

УДК 546.26-419

DOI: 10.33839/2223-3938-2018-21-1-295-300

**О. В. Савицький**, асп., **В. В. Лисаковський**, канд. техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,  
04074, Київ, Україна, e-mail: savitskiy91@gmail.com*

## **ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ГРАФІТОВИХ ДЕТАЛЕЙ РЕЗИСТИВНОГО НАГРІВАННЯ, ВИГОТОВЛЕНИХ ШЛЯХОМ ПРЕСУВАННЯ**

*Вивчення характеристик та дослідження умов виготовлення деталей із графітових матеріалів для струмопровідних деталей контейнерів високих тисків є актуальним завданням під час проведення технологічних процесів для контролювання заданих властивостей. Для визначення значень питомої електропровідності було застосовано метод вихрових струмів, який дає змогу отримувати значення питомої електропровідності матеріалів у локальній області отримуваних деталей. Також було досліджено характеристики графітових матеріалів та деталей, виготовлених шляхом одновісного пресування із цих матеріалів, та визначено особливості формування відповідних властивостей. Отримані результати дають змогу варіювати адитивність резистивної системи нагрівання реакційного об'єму контейнеру високого тиску. Цінність отриманих результатів полягає у можливості отриманні деталей із необхідними електропровідними властивостями для забезпечення резистивного нагрівання реакційного об'єму контейнерів високих тисків.*

**Ключові слова:** електропровідність, графіт, резистивне нагрівання, контейнер високого тиску, апарат високого тиску.

Графіт є однією із модифікацій вуглецю, стабільний за атмосферного тиску, не має фазових перетворень в широкому діапазоні температур і тому використовується як струмопровідний матеріал для резистивного нагрівання [1]. Виготовлення нагрівальних елементів з графіту передбачає їх формування різанням із спечених полікристалічних блоків або пресування заданої форми (зазвичай циліндричних деталей) із порошків. Останній метод є більш простим та економним, але для нього необхідно використання спеціальних марок графіту та контроль гранулометричного складу. Для цього найбільше підходять порошки природних графітів (цейлонський графіт, типу ГСМ-1, ГСМ-2), термічно розширений графіт (ТРГ) та вироби з них. Такі графіти мають відмінні між собою характеристики, що зумовлено їхньою внутрішньою структурою [2].

Суттєвим недоліком електропровідних деталей, отриманих шляхом пресування із графіту, є їхня неоднорідність в осьовому та радіальному напрямку, що є наслідком ефектів пресування, в результаті чого виникають градієнти температури, що істотно впливають на процес нагрівання необхідного експериментального об'єму. Дослідження електропровідних характеристик графітів марок ГСМ-1, ГМЗ та ТРГ було виконано з використанням вихрострумового методу вимірювання питомої електропровідності, реалізованого у багатофункціональному пристрої вимірювання геометричних параметрів "Константа К6" з перетворювачем ПФ-ІЭ-30-У1. Цей прилад призначений для вимірювання електропровідності вуглеграфітових матеріалів [3].

Зразки виготовляли у вигляді дисків діаметром 36 мм та товщиною 3 мм із марок графітів ГСМ-1, ГМЗ та ТРГ з розміром часток від 20 до 300 мкм шляхом пресування деталей

за середнього тиску 0,15–0,2 ГПа. Вміст золи (аморфної фази вуглецю) відповідно до маркування для кожної з марок графіту згідно з технічним регламентом [4–6] подано у табл. 1.

Таблиця 1. Граничний вміст золи у графітах

Марка графіту	ГСМ-1	ГМЗ	ТРГ
Вміст золи, %	0,1	0,03	0,035–0,5

У виготовлених зразках із графітів марок ГСМ-1 та ГМЗ спостерігається параболічний розподіл електропровідності (рис. 1, 2), що зумовлено схемою навантаження зразків під час їх виготовлення ізостатичним пресуванням.

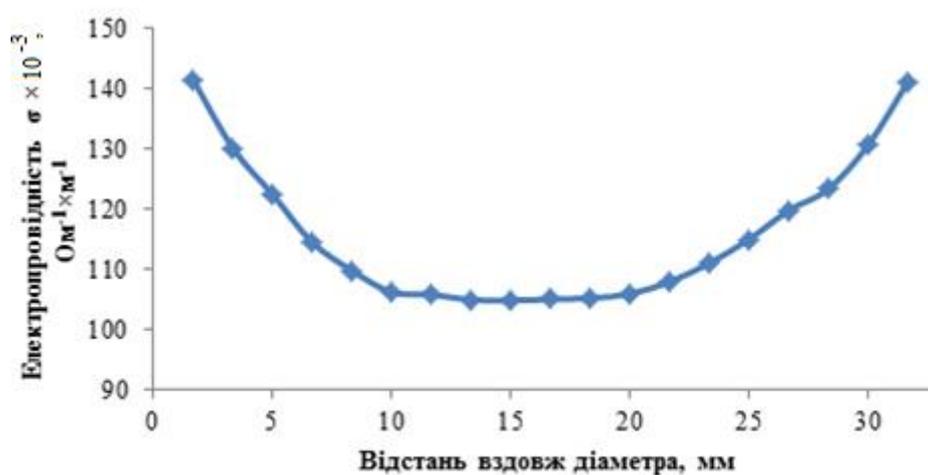


Рис. 1. Розподіл електропровідності графіту марки ГСМ-1 вздовж діаметральної лінії для диску діаметром 36 мм та висотою 3 мм

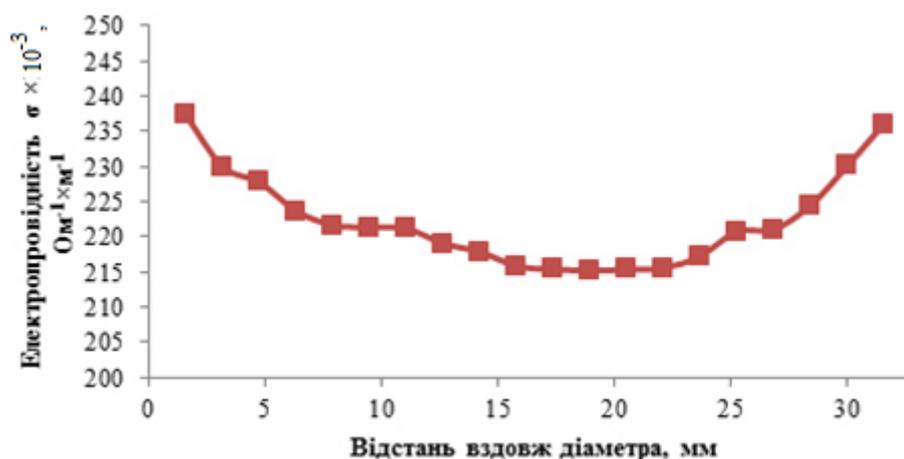


Рис. 2. Розподіл електропровідності графіту марки ГМЗ вздовж діаметральної лінії для диску діаметром 36 мм та висотою 3 мм

Зразок для дослідження електропровідності графіту марки ГМЗ було виготовлено із дрібнодисперсної фракції цього матеріалу із зернистістю -20 мкм, що зумовило зменшення коливання значення електропровідності вздовж діаметральної лінії. Малий коефіцієнт варіації електропровідності графіту ГМЗ, зумовлений великою дисперсністю фракцій, дає змогу щільніше компактувати матеріал, а також даний синтетичний графіт має малий вміст золи, що контролюється технічними умовами виготовлення.

Питома електропровідність графіту марки ТРГ залежно від розміщення точки вимірювання щодо центру змінюється в межах від  $263,127 \times 10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  до  $287,217 \times 10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ . Найменші значення електропровідності є у центральній частині зразку (рис. 3). Середнє значення питомої електропровідності –  $272,595 \times 10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ .

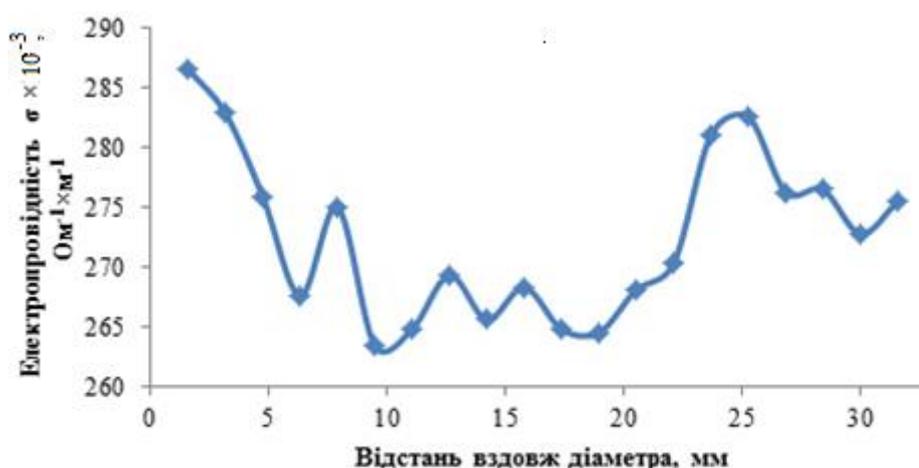


Рис. 3. Графік залежності електропровідності диску термічно розширеного графіту вздовж діаметральної лінії зразка для диску діаметром 36 мм та висотою 3 мм

Як видно із графіка, графіт марки ТРГ має рівномірно стабільний розподіл електропровідності та коефіцієнт варіації 2,5%. Причиною такого розподілу електропровідних характеристик графіту марки ТРГ є його внутрішня будова.

Середні значення визначеної питомої електропровідності досліджуваних графітів наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Значення питомої електропровідності графітів різних марок, визначених за допомогою вихрострумового методу

Марка графіту	ГСМ-1	ГМЗ	ТРГ
Середнє значення питомої електропровідності, $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	$118,005 \times 10^3$	$222,375 \times 10^3$	$272,595 \times 10^3$

З огляду на середні значення питомої електропровідності у виготовлених зразках графітів (табл. 2), можна зробити висновок, що найбільш раціональним матеріалом для виготовлення трубчатих нагрівачів є графіт марки ГСМ-1.

Дослідження трубчатих нагрівачів для апаратів високого тиску, виготовлених із графіту марки ГСМ, показали, що деталі цього типу мають параболічний розподіл електропровідності за висотою (рис. 4) із коефіцієнтом варіації 17,3%; такий розподіл зумовлений особливістю виготовлення цього типу деталей. Зразки являють собою тонкостінний циліндр висотою 13,3 мм.

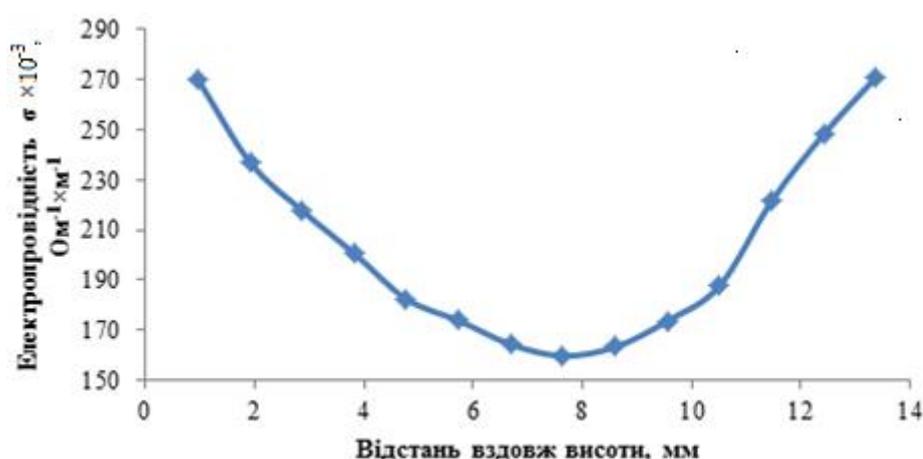


Рис. 4. Розподіл питомої електропровідності у трубчатому нагрівачі за висотою із діаметром 42 мм та висотою 13,3 мм

Для уникнення подібного розподілу електропровідності для деталей із дисперсних графітів можна застосувати такий підхід: розділити загальну висоту трубчатого нагрівача на максимальні за висотою складові із найменшими відхиленнями електропровідності. Експериментально було визначено, що найменші флуктуації питомої електропровідності мають трубчаті нагрівачі з висотою:

$$h = 2 \times (D - d), \quad (1)$$

де  $h$  – висота в мм;  $D$  – зовнішній діаметр нагрівача в мм;  $d$  – внутрішній діаметр нагрівача в мм.

Отримувані таким способом кільця мають коефіцієнт варіації електропровідності 3,5%. Подальше використання цих кілець може мати два варіанти:

1. Додаткове пресування кілець у трубку, що матиме параболічний розподіл електропровідності із коефіцієнтом варіації до 4% (рис. 5).
2. Використання набірного бічного нагрівача, що за умови навантаження апарату високого тиску буде у подібному до першого варіанту стані, але масова частка матеріалу відрізнятись.

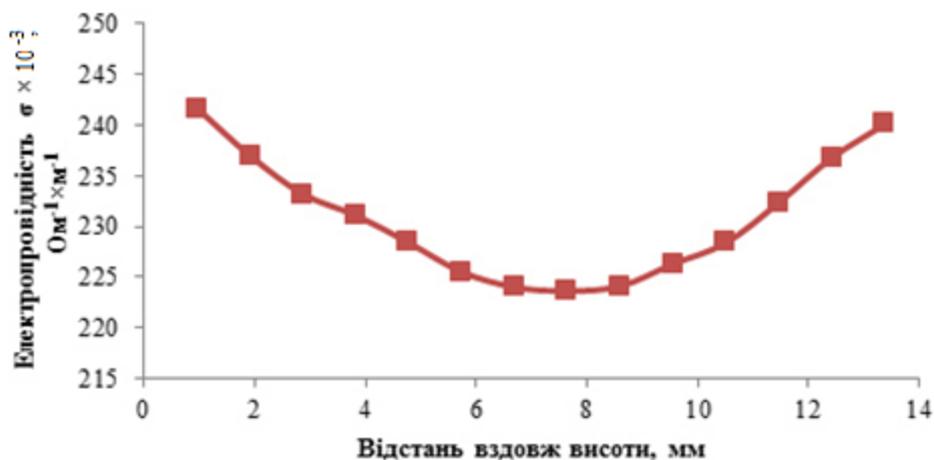


Рис. 5. Розподіл електропровідності у трубчатому нагрівачі, пресованому із кілець, виготовлених із графіту ГСМ-1 із діаметром 42 мм та висотою 13,3 мм

Використання обох варіантів дає змогу отримувати більш рівномірний розподіл температури у реакційному об'ємі контейнеру високого тиску порівняно з трубчатим нагрівачем великої висоти, що виготовляється шляхом ізостатичного пресування.

### Висновки

Для виготовлення струмопровідних деталей, а також нагрівальних елементів контейнерів високого тиску необхідно використовувати дисперсно-композиційні суміші, до складу яких входять графіти різних марок та походження, що дає змогу забезпечувати різні значення електропровідності отримуваних деталей.

Розподіл електропровідності у деталях, виготовлених одноосним пресуванням, змінюється за висотою, що зумовлено розподілом та передачею зусилля на матеріал. Визначення умов виготовлення деталей ізостатичним пресуванням дає змогу забезпечувати розподілення питомої електропровідності із коефіцієнтом варіації від 4 до 17,3% в отриманих зразках.

Отримані результати можуть бути використані для створення необхідних умов нагрівання комірок високого тиску, а також варіювання резистивного нагрівання.

*Изучение характеристик и исследования условий изготовления деталей из графитовых материалов для токопроводящих деталей контейнеров высоких давлений является актуальным вопросом при проведении технологических процессов для контроля заданных свойств. Для определения значений удельной электропроводности был применен метод вихревых токов, который позволяет получать значение удельной электропроводности материалов в локальной области получаемых деталей. Также были исследованы характеристики графитовых материалов и деталей, изготовленных путем одноосного прессования из этих материалов, и определены особенности формирования соответствующих свойств. Полученные результаты позволяют варьировать аддитивность свойств резистивной системы нагрева реакционного объема контейнера высокого давления. Ценность полученных результатов заключается в возможности получении деталей с необходимыми электропроводящими свойствами для обеспечения резистивного нагрева реакционного объема контейнеров высоких давлений.*

**Ключевые слова:** электропроводность, графит, резистивный нагрев, контейнер высокого давления, аппарат высокого давления.

**O. V. Savitskyi, V. V. Lysakovskiy**

### **ELECTRIC CONDUCTIVITY OF RESIST HEATING DETAILS PRODUCED BY PRESSING**

*Studying characteristics and conditions of the production parts from graphite materials for conducting components of high pressure sells is an issue in the process. It is nessure to control the specified properties in technological processes. it have used the method of vortex currents to determine the values of specific conductivity. This method allows to get the values of the specific electrical conductivity of materials in the local area. The properties of graphite materials and details made from those material were also investigated. The simlpes were made due one-sided pressing. There ware determinaded features of the formation of the corresponding properties. The obtained results are allow to vary the additivity of the resistive heating system of the reaction volume of the high pressure sells. The possibility of production parts for high pressure sells with necessary electrical conductive properties has technical and scientific values. Because it is provide necessary resistive heating of the reaction volume of high pressure sells.*

**Key words:** electrical conductivity, graphite, resistive heating, high pressure sell, high pressure apparatus.

### **Література**

1. Мармер Э. Н. Углеродистые материалы. М.: Металлургия, 1973. – 136 с.
2. Сайт виробника «Sealur» Белова М.Ю. Графит, ИГ и ТРГ (краткий обзор) [Электронный ресурс] – 2007. Режим доступа: <http://www.sealur.ru/pdf/useful/reports/grafit.pdf>.
3. Сайт виробника «Константа» [электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://constanta.ru/catalog/izmeriteli\\_elektroprovodnosti2/konstanta\\_k6\\_izmerit\\_elektroprov/](http://constanta.ru/catalog/izmeriteli_elektroprovodnosti2/konstanta_k6_izmerit_elektroprov/).
4. Графит. Типы, марки и общие технические требования: ГОСТ 17022-81. – 1981. – 15 с.
5. Изделия фасонные из графита различных марок: ТУ 48- 20-86-81. – 1981. – 100 с.
6. Графит особой чистоты в заготовках и деталях: ТУ 48- 20-90-82. – 1982 – 64 с.

*Надійшла 28.05.18*

### **References**

1. Marmer, E. N. (1973). *Uglegrafitovye materialy. [Carbon graphite materials]* Moscow: Metallurgiya [in Russian ].
2. Sait proizvoditelia «Sealur» Belova M. Yu. (2007) Grafit, IG i TRG (kratkiy obzor)[Site of manufacturer «Sealur» Graphite, IG, TEG(short overview)] *sealur.ru* Retrieved from <http://www.sealur.ru/pdf/useful/reports/grafit.pdf> [in Russian ].
3. Sait proizvodidetlia «Constanta» [Site of manufacturer «Constanta»] *Constanta.ru* Retrieved from [http://constanta.ru/catalog/izmeriteli\\_elektroprovodnosti2/konstanta\\_k6\\_izmerit\\_elektroprov/](http://constanta.ru/catalog/izmeriteli_elektroprovodnosti2/konstanta_k6_izmerit_elektroprov/) [in Russian].
4. Grafit. Tipy, marki i obschie tehniczeskie trebovaniya [State standard: Graphite, Types, grade and general technical requirements]. (1981). *HOST 17022-81* [in Russian ].
5. Izdeliya fasonnyie iz grafita razlichnyih marok [Technical specification: Graphite products of different grade]. (1981). *TU 48- 20-86-81* [in Russian ].
6. Grafit osoboi chistoty v zagotovkakh i detaliah [Technical specification: Extra pure graphite in workpieces and products ]. (1982). *TU 48- 20-90-82* [in Russian].