

УДК 546.3-19'11

## ОДЕРЖАННЯ ВОДНЮ ГІДРОЛІЗОМ КОМПЗИТІВ ГІДРИДУ МАГНІЮ З ДОДАТКАМИ TiFe/Ti<sub>3</sub>Fe<sub>3</sub>O ТА ГРАФІТУ

О. П. КОНОНЮК, І. Ю. ЗАВАЛІЙ, В. В. БЕРЕЗОВЕЦЬ,  
А. Р. КИЦЯ, І. В. БОРУХ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Механічним помелом в атмосфері водню синтезовано гідриди композитів магнію з додатками інтерметаліду TiFe та субоксиду Ti<sub>3</sub>Fe<sub>3</sub>O. Досліджено вплив графіту на розмір частинок композитів. Вивчено дію каталітичних додатків та графіту на гідроліз гідриду магнію. Виявлено залежність кількості отриманого водню гідролізом від тривалості помелу композита.

**Ключові слова:** композити, графіт, гідрид магнію, отримання водню, гідроліз.

Hydrides of magnesium composites with additions of intermetallic TiFe and suboxide Ti<sub>3</sub>Fe<sub>3</sub>O were synthesized by mechanical milling in a hydrogen atmosphere. The addition of graphite reduces the particle size of the composites. The influence of catalytic additives and graphite on the hydrolysis of magnesium hydride was determined. The dependence of the amount of hydrogen obtained by hydrolysis on the time of milling the composite was studied.

**Keywords:** composites, graphite, magnesium hydride, hydrogen generation, hydrolysis.

**Вступ.** Гідрид магнію MgH<sub>2</sub> характеризується високою енергоємністю, а композити на його основі – це перспективні матеріали у водневій енергетиці [1, 2]. Одним з напрямів використання гідриду магнію є генерація водню методом гідролізу. Основна вимога для розвитку цього напрямку – швидкий та дешевий синтез MgH<sub>2</sub>. Додавання субоксидів (Ti, Zr)(Fe, V)O<sub>x</sub> зменшує час отримання гідриду магнію у чотири рази [3, 4]. Перешкодою ефективного гідролізу MgH<sub>2</sub> є утворення компактного шару гідроксиду магнію на поверхні реагуючого матеріалу, гідроліз гідриду магнію припиняється за конверсії ~ 20% [5, 6]. Для підвищення виходу гідролізу запропонували декілька методів [7–10]. Основні з них передбачають подрібнення в кульовому млині, легування, модифікацію складу розчинів, які використовують для гідролізу, і введення каталізаторів. Досліджували вплив солей на перебіг гідролізу гідриду магнію за різних умов, зокрема, гідроліз MgH<sub>2</sub> із розчинами середніх (нормальних) [8, 9, 11] або кислих [12] солей та гідроліз композитів MgH<sub>2</sub>/сіль [13–15] із дистильованою (водопровідною, морською) водою. Найчастіше серед солей вивчали хлориди [8, 9, 13–22]. Механізми гідролізу гідриду магнію із розчинами солей чи у вигляді композитів із дистильованою водою подібні та прямо залежать від рН утвореного розчину [12]. Очікувано гідроліз MgH<sub>2</sub> із розчинами кислих солей відбуватиметься із максимальною конверсією та швидкістю виділення водню [12]. Збільшення концентрації солі у розчині чи композиті сприяє зростанню (але до певного моменту) виходу водню. У праці [21] за додавання 0,5 mol хлориду алюмінію досягали майже повної конверсії з виділенням 1683 ml/g водню за 17 min та не спостерігали утворення гідроксиду магнію. Також виявили значний вплив розміру частинок MgH<sub>2</sub> на кінетику реакції

Контактна особа: І. Ю. ЗАВАЛІЙ, e-mail: ihor.zavaliy@gmail.com

[18, 23], що можна пояснити як геометричним ефектом, так і відмінними хімічними властивостями поверхні. Інший спосіб суттєво поліпшити кінетику реакції є використання високоенергетичного кульового помелу для формування нанокристалічного  $MgH_2$  [24].

Нижче розглянуто результати досліджень впливу додатків графіту та гідридотвірних інтерметалічних сполук (кисеньстабілізованих  $\eta$ -фаз) на мікроструктуру та гідролізні властивості гідриду магнію. Досліджено залежність виходу водню від тривалості помелу композита.

**Методика випробовування.** Отримання композитів зі стружки магнію 1...3 mm (Shanghai Synpad, 99,0%), сполук  $Ti_3Fe_3O_x$  ( $x = 0, 1$ ) та порошку графіту  $\leq 20 \mu m$  (Fluka, 99+%) описано раніше [25]. Сплави  $TiFe$  та  $Ti_3Fe_3O$  готували методом електродугового плавлення, а композити – реактивним кульовим помелом у середовищі водню за обертання диску млина 400 rpm. Кількість водню, поглинутого зразком під час помелу, визначали волюметричним методом за зміною його тиску у відомому об'ємі. Рентгенофазовий аналіз зразків здійснювали за рентгенограмами, отриманими на порошковому рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3.0 ( $CuK_{\alpha}$ -випромінювання). Хімічний склад вихідних компонентів, мікроструктуру та склад готових композитів дослідили за допомогою сканівного електронного мікроскопа EVO 40XVP, оснащеного спектрометром INCA Energy 350 для енергодисперсійного рентгенівського аналізу (EDS).

Кінетику гідролізу  $MgH_2$  вивчали в псевдоізотермічних умовах при  $20^{\circ}C$ , використовуючи устаткування, яке складалося з двогорлої скляної посудини у водяній бані, обладнаної магнетною мішалкою та інжекторами розчинів  $MgCl_2$  і лимонної кислоти. В реакційну колбу, яка містила 0,2 g композита, вводили 20 ml деіонізованої води або розчину хлориду магнію (0,01...0,1 mol/l). Реакційну суміш добре перемішували за допомогою магнетної мішалки. Утворений водень випускали через конденсатор з рідинним охолодженням, потім передавали в колбу, наповнену водою кімнатної температури, і  $H_2$  збирався над поверхнею води. Після того як потік водню припинявся, до реакційної суміші швидко додавали розчин лимонної кислоти (1 mol/l) для встановлення загального виходу реакції гідролізу.

**Результати та обговорення.** Механохімічний синтез композитів, їх воденьсорбційні властивості та каталітичний вплив інтерметалічних сполук  $Ti_3Fe_3O$ ,  $TiFe$  описано раніше [25]. Для дослідження впливу дисперсного стану  $MgH_2$  у реакціях гідролізу синтезовано композити з різною тривалістю помелу.

За результатами рентгенофазового аналізу підтверджено повне перетворення магнію та інтерметалічних сполук у відповідні нанокристалічні гідриди. Жодних нових сполук, які б свідчили про хімічну взаємодію між компонентами сумішей, не виявлено. Мікроструктуру композитних гідридів 90%  $Mg$ –10%  $Ti_3Fe_3O$  та 87%  $Mg$ –10%  $Ti_3Fe_3O$ –3%  $C$ , синтезованих механохімічним помелом, досліджено за допомогою сканувальної електронної мікроскопії та показано на рис. 1. Як бачимо, додавання графіту призводить до утворення дрібніших частинок. Видно, що розміри отриманих частинок знаходяться в діапазоні від 100 nm до кількох мікрометрів. Розмір частинок також оцінювали за допомогою програмного забезпечення AxioVision V 4.8.2.0 (Carl Zeiss Microscopy). Гістограми розподілу частинок композитів за розміром наведено на рис. 2.

Вивчено вплив складу композитів  $Mg$ – $Ti_3Fe_3O_x$ – $C$  на кінетику генерації водню в результаті його гідролізу в дистильованій воді. Як видно з рис. 3, у композитах, які містять графіт, швидкість виділення водню зростає. Додатково, графіт у складі композита збільшує вихід водню більш ніж на 50%. Ймовірно, це пов'язано зі зміною морфології утворених композитів за додавання графіту. Як ба-

чимо (рис. 2а), за помелу гідриду магнію з 10%  $Ti_3Fe_3O$  утворюється полідисперсна система, де розподіл за розмірами частинок описуємо полімодальною функцією з двома максимумами при  $0,7 \pm 0,6 \mu m$  та  $1,9 \pm 0,9 \mu m$ . Водночас за присутності в системі графіту, гістограму розподілу частинок за розмірами (рис. 2b) описуємо монотонною логнормальною функцією розподілу з максимумом при  $0,7 \pm 0,5 \mu m$ .

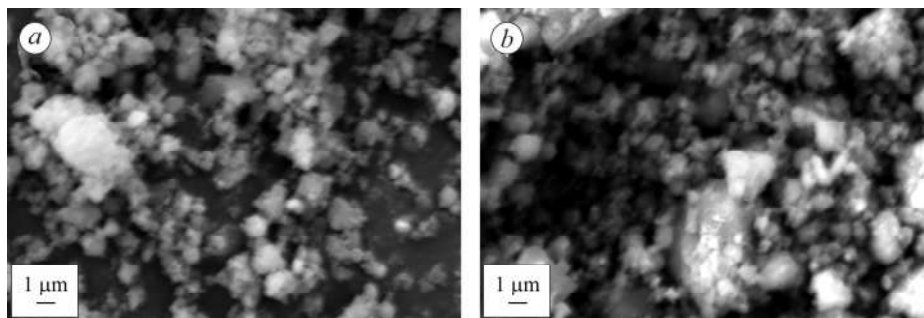


Рис. 1. Мікроструктура гідридних композитів 90% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$  (a) та 87% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$ –3% C (b).

Fig. 1. Microstructure of hydride composites 90% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$  (a) and 87% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$ –3% C (b).

Здрібнення гідриду магнію під час помелу дає змогу суттєво поліпшити вихід водню в реакціях гідролізу. Оптимальна тривалість помелу залежить від використання каталітичних додатків, швидкості та енергії помелу, ступеня чистоти та дисперсності вихідного магнію [6, 9–10, 13, 15]. Композити, отримані за 15 h помелу, містили лише на 3...5% більше водню, ніж композити, отримані впродовж 10 h, але мали суттєво більший ступінь конверсії під час гідролізу. Коефіцієнт перетворення за 30 min гідролізу у чистій воді на 45% вищий для зразка 87% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$ –3% C, отриманого за 15 h помелу, ніж для отриманого за 10 h. Ці зміни, очевидно, пов'язані з вищою дисперсністю зразків з більшою тривалістю помелу.

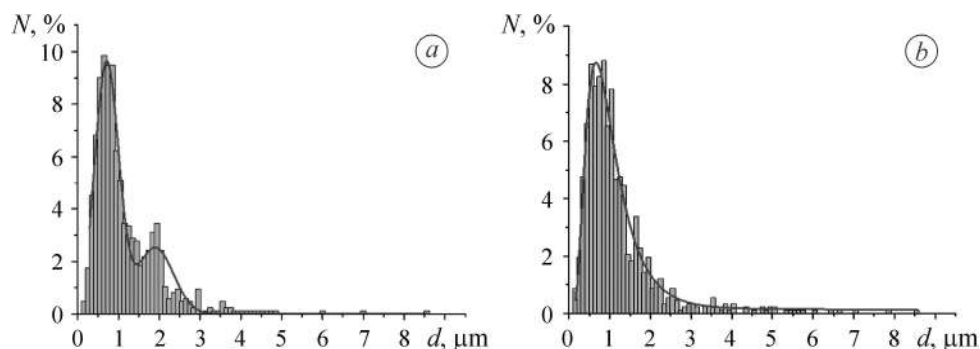
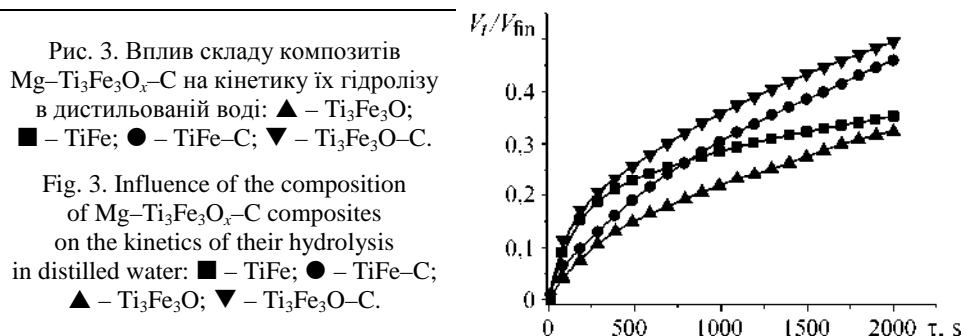


Рис. 2. Розподіл частинок за розмірами в синтезованих композитах 90% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$  (a) та 87% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$ –3% C (b).

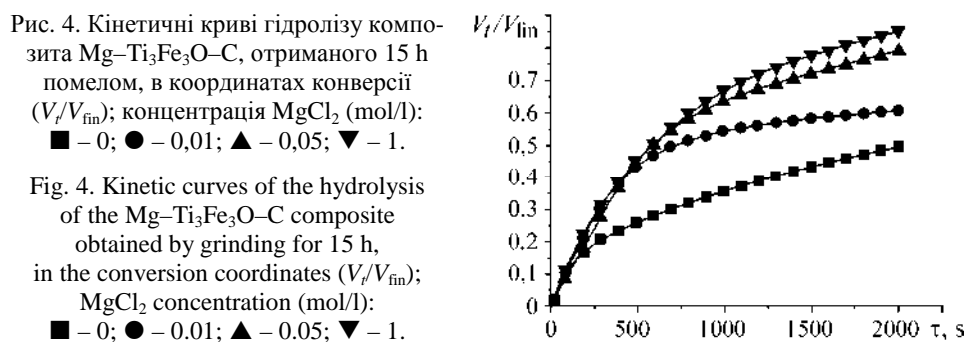
Fig. 2. Size distributions of the particles in the synthesized composites 90% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$  (a) and 87% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$ –3% C (b).

Хлорид магнію є одним з найперспективніших додатків до композитних матеріалів гідролізного генерування водню, зокрема, через його низьку молекулярну масу, оскільки він забезпечує високу конверсію гідриду магнію за незначного зростання загальної маси композиції. Детальніше механізм впливу  $MgCl_2$  на гід-

роліз  $MgH_2$  висвітлено у праці [16]. Проте вплив сумісної дії каталітичних додатків, які використовують для ефективного одержання  $MgH_2$  та  $MgCl_2$ , майже не досліджено. Тому тут вирішили поглиблено вивчити вплив концентрації  $MgCl_2$  на кінетику гідролізу композитів  $Mg-Ti_3Fe_3O_x-C$ . Зважаючи на отримані експериментальні результати (рис. 3), як об'єкт дослідження вибрали композит 87%  $Mg$ -10%  $Ti_3Fe_3O$ -3%  $C$ . Подібний синергетичний ефект спостерігали для зразків з додаванням графіту та  $Fe_2O_3$  [26], трикомпонентний зразок  $MgH_2-C-Fe_2O_3$  має найвищі кінетику і коефіцієнт перетворення гідролізу.



Як і слід очікувати, збільшення концентрації  $MgCl_2$  призводить до зростання як швидкості виділення водню, так і ступеня перетворення (рис. 4, див. таблицю). Водночас варто відмітити, що збільшення концентрації  $MgCl_2$  вдвічі – від 0,05 до 0,1 mol/l – спричиняє приріст конверсії реакції лише на 6%, тобто оптимальною концентрацією хлориду магнію можна вважати 0,05 mol/l (рис. 5). Додавання до розчину хлориду магнію зменшує рН реакційної суміші та не запобігає утворенню пасиваційного шару гідроксиду. Під час гідролізу повного розчинення гідриду магнію не спостерігали, на відміну від праць [27, 28]. Утворення гідроксиду магнію відбувається при рН розчину  $> 9,6$  [5], за використаних концентрацій хлориду його значення більше [16]. Механізм гідролізу  $MgH_2$  у розчинах  $MgCl_2$  передбачає утворення буферного розчину, який призводить до зниження коефіцієнта перенасичення розчину  $Mg(OH)_2$  і, відповідно, до збільшення розміру кристалітів з подальшим утворенням неоднорідної пасиваційної плівки на поверхні  $MgH_2$ .



Під час аналізу отриманих результатів виявили лінійну залежність ступеня перетворення субстрату 87%  $Mg$ -10%  $Ti_3Fe_3O$ -3%  $C$  від логарифму концентрації  $MgCl_2$  у розчинах (рис. 5b). Схожу залежність спостерігали раніше [16] і пояснювали формуванням в реакційній системі буферного розчину “ $Mg(OH)_2-MgCl_2$ ”, рН якого лінійно знижується з ростом  $\log([MgCl_2])$ :

$$pH = 14 - pK_1 + \log([Mg(OH)_2]/[MgCl_2]) .$$

Тут  $K_1$  – константа рівноваги реакції  $Mg(OH)_2 \rightleftharpoons MgOH^+ + OH^-$ .

**Вплив складу композита і концентрації  $MgCl_2$  на ступінь перетворення і об'єм водню, який виділився впродовж 2000 с гідролізу субстрату**

Гідроліз у воді			Гідроліз 87% Mg–10% $Ti_3Fe_3O$ –3% C у розчинах $MgCl_2$		
Склад композита	$V_t/V_{fin}$	$V_t$ , ml/g	$C_{MgCl_2}$ , mol/l	$V_{2000}/V_{fin}$	$V_{2000}$ , ml/g
90% Mg–10% TiFe	0,35	540	0,01	0,61	910
87% Mg–10% TiFe–3% C	0,46	690	0,03	0,75	1120
90% Mg–10% $Ti_3Fe_3O$	0,33	510	0,05	0,79	1180
87% Mg–10% $Ti_3Fe_3O$ –3% C	0,50	750	0,1	0,85	1270

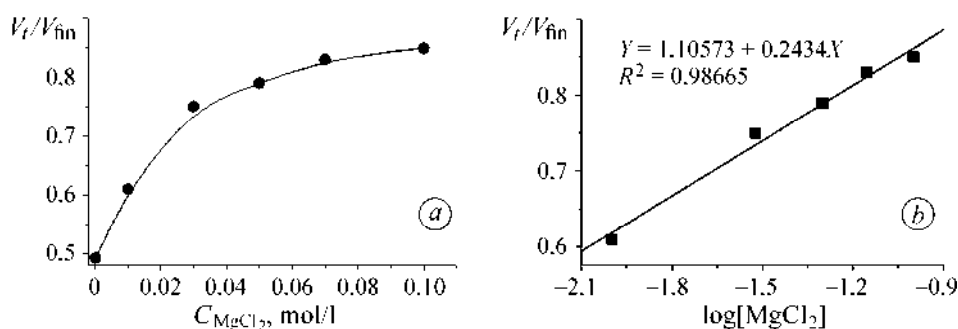


Рис. 5. Пряма (а) та логарифмічна (б) залежності конверсії композита 87% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$ –3% C від концентрації  $MgCl_2$ .

Fig. 5. Direct (a) and logarithmic (b) dependence of the conversion of 87% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$ –3% C composite on the  $MgCl_2$  concentration.

### ВИСНОВКИ

Нанокompозити на основі гідриду магнію синтезовано реакційним кульовим помелом з порошку магнію, субоксиду  $Ti_3Fe_3O$  або інтерметаліду TiFe в атмосфері водню. Показано каталітичний вплив субоксиду та безкисневої сполуки TiFe на утворення гідриду  $MgH_2$ . Структура цих матеріалів проаналізована та охарактеризована за допомогою рентгенівського аналізу та електронного сканувального мікроскопа. Синтезовані нанокompозити протестовані як матеріали для генерування водню гідролізом. Досліджено вплив каталізатора та графіту на ступінь конверсії. Синергетичний вплив графіту та  $Ti_3Fe_3O$  суттєво підвищує кінетику та вихід гідролізу  $MgH_2$ . Отримані результати показали, що композит 87% Mg–10%  $Ti_3Fe_3O$ –3% C має найвищу ступінь конверсії, яка досягає 90%. За 30 min гідролізу цього композита у чистій воді утворюється 850 ml/g водню, а у 0,1 M розчині хлориду магнію – 1500 ml/g.

*Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України в межах гранту №2020.02/0301 “Розроблення нових функціональних матеріалів для потреб водневої енергетики”.*

1. Sakintuna B., Lamari-Darkrim F., and Hirscher M. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review // Int. J. Hydrogen Energy. – 2007. – 32. – P. 1121–1140. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.022>
2. Review on magnesium hydride and sodium borohydride hydrolysis for hydrogen production / N. Ruslan, M. S. Yahya, M. N. I. Siddique, A. P. Yengantiwar, M. Ismail, M. R. Awal, M. Z. Mohd Yusoff, M. F. A. Abdul Halim Yap, and N. S. Mustafa // Crystals. – 2022. – 12. – P. 1376. <https://doi.org/10.3390/cryst12101376>

3. *Effect of Ti-based nanosized additives on the hydrogen storage properties of MgH<sub>2</sub>* / V. V. Berezovets, R. V. Denys, I. Yu. Zavaliy, Y. V. Kosarchyn // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2022. – **47**. – P. 7289–7298. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.019>
4. *Hydrogen absorption-desorption properties and hydrolysis performance of MgH<sub>2</sub>-Zr<sub>3</sub>V<sub>3</sub>O<sub>0.6</sub>H<sub>x</sub> and MgH<sub>2</sub>-Zr<sub>3</sub>V<sub>3</sub>O<sub>0.6</sub>H<sub>x</sub>-C composites* / I. Zavaliy, V. Berezovets, R. Denys, O. Kononiuk, and V. Yartys // *J. Energy Storage*. – 2023. – **65**. – Article number: 1072445. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107245>
5. *Chemical equilibrium analysis for hydrolysis of magnesium hydride to generate hydrogen* / T. Hiraki, S. Hiroi, T. Akashi, N. Okinaka, and T. Akiyama // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2012. – **37**, №17. – P. 12114–12119. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.06.012>
6. *Production of hydrogen from magnesium hydrides hydrolysis* / T. Tayeh, A. S. Awad, M. Nakhil, M. Zakhour, J. F. Silvain, and J. L. Bobet // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2014. – **39**, № 7. – P. 3109–3117. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.082>
7. *Hydrogen generation by the hydrolysis of MgH<sub>2</sub>* / Y. V. Verbovytskyy, V. V. Berezovets, A. R. Kytsya, I. Y. Zavaliy, and V. A. Yartys // *Materials Science*. – 2020. – **56**, № 1. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00390-5>
8. *Grosjean M.-H., Zidoune M., and Roué L. Hydrogen production from highly corroding Mg-based materials elaborated by ball milling* // *J. Alloys and Comp.* – 2005. – **404–406**. – P. 712–715. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.10.098>
9. *Hydrogen production via hydrolysis reaction from ball-milled Mg-based materials* / M.-H. Grosjean, M. Zidoune, L. Roué, and J.-Y. Huot // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2006. – **31**. – P. 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.01.001>
10. *Hydrogen generation from ball milled Mg alloy waste by hydrolysis reaction* / S. Al Bacha, S. A. Pighin, G. Urretavizcaya, M. Zakhour, F. J. Castro, M. Nakhil, and J.-L. Bobet // *J. Power Sources*. – 2020. – **479**. – Article number: 228711. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228711>
11. *Mg-TiN and Mg-ZrN nanocomposites as efficient materials for the accumulation and generation of hydrogen* / I. Yu. Zavaliy, V. V. Berezovets, I. V. Oshchapovsky, and T. M. Zasadnyy // *Materials Science*. – 2021. – **57**, № 1. – P. 53–60. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00514-5>
12. *Hydrogen-generating compositions based on magnesium* / S. D. Kushch, N. S. Kuyunko, R. S. Nazarov, and B. P. Tarasov // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2011. – **36**, № 1. – P. 1321–1325. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.115>
13. *Grosjean M. H. and Roué L. Hydrolysis of Mg-salt and MgH<sub>2</sub>-salt mixtures prepared by ball milling for hydrogen production* // *J. Alloys and Comp.* – 2006. – **416**. – P. 296–302. DOI:10.1016/j.jallcom.2005.09.008
14. *An efficient hydrolysis of MgH<sub>2</sub>-based materials* / M. Tegel, S. Schöne, B. Kieback, and L. Röntzsch // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2017. – **42**, № 4. – P. 2167–2176. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.084>
15. *Influence of chloride salts on hydrogen generation via hydrolysis of MgH<sub>2</sub> prepared by hydriding combustion synthesis and mechanical milling* / S. Li, D. Y. Gan, Y. F. Zhu, Y. N. Liu, G. Zhang, and L. Q. Li // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. – 2017. – **27**. – P. 562–568. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60062-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60062-1)
16. *Kinetics and mechanism of hydrolysis of MgH<sub>2</sub> in MgCl<sub>2</sub> solutions* / V. V. Berezovets, A. R. Kytsya, I. Yu. Zavaliy, and V. A. Yartys // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2021. – **46**. – P. 40278–40293. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.249>
17. *Zhao Z., Zhu Y., and Li L. Efficient catalysis by MgCl<sub>2</sub> in hydrogen generation via hydrolysis of Mg-based hydride prepared by hydriding combustion synthesis* // *Chem. Commun.* – 2012. – **48**, № 44. – P. 5509–5511. DOI:10.1039/c2cc32353b
18. *Enhanced hydrogen generation properties of MgH<sub>2</sub>-based hydrides by breaking the magnesium hydroxide passivation layer* / L. Ouyang, M. Ma, M. Huang, R. Duan, H. Wang, L. Sun, and M. Zhu // *Energies*. – 2015. – **8**, № 5. – P. 4237–4252. <https://doi.org/10.3390/en8054237>
19. *Sevastyanova L. G., Klyamkin S. N., and Bulychev B. M. Generation of hydrogen from magnesium hydride oxidation in water in presence of halides* // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2020. – **45**. – P. 3046–3052. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.226>

20. *Hydrogen generation by oxidation of “mechanical alloys” of magnesium with iron and copper in aqueous salt solutions* / L. G. Sevastyanova, V. K. Genchel, S. N. Klyamkin, P. A. Lario-nova, and B. M. Bulychev // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2017. – **42**, № 27. – P. 16961–16967. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.242>
21. *Kinetic performance of hydrogen generation enhanced by AlCl<sub>3</sub> via hydrolysis of MgH<sub>2</sub> prepared by hydriding combustion synthesis* / D. Gan, Y. Liu, J. Zhang, Y. Zhang, C. Cao, Y. Zhu, and L. Li // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2018. – **43**. – P. 10232–10239. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.119>
22. *Effect of various additives on the hydrolysis performance of nanostructured MgH<sub>2</sub> synthesized by high-energy ball milling in hydrogen* / D. S. Korablov, O. V. Bezdorozhev, S. Gierlotka, V. A. Yartys, and Yu. M. Solonin // *Powder Metall Met Ceram*. – 2013. – **59**. – P. 483–490. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00193-6>
23. *The effect of particle size on hydrolysis properties of Mg<sub>3</sub>La hydrides* / J. M. Huang, R. M. Duan, L. Z. Ouyang, Y. J. Wen, H. Wang, and M. Zhu // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2014. – **39**. – P. 13564–13568. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.024>
24. *Huot J., Liang G., and Schulz R. Magnesium-based nanocomposites chemical hydrides* // *J. Alloys Comp.* – 2003. – **353**. – P. L12–L15. DOI:10.1016/S0925-8388(02)01306-3
25. *Синтез і воденьсорбційні властивості композитів MgH<sub>2</sub> з додатками TiFe та Ti<sub>3</sub>Fe<sub>3</sub>O* / В. В. Березовець, О. П. Кононюк, Р. В. Денис, І. Ю. Завалій // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2023. – **59**, № 2. – С. 73–79.
26. *The effect of graphite and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition on hydrolysis kinetics of Mg-based hydrogen storage materials* / K. Yang, H. Qin, J. Lv, R. Yu, X. Chen, Z. Zhao, Y. Li, F. Zhang, X. Xia, Q. Fu, and M. Wang // *Int. J. of Photoenergy*. – 2021. – **2021**. – Article number: 6651541. <https://doi.org/10.1155/2021/6651541>
27. *Generation of hydrogen by the hydrolysis of mixtures of magnesium hydride with citric acid* / V. V. Berezovets, A. R. Kytsya, T. M. Zasadnyy, I. Yu. Zavaliy, and V. A. Yartys // *Materials Science*. – 2022. – **58**, № 3. – P. 350–356. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00670-w>
28. *Chao C. H. and Jen T. C. Reaction of magnesium hydride with water to produce hydrogen* // *Appl. Mech. and Mater.* – 2013. – **302**. – P. 151–157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.302.151

Одержано 06.03.2023