ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 34, 2026, № 2 (345), 22-36
https://doi.org/10.15407/steelcast2026.02.022
УДК 621.762

А.М. Степанчук, канд. техн. наук, проф., проф. кафедри, e-mail: anstepanchuk6@gmail.com,
https://orcid.org/0000-0002-0363-5226

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(Київ, Україна)

Виготовлення витратних електродів з тугоплавких сполук для плавки у дуговій печі (огляд)

Проведено аналіз методів отримання витратних електродів з деяких твердих тугоплавких карбідів перехідних металів циліндричної форми зі співвідношенням довжини до діаметра більшого 10 мм на їх щільність і її розподіл по довжині електрода.

Проведено аналіз даних, отриманих під час вивчення процесів отримання електродів з карбідів титану, цирконію, ніобію, хрому, молібдену та вольфраму, які найбільш широко використовуються для виготовлення порошкових виробів з них та створення за їх участю зносостійких покриттів багатофункціонального призначення.

Розглядались умови отримання електродів гарячим пресуванням, мундштучним пресуванням, пресуванням заготівок в розбірній прес-формі з наступним спіканням. Розглядався вплив методу і режимів отримання електродів на їх щільність, її розподіл по довжині. Розкривається природа цих властивостей та можливість їх отримання з наперед заданими значеннями.

Також розглянуто вплив методу та режимів отримання електродів на їх експлуатаційні властивості, зокрема термостійкість, яка є визначальною вимогою до електродів. Висока термостійкість забезпечує стабільний процес плавлення та отримання виливків з рівномірним розподілом вмісту складових виливків та структурою. Запропоновано механізм формування високої термостійкості, який полягає у наявності в електродах рівномірно розподіленої за об'ємом пористості.

Встановлені оптимальні умови отримання електродів, які забезпечують найбільшу термостійкість. Показано, що найвищі її значення мають електроди з рівномірним розподілом щільності по довжині і пористістю 10—15 %.

Найбільш придатними методами виготовлення електродів є мундштучне пресування та пресування в розбірних прес-формах з наступним спіканням.

Ключові слова: *електрод, тугоплавкі сполуки, карбіди, дугова плавка, мундштучне пресування, гаряче пресування, прес-форма.*

Вступ. У теперішній час розробка нових матеріалів методами порошкової металургії, особливо інструментального, конструкційного призначення, зносостійких матеріалів, матеріалів спеціального призначення, наплавлювальних матеріалів, напилювання зносостійких покриттів газотермічними методами, абразивних та багато інших матеріалів [1—13] широке застосування знаходять порошки твердих тугоплавких сполук — сполук тугоплавких металів 1Va–V1a підгрупи таблиці Д.І. Менделеєва з вуглецем, бором, азотом та кремнієм [2], [4], [13]. Розробка нових матеріалів за їх участю з наперед заданими властивостями методами порошкової металургії, а також традиційними методами лиття вимагає знань їх властивостей, які у свою чергу залежать від методу їх отримання [2—4], [8], [9], [13], [14].

Аналіз відомих на даний час літературних даних показує, що властивості тугоплавких сполук у деяких випадках суперечливі і значно відрізняються один від одного за твердістю, характеристиками міцності, стійкістю до зношування, абразивною здатністю, електрофізичними характеристиками та іншими властивостями. Різниця у значеннях властивостей, отриманих різними авторами, може бути обумовлено тим, що їхнє вивчення переважно проводили на зразках,

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY license
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

отриманих різними методами порошкової металургії, і, як наслідок, вони відрізнялися за вмістом основних компонентів, домішок і за щільністю [2], [3], [6], [14], [16].

Найбільш достовірними слід вважати значення величин, що отримані на монокристалічних зразках [17]. Матеріал в таких зразках має досконалу структуру, практично не містить домішок та має стовідсоткову щільність. У першому наближенні до таких зразків можна віднести зразки плавлених твердих тугоплавких сполук, у яких відсутня пористість, відносно малий вміст домішок та інші переваги [13—17].

Для отримання матеріалів за участю твердих тугоплавких сполук використовують їхні вихідні порошки, що одержують у процесі синтезу з металів і вуглецю або відновленням-навуглецюванням вихідних оксидів [13]. Водночас за необхідності отримання порошків з необхідним розміром частинок (від ультрадисперсного до грубого) змінюють умови технологічного процесу їхнього отримання [13], [17].

У ряді робіт показано, що використання порошків плавлених тугоплавких сполук або їх отримання як структурної складової в кінцевому матеріалі виробу, може значно підвищити експлуатаційні властивості матеріалів за їхньою участю, як це має місце в інструментальних матеріалах, матеріалах для абразивної і магнітно-абразивної обробки деталей [18—20]. Останнє обумовлене монокристальністю частинок, високою міцністю, що значно перевищує міцність частинок, отриманих традиційними методами порошкової металургії [19], [20].

Враховуючи викладене, актуальним є відпрацювання процесів (технологій) отримання плавлених твердих тугоплавких сполук. Огляд методів їхнього отримання, зокрема карбідів перехідних металів, наведено в [13].

Аналіз літературних джерел показує, що відомості з отримання плавлених в низькотемпературній плазмі карбідів під тиском газу в робочій камері з метою управління їх фазовим та хімічним складом і, як наслідок, властивостей кінцевого продукту обмежені.

Тому актуальним також є проведення досліджень з одержання плавлених твердих тугоплавких сполук, результати яких можуть бути корисними для встановлення механізмів формування властивостей виробів з використанням сучасних технологій електророзрядного спікання заготівок виробів, 3D друку [21], електроімпульсного та інших методів з використанням високоенергетичних джерел енергії з локальним нагріванням матеріалів до надплавильних температур, які значно перевищують температуру їхнього плавлення. За цих умов може відбуватись їхня дисоціація з наступним інконгруентним випаровуванням складових [13], [22]. У разі карбідів це є переважне випаровування вуглецю [16], [17]. Наслідком цього є зміна хімічного і фазового складу кінцевого продукту і його властивостей [16], [17]. Одним з варіантів попередження цих процесів, як показано в [17, [19], отримання матеріалів бажано проводити в автоклавах за високого тиску інертного або активного газу. У цьому випадку буде відбуватись пригнічення випаровування складових матеріалу і не буде відбуватись зміна їх хімічного і фазового складу і, як наслідок, кінцевих властивостей матеріалу і виробу з нього у цілому. Окрім того, штучно змінюючи умови (тиск газу, щільність струму дуги), можливо отримувати матеріали з наперед заданими властивостями.

Найбільш прийнятним методом отримання литих тугоплавких сполук є плавка за допомогою витратних електродів в дуговій печі під тиском захисного або активного газу в робочій камері для пригнічення випаровування газоподібних продуктів їх дисоціації, принципова будова якої наведена в роботах [3], [13]. Схему печі показано на рис. 1.

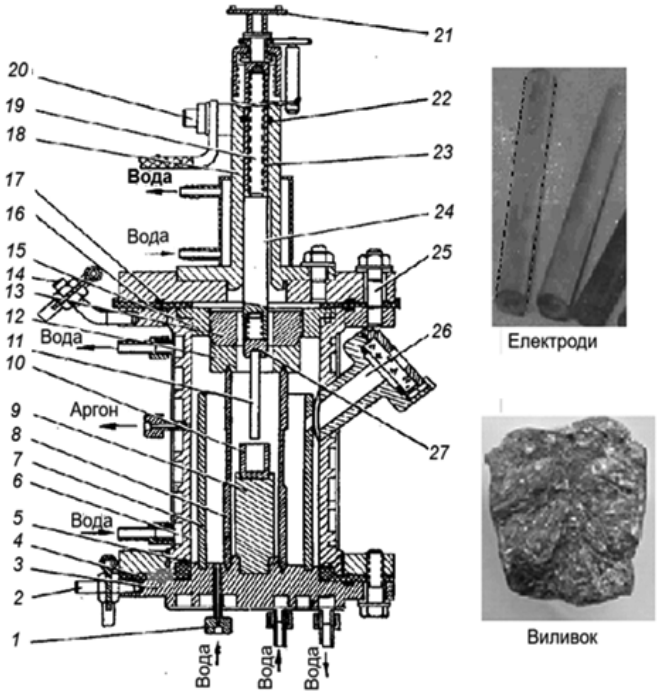


Рис. 1. Камера установки для отримання плавлених тугоплавких сполук (ТС) під тиском захисного (активного) газу у робочій камері: *1* — штуцер для введення газу; *2* ,*15*, *20* — струмопідводи; *3* — нижній фланець; *4*, *16* — текстолітові ізоляційні прокладки; *5*, *17* — гумові прокладки; *6* — корпус камери; *7* — графітовий екран; *8* — графітовий нагрівник; *9* — графітова підставка; *10* — тигель; *11* — витратний електрод; *12* — графітове притискне кільце; *13* — мідна притискна гайка; *14* — сталевий фланець; *18* — голівка; *19* — нарізний хвостовик; *21* — муфта; *22* — гумове кільце; *23* — гайка; *24* — утримувач електрода; *25* — шпилька; *26* — оглядове вікно; *27* — графітовий перехідник

Одним з важливих моментів отримання литих тугоплавких сполук в такій печі є отримання вихідних витратних електродів (рис. 1, *11*), від властивостей яких, як показано в роботах [23], [24], багато у чому залежить якість виливків та властивості отриманої литої тугоплавкої сполуки. Тому однією з актуальних задач під час отримання литих тугоплавких сполук є розробка методів та оптимізація отримання витратних електродів з заданими властивостями.

Мета роботи. Метою роботи було аналіз методів отримання витратних електродів циліндричної форми з відношенням довжини до діаметра більше 10 на їх щільність і її розподіл по довжині. Також передбачалось аналіз впливу методу і режимів отримання

електродів на їх термостійкість (стійкість електродів проти руйнування під час нагрівання їх із швидкістю 600—800 град/с., що має місце під час утворення дуги на початку плавки). Передбачалось отримання електродів з деяких карбідів перехідних металів як таких, що знаходять найбільш широке застосування.

Результати роботи та їх аналіз. У роботі проводився аналіз умов отримання електродів з деяких карбідів перехідних металів. Розглядались методи виготовлення електродів за технологіями порошкової металургії. Такими як пресування в розбірних прес-формах з подальшим спіканням; мундштучне пресування заготівок з наступним їх спіканням; радіальне ізостатичне пресування з подальшим спіканням; гаряче пресування. В усіх випадках передбачається як вихідний матеріал використання порошків карбідів, отриманих синтезом з елементів [13], склад яких наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Умови отримання та склад вихідних порошків карбідів

Карбід	Температура, °С	Термін витримки, хв	Вміст, %		
			Ме	$C_{заг.}$	$C_{вільн.}$
TiC	1900	100—120	79,0	20,1	0,21
ZrC	1900	90—100	88,4	11,0	0,16
NbC	1750	90—100	88,3	11,1	0,14
Cr_3C_2	1600	80—90	86,1	12,64	0,14
Mo_2C	1500	80—90	94,3	5,36	0,12
WC	1550	80—90	93,7	6,08	0,08

У більшості випадків для плавки тугоплавких сполук за допомогою витратних електродів до них ставляться наступні вимоги:

а) достатня механічна міцність і термічна стійкість;

б) висока електропровідність;

в) у разі отримання чистих плавлених матеріалів вміст мінімальної кількості домішок;

г) рівномірна щільність по довжині.

Оскільки карбіди перехідних металів мають високу температуру плавлення, то для їх розплавлення в дузі потрібні великі струми. Збільшення струму за постійного режиму генератора можна досягти збільшенням електропровідності електродів, або збільшенням їх діаметра.

Електропровідність матеріалу можна збільшити, зменшуючи його пористість. Звідси випливає, що метод виготовлення електродів повинен забезпечувати достатню їх щільність. Геометричні розміри електродів лімітуються наступними умовами: зі збільшенням діаметра збільшується електропровідність, а збільшення довжини сприяє збільшенню загального опору, що призводить до нерівномірного розподілу температур по довжині електрода під час виникнення дуги, внаслідок чого можливе його руйнування.

Нижче розглянемо результати досліджень умов отримання витратних електродів методами порошкової металургії, які можуть застосовуватись для отримання довгомірних виробів.

Гаряче пресування. Метод гарячого пресування дозволяє поєднати процес пресування і спікання виробів за температур 0,5—0,8 від температури плавлення матеріалу [25]. Процес спікання методом гарячого пресування відбувається набагато швидше [25], [26], ніж під час вільного спікання.

Згідно з сучасними уявленнями [25], [26] під час спікання порошків у твердій фазі відбувається в'язкий чи пластичний плин матеріалу під дією капілярного тиску (Лапласівського тиску), що діє всередині пор і рівний:

$$P_{л} = \frac{2\sigma}{r}, \quad (1)$$

де σ — поверхневий натяг; r — радіус пори.

Ці сили виконують роботу з ущільнення матеріалу, яка визначається згідно з [25], як:

$$\frac{\sigma}{V} \cdot \frac{dS}{d\tau}. \quad (2)$$

Більш високі швидкості ущільнення під час спікання порошків гарячим пресуванням на відміну від звичайного (вільного) спікання зумовлені тим, що до капілярного тиску $2\sigma/r$ додається зовнішній тиск:

$$\frac{P}{V} \cdot \frac{dV}{d\tau}, \quad (3)$$

де σ — поверхневий натяг; P — тиск прикладений ззовні; V — об'єм матеріалу, що ущільнюється.

Метод спікання гарячим пресуванням зазвичай застосовують для виготовлення виробів з матеріалів, які важко піддаються холодному пресуванню (борид, силіциди, карбіди). Крім того, як відзначається в роботі [25], гаряче пресування має важливі переваги, оскільки за рахунок відсутності однієї операції (спікання) скорочується кількість необхідного устаткування, процес менш чутливий до властивостей порошків, часто можна отримати вироби з кращими властивостями, ніж це дає пресування в металевих прес-формах з наступним спіканням.

У роботі проведено аналіз умов отримання витратних електродів з карбідів титану, цирконію, ніобію

і вольфраму для плавки їх в дуговій печі з метою отримання їх відносно однакової щільності по довжині. Так в роботі [24], як вихідні, використовували порошки карбідів, характеристики яких наведено в табл. 1. Спікання гарячим пресуванням можна проводити на установці з важільно-механічним навантаженням [27]. Використовувалися графітові прес-форми зовнішнім діаметром 30 мм, внутрішнім від 10 до 18 мм і завдовжки до 140 мм. Заздалегідь внутрішні стінки прес-форми футерувались нанесенням водної суспензії з нітриду бору, щоб уникнути припікання карбіду до стінок прес-форми і його взаємодії з графітом прес-форми. Порошок карбіду засипався в прес-форму і ущільнювали вібрацією. Після цього прес-форма розміщувалась між струмопідводами пресу, де і проводилось її нагрівання з одночасним вантаженням пуансона. Отримання електродів завдовжки 100—120 мм та діаметром 12, 14, 16, 18 мм проводилось за тиску 3,2, 6,4 та 10,6 МПа. Температура пресування складала 2500 °С для карбідів TiC, ZrC, 2600 °С для карбіду ніобію NbC і 2300 °С для карбіду вольфраму WC. Час спікання складав 10—12 хв.

Вимірювалася середня пористість отриманих електродів і її розподіл по довжині. Електроди з усіх карбідів мали приблизно однакову пористість, а розподіл її по довжині залежить від діаметра електрода і умов пресування (рис. 2—4), особливо від прикладеного тиску. Найбільш нерівномірно розподілена щільність у електродів діаметром 12 мм, спресованих за навантаження 10,6 МПа. Це пояснюється впливом на процес ущільнення внутрішнього і зовнішнього тертя [28]. Зі зменшенням діаметра електрода згідно з формулою [28]:

$$P_h = Pe^{-4\mu\xi\frac{h}{D}}, \qquad (4)$$

де P — прикладений тиск; μ — коефіцієнт тертя матеріалу об стінки прес-форми; ξ — коефіцієнт бічного тиску; h — висота пресовки; D — діаметр пресовки, збільшується боковий тиск і, тим самим, сила тертя об стінки прес-форми, на подолання якої витрачається частина прикладеного тиску. Тому зі збільшенням висоти (довжини) електрода тиск зменшується у міру віддалення від місця його прикладання. Унаслідок цього частина електрода, протилежного від місця прикладання навантаження, спікається тільки за рахунок сил поверхневого натягу [25] і, як наслідок, в результаті цього щільність виявляється меншою.

Крім того, відбувається зменшення діаметра електрода у міру віддалення від місця прикладання навантаження, оскільки зовнішнього тиску буде недостатньо для подолання сил поверхневого натягу (Лапласівських сил), протидіючих заповненню прес-форми карбідом під дією зовнішніх сил. Збільшення діаметра прес-форми (електрода) за постійного зовнішньому тиску, сприяє більш рівномірному розподілу щільності по висоті (довжині) електрода.

Збільшення прикладеного тиску, за постійного

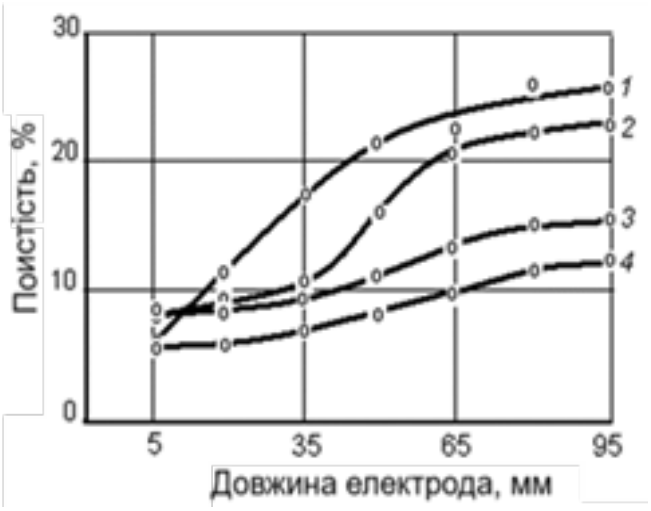


Рис. 2. Залежність пористості від довжини електродів різного діаметра (мм) з карбіду титану за тиску гарячого пресування P = 3,2 МПа: *1* — 12; *2* — 14; *3* — 16; *4* — 18

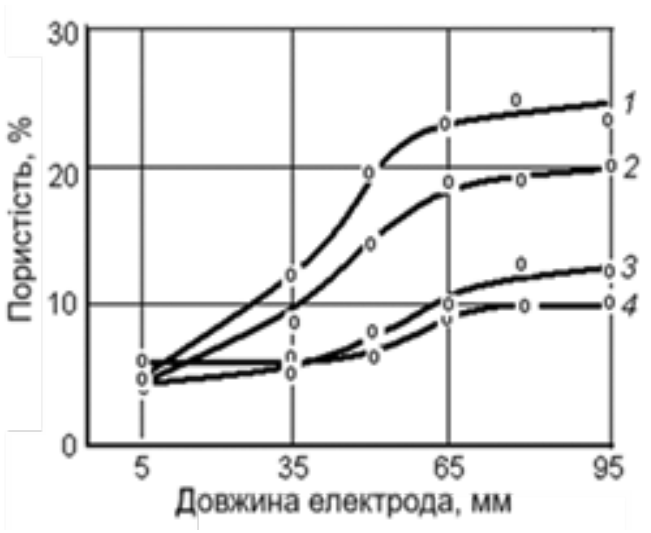


Рис. 3. Залежність пористості від довжини електродів різного діаметра (мм) з карбіду титану за тиску гарячого пресування P = 6,5 МПа: *1* — 12; *2* — 14; *3* — 16; *4* — 18

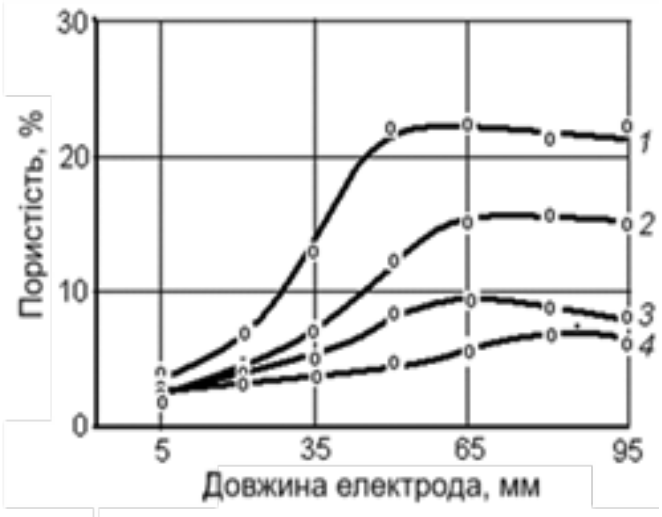


Рис. 4. Залежність пористості від довжини електродів різного діаметра (мм) з карбіду титану за тиску гарячого пресування P = 10,6 МПа: *1* — 12; *2* — 14; *3* — 16; *4* — 18

діаметра, призводить до збільшення бічного тиску і, відповідно, сили тертя об стінки прес-форми. У зв'язку з цим, ймовірно, відбувається своєрідне «заклинювання» верхнього шару пресованого електрода і, тим самим, утруднюється передача тиску на шари, що знаходяться нижче. Результатом цього також є нерівномірний розподіл щільності по довжині електрода. Як показують результати плавок електродів, виготовлених за різних режимів гарячого пресування, найбільш стійкими проти термічного удару, що виникає під час загоряння дуги, є електроди діаметром 18 мм (H/D = 4), спечені за відповідних температур і витримках для різних карбідів за тисків 6,4—10,6 МПа. Це може бути зумовлене тим, що такі електроди мають найбільш рівномірний розподіл щільності по довжині і у зв'язку з цим найменший перепад температур по довжині в початковий період плавки.

Мундштучне пресування. У порівнянні з іншими методами пресування заготівок метод мундштучного пресування з наступним спіканням є найбільш перспективним для виготовлення циліндричних виробів з великим відношенням висоти до діаметра (великої довжини). Найбільш характерними перевагами цього методу є велика продуктивність, відносна простота і забезпечення необхідної якості заготівок відносно рівномірного розподілу щільності по довжині і об'єму виробу. Теоретичні і технологічні основи і методи мундштучного пресування детально розглянуті в роботах [26], [28—30]. У зв'язку з цим, в роботі не передбачалось їх розгляд (аналіз), а тільки деяке уточнення відомих вже режимів і, головним чином, отримання методом мундштучного пресування витратних електродів з деяких тугоплавких карбідів для плавки в дуговій печі, а також порівняння їх властивостей з властивостями електродів, отриманих іншими методами.

Як відомо [25], [26], порошки карбідів перехідних металів мають низьку пресуємість, у зв'язку з чим для їх пресування потрібні пластифікатори [26], [29], [30]. Від виду пластифікатору залежить якість та склад заготівок, виготовлених методом мундштучного пресування. У загальному випадку пластифікатор повинен мати наступні властивості:

а) надавати заготівкам жорсткості, достатньої для маніпулювання з ними;

б) забезпечувати можливість спікання заготівель без попереднього відгону пластифікатору;

в) повністю видалятись з заготівок під час спікання, не впливати на процес спікання і не вступати у взаємодію з основним матеріалом і середовищем печі. Найбільш широке застосування залежно від виду виробів, що виготовляються, і матеріалу, що використовується, знайшли пластифікатори, характеристика яких наведена в табл. 2 [28]. Якщо внесення домішок в карбіди під час їх плавлення є небажаним, то як пластифікатор доцільно використовувати парафін.

Для виготовлення заготівок витратних електродів з карбідів та інших виробів зазвичай використовують порошки карбідів (табл. 1) з розміром частинок меншим за 160 мкм (за необхідності меншим). У випадку використання як пластифікатору парафіну для приготування пластифікованої суміші, яку використовують для формування заготівок, такі порошки карбідів змішують з парафіном за температури 80—90 ºС до отримання густої сметаноподібної маси. Парафін вводиться у кількостях, вказаних в табл. 3. Для з'ясування оптимального вмісту його в суміші забезпечують необхідні його властивості відносно пластичної міцності, пластичної в'язкості, характеру кривих витікання і тиску витікання [26], [28], які залежать від властивостей вихідних порошків і впливають на процес формування під час мундштучного пресування властивостей заготівок і спечених виробів. Виготовлену таким чином суміш пресують одностороннім пресуванням у брикети діаметром, відповідним до діаметра прес-форми для мундштучного і заввишки 10—15 мм. Брикетування проводиться для видалення повітря з суміші, яке може призвести до виникнення в спечених виробах «пузирчастої» пористості, і для більш рівномірного розподілу щільності в об'ємі заготівки і кінцевого виробу з неї.

Таблиця 2

Характеристика пластифікаторів [28]

Пластифікатор	Співвідношення розчинника і речовини	Вміст, %	
		попіл	кокс
Парафін	—	0	0
Розчин парафіну і бензину	2:1	0	0
Розчин парафіну в бензолі	2:1	0	0
Розчин каучуку в бензині	10:1	0,94	1,55
Розчин полівінілового спирту у воді	4:1	0,58	1,15
Крохмальний клейстер	4:1	2,45	6,75
Розчин сополіаміду в спирті	5:1	0	0
Розчин метилцелюлози у воді	5:1	2,05	4,35

Пресування можна проводити в прес-формі для мундштучного пресування (рис. 119, [26]). У випадку використання як пластифікатору парафіну матриця прес-форми попередньо нагрівається в печі з ніхромовим нагрівачем до температури 60 ºС. Основними умовами (характеристиками) пресування заготівок витратних електродів з карбідів під час мундштучного пресування є характеристики, наведені в табл. 3.

Аналіз даних [24] показує, що за вмісту парафіну в суміші близько 5—7 % (залежно від порошку

Таблиця 3

Режими отримання витратних електродів з порошків карбідів методом мундштучного пресування

Карбід	Кількість парафіну, %	Тиск витікання, МПа	Пористість заготівок, %
TiC	5	215	42—61
	6	200	40—60
	6,8	190	44—53
	8,5	140	46
	9,2	60	66
ZrC	7,0	185	40—52
	7,5	150	44
	8,0	90	51
	9,0	65	60
NbC	6	198	46—53
	7	173	46—49
	8	150	51
	9	86	62
WC	6	180	45—49
	6,8	144	43
	7,5	114	52
	8,5	86	60
	9,0	63	66
Mo_2C	7,0	190	42—51
	8,0	140	49
	9,0	91	54
	10,0	56	62
Cr_3C_2	6,0	194	40—44
	7,0	140	46
	8,0	91	54
	10,0	54	66

карбіду) тиск витікання не стійкий (стрибкоподібний рух пуансона [26]). Зі збільшенням вмісту парафіну тиск витікання досягає цілком визначеного значення і зменшується за подальшого збільшення вмісту пластифікатору з одночасним зростанням пористості заготівок. Виходячи з теорії витікання речовини через отвір, розробленої Н.С. Курнаковым та іншими [26], можна вважати, що такі суміші є в'язко-пластичні тіла Бингама-Шведова, що відповідає вимогам до них.

Відомо [26], [28—30], що ущільнення у процесі мундштучного пресування карбідів, а також інших тугоплавких сполук відбувається не за рахунок пластичної деформації частинок, яка не властива для них, а внаслідок особливого виду деформацій (структурна деформація), під час якої відбувається переміщення частинок одна відносно одної з наступною більш щільною їх укладкою та заповнення порожнин між ними. За малого вмісту парафіну (5—8 % залежно від властивостей порошку карбіду), стрибкоподібне витікання пластифікованої суміші з порушенням суцільності заготівель можна пояснити тим, що у цьому випадку пластифікатору недостатньо для забезпечення переміщення частинок без зачеплення їх одна з одною. Внаслідок тертя частинок одна об одну і об стінки прес-форми відбувається утворення конгломератів, в яких між частками порошку відсутній пластифікатор. Для течії суміші потрібне руйнування утворених конгломератів, що пов'язано з необхідністю докладання додаткових зусиль, внаслідок чого зрештою відбувається стрибкоподібна зміна тиску витікання і порушення суцільності заготівок. Зі збільшенням вмісту парафіну прошарок його між частинками також збільшується, що сприяє рівномірному ущільненню (укладанню) частинок у процесі переміщення їх у процесі обтискання під час пресування. Однак у цьому випадку відбувається збільшення пористості заготівок у зв'язку зі збільшенням в них долі пластифікатору (рис. 5).

Оптимальними умовами виготовлення заготівок витратних електродів методом мундштучного пресування слід вважати наведені в табл. 4.

Виготовлені за оптимальних умов заготівки спікають. Зазвичай спікання пластифікованих заготівок за участю парафіну проводять у дві стадії: 1 — видалення пластифікатору (парафіну); 2 — кінцеве спікання. У разі суміщення процесу видалення парафіну і спікання використовують двозонні

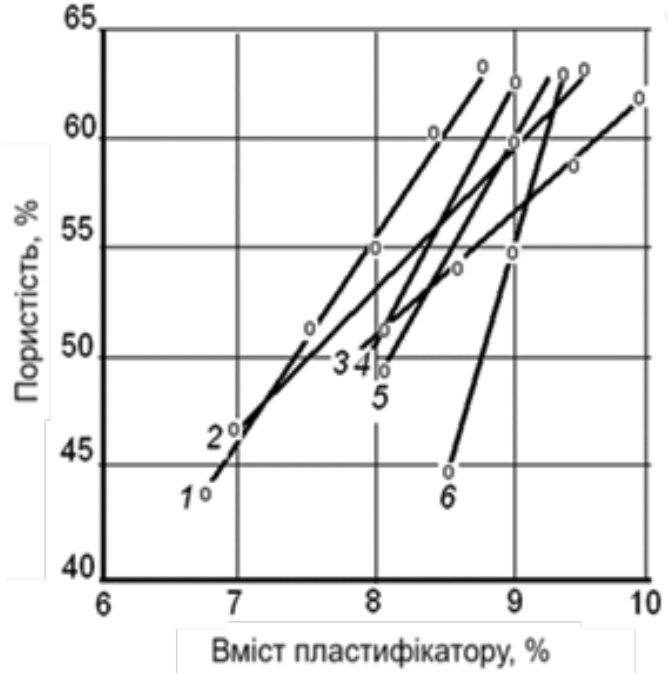


Рис. 5. Залежність пористості «сирих» заготівок від вмісту парафіну у суміші: *1* — WC; *2* — Cr_3C_2; *3* — Mo_2C; *4* — NbC; *5* — ZrC; *6* — TiC

печі [31]. Перша, низькотемпературна зона печі, призначена для відгону пластифікатору, є піччю опору з ніхромовим нагрівником і кварцевим муфелем, яка поєднана з піччю Таммана, призначеною для остаточного спікання електродів. У випадку двостадійного спікання процес видалення парафіну проводять у муфельній печі за режимом, наведеним на рис. 6 [28].

Такий режим видалення парафіну зумовлений наступним. Відомо [28], що під час нагрівання пластифікованих заготівок парафін з них видаляється спочатку в рідкому стані, а потім вигорає або випаровується. Видалення у рідкому стані відбувається за рахунок капілярного ефекту, який створює засипка з дрібнозернистого алюмінію (корекс). Видалення парафіну за рахунок випаровування пов'язано з дифузійними процесами у газовій фазі по поровим каналам. У цьому випадку необхідно забезпечувати молекулярний режим дифузії. У випадку виникнення Кнудсенівського режиму [13] можливе утворення тиску газу (пару парафіну) в об'ємі заготівки, що може бути причиною виникнення несуцільностей, розтріскування та їх здуття. Для попередження цих процесів швидкість нагрівання до температур 350—450 ºС має бути досить повільною (рис. 5). Вона залежить від конфігурації виробу, гранулометричного складу початкових порошків і ряду інших чинників.

Таблиця 4

Оптимальні режими мундштучного пресування карбідів

Карбід	TiC	ZrC	NbC	Cr_3C_2	Mo_2C	WC
Тиск витікання, МПа	140	150	150	140	130	140
Вміст парафіну, %	8,5	7,5	8	7	8	6,8
Пористість, %	46	44	51	46	49	43

Для випадку спікання витратних заготівок електродів, виготовлених з порошків карбідів та розміром частинок меншим за 160 мкм, діаметром до 20 мм, процес видалення парафіну без порушення суцільності заготівок для усіх карбідів, які розглядаються в роботі, приблизно однаковий і полягає у підйомі температури зі швидкістю 20 град/хв до 250—300 ºС, витримці за цієї температури впродовж 1,5—2-х год, з подальшим підйомом температури до 450 ºС зі швидкістю 1,5—2 град/хв і витримці за цієї температури впродовж 1-ої години. Після видалення парафіну піддони із заготівками проштовхують у другу зону печі (Таммана), де і відбувалося їх остаточне спікання за режимами, наведеними в табл. 5.

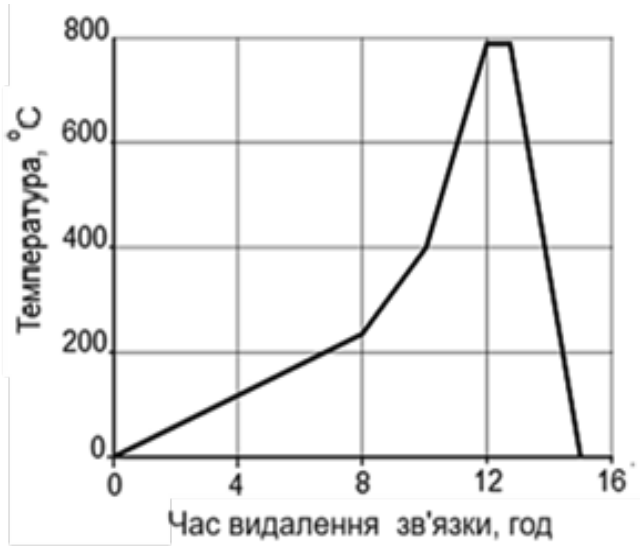


Рис. 6. Оптимальний режим видалення зв'язки із заготівок (виробів) тугоплавких сполук з товщиною стінок 10 мм

У випадку двостадійного спікання після видалення парафіну за температури 450 ºС температуру збільшують до 800—900 ºС з витримкою 1 год для попереднього спікання заготівок з метою надання їм необхідної міцності для подальшого маніпулювання з ними. Спікання на другій стадії проводять окремо в печі Таммана за тих же режимів (табл. 5).

Пресування заготівок електродів з пластифікованої суміші з наступним їх спіканням. Окрім описаних вище методів отримання виробів з великим відношенням висоти до діаметра з тугоплавких з'єднань, можна застосовувати метод пресування в спеціальних розбірних прес-формах (рис. 7), під час пресування в яких зусилля спрямоване перпендикулярно довгій стороні (виконується умова для одновісного пресування $H(D)/d(L)$ [28]), з подальшим спіканням заготівок. В цьому випадку нерівномірність

Таблиця 5

Режими спікання витратних електродів, виготовлених методом мундштучного пресування

Карбід	Час нагрівання до температури спікання, хв	Час спікання, хв	Температура спікання, °С	Щільність електродів, %
TiC	90	60	2200	90—88
	85	60	2100	86—84
	80	60	2000	82—80
	75	60	1900	79—77
ZrC	90	60	2200	86—84
	85	60	2100	82—81
	80	60	2000	78—76
	75	60	1900	75—77
NbC	90	60	2200	88—86
	85	60	2100	84—82
	80	60	2000	81—80
	75	60	1900	76—75
Cr_3C_2	70	45	1800	90—89
	67	45	1750	89—88
	65	45	1700	85—83
	60	45	1600	79—78
Mo_2C	70	45	1850	89—87
	67	45	1750	80—78
	65	45	1700	75—73
	62	45	1650	70—69
WC	78	30	1950	89—87
	75	30	1900	88—86
	72	30	1850	80—77
	70	30	1800	74—73

розподілу щільності по довжині виробів залежить переважно від розподілу вихідної шихти у прес-формі перед пресуванням і її якості.

У зв'язку з низькою пресуємістю порошків тугоплавких сполук для їх ущільнення необхідно застосовувати пластифікатор. Виходячи з технологічності і характеристик, наведених в табл. 2, як пластифікатор доцільно використовувати 5%-ний розчин полівінілового спирту у воді. Приготування шихти для пресування проводять шляхом змішування порошку карбіду з 20 об. % розчину полівінілового спирту до утворення густої тістоподібної маси рівномірної вологості. Отриману таким чином суміш сушать у вакуумній сушильній шафі за температури 90 °С впродовж 45 хв до вологості 5—6 %, а потім гранулюють протиранням через сито з сіткою № 08. Зазвичай заготівки витратних електродів діаметром 16—18 мм і довжиною 120—160 мм пресують в розбірній прес-формі (рис. 7).

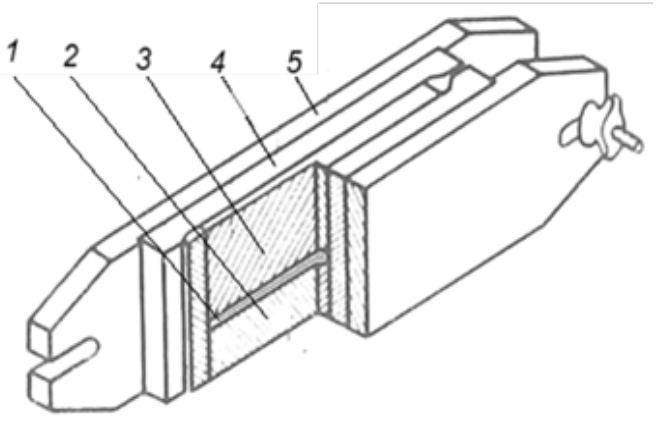


Рис. 7. Розбірна прес-форма: *1* — пресовка; *2* — нижній пуансон; *3* — верхній пуансон; *4* — щоки; *5* — струбцина

Аналіз процесів ущільнення показує (рис. 8) [24], що щільність заготівок зі збільшенням тиску пресування від 100—200 МПа до 400—500 МПа інтенсивно збільшується і за подальшого збільшення тиску до 700—800 МПа змінюється незначно. Мало того, збільшення тиску у цих межах призводить до виникнення розшарувань в заготівках і, як наслідок, виникнення в них несуцільностей під час спікання. Однією з причин розшарування пресовок за збільшення тиску пресування може бути за рахунок порушення шару пластифікатору, який оточує частинки, і тим самим зменшується їх зчіплюваність в пресовці.

Оптимальним тиском пресування карбідів, що

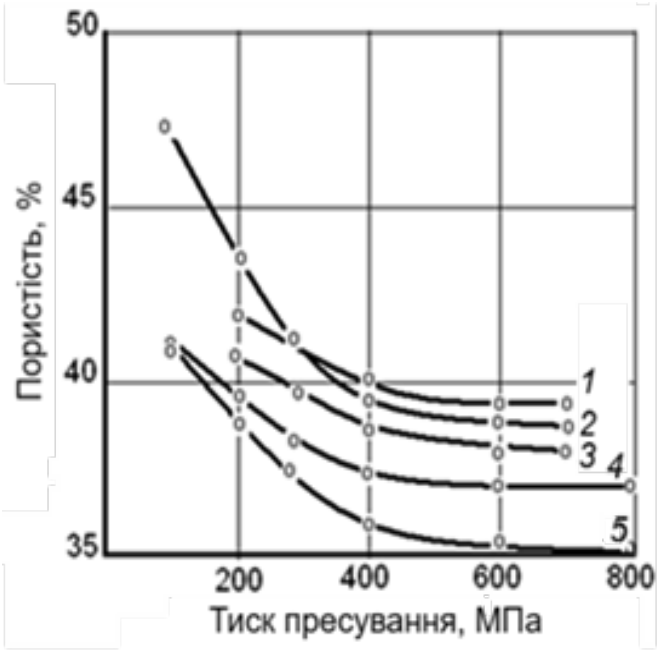


Рис. 8. Залежність пористості пресовок карбідів від тиску пресування: *1* — NbC; *2* — TiC; *3* — ZrC; *4* — Cr_3C_2; *5* — WC

розглядаються в роботі, слід вважати тиск у межах 400—500 МПа, що може бути пов'язано переважно з приблизно однаковим розміром частинок порошків різних карбідів, що свідчить про їх основний вплив, за рівних інших умов, на процес ущільнення. Пористість «сирих» заготівок може коливатись для різних карбідів в межах 35—40 %.

Зазвичай пресування проводять на гідравлічних пресах з зусиллям 500 кН. Наважку гранульованої пластифікованої суміші засипають в прес-форму і вирівнюють її по висоті. Отримані заготівки сушать у вакуумній сушильній шафі за температури 80—120 ºС протягом 4-х годин для видалення вологи.

Спікання пластифікованих заготівок можна здійснювати двома методами. За першим — спікання здійснюється за режимами, наведеними в табл. 6, в печі Таммана із застосуванням як захисного середовища осушеного аргону. Крім того, для попередження взаємодії матеріалу заготівок з середовищем печі їх розміщують у графітовому човнику (піддоні) з використанням як засипки гранульованого порошку того ж складу або графітової крупки.

За другим — можливе спікання заготівок карбідів

Таблиця 6

Режими спікання пластифікованих заготівок, спресованих у розбірній прес-формі

Карбід	Час нагрівання до температури спікання, хв	Температура спікання, °С	Витримка за температури спікання, хв	Пористість, %
1	2	3	4	5
TiC	90—120	2400	90	8
ZrC	90—120	2400	90	14
NbC	90—120	2500	90	14
Cr_3C_2	60	1800	60	10
WC	60—90	1900	60	16

в автоклаві під тиском аргону, виходячи з припущення, що на процес спікання впливатимуть окрім сил капілярного тиску, які є, як відомо [26], основними рушійними силами спікання, також сили, обумовлені тиском газу. Можна припустити, що останні, так само як і у разі гарячого ізостатичного пресування [26], прискорюватимуть процес деформації (пластичної течії) матеріалу і тим самим прискорюватимуть процес ущільнення виробів під час спікання у цілому [26]. Спікання за таким варіантом можна проводити в установці для плавлення тугоплавких сполук під тиском газу (рис. 1).

Вплив початкової пористості, часу витримки за температури спікання на процес ущільнення за різного тиску газу розглянемо на прикладі карбіду хрому (Cr_3C_2). Як видно з рис. 9, 10, щільність виробів збільшується за підвищення тиску до 2,0 МПа як для витримок за температури спікання впродовж 15 хв, так і впродовж 30-ти хв. Збільшення тиску до 4,0 МПа під час спікання впродовж 15 хв призводить до уповільнення процесу ущільнення. Це можна пояснити тим, що тиск усередині закритих пор, що утворюються в процесі спікання, протидіє як капілярним силам, так і силам, зумовленим тиском газу в печі спікання. Крім того, можна припустити, що сили тиску газу в закритих порах на певному проміжку часу спікання сприяють розриву контактів між частками, і тим самим, зменшенню тиску газу в

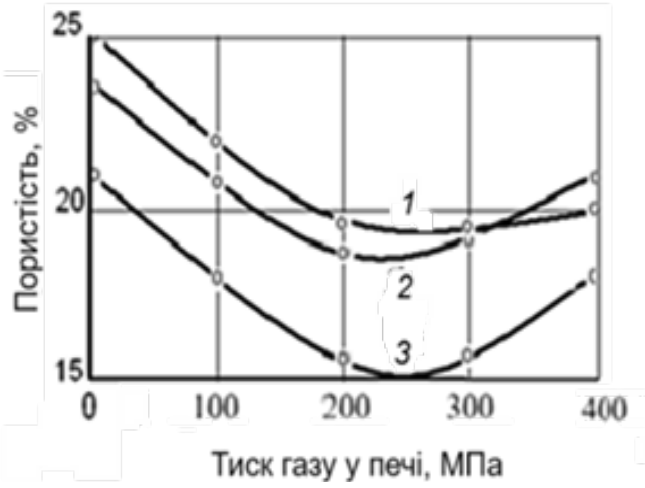


Рис. 9. Залежність пористості зразків Cr_3C_2, спечених за температури 1600 ºС протягом 15 хв, від тиску газу у печі за різної вихідної пористості за тиску пресування: *1* — 200 МПа; *2* — 300 МПа; *3* — 400 МПа

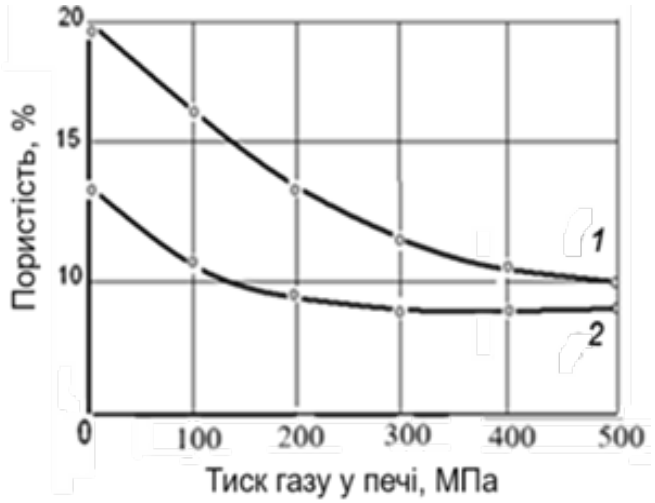


Рис. 10. Залежність пористості зразків Cr_3C_2, спечених за температури 1600 °С протягом 30 хв, від тиску газу у печі за різної вихідної пористості, отриманих за тиску пресування: *1* — 200 МПа; *2* — 400 МПа

порах і вирівнюванню його з тиском в печі. Подальша інтенсифікація процесу спікання за збільшення тиску до 5,0 МПа за витримки 30 хв відбувається за тих же причин, що і за спікання під час гарячого пресування.

Аналізуючи дані про спікання витратних електродів з карбідів під тиском газу в печі, можна стверджувати, що у цьому випадку скорочується час спікання, і отримується висока їх якість (табл. 7).

Скорочення загального часу спікання пояснюється наведеними вище міркуваннями відносно спікання карбіду хрому, а також можливістю прискореного нагрівання заготівок до температури спікання (10—15 хв) без порушення їх форми і суцільності. Останнє можна пояснити тим, що за наявності високого тиску газу видалення газоподібних продуктів розкладання пластифікатору відбувається не бурхливо, а рівномірно у ламінарному режимі у процесі нагрівання заготівок до температур спікання за рахунок утруднення дифузії їх в газове середовище печі. Застосування подібних режимів під час спікання

Таблиця 7

Хімічний склад електродів з NbC

Метод отримання	Склад, %			
	Me	$C_{заг.}$	$C_{вільн.}$	Me + C
Вихідний порошок	88,30	11,4	0,34	99,7
Гаряче пресування	87,1	11,6	0,40	98,7
Мундштучне пресування з наступним спіканням в двозонній печі	88,00	11,70	0,51	99,7
Пресування в розбірних прес-формах з наступним спіканням в печі Таммана	87,85	11,70	0,40	99,55
Те ж саме з наступним спіканням під тиском газу	88,5	11,4	0,30	99,9

у печі Таммана за атмосферного тиску газового середовища призводить до негативних результатів. Відбувалося викривлення заготівок з виникненням в них шпарин.

Термостійкість витратних електродів під час їх плавлення. Під час отриманням литих карбідів за допомогою плавлення витратних електродів важливе значення має їх термостійкість, яка визначалась автором в роботі [28] шляхом обробки статистичних даних як відношення кількості електродів, що збереглися, до кількості зруйнованих на початку плавки за рахунок різкого підйому температури у момент виникнення дуги.

Плавка витратних електродів, виготовлених різними методами, дає можливість зробити висновок, що електроди мають різну стійкість проти різкого підвищення температури у момент виникнення дуги (рис. 11).

З іншого боку, методи і режими виготовлення електродів також впливають на режими плавки і стійкість дуги. Останнє, ймовірно, частково можна пояснити, виходячи з термостійкості карбідів, яка є здатністю матеріалу протистояти без руйнування різким тепловим змінам. Природа цієї властивості залежить від теплопровідності, величини коефіцієнта лінійного розширення, міцності, анізотропії кристалічної ґратки, щільності, дисперсності структури, пластичності, геометрії виробу. Як правило, термостійкість підвищується зі збільшенням теплопровідності, міцності і пластичності, зі зменшенням величини коефіцієнта лінійного розширення і щільності. Зменшення дисперсності структури також сприяє підвищенню термостійкості.

Руйнування від теплових ударів пов'язане з появою в матеріалі локальної напруги і утворенням

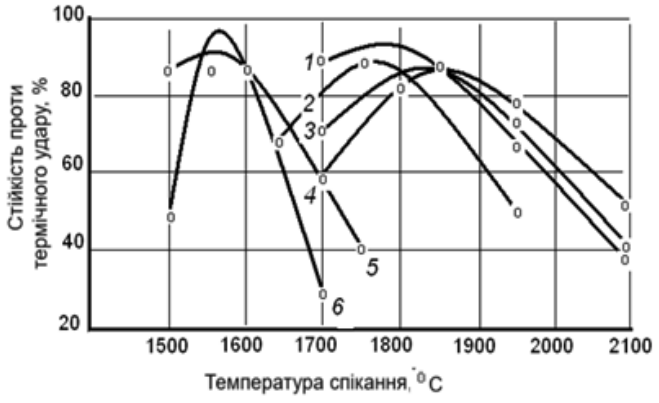


Рис. 11. Залежність стійкості проти термічного удару електродів з карбідів від температури їх спікання: *1* — NbC; *2* — WC; *3* — TiC; *4* — ZrC; *5* — Mo_2C; *6* — Cr_3C_2

тріщин під впливом цієї напруги. Металоподібні тугоплавкі сполуки у більшості випадків мають погану термостійкість через високу крихкість і відносно малу теплопровідність. У зв'язку з вищевикладеним, погану стійкість проти термічного удару електродів з великим відношенням висоти до діаметра, виготовлених методом спікання гарячим пресуванням (рис. 5), можна пояснити нерівномірним розподілом щільності по довжині електрода. Останнє призводить до локального перегрівання під час проходження струму через електрод і, відповідно, до виникнення термічної напруги, що призводить до руйнування електрода в перший момент плавки.

Електроди, отримані методом мундштучного пресування, а також методом пресування пластифікованої суміші в розбірній прес-формі з подальшим спіканням, мають більш високу стійкість проти термічного удару, ніж електроди, отримані методом спікання гарячим пресуванням. Проте, стійкість проти термічного удару в цьому випадку залежить від режимів спікання (щільності) заготівок. У електродів з високою щільністю під час виникнення дуги, за рахунок швидкого підвищення температури до 4500—5500 ºС з'являються тріщини внаслідок причин, вказаних вище, що призводить до нестійкого горіння дуги, її розриву за рахунок зміни електропровідності електрода і навіть його руйнування.

Процес плавки електродів, спечених за більш низької температури, які мають меншу щільність (рис. 10), більш стійкий. У цьому випадку в умовах плавки виникає нерівномірне розподілення температур по перетину електрода. Температура поверхні виявляється нижче, ніж серцевини за рахунок втрати тепла в навколишнє середовище, особливо за наявності тиску газу в печі. Окрім того, під час проходженні струму через електрод, через малу контактну поверхню між частинками за малої пористості відбувається їх локальне плавлення (особливо в центрі електрода), що, загалом, призводить до підвищення пластичності електрода і, відповідно, стійкості проти термічного удару.

Якщо розглядати вплив розглянутих методів виготовлення витратних електродів з точки зору чистоти отриманого продукту, то, як видно з табл. 7, перевага залишається за методами мундштучного пресування і пресування в розбірних прес-формах з подальшим спіканням в печі під тиском захисного газу. У цьому випадку хімічний склад спечених електродів не значно відрізняється від складу вихідних порошків.

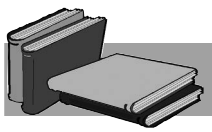
Висновки

Проведено аналіз досліджень впливу методів і умов отримання витратних електродів з тугоплавких карбідів перехідних металів (TiC, ZrC, NbC, Cr_3C_2, WC) для плавки в дуговій печі на їх щільність і її розподіл по довжині. Надано інтерпретацію природи властивостей електродів з точки зору сучасних уявлень про формування властивостей порошкових виробів, зокрема термостійкості.

Встановлено, що на нерівномірний розподіл щільності в електродах, отриманих статичним та гарячим пресуванням, впливає зовнішнє тертя та нерівномірний розподіл тиску пресування по довжині електрода. Відсутність впливу цих факторів на використання для виготовлення електродів методу мундштучного пресування та пресування в розбірних прес-формах у напрямку довжини електрода з наступним спіканням сприяє отримання їх з рівномірним розподілом щільності по їх довжині.

Показано, що на термостійкість електродів впливає пористість електродів. Вона зменшується зі зменшенням пористості. Найбільш високу термостійкість мають електроди з рівномірним розподілом щільності по довжині і пористістю 10–15 %.

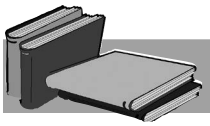
Найбільш прийнятними методами виготовлення електродів є методи мундштучного пресування і пресування в розбірних прес-формах з подальшим спіканням.



ЛІТЕРАТУРА

1. Скороход В.В. Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений. Киев: Техника, 1982. 167 с.
2. Samsonov G.V., Vinitski I.M. Handbook of Refractory Compounds. IFI. Plenum, New York, Washington, London, 1980. 568 p.
3. Степанчук А.Н. Прочностные и абразивные свойства плавленых тугоплавких соединений и инструментальных материалов на их основе. *Современные спеченные твердые сплавы*. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. С. 269—280.
4. Степанчук А.Н., Билык И.И., Бойко П.А. Технология порошковой металлургии. Киев: Выща школа, 1989. 415 с.
5. Shin S.G. Experimental and Simulation Studies on Grain Growth in TiC and WC-based Cermets during Liquid Phase Sintering. *Metals and Materials*. 2000. Vol. 6. Iss. 3. P. 195—201. https://doi.org/10.1007/BF03028212
6. Степанчук А.Н. Плавленые тугоплавкие соединения для инструментальных материалов. *Оборудование и инструмент для профессионалов.* 2008. № 6. С. 52—56.

7. Степанчук А.М., Білик І.І. Матеріали для напилювання покриттів: Навч. посібн. Київ: Центр учбової літератури, 2016. 226 с.
8. Белый А.И. Износостойкость и прочность карбидов вольфрама WC–W_2C, полученных различными способами. *Автоматическая сварка*. 2010. № 12. С. 20—23.
9. Дзыкович В.И., Жудра А.П., Белый А.И. Свойства порошков карбидов вольфрама, полученных по различным технологиям. *Автоматическая сварка.* 2010. № 4 (684). С. 28—31.
10. Garcia-Ayala E.M., Tarancon S., Ferrari B., Pastor J.Y., Sanchez-Herencia A.J. Thermomechanical behaviour of WC–W_2C composites at first wall in fusion conditions. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2021. Vol. 98, art. 105565. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105565
11. Витрянюк В.К., Степанчук А.Н. Спеченные безвольфрамовые твердые сплавы. Монография. Киев: ЗАО «Випол», 2001. 248 с.
12. Bretzler P., Huber M., Rane A.A., Jentoft R.E., Köhler K., Jentoft F.C. Selective synthesis of tungsten carbide phases W_2C and WC as hydrogenation catalysts. *Journal of Catalysis*. 2022. Vol. 405. P. 60—73. https://doi.org/10.1016/j.jcat.2021.11.025
13. Степанчук А.М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук. Підручник. Київ: Видавництво «Політехніка», 2006. 353 с.
14. Степанчкук А.М., Бірюкович Л.О. Електрофізичні властивості плавлених карбідів TiC, ZrC, NbC в області їх гомогенності. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2015. № 1. С. 66—73.
15. Самсонов Г.В., Упадхая Г.Ш., Нешпор В.С. Физическое материаловедение карбидов. Киев: Наукова думка, 1974. 456 с.
16. Степанчук А.Н., Притуляк А.С., Шлюко В.Я. Получение плавленых карбидов титана, циркония и ниобия в области их гомогенности. *Вестник КПИ. Серия «Машиностроение»*. Киев: «Выща школа», 1975. С. 153—156.
17. Самсонов Г.В., Степанчук А.Н., Притуляк А.С., Машонкина Т.В. Концентрационная зависимость абразивных свойств порошков плавленых карбидов титана и циркония. *Порошковая металлургия.* 1974. № 9. С. 56—61.
18. Адамовский А.А., Степанчук А.Н. Особенности шлифования титановых изделий кругами из карбида ниобия. *Технология и организация производства*. 1978. № 4. С. 24—26.
19. Оликер В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий. Москва: Металлургия, 1990. 176 с.
20. Степанчук А.М., Шевчук М.Б., Мазаєв С.В. Отримання та властивості гранул з тугоплавких сполук для створення композиційних матеріалів. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2010. № 6. С. 111—119.
21. Zgalat-Lozynskyy O.O., Matviichuk O.O., Tolochyn O.I., Ievdokymova O.V., Zgalat-Lozynska N.O., Zakiev V.I. Polymer Materials Reinforced with Silicon Nitride Particles for 3D Printing. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2021. Vol. 59. P. 515—527. https://doi.org/10.1007/s11106-021-00189-2
22. Болгар А.С., Турчанин А.Г., Фесенко В.В. Термодинамические свойства карбидов. Киев: Наук. думка, 1973. 271 с.
23. Степанчук А.Н., Шлюко В.Я. Получение и некоторые свойства плавленых карбидов. *Вестник КПИ, серия «Машиностроение»*. 1970. Вып. № 7. С. 116—120.
24. Степанчук А.Н., Бирюкович Л.О., Шум Л.А. Получение расходуемых электродов для плавки тугоплавких соединений в дуговой печи. Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 21 квітня 2015 р. Київ: НТУУ «КПІ». 2015. С. 843—864.
25. Ковальченко М.С. Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением. Киев: Наук. думка, 1980. 240 с.
26. Степанчук А.М. Основи теорії і технології процесів консолідації порошкових матеріалів: Підручник. Київ: Вид-во "SBA Print", 2025. 365 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/73292 (дата звернення: 20.03.2026).
27. Самсонов Г.В., Ковальченко М.С. Горячее прессование. Киев: Государственное издательство технической литературы УССР, 1969. 212 с.
28. Степанчук А.М. Теорія і технологія пресування порошкових матеріалів. Навч. посібник. Київ: Центр учбової літератури, 2016. 336 с.
29. Кислый П.С., Самсонов Г.В. Основы процессов мундштучного прессования труб и стержней из порошков тугоплавких соединений. *Порошковая металлургия*. 1962. № 3. С. 31—48.
30. Самсонов Г.В., Кислый П.С. Высокотемпературные неметаллические термопары и наконечники. Киев: Наук. думка, 1969. 181 с.
31. Кипарисов С.С., Падалко О.В. Оборудование предприятий порошковой металлургии. Москва: Металлургия, 1988. 448 с.



REFERENCES

1. Skorokhod, V. V. (1982). Poroshkovyie materialyi na osnove tugoplavkih metallov i soedineniy [Powder materials based on refractory metals and compounds]. Tekhnika [in Russian].
2. Samsonov, G. V., & Vinitski, I. M. (1980). Handbook of Refractory Compounds. IFI. Plenum, New York, Washington, London.
3. Stepanchuk, A. N. (2008). Prochnostnyie i abrazivnyie svoystva plavlenyih tugoplavkih soedineniy i instrumentalnyih materialov na ih osnove [Strength and abrasive properties of molten refractory compounds and instrumental materials based on them]. *Modern sintered solids*. Kyiv. ISM named after V. N. Bakulya, National Academy of Sciences, pp. 269-280 [in Russian].
4. Stepanchuk, A. N., Bylyk, I. I., & Boyko, P. A. (1989). Tehnologiya poroshkovoy metallurgii [Technology of powder metallurgy]. Vyischa shkola [in Russian].
5. Shin, S.G. (2000). Experimental and Simulation Studies on Grain Growth in TiC and WC-based Cermets during Liquid Phase Sintering. *Metals and Materials, 6*(3), 195-201. https://doi.org/10.1007/BF03028212
6. Stepanchuk, A. N. (2008). Plavlenyie tugoplavkie soedineniya dlya instrumentalnyih materialov [Fused refractory compounds for instrumental materials]. *Equipment and instruments for professionals*, (6), 52-56 [in Russian].
7. Stepanchuk, A. M., & Bilyk, I. I. (2016). Materialy dlia napyliuvannia pokryttiv: Navch. posibn. [Materials for spraying coatings: Education. Manual]. Center for Educational Literature [in Ukrainian].
8. Bely, A. I. (2010). Iznosostoykost i prochnost karbidov volframa WC–W_2C, poluchennyih razlichnyimi sposobami [Wear resistance and strength of WC–W_2C tungsten carbides obtained by various methods]. *Automatic Welding,* (12), 20-23 [in Russian].
9. Dzykovich, V. I., Zhudra, A. P., & Belyi, A. I. (2010). Svoystva poroshkov karbidov volframa, poluchennyih po razlichnyim tehnologiyam [Properties of tungsten carbide powders obtained by various technologies]. *Automatic Welding*, *4*(684), 28-31 [in Russian].
10. Garcia-Ayala, E. M., Tarancon, S., Ferrari, B., Pastor, J. Y., & Sanchez-Herencia, A. J. (2021). Thermomechanical behaviour of WC–W_2C composites at first wall in fusion conditions. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *98*, art. 105565. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105565
11. Vytryaniuk, V. K., & Stepanchuk, A .N. (2001). Spechennyie bezvolframovyie tverdyie splavyi. Monografiya [Sintered tungsten-free hard alloys. Monograph]. ZAO "Vypol" [in Russian].
12. Bretzler, P., Huber, M., Rane, A. A., Jentoft, R. E., Köhler, K., & Jentoft, F. C. (2022). Selective synthesis of tungsten carbide phases W_2C and WC as hydrogenation catalysts. *Journal of Catalysis*, *405*, 60-73. https://doi.org/10.1016/j.jcat.2021.11.025
13. Stepanchuk, A. M. (2006). Teoretychni ta tekhnolohichni osnovy otrymannia poroshkiv metaliv, splaviv i tuhoplavkykh spoluk. Pidruchnyk [Theoretical and technological foundations of obtaining powders of metals, alloys and refractory compounds. Textbook]. Politekhnika [in Ukrainian].
14. Stepanchuk, A. M., & Biryukovich, L. O. (2015). Elektrofizychni vlastyvosti plavlenykh karbidiv TiC, ZrC, NbC v oblasti yikh homohennosti [Electrophysical properties of fused carbides TiC, ZrC, NbC in the area of their homogeneity]. *Scientific news of NTUU "KPI"*, (1), 66-73 [in Ukrainian].
15. Samsonov, G. V., Upadkhaya, G. Sh, & Neshpor, V. S. (1974). Fizicheskoe materialovedenie karbidov [Physical materials science of carbides]. Naukova dumka [in Russian].
16. Stepanchuk, A. N., Prytulyak, A. S., & Shlyuko, V. Ya. (1975). Poluchenie plavlenyih karbidov titana, tsirkoniya i niobiya v oblasti ih gomogennosti [Obtaining fused carbides of titanium, zirconium and niobium in the area of their homogeneity]. *Vestnik KPI. Seriya "Mashinostroenie"*. Vyischa shkola, 153-156 [in Russian].
17. Samsonov, G. V., Stepanchuk, A. N., Prytulyak, A. S., & Mashonkina, T. V. (1974). Kontsentratsionnaya zavisimost abrazivnyih svoystv poroshkov plavlenyih karbidov titana i tsirkoniya [Concentration dependence of abrasive properties of powders of molten carbides of titanium and zirconium]. *Powder metallurgy*, (9), 56-61 [in Russian].
18. Adamovsky, A. A, & Stepanchuk, A. N. (1978). Osobennosti shlifovaniya titanovyih izdeliy krugami iz karbida niobiya [Peculiarities of grinding of titanium products with niobium carbide wheels]. *Technology and production organization*, (4), 24-26 [in Russian].
19. Olyker, V. E. (1990). Poroshki dlya magnitno-abrazivnoy obrabotki i iznosostoykih pokryitiy [Powders for magnetic abrasive processing and wear-resistant coatings]. Metallurgiya [in Russian].
20. Stepanchuk, A. M., Shevchuk, M. B., & Mazaev, S. V. (2010). Otrymannia ta vlastyvosti hranul z tuhoplavkykh spoluk dlia stvorennia kompozytsiinykh materialiv [Obtaining and properties of granules from refractory compounds for the creation of composite materials]. *Scientific Bulletin of NTUU "KPI"*, (6), 111-119 [in Ukrainian].
21. Zgalat-Lozynskyy, O. O., Matviichuk, O. O., Tolochyn, O. I., Ievdokymova, O. V., Zgalat-Lozynska, N. O., & Zakiev, V. I. (2021). Polymer Materials Reinforced with Silicon Nitride Particles for 3D Printing. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 59*, 515-527. https://doi.org/10.1007/s11106-021-00189-2

22. Bolgar, A. S., Turchanin, A. G, & Fesenko, V. V. (1973). Termodinamicheskie svoystva karbidov [Thermodynamic properties of carbides]. Nauk. dumka [in Russian].

23. Stepanchuk, A. N., & Shlyuko, V. Ya. (1970). Poluchenie i nekotoryie svoystva plavlenyih karbidov [Production and some properties of molten carbides]. *Bulletin of KPI, series "Machine Engineering"*, (7), 116-120 [in Russian].

24. Stepanchuk, A. N., Biryukovich, L. O., & Shum, L. A. (2015). Poluchenie rashoduemyih elektrodov dlya plavki tugoplavkih soedineniy v dugovoy pechi [Production of consumable electrodes for melting refractory compounds in an arc furnace]. *Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow: materials of the XIII All-Ukrainian scientific and practical conference*, Kyiv, April 21. Kyiv: NTUU "KPI", pp. 843-864 [in Russian].

25. Kovalchenko, M. S. (1980). Teoreticheskie osnovyi goryachey obrabotki poristyih materialov davleniem [Theoretical foundations of hot processing of porous materials by pressure]. Nauk. dumka [in Russian].

26. Stepanchuk, A. M. (2025). Osnovy teorii i tekhnolohii protsesiv konsolidatsii poroshkovykh materialiv. Pidruchnyk [Fundamentals of the theory and technology of processes of consolidation of powder materials. Textbook]. SBA Print. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/73292 [in Ukrainian].

27. Samsonov, G. V., & Kovalchenko, M. S. (1969). Goryachee pressovanie [Hot pressing]. Gosudarstvennoe izdatelstvo tehnicheskoy literaturyi USSR [in Russian].

28. Stepanchuk, A. M. (2016). Teoriia i tekhnolohiia presuvannia poroshkovykh materialiv. Navch. posibnyk [Theory and technology of pressing powder materials. Manual]. Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].

29. Kisly, P. S., & Samsonov, G. V. (1962). Osnovyi protsessov mundshtuchnogo pressovaniya trub i sterzhney iz poroshkov tugoplavkih soedineniy [Basics of the process of nozzle pressing of pipes and rods from powders of refractory compounds]. *Powder metallurgy*, (3), 31-48 [in Russian].

30. Samsonov, G. V., & Kisly, P. S. (1969). Vyisokotemperaturnyie nemetallicheskie termoparyi i nakonechniki [High-temperature non-metallic thermocouples and tips]. Nauk. dumka [in Russian].

31. Kyparisov, S. S., & Padalko O. V. (1988). Oborudovanie predpriyatiy poroshkovoy metallurgii [Equipment of powder metallurgy enterprises]. Metallurgiya [in Russian].

Надійшла/Received 25.03.2026

Прийнята/Accepted 11.05.2026

Опублікована/Published 29.05.2026

A.M. Stepanchuk, PhD (Engin.), Professor, Professor of the Department,
e-mail: anstepanchuk6@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0363-5226

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

Production of Consumable Electrodes from Refractory Compounds for Melting in an Arc Furnace (Review)

Summary

The methods of obtaining consumable electrodes from some hard refractory carbides of transition metals of cylindrical shape with a ratio of length to diameter greater than 10 mm on their density and its distribution along the length of the electrode were analyzed.

The data obtained during the study of the processes of obtaining electrodes from carbides of titanium, zirconium, niobium, chromium, molybdenum and tungsten, which are most widely used for the manufacture of powder products from them and the creation of wear-resistant coatings with their participation for multifunctional purposes, were analyzed.

The conditions for obtaining electrodes by hot pressing, mouthpiece pressing, and pressing of blanks in a collapsible mold with subsequent sintering were considered. The influence of the method and modes of obtaining electrodes on their density, its distribution along the length was considered. The nature of these properties and the possibility of obtaining them with predetermined values are revealed.

The influence of the method and modes of obtaining electrodes on their operational properties, in particular heat resistance, which is a defining requirement for electrodes, is also considered. High heat resistance ensures a stable melting process and the production of castings with a uniform distribution of the content of the casting components and structure. A mechanism for the formation of high heat resistance is proposed, which consists in the presence of porosity evenly distributed over the volume in the electrodes.

The optimal conditions for obtaining electrodes that provide the greatest thermal stability have been established. It has been shown that the highest values are obtained for electrodes with a uniform density distribution along the length and a porosity of 10–15 %.

The most suitable methods for manufacturing electrodes are die pressing and pressing in collapsible molds with subsequent sintering.

Keywords

Electrode, refractory compounds, carbides, arc melting, die pressing, hot pressing, mold.