

УДК 546.3+548.3+544.653

ТВЕРДІ РОЗЧИНИ НА ОСНОВІ LaSn_3 ЯК НОВІ ЕЛЕКТРОДНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЛІТІЙ-ІОННИХ ХІМІЧНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

В. Кордан^{1*}, О. Зелінська¹, І. Тарасюк¹, Р. Серкіз², В. Павлюк¹

¹Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 6, 79005 Львів, Україна;

²Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Драгоманова, 50, 79005 Львів, Україна
e-mail: kordan50@gmail.com

Методами рентгенівської дифракції, скануючої електронної мікроскопії, енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії, циклічної вольтамперометрії та електрохімічної інтеркаляції дослідили фази $\text{LaSn}_{3-x}\text{M}_x$, $M = \text{Mg}, \text{Sn}, \text{Sb}$ та $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Sn}_3$ з кубічною структурою типу AuCu_3 як потенційні електродні матеріали для літій-іонних акумуляторів. Електрохімічне літування досліджених фаз призводить до включення атомів Li в октаедричні порожнини $1b$ й утворення твердих розчинів включення $\text{LaSn}_{3-x}\text{M}_x\text{Li}_y$, які за граничного складу кристалізуються в надструктурі типу перовскіту CaTiO_3 . Найбільше значення питомої ємності демонструє електродний матеріал, виготовлений на основі сплавів з області існування твердого розчину, $\text{LaSn}_{3-x}\text{Mg}_x - 92 \text{ mA}\cdot\text{год}/\text{г}$; сплав LaSn_3 демонструє питому ємність $81 \text{ mA}\cdot\text{год}/\text{г}$; сплав $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Sn}_3 - 60 \text{ mA}\cdot\text{год}/\text{г}$. Легування стибієм призводить до зниження питомої ємності (сплав $\text{LaSn}_{3-x}\text{Sb}_x$ демонструє питому ємність $18 \text{ mA}\cdot\text{год}/\text{г}$; сплав $\text{LaSn}_{3-x-y}\text{Mg}_x\text{Sb}_y - 40 \text{ mA}\cdot\text{год}/\text{г}$), що спричинене руйнуванням матеріалу електрода внаслідок заміщення атомів Sb на Li.

Ключові слова: тверді розчини включення, електрохімічне літування, літій-іонні хімічні джерела електричної енергії.

DOI: <https://doi.org/10.30970/vch.5901.115>

Попит на нові матеріали є рушійною силою для науковців, що працюють у напрямі пошуку нових матеріалів чи вдосконалення існуючих. Інтерметаліди на основі рідкісноземельних металів є цікавими з огляду просторової будови (а саме величини порожнин і каналів) та типу провідності. Головні вимоги до електродних матеріалів – це здатність до процесу інтеркаляції-деінтеркаляції зі збереженням вихідної структури та велика сорбційна ємність електродного матеріалу [1, 2]. Найбільшою розрядною ємністю характеризуються фази, які утворюють тверді розчини включення, порівняно з твердими розчинами заміщення, оскільки при заміщенні утворюються продукти, що не завжди мають оборотну здатність до делітування, і, як наслідок, відбувається поступове руйнування структури вихідного електродного матеріалу. На утворення твердих розчинів впливають компоненти, які входять до складу електродного зразка, та електроліт, в середовищі якого відбувається електрохімічний процес, тому не менш важливою є інертність електродів щодо електроліту під дією електричного струму [1].

Відомо, що сполуки R_5M_3 зі структурним типом Mn_5Si_3 мають октаедричні пустоти $2b$, придатні для втілення літію [3]. Рідкісноземельний чи перехідний метал, атоми яких утворюють такі пустоти, впливають на їхні розміри, відповідно, і кількість включеного літію, тоді як p -елемент відповідає за тип утвореного розчину (включення чи заміщення). Згідно з результатами попередніх досліджень [4–7] протяжність твердих розчинів включення на основі станідів Zr_5Sn_3 , Y_5Sn_3 та Gd_5Sn_3 становить 0,65, 0,9 та 0,9 ат. Li/ф.о., відповідно. За збільшення кількості літію відбувається утворення проміжних бінарних сполук літію зі станумом, наприклад, $Li_{17}Sn_4$ (СТ $Li_{17}Pb_4$, ПГ $F\bar{4}3m$). Металічний магній як електродний матеріал [8, 9] або сплави за його участю [6] за електрохімічного літування утворюють бінарний інтерметалід Li_3Mg_5 (власний СТ, ПГ $I4/mmm$). У випадку легування стибієм чи використання стибію як електродного матеріалу простежуємо ємності та ресурсу роботи прототипу хімічного джерела електричної енергії [10, 11].

Мета нашої праці – дослідити процес електрохімічного літування сплавів складу $La_{25}Sn_{75}$, $La_{20}Tb_5Sn_{75}$, $La_{25}Mg_{20}Sn_{55}$, $La_{25}Sn_{65}Sb_{10}$ та $La_{25}Mg_{7,5}Sn_{60}Sb_{7,5}$, визначити область гомогенності твердих розчинів включення літію в структури синтезованих фаз, провести фазовий аналіз сплавів до літування та після, дослідити питому ємність електродних матеріалів, провести дослідження їхньої стабільності у розчині електроліту, охарактеризувати можливість використання синтезованих фаз як електродних матеріалів у Li-іонних хімічних джерелах електричної енергії.

Зразки для дослідження синтезували в електродуговій печі в атмосфері чистого аргону. Для зразків, що містили магній, стибій чи їхню суміш, шихту металів попередньо пресували у таблетку, поміщаючи компоненти з низькою температурою кипіння (Mg, Sb) по центру таблетки. Зразки для гомогенізації відпалювали у вакуумованих кварцових ампулах впродовж двох місяців при 400 °C, гартування проводили у холодній воді, не розбиваючи ампул. Рентгенівський масив даних одержали на автоматичному рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2.0М, (FeK_{α} -випромінювання, інтервал кутів $20^{\circ} \leq 2\theta \leq 120^{\circ}$, крок сканування – $0,025^{\circ}$). Фазовий аналіз зразків анодного матеріалу до та після літування проводили порівнюючи експериментальні дифрактограми з теоретичними, одержаними з використанням програми PowderCell [12]. Параметри елементарних комірок уточнили методом найменших квадратів за допомогою програми LATCON [13].

Електрохімічне літування проводили у двоелектродних моделях акумуляторів типу “Swagelok-cell”. Як катодний матеріал, використовували літій кобальтат $LiCoO_2$ (структурний тип $NaFeO_2$, просторова група $R\bar{3}m$), шарувата кристалічна ґратка якого сприяє переходу літію з каналів структури в структуру електродного матеріалу. Як сепаратор, використовували пресовану целюлозу. Досліджувані сплави масою ~0,3 г, розтерті в порошок та спресовані в таблетку, виконували роль анодного матеріалу. Кожний електродний шар та сепаратор змочували електролітом – 1 М розчином $Li[PF_6]$ у 1:1 етиленкарбонаті та диметилкарбонаті. Процес заряду складеного прототипу акумулятора проводили при струмах 0,5–2,0 мА, розряд – при 0,5 мА. Деякі електрохімічні дослідження проводили на гальваностаті MTech G410-2 [14]. Циклічні вольтамперограми та потенціо-динамічні характеристики електродного матеріалу отримували в триелектродних прототипах акумуляторів “Swagelok-cell” з використанням потенціостат-гальваностату CH Instruments. Як джерело літію, використали літій кобальтат $LiCoO_2$, а як електрод порівняння – чистий літій.

Електродні матеріали до та після електрохімічної інтеркаляції літію досліджували методом порошкової дифракції, скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) та енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (ЕДРС). Структурний тип $AuCu_3$, у якому кристалізуються бінарні сполуки RM_3 , є досить цікавим з огляду наявності достатнього розміру пустот, а також атомів, які утворюють ці пустоти та слугують координаційним оточенням для інтеркальованих атомів Літію. Зокрема, у структурі RM_3Li_x атоми рідкісноземельного металу займають положення $Au\ 1a$ (0 0 0), атоми p -елемента чи статистичної суміші – положення атомів $Cu\ 3c$ (0 1/2 1/2), атоми Li , ймовірно, займають октаедричні пустоти $1b$ (1/2 1/2 1/2) завдяки розміру, достатньому для включення атома Li . Граничний склад твердого розчину включення буде мати структуру перовскіту ($CaTiO_3$, ПГ $Pm\ \bar{3}m$, СП $cP5$), що є надструктурою до $AuCu_3$. На рис. 1 зображено кристалічну структуру тернарної фази RM_3Li_x та координаційний многогранник атомів Li , утворений шістьма атомами p -елемента або статистичної суміші, $[LiM_6]$.

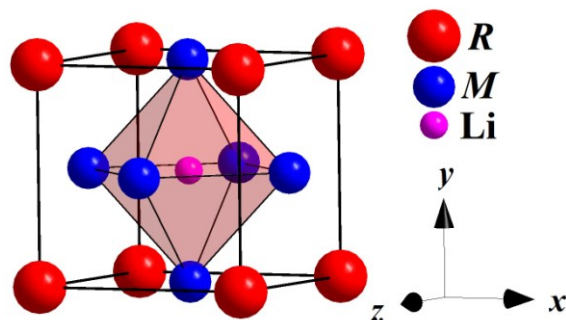


Рис. 1. Кристалічна структура тернарної фази RM_3Li_x зі структурою типу $CaTiO_3$

Fig. 1. Crystal structure of the RM_3Li_x ternary phase with $CaTiO_3$ -type structure

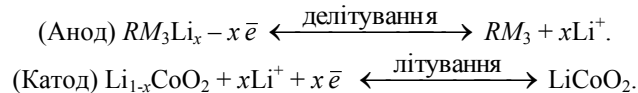
У таблиці наведено результати рентгенофазового аналізу електродних матеріалів на основі фаз RM_3 зі структурою типу $AuCu_3$ до та після електрохімічного літування. Аналізуючи результати електрохімічного літування $LaSn_3$ та його похідних, що кристалізуються в структурному типі $AuCu_3$, бачимо, що відносне збільшення об'ємів елементарних комірок не завжди корелює з кількістю втіленого Літію, обчисленого при делітуванні. Це можна пояснити неповною деінтеркаляцією Li з надструктури перовскіту $CaTiO_3$ внаслідок послаблення дифузійних процесів в об'ємі електродного матеріалу.

Літування зразків, наведених у таблиці, проводили при струмі 0,5 мА, щоб запобігти руйнуванню структури вихідного електродного матеріалу, водночас подані нижче значення питомих ємностей (C_m) наведено при струмі заряду 2,0 мА. Найбільшу кількість Літію (5,25 ат. %) містить твердий розчин на основі бінарної сполуки $LaSn_3$, що призводить до помітного збільшення об'єму елементарної комірки. Твердий розчин на основі $LaSn_{2,21}Mg_{0,79}$ демонструє невелике збільшення об'єму комірки. Максимальна розчинність літію в цій фазі досягає 5,00 ат. %, а максимальна питома розрядна ємність становить ~ 92 мА·год/г. Цікаво, що за малих значень струму заряду (до 0,5 мА) магнієвісний матеріал не демонструє високої ємності, ймовірно, через те, що літій інтеркалюється лише у приповерхневий шар зерен, тоді як за більших значень струму (2,0 мА) ємність зростає на порядки [15].

Матеріал на основі цієї фази зберігає стабільність, навіть після 50 циклів не простежували його руйнування чи зміни складу. Легування тербієм призводить до утворення статистичної суміші рідкісноземельних металів (La, Tb) у положенні 1a і меншої розчинності літію у цій сполуці – 4,00 ат. %, що дорівнює ємності ~60 мА·год/г, у той час як бінарна фаза LaSn₃ розчиняє до 5,25 ат. %, що становить близько ~81 мА·год/г питомої розрядної ємності прототипу акумулятора.

Крім розмірного фактору (атомного радіуса компонентів, що утворюють порожнечу), значну роль має електронний фактор та фізико-хімічні характеристики легуючих компонентів. Зокрема, Sb-вмісний зразок демонструє невелику розчинність літію до 1,25 ат. %, максимальна розрядна ємність становить ~18 мА·год/г. Для цього зразка електродного матеріалу зміна об'єму Li-вмісного сплаву становить лише 0,12 %, що можна пояснити проходженням побічних процесів заміщення атомів літію на стибій одночасно чи після процесів включення атомів літію в структуру фази.

Електрохімічні процеси, що відбуваються на електродах, подано у схемі:



На дифрактограмах зразків після літування ми не помітили слідів утворення нових фаз як продуктів часткового заміщення *p*-елементу на літій. Повного підтвердження, що заміщення не відбувається, немає, однак є ймовірність, що бінарні фази Li_xM_y, M = Sn, Sb можуть утворитися в невеликих кількостях та інтенсивність їхніх дифракційних піків є на рівні фону.

Аналогічну поведінку простежували за електрохімічного літування бінарних сполук Tb₅Sn₃Li_x, де *x* = 0,4 та Tb₅Sb₃Li_x, де *x* = 0,2 [11].

Рентгенофазовий аналіз електродних матеріалів на основі фаз зі структурою типу AuCu₃ до та після електрохімічного літування
X-ray phase analysis of the electrode materials on the basis of the phases with AuCu₃-type structure before and after electrochemical lithiation

Параметри елементарних комірок фаз		ΔV/V, %	Li/ф.о.	ат. % Li
до літування	після літування			
LaSn₃ <i>a</i> = 4,7693(2) Å, <i>V</i> = 108,48(1) Å ³	LaSn₃Li_x <i>a</i> = 4,7848(4) Å, <i>V</i> = 109,54(3) Å ³	0,98	0,21	5,25
La(Sn,Mg)₃ <i>a</i> = 4,7597(4) Å, <i>V</i> = 107,82(2) Å ³	La(Sn,Mg)₃Li_x <i>a</i> = 4,7660(9) Å, <i>V</i> = 108,26(7) Å ³	0,41	0,20	5,00
(La,Tb)Sn₃ <i>a</i> = 4,7468(2) Å, <i>V</i> = 106,96(1) Å ³	(La,Tb)Sn₃Li_x <i>a</i> = 4,7725(5) Å, <i>V</i> = 108,70(4) Å ³	1,63	0,16	4,00
La(Sn,Sb)₃ <i>a</i> = 4,7405(6) Å, <i>V</i> = 106,53(4) Å ³	La(Sn,Sb)₃Li_x <i>a</i> = 4,7425(9) Å, <i>V</i> = 106,66(7) Å ³	0,12	0,05	1,25
La(Mg,Sn,Sb)₃ <i>a</i> = 4,7424(5) Å, <i>V</i> = 106,66(4) Å ³	La(Mg,Sn,Sb)₃Li_x <i>a</i> = 4,7601(8) Å, <i>V</i> = 107,85(5) Å ³	1,12	0,11	2,75

Одночасне легування сполуки LaSn₃ магнієм та стибієм дещо покращує характеристики прототипу акумулятора порівняно з легуванням лише стибієм, а саме вміст літію, що становить 2,75 ат. % Li та питомої ємності – ~40 мА·год/г, однак вони є гірші, ніж для бінарної фази LaSn₃.

Вибрані розрядні характеристики (30-ий цикл) для досліджених електродних матеріалів зображено на рис. 2. Твердий розчин на основі $\text{LaSn}_{2,21}\text{Mg}_{0,79}$, крім найвищої питомої ємності, серед досліджених сплавів демонструє також найбільше значення номінальної напруги розряду, що становить $\sim 2,60$ В. Питома енергоємність такого матеріалу сягає 240 Вт·год/кг.

На рис. 3 наведено СЕМ-зображення та результати ЕДРС для зразка $\text{La}_{25}\text{Sn}_{75}$ до та після інтеркаляції літію. Оскільки сполука LaSn_3 залишається стабільною впродовж усього експерименту, то співвідношення між вмістом лантану та стануму до та після електрохімічного літування суттєво не змінюється.

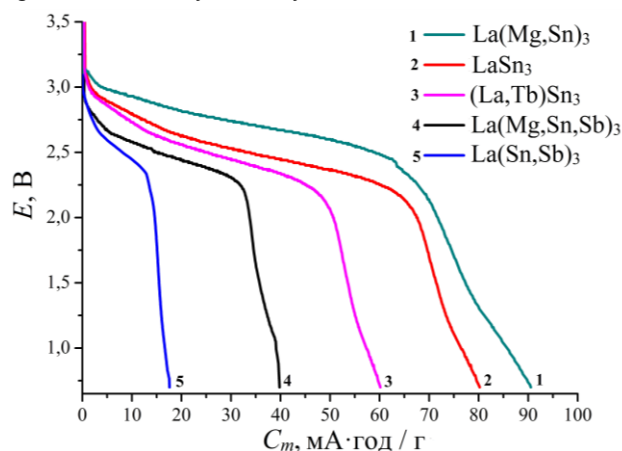


Рис. 2. Розрядні криві для електродних матеріалів на основі фаз зі структурою типу AuCu_3
Fig. 2. Discharge curves for the electrode materials on the basis of the phases with AuCu_3 -type structure

Автори [16] також досліджували електрохімічне літування бінарної сполуки LaSn_3 та твердого розчину заміщення на її основі $\text{LaSn}_{2,7}\text{In}_{0,3}$. Варто зазначити, що за великого вмісту літію вони простежували процеси розкладу-заміщення основної фази, при цьому максимальну ємність мав електродний матеріал на основі бінарної сполуки – 200–250 $\text{mA}\cdot\text{год}/\text{г}$, легована фаза мала меншу оборотну ємність.

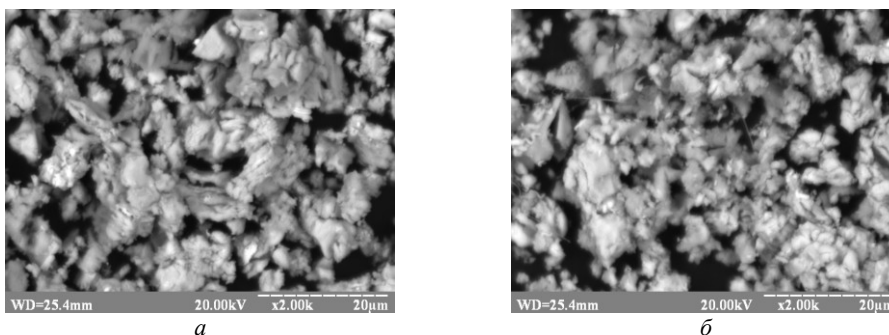


Рис. 3. СЕМ-зображення електродного матеріалу на основі LaSn_3 до ($a - \text{La}_{25,25}\text{Sn}_{74,75}$) та після ($b - \text{La}_{24,82}\text{Sn}_{75,18}$) електрохімічного літування
Fig. 3. SEM-images of the electrode material on the basis of the LaSn_3 before ($a - \text{La}_{25,25}\text{Sn}_{74,75}$) and after ($b - \text{La}_{24,82}\text{Sn}_{75,18}$) electrochemical lithiation

Дослідження хімічної стійкості електродного матеріалу на основі $\text{LaSn}_{3-x}\text{Mg}_x$ ($x = 0,79$) показало, що на перших етапах електрохімічного літування відбувається специфічна взаємодія поверхні електрода з електролітом, що відбувається в катодній області розгортки потенціалу. На рис. 4, *a* чітко простежуємо задовільну відтворюваність вольтамперних залежностей для 1, 2 та 3-го циклів. Потенціодинамічні поляризаційні криві для перших трьох розгорток демонструють зміщення потенціалу Тафеля в напрямку зростання, що свідчить про деяку електрохімічну активність електрода в розчині електроліту (рис. 4, *б*).

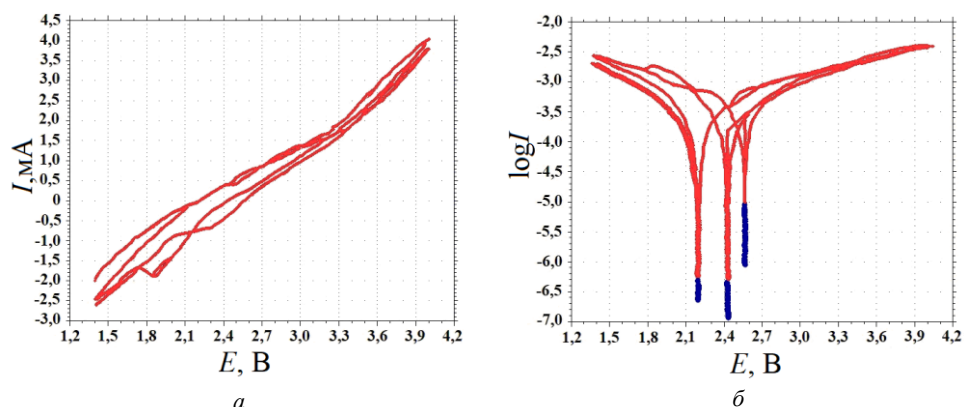


Рис. 4. Циклічні вольтамперограми (*a*) та потенціо-динамічні поляризаційні криві (*б*) для електродного матеріалу на основі $\text{LaSn}_{3-x}\text{Mg}_x$, $x = 0,79$

Fig. 4. Cyclic volt-ampereograms (*a*) and potential dynamic polarization curves (*b*) for electrode material on the basis of $\text{LaSn}_{3-x}\text{Mg}_x$, $x = 0.79$

Отже, експериментальними методами визначили, що легування магнієм покращує електрохімічні властивості синтезованих сплавів. Хоч отримані значення питомої ємності є меншими від теоретичного значення питомої ємності для чистого графіту ~ 372 $\text{mA}\cdot\text{год}/\text{г}$, однак дає цінну інформацію для інших досліджень, а саме вибір сполук із великими розмірами пор, підбір легуючих компонентів для покращення їхніх характеристик (утворення твердих розчинів включення більшої протяжності, забезпечення повноти оборотності процесів делітування-літування, зменшення прямої взаємодії літію з компонентами електродного матеріалу). Головна причина, чому магній як легуюча добавка покращує електрохімічні властивості сплавів у Li-іонних хімічних джерелах електричної енергії – це подібність фізико-хімічних властивостей літію та магнію, що радше зумовлює утворення твердих розчинів, ніж індивідуальних сполук.

Роботу виконано в рамках теми (номер державної реєстрації 0117U007192).

1. Handbook of battery materials / ed. J. O. Besenhard. Weinheim; New York; Chichester; Brisbane; Singapore; Toronto: Wiley-VCH, 1999. 618 p.
2. Vincent C. A., Scrosati B. Modern batteries an introduction to electrochemical power sources: 2nd edn. Arnold. London, 1997.
3. Stetskiv A., Kordan V., Tarasiuk I. et al. Structural peculiarities and electrochemical properties of R_5M_3 ($R = \text{La, Gd}$; $M = \text{Ge, Sn}$) doped by lithium // Chem. Met. Alloys. 2014. Iss. 7. P. 106–111.
4. Balińska A., Kordan V., Misztal R., Pavlyuk V. Electrochemical and thermal insertion of lithium and magnesium into Zr_5Sn_3 // J. Solid State Electrochem. 2015. Vol. 19(8). P. 2481–2490. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10008-015-2895-7>
5. Stetskiv A., Kordan V., Kowalczyk G., Rożyńska-Kielbik B. Electrochemical lithiation and magnesiumation of R_5Sn_3 ($R = \text{Y, Gd}$) alloys // Coll. Abstr. XV Scientific Conference “Lviv chemical reading – 2015”. Lviv. 2015. P. 233.
6. Kordan V., Zelinska O., Pavlyuk V. Electrochemical lithiation of Z_5Sn_3 and $Zr_5NiSn_{3-x}Mg_x$ phases // Coll. Abstr. XV Ukrainian Scientific Conference “Lviv chemical reading – 2015”. Lviv, 2015. P. 225. (in Ukrainian).
7. Kowalczyk G., Kordan V., Stetskiv A., Pavlyuk V. Lithiation and magnesiumation of R_5Sn_3 ($R = \text{Y and Gd}$) alloys // Intermetallics. 2016. Vol. 70. P. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.12.004>
8. Kordan V., Pavlyuk V., Zelinska O. Electrochemical insertion of Lithium into tin and magnesium // Program and book of abstracts of the XXth International Seminar on Physics and Chemistry of Solids. Lviv, 2015. P. 117.
9. Kordan V., Pavlyuk V., Zelinska O. Electrochemical lithiation of magnesium and tin // Visnyk Lviv Univ. Ser. Chem. 2016. Vol. 57 (1). P. 148–154 (in Ukrainian).
10. Kordan V., Zelinska O., Pavlyuk V., Oshchapovsky I., Serkiz R. Electrochemical lithiation of the Ti_5M_3 , Ti_3M and Zr_3M ($M = \text{Sn, Sb}$) binary intermetallics // Chem. Met. Alloys. 2016. Iss. 9(1/2). P. 84–91.
11. Kordan V., Zelinska O., Pavlyuk V. Reactions of combination, decomposition and substitution during electrochemical intercalation of lithium in the structure of Tb_5Sn_3 and Tb_5Sb_3 // Visnyk Lviv Univ. Ser. Chem. 2017. Vol. 58(1). P. 108–116. (in Ukrainian).
12. Kraus W., Nolze G. Powder Cell for Windows. Berlin, 1999.
13. King G., Schwarzenbach D., Hall S. R. et al. Latcon. Xtal3.7 System: University of Western Australia, 2000.
14. <http://chem.lnu.edu.ua/mtech/mtech.htm>
15. Kordan V. M., Zelinska O. Ya., Pavlyuk V. V. Structural and electrochemical characteristics of $LaSn_{3-x}Mg_x$ solid solution // Coll. Abstr. XIX Ukrainian conference on inorganic chemistry with international participation. Odessa, 2014. P. 193.
16. Vaughey J. T., Thackeray M. M., Shin D., Wolverton C. Studies of $LaSn_3$ as a Negative Electrode for Lithium-Ion Batteries // J. Electrochem. Soc. 2009. Vol. 156(7). P. A536–A540. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3125132>

**LaSn₃-BASED SOLID SOLUTIONS AS NEW ELECTRODE MATERIALS
FOR Li-ION BATTERIES****V. Kordan^{1*}, O. Zelinska¹, I. Tarasiuk¹, R. Serkiz², V. Pavlyuk¹**

¹*Ivan Franko National University of Lviv,
Kyryla i Mefodiya Str., 6, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: kordan50@gmail.com;*

²*Ivan Franko National University of Lviv,
Drahomanova Str., 50, 79005 Lviv, Ukraine*

LaSn_{3-x}M_x (M = Mg, Sn, Sb) and La_{1-x}Tb_xSn₃ phases with the cubic AuCu₃-type structure have been investigated by X-ray powder diffraction, scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy, cyclic voltammetry and electrochemical intercalation as potential electrode materials for Li-ion batteries. The samples have been synthesized by arc melting of pure components under an argon atmosphere and further annealing of the alloys at 400 °C over 2 month-period in evacuated silica tubes. Electrochemical lithiation of the phases has been carried out in two-electrode Swagelok-cell prototype of batteries.

Intercalation of Li into the structure of studied phases leads to occupation of the octahedral voids 1b by these atoms and to formation of the ordered solid solutions of inclusion LaSn_{3-x}M_xLi_y, which at the boundary composition crystallize in the superstructure of perovskite (CaTiO₃-type). The largest value of specific capacity (92 mA·h/g) demonstrates electrode material on the basis of alloy from the homogeneity range of solid solution LaSn_{3-x}Mg_x, x = 0.79. The electrode material based on LaSn₃ binary phase exhibits 81 mA·h/g capacity and the electrode material based on La_{1-x}Tb_xSn₃ exhibits 60 mA·h/g capacity. Doping by antimony significantly decreases the specific capacity of alloys. For example, the electrode material based on LaSn_{3-x}Sb_x demonstrates only 18 mA·h/g capacity while the electrode material based on LaSn_{3-x-y}Mg_xSb_y demonstrates 40 mA·h/g of capacity. The main reason for the significant loss of specific capacity by the Sb-doped samples is decomposition of the initial structure of electrode material caused by the substitution of Sb-atoms by Li. Quantitative composition of the LaSn₃ based electrode material did not change significantly after electrochemical lithiation and delithiation. The cyclic volt-amperograms and potential dynamic polarization curves of electrode material based on LaSn_{3-x}Mg_x obtained using three-electrode Swagelok-cell prototype of the battery confirm its stability in the aprotic Li-contained electrolyte.

Keywords: solid solution of inclusion, electrochemical lithiation, Li-ion batteries.

Стаття надійшла до редколегії 31.10.2017

Прийнята до друку 11.04.2018