

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ РІЗКИ НА УТВОРЕННЯ ПОШКОДЖЕНОГО ШАРУ ПРИ ОБРОБЦІ МОНОКРИСТАЛІВ ВОЛЬФРАМУ

Ю.О. Никитенко, В.О. Шаповалов, В.В. Якуша, О.М. Гніздило, Д.М. Жиров

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: nikyu80@gmail.com

Новий різновид електроерозійної різки без занурення деталі, що обробляється, відрізняється більш економічною собівартістю, спрощеною системою обслуговування і безпечністю. Також у якості ріжучого інструменту, замість одноразового латунного дроту, використовують молібденовий із багаторазовою реверсивною подачею. У цьому дослідженні наведені результати експериментів з обробки монокристалів вольфраму при варіації технологічних режимів електроерозійної різки. Встановлено залежності впливу тривалості імпульсів електричного розряду і паузи між ними на морфологію поверхні, глибину утворення міжплощинних тріщин та швидкість різання. Як інструмент і робочий матеріал в досліджах використовували молібденовий дріт діаметром 0,18 мм і монокристал вольфраму товщиною 15 мм. Бібліогр. 7, табл. 3, рис. 11.

Ключові слова: монокристал, вольфрам, електроерозійна різка, пошкоджений шар, міжплощинні тріщини

Вступ. Унікальні властивості монокристалів, що обумовлені структурною досконалістю та анізотропією кристалічної ґратки, відіграють істотну роль у забезпеченні необхідних параметрів та довговічності виробів, що з них виготовляються. Тому питання оброблення монокристалічних виробів є актуальним як для напівпровідникових, так і металевих матеріалів, оскільки невіддалений ушкоджений поверхневий шар повністю нівелює унікальні властивості, що притаманні монокристалічній структурі [1]. Внаслідок високих термомеханічних навантажень, що мають місце при механічному обробленні, утворюється дефектний шар із високою концентрацією дислокацій. Поверхневий шар з порушеною структурою — один з найбільш поширених типів дефектів при виготовленні виробів із монокристалів, оскільки виготовлення твердотільних елементів пов'язано з певним комплексом необхідних операцій оброблення поверхні, як то різання, шліфування, полірування, так і наступного більш тонкого фінішного оброблення для забезпечення заданих характеристик виробу. Це питання особливо актуально для загального дослідження властивостей монокристала у сенсі дослідження глибини пошкодженого шару, його впливу на наступні етапи обробки з метою уникнення його розвитку та вивчення внутрішньої (справжньої, неспотвореної) кристалічної будови [2].

Визначення товщини порушеного поверхневого шару монокристалів, тобто після різання, шліфування та хіміко-механічного полірування, доз-

воляє оптимізувати режими механічної обробки кристалів.

Оскільки монокристал вольфраму є досить твердим матеріалом, його механічна обробка різальним інструментом досить проблематична як для інструмента, так і для самого кристала. Характерні параметри ушкодженого поверхневого шару в значній мірі визначають ступінь структурної досконалісті самого монокристала. Значення цієї величини може залежати не тільки від способу обробки монокристалів, але й від напрямків силового впливу на оброблюваний кристал, що має задану кристалографічну орієнтацію.

Тому для первинної обробки монокристалів тугоплавких металів (для виключення жорсткого механічного оброблення) часто застосовують електроерозійне (електроіскрове) різання. Електроерозійна обробка — це контрольоване руйнування струмопровідного матеріалу під дією електричних розрядів між електродом і деталлю. Розряди проходять у імпульсному режимі для того, щоб міжелектродний простір встиг відновити свій електричний опір.

Після електроерозійної обробки, особливо монокристалів вольфраму, на поверхні металу утворюється полікристалічний шар із аксіальною текстурою. Тонка структура цього шару, а також механізм її утворення, тісно пов'язані з анізотропією властивостей металів у монокристалічному стані.

Найпоширенішим методом електроіскрової різки Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) є спосіб різання зразків, що повністю занурені

Ю.О. Никитенко — <https://orcid.org/0000-0002-3603-2333>, В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3089>,
В.В. Якуша — <https://orcid.org/0000-0001-5962-9194>, О.М. Гніздило — <http://orcid.org/0000-0001-7537-6481>,
Д.М. Жиров — <https://orcid.org/0000-0002-9435-8075>

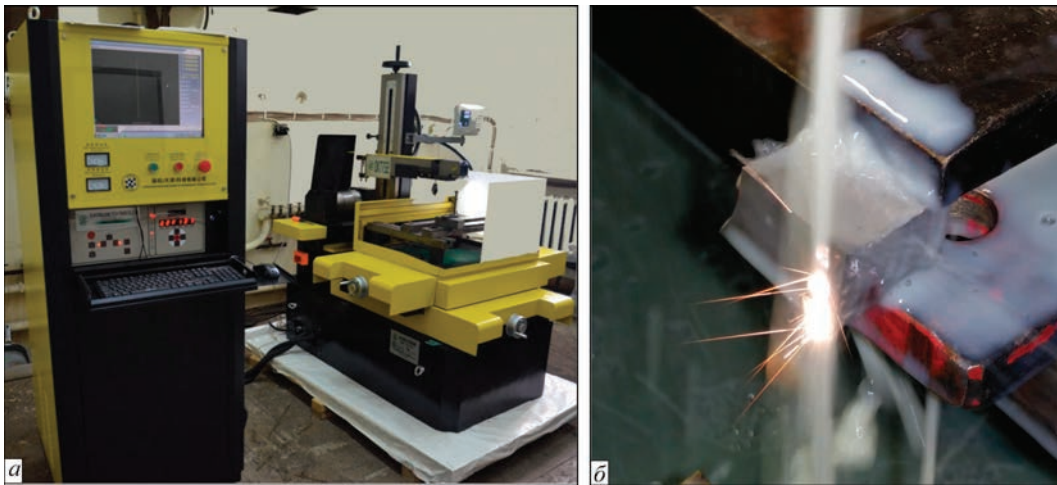


Рис. 1. Зовнішній вигляд верстата для електроерозійного різання DK7732 (а) і фото процесу різання зразка монокристалу вольфраму (б)

в робочій рідині (керосин або вода). У якості ріжучого інструмента використовується латунний дріт і в цьому напрямку проведено багато досліджень [3–5]. Розвиток технологій електроіскрового різання дозволив створити нові варіанти цього процесу. Замість одноразового латунного дроту використовується молібденовий діаметром 0,18 мм, що має реверсивну подачу, тобто за рахунок намотування та змотування на барабан дріт заданої довжини приймає участь у різанні багато разів. Різання відбувається без занурення, а з подачею змащувально-охолоджувальної рідини (ЗОР) на водній основі зверху та знизу зразка, при цьому дріт, здійснюючи реверсивний рух, захоплює своєю поверхнею певну кількість ЗОР і транспортує її до місця електроіскрового проміжку.

Тому виконане дослідження впливу технологічних параметрів WEDM-способу електроерозійної різки на властивості пошкодженого шару монокристалів вольфраму є важливою науково-практичною задачею, що має актуальне прикладне значення для більш широкого їх застосування в техніці.

Технологічне обладнання, методика проведення експериментів і матеріали. Електроерозійний дрово-вирізний верстат DK7732 (TOSUN) з ЧПК призначений для обробки будь-яких струмопровідних матеріалів, у тому числі металокерамічних сплавів, кольорових металів та інших важкооброблюваних матеріалів, що дозволяє отримувати складні фасонні зовнішні та внутрішні

поверхні із них (рис. 1, а). Верстат серії DK77 є станками струминного типу, де оброблення здійснюється не у ванні з рідиною, а на робочому столі, де ЗОР подається безпосередньо в зону обробки знизу та зверху (рис. 1, б).

Основні технічні характеристики електроерозійного обладнання наведені нижче.

Технічні характеристики верстата DK7732

Тип рідини охолодження	Вода з додаванням емульсії JR3 (A, B, C, D, H, G)
Тип електрода	Молібденовий дріт багаторазового використання
Габаритні розміри робочого столу, мм	Не менше 620×450
Хід робочого столу (X, Y)	Не менше 450×350
Максимальна вага деталі, що встановлюється на робочий стіл, кг	До 600
Максимальна висота деталі, яку можливо обробляти, мм	До 300
Діаметр дроту, що можливо використовувати, мм	0,04...0,22
Точність обробки деталі, мм	Не більше 0,010
Точність повторювального позиціонування осей X, Y, мкм	Не більше ± 1
Встановлена потужність, кВт	Не більше 3

Згідно інструкції користування станок має чотири основні групи змінних параметрів оброблення, що впливають на показники процесу різання: тривалість імпульсу (значення — 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F); інтервал імпульсу (значення — 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F); стеження критичного проміжку між електродами (значення — 0, 1, 2,

Таблиця 1. Показники для розрахунку параметрів різання

Показник	K	0	1	2	3	4	5	6	7
Значення тривалості імпульсу	мс	1	2	4	6	9	12	16	20
Показник	K	8	9	A	B	C	D	E	F
Значення тривалості імпульсу	мс	24	28	32	40	48	56	64	72

3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, А, В, С, D, E, F); рівень посилювача імпульсу (значення — 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, А).

Задля проведення чистого експерименту проводили вивчення тільки таких характеристик струму як тривалість імпульсу та інтервалу між ними. Параметри стеження та підсилення у всіх експериментах були не змінними і мали значення 1 та 6 відповідно.

Значення тривалості імпульсу (у мікросекундах) в залежності від показника K налаштування наведені в табл. 1. Значення інтервалу між імпульсами розраховується як $4 + 0,25K$ (де K — тривалість імпульсу відповідно показника з табл. 1).

Результати експериментів та їх аналіз. Проблема механічної обробки монокристалів дуже актуальна як при виготовленні виробів, так і виготовленні зародкових кристалів. Утворення глибоких шпарин між площинами може привести до утворення паразитних зерен з відмінною орієнтацією.

Наприклад для отримання кристала у вигляді тіла обертання за допомогою механічного оброблення відрізається зародковий кристал з великого плоского кристала, який вирощено з орієнтацією бічної грані у площині (100) (рис. 2, *а*). Зародковому кристалу надається форма круга і відокремлюються усі лишні елементи (рис. 2, *б*, *в*). У результаті жорстких умов

обробки може утворюватися сітка тріщин, що відповідає кристалічній орієнтації зливка. На рис. 3 наведено приклад утворення тріщин на боковій та нижній поверхні. Наявність паралельних і прямокутних тріщин відповідає міжплощинним утворенням для орієнтацій (100, 010, 001).

При застосуванні електроіскрової різки значно полегшується процес вирізання зародкового кристала та усувається потреба у додатковій обробці бічної поверхні. Зародковий кристал має задану ідеальну циліндричну форму діаметром 85 мм (рис. 4). Бічна поверхня хоч і має пошкоджений дефектний шар, але він значно менший, і при технологічному процесі плазово-індукційного вирощування поверхневе оплавлення на мінімальній швидкості обертання зразка забезпечує відновлення монокристалічної структури.

При розгляді поверхня розрізу має шорстку поверхню з дефектним шаром не більше 0,2...0,3 мм, що пов'язано з особливостями електроіскрової різки (рис. 5). При різанні в глибину основного металу направляються електричні розряди, що утворюють дефектний шар. Дефекти проявляються як викривлення матеріалу з поверхні у вигляді однаково направлених геометричних фігур. Після травлен-

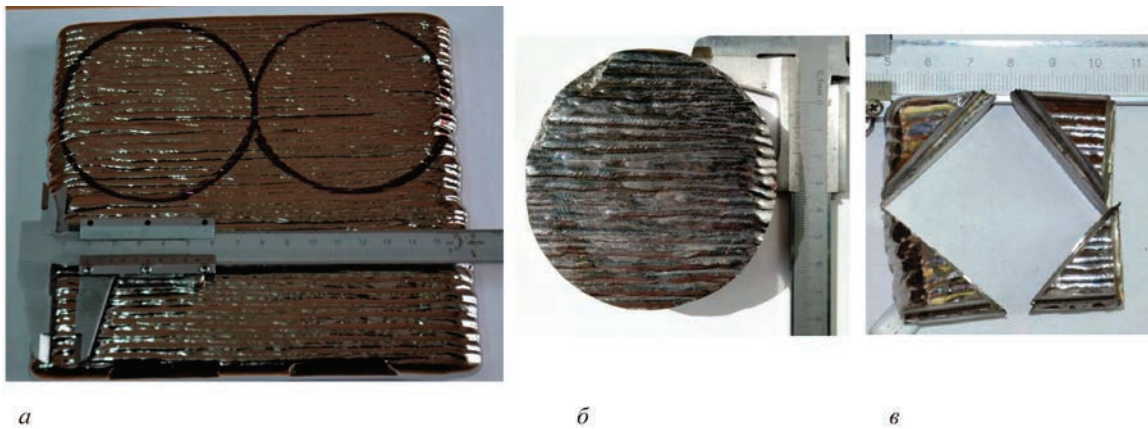


Рис. 2. Етапи виготовлення зародкового монокристала для вирощування зливка вольфраму у вигляді тіла обертання: великий плоский монокристал $170 \times 160 \times 25$ мм (*а*), круглий зародковий кристал діаметром 85 мм (*б*) і кутові сегменти, що залишились після обробки (*в*)

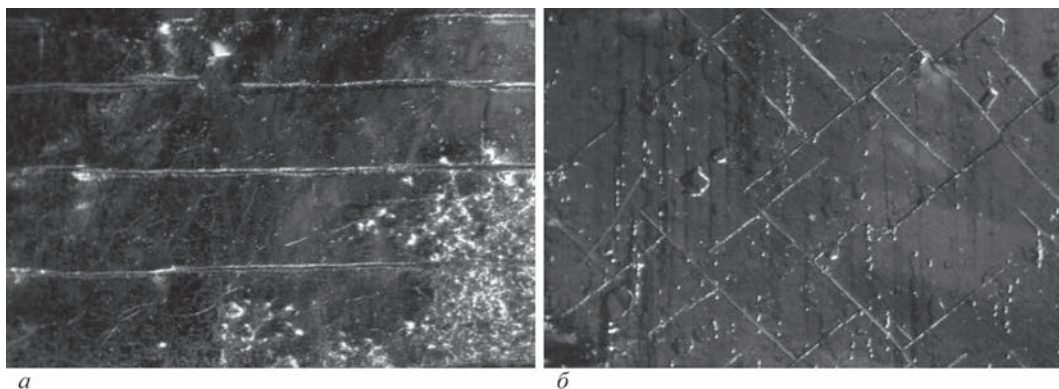


Рис. 3. Сітка тріщин на боковій (*а*) і нижній поверхні (*б*) зародкового кристала після абразивної обробки

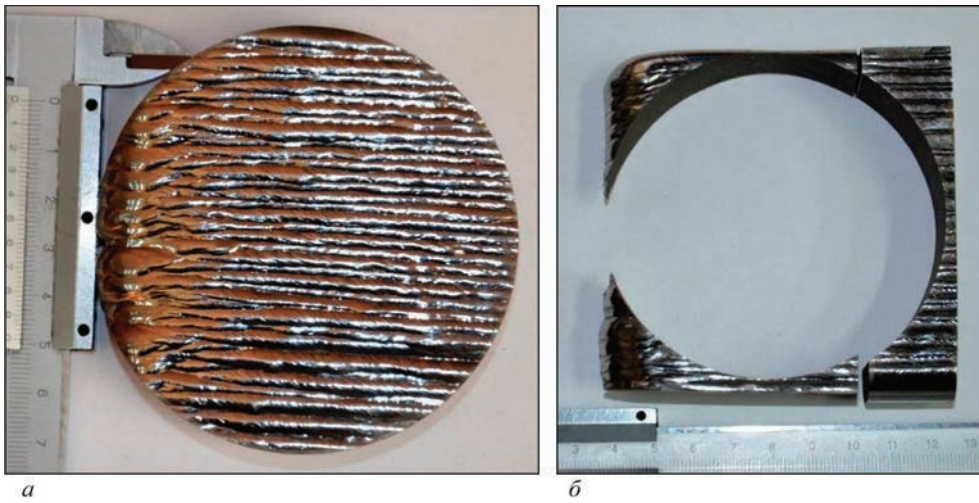


Рис. 4. Загальний вигляд зародкового кристала (а) та залишки після електроіскрової різки (б)

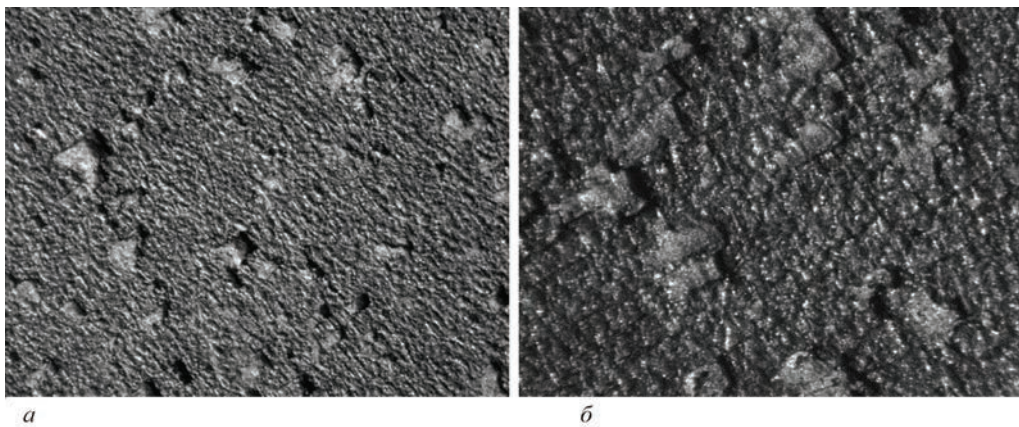


Рис. 5. Вигляд вертикальної площини розрізу зразків після електроіскрової різки при збільшенні: а — $\times 50$; б — $\times 88$

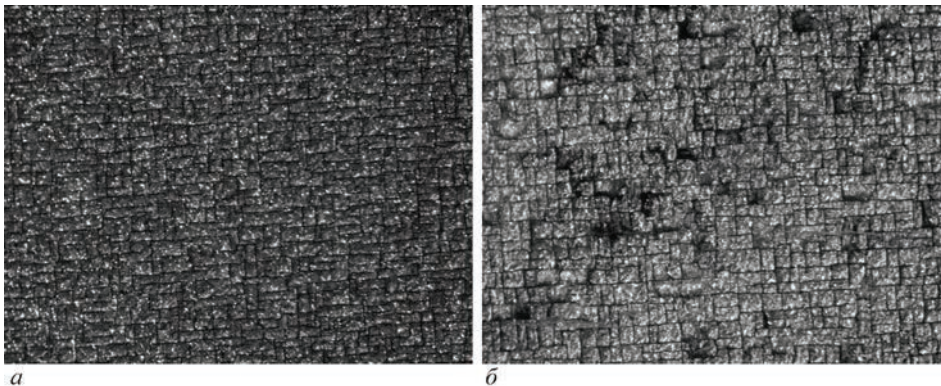


Рис. 6. Утворення сітки тріщин на поверхні зразка після електроіскрової різки, що проявляється після травлення хімічними реагентами: а — горизонтальна; б — вертикальна площина

ня хімічними реагентами проявляється сітка паралельних тріщин (рис. 6). Одне направлення граней дефектів прямокутників свідчить про збереження загальної орієнтації монокристалічної структури. Накопичуванні напруження під час обробки можуть призвести не тільки до утворення сітки тріщин, але і до відколів фрагментів з поверхні. У якості хімічного реактиву для травлення і виявлення дефектів структури застосовували розчин плавико-

вої (HF) та азотної (HNO₃) кислот у співвідношенні 1:1, час травлення складав 5 хв.

Для виготовлення зародкового кристала застосовували досить жорсткий режим оброблення (AA18), що забезпечував максимальну продуктивність різання.

Але при подальших дослідженнях, особливо при виготовленні зразків для металографічних досліджень, постає питання — яка ж насправді



Рис. 7. Кристал вольфраму, вирощений у вигляді циліндричного порожнистого тіла діаметром 85 та 68 мм (а), і його відокремлена верхня частина, розрізана на дрібні зразки (б)

глибина пошкодженого шару і який необхідно видалити, щоб проводити дослідження справжньої непошкодженої структури.

У якості матеріалу для досліджень було обрано зразки, що були відокремлені від кристала у вигляді циліндричного порожнистого тіла діаметром 85 мм (рис. 7) [7]. Експерименти проводили при різці одного зі зразків на різних режимах на горизонтальній площині злитка (рис. 8), висота різку склала 15 мм. На рис. 9 наведені збільшені фотографії отриманого рельєфу поверхні, що утворився при різних режимах різання (табл. 2). Для більш об'ємного і наглядного сприйняття рельєфу фото робили при різних кутах освітлення.

Для визначення глибини пошкодженого шару на перпендикулярній площині до ділянки різання було виконано шліфування поверхні. Проведено дослідження глибини утворених проникаючих тріщин у глиб метала безпосередньо після шліфування і після травлення хімічними реагентами (рис. 10).

Результати проведених досліджень наведені у табл. 3. Проаналізувавши вплив тривалості ім-

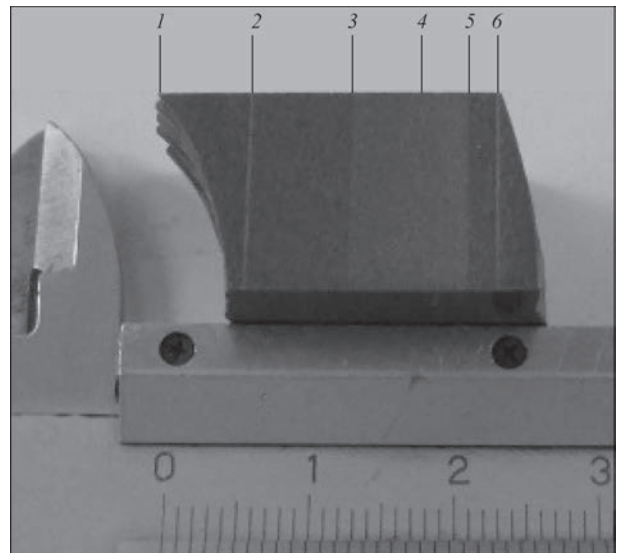


Рис. 8. Зовнішній вигляд дослідного зразка вольфраму з позначеними зонами різних режимів різання

пульсу та паузи, можна зробити наступні висновки: при обробці на режимах з незмінною тривалістю імпульсів (режими 1, 5, 6) показник тривалості

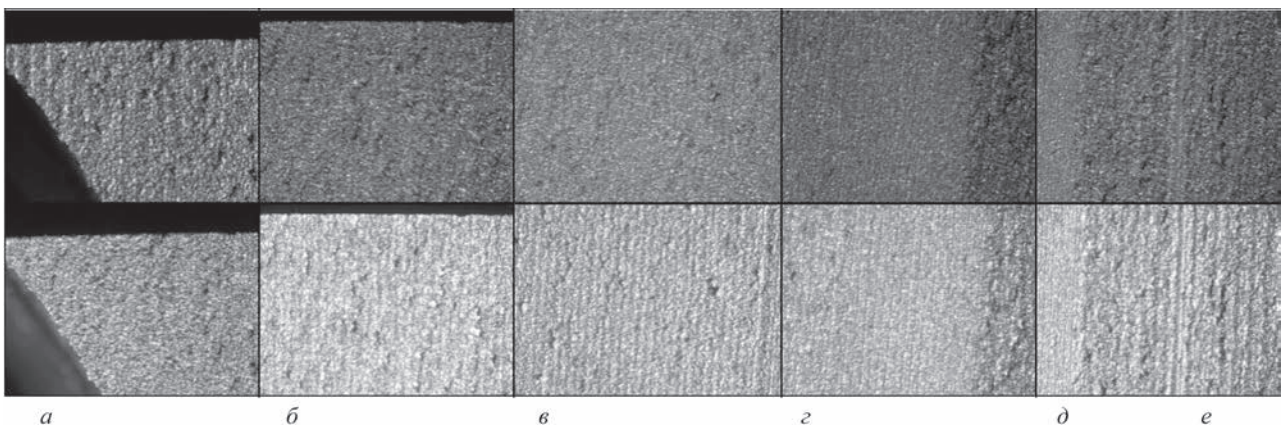


Рис. 9. Збільшений вигляд зон під різними кутами освітлення ($\times 200$): а — 1; б — 2; в — 3; г — 4; д — 5; е — 6, позначення, що відповідають рис. 8

Таблиця 2. Режими різання, відносно рис. 9

Режим	1	2	3	4	5	6
Позначення	9B16	7D16	5F16	3416	9616	9816
Імпульс, мкс	28	20	12	6	28	28
Пауза, мкс	14	18	22	6,25	8	10
Швидкість різання, мкм/с	< 15	< 13	< 11	< 9	< 16	< 14

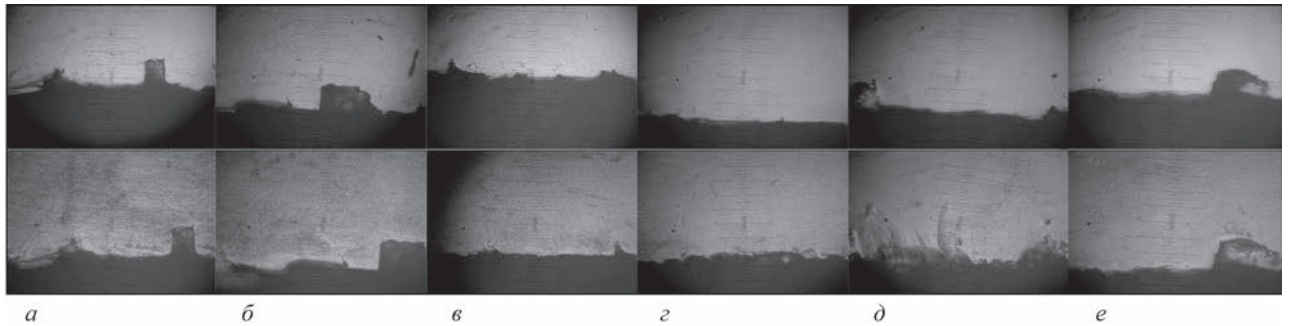


Рис. 10. Глибина проникнення шпарин і руйнувань від електроіскрової різки ($\times 200$): верхній ряд — поліровка, нижній ряд — після травлення; а — 1; б — 2; в — 3; г — 4; д — 5; е — 6; відстань між двома великими поділками лінійки дорівнюється 50 мкм

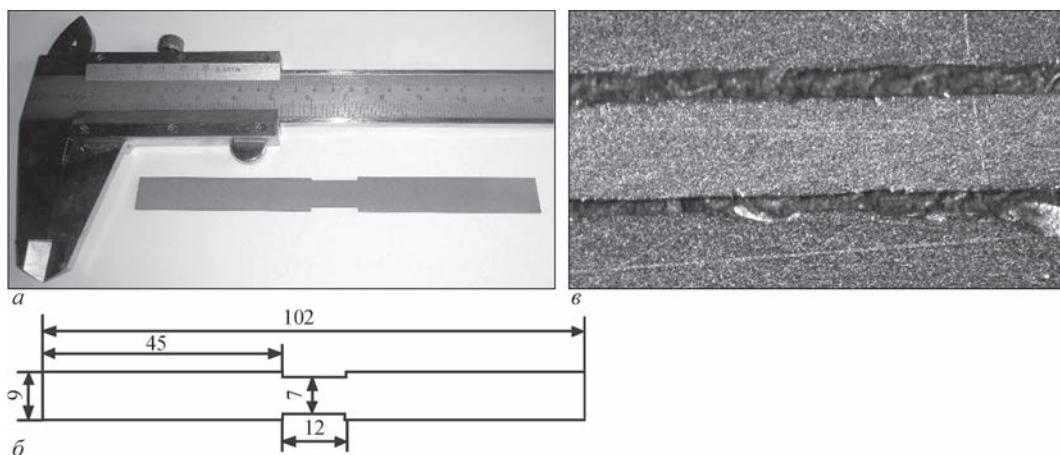


Рис. 11. Нагрівач, виготовлений із монокристалу вольфраму завтовшки 0,5 мм: а — загальний вигляд; б — креслення; в — шлиф поперечного перерізу

Таблиця 3. Глибина розповсюдження тріщин у тіло кристала вольфраму залежно від режимів різання

Режим	4	3	1, 2, 5, 6
Глибина тріщин	< 50 мкм	≈ 100 мкм	< 200 мкм

пауз між імпульсами практично не вплинув на характеристики дефектного шару; зменшення тривалості імпульсу (режими 1, 2, 3, 4) знижує вплив фактору обробки на формування дефектного шару, що проявляється у зменшенні його глибини. На режимі 4 глибина не перевищувала 50 мкм.

На основі проведених досліджень було обрано режими різання для виготовлення відповідальних деталей із монокристалів вольфраму. Так було

виготовлено бездефектний тонкостінний елемент-нагрівач завтовшки 0,5 мм (рис. 11).

Висновки

Досліджено технологічні режими оброблення монокристала вольфраму способом електроерозійного різання. Встановлено вплив режимів на глибину пошкодженого шару та утворення тріщин вглиб монокристалічної структури. Показано, що на жорстких режимах, що забезпечують максимальну швидкість різання, глибина пошкодженого шару може досягати 200 мкм. Встановлено, що при зменшенні тривалості імпульсу можливо досягнути формування оброблюваної поверхні майже без пошкодженого шару, але це призведе до більш повільних швидкостей різання.

Робота виконана за сприяння Міністерства освіти і науки України Наказ від 02.02.2021 № 134 «Про фінансування у 2021 р. науково-технічних робіт в рамках виконання державного замовлення на науково-технічні (експериментальні) розробки та науково-технічну продукцію», згідно договору № ДЗ/103-2021 від 09.03.2021 року: «Розроблення інноваційної 3D технології вирощування монокристалічних тиглів із вольфраму».

Список літератури/References

1. Shpak, A.P., Molodkin, V.B., Nizkova, G.I. et al. (2004). Influence of the broken surface layer on dynamic scattering in crystals with defects. *Usp. Fiz. Met.*, **5**, 285–312. DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.05.03.285>
2. Tosun, N., Cogun, C., Tosun, G. (2004) A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method. *J. Materials Proc. Technology*, **152**, 316–322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatproc.2004.04.373>
3. Kneubühler, F., Wiessner, M., Wegener, K. (2020) Analysis of WEDM process with respect to wire wear and wire consumption. *Procedia CIRP*, **95**, 313–318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.151>
4. Tosun, N. (2003) The effect of the cutting parameters on performance of WEDM. *KSME Inter. J.*, **17(6)**, 816–824. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02983395>
5. Mouralova, K., Prokes, T., Benes, L., Bednar, J. (2019) The influence of WEDM parameters setup on the occurrence of defects when machining Hardox 400 steel. *Materials*, **12**, 3758. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12223758>
6. Nikitenko, Yu.O., Shapovalov, V.O., Yakusha, V.V. et al. (2023) 3D technology of growing single-crystal ingots in the form of hollow tungsten cylinders. *Suchasna Elektrometal.*, **2**, 34–40 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.02.05>
7. Nikitenko, Y., Shapovalov, V., Yakusha, V. et al. (2024) Features of the structural formation of tungsten single crystals in the shape of hollow rotational bodies. *Mat. Sci. Forum*, 1113. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-SDyx6A.2024>

STUDY OF THE EFFECT OF ELECTRICAL DISCHARGE CUTTING ON FORMATION OF A DAMAGED LAYER DURING PROCESSING OF TUNGSTEN SINGLE CRYSTALS

Yu.O. Nikitenko, V.O. Shapovalov, V.V. Yakusha, O.M. Gnizdylo, D.M. Zhiron
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: nikyu80@gmail.com

The new type of electrical discharge machining without immersion of the processed workpiece is characterized by higher cost-effectiveness, simplified maintenance, and safety. In addition, a molybdenum wire with multiple reversible feed is used as a cutting tool, instead of a consumable brass wire. This study presents the results of experiments on processing tungsten single crystals by varying the technological modes of electrical discharge cutting. The dependences of the effect of the duration of electric discharge pulses and the pause between them on surface morphology, depth of interplane crack formation, and cutting speed were determined. Molybdenum wire with a diameter of 0.18 mm and a tungsten single crystal with a thickness of 15 mm were used as tools and working material in the experiments. 7 Ref., 3 Tabl., 11 Fig.

Keywords: tungsten single crystal, electrical discharge cutting, damaged layer, interplane cracks

Отримано 05.06.2024

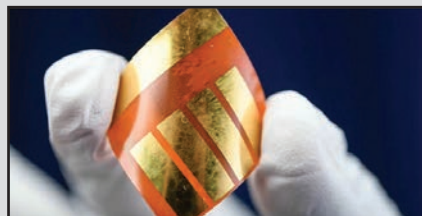
Отримано у переглянутому вигляді 27.06.2024

Прийнято 14.02.2025

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Дослідники Інституту Гельмгольца (Helmholtz Institute Erlangen-Nürnberg for Renewable, далі HI ERN) з відновлюваної енергії в філії дослідницького центру Jülich виявили нові органічні молекули, які можна використовувати для підвищення ефективності перовскітних сонячних елементів.

Вчені об'єднали можливості штучного інтелекту (ШІ) з повністю автоматизованим високопродуктивним синтезом. Вони провели 150 експериментів, але якби не ШІ, то їм знадобилося б провести сотні тисяч тестів. З одним із матеріалів, виявлених таким чином, вони збільшили ефективність етапного сонячного елемента приблизно на 2 % — до 26,2 %.



Відправною точкою в HI ERN була база даних зі структурними формулами близько мільйона віртуальних молекул, які можна було б отримати з комерційно доступних речовин. Дослідники використовували усталені квантово-механічні методи для розрахунку енергетичних рівнів, полярності, геометрії та інших характеристик 13000 випадково обраних віртуальних молекул.

З цих 13000 молекул потім вибрали 100 молекул, які максимально відрізнялися за характеристиками. Вони були автоматично вироблені в HI ERN за допомогою роботизованої системи і використані для виробництва в іншому ідентичних сонячних елементів. Потім виміряли їхню ефективність. Отримані значення і характеристики пов'язаних молекул використовували для навчання ШІ-моделі. У підсумку, ШІ запропонував ще 48 молекул для синтезу на основі двох критеріїв: очікуваної високої ефективності та непередбачуваних властивостей.