

**Nan Zhang¹, Pan Ma^{1,2,3,*}, Zhilu Yang¹, Yacheng Fang¹,
Zhiyu Zhang¹**

¹School of Materials Engineering, Shanghai University
of Engineering Science, Shanghai, P. R. China

²State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining,
Harbin Institute of Technology, Harbin, P. R. China

³Institute for Composites Science Innovation (InCSI),
School of Materials Science and Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou, P. R. China

**mapan@sues.edu.cn*

Методи та механізм фізичного диспергування графену

Підсумовано фізичні методи покращення диспергування графену, який привертає все більше уваги завдяки своїм чудовим властивостям, зокрема оптичним, електричним і механічним, але важливим фактором, що суттєво впливає на його застосування, є дисперсність, що дає можливість використовувати графен для зміцнення композитів з металевою матрицею. Проведено порівняння переваг і недоліків методів диспергування та передбачено їхнє вдосконалення і застосування в майбутньому.

***Ключові слова:** графен, фізичне диспергування, кульове подріблення, ультразвукова обробка, перемішування, електростатична взаємодія.*

ВСТУП

Як відомо, графен є різновидом двовимірного сітчастого вуглецевого наноматеріалу з унікальною структурою, завдяки якій він має відмінні фізичні та хімічні властивості [1]. Як найтонша і найтвердіша речовина у світі, графен демонструє чудові механічні властивості, хорошу електро- та теплопровідність [2]. Останніми роками, у зв'язку зі зростанням вимог до характеристик матеріалів у різних областях, дослідження композитів з металевою матрицею поглиблюються. Графен часто додають у металеву матрицю для зміцнення матеріалів для виготовлення композитів, але також широко використовують в багатьох областях [3–5]. Однак через велику питому поверхню графену та високі сили Ван-дер-Ваальса між листами графену, листи графену схильні до агломерації, що серйозно обмежує потенціал застосування композитів. В даний час диспергування графену в матриці є в центрі уваги поточних досліджень. Дана робота підсумовує останні дослідження методів та механізму диспергування графену, що ефективно допоможе розширити діапазон його застосування [6, 7].

ФІЗИЧНІ МЕТОДИ ДИСПЕРГУВАННЯ

Методи фізичного диспергування в основному включають подрібнення в кульовому млині [8], ультразвукову обробку [9], перемішування [10], елект-

ростатичну взаємодію [11] і мікрохвильову обробку [12]. Механізм цих методів полягає в подоланні сил Ван-дер-Ваальса між листами графену та реалізації дисперсності.

Кульове подрібнення

Кульове подрібнення широко використовують як метод змішування порошку, який може діяти на графен за допомогою зсуву або удару та впливати на ван-дер-ваальсові листи графену для покращення його диспергування, а висока швидкість обертання кульового подрібнювача може ефективно сприяти рівномірному розподілу графену в металевій матриці.

У процесі кульового подрібнення температура, час і швидкість обертання є важливими факторами, які впливають на диспергування графену. Було повідомлено [13, 14] про використання низькотемпературного кульового подрібнення середовища та порошоків у рідкому азоті. Порівняно з кімнатною температурою, низькотемпературне кульове подрібнення може ефективно пригнічувати відновлення та рекристалізацію [15] і зменшувати розмір зерна. Крім того, під час процесу можна зменшити введення агента контролю процесу, елементи, що зміцнюють, можуть бути рівномірно розподілені і добре скріплені в матриці. У [16] повідомляли, що час кульового подрібнення, швидкість і час ультразвуку мають великий вплив на продуктивність композита з графенових нанолістів (ГНЛ) і Al, що включав 0,5 % (за масою) ГНЛ. Після обробки ультразвуком графен був згорнутий (див. рис. 1), і кількість листів зменшувалася зі збільшенням часу обробки. Диспергування графену ставало кращим зі збільшенням часу обробки ультразвуком. Графенові нанолісти було інтегровано в матрицю Al, агломерація була найнижчою і комплексні механічні властивості одержаного матеріалу були кращими, коли швидкість, час кульового подрібнення і час ультразвукової обробки графену становили 300 об/хв, 6 год і 90 хв відповідно. Застосування двостадійного процесу кульового подрібнення [17] допомагає досягти рівномірного диспергування високого вмісту ГНЛ, які спочатку диспергували на поверхні алюмінієвого листа за допомогою низькошвидкісного кульового подрібнення (НШКП), а потім диспергували в частинки алюмінію протягом короткого періоду після високошвидкісного кульового подрібнення (ВШКП). 5,0 % (за об'ємом) ГНЛ можна рівномірно розподілити в алюмінієвій матриці за допомогою ВШКП, однак ГНЛ буде пошкоджено, якщо вхідна енергія буде занадто високою. Поєднання НШКП і ВШКП могло б допомогти отримати ГНЛ з інтегрованою структурою та рівномірним диспергуванням в алюмінієвих порошках, що значно покращило б механічні властивості.

Композити з алюмінієвого сплаву Al6061 і 1 % (за масою) графену [18] готували гарячим пресуванням у напівтвердому стані після кульового подрібнення та попереднього компактування за кімнатної температури. Дослідження впливу часу кульового подрібнення показало, що довший час кульового подрібнення допомагає рівномірно диспергувати графен і зменшувати кількість його листів, однак процес кульового подрібнення частково пошкодив структуру графену та порушив його цілісність. Подібним способом готували композити ГНЛ/Cu за допомогою кульового подрібнення та спікання гарячим пресуванням [19] і виявили, що кульове подрібнення було сприятливим для диспергування ГНЛ у мідній матриці, однак занадто довгий час кульового подрібнення може сильно пошкодити ГНЛ.

Такі речовини, як меламін, також можуть бути диспергаторами під час кульового подрібнення, до того ж їх можна легко видалити. У [20] отримали

листи графену різних розмірів в умовах твердотілого стану у разі додавання меламіну в процесі кульового подрібнення та видалення графіту через взаємодію. Меламін має ароматичне ядро, здатне взаємодіяти з π -системою графену, що може зменшити вільну поверхневу енергію графену та уникнути його агломерації. Крім того, графен можна повторно диспергувати в органічних розчинниках, воді або середовищі для утворення стабільного диспергатора. У [21] додавали велику кількість NaCl як абразиву під час процесу кульового подрібнення. Коли час подрібнення збільшився з 2 до 5 год, крихкі та тверді частинки NaCl змогли подрібнити більш м'який графен на дрібніші пластівці, що ефективно перешкождало агрегації графену. Після кульового подрібнення NaCl змивали водою, що було зручним і ефективним способом.

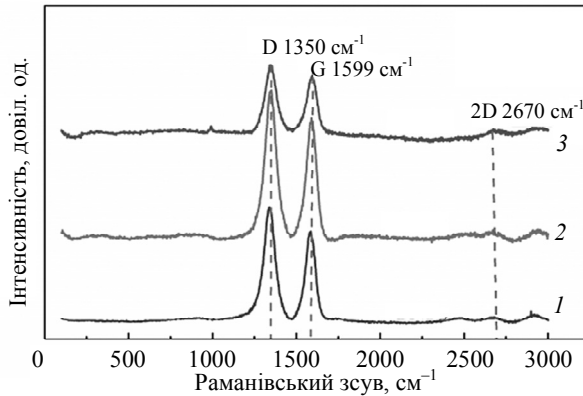


Рис. 1. Спектри комбінаційного розсіювання графену до (1) та після (2, 3) ультразвукової обробки протягом 60 (2) і 90 (3) хв [16].

Ультразвукова обробка

Ультразвуковий метод є ефективним методом зменшення поверхневої енергії та сприяння диспергуванню графену за допомогою ультразвукової кавітації, високої енергії та великої частоти коливань [22]. Енергія між розчинником і графеном, одержана за допомогою дії ультразвуку, перевищує енергію, необхідну для відшарування графенового листа, і, відповідно, графен традиційно демонструє хороше диспергування. Порівняно з іншими методами, ультразвукова обробка є зручним і перспективним методом, який сприяє розширенню областей застосування графену.

Під час обробки ультразвуком у розчині виникає велика кількість кавітаційних бульбашок, які потім швидко згортаються, створюючи ударну хвилю, яка розбиває накопичені згустки графену та відокремлює їх один від одного [23]. Крім того, ультразвукова обробка є зручною, екологічно чистою та може запобігти попаданню домішок [22].

У [24] досліджували вплив часу обробки ультразвуком, потужності ультразвуку, типу розчинника та температури на диспергування та структуру ГНЛ. Було виявлено, що розчинник з низькою температурою, низькою в'язкістю або високим поверхневим натягом вимагає збільшення часу або потужності ультразвукової обробки. Однак збільшення часу ультразвукової обробки або збільшення її потужності збільшить ступінь хаотичності розподілу атомів вуглецю [25]. Порівняно з отриманими ГНЛ, розмір і кількість щільно розташованих частинок (позначених А на рис. 2, а) явно зменшилися, тоді як кількість неупорядкованих нагромаджених ГНЛ (позначених В) знач-

но збільшилася. Зі збільшенням часу дії ультразвуку розмір і кількість агрегатів ГНЛ (позначених С і D на рис. 2, б і в) зменшувалися (порівняно з рис. 2, а, з). Результати показали, що оптимальний час ультразвукової обробки становив 4 год, агреговані частинки зникали, а ГНЛ руйнувалися з подальшим збільшенням часу.

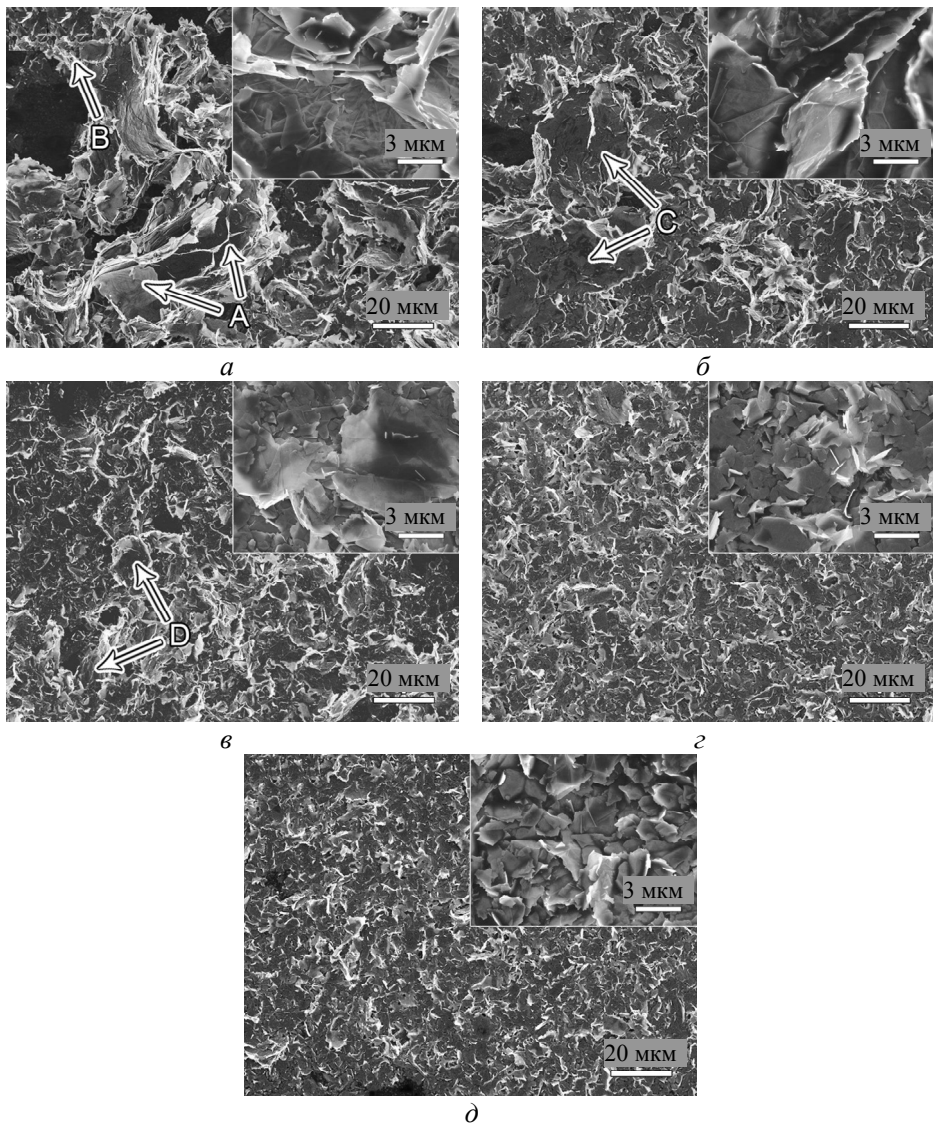


Рис. 2. СЕМ-зображення ГНЛ, диспергованих ультразвуком, протягом 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (з), 5 (д) год; вставки – відповідне збільшене зображення [24].

Авторами [26] було успішно створено графен зі стабільним диспергуванням високої концентрації за допомогою інгібування агрегації різних проміжних продуктів у процесі відновлення оксиду графену (ОГ) без руйнування хімічної структури та кристалічної структури графену. У [27] зазначено, що добре диспергований графен можна отримати за допомогою збільшення часу дії ультразвуку. Однак у процесі ультразвукового диспергування структура поверхні графену може бути пошкоджена локальною високою енергією, що

негативно впливає на продуктивність графену. У [28] підготували 0,5 % (за масою) графенового наночарового армованого алюмінієвого матричного композита за допомогою ультразвукового диспергування та виявили, що в результаті рівномірного розподілу графену межа текучості композита зросла на 50 % без втрати пластичності порівняно з матрицею.

Перемішування

Силу зсуву, яка виникає в процесі перемішування, можна використовувати для диспергування графену. Згідно з принципом процесу перемішування, він в основному включає перемішування тертям і магнітне перемішування [29, 30]. Обробка тертям (ОТ) може ефективно диспергувати графенові нанолісти в металеву матрицю, особливо в алюмінієву матрицю.

Виявлено [31], що багатопрхідна обробка тертям з перемішуванням може, очевидно, інтегрувати та диспергувати ГНЛ у металевій матриці сплаву Al–Mg, результати показали, що додавання ГНЛ значно покращило механічні властивості завдяки великій питомій площі поверхні на одиницю об'єму графену, в результаті посилення невідповідності. У [32] також використовували багатопрхідну обробку тертям з перемішуванням (ОТП) для виготовлення композита 2009Al (ГНЛ/2009Al). Було показано, що зі збільшенням кількості проходів ОТП розподіл ГНЛ значно покращився. ГНЛ досягли рівномірного диспергування після двох проходів ОТП. Випробування на розтяг також показали, що максимальна границя міцності на розтяг і границя текучості композитного матеріалу значно зросли після двох проходів ОТП. Композити Al–SiC-багатошарові вуглецеві нанотрубки (ВНТ) і Al–SiC-графенові нанолісти було отримано методом тертя з перемішуванням [33], порівняння властивостей їхньої поверхні виявлено, що ГНЛ більш рівномірно дисперговані в алюмінієвій матриці порівняно з ВНТ. Зміцнений графеном матричний композит 7050Al виготовляли за допомогою процесу лиття з перемішуванням і стисненням [34]. Повідомлено, що графен був рівномірно розподілений і добре зчеплений з алюмінієвою матрицею, що значно покращило механічні властивості композита.

Електростатична взаємодія

Електростатична взаємодія є ще одним ефективним способом покращення розподілу графену в алюмінієвій матриці за рахунок адсорбції між позитивними та негативними частинками.

Рівномірно розподілений у порошках Al ОГ було отримано за допомогою електростатичного притягання у змішаному розчині вода/етанол [35]. Початкове відновлення ОГ, спричинене електронним обміном під час процесу адсорбції, у поєднанні з подальшим відновленням термічного відпалу сприяло повному відновленню графену, а це сприяло покращенню механічних властивостей кінцевих ущільнених композитів відновлений оксид графену (ВОГ)/Al в результаті високої якості ВОГ та міцного з'єднання між поверхнями з алюмінієвою матрицею. У [36] використовували Mg^{2+} як “точку прив'язки” для адсорбції нанолістів графену на поверхні порошку Al під час процесу змішування на основі хімічної реакції водної суспензії. Через малу концентрацію Mg^{2+} міжфазний зв'язок між графеном і матрицею Al був значно покращений завдяки хімічному зв'язку та електростатичному притяганням, а диспергування графену на матриці було посилено. Було повідомлено [37], що через електростатичну взаємодію між ОГ та алюмінієм ОГ було відновлено та рівномірно нанесено на поверхню мікросферичних порошоків Al, і меха-

нічні властивості алюмінієвої матриці були значно покращені. Продемонструвано [38], що розподіл таблеток ОГ в порошок Al було покращено за допомогою простого методу електростатичної адсорбції з Cu^{2+} в якості сполучного містка до суспензії порошку ОГ/Al. Результати показали, що легування 3 % (за масою) Cu^{2+} показало найкраще диспергування ОГ на поверхні порошку Al і чудові механічні властивості.

Мікрохвильова обробка

Мікрохвильова обробка може генерувати високу енергію та тепло, які можуть подолати сили Ван-дер-Ваальса між листами графену, і таким способом покращувати диспергування графену. Дослідження [39], зосереджені на впливі графіту, обробленого в мікрохвильовій печі, на електропровідність та електрохімічні властивості композитів поліанілін/ОГ, показали, що графен, отриманий за допомогою мікрохвильової обробки, має добру дисперсню та високовпорядковану шарову структуру, яка сприяла міцному зв'язку між ОГ та поліфеніламіновими нанолістами. У [40] розчин аміаку (NH_4OH) було розподілено між графеновими листами розширеного графіту, і NH_4OH спонтанно розкладався на NH_3 і H_2O під мікрохвильовим низькотемпературним опроміненням. Результуючий тиск повітря відіграв значну роль у подоланні сил Ван-дер-Ваальса між графеновими листами. Було виявлено, що продукти стабільно диспергуються в аміачній воді і в основному складаються з одного, двох і кількох листів графену.

ВИСНОВКИ

Узагальнено традиційні фізичні методи рівномірного диспергування графену в металевих матричних композитах.

Методи фізичного диспергування демонструють переваги в простоті роботи, доступності обладнання, запобіганні руйнуванню та новому утворенню ковалентного зв'язку. Однак такі методи можуть частково пошкодити цілісність структури графену. Ефективність фізичного диспергування графену нижча, ніж методу хімічної модифікації.

На даний момент графен, що має відмінні характеристики, в композиті використовують не достатньо, але використання можна максимізувати за допомогою його рівномірного розподілу в композиті та інтеграції.

Узагальнено традиційні фізичні методи рівномірного диспергування графену в металевих матричних композитах.

Методи фізичного диспергування демонструють переваги через простоту і доступність обладнання, запобігають руйнуванню та утворенню ковалентних зв'язків.

Однак метод фізичного диспергування може руйнувати структуру графену. Крім того, ефективність фізичного диспергування графену нижча, ніж за допомогою методу хімічної модифікації.

На даний момент відмінні характеристики графену для армування і зміцнення композитів не використовують в достатній мірі, тому необхідно максимізувати характеристики графену через його рівномірний розподіл та інтеграцію.

Nan Zhang¹, Pan Ma^{1, 2, 3}, Zhilu Yang¹, Yacheng Fang¹,
Zhiyu Zhang¹

¹School of Materials Engineering, Shanghai University
of Engineering Science, Shanghai, P. R. China

²State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining,

Harbin Institute of Technology, Harbin, P. R. China

³Institute for Composites Science Innovation (InCSI),

School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University,

Hangzhou, P. R. China

Physical dispersion method and mechanism of graphene

As a reinforcement phase to form metal matrix composites, graphene has attracted more and more attention due to its excellent properties i.e. optical, electrical and mechanical properties. However, the dispersion of graphene has always been an important factor that significantly effects its development. This paper mainly summarizes the physical methods to improve the dispersion of graphene and analyzes its internal mechanism, moreover the advantages and disadvantages of these methods are depicted and compared. Finally, the improvement of the dispersion of graphene and its future applications are prospected.

Keywords: *graphene, physical dispersion, ball milling, ultrasonic treatment, stirring, electrostatic interaction.*

1. Huang B.R., Chan H.W., Jou S., Chen G.Y., Kuo, H.A., Song W.J. Structure and field emission of graphene layers on top of silicon nanowire arrays. *Appl. Surf. Sci.* 2016. Vol. 362. P. 250–256.
2. Galiotis C., Frank O., Koukaras E.N., Sfyris D. Graphene mechanics: current status and perspectives. *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 2015. Vol. 6, no. 1. P. 121–140.
3. Zhuo Q., Ma Y., Gao J., Zhang P., Xia Y., Tian Y., Sun X., Zhong J., Sun X. Facile synthesis of graphene/metal nanoparticle composites via self-catalysis reduction at room temperature. *Inorg. Chem.* 2013. Vol. 52, no. 6. P. 3141–3147.
4. Wejrzanowski T., Grybczuk M., Chmielewski M., Pietrzak K., Kurzydowski K.J., Strojny-Nedza A. Thermal conductivity of metal-graphene composites. *Mater. Des.* 2016. Vol. 99. P. 163–173.
5. Guo R., Yue W., Ren Y., Zhou W. Hierarchical structured graphene/metal oxide/porous carbon composites as anode materials for lithium-ion batteries. *Mater. Res. Bull.* 2016. Vol. 73. P. 102–110.
6. Yaakub J., Mohamad N., Abd Razak J., Lau K.T., Abd Manaf M.E., Shueb M.I., Dispersion stability of graphene nanoplatelets (GNPs) and noncovalent-functionalization of GNPs with chitosan in ethanol. *Appl. Mech. Mater.* 2015. Vol. 761. P. 447–451.
7. Park M., Song K., Lee T., Cha J., Lyo I., Kim B.S. Tailoring graphene nanosheets for highly improved dispersion stability and quantitative assessment in nonaqueous solvent. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2016. Vol. 8, no. 33. P. 21595–21602.
8. Yu M., Shao D., Lu F., Sun X., Sun H., Hu T., Wang G., Sawyer S., Qiu H., Lian J. ZnO/graphene nanocomposite fabricated by high energy ball milling with greatly enhanced lithium storage capability. *Electrochem. Commun.* 2013. Vol. 34. P. 312–315.
9. Muthoosamy K., Manickam S. State of the art and recent advances in the ultrasound-assisted synthesis, exfoliation and functionalization of graphene derivatives. *Ultrason. Sonochem.* 2017. Vol. 39. P. 478–493.
10. Gamil M., Ahmed M.M. Investigating the thermo-mechanical properties of aluminum/graphene nano-platelets composites developed by friction stir processing. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2020. Vol. 21, no. 8. P. 1539–1546.
11. Guo Y., Yang W., He F., Xie C., Fan J., Wu J. Zhang K. Electrostatic interaction-based self-assembly of paraffin@graphene microcapsules with remarkable thermal conductivity for thermal energy storage. *Fuller. Nanotub. Carbon Nanost.* 2019. Vol. 27, no. 2. P. 120–127.
12. Chen W., Yan L., Bangal P.R. Preparation of graphene by the rapid and mild thermal reduction of graphene oxide induced by microwaves. *Carbon.* 2010. Vol. 48, no. 4. P. 1146–1152.
13. Han T., Li J., Zhao N., He C. Microstructure and properties of copper coated graphene nanoplates reinforced Al matrix composites developed by low temperature ball milling. *Carbon.* 2020. Vol. 159. P. 311–323.
14. Ye J., Han B.Q., Lee Z., Ahn B., Nutt S.R., Schoenung J.M. A tri-modal aluminum based composite with super-high strength. *Scr. Mater.* 2005. Vol. 53, no. 5. P. 481–486.
15. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling. *Prog. Mater. Sci.* 2001. Vol. 46, nos. 1–2. P. 1–184.

16. Lou S.M., Qu C.D., Guo G.X., Ran L.W., Liu Y.Q., Zhang P.P., Su C.J. Wang Q.B. Effect of fabrication parameters on the performance of 0.5 wt.% graphene nanoplates-reinforced aluminum composites. *Materials*. 2020. Vol. 13, no. 16, art. 3483.
17. Zheng Z., Zhang X., Li J., Geng L. High-content graphene nanoplatelet reinforced aluminum composites produced by ball milling and hot extrusion. *Sci. China Technol. Sci.* 2020. Vol. 63, no. 8. P. 1426–1435.
18. Bastwros M., Kim G.Y., Zhu C., Zhang K., Wang S., Tang X., Wang X. Effect of ball milling on graphene reinforced Al6061 composite fabricated by semi-solid sintering. *Comp. B. Eng.* 2014. Vol. 60. P.111–118.
19. Yue H., Yao L., Gao X., Zhang S., Guo E., Zhang H., Lin X., Wang B. Effect of ball-milling and graphene contents on the mechanical properties and fracture mechanisms of graphene nanosheets reinforced copper matrix composites. *J. Alloys Compd.* 2017. Vol. 691. P. 755–762.
20. Leon V., Rodriguez A. M., Prieto P., Prato M., Vazquez E. Exfoliation of graphite with triazine derivatives under ball-milling conditions: preparation of few-layer graphene via selective noncovalent interactions. *ACS Nano*. 2014. Vol. 8, no. 1. P. 563–571.
21. Alinejad B., Mahmoodi K. Synthesis of graphene nanoflakes by grinding natural graphite together with NaCl in a planetary ball mill. *Funct. Mater. Lett.* 2017. Vol. 10, no. 4. P. 1750047.
22. Show K.Y., Mao T., Lee D.J. Optimisation of sludge disruption by sonication. *Water Res.* 2007. Vol. 41, no. 20. P. 4741–4747.
23. Si Y., Samulski E.T. Synthesis of water soluble graphene. *Nano Lett.* 2008. Vol. 8, no. 6. P. 1679–1682.
24. Zhang B., Chen T. Study of ultrasonic dispersion of graphene nanoplatelets. *Materials*. 2019. Vol. 12, no. 11, art. 1757.
25. Cañado L.G., Jorio A., Ferreira E.M., Stavale F., Achete C.A., Capaz R.B., Moutinho M.V.O., Lombardo A., Kulmala T.S., Ferrari A.C. Quantifying defects in graphene via Raman spectroscopy at different excitation energies. *Nano Lett.* 2011. Vol. 11, no. 8. P. 3190–3196.
26. Zhang W., He W., Jing X. Preparation of a stable graphene dispersion with high concentration by ultrasound. *J. Phys. Chem. B*. 2010. Vol. 114, no. 32. P. 10368–10373.
27. Khan U., O'Neill A., Lotya M., De S., Coleman J.N. High-concentration solvent exfoliation of graphene. *Small*. 2010. Vol. 6, no. 7. P. 864–871.
28. Yan S.J., Dai S.L., Zhang X.Y., Yang C., Hong Q.H., Chen J.Z., Lin Z.M. Investigating aluminum alloy reinforced by graphene nanoflakes. *Mater. Sci. Eng. A*. 2014. Vol. 612. P. 440–444.
29. Dixit S., Mahata A., Mahapatra D. R., Kailas S. V., Chattopadhyay K. Multi-layer graphene reinforced aluminum–manufacturing of high strength composite by friction stir alloying. *Comp. B. Eng.* Vol. 136. P. 63–71.
30. Yue L., Pircheraghi G., Monemian S. A., Manas-Zloczower I. Epoxy composites with carbon nanotubes and graphene nanoplatelets–Dispersion and synergy effects. *Carbon*. 2014. Vol. 78. P. 268–278.
31. Khodabakhshi F., Arab S. M., Švec P., Gerlich A. P. Fabrication of a new Al–Mg/graphene nanocomposite by multi-pass friction-stir processing: Dispersion, microstructure, stability, and strengthening. *Mater. Charact.* 2017. Vol. 132. P. 92–107.
32. Zhang Z.W., Liu Z.Y., Xiao B.L., Ni D.R., Ma Z.Y. High efficiency dispersal and strengthening of graphene reinforced aluminum alloy composites fabricated by powder metallurgy combined with friction stir processing. *Carbon*. 2018. Vol. 135. P. 215–223.
33. Sharma A., Sharma V.M., Paul J. A comparative study on microstructural evolution and surface properties of graphene/CNT reinforced Al6061–SiC hybrid surface composite fabricated via friction stir processing. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2019. Vol. 29, no. 10. P. 2005–2026.
34. Venkatesan S., Xavier A. Experimental investigation on stir and squeeze casted aluminum alloy composites reinforced with graphene. *Mater. Res. Express*. 2019. Vol. 6, no. 12. art. 126542.
35. Li Z., Fan G., Tan Z., Guo Q., Xiong D., Su Y., Li Z., Zhang D. Uniform dispersion of graphene oxide in aluminum powder by direct electrostatic adsorption for fabrication of graphene/aluminum composites. *Nanotechnol.* 2014. Vol. 25, no. 32. art. 325601.
36. Ju J. M., Wang G., Sim K. H. Facile synthesis of graphene reinforced Al matrix composites with improved dispersion of graphene and enhanced mechanical properties. *J. Alloys Compd.* 2017. Vol. 704. P. 585–592.

37. Wu Y., Zhan K., Yang Z., Sun W., Zhao B., Yan Y., Yang J. Graphene oxide/Al composites with enhanced mechanical properties fabricated by simple electrostatic interaction and powder metallurgy. *J. Alloys Compd.* 2019. Vol. 775. P. 233–240.
38. Sun W., Zhan K., Yang Z., Zhao R., Wang T., Zhao B., Ya Y., Junbe Y. Facile fabrication of GO/Al composites with improved dispersion of graphene and enhanced mechanical properties by Cu doping and powder metallurgy. *J. Alloys Compd.* 2020. Vol. 815. art. 152465.
39. Tang Y., Hu X., Liu D., Guo D., Zhang J. Effect of microwave treatment of graphite on the electrical conductivity and electrochemical properties of polyaniline/graphene oxide composites. *Polymers.* 2016. Vol. 8, no. 11. art. 399.
40. Janowska I., Chizari K., Ersen O., Zafeiratos S., Soubane D., Costa V. D., Speisser V., Boeglin C., Houllé M., Bégin D., Plee D., Ledoux M.-J., Pham-Huu C. Microwave synthesis of large few-layer graphene sheets in aqueous solution of ammonia. *Nano Res.* 2010. Vol. 3, no. 2. P. 126–137.

Надійшла до редакції 27.07.22

Після доопрацювання 27.07.22

Прийнята до опублікування 14.09.22