

УДК [621.365.32:62-418]:004.356.2:004.942

СОЛОВЕЙ В. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ ТЕРМО-ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИХ ПРОКЛАДОК, ВИГОТОВЛЕНИХ З ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ПОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

У статті наведено результати теоретичного дослідження з визначення придатності застосування електроконтактних прокладок (ЕКП) у промислових умовах (печах прямого графітування Кастнера), виготовлених з коксо-пекового композиту з використанням адитивних технологій на базі методу моделювання пошаровим наплавленням (МПН). Числовий аналіз фізичного стану ЕКП за умов промислового застосування виконано на підставі математичної постановки задачі термо-пружно-пластичності та алгоритму неявного зворотного відображення її розв'язання на базі методу скінченних елементів у середовищі програмування Mathcad. Для побудови геометрії та тетраїдної сітки моделі ЕКП використано вільно відкритий програмний код – САD-систему для сіткової генерації Gmsh, а для візуалізації результатів розрахунків фізичних полів – вільно відкритий програмний код ParaView. Моделювання термо-пружно-пластичного стану ЕКП проведено за умов процесу графітування в печах Кастнера на інтервалі температур до 900 °С, на якому проявляються термопластичні властивості матеріалу, за умов силового навантаження зовнішнім тиском на бічній поверхні прокладки величиною 2,5 МПа та різних значень радіального перепаду температур в діапазоні 15–90 °С. На підставі аналізу отриманих результатів числового моделювання обґрунтовано можливість застосування ЕКП, виготовлених з дисперсно-армованих композитних матеріалів (коксо-пекових сумішей) методом МПН, у технології графітування електродних виробів за методом Кастнера.

Ключові слова: *піч Кастнера, електроконтактна прокладка, моделювання пошаровим наплавленням, коксо-пековий композит, термо-пружно-пластичний стан.*

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2022.269748

Corresponding author: vlsolovej84@gmail.com

Received 16 October 2022; Accepted 9 December 2022

Постановка проблеми. У технології графітування електродних виробів (ЕВ) за методом Кастнера використовуються електроконтактні прокладки (ЕКП), для виготовлення яких значного застосування набув терморозширений графіт (ТРГ) [1]. Однак існує певна проблема монтажу таких ЕКП у колонах з ЕВ, а їх виробництво є складним, потребує високотехнологічного напівфабрикату ТРГ та значної номенклатури спеціального обладнання, оскільки для кожного типорозміру ЕВ потрібна окрема пресформа [2]. Тому цілком логічно є потреба пошуку альтернативних способів і матеріалів для виготовлення ЕКП. Одним із таких способів виробництва ЕКП може бути застосування адитивних технологій на базі методу моделювання пошаровим наплавленням (Fused Deposition Modeling (FDM)) [3]. При цьому як матеріал може бути обрано дисперсно-армований композит на основі коксо-пекових сумішей, які є основою для виробництва ізостатичного графіту (ІГ) [4]. До складу цієї суміші входять пек (матриця) і дрібнодисперсний (30–150 мкм) або дрібнозернистий (10–30 мкм) наповнювач – кокс [5].

Аналіз попередніх досліджень. У науково-технічній літературі немає інформації щодо результатів дослідження пружно-пластичної поведінки ЕКП виготовлених з коксо-пекового композиту, зокрема методом FDM. Монографію [1] присвячено науковим засадам розробки та вдосконалення технологічних регламентів процесу графітування ЕВ у печах Кастнера, що забезпечують визначення раціональних експлуатаційних параметрів обладнання та підвищення якості готової продукції. Досліджено вплив форми, геометричних розмірів та властивостей матеріалу ЕКП, виготовлених з ТРГ, на розподіл температурних полів у заготовках ЕВ під час кампанії графітування в печах Кастнера. Встановлено, що для зменшення радіального

температурного перепаду електродних заготовок і зниження контактного електричного опору між ними рекомендовано використовувати електроконтактні прокладки кільцевої форми, виготовлені з низькоомного ТРГ, який може витримувати значні механічні та температурні навантаження.

У праці [2] обґрунтовано вибір матеріалу для виготовлення ЕКП, призначених для їх розміщення на торцях електродних заготовок перед їх графітизацією в печах прямого нагріву (печах Кастнера). Як матеріал прокладок пропонується використовувати ТРГ з кріпленням прокладок до торців електродних заготовок за допомогою декстринового або алюмосилікатного клею з додаванням графітового порошку. Розглянуто два способи формування контактних прокладок, перший з яких полягає у вирізанні їх із заготовленого листа ТРГ заданої густини, а другий – у безвідходному пресуванні прокладок із сипучих ТРГ низької густини до заданої величини щільності матеріалу прокладки. Розроблено ескізний проект форми для пресування електроконтактних прокладок і виконано числовий аналіз напружено-деформованого стану її конструкції, який підтвердив можливість використання форми в промислових умовах.

Праця [3] присвячена аналізу сучасного стану створення композитних виробів на основі полімерної матриці та армувальних волокон із застосуванням адитивних технологій методом FDM і результатам дослідження їхніх фізико-механічних властивостей. Встановлено, що до основних недоліків технології адитивного виробництва на базі методу FDM належить анізотропія властивостей готових виробів, що спричинює значно меншу міцність деталей у поперечному напрямку до напрямку 3D-друку (напряму накладання стренгу), порівняно з повздовжнім тощо. Розроблено модернізації способу просторового друку та вузла екструдера для подолання відмічених недоліків 3D-друку методом FDM.

У монографії [4] розглянуто наукові засади теоретико-експериментальних досліджень фізичних полів у термічних процесах виробництва ІГ з метою розробки енергоресурсоефективних технологічних регламентів та обладнання його виробництва. Сировиною для одержання ІГ, так само як і для тривимірного друку ЕКП за методом FDM, є коксо-пекові композити. Запропоновано шляхи підвищення ефективності конструкцій і регламентів експлуатації пічного електротермічного обладнання термообробки заготовок ізостатичного графіту з поліпшеними показниками енергоефективності та якості готового продукту.

Працю [5] присвячено розробленню інструментарію у вигляді методології та програмного коду для числового аналізу термо-пружно-пластичного стану коксо-пекових композитів на прикладі технології отримання ІГ. Наведено замкнену математичну постановку та розроблено методіку числового розв'язування задачі з врахуванням ізотропного зміцнення на основі алгоритму неявного зворотного відображення та методу скінченних елементів (МСЕ). Розроблено та верифіковано відповідний програмний код. Проведено розрахунки термо-пружно-пластичної поведінки коксо-пекового композиту на технологічному етапі виготовлення заготовок ІГ. Показано, що за умови недотримання потрібних температурних режимів на початкових етапах випалу в заготовках ІГ виникають пластичні деформації, які призводять до розтріскування та погіршення однорідності фізичних властивостей готових виробів.

У праці [6] на основі відомих аналітичних розв'язків нормальних складових тензора термічних напружень у циліндричному тілі оцінено граничні радіальні перепади температур у композиційних графітових заготовках на стадії випалу.

У статті [7], яка є однією з перших значущих робіт, присвячених неявним алгоритмам розв'язування пружно-пластичних задач, введено такі важливі поняття як послідовні тангенціальні оператори та алгоритм зворотного відображення. Показано, що для випадку, незалежного від швидкості пружно-пластичної поведінки матеріалу, так звані алгоритми зворотного відображення забезпечують квадратичну швидкість асимптотичної збіжності схем ітераційних розв'язків на основі методу Ньютонна. Наведено приклади числового розв'язання задач ізотропного та кінематичного зміцнення для асоціативного закону течії тощо.

Найбільш повно теоретичні основи розв'язування широкого класу пружно-пластичних задач із використанням різних модифікацій алгоритму зворотного відображення викладено в [8, 9].

У праці [10] подано математичну постановку задачі про пружно-пластичний стан сипучого матеріалу на основі класичної моделі Друкера-Прагера. За використанням алгоритму зворотного відображення проведено числові експерименти на прикладі матеріалу, що характеризується асоціативним законом течії.

У зазначених працях [5–10], окрім [5], відсутні закриті постановки задач термо-пружно-пластичності та приклади їх числової реалізації, які можна було б безпосередньо застосувати для числового аналізу термо-пружно-пластичного стану ЕКП, виготовлених з дисперсно-армованих композитних матеріалів методом FDM. Тому подальші теоретичні дослідження статті будуть ґрунтуватися на праці [5].

Мета дослідження полягає в теоретичному визначенні придатності до застосування ЕКП у промислових умовах, надрукованих з коксо-пекового композиту методом пошарового наплавлення.

Наукова новизна дослідження. Теоретично обґрунтовано можливість застосування електроконтактних прокладок, виготовлених з дисперсно-армованих композитних матеріалів (коксо-пекових сумішей) методом FDM, у технології графітування електродних виробів за методом Кастнера.

Виклад основного матеріалу. В основу проведених досліджень покладено спосіб виготовлення ЕКП з коксо-пекових сумішей методом просторового друку FDM (пат. № UA147784U).

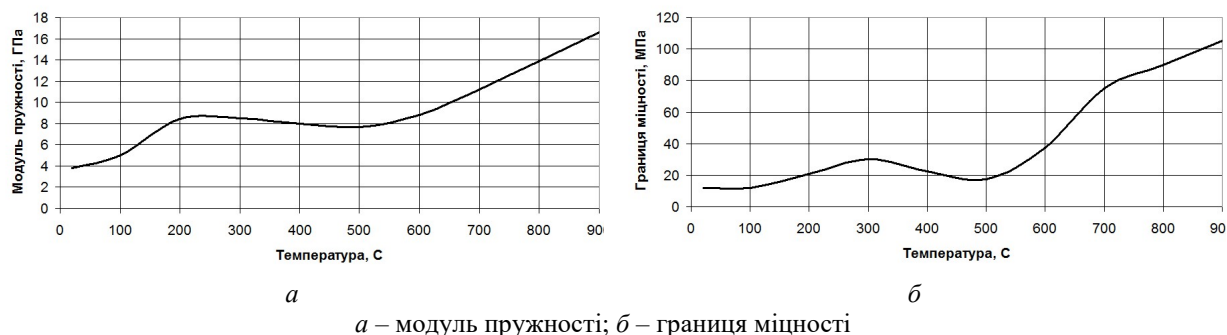
Сутність застосування ЕКП у технології графітування ЕВ за методом Кастнера полягає в такому [1]. Спочатку виготовлені за методом FDM ЕКП розміщуються між заготовками в колонах між електродними заготовками печі Кастнера. Після чого колони електродних заготовок стискаються за тиску 2,5 МПа, крізь них пропускається електричний струм, за рахунок якого відбувається процес нагрівання до високих температур (понад 3000 °С) упродовж (10–20) год. Коксо-пековий композит, який є матеріалом для 3D-друку ЕКП, включає такі складові: прожарений пековий кокс як наповнювач з середнім розміром зерен 15–30 мкм і матриці з високотемпературного пеку (ВТП) у кількості 40 % (за мас.) [4, 5, 11]. Температура розм'якшення ВТП складає 140 °С. Пековий кокс характеризується фізичними властивостями близькими до ізотропних [12]. Фізичні властивості коксо-пекового композиту, що використано в розрахунках, наведено в табл. 1 [4, 5, 11] і на рис. 1.

Числовий аналіз термо-пружно-пластичного стану ЕКП виконано на підставі математичної постановки задачі та алгоритму її розв'язання [5] на базі МСЕ [8–11, 13] у середовищі програмування Mathcad [14]. Для побудови геометрії та тетраїдної сітки моделі ЕКП використано вільно відкритий програмний код – САД-систему для сіткової генерації Gmsh [15]. Для візуалізації результатів розрахунків фізичних полів застосований вільно відкритий програмний код ParaView [16].

**Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості коксо-пекової суміші [4, 5, 11]
(склад: прожарений кокс (15–30 мкм)+40 % ВТП)**

t , °С	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	E , ГПа	σ_c , МПа	σ_T , МПа
20	1420	0,67	0,60	3,8	12,0	12,0
100	1380	0,95	0,77	5,0	12,0	12,0
200	1450	1,18	0,90	8,4	20,6	20,6
300	1450	1,35	1,10	8,5	30	30
400	1430	1,45	1,22	8,0	22,5	22,5
500	1460	1,52	1,40	7,7	17,5	17,5
600	1450	1,60	1,58	8,8	37,5	37,5
700	1520	1,75	1,70	11,2	75,0	75,0
800	1560	1,84	1,90	13,9	90,0	90,0
900	1620	1,90	2,05	16,6	105,0	105,0

t – температура; ρ – густина; c_p – масова ізобарна теплоємність; λ – коефіцієнт теплопровідності; σ_c , σ_T – границі міцності на стискання та текучості, відповідно; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,20-0,27$;
 $\alpha = \begin{cases} 3,0 \times 10^{-4}, t \leq 600^\circ \text{C}; \\ 1,8 \times 10^{-4}, t > 600^\circ \text{C}; \end{cases}$ К⁻¹ – коефіцієнт лінійного температурного розширення (КЛТР).



**Рис. 1 – Температурні залежності механічних властивостей коксо-пекової суміші [4]
(склад: прожарений кокс (15–30 мкм)+40 % ВТП)**

Аналіз даних фізико-хімічних властивостей коксо-пекової суміші (див. табл. 1 та рис. 1) вказує на те, що [17, 18]:

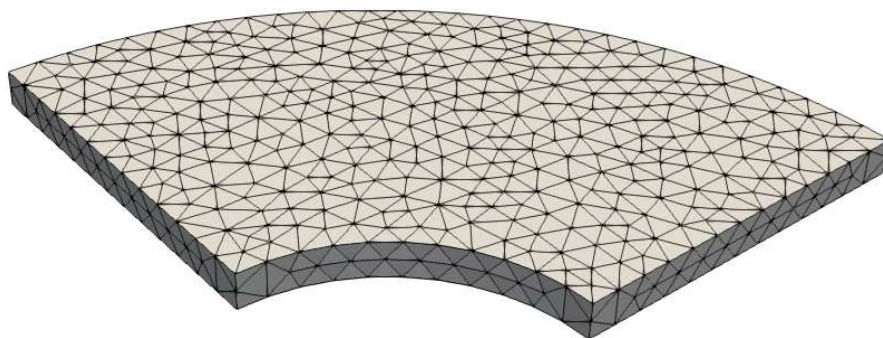
– під час нагрівання на інтервалі температур до 1100 °С матеріал значно змінює свої властивості – від термопластичного до крихкого. При цьому відбуваються процеси напівкоксування та коксування коксо-пекової суміші внаслідок їх термічної деструкції без доступу повітря. Ці процеси відрізняються кінцевою температурою нагрівання: напівкоксування відбувається за температур до 600 °С, а коксування – до 1100 °С;

– завдяки складних фізико-механічних перетворень, що супроводжуються розкладанням (деструкцією) важких вуглеводнів пеку, інтенсивним газовиділенням (300–450 °С), втратою маси (усадкою) та утворенням напівкоксу за температур до 600 °С та коксу в інтервалі температур до 1100 °С, матеріал коксо-пекового композиту з аморфного поступово перетворюється в полікристалічний. При цьому в інтервалі температур до 600 °С механічні властивості композиту характеризується значною нелінійністю, а потім монотонно зростають з підвищенням температури (див. рис. 1);

– границя міцності на стискання композиту на інтервалі температур понад 600 °С на етапі коксування зростає у 2–3 рази і більше (див. табл. 1).

Виходячи з проведеного аналізу фізико-хімічних властивостей коксо-пекової суміші, яка використовується для 3D-друку ЕКП методом FDM, дослідження термо-пружно-пластичного стану електроконтактних прокладок за умов процесу графітування в печах Кастнера виконувалося на інтервалі температур до 900 °С, на якому проявляються термопластичні властивості матеріалу. При цьому досліджувалися фізичні поля ЕКП, що включають розподіл температури, результуючі переміщення, еквівалентні пружні напруження за Мізесом, еквівалентні повні, пружні та пластичні деформації за Мізесом, та об'ємна частка матеріалу ЕКП, що знаходиться в пластичному стані, залежно від рівня температур та радіального градієнта температур (радіального перепаду температур) електроконтактних прокладок.

Приклад дискретизації геометричної моделі ЕКП круглої форми з отвором у середині, побудованої в САД-системі Gmsh, наведено на рис. 2.



вузлів – 824; скінченних елементів (СЕ) – 2315
(діаметри – $d_2/d_1 = 630$ мм/220 мм, товщина $h = 20$ мм)

Рис. 2 – Дискретизація ¼ геометричної моделі ЕКП круглої форми

Умови проведення числового дослідження термо-пружно-пластичного стану ЕКП були такими:

– розміри ЕКП – діаметри – $d_2/d_1 = 630$ мм/220 мм, товщина $h = 20$ мм. Дискретизацію ¼ геометричної моделі наведено на рис. 2;

– фізико-механічні властивості коксо-пекового композиту – матеріалу ЕКП бралися з табл. 1;

– теплові граничні умови – радіальний перепад температур ($\Delta T_r = 15; 30; 60; 90$) °С. Вказані радіальні перепади температур у заготовках відповідають даним [1, 4];

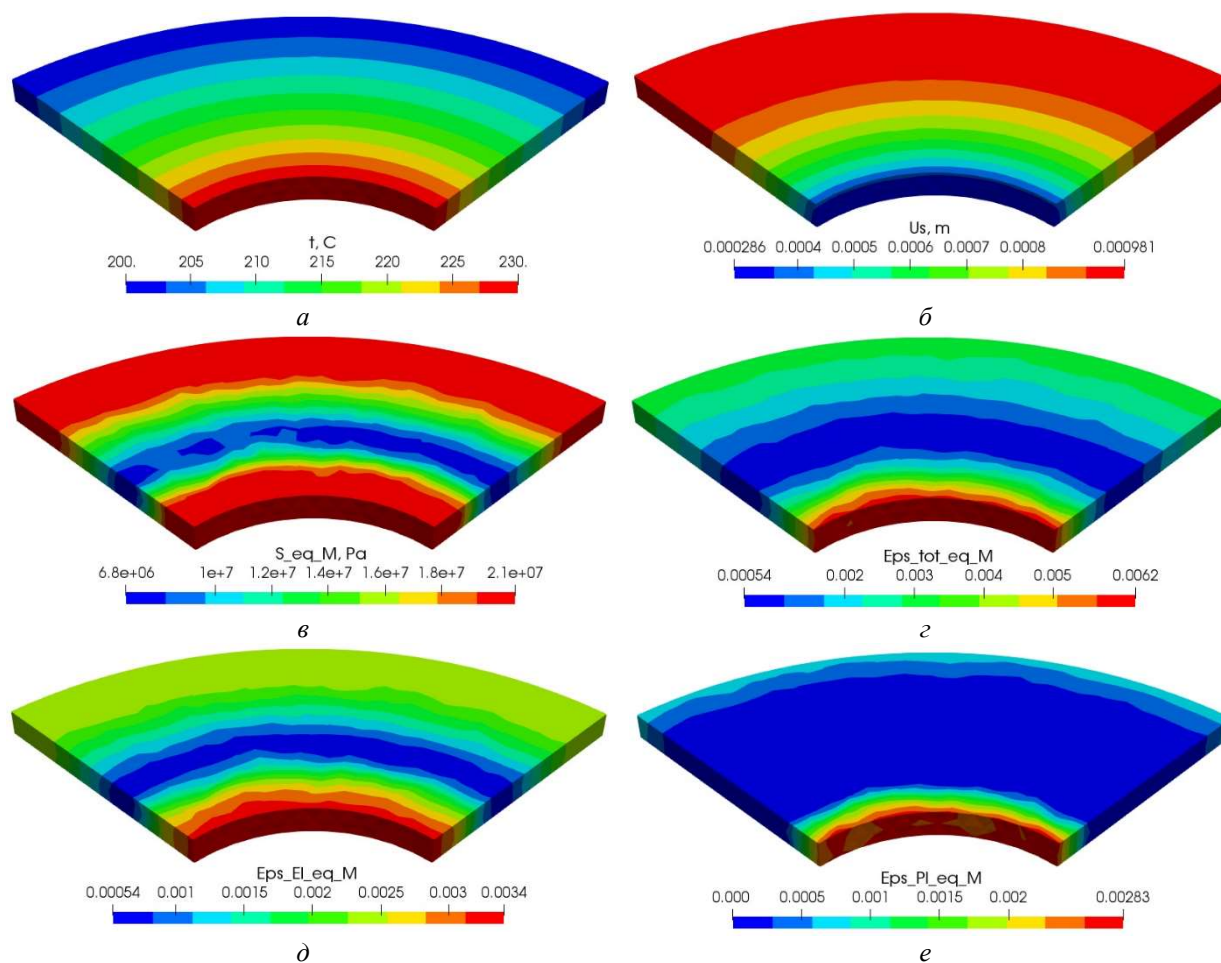
– механічні граничні умови: закріплення за відповідними координатами на одній бічній поверхні та торцевих поверхнях симетрії; силове навантаження тиском на бічній поверхні величиною 2,5 МПа;

– числовий аналіз термо-пружно-пластичного стану ЕКП виконано в наближенні ідеальної пластичності, оскільки дані, наприклад, з модуля ізотропного зміцнення в наявних джерелах інформації відсутні.

Результати вказаних досліджень, виконаних на підставі багатоваріантних порівняльних розрахунків, наведено на рис. 3–7.

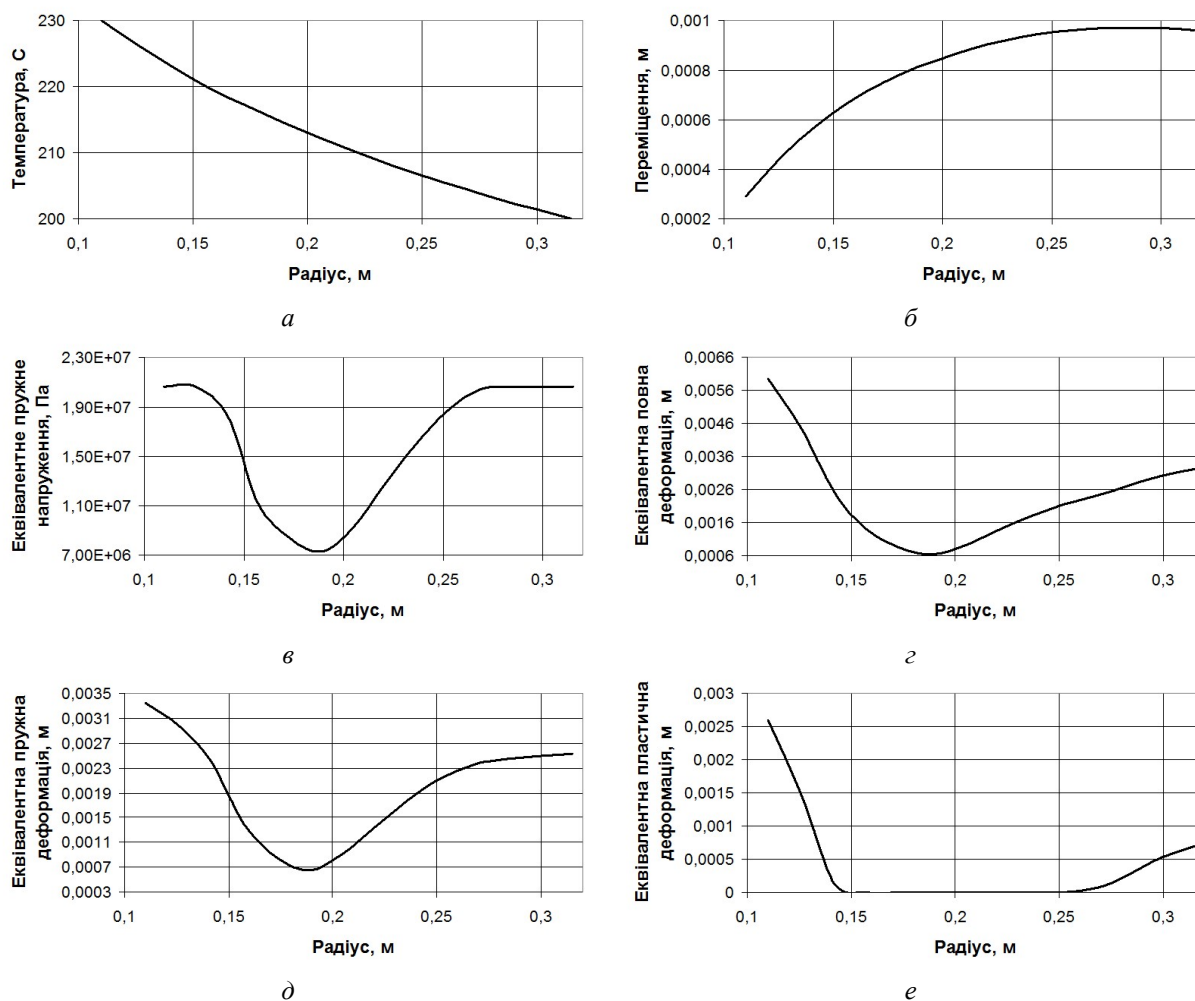
Аналіз отриманих результатів показує таке:

- температурне навантаження ЕКП завдяки умовам їх застосування в печах Кастнера характеризується одномірністю і носить логарифмічний закон залежно від радіусу прокладки (див. рис. 3,а, 4,а). Одномірність поведінки також стосуються і всіх інших фізичних полів наведених на рис. 3, 4;
- результуючі переміщення зростають з радіусом від 0,29 мм до 0,98 мм (див. рис. 3,б, 4,б).
- максимальні еквівалентні пружні напруження за Мізесом спостерігаються біля циліндричних поверхонь ЕКП, що вільні від механічних навантажень, та не перевищують 20,1 МПа (границя міцності, див. рис. 3,в, 4,в) за рівня температур 200 °С (див. табл. 1) як це і має бути під час механічного навантаження пружно-пластичного матеріалу [18], тобто запас міцності дорівнює одиниці. Мінімальні еквівалентні напруження мають місце за $r = 0,189$ мм і становлять 7,33 МПа (див. рис. 4,в);



а – температура; б – результуючі переміщення; в – еквівалентні пружні напруження за Мізесом; г – повні еквівалентні деформації за Мізесом; д – еквівалентні пружні деформації за Мізесом; е – еквівалентні пластичні деформації за Мізесом

Рис. 3 – Поля термо-пружно-пластичного стану $\frac{1}{4}$ ЕКП за радіального градієнта температур 73 К/м на рівні температур (100–130) °С під час їх нагрівання в колонах печі Кастнера за зовнішнього тиску 2,5 МПа, прикладеного до бічних сторін прокладки



a – температура; *б* – результуючі переміщення; *в* – еквівалентні пружних напруження за Мізесом; *г* – повні еквівалентні деформації за Мізесом; *д* – еквівалентні пружні деформації за Мізесом; *е* – еквівалентні пластичні деформації за Мізесом

Рис. 4 – Епюри термо-пружно-пластичного стану $\frac{1}{4}$ ЕКП за радіального градієнта температур 73 К/м на рівні температур (100–130) °С під час їх нагрівання в колонах печі Кастнера за зовнішнього тиску 2,5 МПа, прикладеного до бічних сторін прокладки

– максимальні еквівалентні повні, пружні та пластичні деформації мають місце біля циліндричної поверхні ЕКП меншого радіусу $r = 0,11$ мм (див. рис. 3,з,д,е, 4,з,д,е). Мінімальні еквівалентні повні та пружні деформації також як і еквівалентні напруження спостерігаються за $r = 0,189$ мм, є однаковими і становлять 0,000647 (див. рис. 4,з,д), у той час як еквівалентні пластичні деформації є нульовими (відсутні) на інтервалі $r = 0,15$ – $0,26$ мм (див. рис. 4,е);

– графіки зміни об’ємної частки композиту, що знаходиться в пластичному стані, залежно від градієнта температур на етапі утворення напівкоксу (див. рис. 5) показують, що пластичні деформації в ЕКП для рівнів температури 100; 200; 400 і 500 °С розпочинаються з градієнта температури $dT/dr = 75$ К/м і асимптотично досягають максимуму біля 24 % за $dT/dr = 440$ К/м, а для рівнів температури 300 і 600 °С – з $dT/dr = 125$ К/м і досягають максимуму біля 20–22,5 % за $dT/dr = 440$ К/м. Така поведінка графіків об’ємної частки композиту залежно від dT/dr пов’язана зі значною нелінійністю механічних властивостей коксо-пекового композиту на інтервалі температур до 600 °С (див. рис. 1);

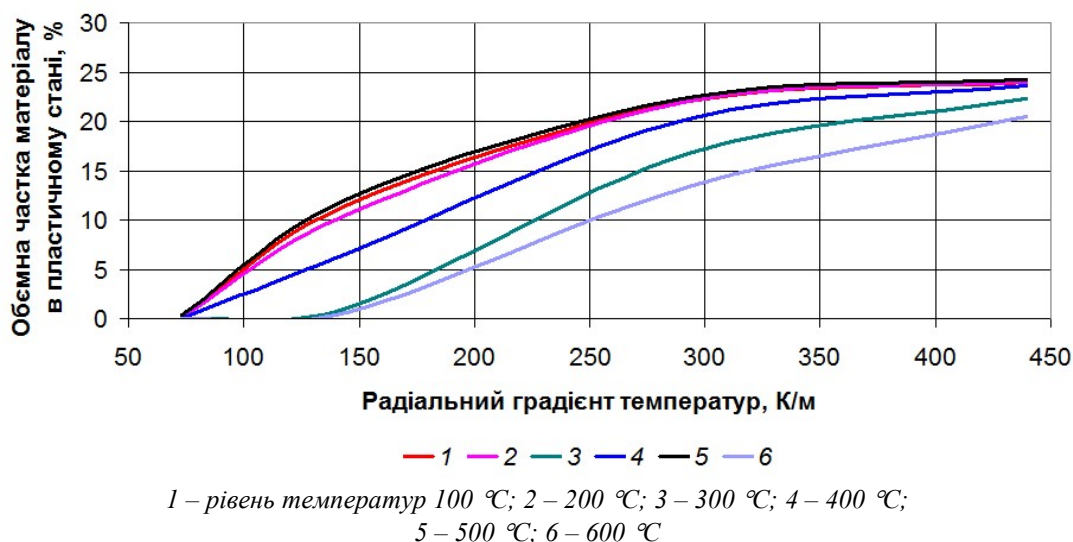


Рис. 5 – Зміна об'ємної частки композиту, що перебуває в пластичному стані, залежно від градієнта температур на етапі утворення напівкоксу в інтервалі температур до 600 °С

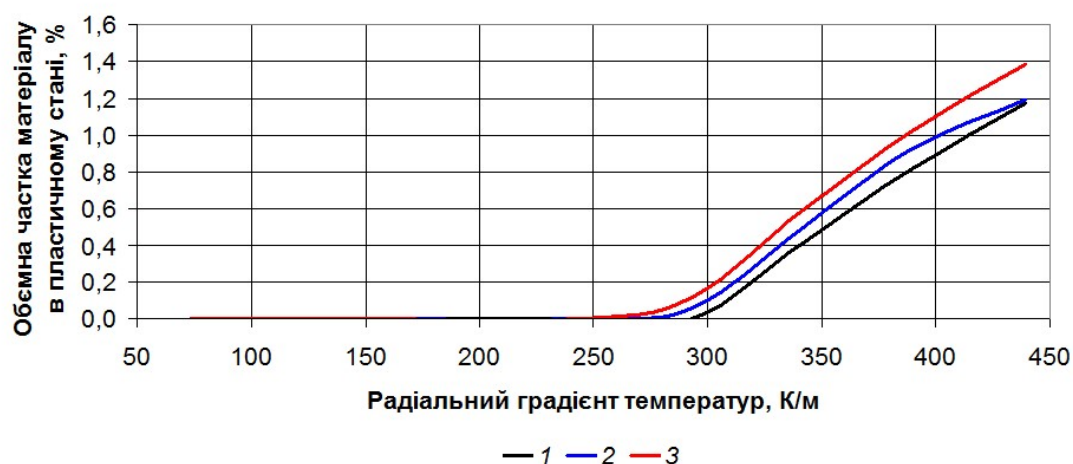
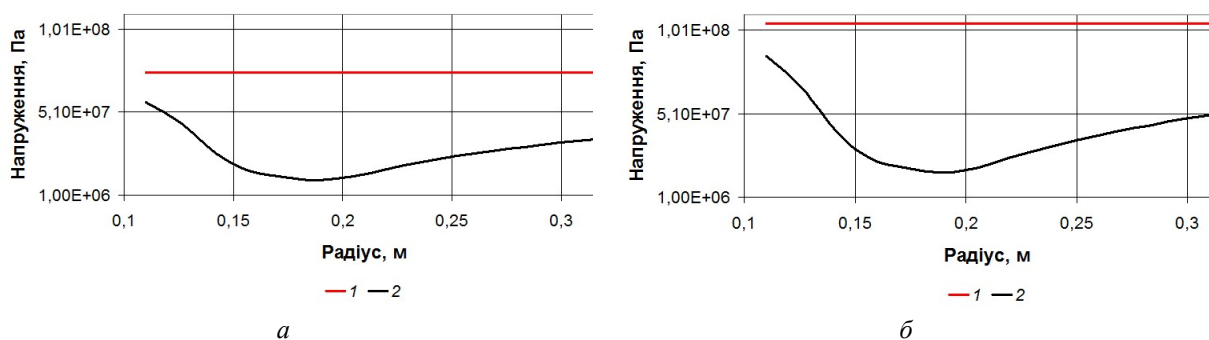


Рис. 6 – Зміна об'ємної частки композиту, що перебуває в пластичному стані, залежно від градієнта температур на етапі перетворення напівкоксу в кокс в інтервалі температур (600–900) °С

– графіки зміни об'ємної частки композиту, що знаходиться в пластичному стані, залежно від градієнта температур на етапі перетворення напівкоксу в кокс (див. рис. 6) показують, що пластичні деформації в ЕКП для рівнів температури 700; 800 і 900 °С розпочинаються з градієнтів температури $dT/dr = 250$; 275 і 290 К/м, відповідно, і досягають 1,2–1,4 % за $dT/dr = 440$ К/м та є майже еквідистантними;

– графіки порівняння радіального розподілу еквівалентних пружних напружень в ЕКП та їх порівняння відповідними значеннями границі міцності матеріалу на етапі перетворення напівкоксу в кокс (див. рис. 3.7) показують, що за умови $dT/dr = 244$ К/м ($\Delta T_r = 50$ К), які відповідають даним [1] для інтервалу температур (700–900) °С, електроконтактні прокладки за робочих умов знаходяться в пружному стані (тобто пластичні деформації відсутні), а максимальні значення еквівалентних пружних напружень за Мізесом не перевищують відповідні значення границі міцності матеріалу (запас міцності >1).



1 – еквівалентні пружні напруження за Мізесом в ЕКП; 2 – границя міцності матеріалу

Рис. 7 – Результати числового моделювання радіального розподілу еквівалентних пружних напружень в ЕКП на етапі перетворення напівкоксу в кокс для рівня температур 700 °С (а) та 900 °С (б) та їх порівняння відповідними значеннями границі міцності матеріалу за $dT/dr = 244$ К/м ($\Delta T_r = 50$ К)

За результатами числового дослідження термо-пружно-пластичного стану електроконтактних прокладок, виготовлених з коксо-пекового композиту тривимірним друком методом пошарового наплавлення, під час їх використання в технології виробництва електродних заготовок встановлено, що:

– на етапі утворення напівкоксу в інтервалі температур до 600 °С ЕКП, як складові колон електродних заготовок у печі Кастнера, знаходяться в пружно-пластичному стані, тому максимальні еквівалентні пружні напруження, що в них виникають не перевищують границі міцності матеріалу. Тобто на цьому етапі завдяки наявності пластичних деформацій запас міцності ЕКП дорівнює одиниці;

– на етапі перетворення напівкоксу в кокс в інтервалі температур (600–900) °С ЕКП, завдяки значному зростанню границі міцності та зменшенню значень КЛТР і ΔT_r або dT/dr , знаходяться у пружному стані, а максимальні еквівалентні пружні напруження, що в них виникають, менші за границю міцності матеріалу. Тобто на цьому етапі запас міцності ЕКП становить більше 1;

– оскільки за даними числового аналізу на етапах утворення напівкоксу і коксу в матеріалі коксо-пекового композиту ЕКП за термомеханічних умов експлуатації печі Кастнера отримано запас міцності не менший за одиницю (тобто умови міцності виконуються), то можна стверджувати, що ЕКП є експлуатаційно придатними на інтервалі температур до (900–1100) °С;

– під час подальшого зростання рівня температур до 3000 °С у печі Кастнера, коксо-пековий композит – вихідний матеріал ЕКП, внаслідок температурної деструкції вже перетворився на кокс і, тому його механічні властивості стали близькими до механічних властивостей електродних заготовок в колонах, які піддаються графітуванню. Тому також можна стверджувати, що ЕКП не будуть механічно зруйновані на протязі всієї кампанії графітування печі Кастнера.

Висновки. Проведено числовий аналіз термо-пружно-пластичного стану електроконтактних прокладок, виготовлених з коксо-пекового композиту тривимірним друком методом FDM, під час їх використання в технології виробництва електродних заготовок за методом Кастнера.

Встановлено, що:

– на етапах утворення напівкоксу й коксу в матеріалі коксо-пекового композиту ЕКП за термомеханічних умов експлуатації печі Кастнера отримано запас міцності не менший за одиницю. Це дає підставу стверджувати, що ЕКП експлуатаційно придатні в інтервалі температур до (900–1100) °С;

– з подальшим зростанням рівня температур у печі Кастнера до 3000 °С і вище, вихідний матеріал ЕКП, внаслідок температурної деструкції вже перетворився на кокс і, тому його механічні властивості стали близькими до механічних властивостей електродних заготовок в колонах, які піддаються графітуванню. Це дає підставу також стверджувати, що ЕКП не будуть механічно зруйновані на протязі всієї кампанії графітування печі Кастнера.

Перспективи подальших досліджень. Планується на практиці реалізувати запропонований спосіб виготовлення ЕКП з коксо-пекового композиту та виконати випробування ЕКП в промислових умовах.

Список використаної літератури

1. Теоретично-експериментальні дослідження печей графітування Кастнера: монографія / А. Ю. Педченко, Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 174 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/20800>
2. Technology of Electrocontact Gaskets for Graphitizing Electrode Blanks in Direct Heating Furnaces / Ye. M. Panov, A. Ya. Karvatskii, S. V. Leleka, I. O. Mikulionok, O. I. Ivanenko // *Petroleum and Coal*, 2022. No 64(2). P. 299–303. URL: https://www.vurup.sk/wp-content/uploads/2022/07/PC-X_Karvatskii_144_rev1.pdf
3. Соловей В. В., Олексішен В. О. Дослідження фізико-механічних властивостей композитних матеріалів отриманих з використанням адитивних технологій // *Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»*. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2021. № 1(20), С. 9–21. DOI: 10.20535/2617-9741.1.2021.228078
4. Энергоресурсоэффективное производство изостатического графита : монография / Є. М. Панов, С. В. Лелека, А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 140 с. ISBN 978-617-7734-26-9 <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37590>
5. Numerical Simulation of Elasto-Plastic Behavior of Isotropic Composite Materials / Anton Karvatskii, Ihor Mikulionok, Serhii Leleka, Vladyslav Solovei // *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. Vol. 1: Manufacturing and Materials Engineering (Kharkiv, Ukraine, June 9-12, 2020) : Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2020)*. Cham, Switzerland: Springer. 2020. P. 492–501. ISSN 2195-4356 DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7_48
6. Шувалов Э. А. О распределении температур и термических напряжений в углеграфитовых телах цилиндрической формы // *Сб. трудов ЧЭМК. Челябинск : Южно-уральское кн. изд-во, 1970. № 2. С. 200–214.*
7. Simo J., Taylor R. Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity. *Comp. methods in applied mechanics and engineering*. 1985. Vol. 48. P. 101–118.
8. Non-linear finite element analysis of solids and structures: 2nd edn / R. Borst de R., M. Crisfield, J. Remmers, C. Verhoosel. John Wiley & Sons Ltd, New York. 2012.
9. Zienkiewicz O., Taylor R., Fox D. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics: 7th edn*. Elsevier Ltd., Oxford. 2014.
10. Thompson M., Thompson J. *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*. Butterworth-Heinemann, Oxford. 2017.
11. The numerical simulation of thermo-elasto-plastic state of composites / A. Ya. Karvatskii, I. O. Mikulionok, S. V. Leleka, V. M. Vytvytskyi, V. V. Solovei // *Modern Engineering and Innovative Technologies*. Germany. 2021. Iss. 16, Part 1. P. 6–17. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-16-01-007
12. Пековий кокс как наполнитель конструкционных графитов / В. С. Островский, Н. Ю. Бейлина, Н. В. Липкина, Л. З. Синельников // *Химия твердого топлива*. 1995. №1. с. 56–61.
13. Моделювання механічних властивостей армованих полімерних матеріалів пакувального призначення / А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок, С. О. Борщик, В. О. Караулова // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2018. № 1(17). С. 24–31. DOI: 10.20535/2306-1626.1.2018.143371
14. Mathcad. Engineering math software that allows perform, analyze, and share your most vital calculations: [сайт]. URL: <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad/> (дата звернення: 16.11.2019).
15. Gmsh. A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities: [сайт]. URL: <http://geuz.org/gmsh/> (дата звернення: 17.11.2019).
16. ParaView. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application: [сайт]. URL: <http://www.paraview.org/> (дата звернення: 18.11.2019).
17. Study on physical-chemical properties of petroleum cokes / S. Birghila, I. Carazeanu Popovici, A. Dumitru // *Romanian Journal of Physics*. 2011. Vol. 56. Nos. 7–8, P. 976–982. https://rjp.nipne.ro/2011_56_7-8/0976_0982.pdf
18. Коваленко А. Д. *Основы термоупругости*. Київ : Наук. думка, 1970. 307 с.

Vladyslav Solovei

NUMERICAL ANALYSIS OF THE THERMAL-ELASTIC-PLASTIC STATE OF ELECTRICAL CONTACT GASKET MADE FROM DISPERSION-REINFORCED COMPOSITE MATERIALS USING THE FUSED DEPOSITION MODELING METHOD

The article presents the results of a theoretical study on determining the suitability of using electrical contact gaskets (ECG) in industrial conditions (Castner direct graphitization furnaces), made of coke-pitch composite using additive technologies based on the Fused Deposition Modeling (FDM) method.

Numerical analysis of the physical state of ECG under the conditions of industrial application was performed on the basis of the mathematical statement of the thermo-elastic-plasticity problem and the algorithm of implicit inverse mapping of its solution based on the finite element method in the Mathcad programming environment. To construct the geometry and tetraed mesh of the ECG model, a freely open program code was used - the Gmsh CAD system for grid generation, and for the visualization of the results of physical field calculations, the free open program code ParaView was used.

The study of the thermo-elastic-plastic state of ECG under the conditions of the graphitization process in Castner furnaces was carried out in the temperature range up to 900 °C, at which the thermoplastic properties of the material are manifested. At the same time, such physical fields of ECG were analyzed as temperature distribution, resulting displacements, equivalent elastic stresses according to Mises, equivalent total, elastic and plastic deformations according to Mises, and the volume fraction of ECG material in a plastic state, depending on the temperature level and radial gradient temperatures (radial temperature difference) of electrical contact gaskets.

Numerical simulation of the thermo-elastic-plastic state of the ECG was carried out under the conditions of force loading by external pressure on the lateral surface of the gasket of 2.5 MPa and different values of the radial temperature difference in the range of 15–90 °C in the temperature range up to 900 °C. It was established that: at the stages of formation of semi-coke and coke in the material of the coke-pitch composite ECG under the thermomechanical conditions of operation of the Castner furnace, a margin of strength of not less than unity was obtained; with the subsequent increase in the temperature level in the Castner furnace to 3000 °C and above, the raw material of ECG, as a result of thermal destruction, has already turned into coke and, therefore, its mechanical properties have become close to the mechanical properties of electrode blanks in columns that are subjected to graphitization. This gives reason to assert that the ECGs will not be mechanically destroyed during the entire graphitization campaign of the Castner furnace.

On the basis of the analysis of the results of numerical simulation, the possibility of using ECGs made from dispersion-reinforced composite materials (coke-pitch mixtures) by the FDM method in the technology of graphitizing electrode products according to the Castner method is substantiated.

Keywords: *Castner furnace, electrical contact gasket, fused deposition modeling, coke-pitch composite, thermo-elastic-plastic state*

References

1. Pedchenko, A. Yu., Panov, Ye. M., Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Lazarev, T. V. (2017). Teoretychno-eksperymentalni doslidzhennia pechei grafituvannia Kastnera [Theoretical and experimental studies of Castner graphitization furnaces]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. – URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/20800> (Ukr.)
2. Panov, Ye. M., Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Mikulionok, I. O., Ivanenko, O. I. (2022). Technology of Electrocontact Gaskets for Graphitizing Electrode Blanks in Direct Heating Furnaces. *Petroleum and Coal*, vol. 64, no 2, pp. 299–303. – URL: https://www.vurup.sk/wp-content/uploads/2022/07/PC-X_Karvatskii_144_rev1.pdf
3. Solovei, V. V., Oleksyshen, V. O. (2021). Doslidzhennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei kompozytnykh materialiv otrymanykh z vykorystanniam adytyvnykh tekhnolohii [Study of physical and mechanical properties of composite materials obtained using additive technologies]. *Visnyk NTUU «KPI im. Ihoria Sikorskoho». Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia*, no 1 (20), pp. 9–21. doi: 10.20535/2617-9741.1.2021.228078 (Ukr.)
4. Panov, Ye. M., Leleka, S. V., Karvatskii, A. Ya., Mikulionok, I. O. (2020). Enerhoresursoefektyvne vyrobnytstvo izostatychnoho hrafitu [Energy-resource-efficient production of isostatic graphite]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. – URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37590> (Ukr.)

5. Karvatskii, A., Mikulionok, I., Leleka, S., Solovei, V. (2020). Numerical Simulation of Elasto-Plastic Behavior of Isotropic Composite Materials. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*, vol. 1: Manufacturing and Materials Engineering (Kharkiv, Ukraine, June 9-12, 2020) : Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2020), Cham, Switzerland: Springer, pp. 492–501. doi: 10.1007/978-3-030-50794-7_48
6. Shuvalov, E. A. (1970). O raspredelenii temperatur i termicheskikh napryazhenij v uglegrafitovykh telakh cilindricheskoy formy [On the distribution of temperatures and thermal stresses in cylindrical carbon-graphite bodies]. *Sb. trudov CHEMK, Yuzhno-ural'skoe kn. izd-vo, Chelyabinsk*, no 2, pp. 200–214. (Rus.)
7. Simo, J., Taylor, R. (1985). Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity. *Comp. methods in applied mechanics and engineering*, vol. 48, pp. 101–118.
8. Borst de R., R., Crisfield, M., Remmers, J., Verhoosel, C. (2012). Non-linear finite element analysis of solids and structures: 2nd edn. John Wiley & Sons Ltd, New York.
9. Zienkiewicz, O., Taylor, R., Fox, D. (2014). The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics: 7th edn. Elsevier Ltd., Oxford.
10. Thompson, M., Thompson, J. (2017). ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis. Butterworth-Heinemann, Oxford.
11. Rui, R., Le, G., Zhong, J., Ma, D., He, Q. (2019). Numerical research on elasto-plastic behaviors of fiber-reinforced polymer based composite laminates. *Composite Structures*, vol. 207, pp. 364–372. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.09.027
12. Ostrovskij, V. S., Bejlina, N. YU., Lipkina, N. V., Sinel'nikov, L. Z. (1995). Pekovyj koks kak napolnitel' konstrukcionnykh grafitov [Pitch coke as a filler for structural graphites]. *Himiya tverdogo topliva*, no 1, pp. 56–61. (Rus.)
13. Boiko, S. V., Yeroshenko, A. M. (2016). Modeliuvannia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei modyfikovanoi derevyny metodom skinchenykh elementiv [Modeling of physical and mechanical properties of modified wood using the finite element method]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, no 2 (4). pp. 184–188. <http://ir.stu.cn.ua/123456789/11112> (Ukr.)
14. Mathcad: – URL: <http://www.mathcad.com.ua/down-math.php> (Accessed November 16, 2019)
15. Gmsh: A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. – URL: <http://geuz.org/gmsh/> (Accessed November 17, 2019)
16. ParaView: An open-source, multi-platform data analysis and visualization application. – URL: <http://www.paraview.org/> (Accessed November 18, 2019)
17. Study on physical-chemical properties of petroleum cokes / Birghila, S., Carazeanu Popovici, I., Dumitru, A. (2011). *Romanian Journal of Physics*, vol. 56, nos. 7–8, pp. 976–982. – URL: https://rjp.nipne.ro/2011_56_7-8/0976_0982.pdf
18. Kovalenko, A. D. (1970). Osnovy termouprugosti [Fundamentals of thermoelasticity]. Nauk. dumka, Kyiv. (Rus.)