовлює низку критичних проблем, оскільки органічні розчинники, які входять до складу електроліту, є легкозаймистими, токсичними та нестабільними за високих температур. Зокрема, взаємодія рідкого електроліту з активними матеріалами електродів призводить до формування так званої *плівки SEI* (solid-electrolyte interface), що спричиняє деградацію системи та втрату ємності в процесі циклування, бо супроводжується споживанням електроліту та активного літію, що спричиняє незворотні втрати ємності та зростання внутрішнього опору, особливо на початкових циклах [2, 3]. Крім того, присутність рідкого електроліту ускладнює виробничий процес через необхідність ретельного заповнення та герметизації комірок у сухій інертній атмосфері [4].

Альтернативою цій технології є твердотільні акумулятори (ТТА), в яких рідкий електроліт замінено на твердий іонний провідник [5]. Така конструкція забезпечує вищу безпеку, підвищену термічну стабільність, а також твердий електроліт виконує роль фізичного бар'єру для дендритів, знижуючи ризик короткого замикання [3]. Більш того, архітектура ТТА сприяє реалізації біполярного укладання одиничних

елементів у батарею, що спрощує її дизайн та зменшує масу і об'єм [6].

Тверді електроліти, які використовують у таких системах, поділяють на три основні типи: неорганічні, полімерні та композитні [7]. Неорганічні тверді електроліти зазвичай мають кристалічну або склоподібну структуру, завдяки якій забезпечують високу іонну провідність навіть за кімнатної температури (до 10^{-2} См/см) [8]. Вони характеризуються високою механічною міцністю, стабільністю за високих температур та агресивних хімічних умов. Серед відомих на сьогодні неорганічних літій-іонних провідників увагу привертають матеріали зі структурами NASICON, перовськіту та гранату. Найвищою іонною провідністю в рамках кожного з наведених класів володіють хімічні сполуки $\text{Li}_{1-x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ (LATP), $\text{Li}_x\text{La}_{2/3-x/3}\text{TiO}_3$ (LLTO) та $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (LLZO) відповідно [9, 10]. Очевидною перевагою літій-провідних матеріалів зі структурою NASICON є відсутність у їхньому складі рідкісноземельних елементів, що зменшує їхню собівартість порівняно з гранатами та перовськітами. Водночас крихкість неорганічних електролітів, а також високий опір на межі контакту з електродами обмежує їхнє використання в реальних пристроях.

Полімерні тверді електроліти, на відміну від неорганічних, демонструють добру еластичність, гнучкість і здатність формувати стабільний інтерфейс з електродами. Вони містять солі літію, що забезпечує іонну провідність у полімерній матриці [11]. Найчастіше використовують поліетиленоксид, фторовані полімери, полікарбонати, поліестери, полінітрили та біополімери. Головним недоліком полімерних електро-

літів є їхня низька іонна провідність за кімнатної температури, яка потребує підвищення температури для досягнення прийняттого рівня роботи.

Для поєднання переваг обох класів матеріалів – високої провідності неорганічних твердих електролітів та гнучкості полімерних – було розроблено композитні полімерні електроліти, в яких неорганічні частинки вводять у полімерну матрицю для покращення іонної провідності, механічної стабільності та електрохімічної сумісності [12]. Такий підхід дозволяє зменшити кристалічність полімеру, збільшити кількість шляхів для переносу іонів і водночас зберегти гнучкість та оброблюваність. Наповнювачі можуть бути інертними, такими як оксиди алюмінію чи кремнію, або активними – такими як LLZO, LLTO чи LATP [13]. Останні не лише підсилюють механічні властивості, а й самі беруть участь у процесі іонної провідності.

У цій статті розглядаємо спосіб одержання композитного полімерного електроліту, що містить Li-провідні компоненти, а також шляхи покращення його контакту з електродними шарами. Метою роботи було розроблення і дослідження ефективного композитного твердого електроліту на основі фторполімеру Neoflon VT-475, іонної рідини PYR14-TFSI та солі LiTFSI із додаванням $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ як провідної добавки. Запропонована комбінація дозволяє забезпечити стабільність і високу провідність і є важливим кроком до створення ефективних, безпечних та масштабованих твердотільних акумуляторів нового покоління. Згідно з літературними даними, електроліти на основі полівініліденфториду (PVDF) і LATP демонструють хорошу

електрохімічну стабільність та придатність до довготривалого циклування. Наприклад, у роботі [14] показано, що композит PVDF із 90% LATP забезпечив ємність 107 мА·год/г при збереженні 91.4% після 200 циклів у LMO-системі. В іншому дослідженні [15] плівка PVDF-HFP/LATP (10%) демонструвала вікно стабільності до 4,94 В, стабільну роботу з літєвим анодом протягом >300 годин, а в коміріці з NCM622 досягала 152 мА·год/г після 50 циклів при 100% кулонівській ефективності.

ЕКСПЕРИМЕНТ І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. Композитна полімерна плівка на основі фторполімеру Neoflon VT-475 (Daikin Chemical) включала біс(трифторметилсульфоніл)імід літію (LiTFSI) (Solvionic, Франція), іонну рідину 1-бутил-1-метилпіролідінію (PYR14) з аніоном TFSI (Proionic, Франція) та LATP зі структурою NASICON LATP одержували золь-гель-методом [16]. Результати РФА свідчать, що синтезовані зразки характеризуються ромбоєдричною структурою, при цьому кристалічні наночастинки є слабкоагломерованими, а їхній середній розмір становить 35 нм. Вибір фторполімеру Neoflon VT-475 був зумовлений його характеристиками при виготовленні електродів для літій-іонних акумуляторів, а саме: хімічна стійкість, покращена гнучкість, крім того, його використання підвищує стабільність суспензії. Іонну рідину PYR14-TFSI додавали як «розчинник» для солі LiTFSI у складі полімерної композиції. Розчин містив VT-475, LiTFSI і PYR14-TFSI зі співвідношенням компонентів по масі 4:3:3 в ацетонітрилі. Після повного розчинення компонентів додавали суспензію LATP в ацетонітрилі із вмістом LATP 10 мас.%. Гомогенізацію

здійснювали за допомогою швидкісної мішалки (10 тис. об/хв).

Отриману суспензію наносили на скляну пластину за допомогою аплікатора в атмосфері аргону. Для видалення ацетонітрилу пластину з нанесеною суспензією вакуумували упродовж однієї години за кімнатної температури, а потім обережно знімали утворену плівку (рис. 1). Всі роботи з приготування розчинів і зі збирання прототипів літій-іонних акумуляторів із полімерною плівкою проводили в боксі Vigor Technologies Co (Suzhou, China), заповненому сухим аргоном. Вміст вологи і кисню в боксі не перевищував 2 ppm.

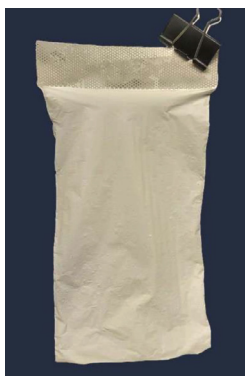


Рис. 1. Фото полімерної плівки, виготовленої з VT-475, LiTFSI, PYR14-TFSI та LATP

Fig. 1. Photo of polymer film made of VT-475, LiTFSI, PYR14-TFSI and LATP.

Для електрохімічних досліджень було виготовлено лабораторні прототипи ЛІА, які склалися з пари електродів, розділених сепаратором і герметично упакованих в ламіновану алюмінієву фольгу. Для виготовлення електродів готували суспензію змішуванням вихідного електродного матеріалу із сажею та активованим вугіллям у розчині полівініліденфториду в N-ме-

тил-2-піролідоні; масове співвідношення компонентів 85:4,4:4,8:6. Як катодний матеріал використовували LiFePO_4 (LFP), як анодний – $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO), модифікований LATP. Суспензію активного матеріалу наносили на попередньо підготовлений колектор струму методом «doctor blade». Як колектор струму використовували модифіковану частинками графіту алюмінієву фольгу з тонким шаром (до 5 мкм) праймеру – сажа зі зв'язуючим-адгезивом PVDF.

Як твердий електроліт і водночас сепаратор було використано синтезовану полімерну плівку на основі LiTFSI та PYR14-TFSI, наповнену літій-провідними частинками LATP. Для порівняння були виготовлені також зразки з комерційним полімерним сепаратором Solupore 3P07A (компанія Lidal) товщиною 20 мкм.

Варто зазначити, що у твердотільних ЛІА контакт між полімерним електролітом і електродами може бути неефективним через неконформну морфологію. Обмежений і нерівномірний міжфазний контакт «полімерний електроліт – твердий електрод» призводить до низького рівня міграції іонів і можливого у низці випадків утворення дендритів літію на аноді [17, 18]. Проблеми міжфазної поверхні можуть впливати на практичну густину енергії та стабільність роботи ЛІА за тривалого циклування. Для покращення міжфазного контакту між твердотільним електролітом та електродами запропоновано застосовувати «рідкофазну терапію» [19, 20], що передбачає введення невеликої кількості рідкого електроліту.

У наших експериментах було проведено рідкофазову терапію за допомогою розчину 1 М LiTFSI у пропіленкарбонаті. Вміст рідкого електроліту в зразках ЛІА з площею

електродів $35,7 \text{ см}^2$ складав 0,5 мл. Більш того, для покращення міжфазового контакту між поверхнею електрода і плівкою-сепаратором поверхню електродів додатково просочували полімерним розчином Neoflon VT-475, LiTFSI і PYR14-TFSI в ацетонітрилі з таким самим співвідношенням компонентів по масі 4:3:3. Для видалення залишків ацетонітрилу електроди після просочування витримували у вакуумі за кімнатної температури упродовж 1 год. Схематичну

конструкцію досліджуваних систем показано на рис. 2.

Для встановлення надійності одержаних результатів було досліджено серію з 3-х комірок з однаковим складом електродного матеріалу. Заряд/розрядні характеристики прототипів літій-іонних акумуляторів було одержано з використанням багатоканального вимірювального стенду ARBIN (MITS Pro Software of MSTAT 32, Arbin Corporation, США).

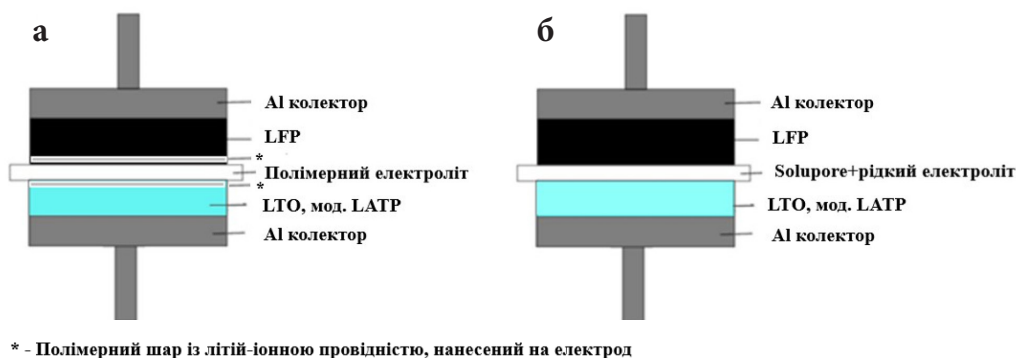


Рис. 2. Схематична конструкція лабораторних елементів із катодом LFP й анодом LTO, модифікованим LATP: а – з твердим електролітом, виготовленим із використанням Neoflon VT-475, LiTFSI, PYR14-TFSI та LATP; б – із рідким електролітом і комерційним сепаратором Solupore 3P07A

Fig. 2. Schematic design of laboratory cells with LFP cathode and LTO anode modified with LATP: а – with a solid electrolyte prepared using Neoflon VT-475, LiTFSI, PYR14-TFSI, and LATP; б – with a liquid electrolyte and a commercial separator Solupore 3P07A.

На рис. 3 показано результати гальваностатичного циклування за різного струмового навантаження. Із результатів експерименту можна зробити висновок про те, що зразки із полімерним електролітом характеризуються значеннями питомої ємності, подібними до значень ємності зразків із рідким електролітом за невисоких струмових навантажень: при струмі 4С ємність ТТА становила $120 \text{ мА} \cdot \text{год/г}$ порівня-

но із $124 \text{ мА} \cdot \text{год/г}$ для прототипу із рідким електролітом, однак при струмі 16С значення ємності ТТА становило лише 50 % ємності прототипу із рідким електролітом. При розрахунку на зазначені виробником $160 \text{ мА} \cdot \text{год/г}$ (LTO) відносна початкова розрядна ємність експериментального зразка ТТА становила 92 % від теоретичної, що все ще залишається високим показником.

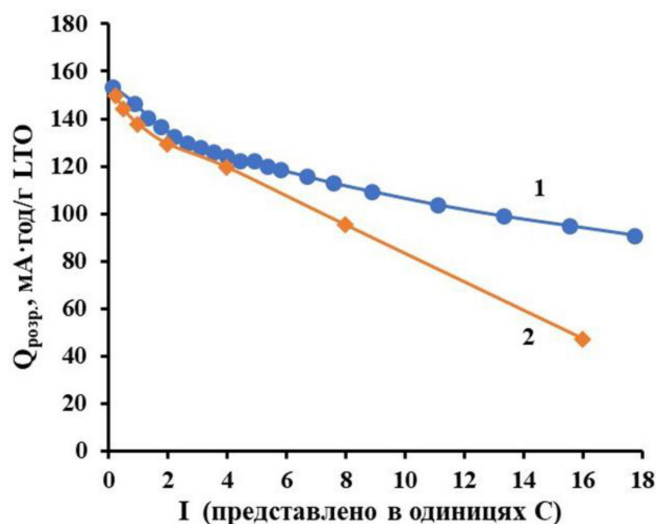


Рис. 3. Зміна питомої ємності лабораторних елементів із рідким і полімерним електролітом при різному струмовому навантаженні: 1 - рідкий електроліт; 2 - полімерний електроліт

Fig. 3. Change in the specific capacity of laboratory cells with liquid and polymer electrolyte material at different current loads: 1 – liquid electrolyte; 2 – polymer electrolyte.

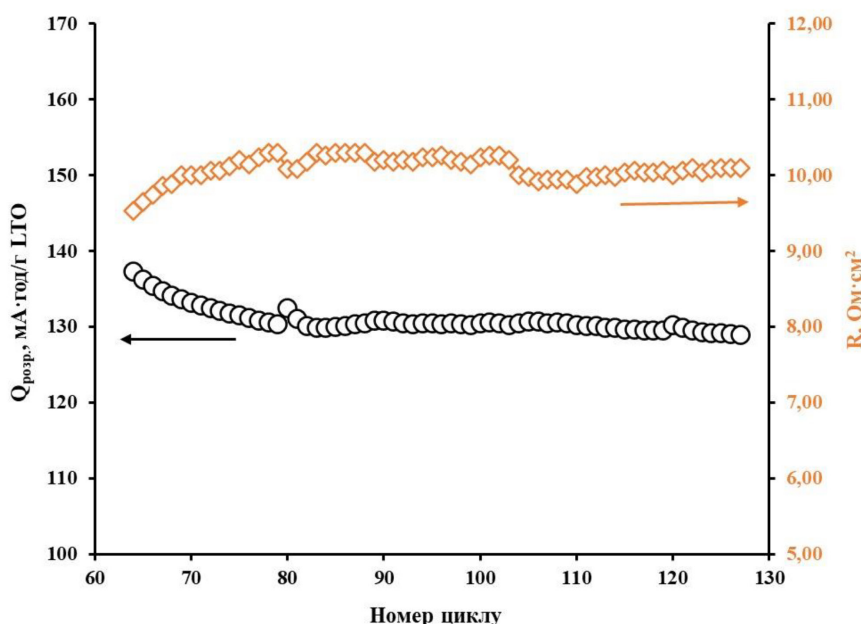


Рис. 4. Зміна питомої ємності лабораторних прототипів із плівкою, виготовленою із використанням LiTFSI, PYR14-TFSI та LATP при тривалому гальваностатичному циклуванні

Fig. 4. Changes in the specific capacitance of laboratory prototypes with film made using LiTFSI, PYR14-TFSI and LATP during prolonged galvanostatic cycling.

Щоб дослідити стабільність роботи твердотільних прототипів, було проведено гальваностатичне циклування за різних струмів (0,3–16С). Заклучне циклування проводили при 0,9С і при проходженні загальних 130 циклів заряд/розряд, як видно із одержаних даних (рис. 4), значення питомої ємності знижується на 6 %, а значення опору підвищується на 6 %, що свідчить про стабільність роботи комірок із полімерною плівкою з включенням LATP.

ВИСНОВКИ. Розроблено методику одержання композитного твердого електроліту на основі фторполімеру Neoflon VT-475 і $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$, який водночас виконував функцію і сепаратора, у лабораторних прототипах твердотільних акумуляторів з LFP/LTO електродами. Для покращення міжфазного контакту між електродами і твердим електролітом реалізовано метод рідкофазної терапії, що передбачав змочування електродів полімерним розчином із літій-іонною провідністю, а також додавання невеликої кількості рідкого електроліту. Це дозволило зменшити опір на межі поділу фаз та покращити транспорт іонів літію.

Прототип ТТА демонструє високу початкову розрядну ємність (146 мА·год/г), що становить 92 % від ємності зразка з рідким електролітом. Результати тривалого гальваностатичного циклування при 0,9С підтверджують стабільність електрохімічних параметрів системи із розробленим твердим електролітом, оскільки значення питомої ємності знижується на 6 %, при цьому збільшення опору становить менше 6 % після проходження 130 циклів заряд/розряд.

Отже, розроблений композитний полімерний електроліт є перспективним мате-

ріалом для використання в твердотільних літійових джерелах струму завдяки стабільності та ефективності.



Роботу виконано за підтримки Національної академії наук України в рамках проєкту «Розробка плівкових композиційних літій- та натрій-провідних електролітів і електродних матеріалів для твердотільних акумуляторів» (реєстраційний № 0125U000641 та реєстраційний № 0125U001106)

POLYMERIC COMPOSITE ELECTROLYTE BASED ON NASICON FOR SOLID-STATE LITHIUM BATTERIES.

**I. L. Yefimishch¹, H. S. Bubela¹,
O. A. Syvolozhsky¹, N. G. Stryzhakova¹,
Y. A. Maletin¹, I. V. Lisovskyi²**

¹ *Institute for Sorption and Problems of Endoecology of the National Academy of Sciences of Ukraine,
13 Oleg Mudrak str., 03164 Kyiv, Ukraine;*

² *V.I. Vernadskyi Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine,
32/34 Akademika Palladina Ave., 03142 Kyiv, Ukraine
e-mail: irinaefimich@gmail.com*

A composite solid electrolyte based on the fluoropolymer Neoflon VT-475, the ionic liquid PYR14-TFSI, and the lithium salt LiTFSI has been developed and studied for use in solid-state lithium-ion batteries. As a lithium-conductive additive, nanoparticles of

$\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) with a NASICON-type structure were introduced into the electrolyte composition, providing three-dimensional channels for efficient lithium-ion migration. LATP was synthesized using a sol-gel method, which enabled the production of particles with high ionic conductivity and a stable crystalline structure. The methodology for fabricating the electrolyte in the form of a film is described, along with its characteristics, including electrochemical properties, which were investigated in laboratory battery prototypes with a LiFePO_4 (LFP) cathode and a $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO) anode modified with LATP. To improve interfacial contact between the solid electrolyte and the electrodes, a liquid-phase treatment was applied. The electrode surfaces were additionally impregnated with a polymer solution to enhance adhesion and interfacial contact. This approach reduced interfacial resistance, improved ion transport, and ensured stable performance during long-term cycling. The study showed that the developed prototypes with the composite solid electrolyte demonstrated specific capacities comparable to those of samples with liquid electrolytes under current loads up to 4C. Long-term cycling statistics indicated a high level of stability, with capacity degradation not exceeding 6% after 130 full charge-discharge cycles. The developed electrolyte is promising for use in solid-state lithium-ion batteries with improved performance, safety, and durability, as its structure and composition help reduce dendrite formation risk, enhance interfacial layer stability, and maintain high ionic conductivity even under high loads.

Key words: solid-state LIB, polymeric electrolyte, LATP.

ЛІТЕРАТУРА

1. Nasajpour-Esfahani N., Garmestani H., Bagheritabar M., Jasim D.J., Toghraie D., Dadkhah S., Firoozeh H. Comprehensive review of lithium-ion battery materials and development challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. **203**. P.114783.
2. Rufino Júnior C.A., Sanseverino E.R., Gallo P., Amaral M.M., Koch D., Kotak Y., Diel S., Walter G., Schweiger H.-G., Zanin H. Unraveling the degradation mechanisms of lithium-ion batteries. *Energies*. 2024. **17** (14). P. 3372.
3. Lin Y.-X., Liu Z., Leung K., Chen L.-Q., Lu P., Qi Y. Connecting the irreversible capacity loss in Li-ion batteries with the electronic insulating properties of solid electrolyte interphase (SEI) components. *J. Power Sources*. 2016. **309**. P. 221–230.
4. Machín A. Advancements and challenges in solid-state battery technology: an in-depth review of solid electrolytes and anode innovations. *Batteries*. 2024. **10** (1). P. 29.
5. Moradi Z., Lanjan A., Tyagi R., Srinivasan S. Review on current state, challenges, and potential solutions in solid-state batteries research. *Journal of Energy Storage*. 2023. **73** (C). P. 109048.
6. Sung J., Heo J., Kim D.-H., Jo S., Ha Y.-C., Kim D., Ahn S., Park J.-W. Recent advances in all-solid-state batteries for commercialization. *Materials Chemistry Frontiers*. 2024. **8**. P. 1861–1887.
7. Joshi A., Mishra D.K., Singh R., Zhang J., Ding Y. A comprehensive review of solid-state batteries. *Applied Energy*. 2025. **386**. P. 125546.
8. Sarfraz N., Kanwal N., Ali M., Ali K., Hasnain A., Ashraf M., Ayaz M., Ifthikar J., Ali S., Hendi A., Baig N., Ehsan M.F., Shah S.S., Khan R., Khan I. Materials advancements in solid-state inorganic electrolytes for highly anticipated all solid Li-ion batteries. *Energy Storage Materials*. 2024. **71**. P. 103619.
9. Bachman J. C., Muy S., Grimaud A., Chang H.

- H., Pour N., Lux S. F., Paschos. O., Maglia F., Lupart S., Lamp P., Giordano L., Shao-Horn, Y. Inorganic solid-state electrolytes for lithium batteries: mechanisms and properties governing ion conduction. *Chemical reviews*, 2016. **116**(1). P. 140.
10. Hou M., Liang F., Chen K., Dai Y., Xue D. Challenges and perspectives of NASICON-type solid electrolytes for all-solid-state lithium batteries. *Nanotechnology*. 2020. **31** (13). P. 132003.
11. Song Z., Chen F., Martinez-Ibañez M., Feng W., Forsyth M., Zhou Z., Armand M., Zhang H. A reflection on polymer electrolytes for solid-state lithium metal batteries. *Nature Communications*. 2023. **14**. P. 4884.
12. Li S., Li L., Yang H., Zhao Y., Shan Y. A review of composite polymer electrolytes for solid-state lithium-sulfur batteries: Synthesis methods, optimal design, and critical challenges. *Chemical Engineering Journal*. 2024. **484**. P. 149433.
13. Jian S., Cao Y., Feng W., Yin G., Zhao Y., Lai Y., Zhang T., Ling X., Wu H., Bi H., Dong Y. Recent progress in solid polymer electrolytes with various dimensional fillers: a review. *Materials Today Sustainability*. 2022. **20**. P. 100224.
14. Liang X., Han D., Wang Y., Lan L., Mao J. Preparation and performance study of a PVDF-LATP ceramic composite polymer electrolyte membrane for solid-state batteries. *RSC Adv*. 2018. **8**. P. 40498–40504.
15. Yao Z., Qi F., Ye L., Sun Q., Gu X., Yang X., Zhu K. Composite polymer electrolyte based on poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP) for solid-state batteries. *Heliyon*. 2024. **10** (6). P. e28097.
16. Lisovskyi I., Solopan S., Belous A., Khomenko V., Barsukov V. An effective modification of $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ with $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ as a high-performance cathode material for Li-ion batteries. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2022. **52**. P. 1701–1713.
17. Yan, C.; Yao, Y.-X.; Chen, X.; Cheng, X.-B.; Zhang, X.-Q.; Huang, J.-Q.; Zhang, Q. Lithium nitrate solvation chemistry in carbonate electrolytes sustains high-voltage lithium metal batteries. *Angewandte Chemie International Edition*. 2018. **130**. P. 14251–14255.
18. Kerman K., Luntz A., Viswanathan V., Chiang Y.-M., Chen Z. Review – practical challenges hindering the developments of solid-state Li ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. 2017. **164**. P. A1731–A1744.
19. Keller M., Varzi A., Passerini S. Hybrid electrolytes for lithium metal batteries. *Journal of Power Sources*. 2018. **392**. P. 206–225.
20. Zhao C.-Z., Zhao B.-C., Yan C., Zhang X.-Q., Huang J.-Q., Mo Y., Xu X., Li H., Zhang Q. Liquid phase therapy to solid electrolyte-electrode interface in solid-state Li metal batteries: A review. *Energy Storage Mater*. 2020. **24**. P. 75–84.

REFERENCES

1. Nasajpour-Esfahani N., Garmestani H., Bagheritabar M., Jasim D.J., Toghraie D., Dadkhah S., Firoozeh H. Comprehensive review of lithium-ion battery materials and development challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. **203**: 114783.
2. Rufino Júnior C.A., Sanseverino E.R., Gallo P., Amaral M.M., Koch D., Kotak Y., Diel S., Walter G., Schweiger H.-G., Zanin H. Unraveling the degradation mechanisms of lithium-ion batteries. *Energies*. 2024. **17** (14): 3372.
3. Lin Y.-X., Liu Z., Leung K., Chen L.-Q., Lu P., Qi Y. Connecting the irreversible capacity loss in Li-ion batteries with the electronic insulating properties of solid electrolyte interphase (SEI) components. *J. Power Sources*. 2016. **309**: 221–230.
4. Machín A. Advancements and challenges in solid-state battery technology: an in-depth review of solid electrolytes and anode innovations.

- Batteries*. 2024. **10** (1): 29.
5. Moradi Z., Lanjan A., Tyagi R., Srinivasan S. Review on current state, challenges, and potential solutions in solid-state batteries research. *Journal of Energy Storage*. 2023. **73** (C): 109048.
 6. Sung J., Heo J., Kim D.-H., Jo S., Ha Y.-C., Kim D., Ahn S., Park J.-W. Recent advances in all-solid-state batteries for commercialization. *Materials Chemistry Frontiers*. 2024. **8**: 1861–1887.
 7. Joshi A., Mishra D.K., Singh R., Zhang J., Ding Y. A comprehensive review of solid-state batteries. *Applied Energy*. 2025. **386**: 125546.
 8. Sarfraz N., Kanwal N., Ali M., Ali K., Hasnain A., Ashraf M., Ayaz M., Ifthikar J., Ali S., Hendi A., Baig N., Ehsan M.F., Shah S.S., Khan R., Khan I. Materials advancements in solid-state inorganic electrolytes for highly anticipated all solid Li-ion batteries. *Energy Storage Materials*. 2024. **71**: 103619.
 9. Bachman J. C., Muy S., Grimaud A., Chang H. H., Pour N., Lux S. F., Paschos. O., Maglia F., Lupart S., Lamp P., Giordano L., Shao-Horn, Y. Inorganic solid-state electrolytes for lithium batteries: mechanisms and properties governing ion conduction. *Chemical reviews*, 2016. **116**(1): 140.
 10. Hou M., Liang F., Chen K., Dai Y., Xue D. Challenges and perspectives of NASICON-type solid electrolytes for all-solid-state lithium batteries. *Nanotechnology*. 2020. **31** (13): 132003.
 11. Song Z., Chen F., Martinez-Ibañez M., Feng W., Forsyth M., Zhou Z., Armand M., Zhang H. A reflection on polymer electrolytes for solid-state lithium metal batteries. *Nature Communications*. 2023. **14**: 4884.
 12. Li S., Li L., Yang H., Zhao Y., Shan Y. A review of composite polymer electrolytes for solid-state lithium-sulfur batteries: Synthesis methods, optimal design, and critical challenges. *Chemical Engineering Journal*. 2024. **484**: 149433.
 13. Jian S., Cao Y., Feng W., Yin G., Zhao Y., Lai Y., Zhang T., Ling X., Wu H., Bi H., Dong Y. Recent progress in solid polymer electrolytes with various dimensional fillers: a review. *Materials Today Sustainability*. 2022. **20**: 100224.
 14. Liang X., Han D., Wang Y., Lan L., Mao J. Preparation and performance study of a PVDF–LATP ceramic composite polymer electrolyte membrane for solid-state batteries. *RSC Adv*. 2018. **8**: 40498–40504.
 15. Yao Z., Qi F., Ye L., Sun Q., Gu X., Yang X., Zhu K. Composite polymer electrolyte based on poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP) for solid-state batteries. *Heliyon*. 2024. **10** (6): e28097.
 16. Lisovskyi I., Solopan S., Belous A., Khomenko V., Barsukov V. An effective modification of $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ with $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ as a high-performance cathode material for Li-ion batteries. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2022. **52**: 1701–1713.
 17. Yan, C.; Yao, Y.-X.; Chen, X.; Cheng, X.-B.; Zhang, X.-Q.; Huang, J.-Q.; Zhang, Q. Lithium nitrate solvation chemistry in carbonate electrolytes sustains high-voltage lithium metal batteries. *Angewandte Chemie International Edition*. 2018. **130**: 14251–14255.
 18. Kerman, K.; Luntz, A.; Viswanathan, V.; Chiang, Y.-M.; Chen, Z. Review – practical challenges hindering the developments of solid-state Li ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. 2017. **164**: A1731–A1744.
 19. Keller M., Varzi A., Passerini S. Hybrid electrolytes for lithium metal batteries. *Journal of Power Sources*. 2018. **392**: 206–225.
 20. Zhao C.-Z., Zhao B.-C., Yan C., Zhang X.-Q., Huang J.-Q., Mo Y., Xu X., Li H., Zhang Q. Liquid phase therapy to solid electrolyte–electrode interface in solid-state Li metal batteries: A review. *Energy Storage Mater.* 2020. **24**: 75–84.

Стаття надійшла 21.08.2025.