

ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО СПІКАННЯ ТВЕРДОСПЛАВНИХ ЗАГОТОВОК

В.М. Нестеренков¹, К.С. Хрипко¹, В.В. Лук'янов¹, М.О. Сисоєв², В.В. Чернявський²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: nesterenkov@technobeam.com.ua

²ПАТ «ПлазмаТек». 21036, м. Вінниця, вул. Максимовича, 18. E-mail: sysoev.maksym@tve.com.ua

У статті розглянуто застосування електронного пучка в технології високошвидкісного спікання заготовок із твердого сплаву, який отримано із вторинної сировини, а також високопродуктивне обладнання, що розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України для впровадження цієї технології. Бібліогр. 9, рис. 7.

Ключові слова: електронно-променева обробка, твердий сплав, спікання

Вступ. Потужний електронний пучок вже багато років використовується у промислових цілях як інструмент термічного впливу на метали та їх сплави. Спочатку він використовувався тільки для зварювання, наплавлення та переплаву металів. Пізніше, у міру розвитку керуючої апаратури, його стали використовувати й для інших завдань, наприклад, для локальної термічної обробки [1, 2] (попереднього нагріву, гарту, повного та неповного відпалу), а також в адитивних процесах як з використанням наплавного дроту, так і порошкових матеріалів [3, 4]. У цій статті розглянуто застосування електронного пучка в технології спікання (умовно) циліндричних заготовок із твердого сплаву, а також відповідне обладнання для реалізації цього процесу на масових партіях таких виробів.

Технологія спікання заготовок із твердого сплаву ВК. Тверді сплави мають широке технічне застосування. При цьому для їх виробництва використовуються ресурси, світові запаси яких є обмеженими. Виявлені та прогнозовані світові ресурси вольфраму оцінюються в 21 млн. т [5]. При цьому в Україні запаси вольфрамових руд зосереджені переважно в північно-західній частині Українського кристалічного щита (південно-західна частина фундаменту Східноєвропейської платформи) і оцінюються в 105 тис. т металу [6]. А щорічні потреби України у вольфрамовій продукції становлять 2,5 тис. т і невпинно зростають. Тому в наш час для виробництва твердосплавних деталей також використовують порошок карбіду вольфраму, отриманий із вторинної сировини (наприклад, з відпрацьованих ріжучих інструментів, штампів, прес-форм, філь'єр тощо). Наявна технологія переробки відходів твердих сплавів є екологічно безпечною (тобто не шкодить навколишньому середовищу) та забезпечує отримання високоякісної, тобто високочистої, сировини.

Зміна параметрів процесу карбідизації дозволяє керувати розміром частинок порошку кар-

біду вольфраму в діапазоні від 50 нм до 10 мкм (рис. 1). У залежності від області застосування та умов експлуатації конкретної деталі підбирається відповідний склад і зернистість сплаву.

Виготовлення «сирої» заготовки проводиться за традиційною технологією: змішування компонентів, замішування на пластифікаторі, формування твердосплавних заготовок на гідравлічних пресах у сталевих прес-формах, видалення пластифікатора під час попереднього спікання у водневому середовищі. Далі ці заготовки потребують ще остаточного спікання.

Слід зазначити, що під час традиційного пічного спікання твердих сплавів при появі рідкої фази спостерігається інтенсивне зростання карбідних зерен, що обумовлене процесом перекристалізації карбіду через рідку фазу, а також зростання сусідніх зерен – внаслідок переважного росту одного зерна за рахунок інших. Для запобігання цих явищ використовують інгібітори росту, а саме карбіди ванадію, хрому та ін.

На відміну від традиційної технології електронно-променева технологія, по-перше, може забезпечити високі швидкості спікання і, по-друге, завдяки високій керованості самого процесу дозволяє достатньо «тонко» керувати мікроструктурою сплаву (рис. 2). При бомбардуванні «сирої» заготовки електронним пучком із прискорювальною напругою високовольтного джерела живлення 60 кВ близько 75 % його потужності перетворюється на тепло у поверхневому шарі заготовки завтовшки S близько 10 мкм [7]. З поверхневого шару тепло поширюється углиб заготовки згідно з законами теплопровідності. Після припинення підведення енергії від електронного пучка поверхневий шар швидко охолоджується. Час охолодження τ є пропорційним товщині S поверхневого шару, що опромінюється, і обернено пропорційним температуропровідності матеріалу a , точніше цей час $\tau \sim S^2/a$. Якщо, наприклад, для сталей температу-

Нестеренков В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7973-1986>, Максимов С.Ю. – <http://orcid.org/0000-0002-5788-0753>

© В.М. Нестеренков, К.С. Хрипко, В.В. Лук'янов, М.О. Сисоєв, В.В. Чернявський, 2023

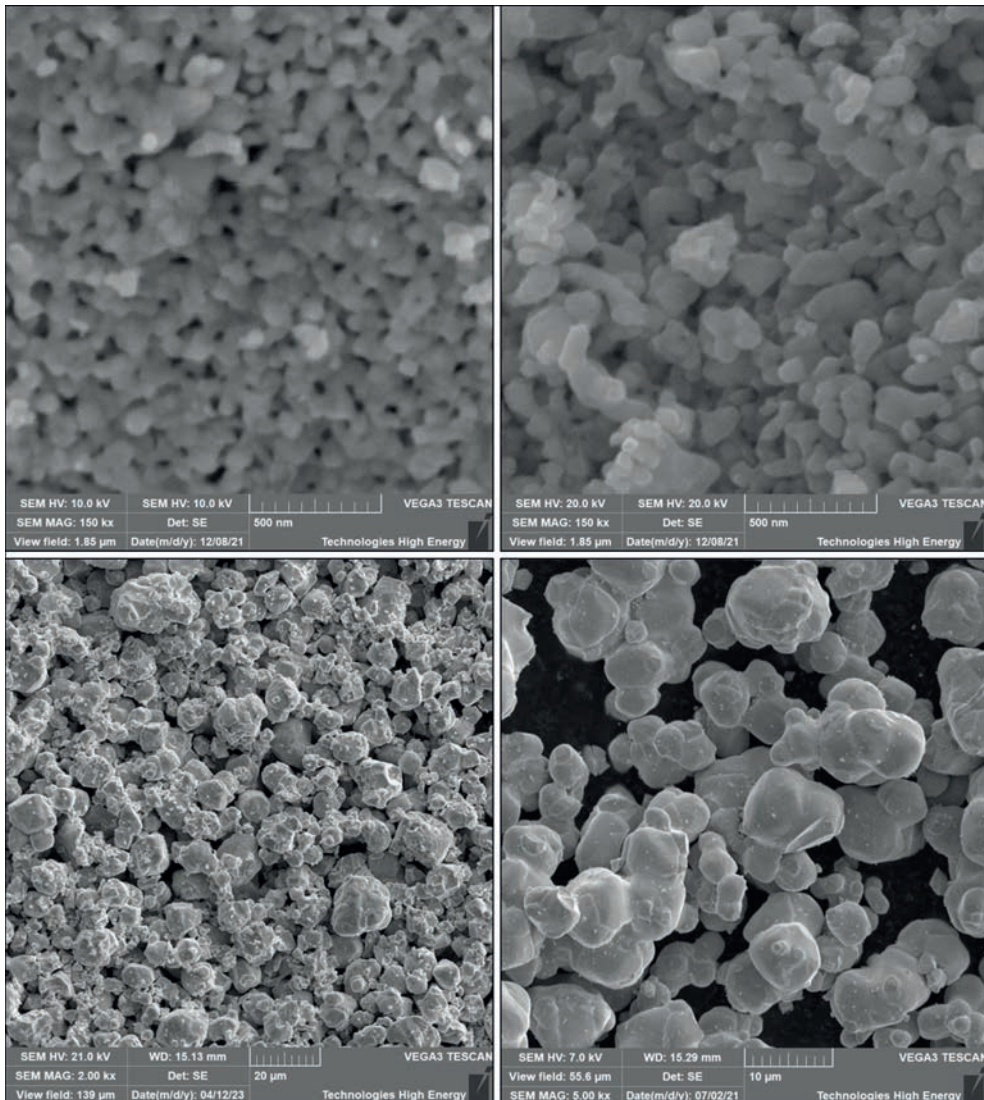


Рис. 1. Морфологія частинок порошку сплаву ВК

ропровідність $a = 0,05 \text{ см}^2/\text{с}$, то час охолодження $\tau = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Такі значні швидкості охолодження дозволяють уникнути інтенсивного зростання карбідних зерен без використання інгібіторів росту.

Номенклатура виробів, що виготовляються за даною технологією, включає: металургійні, прокатні та направляючі ролики, ролики для рихтування дроту в волочильних станах, різний волочильний інструмент, рубочні ножі, борфрези, спеціальні вироби військового призначення тощо (рис. 3).

Установка для електронно-променевого спікання твродсплавних заготовок. Фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ) розроблено та виготовлено на базі ДП «Інженерний центр електронно-променевого зварювання» установку СВ-229 для електронно-променевої обробки (ЕПО) твродсплавних попередньо спечених заготовок з метою їх остаточного спікання. Загальний вигляд цієї установки показано на рис. 4. За винятком внутрішньокамерних механізмів ця установка має конструкцію, що здебільшого є типовою для електронно-променевого зварювально-

го устаткування, розробленого в ІЕЗ, з аналогічним об'ємом вакуумної камери [8, 9]. Вакуумна камера (рис. 4, поз. 2) має прямокутну форму і внутрішній об'єм $\sim 0,5 \text{ м}^3$. Її двері (рис. 4, поз. 3) зсуваються ліворуч вздовж площини переднього торця (коміра) камери. За допомогою рухливих завіс двері підвішені на поздовжній напрямній. Зсув дверей виконується за допомогою пневмоциліндра. Камеру розміщено на жорсткій рамі. До отвору в задній стінці камери консольно прикріплено корпус вертикального пневматичного вакуумного затвору (рис. 4, поз. 4), до якого знизу послідовно приєднані водоохолоджувана пастка та дифузійний насос. На деякій відстані від них на полу розташована механічна форвакуумна станція, що складається з послідовно працюючих роторного та двороторного насосів. Електронно-променева гармата (рис. 4, поз. 1) нерухомо закріплена на даху камери і має строго вертикальну орієнтацію. Для ізоляції джерела електронів гармати від внутрішнього об'єму вакуумної камери слугує пневматичний шибер. Вихлоп турбомолекулярного насоса гармати через клапан з'єдна-

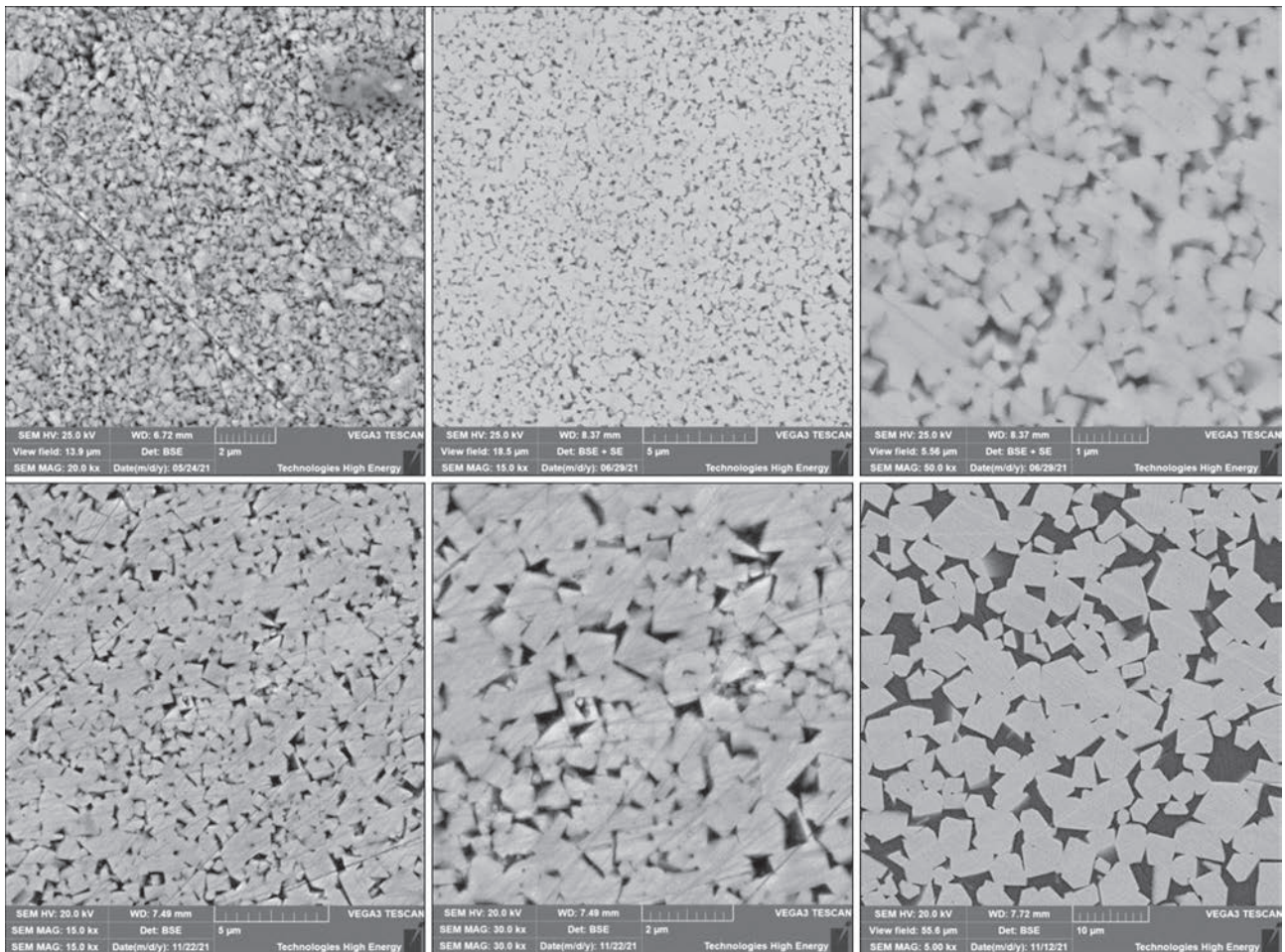


Рис. 2. Мікроструктура сплавів ВК, отриманих електронно-променевим спіканням



Рис. 3. Вироби, які виготовлено методом електронно-променевого спікання

но з об'ємом вакуумної камери, тобто роль ступеня попереднього відкачування гармати виконує об'єм самої камери. Продуктивність вакуумної системи установки є достатньою для створення тиску у вакуумній камері $2 \cdot 10^{-4}$ мбар і, відповідно, $5 \cdot 10^{-5}$ мбар у гарматі приблизно за 15 хв.

Робоче місце оператора установки знаходиться праворуч від вакуумної камери перед шафою керування (рис. 4, поз. 5). Відповідно, у правій стінці камери розташовано похилий тубус головного вікна – для візуального спостереження за подіями в камері (рис. 5).

Основний монітор шафи керування знаходиться на рівні погляду людини середнього зросту, що стоїть на підлозі. Він відображає графічний інтерфейс

програми керування установкою (верхнього рівня, що працює під ОС Windows), включно з системою вторинно-емісійного спостереження РАСТР-6.

Вище основного монітора закріплено додатковий монітор, що призначений для виведення зображення від відеокамери (а також, якщо потрібно, для виведення оперативної інформації програми керування нижнього рівня, що працює під ОС QNX). Відеокамеру встановлено на даху вакуумної камери навпроти невеличкого вікна.

З лицьового боку шафи керування також знаходяться два промислові комп'ютери системи управління установкою (верхнього та нижнього рівнів), блок безперебійного живлення цих комп'юте-



Рис. 4. Установка для ЕПО твердосплавних заготовок: 1 – електронно-променева гармата; 2 – вакуумна камера; 3 – зсувні двері; 4 – вакуумна система; 5 – шафа керування; 6 – силова шафа; 7 – шафа зварювального високовольтного джерела живлення; 8 – завантажувальний пристрій для двох барабаних магазинів деталей

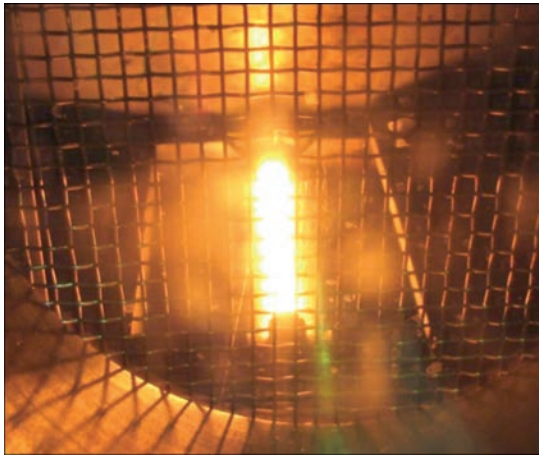


Рис. 5. Спостереження за процесом ЕПО через головне вікно рівня, промисловий блок клавіатури і тачпаду (для комп'ютера верхнього рівня), перетворювач турбомолекулярного насоса гармати, блок управління системою вторинноemisійного спостереження РАСТР-6 і кнопкова панель управління зварювальним високовольтним джерелом живлення.

Праворуч від шафи керування, впритул до неї, розміщено силову шафу (рис. 4, поз. 6) з пускорегулюючою апаратурою вакуумної системи та управління елементами системи SIEMENS Sinamics S120. Ще правіше розміщено шафу (рис. 4, поз. 7) зварювального високовольтного джерела живлення 15 кВт/60 кВ інверторного типу.

Установку укомплектовано автономною системою водяного охолодження з промисловим чилером, який розміщено ліворуч від вакуумної системи.

На відміну від вищеописаних конструктивних рішень, які є звичними для електронно-променевого обладнання, нижче розглянуто особливості установки, пов'язані із специфікою ЕПО.

І вакуумна камера, і двері цієї установки мають порожнисту конструкцію для циркуляції охолоджуючої води. Це дає можливість довготривалої ЕПО, у тому числі забезпечуючи стабільність за-

гальної геометрії камери – насамперед просторової орієнтації поздовжньої осі електронно-променевої гармати.

Для захисту головного вікна від довготривалого теплового випромінювання та напilenня в процесі ЕПО слугує пристрій на внутрішній стінці камери у вигляді пари вертикальних металевих ступок, одночасний протилежно направлений рух яких забезпечує виведений назовні ручний привод (його руків'я знаходиться збоку від вікна).

Крім вищезгаданого віконця для відеокамери, на даху вакуумної камери є ще одне невеличке вікно – для високотемпературного пірометра OPTRIS CTratio 2M (що у двоколірному режимі розрахований на діапазон температур 550...3000 °С). Зауважимо, що фірмову програму пірометра встановлено на комп'ютер верхнього рівня і вона використовується паралельно з основною програмою керування установкою.

Обидва вищезгадані віконця (для відеокамери і пірометра) мають спільну ручну екрануючу заслінку, теж для захисту від нагріву та напilenня при ЕПО. Таким чином, в установці передбачається лише порівняно короткочасне візуальне спостереження (відеокамерою або безпосередньо очима) за процесом ЕПО, а також вимірювання температури заготовок при обробці. Навпаки, вторинноemisійне спостереження за процесом ЕПО доступне постійно.

Це були, хоч і пов'язані з процесом ЕПО, але допоміжні конструктивні елементи. Далі розглянуто специфічні елементи, що безпосередньо беруть участь у цьому процесі.

Насамперед відзначимо, що дана установка призначена для ЕПО заготовок виключно з циліндричною зовнішньою поверхнею, початковими діаметром 15...30 мм і довжиною до 30 мм. Хоча у реальності конструкція установки дозволяє проводити обробку заготовок ширшого діапазону, у тому числі з кінцевим діаметром всього 6 мм, у базовій комплектації установки передбачено оснащення лише для трьох типорозмірів заготовок (початковий діаметр і довжина відповідно): 30×30, 25×25 і 15×15 мм.

У технологічному циклі ЕПО задіяно такі механізми: барабаний магазин для деталей, що повинні оброблятися; механізм робочого обертання деталей (обертач), на якому безпосередньо і виконується ЕПО; механізм повздовжньої подачі деталей при їх завантаженні на обертач та вивантаженні з нього; піддон для оброблених деталей; а також завантажувальний пристрій для двох барабаних магазинів (рис. 4, поз. 8). Усі заготовки, які повинні бути оброблені за один сеанс вакуумування камери, знаходяться в комірках барабанного магазину (рис. 6, поз. 4). У камері магазин підві-

шений на її лівій внутрішній стінці. Для цього до стінки прикріплено дві горизонтальні циліндричні рейки (рис. 6, поз. 5), на які щільно спіраються чотири опорні колеса (ролика) базової плити магазину, так що він може вільно рухатись вздовж цих рейок до обмежувального упору. Цей упор разом з фіксатором на базовій плиті визначають робочу позицію магазину в камері.

Установка має два однакові барабанні магазини. Кожен з них має комплект з трьох змінних вкладишів (рис. 6, поз. 7) із відкритими комірками по зовнішньому периметру де і містяться заготовки трьох вище згаданих типорозмірів. Вкладиші насуваються на зовнішній діаметр барабана (рис. 6, поз. 8), а напрямна шпонка забезпечує фіксування від прокручування. Поперечні розміри комірок у цих вкладишах відрізняються, тому відрізняється і кількість комірок у них: 60 комірок для типорозміру «15 мм», 40 – для «25 мм» і 36 – для «30 мм». Кутівий крок між комірками є цілочисловим і дорівнює 6, 9 та 10° відповідно. Довжина комірок є однаковою та дорівнює 212 мм. Заготовки утримуються від випадання з відкритих комірок зовнішньою нерухомою обичайкою (рис. 6, поз. 9), що знизу має повздовжню щілину (рис. 7, поз. 1). Впритул до цієї щілини розташовано пару стулок (рис. 7, поз. 2), повздовжній зазор між якими установлюється залежно від типорозміру заготовок. Таким чином, при повороті барабана на відповідний кутівий крок з поточної нижньої комірки у цей зазор вниз випадають заготовки (одна з послідовних операцій завантаження обертача). Відкриті кінці комірок закриваються загальною

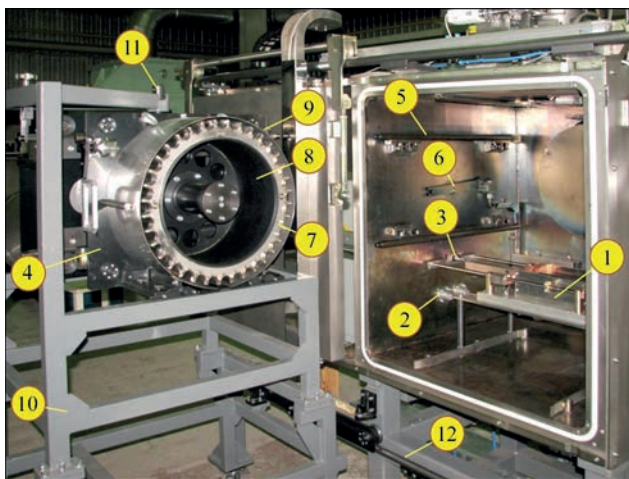


Рис. 6. Загальний вигляд більшості механізмів, що пов'язані з ЕПО: 1 – механізм обертання деталей; 2 – привід цього механізму; 3 – механізм повздовжньої подачі деталей; 4 – барабанний магазин деталей; 5 – рейки підвіски магазину в камері; 6 – привід магазину; 7 – змінний вкладиш з комірками для деталей; 8 – поворотний барабан магазину; 9 – зовнішня обичайка магазину; 10 – рама завантажувального пристрою; 11 – поворотний вузол підвіски для двох барабанних магазинів цього пристрою; 12 – горизонтальна опорна рейка цього пристрою

кришкою (рис. 7, поз. 3), яка одягається на торець барабана і швидко з'єднується з ним.

Маточина барабана через пару підшипників опирається на нерухомий трубчастий вал, що приєднаний перпендикулярно до базової плити магазину. Для повороту барабана використовується такий технічний прийом, як водило. Крізь отвір трубчастого валу проходить стрижень, що з'єднує торцевий фланець на маточині барабана з приводною вилкою цього водила. Відкритий назовні паз вилки знаходиться в зачепленні (зчеплення/розчеплення можливе лише за горизонтальної орієнтації вилки) з приводним пальцем електромеханічного привода повороту барабана (рис. 6, поз. 6). Більшість елементів цього приводу виведено крізь ущільнення назовні вакуумної камери. Передбачається, що коли магазин відчеплений від приводу, зокрема коли магазин знаходиться зовні вакуумної камери, для запобігання самовільному повороту барабана оператор повинен зафіксувати його вручну за допомогою ригельного фіксатора. У подальшому при черговому зчепленні магазину з приводом цей фіксатор автоматично скидається.

Таким чином, вісь повороту барабана магазину і, відповідно, всі комірки орієнтовані вздовж повздовжньої осі камери. Більш того, обидві осі, вісь повороту барабана і вісь приводу цього повороту збігаються та приблизно перетинаються з повздовжньою віссю електронно-променевої гармати.

Магазин заповнюють заготовками зовні вакуумної камери та вже потім переміщують до

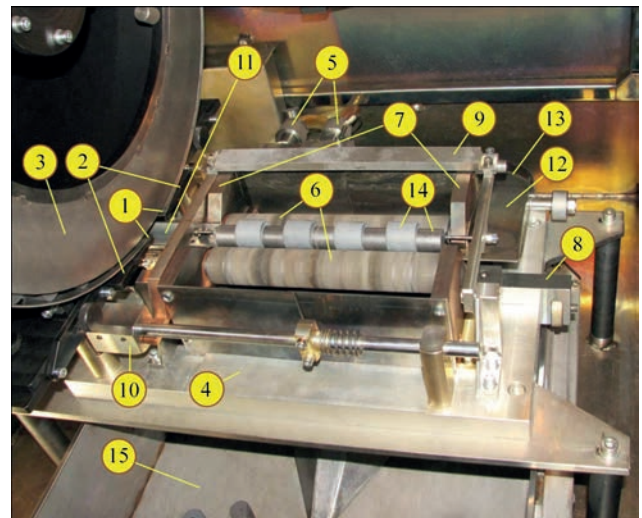


Рис. 7. Внутрішньокамерне оснащення для ЕПО крупним планом: деталі барабанного магазину: 1 – щілина у зовнішній обичайці; 2 – пара нижніх повздовжніх стулок; 3 – торцева кришка барабана; деталі обертача: 4 – базова плита; 5 – водяне охолодження базової плити; 6 – робочі валки; 7 – пара опорних шік одного з валків; 8 – шаблон для позиціонування валків; 9 – підйомна рамка обмежувачів деталей; 10 – блокуючий кулачок фіксатора підйомної рамки; 11 – приймальний лоток; 12 – похилий вивантажувальний лоток; 13 – гвинтовий лоток; інше; 14 – заготовки та графітові проставки; 15 – піддон для оброблених деталей

неї. Для таких операцій слугує завантажувальний пристрій. Це рамна конструкція (рис. 6, поз. 10), у верхній частині якої знаходиться поворотний вузол рейкової підвіски (рис. 6, поз. 11), що розрахована на два магазини. Це дві пари рейок, що аналогічні встановленим у камері та розташовані у двох паралельних площинах, які рівновіддалені від вертикальної осі повороту. Підвішені магазини зорієнтовані барабанами назовні у протилежних напрямках і можуть мінятися місцями при повороті вузла підвіски на 180°.

Для переміщення магазину в вакуумну камеру та з неї назовні вжито відповідних конструктивних заходів. Завантажувальний пристрій розміщено перед дверима камери (не заважаючи їх зсуву). З дальнього від дверей краю пристрій двома поворотними колесами спирається на цехову підлогу. З ближнього ж краю він двома роликками спирається на горизонтальну напрямну рейку (рис. 6, поз. 12), що прикріплена до рами камери паралельно площині її дверного коміра. Таким чином, пристрій можна вручну рухати вздовж рейки від упору до упору. У крайній лівій позиції пристрій не заважає вільному доступу до дверного отвору камери. Відповідно крайня права позиція – це позиція стикування з камерними рейками, коли поточна права пара рейок пристрою повинна знаходитись в одній площині з парою камерних рейок. Підпружинений фіксатор запобігає самовільному поздовжньому зсуву пристрою з цієї позиції. Крім того, паралельність рейок пристрою площині камерних рейок забезпечує фіксатор кута повороту вузла рейкової підвіски цього пристрою. Для безпосереднього (ручного) переміщення барабанного магазину між рейками завантажувального пристрою та камери у зазор між ними встановлюється знімна рейкова перемичка, що легко монтується.

Передбачається, що в налагодженому виробничому циклі під час кожного сеансу вакуумування камери (для виконання ЕПО) раніше наповнений магазин знаходиться в камері, а поточна права пара рейок завантажувального пристрою залишається порожньою – чекає на зворотне переміщення цього, вже порожнього, магазину з камери. Відповідно увесь час цього сеансу вакуумування другий магазин знаходиться на лівій парі рейок цього пристрою. Зазвичай він порожній, тому до закінчення поточного сеансу вакуумування оператор повинен вручну заповнити кожен комірку магазину відповідною кількістю заготовок (залежно від типорозміру). Крайніми з обох кінців кожної комірки мають бути циліндричні графітові проставки. Між ними укладається переміжний ланцюжок з твердосплавних заготовок і графітових проставок. Це мають бути 3 заготовки для типорозміру «30», 4 – для «25» та 6 – для «15» відповідно. Взагалі-то

між крайніми проставками можна класти й одні тільки заготовки і це збільшить загальну кількість заготовок, що обробляються за раз. Але надійніше все ж використовувати проміжні проставки. Початкову, саму нижню, комірку завжди залишають порожньою, бо вона знаходиться над поздовжньою щілиною в зовнішній обичайці магазину.

Основний елемент механізму обертання деталей (обертача) – це пара графітових валків із циліндричною робочою поверхнею завдовжки 208 мм (рис. 7, поз. 6). Синхронне обертання валків забезпечує рівномірне обертання заготовок (рис. 7, поз. 14) під час ЕПО. Більш тонкі кінці валків спираються на опорні втулки, що фіксовані в отворах вертикально розташованих мідних щік (рис. 7, поз. 7). Останні своїми нижніми торцями прикріплені до масивної горизонтальної базової плити (рис. 7, поз. 4), яка має внутрішні канали для водяного охолодження (рис. 7, поз. 5). Дистанція між валками регулюється в залежності від типорозміру заготовок, так щоб кут контакту валків з необробленою заготовкою і з нею після завершення спікання змінювався приблизно від 110 до 125°. При цьому валки повинні бути симетричними відносно вертикальної поздовжньої площини, вздовж якої виконується технологічна поздовжня осциляція електронного пучка (максимальна довжина розгортки електронного пучка на цій робочій відстані не менше 190 мм). Спеціальний рухомий шаблон (рис. 7, поз. 8) полегшує виставлення необхідної дистанції з дотриманням вищезазначеної умови.

Привідний кінець кожного з валків (зі сторони лівої стінки камери) через подвійний карданний зв'язок з'єднаний зі спільним електромеханічним приводом (рис. 6, поз. 2). Привід також виведений крізь ущільнення назовні вакуумної камери.

Осьовому зміщенню заготовок із зони обробки перешкоджають обмежувачі з обох кінців робочих поверхонь валків (відстань між ними – 210 мм). Стрижні обмежувачів укріплені в бокові стінки П-подібної рамки (рис. 7, поз. 9). Відкритою стороною ця рамка шарнірно з'єднана з двома вертикальними кронштейнами, що прикріплені до базової плити. У вільному стані, з закритої сторони, рамка спирається на упор на дальній лівій щоці. Коли рамка піднята, рухомий підпружинений фіксатор своїм кулачком (рис. 7, поз. 10) може блокувати такий стан рамки і це дозволяє прохід під нею заготовок під час завантаження обертача.

Біля лівого краю робочої поверхні валків розташований V-одібний приймальний лоток (рис. 7, поз. 11) – уздовж вищезгаданої вертикальної поздовжньої площини. У нього випадають заготовки з барабанного магазину при повороті барабана «на одну комірку». Висота розміщення лотка регулюється залежно від типорозміру заготовок так,

щоб місця контакту заготовок з похилими стінками лотка були трохи вищими від місць їх контакту з валками. Це дозволяє легко пересувати заготовки з лотка на робочі валки.

З правого краю обертача розташований похилий вивантажувальний лоток (рис. 7, поз. 12) для приймання вже оброблених деталей з валків. Рівень цього переходу регулюється нахилом лотка – залежно розміру компактованих заготовок. Протилежний край цього лотка переходить у гвинтовий лоток (рис. 7, поз. 13), що забезпечує скочування оброблених заготовок і проставок у піддон (рис. 7, поз. 15), який лежить на полу вакуумної камери (який охолоджується водою). Передбачено два однакові піддони для швидкої заміни наповненого піддона порожнім. Для витягування наповненого піддону з камери (після відчинення її дверей) передбачено ручний вилковий підйомник, що зроблений на базі стандартного виробу. Встановити порожній піддон у камеру можна як за допомогою цього підйомника, так і вручну.

Механізм повздовжньої подачі, фактично, це промисловий лінійний актуатор (електроциліндр) з робочим ходом штока до 600 мм. Сам актуатор розташований зовні вакуумної камери, а його подовжений шток заходить у камеру через ущільнення. На кінці штоку закріплений наконечник спеціальної форми, яка обумовлена тим, що цей механізм, крім подачі необроблених заготовок на обертач і вивантаження компактованих заготовок з нього, виконує ще декілька пов'язаних операцій. По-перше, на етапі вивантаження оброблених заготовок з валків обертача (після закінчення їх ЕПО) починається рух штоку від нульової позиції в напрямку заготовок. Не доходячи до них, наконечник штоку, завдяки похилій формі своєї лицевої частини, піднімає рамку обмежувачів обертача і тоді відкрита сторона рамки (подовжений кінець її лівої бокової стінки) блокується кулачком підпружиненого фіксатора. Цей стан потрібен для наступного етапу завантаження заготовок на обертач. По-друге, на етапі цього завантаження, після того як шток подає (зсуває) порцію необроблених заготовок з приймального лотка обертача на його робочі валки, виконується зворотній рух штоку у нульову позицію. При цьому наконечник штоку своїм заднім уступом чіпляє і зсуває ліворуч підпружинений фіксатор, натягуючи його пружину. Безпосередньо біля нульової позиції штоку кулачок фіксатора вивільняє рамку обмежувачів обертача і вона під своєю вагою опускається у стан, потрібний для наступної ЕПО.

Нижче описано алгоритм взаємодії всіх цих механізмів для ЕПО. Для прикладу візьмемо стан налагодженого виробничого процесу, коли у поточному сеансі вакуумування камери завершено повний цикл ЕПО всіх закладених у барабанний магазин заготовок, до камери напущене атмосферне повітря і відкрито її двері. При цьому у порожньому магазині початкова комірка знову нахо-

диться знизу і, відповідно, привідне водило стоїть горизонтально та його вилка направлена на отвір дверей. У цей час на лівих рейках завантажувального пристрою знаходиться другий (вже наповнений) магазин, а праві рейки, відповідно, порожні. Далі оператор виконує наступні дії.

Він пересуває завантажувальний пристрій у позицію стикування з камерними рейками і встановлює рейкову перемичку. Після цього оператор розблоковує рух магазину в камері, викочує його на рейки завантажувального пристрою до упору і фіксує це положення, а також фіксує барабан магазину. Далі оператор міняє магазини місцями. Для цього він тимчасово знімає рейкову перемичку, розблоковує поворотний вузол рейкової підвіски завантажувального пристрою, повертає його на 180° і знов блокує його. Таким чином, наповнений магазин знаходиться вже на правих рейках. Тоді оператор знов встановлює рейкову перемичку, розблоковує рух цього магазину, зачочує його до камери до упору і фіксує це робоче положення. При цьому вилка водила вже буде зчеплена з приводним пальцем приводу повороту барабана магазину, а ригельний фіксатор барабана – скинутий. Далі оператор остаточно знімає рейкову перемичку та відсуває завантажувальний пристрій від отвору дверей до упору.

Крім того, за допомогою вилкового підйомника оператор витягує наповнений обробленими заготовками і графітовими проставками піддон з камери і встановлює замість нього другий, порожній піддон.

Правильний стан внутрішньокамерних механізмів у цей час такий: шток механізму повздовжньої подачі (актуатора) знаходиться у нульовій позиції, відповідно рамка обмежувачів обертача опущена. Крім того, валки обертача – порожні. Тому оператору треба вручну завантажити останню за рахунком порцію заготовок і графітових проставок на валки, бо нижня комірка магазину порожня.

Після вакуумування камери і гармати та ввімкнення високовольтного джерела живлення оператор одразу запускає програмний цикл ЕПО. У ньому циклічно повторюється одна ж та сама послідовність операцій. Кількість таких повторень дорівнює кількості завантажених порцій заготовок конкретного типорозміру, тобто порції у $(n-1)$ комірках барабанного магазину плюс одна порція на валках. Інакше кажучи – це загальна кількість комірок барабанного магазину n .

Вищезгадана повторювана послідовність операцій включає, по-перше, безпосередньо ЕПО порції заготовок, по-друге, операції вивантаження порції оброблених заготовок з валків обертача і, по-третє, операції завантаження порції ще не оброблених заготовок на валки обертача.

ЕПО порції заготовок починається з програмованого включення робочого обертання валків і повздовжньої осциляції електронного пучка. Довжина цієї технологічної розгортки пучка покриває

увесь ланцюжок заготовок, а також біля половини довжини крайніх графітових проставок, що контактують з обмежувачами обертача (тобто вона не менша за 190 мм). Тільки при наявності цих двох факторів можливим є включення струму електронного пучка. Розфокусований електронний пучок, що сканує вдовж лінійної траєкторії, створює джерело нагріву, необхідне для виконання термічного циклу обробки одночасно всіх твердосплавних заготовок, що обертаються на валках. Зазначимо, що програму, яка генерує осциляцію пучка включено з розподілом густини потужності по її траєкторії, користувач може коригувати самостійно за допомогою спеціального програмного інтерфейсу. Програмована за часом зміна потужності електронного пучка зумовлює швидкість нагріву, час витримки та швидкість охолодження заготовок.

Вивантаження виконується у наступній послідовності: шток актуатора починає рухатись від нульової позиції в напрямку валків обертача; на цьому шляху він спочатку піднімає рамку обмежувачів обертача і тоді її блокує кулачок підпружиненого фіксатора; далі шток актуатора один за одним виштовхує оброблені заготовки і графітові проставки з валків на похилий лоток, з якого вони скочуються на гвинтовий лоток і по ньому вниз у піддон; по закінченні цього починається рух штоку у зворотньому напрямку, який закінчується на деякій відстані від нульової позиції – коли наконечник штока вже не заважає падінню порції заготовок з магазину у приймальний лоток обертача, але піднята рамка його обмежувачів все ще заблокована.

Завантаження виконується у такій послідовності: привод барабанного магазину повертає барабан на відповідний кутовий крок і порція необроблених заготовок і графітових проставок з комірки магазину крізь його нижню щілину випадає у приймальний лоток обертача; далі шток актуатора зсуває (подає) цей ланцюжок на валки обертача (на позицію ЕПО); наостанок шток рухається взад, вже в нульову позицію, у якій піднята рамка обмежувачів обертача розблоковується і тоді опускається у положення, що потрібне для наступної ЕПО.

Зазначимо особливість завершення програмного циклу ЕПО. Після вивантаження з валків обер-

тача останньої n -ї порції оброблених (спечених) заготовок, фактично, далі нічого завантажувати, бо барабанний магазин вже порожній. Але для однорідності всього циклічного процесу таке «пусте» завантаження потрібне. Тоді барабан магазину на решті зробить повний оберт, тобто стане у первинну позицію, при якій привідне водило орієнтовано горизонтально і направлене вилкою на отвір дверей. Крім того шток актуатора стане у нульову позицію і, відповідно, рамка обмежувачів обертача опуститься у положення, потрібне для ЕПО, вже у наступному сеансі вакуумування камери.

Висновки

1. Розроблено промислову технологію одержання порошків сплаву WC-Co з відходів виробництва, їх прецизійне пресування у різні форми та електронно-променеве високошвидкісне спікання напівфабрикатів.

2. Розроблено та виготовлено високопродуктивну установку для електронно-променевої обробки твердосплавних попередньо сформованих заготовок з метою їх спікання та отримання необхідних експлуатаційних характеристик.

Список літератури/References

1. Shiller, Z., Gaizig, U., Pantser, Z. (1980) *Electron beam technology*. Moscow, Energiya [in Russian].
2. (2007) *An International History of Electron Beam Welding*. Ed. by Dietrich v. Dobeneck. Pro-beam AG & Co. KGaA.
3. (2017) *Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)*. URL: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>.
4. Nesterenkov, V.M., Matvejchuk, V.A., Rusynik, M.O. (2018) Manufacture of industrial products using electron beam technologies for 3D-printing. *The Paton Welding J.*, 1, 24-28. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2018.01.05>
5. *Tungsten statistics and information by National mineral information center; USGS*. URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/tungsten-statistics-and-information>
6. *Tungsten ores*. Big Ukrainian encyclopedia URL: https://vue.gov.ua/Вольфрамові_руди
7. Rykalin, N.N. et al. (1985) *Laser and electron beam processing of materials*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
8. Nesterenkov, V., Khripko, K. (2017) Recent achievements of E.O. Paton Electric Welding Institute in development of equipment for electron beam welding. *ZVÁRAC profesional*, XIV/2/2017, 913.
9. Nazarenko, O.K., Kajdalov, A.A., Kovbasenko, S.N. et al. (1987) *Electron beam welding*. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR ELECTRON BEAM SINTERING OF HARD-ALLOY BILLETS

V.M. Nesterenkov¹, K.S. Khrypko¹, V.V. Lukyanov¹, M.O. Sysyoev², V.V. Chernyavsky²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: nesterenkov@technobeam.com.ua

²PJSC «PlasmaTec». 18 Maksymovych Str., 21036, Vinnytsya. E-mail: sysoev.maksym@tve.com.ua

The article deals with the use of an electron beam in the technology of high-speed sintering of billets of a hard alloy, which was produced from secondary raw materials, as well as high-performance equipment developed at PWI of the NAS of Ukraine for the introduction of this technology. 9 Ref., 7 Fig.

Keywords: electron beam treatment, hard alloy, sintering

Надійшла до редакції 05.08.2023