

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ, ВЛАСТИВОСТІ І ДОВГОВІЧНІСТЬ ПЛОСКИХ ВОЛЬФРАМОВИХ КАТОДІВ

Л.А. Крушинська¹, Я.А. Стельмах¹, Р.А. Ткач², О.О. Юкальчук², О.О. Дудник³

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: lkrushynska@gmail.com

²ДП «МЦ ЕПТ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України».

03150, м. Київ, вул. Антоновича, 68. E-mail: tkachroman@gmail.com

³ТОВ «ТАНГСТЕН».

02081, м. Київ, Дніпровська набережна, буд. 19, а, оф. 33. E-mail: tungsten.kom@gmail.com

Досліджено вплив термічної обробки на структуру і властивості плоских вольфрамових термоемісійних катодів (W-катодів), отриманих методом гарячого пресування заготовок з вольфрамового дроту чистотою 99,99 %. Вивчено вплив температури (800...1200 °С) та часу вакуумного відпалу (0,3...2,0 год) на формування рекристалізаційної структури у W-катадах, проведено комплексні порівняльні дослідження структури, механічних та експлуатаційних властивостей. Встановлено, що для збільшення терміну служби W-катодів у них повинна бути сформована змішана структура в наступному кількісному співвідношенні: 5...25 % — рівноосні рекристалізовані зерна розміром 1...8 мкм, решта обсягу матеріалу катода повинна зберігати вихідну орієнтовану структуру. Бібліогр. 18, рис. 5.

Ключові слова: термокатоди, вольфрам, електронно-променеві установки, рекристалізація, мікроструктура

Вступ. Для проведення процесів плавки, випаровування і конденсації у вакуумі широко застосовуються електронно-променеві гармати (ЕПГ), витратний елемент яких — вольфрамові термоемісійні катоди (W-катоди), що є джерелом електронів. Цей найважливіший компонент ЕПГ визначає електричні, енергетичні та експлуатаційні характеристики вакуумної електронно-променевої установки (ЕПУ). Для промислових процесів як джерела електронів в даний час широко застосовують W-катоди з плоскою поверхнею (у формі пластин), при нагріванні яких до високої температури відбувається емісія електронів [1–3].

Ресурс роботи катода визначається швидкістю зміни його геометрії (подовження, викривлення і т. п.) в процесі експлуатації при високій температурі і циклах нагрівання-охолодження, що повторюються, що призводить до погіршення форми променя і необхідності заміни катода. Відповідно патентної інформації основну увагу приділяють конструкційним розробкам варіантів плоского катода, зберігаючи як матеріал полікристалічний вольфрам [2–5]. На практиці виявилось, що не тільки конструкція визначає експлуатаційні характеристики катода, але і властивості матеріалу, з якого він виготовлений. Однак, при застосуванні в якості матеріалів плоских катодів сплавів вольфраму (наприклад, монокристалічний сплав W–4 % Та [6]), та вольфраму, легованого добавками SiO₂, K₂O, Al₂O₃ [7], а також вольфраму з

покриттям То, Та, Ре [8] виявлено суттєве обмеження сфери їх застосування (покриття з РЗМ використовуються переважно для катодів непрямого нагріву). Тому пріоритетним матеріалом для термокатодів прямого розжарювання залишається вольфрам. На жаль, у літературі практично відсутні дані щодо високотемпературних досліджень комплексу структура–властивості–експлуатаційні характеристики катодів із чистого W.

При виготовленні катодів широко використовують два процеси — деформацію та рекристалізацію. Для покращення необхідних характеристик матеріалу важливо підібрати оптимальні режими впливу на нього. Вітчизняні W-катоди одержують із дроту в заводських умовах багатостадійно, чергуючи пресування та термічну обробку [3, 9]. Однак, і до цього дня необхідність удосконалення технологічних процесів отримання W-катодів для ЕПГ з позиції покращення за критерієм вартість/ефективність залишається важливою, актуальною і особливо загострилася в даний час в умовах імпорту заміщення та економії металів високої вартості.

Завданням даної роботи була розробка режимів термічної обробки (ТО) матеріалу вже отриманих W-катодів з метою поліпшення властивостей, необхідних для підвищення їхньої експлуатаційної довговічності.

Матеріали та методи дослідження. W-катоди, що поставляються для використання в ЕПГ, являють собою пластини товщиною 0,6 мм, ши-

Л.А. Крушинська — <https://orcid.org/0009-0000-6050-9130>, Я.А. Стельмах — <https://orcid.org/0000-0002-5238-2288>

риною 3 мм і довжиною 100...140 мм. Метод їх отримання — багатоступінчасте гаряче пресування заготовок з вольфрамового дроту чистотою 99,99, описаний в літературі [3, 9]. Сумарний ступінь деформації за оцінкою становить 60...65 %.

Католи для досліджень вибирали випадково з трьох партій катодів загальною кількістю 1000 шт, виготовлених ТОВ «Тангстен» (м. Харків) у 2023 р.

Для визначення початкової температури рекристалізації і вивчення динаміки її процесів проводили вакуумні відпали W-катодів, що поставляються, протягом 1 год при різних температурах в інтервалі 800...1200 °С, а також ізотермічні відпали у вакуумі при 1200 °С в інтервалі часу 20...120 хв.

Структурні зміни контролювали за допомогою оптичної (Polyvar Met) та растрової електронної мікроскопії (Cam Scan 4D). Для вивчення структурних змін у W-катадах було застосовано комп'ютерний аналіз зображень та обробки статистичних даних за допомогою комплексу комп'ютерних програм «Media cybernetics image analysis program» Image-Pro Plus version 6.0.

Механічні властивості оцінювали на підставі вимірювань мікротвердості за Віккерсом (HV), використовуючи приставку Micro Duomat 4000E до оптичного мікроскопа та методом автоматичного мікроіндентування (індентор Берковича) з автоматичним записом діаграми навантаження (впровадження індентора в матеріал) на приладі MicronGamma [10].

Експлуатаційні властивості визначали при проведенні випробувань у реальних умовах роботи катодів в ЕПГ типу ПЕ-123 на ЕПУ типу УЕ-202 та УЕ-210 [2]. Катод встановлювали у катодну головку ЕПГ, попередньо здійснювали контроль натягу пружини, яка розтягує катод. Як випарований матеріал використовували таблетку вольфраму діаметром 70 мм, поміщену у водоохолоджуваний тигель. Під час експлуатації на катод, крім постійних механічних, діють багаторазові циклічні температурні навантаження. Цикл випробувань моделював температурний профіль роботи катода і складався з наступних етапів: нагрівання катода та вихід на робочий режим (струм пучка близько 1,3 А, діаметр пучка електронів 60 мм) протягом 1 хв, робота в цьому режимі протягом 30 хв, вимкнення та охолодження катода — 10 хв. Цикли випробувань тривали до порушення геометрії електронного променя (вихід плями променя за межі тигля при робочому режимі), після чого фіксувався загальний час роботи катода на робочому режимі.

Результати та їх обговорення. Мікроструктура катодів у стані поставки полікристалічна і волокниста (рис. 1, а). Слід зазначити, що в обох перерізах, зроблених у поперечному та поздовж-

ньому напрямках катода, структура рівномірна, морфологія її однакова і являє собою зерна подовженої форми, середня ширина 3...5 мкм, довжина 40...100 мкм, окремі зерна досягають довжини 200 мкм. Анізотропії механічних властивостей також не виявлено, отримані значення мікротвердості 5,4...5,6 ГПа характерні для обох напрямків.

Однією з важливих характеристик, що визначають поведінку металу в процесі ТО, є температура початку рекристалізації, що істотно впливає на зміну фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів. Як встановив А.А. Бочвар, температура початку рекристалізації (TR) пов'язана з абсолютною температурою плавлення співвідношенням: $TR = 0,4T_{пл}$ ($T_{пл} W = 3680$ К). Відомі діаграми рекристалізації [11] також дозволяють заздалегідь оцінити TR залежно від величини попередньої деформації. Температура початку первинної рекристалізації згідно з літературними даними для нелегованого вольфраму лежить в інтервалі $TR = 1373...1573$ К (1100...1300 °С) [12, 13].

Однак TR залежить від багатьох параметрів, що визначають більш точно її значення [14]. Три фактори: ступінь попередньої деформації, температура нагрівання (T) і тривалість витримки (τ) найбільш сильно впливають на процес рекристалізації і визначають кінцеву величину зерна та механічні властивості матеріалу. При фіксованому ступені деформації (умови виробництва незмінні) залишаються ще 2 фактори, що вимагають уточнення TR для досліджуваних W-катодів — T і τ .

Проведений аналіз залежності мікротвердості W-катодів від температури вакуумного відпалу (T) у вибраному інтервалі температур 800...1200 °С при фіксованій витримці ($\tau = 1$ год) показав, що значення мікротвердості не змінюються аж до 1000 °С (рис. 2), і лише при досягненні температури 1100 °С мікротвердість незначно (на 3...4 %) знижується. До 1100 °С при вибраних методах досліджень будь-яких видимих змін мікроструктури не виявлено. Помітні зміни мікроструктури відбуваються у разі зростання температури до 1200 °С. На тлі вихідної структури формуються нові рівноосні зерна (рис. 1), що супроводжується зниженням мікротвердості на 10 % проти початкової (рис. 2). Вочевидь, що у нашому випадку підвищення температури відпалу W-катодів до 1200 °С та витримка впродовж 1 год активно стимулюють початок процесу первинної рекристалізації. Подальші докладніші дослідження кінетики цього процесу проводили при температурі 1200 °С.

Виявлено, що після ізотермічних відпалів у всьому досліджуваному часовому інтервалі ($\tau = 20...120$ хв) формується двофазна мікрострук-

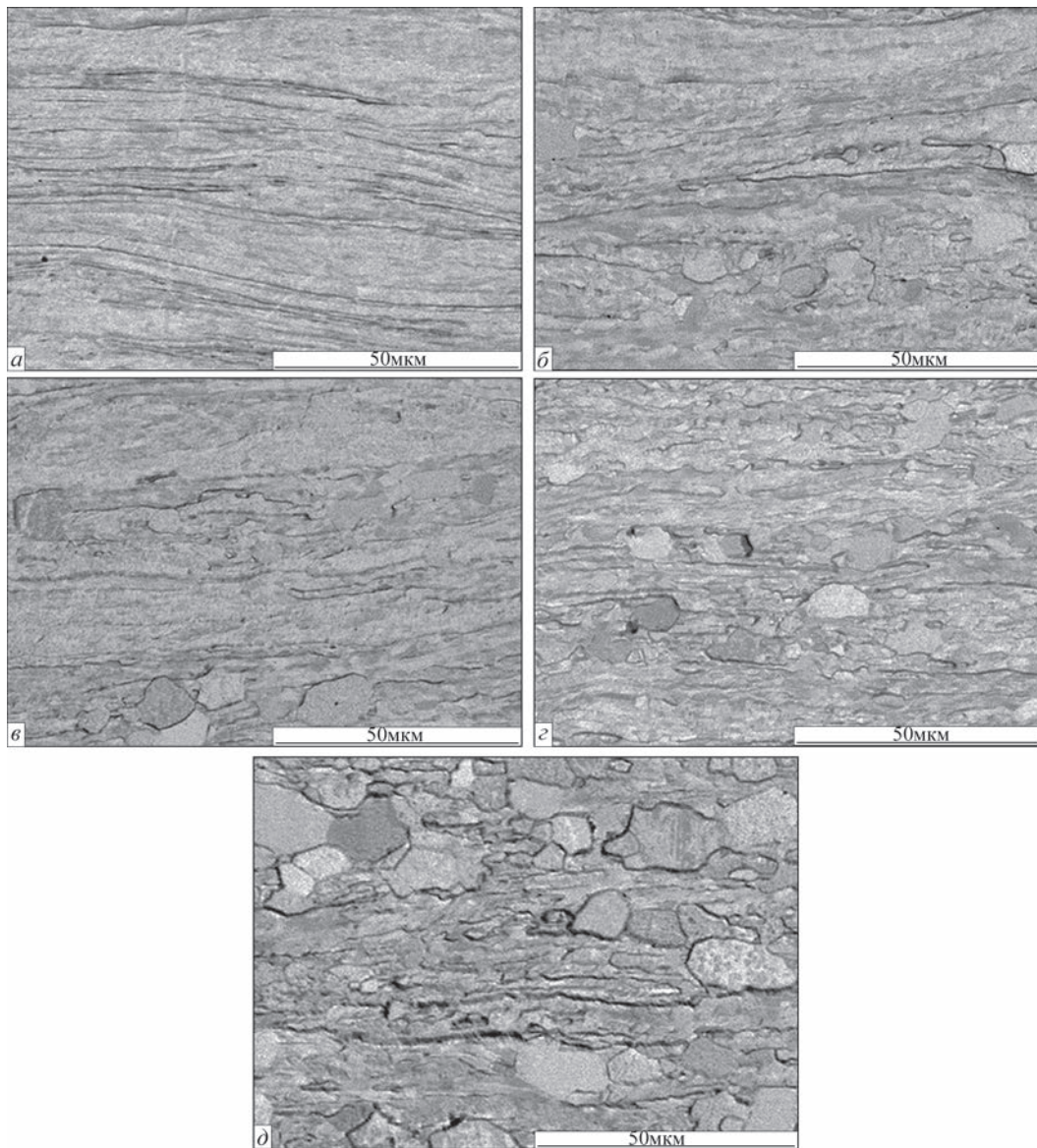


Рис. 1. Структура W-катодів: *a* — у стані поставки; *б-г* — після вакуумних відпалів при температурі 1200 °С і часу відпалу 30, 50, 80 та 120 хв відповідно

тура, що є сумішшю вихідних подовжених і рівноосних рекристалізованих зерен (рис. 1).

Оскільки присутні в структурі рекристалізовані зерна мають широкий розкид за розміром (наприклад, від 2 до 21 мкм при $\tau = 90$ хв), величина середнього розміру зерна може спотворювати інформацію про процеси, що відбуваються. В результаті виконаної комп'ютерної обробки зображень мікроструктури та статистичного аналізу були побудовані криві частотного розподілу зерен за розмірами для W-катодів, відпалених протягом різних τ при температурі 1200 °С. По кривим розподілу було визначено максимально ймовірний розмір зерна d кожного з досліджуваних τ , результати наведено на рис. 3 (крива 1). Зміна об'ємної частки рекристалізованої фази V зі збільшенням часу витримки показано на рис. 3 (крива 2).

Наведені залежності фіксують, що для W, що пройшов деформаційну обробку як у нашому випадку, вже після 20 хв ізотермічної витримки виявлено дрібні рівноосні зерна розміром 1 мкм. Об'єм рекристалізованої фази 5 %.

У міру збільшення тривалості ізотермічного відпалу (τ) розмір зерна d та їх об'ємна частка у матеріалі катода зростають синхронно (рис. 3,

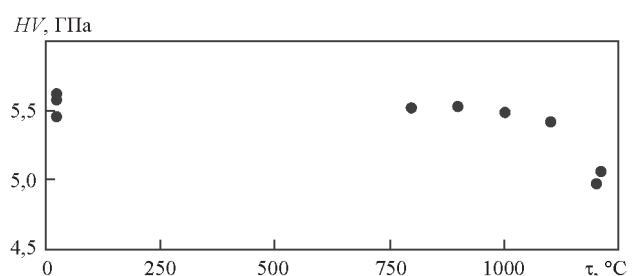


Рис. 2. Залежність мікротвердості вольфрамових катодів від температури вакуумного відпалу ($\tau = 60$ хв)

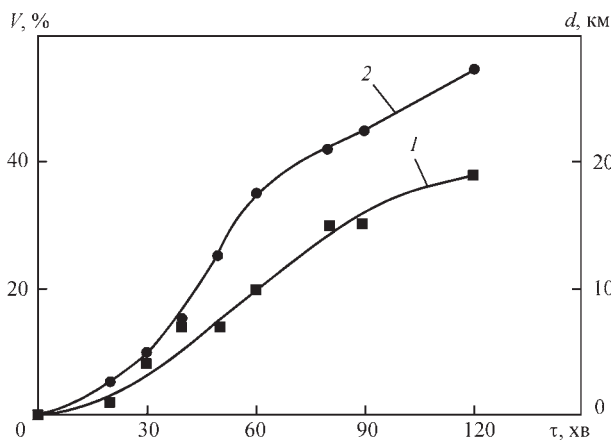


Рис. 3. Вплив часу відпалу (τ) на розмір рекристалізованих зерен d (1) та їх об'ємну частку V (2)

криві 1, 2). При цьому процеси протікають активно в інтервалі τ від 20 до 60 хв, при $\tau > 60$ хв спостерігається їх уповільнення.

Слід зазначити, що зі збільшенням τ частина зерен укрупнюється, але з'являються і нові. Отже, зафіксовані нами структури в усьому часовому інтервалі відпалів (рис. 1) формуються у результаті накладання двох паралельних процесів — сумісно із зростанням вже створених зерен іде процес утворення нових дрібних зерен. Таким чином, навіть при максимальному $\tau = 120$ хв первинна рекристалізація не є повною, обсяг рекристалізованої фази в цьому випадку не перевищує 60 %. На основі отриманих даних структури в поздовжньому та поперечному перерізах можна вважати, що часткова рекристалізація проходить рівномірно по всьому об'єму матеріалу катода.

Структурні зміни корелюють із зміною механічних властивостей W-катодів. При збільшенні τ відбувається монотонне зниження мікротвердості HV від 5,5 ГПа у вихідному стані до 4,7...4,9 ГПа ($\tau = 120$ хв) (рис. 4). Це відповідає відомому факту, що процеси первинної рекристалізації супроводжуються зниженням внутрішнього напруження і міцності матеріалу, однак, враховуючи факт неповної рекристалізації та об'єму, що нею займається, результуюче зниження мікротвердості матеріалу катода не перевищує 13 %.

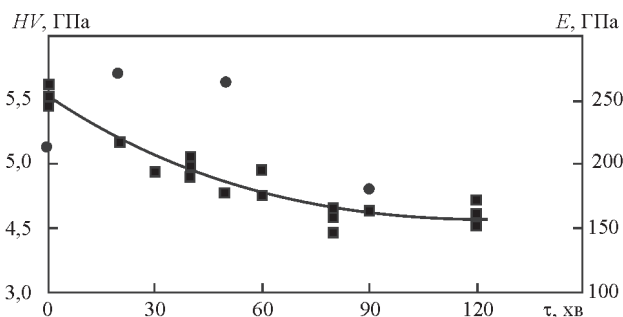


Рис. 4. Вплив часу відпалу (τ) на механічні властивості W-катодів: лінія — мікротвердість; точки — модуль пружності

Ключовим фактором, що забезпечує міцність об'єкта, а також мірою пружності матеріалу, з якого він виготовлений, є модуль Юнга (E). У роботі E розраховували за отриманими діаграмами навантаження, витримки та розвантаження в координатах навантаження — глибина проникнення індентора за методикою, описаною в ряді робіт [10, 15]. Результуюче середнє значення E для кожного з τ взято з розрахунків не менше 10 вимірювань. На рис. 4 показані зміни модуля пружності W-катодів в залежності від часу відпалу при незмінній температурі 1200 °С.

Середнє значення модуля пружності W-катодів у вихідному стані становить 213 ГПа. Різниця у значеннях E , отриманих на перерізах катодів у поздовжньому та поперечному напрямках незначна, у межах помилки приладу.

Зі збільшенням часу витримки при відпалі E змінюється немонотонно, після збільшення до максимального значення 263...270 ГПа у часовому інтервалі τ від 20 до 50 хв відбувається помітне його зниження і після 90 хв витримки значення модуля пружності відпалених вольфрамових катодів нижче вихідного.

Усі отримані значення E лежать у межах 180...270 ГПа. Це менше, ніж значення модуля пружності для масивного монокристалічного зразка вольфраму E_0 , згідно з довідковими даними E_0 400...411 ГПа [13], та експериментально отриманого значення $E_0 = 355$ ГПа для полікристалічного W [16]. Однак вище, ніж значення модуля пружності 100 ± 30 ГПа, яке на основі експериментальних даних автори роботи [17] визначили для наноструктурного вольфраму. Простежується загальна тенденція до зменшення модуля пружності із зменшенням розміру зерна та відповідним збільшенням міжкристалічних границь. У нашому випадку дослідним шляхом встановлена кореляція модуля пружності з розміром і кількістю рекристалізованої фази і виявлена область максимальних значень E , яка відповідає наявності в структурі W-катодів 5...25 % рекристалізованих зерен розміром 1...8 мкм.

При вирішенні питання щодо застосування матеріалів доводиться враховувати, як завжди, кілька параметрів. У процесі експлуатації катод зазнає не тільки температурних навантажень, а й механічних — постійного розтягування, обумовленого конструкцією ЕПГ.

Однією з причин скорочення ресурсу роботи W-катодів, що поставляються, є їх розтягування в процесі експлуатації аж до провисання. Хоча опір деформації повзучості є визначальною властивістю тугоплавких матеріалів, зменшення швидко-

сті повзучості є одним із завдань, спрямованих на поліпшення робочих характеристик катодів.

При проведенні додаткового експерименту для порівняння з вихідним був обраний катод з максимальною жорсткістю з області з високим E , що пройшов ТО за режимом $T = 1200\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 30\text{ хв}$. Випробування обох зразків проводили в подібних умовах: при високій температурі (робоча температура катода прямого розжарення $2200\dots 2300\text{ }^\circ\text{C}$ ($0,7T_{\text{пл}}$)) та під впливом постійного напруження розтягуванням σ оціночною величиною $35,4\text{ МПа}$, час роботи в такому режимі 10 хв (помічено, що у разі суттєвого подовження катода це відбувається у перші $10\dots 20\text{ хв}$ роботи). Результати вимірювань показали, що величина деформації $\Delta l/l$ вихідного та термообробленого катодів складала відповідно $0,9$ та $0,7\%$. Таким чином, проведення ТО катодів призводить до зниження швидкості повзучості.

Процес повзучості в нашому випадку пов'язаний з дією цілого ряду різних фізичних факторів: напруження, що розтягують; висока температура, при цьому нагрівання катода характеризується великою швидкістю і досить швидким виходом на стаціонарний режим експлуатації; наявність осьового градієнта температури, наслідком чого є зона вторинної рекристалізації ($TBP\ 2000\dots 2100\text{ }^\circ\text{C}$) в активній центральній області катода і можливий розвиток напружень, що стискають через те, що інтенсивному розширенню металу в цій області перешкоджають холодні кінці катода. Питання механізму повзучості складне, вимагає додаткових досліджень і теоретичного аналізу, і не входило у завдання даної роботи, але з-за великого практичного інтересу дослідження у цьому напрямі буде продовжено.

Імовірно, якщо спиратися на дані карти механізмів деформації при повзучості вольфраму [18] і враховуючи наші значення двох основних параметрів, робочу температуру та напруження σ , то фізичний механізм повзучості має переважно дислокаційну природу. Як відомо, швидкість цього процесу чутлива до структурних характеристик — розміру та форми зерна. Очевидно наявність рекристалізованих зерен розміром 4 мкм у кількості 10% створила додаткові межі у напрямі, перпендикулярному навантаженню, і цим трохи знизилася швидкість повзучості.

Експериментальне вивчення всього комплексу процесів, що відбуваються в катодному вузлі (включаючи ерозію матеріалу катода в результаті іонного бомбардування) достатньо складно, можливий лише непрямий вимір фізичних величин, що визначають перебіг процесів усередині катода. Остаточна відповідь на питання про доцільність застосування термообробки для W-катодів дає

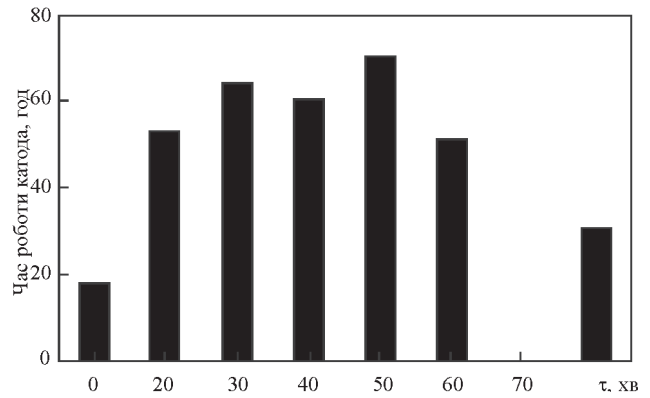


Рис. 5. Експлуатаційна довговічність W-катодів у вихідному стані та в залежності від часу відпалу у вакуумі

лише перевірка їх експлуатаційних властивостей у реальних умовах роботи на ЕПУ.

Результати експлуатаційної довговічності катодів у вихідному стані, а також катодів, що пройшли ТО за різних режимів, представлені на рис. 5. У стані поставки експлуатаційна довговічність катодів коливається від 10 до 18 год (випробувано 8 катодів), після вакуумних відпалів ($T = 1200\text{ }^\circ\text{C}$) на протязі τ від 20 до 60 хв досягає максимальних $50\dots 60$ год. Це збігається з областю максимальних значень E (рис. 5) на тлі незначного розміщення (рис. 4) за рахунок зниження внутрішнього напруження при початкових стадіях процесу первинної рекристалізації (рис. 3). Подальше збільшення часу відпалу призводить до зниження експлуатаційних характеристик, отже не доцільно.

Таким чином, на основі аналізу результатів проведених комплексних досліджень з метою поліпшення експлуатаційних властивостей W-катодів був обраний оптимальний режим ТО ($T = 1200\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 20\dots 50\text{ хв}$, захисне середовище — вакуум). Така ТО призводить до наявності змішаної двофазної структури — рекристалізованої та нерекристалізованої фаз. Наявність рекристалізованої фази у кількості $5\dots 25\%$ і розміром $1\dots 8\text{ мкм}$ забезпечує необхідний для надійної експлуатації катодів рівень механічних властивостей: мікротвердість — $5,0 \pm 0,15\text{ ГПа}$, модуль пружності $260\dots 270\text{ ГПа}$.

Висновки

1. Встановлено, що для поліпшення якості плоских W-катодів, отриманих пресуванням з вольфрамового дроту, в них має бути сформована змішана структура в наступному кількісному співвідношенні: до $5\dots 25\%$ — рівноосні рекристалізовані зерна, а решта обсягу матеріалу катода повинна зберігати нерекристалізовану структуру.

2. Показано, що такий стан W-катодів досягається після проведення ТО: рекомендований вакуумний відпал при $1200\text{ }^\circ\text{C}$, час — $20\dots 50\text{ хв}$.

3. Експлуатаційна довговічність термооброблених за таким режимом катодів досягає 50...60 год (в 3...5 разів вище у порівнянні з катодами без ТО) і відповідає рівню довговічності катодів зарубіжного виробництва, вартість яких в декілька разів вище.

Список літератури/References

1. Zuev, I.V. (1998) *Processing of materials with concentrated energy flows*. Moscow, Izd-vo MEI [in Russian].
2. Movchan, B.A., Yakovchuk, K.Yu. (2004) Electron beam installations for evaporation and deposition of inorganic materials and coatings. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 10–15 [in Russian].
3. Shapoval, A.A. (2011) Using highly processes in deformation trial tungsten ribbon. *Visnyk Kremenchuk National University*, Pt 1, **67(2)**, 65–67 [in Russian].
4. Yakovchuk, K.Yu., Barskov, V.O., Klimenko, I.G. et al. (2018) *Electron-beam projector with linear thermionic cathode*. Pat. 113607, Ukraine, Int. Cl. H01J37/06 H01J37/065 [in Ukrainian].
5. Movchan, B.O. (1994) *Linear thermionic cathode electron gun*. Pat. 21440, Ukraine, Int. Cl. H01J29/46 H01J29/48 [in Ukrainian].
6. Yaskolko, A.A. (2010) *Methods and results of studying materials of cathode of powerful X-ray tubes*. Syn. of Thesis for Ph. D. Dissertation. Moscow, A.A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science [in Russian].
7. Taubin, M.L., Platonov, V.F., Yaskolko, A.A. (2009) Medical X-ray tube cathodes. *Med. Tekhnika*, **253(1)**, 44–47 [in Russian].
8. Shi Lei, L., Jun Yan, G., Yun Fei, Y. et al. (2020) A review on recent progress of thermionic cathode. *Tungsten*, **2**, 289–300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42864-020-00059-1>
9. Dragobetskiy V.V., Shapoval O.O., Shchepetov V.V. et al. (2017) *Controlled effects of plastic deformation of blanks for metallurgy and transport: monograph*. Monograph. Kharkiv, Madrid Printing House.
10. Ignatovich, S.R., Zakiev, I.M. (2011) Universal micro/nano-indentometer “MicronGamma”. *Zavodskaya Laboratoriya*, **77(1)**, 61–67 [in Russian].
11. Golovin, S.A., Krystal, M.A., Legner, M.N., Rabinovich, E.M. (1968) Recrystallization diagram of tungsten powder. *Physics and Chemistry of Metal Processing*, **5**, 168–172 [in Russian].
12. Savitsky, E.M., Povarova, K.B., Makarov, P.V. (1978) *Metalurgy of tungsten*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
13. Lassner, E., Schubert, W.D. (1999) *Tungsten: Properties, chemistry, technology of the element. Alloys and chemical compounds*. Berlin, Springer-Verlag.
14. Humphreys, F.J., Hatherly, M. (2004) *Recrystallization and related annealing phenomena*. Elsevier.
15. Oliver, W.C., Pharr, G.M. (2004) Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *J. of Materials Research*, **19(1)**, 3–20.
16. Grigoriev, I.S., Meilikhov, E.Z. (1991) *Physical Quantities: Handbook*. Moscow, Energoatom.
17. Pugachevsky, M.A. (2010) Determination of the elastic modulus of tungsten nanowires. *Letters to the J. of Technical Physics*, **36(14)**, 7–12 [in Russian].
18. Frost, G.J., Ashby, M.F. (1989) *Maps of deformation mechanisms*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE, PROPERTIES AND LIFE OF FLAT TUNGSTEN CATHODES

L.A. Krushynska¹, Ya.A. Stelmakh¹, R.A. Tkach², O.O. Yukalchuk², A.A. Dudnik³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: lkrushynska@gmail.com

²State-run Company «International Center for Electron Beam Technologies of E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine».

68 Antonovicha Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: tkachroman@gmail.com

³LLD «TANGSTEN». 19a Dniprovska Naberezhna, of. 33, 02081, Kyiv, Ukraine. E-mail: tungsten.kom@gmail.com

The effect of heat treatment on the structure and properties of flat tungsten thermionic cathodes (W-cathodes) produced by hot pressing (flattening) of blanks from 99.99 % pure tungsten wire was investigated. The influence of temperature (800...1200 °C) and vacuum annealing time (0.3...2.0 h) on the formation of a recrystallization structure in W-cathodes was studied; comprehensive comparative studies of the structure, mechanical and operational properties were carried out. It was found that to increase the service life of W cathodes, a mixed structure should be formed in them in the following quantitative ratio: 5...25 % — equiaxed recrystallized grains 1...8 μm in size; the remaining volume of the cathode material should preserve the original oriented structure. 18 Ref., 5 Fig.

Keywords: thermionic cathodes, tungsten, electron beam installations, recrystallization, microstructure

Отримано 15.01.2025

Отримано у переглянутому вигляді 02.02.2025

Прийнято 25.02.2025

**СУЧАСНА
ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ**

Передплата доступна
у друкованому
та цифровому форматах!
ПІДПИШІТЬСЯ СЬОГОДНІ

Тел.: (38044) 205-23-90; E-mail: journal@paton.kiev.ua; patonpublishinghouse@gmail.com;

<https://patonpublishinghouse.com>