

ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ІЗОСТАТИЧНОГО ГРАФІТУ

Карвацький А. Я., Лелека С. В., Лазарєв Т. В., Педченко А. Ю.

1. Вступ

Графітові матеріали набули широкого використання в різних галузях промисловості завдяки унікальному поєднанню механічних, хімічних і теплофізичних властивостей. Їх застосовують в металургії, енергетиці, машинобудуванні, на підприємствах військово-промислового комплексу, під час виготовлення вогнетривких матеріалів, електричних машин і установок, фарб, акумуляторних батарей, нагрівачів тощо.

На виробництві використовують як природний, так і штучний графіт, останній з яких відзначається високою чистотою. Штучний графіт за способом виготовлення, подальшого місця його використання, експлуатаційних умов поділяється на велику кількість різновидів та марок. Ізостатичний графіт представляє собою окремий унікальний тип графітового матеріалу, який відрізняється від інших видів штучного графіту кращими фізичними властивостями та їх ізотропністю по всій структурі. Деталі з даного матеріалу за багатьма характеристиками міцності схожі на сталеві, а за електро- та теплопровідністю зберігають всі переваги графіту. У деяких галузях промисловості такий матеріал практично незамінний. Наприклад, електроди з ізостатичного графіту в електроерозійних верстатах дають змогу мало не на порядок збільшити точність металообробки [1].

Ізостатичний графіт являє собою дрібнозернистий графіт, який отримують за високого тиску методом ізостатичного пресування. З даного матеріалу виготовляють вироби складної форми з високою чистотою обробки поверхні. Для потреб металургійної промисловості з ізостатичного графіту виготовляються ливарні кокілі, плавильні тиглі, кристалізатори, воронки, жолоби тощо [2]. В електротехнічній галузі з цього матеріалу виготовляють елементи електровакуумних приладів, контейнери для виробництва напівпровідників, сітки для випрямлячів з ртуті, аноди. Ізостатичний графіт є незамінним конструкційним матеріалом реакторів атомних електростанцій, сонячних фотоелектричних елементів тощо.

Розробка технології виробництва ізостатичного графіту ведеться провідними виробниками на ринку з виготовлення штучного графіту ще з 60-х років минулого століття. У країнах СНД та в Україні зокрема даним перспективним напрямком вітчизняні виробники зацікавилися після 2006 року, тобто в час швидкого зростання глобальної фотоелектричної промисловості. Такий швидкий ріст призвів до нестачі перспективного графітового матеріалу на світовому ринку з виробництва штучного графіту [3]. З того часу провідні виробники займаються постійним розширенням асортименту ізостатичного графіту та удосконалюванням технології його виробництва.

За даних обставин дослідження та вдосконалення технології виробництва продукції з ізостатичного графіту є безперечно актуальною задачею.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом даного дослідження є процес виробництва ізостатичного графіту та перспективи його подальшого розвитку на світовій арені.

Наразі ізостатичний графіт є досить затребуваним матеріалом, який користується значним попитом у фотоелектричній промисловості та є незамінним під час виробництва напівпровідників. Це пояснюється унікальністю властивостей даного типу графіту, який характеризується високими значеннями міцності, термостійкості, електропровідності та однорідністю фізичних властивостей.

Однак виробництво ізостатичного графіту потребує ретельної підготовки вихідної сировини, застосування спеціального потужного пресувального обладнання, використання детально розроблених режимів термообробки тощо. В кінцевому результаті це призводить до високих цін на готовий ізостатичний графіт порівняно з іншими типами графітових матеріалів.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи – дослідження особливостей процесу поетапного виготовлення ізостатичного графітового матеріалу та визначення рівня попиту продукції з високодисперсного графітового матеріалу на світовому ринку.

Для досягнення вказаної мети необхідно виконати такі задачі:

1. Визначити основні етапи виробництва ізостатичного графіту та провести їх детальний аналіз.
2. Розкрити особливості технології закордонного виробництва ізостатичного графіту та визначити можливості її удосконалення на підприємствах України.
3. Встановити рівень подальшого розвитку світового виробництва ізостатичного графітового матеріалу та матеріалів на його основі.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

В результаті аналізу літературних даних встановлено, що ізостатичний штучний графіт отримують у декілька стадій, а саме [4–11]:

- підготовка пеку та подрібнення коксу;
- змішування коксу та пеку з одночасним нагріванням отриманої суміші;
- формування, охолодження та подрібнення утвореної коксопекової композиції;
- пресування подрібненого порошку в заготовки під дією високого тиску у спеціальних ізостатичних пресах;
- випалювання підготовлених заготовок за температури до 800–1300 °С;
- графітування випалених вуглецевих виробів за температури до 3000 °С;
- механічна обробка графітових заготовок з метою отримання кінцевого продукту.

Також було встановлено, що ізостатичний графіт є досить затребуваним матеріалом у фотоелектричній промисловості у виробництві сонячних батарей – в галузі, яка зазнає стрімкого розвитку з 2006 року [3, 12, 13]. Дана зростаюча тенденція вимагає застосування нових високочистих марок ізотропного графіту, а відтак і нових технологій його виробництва.

Таким чином, результати аналізу дають змогу зробити висновок про те, що детальний опис технології виготовлення ізостатичного графіту ретельно

оберігається провідними зарубіжними виробниками з виробництва графітової продукції. Тому дослідження та облік доступної інформації, потрібної для розвитку даного напрямку з виробництва нового та перспективного конструкційного графіту та виробів на його основі є вкрай актуальною задачею.

5. Методи досліджень

Для вирішення поставленої задачі використовувалися методи синтезу, аналізу та систематизації доступної у відкритому доступі інформації, пов'язаної з виробництвом продукції з використанням ізостатичного графіту.

Для побудови усередненої залежності основних механічних властивостей деяких найпоширеніших марок зарубіжних зразків високодисперсного графіту та тенденцій виробництва ізостатичного графіту використовувалися методи статистичної обробки даних.

6. Результати досліджень

6.1. Аналіз сучасного стану технології виробництва ізостатичного графіту.

Як відомо, процес виробництва ізостатичного графіту починається з приготування вихідної сировини, а саме подрібнення наповнювача – коксу різної природи та підготовки «матриці – в'язучого матеріалу» – зазвичай кам'яновугільного пеку [11].

У якості наповнювача використовують сланцевий [5, 7], нафтовий [6] і пековий кокс [1, 8, 9], а також суміш коксового дріб'язку різної природи [8]. Голчастий кокс практично не використовують через досить високу анізотропію частинок, утворених після процесу подрібнення, однак такий кокс дає змогу отримувати матеріал високої густини з низьким коефіцієнтом термічного розширення (КТР) [1].

Також існує технологія отримання однокомпонентного ізостатичного графіту на основі мезофазних пеків, які одержують у результаті спеціальної термічної обробки кам'яновугільних пеків. Порошок із такого матеріалу є самов'язучим і не потребує додавання до нього в'язучого матеріалу під час виробництва конструкційного графіту. У результаті отримані з порошків на основі мезофазних пеків вироби мають підвищену ізотропність і фізико-механічні характеристики [14].

Після подрібнення наповнювача його розмелюють з метою отримання фракції з середнім розміром зерен 30–150 мкм для мілкодисперсних марок графіту або до 1–30 мкм для тонкодисперсних марок. У результаті аналізу продукції на основі ізостатичного графіту таких компаній, як:

- SGL Carbon (Німеччина);
- Mersen (Франція);
- Toyo Tanso (Японія);
- GrafTech (США);
- АТ «НИИГрафит» (Росія),

встановлено, що наразі найбільш затребувані на міжнародному ринку з виробництва вуглецевої продукції тонкодисперсні ізостатичні графіти з середнім ро-

зміром зерен 10–20 мкм. Важливо також відмітити, що надтонке подрібнення вуглецевих наповнювачів до розмірів частинок близько 1 мкм досягається за рахунок механічної енергії на рівні 15 кДж/г. Зі зменшенням розміру частинок від 30 мкм до 1 мкм енерговитрати на подрібнення збільшуються більш ніж на три порядки [1]. Також це призводить до зниження ступеня досконалості кристалічної структури вуглецевих наповнювачів. Руйнування матеріалу до розмірів частинок менше 1 мкм призводить до зниження його здатності графітуватися [15]. Даний факт показує принципову неможливість застосовувати такого матеріалу в якості наповнювача для виробництва штучного графіту, принаймні за необхідності отримати матеріал з високою тепло- та електропровідністю.

Також важливо підбирати такий гранулометричний склад наповнювача, щоб за один технологічний цикл мати змогу отримувати готові графітові заготовки з уявною густиною понад 1700 кг/м³. Така оптимізація в ряді випадків дає змогу підвищити уявну густину одержуваних графітів на 150 кг/м³ та отримувати готові вироби з дрібнозернистого графіту без проведення додаткових технологічних циклів «просочення – випалювання» [1].

Встановлено, що густина упакування частинок наповнювача визначається співвідношенням розмірів найбільших і найменших за розмірами частинок – чим більша ця різниця, тим більша густина упаковки досягається. На рис. 1 наведено залежність максимальної об'ємної частки наповнювача від співвідношення граничних розмірів частинок $\delta_{\min}/\delta_{\max}$ у полідисперсних наповнювачах. Анізотрія частинок за даних обставин є негативним фактором, який знижує густину упаковки [1]. На рис. 2 наведено результати теоретичних розрахунків з визначення оптимального гранулометричного складу наповнювача за $\delta_{\max}=100$ мкм [16].

Для систем, що забезпечують максимальну густину упаковки, кількість в'язучої речовини задається величиною вільного об'єму, тобто величиною $(100-P_n)$, як це видно з рис. 1.

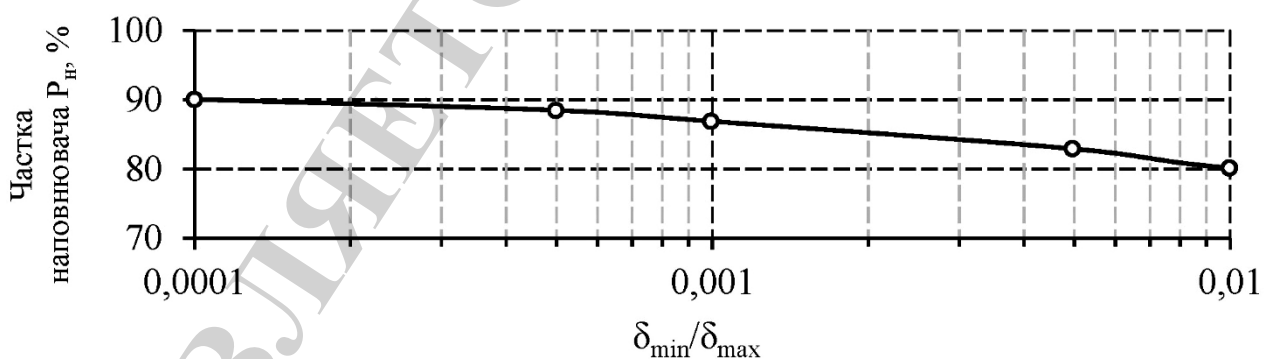


Рис. 1. Залежність максимальної об'ємної частки наповнювача від співвідношення граничних розмірів частинок $\delta_{\min}/\delta_{\max}$ у полідисперсних наповнювачах [16]

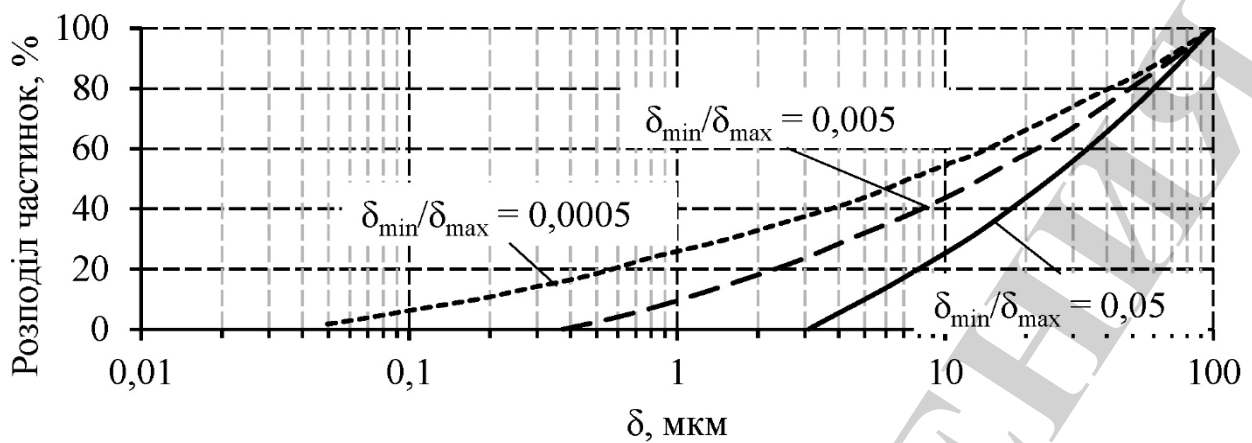


Рис. 2. Теоретичне значення функції розподілу частинок по розмірам, які забезпечують максимальну густину упакування [16]

Підготовку кам'яновугільного пеку здійснюють, наприклад, за допомогою контрольованої термічної обробки до температури 630 °С [8] або додаванням до 1,5 % спеціальних високодисперсних вуглецевмісних добавок з одночасним змішуванням та нагріванням суміші:

- складні феноли та фенілфосфати [5];
- фулерени та фулерити [7];
- нанодисперсний вуглець [7, 9];
- терморозширений природний графіт тощо [9].

Така підготовка дає змогу підвищити фізико-хімічні та технологічні характеристики коксопекової суміші, що є важливим на різних стадіях виробництва штучного графіту. Також це дає змогу створити таку просторову структуру, яка в результаті дає можливість підвищити технологічні властивості кінцевого продукту.

Після підготовки компонентів їх ретельно змішують з одночасним нагріванням до температури значно вищої температури розм'якшення пеку. При цьому коксопекова композиція переважно складається з 60–72 % (по масі) наповнювача та 28–40 % (по масі) в'язучого матеріалу [1, 5, 6, 9].

Далі отриману масу охолоджують до температури навколишнього середовища, подрібнюють, розмелюють і в результаті отримують преспорошок необхідної фракції.

Процес ізостатичного пресування проходить за нормальної температури на ізостатичних пресах за допомогою рідкої речовини, яка з усіх боків рівномірно стискає підготовлений преспорошок за величини тиску пресування 40–200 МПа [5, 8, 9, 17, 18]. Саме цей процес дає змогу отримувати графітовий матеріал більш високої об'ємної густини, низької пористості та високої твердості.

Надалі відпресовані заготовки піддають термічній обробці: випалювання за температури 800–1300 °С та графітування за температури до 3000 °С. Після процесу випалювання заготовки за потреби додатково просочують в'язучим матеріалом і знову повторяють стадію випалювання. В процесі термообробки заготовки зменшуються в об'ємі та ущільнюються [19]. Величина об'ємної усадки залежить

основним чином від вибору наповнювача та вмісту в ньому летючих і можуть досягати до 50 % від початкового об'єму відпресованого матеріалу [17–20].

У результаті проведених вище операцій отримують тонкодисперсний ізостатичний графіт, який характеризується такими фізичними властивостями (за с. у.) [4]:

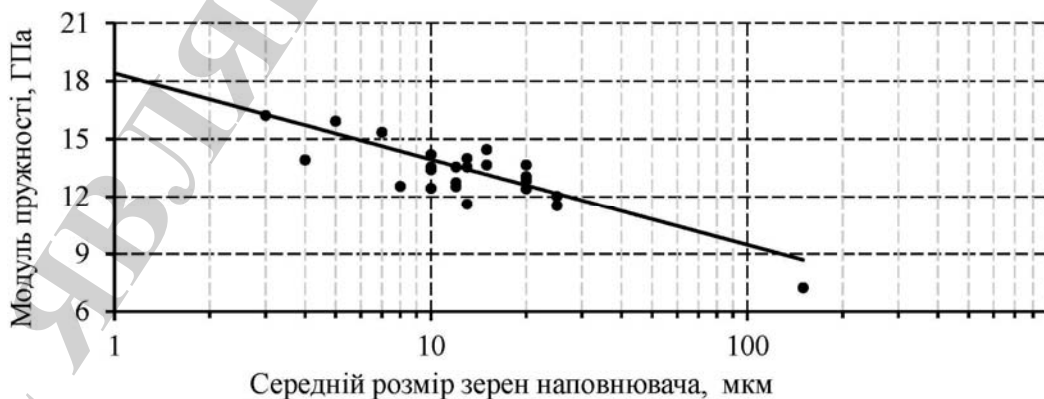
- питомий електричний опір – 10–15 мкОм·м;
- коефіцієнт теплопровідності – 70–140 Вт/(м·К);
- КЛТР (до 200 °С) – $3 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, густина – 1,7–1,9 г/см³.

Міцність ізостатичного графіту залежить від середнього розміру зерен [1]. На рис. 3 наведено залежності модуля пружності та характеристик міцності різних типів конструкційного графіту від середнього розміру зерен наповнювача приведених до значень матеріалу з нульовою поруватістю. Для побудови даних залежностей використовувалася доступна у відкритому доступі інформація щодо властивостей 100 найпоширеніших марок зарубіжних зразків високодисперсного графіту виробників:

- GrafTech Int. (США) [21];
- SGL Carbon (Німеччина) [22];
- Mersen (Франція) [23];
- Toyo Tanso (Японія) [24];
- Ibiden Co. (Японія) [25].



а



б

Рис. 3. Залежність від середніх розмірів зерен наповнювача: а – границі міцності; б – модуля пружності для різних марок штучного графіту

Зі зменшенням розмірів зерен збільшується КТР тонкодисперсних графітів. Це пов'язано з ростом кристалів, чим продукується термічне розширення графіту [16]. Також збільшується температура початку окиснення на повітрі з 400 °С до 500 °С, що обумовлено зниженням середнього розміру пор [16, 26]. Додавання бору в якості модифікатора дає змогу підвищити температуру початку окиснення на повітрі до 700 °С та зменшити КТР нижче 10^{-6} K^{-1} [27].

Завершальним етапом виготовлення ізостатичного графіту є механічна обробка графітових заготовок, а також, за потреби, виконується газотермічна очистка.

6.2. Перспективи світового виробництва ізостатичного графітового матеріалу.

Наразі лідерами в області виробництва конструкційних штучних графітів є [28]:

- GrafTech Int. (США);
- Graphite India (Індія);
- HEG (Індія);
- JSC Energoprom Management (Росія);
- Nippon Carbon Co. (Японія);
- SEC Carbon (Японія);
- SGL Carbon Group (Німеччина);
- Showa Denko Carbon Inc. (США);
- Ibiden Co. (Японія);
- Mersen Group (Франція);
- POCO Graphite Inc. (США);
- Toyo Tanso Co. (Японія);
- Schunk Group (Німеччина).

Розвиток фотоелектричної галузі, збільшення обсягів виробництва напівпровідників, удосконалення технології електроерозійної технології – все це підвищує попит на ізостатичний графіт [3, 12, 13]. Також це змушує перераховані вище компанії розширювати асортимент продукції та удосконалювати технологію виробництва. Наразі світове виробництво ізостатичного графіту становить близько 120 кт/рік і продовжує зростати [3].

У результаті аналізу наявної у відкритому доступі інформації встановлено, що в найближчі кілька років очікується збільшення світового виробництва ізостатичного графіту понад 5 % щорічно (рис. 4). За даних обставин найбільшого зростання виробництва очікується в Китаї (рис. 5), на який припадає більше чверті всього світового виробництва ізостатичного графіту [3].

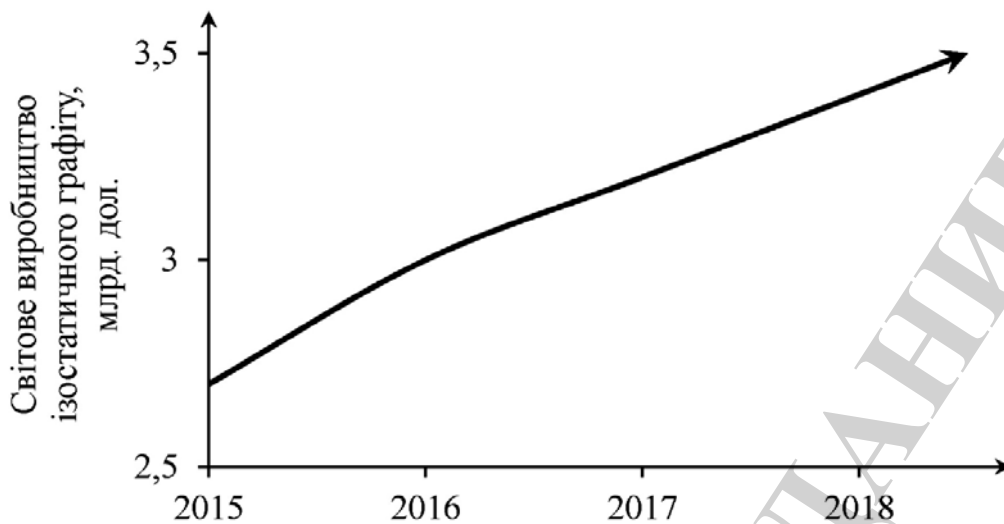


Рис. 4. Тенденція світового виробництва ізостатичного графіту [3]

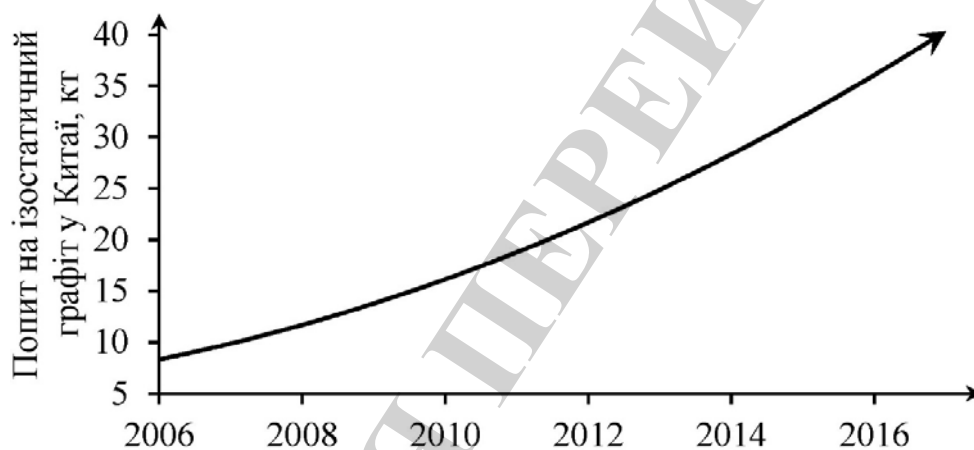


Рис. 5. Тенденція виробництва ізостатичного графіту в Китаї [3]

Така зростаюча тенденція виробництва графітового матеріалу сприяє розвитку нової технології виробництва ізостатичного графіту в Україні. В результаті це дасть можливість українським виробникам конкурувати із зарубіжними фірмами з виробництва високодисперсних марок графіту.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Сильною стороною цього дослідження є доказ принципової можливості та перспективи виготовлення ізостатичного графіту на ринку України з виробництва графітової продукції. Досвід українських виробників з вуглеграфітової продукції дає змогу в короткі терміни розробити та впровадити нову технологію та мати можливість конкурувати зі світовими виробниками.

Weaknesses. Слабкою стороною процесу виготовлення ізостатичного графіту є складна поетапна технологія виробництва, яка потребує:

- значних людських та енергетичних ресурсів;
- використання спеціалізованого потужного подрібнювального та пресувального обладнання;
- розробки раціональних режимів обробки тощо.

В результаті це позначається на високій ціні кінцевого продукту.

Opportunities. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням технології процесу виробництва ізостатичного графіту:

– розробка обладнання та раціональних режимів подрібнення, змішування та пресування коксопекової композиції, використовуючи українські доступні марки коксу та пеку;

– проведення експериментальних досліджень повної одностадійної термічної обробки спресованих заготовок з метою зниження питомої витрати електроенергії для одержання готового продукту.

Threats. Відсутність повністю розробленої конкурентоспроможної технології виробництва ізостатичного графіту ставить під загрозу можливий подальший її розвиток в Україні. Також промислове впровадження виробництва сонячних фотоелементів на основі графену [29, 30] може призвести загалом до значного зниження темпів світового виробництва ізостатичного графіту.

8. Висновки

1. Встановлено, що схема отримання ізостатичного штучного графіту включає:

- подрібнення та розмелювання наповнювача;
- змішування його із в'язучою речовиною й отримання коксопекової композиції;
- подрібнення коксопекової композиції для отримання преспорошку;
- формування заготовок шляхом ізостатичного пресування;
- випалювання у відновлювальному або нейтральному середовищі за температури до 800–1300 °С;
- графітування за температури до 2500–3000 °С.

2. Визначено особливості технології виробництва ізостатичного графіту, що сприяють енергозбереженню та дають змогу удосконалювати фізико-механічні характеристики вихідного матеріалу. Цими особливостями є:

- вибір компонентів та їх склад для отримання коксопекової суміші;
- додавання спеціальних модифікаторів;
- оптимізація гранулометричного складу наповнювача;
- встановлення величини тиску для пресування преспорошку;
- вибір режимів термічного оброблення заготовок тощо.

3. Спрогнозовано подальше зростання світового попиту на ізостатичний графітовий матеріал та вироби на його основі, що становить більш ніж 5 % від щорічного обсягу світового його виробництва. При цьому країною-лідером з виробництва ізостатичного графіту є Китай.

Література

1. Kostikov, V. I. Nove vysokoprochnye uglirodnye materialy dlia vysokih tehnologii [Text] / V. I. Kostikov, V. M. Samoilov, N. Yu. Beilina, B. G. Ostronov // Rossiiskii himicheskii zhurnal. – 2004. – Vol. XLVIII, № 5. – P. 64–75.
2. Castings of metallic alloys with improved surface quality, structural integrity and mechanical properties fabricated in finegrained isotropic graphite molds under vacuum [Text]: Patent US 6799626 B2, Int. Cl.⁷ B22C 9/00, B22C 3/00 / Ranjan R., Donald W. S.; assignee: Santoku America, Inc. – Appl. No. 10/143,920; filed 14.03.2002; publ. 05.10.2004. – 36 p.
3. Global Isostatic Graphite Market 2015 Industry Trends, Analysis & Forecast to 2020 [Text]. – Florida: QY Research, 2015. – 153 p.
4. Inagaki, M. Advanced Materials Science and Engineering of Carbon [Text] / M. Inagaki, F. Kang, M. Toyoda, H. Konno. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. – 440 p. doi:10.1016/c2012-0-03601-0
5. Sposob polucheniia grafitirovannogo materiala [Text]: Patent RU 2252190 C1, MPK⁷ C 01 B 31/02, S 04 B 35/52 / Eliseev Yu. S., Poklad V. A., Shutov A. N., Vasilev Yu. N., Sankin A. E.; assignee: JSC «GTERPC «SALUT». – Appl. No. 2004107239/15; filed 12.03.2004; publ. 20.05.2005, Bull. № 14. – 6 p.
6. Sposob polucheniia vysokoplotnyh melkozernistykh uglegrafitovykh materialov [Text]: Patent RU 2256610 C2, MPK⁷ C 01 B 31/04, S 04 B 35/52 / Sviridov A. A., Seleznev A. N., Podkopaev S. A., Gnedin Yu. F., Sherriuble V. G., Sherriuble V. G.; assignee: «Chelyabinsk Electrode Plant» OJSC. – Appl. No. 2003116383/15; filed 04.06.2003; publ. 27.02.2005, Bull. № 20. – 5 p.
7. Nanostrukturirovannyi kamennougol'nyi pek i sposob ego polucheniia [Text]: Patent RU 2394870 C1, MPK (2006.01) C10C 3/10, B82B 1/00 / Beilina N. Yu., Lipkina N. V., Petrov A. V., Roshchina A. A., Starichenko N. S.; assignee: State Research Institute of Structural Materials Based on Graphite «NIgrafit». – Appl. No. 2008148549/04; filed 10.12.2008; publ. 20.07.2010, Bull. № 20. – 8 p.
8. Sposob izgotovleniia zagotovok iz melkozernistogo grafita [Text]: Patent RU 2488554 C2, MPK (2006.01) C01B 31/04, S 04 B 35/52 / Klimenko A. A., Morozov S. M., Filippova L. I. – Appl. No. 2011142450/05; filed 21.10.2011; publ. 27.07.2013, Bull. № 21. – 8 p.
9. Sposob polucheniia zagotovok iz melkozernistogo grafita [Text]: Patent RU 2493098 C1, MPK (2006.01) C01B 31/04, B82B 3/00, (2011.01) B82Y 30/00 / Lavrenov A. A., Fokin V. P.; assignee: LLC «Doncarb Graphite». – Appl. No. 2012100051/05; filed 11.01.2012; publ. 20.09.2013, Bull. № 26. – 11 p.
10. Nonishneva, N. P. Issledovaniia v oblasti razrabotki otechestvennoi tehnologii polucheniia izostaticheskogo grafita [Text]: Proceedings of the 67th Scientific Conference / N. P. Nonishneva, A. V. Frolov // Nauka YuUrGU. Sektsii estestvennykh nauk. – Cheliabinsk: Izdatelskii tsentr YuUrGU, 2015. – P. 364–368.
11. Asao, O. High density isotropic graphites and glassy carbons. Japanese situation: production, properties and applicaitons [Text] / O. Asao; ed. by H. Marsh, E. A. Heintz, F. Rodriques-Reinoso. – Alicante: Universidad de Alicante. Secretariado de Publicaciones, 1997. – 564 p.

12. Randall, T. The world nears peak fossil fuels for electricity [Electronic resource] / T. Randall. – 13.06.2016. – Available at: \www/URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-06-13/we-ve-almost-reached-peak-fossil-fuels-for-electricity>. – 01.02.2017. – Title from the screen.
13. Freik, D. M. Photovoltaic Converters of Solar Radiation. Achievements, Current Status and Trends (Review) [Text] / D. M. Freik, V. M. Chobanyuk, M. O. Galuschak, O. S. Krunutsky, G. D. Mateik // Physics and Chemistry of Solid State. – 2012. – Vol. 13, № 1. – P. 7–20.
14. Hoffmann, W. R. Sintering of powders of polyaromatic mesophase to high-strength isotropic carbons – I. Influence of the raw material and sintering conditions on the properties of the carbon materials [Text] / W. R. Hoffmann, K. J. Hüttinger // Carbon. – 1994. – Vol. 32, № 6. – P. 1087–1103. doi:10.1016/0008-6223(94)90218-6
15. Samoilov, V. M. Vliianie sverhtonkogo izmel'cheniia na kristallicheskuu strukturu i grafitiruemost' tonkodispersnyh uglerodnyh napolnitelei [Text] / V. M. Samoilov, A. N. Streletskii // Himiia tverdogo topliva. – 2004. – № 2. – P. 53–59.
16. Samoilov, V. M. Poluchenie tonkodispersnyh uglerodnyh napolnitelei i razrabotka tehnologii proizvodstva tonkozernistyh grafitov na ih osnove [Text]: The author's abstract of the thesis of the Doctor of Technical Sciences: 05.17.11 / V. M. Samoilov; State Research Institute of Structural Materials Based on Graphite «NIgrafit». – Moscow, 2006. – 56 p.
17. Timoshchuk, E. V. Vliianie dlitel'nosti sovместnogo vibroizmel'cheniia i davleniia pressovaniia na plotnosti i usadki zagotovok grafita [Text] / E. V. Timoshchuk, V. M. Samoilov, E. I. Timoshchuk, V. K. Smirnov // Himiia tverdogo topliva. – 2011. – № 1. – P. 60–64.
18. Chard, W. Advanced High Pressure Graphite Processing Technology [Text] / W. Chard, M. Conaway, O. Niesz // Petroleum Derived Carbons. – 1979. – Vol. 21. – P. 155–171. doi:10.1021/bk-1976-0021.ch014
19. Timoshchuk, E. I. Determination of the Particle Size of Fine Powders of the Artificial Graphite by Laser Diffraction [Text] / E. I. Timoshchuk, V. M. Samoilov, A. Ya. Lyapunov, Yu. M. Balaklienko, A. B. Borunova // Industrial laboratory. Materials diagnostics. – 2012. – Vol. 78, № 11. – P. 25–28.
20. Samoilov, V. M. Udel'naia poverhnost', razmery i forma chastits tonkodispersnyh uglerodnyh napolnitelei [Text] / V. M. Samoilov // Neorganicheskie materialy. – 2010. – Vol. 46, № 8. – P. 913–918.
21. Ucar isostatic molded graphite [Electronic resource] // MatWeb. – Available at: \www/URL: <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=UCAR%20Isostatic%20Molded%20Graphite>. – 01.02.2017. – Title from the screen.
22. Technical Data Sheets: SIGRAFINE Isostatic Graphite [Electronic resource] // SGL Group – The Carbon Company. – Available at: \www/URL: <https://www.sglgroup.com/cms/international/infokorb/Downloadcenter/products/fgg/technical-data-sheets/iso/index.html>. – 01.02.2017. – Title from the screen.
23. Main graphite grades [Electronic resource] // MERSEN. – Available at: \www/URL: https://www.mersen.com/fileadmin/user_upload/pdf/ht/19-graphite-grades-mersen.pdf. – 01.02.2017. – Title from the screen.

24. Special Graphite (Isostatic Graphite) [Electronic resource] // TOYO TANSO. – Available at: \www/URL: http://www.toyotanso.com/Products/Special_graphite/data.html. – 01.02.2017. – Title from the screen.
25. Property Data [Electronic resource] // IBIDEN Fine Graphite Material. – Available at: \www/URL: <https://www.fgm.ibiden.co.jp/multilanguage/english/list.html>. – 01.02.2017. – Title from the screen.
26. Butyrin, G. M. Plotnost', poristaia struktura i gazodinamicheskie karakteristiki tonkozernistykh grafitov (obzor) [Text] / G. M. Butyrin // Himiia tverdogo topliva. – 2015. – № 5. – P. 40–53.
27. Tracy, L. A. The characterization of highly crystalline, isotropic graphite [Electronic resource] / L. A. Tracy, J. M. Doug // Carbon 2007 Conference, 15–20 July 2007, Seattle, Washington, USA. – Available at: \www/URL: http://acs.omnibooksonline.com/data/papers/2007_D021.pdf
28. Lgalov, V. V. Izuchenie ekspluatatsionnoi stoikosti detalei iz iskusstvennogo grafita pri izgotovlenii metallostekliannykh soedinenii [Text]: Proceedings of the V All-Russian Scientific Conference with International Participation / V. V. Lgalov, A. M. Tokarev // Zhiznennyi tsikl konstruktsionnykh materialov. – Irkutsk, 2015. – P. 56–64.
29. Dodoo-Arhin, D. Inkjet-printed graphene electrodes for dye-sensitized solar cells [Text] / D. Dodoo-Arhin, R. C. T. Howe, G. Hu, Y. Zhang, P. Hiralal, A. Bello et al. // Carbon. – 2016. – Vol. 105. – P. 33–41. doi:10.1016/j.carbon.2016.04.012
30. Liu, Z. Ultrathin and flexible perovskite solar cells with graphene transparent electrodes [Text] / Z. Liu, P. You, C. Xie, G. Tang, F. Yan // Nano Energy. – 2016. – Vol. 28. – P. 151–157. doi:10.1016/j.nanoen.2016.08.038