

УДК 669.275.017

- Вініченко В. С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: valeryi_v@ukr.net, ORCID: 0009-0001-7631-9822
- Єршов А. В. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: eav.nuzp@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0878-6434
- Ольшанецький В. Ю. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: olshanolshan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Волков Г. П. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри деталей машин і підйомно-транспортних механізмів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: gpvolkov@ukr.net, ORCID: 0009-0006-9810-5805
- Іванченко Е. Ю. аспірант кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: metodist26.08@meta.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ ВОЛЬФРАМОВОГО ДРОТУ ПРИ ЗВИЧАЙНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВОЛОЧІННЯ

Мета роботи. Полягає у розробці математичної моделі процесу волочіння вольфрамоторієвого дроту для аналізу впливу технологічних факторів вказаного процесу на пластичність виробляемого матеріалу та надання рекомендацій щодо вибору їх оптимальних значень, з точки зору, досягнення певної пластичності дроту при максимальній продуктивності процесу волочіння.

Методи дослідження. Проблему створення математичної моделі для дослідження впливу технологічних параметрів процесу волочіння на пластичність вольфрамоторієвого дроту вирішували з застосуванням теорії експерименту, зокрема, методу планування експерименту. Зразки матеріалів виготовляли з застосуванням методів порошкової металургії та обробки металів тиском, зокрема, волочіння. Експерименти проводили в умовах реального виробництва з застосуванням промислового обладнання. Пластичність вольфрамоторієвого дроту визначали проведенням випробувань на кручення з застосуванням машини К-5.

Отримані результати. Створена математична модель адекватно описує вплив технологічних факторів на пластичність вольфрамоторієвого дроту, що дозволяє досконаліше проаналізувати фізичні процеси, які відбуваються при його волочінні, скорегувати при необхідності режими волочіння без проведення великої кількості фізичних експериментів.

Наукова новизна. Розроблено математичну модель, яка дозволяє кількісно аналізувати вплив технологічних факторів процесу волочіння на пластичність виробляемого в умовах реального виробництва вольфрамоторієвого дроту.

Практична цінність. Робота може бути корисною технологам для більш продуктивного використання виробничого обладнання та зменшення витрат на виробництво експериментальних партій продукції.

Ключові слова: вольфрамоторієві сплави, пластичність при 20 °С, процес волочіння, випробування на кручення, математична модель, умови реального виробництва, методи порошкової металургії.

Вступ

Важлива роль у функціонуванні промислово-розвиненої держави належить радіозв'язку, зокрема радіомовленню та телебаченню. У цьому особливе місце займають потужні радіосистеми. Елементами, що визначають тактико-технічні характеристики таких систем, зокрема, є потужні радіолампи. Вони знаходять широке застосування у сучасних технологічних установках промислового нагрівання, у спеціальних електрофізичних установках, призначених для прискорення заряджених елементарних частинок та досліджень у галузях ядерної фізики і термоядерного синтезу, радіолокації. Це свідчить про те, що напрям електроніки, пов'язаний із розробкою та виробництвом потужних

генераторних, модуляторних та регулюючих ламп, є невід'ємною частиною життєзабезпечення держави, а самі ці прилади – одним із видів важливої продукції.

Потужні генераторні лампи являють собою триоди і тетроди. Як емітер електронів, в таких приладах часто використовують катод прямого розжарення. Для виготовлення такого роду катодів, в даний час, використовують торійований вольфрам це вольфрамований дріт з присадкою двоокису торію (ThO₂) [1].

Даний матеріал був запропонований Ленгмюром (Irving Langmuir) в 1915 р. в результаті дослідження термоелектронної емісії різних сортів вольфрамоторієвого дроту. При цьому було встановлено, що присадка

1–2 % мас. ThO_2 дозволяє отримати значно більшу електронну емісію, ніж з чистого вольфраму в наслідок того, що робота виходу торійованого катода становить 2,63 еВ, що значно нижче, ніж для катода із вольфраму без присадки ThO_2 (4,55 еВ). В результаті цих досліджень було створене виробництво торійованого вольфрамового дроту марок ВТ7, ВТ10, ВТ15. Дріт, зокрема, марки ВТ15 на сьогодні, є мало не єдиним матеріалом придатним для виготовлення катодів потужних електровакуумних приладів.

Проте незважаючи на велику кількість наукових рекомендацій, дріт з вольфрамоторієвих сплавів, що випускається промисловістю, має суттєвий недолік. А саме, високу температуру порогу холодноламкості ($T_{кр}$) в рекристалізованому стані (до 600 °С). Внаслідок цього дріт стає крихким у вказаному стані при звичайних температурах (20 °С), що призводить до необхідності застосування спеціальних заходів по захисту від механічних навантажень, які неминуче виникають при технологічних операціях виготовлення і в процесі експлуатації виробів. Тому дослідження в напрямку зниження впливу вказаного недоліку є актуальними.

Аналіз досліджень та публікацій

Вольфрам технічної чистоти в рекристалізованому стані має високу температуру переходу з пластичного в крихкий стан ($T_{кр}$), яка становить ~ 400–600 °С, що приводить до неможливості здійснювати подальші технологічні операції, які передбачають, наприклад, згинання або інші види пластичної деформації. Це значною мірою обмежує застосування рекристалізаційних відпалів в технології виготовлення дроту і застосування його як конструкційного матеріалу. В роботах [2, 3] показано, що найбільш крихкою структурною складовою рекристалізованого вольфраму являються границі зерен, про що свідчить інтеркристалічний характер руйнування даного металу при температурі нижче $T_{кр}$. При цьому наявність слідів мікропластичної деформації у тілі зерна при транскристалічному руйнуванні, свідчить про те, що вона має нижчу температуру $T_{кр}$ порівняно з границею зерна [4].

На сьогодні в багатьох роботах [6–7] показано, що основною причиною міжзеренної крихкості є скупчення в області границь зерен різних домішок. Оскільки розчинність елементів впровадження у вольфрам значно нижча за їх вміст в металі технічної чи навіть монокристалічної чистоти, ці елементи утворюють з вольфрамом або іншими домішками надлишкові фази відносно легкоплавкі оксиди, карбіди, бориди або інші виділення, що не міцно пов'язані з матрицею. Ці частинки розташовуючись переважно по границям зерен, уявляють собою концентратори напружень і знижують міцність з'єднання зерен. Зменшити вказаний вплив домішок поки що, в умовах промислового виробництва, неможливо, оскільки не існує технологій, що дозволяють досягнути того ступеню чистоти вольфраму, яка б виключила вплив домішок втілення.

Відомий [12] шлях зниження порогу холодноламкості вольфрамових сплавів в рекристалізованому

стані нижче звичайних температур це введення в їх склад до 27 % (мас.) ренію.

Так в роботі [8] досліджено сплави з вмістом ренію (Re) 5 мас.% та 25 мас.%. З використанням дифракції зворотного розсіювання електронів було виявлено вплив ренію як на зменшення середнього розміру зерен, так і на отримання більш рівновісної форми зерна сплаву у відпаленому рекристалізованому стані. При цьому встановлено, що збільшення вмісту ренію знижує схильність до крихкого руйнування, яка характерна для чистого вольфраму. Особливо це помітно для сплаву W-25% мас. Re.

Таке легування дає можливість при деформаційному переділі здійснювати бажані рекристалізаційні відпали напівфабрикатів без ризику їх крихкого руйнування при подальшому використанні. Проте, незважаючи на унікальну пластифікуювальну дію ренію, вольфрамкові сплави з подібною його концентрацією є дуже коштовними матеріалами, а просте зниження концентрації цього дефіцитного елемента підвищує поріг холодноламкості вольфрамових сплавів у рекристалізованому стані вище звичайних температур. Наприклад, сплав ВР10Т2 в рекристалізованому стані менш крихкий, ніж вольфрамівий сплав ВТ15, але все ж таки є недостатньо пластичним в рекристалізованому стані, щоб виключити ймовірність крихкого руйнування в процесі виробництва дроту та катодів [9].

Перевіреною способом зниження порогу крихкості $T_{кр}$ є застосування теплої пластичної деформації. Відповідно до теорії, що розвивається авторами робіт [10–12], зниження $T_{кр}$, а відповідно підвищення пластичності при звичайних температурах, є результатом пластичної деформації, при якій руйнуються плівки вторинних фаз по границях зерен та відбувається утворення комірчастої структури, що, в свою чергу, приводить до перерозподілу домішок на границям комірок. При цьому домішки розподіляються по більшій питомій поверхні в результаті чого товщина їх плівок зменшується, а відповідно і знижується їх окрихчувальна дія. Так в роботі [13] повідомляється, що поєднання низькотемпературної пластичності та високої міцності в об'ємному чистому W можливо отримати застосуванням високоенергетичної обробки куванням. Пояснено це тим, що в структурі вольфраму утворюються пластинчасті видовжені матричні зерна, з численними внутрішніми дрібними субзернами та високою щільністю рухомих крайових і змішаних дислокацій. Це дослідження демонструє практичний шлях досягнення помітної низькотемпературної пластичності в вольфрамі без використання легуювальних елементів. Авторами вказується, що це є доцільним способом для розробки високоєфективних сплавів на основі вольфраму.

В роботі [14] також автори дійшли висновку, що пластичність проволочених вольфрамових дротів при низьких температурах є наслідком мікроструктурних і текстурних змін, які відбуваються під час волочіння дроту.

Практичний досвід авторів даної роботи, накопичений при виробництві металокерамічного вольфрамового дроту, також свідчить про те, що зі збільшення ступеня деформації за певними режимами, підвищує його відносне видовження при температурі 20 °С, що говорить про зниження $T_{кр}$. При цьому потрібно врахувати, що в умовах виробництва деформацію вольфрамоторієвих сплавів, зокрема волочіння, проводять при температурах істотно нижче температури рекристалізації. Комірки і зерна при цьому витягаються в напрямку деформації. З границями таких комірок пов'язаний високий рівень внутрішніх напружень, при перевищенні певних значень яких проявляється схильність до розшарування з розвитком тріщини вздовж границь комірок при напруженнях нижче границі плинності. Це сприяє підвищенню схильності дроту до розшарування з поширенням тріщини уздовж границь. У роботі [16] компроміс між пластичністю дроту при температурі 20 °С і схильністю його до розшарування рекомендується досягати, регулюванням режимів відпалів таким чином, щоб відбувались процеси при яких знижуються внутрішні напруження проте зберігаються границі комірок. Оскільки здійснення високотемпературних відпалів в захисній атмосфері потребує додаткових витрат, автори даної роботи вирішили перевірити можливість отримання матеріалу з такими ж властивостями шляхом вибору раціональних режимів волочіння. При цьому стикнулися з суттєвим утрудненням вибору значень технологічних параметрів волочіння, що обумовлене необхідністю забезпечити не тільки відповідний діаметр дроту, а і його механічні властивості. Крім того режими волочіння суттєво впливають на продуктивність цього процесу. Оскільки теоретичні положення не забезпечили встановлення значень технологічних параметрів процесу волочіння з точністю, яка б була прийнятна у виробництві, для кожної партії матеріалу прийшлося вибирати режим деформації експериментальним шляхом. Здійснювати виробництво експериментальних партій продукції для корегування технологічних режимів доволі економічно витратно. Це питання постало особливо гостро у зв'язку з великим сортаментом і невеликим обсягом партій дроту із даних сплавів.

Зменшити витрати при рішенні цієї проблеми можна шляхом використання математичної моделі побудованої за експериментальними результатами.

Мета роботи

Задачею даної роботи було розробити математичну модель, яка б в умовах реального виробництва дозволяла корегувати технологічні параметри волочіння таким чином, щоб забезпечити необхідну пластичність дроту із сплавів ВТ-7, ВТ-10, ВТ-15 при температурі 20 °С при максимальній продуктивності вказаного процесу.

Матеріал і методика досліджень

Для проведення досліджень в даній роботі використовували сплави промислового виробництва ВТ7, ВТ10, ВТ15. Їх хімічний склад наведено в табл. 1.

Волочіння вольфрамового дроту від діаметра 2,75 мм (пруток після ротаційного кування) до 1,3 мм проводили на цепному стані ЦС28. При цьому заготовку змащували графітом. Потім дріт протягувався через гарячу піч і філь'єру. Як робочий інструмент використовували філь'єри з твердого сплаву ВК-6. Швидкість протягування становила 9 м/хв.

Випробування на кручення проводили з застосуванням випробувальної машини К-5. Зразками були відрізки дроту діаметром 1,3 мм і довжиною 200 мм. Ці зразки затискували в захвати таким чином, щоб між захватами відстань становила 100 мм.

Експерименти

Для встановлення залежності між параметром оптимізації і змінними факторами використовували метод планування експерименту. Як параметр оптимізації було вирішено використати кут закручення зразка дроту до його руйнування ($\varphi, ^\circ$). Вказаний параметр кількісно характеризує пластичність сплаву і порівняно з іншими, зокрема, відносним видовженням чи відносним звужуванням, у випадку крихких матеріалів, має вищу чутливість.

Як змінні фактори були обрані наступні: вміст торію в сплаві – x_1 ; температура волочіння – x_2 ; обтиснення при здійсненні першого переходу – x_3 ; обтиснення при наступних переходах – x_4 . Варіювання вмісту торію реалізували використанням промислових сплавів ВТ7, ВТ10 і ВТ15 з вмістом вказаного елемента 0,7 %, 1,0 % і 1,5 % мас. Оскільки інтервали варіювання факторів отримані у такий спосіб, були досить широкими, а експеримент бажано було провести на одній партії висхідних матеріалів, що допомогло виключити можливий вплив домішок, концентрація яких дещо змінюється від однієї партії сировини до іншої, вирішили застосувати зразу план, який дозволить отримати математичну модель другого ступеню. В даному випадку для проведення експерименту була обрана матриця некомпозитійного плану другого порядку для чотирьох факторів (3^4). Вибраний план має високу ступінь ортогональності (тільки коефіцієнти при вільному члені і при квадратичних членах корельовані один з одним) і є ротатабельним. Обробку результатів здійснювали по методиці описаній в [16].

Умови проведення експерименту наведено в табл. 2. За наведеними умовами був реалізований експеримент 3^4 матриця і результати якого наведена в табл. 3.

За результатами даного експерименту була отримана математична модель, що адекватно описує процес волочіння дроту із вольфрамівих сплавів з вмістом ThO_2 від 0,5 до 1,5 % мас. Відповідно до даної моделі на значення кута закручування дроту впливають концентрація ThO_2 , температура при якій здійснюють волочіння, і ступінь деформації дроту при першому і наступних переходах волочіння.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджених сплавів, % мас.

Марка сплаву	ThO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Mo
BT7	0,5	0,0014	0,0019	0,002	0,002	0,003
BT10	1,0	0,0016	0,0017	0,001	0,001	0,006
BT15	1,5	0,0011	0,0015	0,003	0,003	0,005

Таблиця 2 – Рівні та інтервали варіювання факторів

Фактори	Кодове позначення факторів	Інтервал варіювання факторів	Рівні факторів		
			верхній +1	основний 0	нижній -1
<i>C</i> – вміст ThO ₂ в сплаві, % мас.	x_1	0,5	1,5	1	0,5
<i>T</i> – температура волоочіння, °C	x_2	100	1000	900	800
ψ_1 – обтиснення за 1-ий перехід, %	x_3	10	40	30	20
ψ_2 – обтиснення за наступні переходи, %	x_4	10	30	20	10

Таблиця 3 – Матриця планування в кодованих величинах та результати дослідів

Номер досліду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	Кут закручування $\varphi, ^\circ$
1	2	3	4	5	6	7
1	+	+	+	0	0	112
2	+	+	0	+	0	172
3	+	+	0	0	+	167
4	+	+	0	0	-	168
5	+	+	0	-	0	165
6	+	+	-	0	0	114
7	+	0	+	0	+	156
8	+	0	+	0	-	151
9	+	0	+	+	0	162
10	+	0	+	-	0	152
11	+	0	0	+	+	216
12	+	0	0	+	-	213
13	+	0	0	0	0	227
14	+	0	0	0	0	223
15	+	0	0	0	0	226
16	+	0	0	-	+	206
17	+	0	0	-	-	207
18	+	0	-	-	0	156
19	+	0	-	+	0	163
20	+	0	-	0	+	157
21	+	0	-	0	-	158
22	+	-	+	0	0	150
23	+	-	0	+	0	212
24	+	-	0	0	+	208
25	+	-	0	0	-	205
26	+	-	0	-	0	206
27	+	-	-	0	0	157

Обговорення

Дана модель дозволяє оцінити вплив зазначених факторів при зміні їх значень в границях інтервалів варіювання. З метою встановлення суті впливу кожного фактору стабілізували значення всіх факторів, крім аналізованого і розраховували значення кута закручування при наданні даному фактору наступних

значень: -1; 0 і +1. Результати наведено в табл. 4. Мінус одиниця в таблиці позначена знаком мінус, а замість +1 написано +. З наведених результатів видно, що як зниження концентрації ThO₂ до 0,5% мас., (віртуальний дослід 2) так і її підвищення до 1,5% мас. (віртуальний дослід 3), приводить до зменшення значення кута закручування, тобто знижує пластичність дроту.

Таблиця 4 – Значення кута закручування в залежності від значень факторів

№ віртуального досліді	Фактори				Значення кута закручування φ, °
	C – вміст ThO ₂ в сплаві, % мас. (x ₁)	T – температура волочіння, °C (x ₂)	ψ ₁ – обтиснення за 1-й перехід, % (x ₃)	ψ ₂ – обтиснення за наступні переходи, % (x ₄)	
1	1,0 (0)	900 (0)	30 (0)	20 (0)	225,3
2	0,5 (-)	900 (0)	30 (0)	20 (0)	214,9
3	1,5 (+)	900 (0)	30 (0)	20 (0)	174,9
4	1,0 (0)	800 (-)	30 (0)	20 (0)	160,1
5	1,0 (0)	1000 (+)	30 (0)	20 (0)	167,7
6	1,0 (0)	900 (0)	20 (-)	20 (0)	219,2
7	1,0 (0)	900 (0)	40 (+)	20 (0)	219,2
8	1,0 (0)	900 (0)	30 (0)	10 (-)	216,9
9	1,0 (0)	900 (0)	30 (0)	30 (+)	216,9

При цьому слід вказати, що в першому випадку зменшення кута закручування менш суттєве (до 214,9°), ніж у наступному (до 174,9°). На наш погляд, це можна пояснити тим, що при концентрації ThO₂ 0,5% мас., пластичність дещо нижча порівняно з дротом в якому концентрація ThO₂ становить 1,0 % мас. тому, що при концентрації ThO₂ 0,5 % мас., в даному сплаві менше перешкод для руху дислокацій ніж в сплаві, що містить 1,0 % мас. ThO₂ і тому в ньому в процесі волочіння повільніше утворюється комірчаста структура, яка забезпечує пластичність даного типу сплавів при температурі 20 °C.

В другому випадку, при концентрації ThO₂ 1,5 % мас., частинки ThO₂ більш крупні і, ймовірно, діють як неметалеві включення, які порушують суцільність металу, в результаті чого, він втрачає пластичність внаслідок чого кут закручування становить лише 174,9°.

Аналіз впливу температури показав, що зниження її до 800 °C (віртуальний дослід 4) викликає зменшення кута закручування до значення 160,1°. На наш погляд це відбувається в наслідок пришвидшення нагартування металу і утруднення утворення комірчастої структури. Зниження кута закручування (до 167,7°) з підвищенням температури до 1000 °C (віртуальний дослід 5), ймовірно, обумовлене інтенсифікацією процесів знеміцнення, які приводять до часткового зникнення комірчастої структури.

Зниження кута закручування, як при зниженні так і при підвищенні обтиснень при першому і кожному наступному переходах волочіння (віртуальні досліді 6–9), за нашою гіпотезою, також пов'язано з утрудненням утворення комірчастої структури. Зокрема, підвищення обтиснення може інтенсифікувати процеси знеміцнення, що, як правило, приводить до часткового зникнення границь комірок і відповідно зниження пластичності. Детально ці процеси розглянуті в роботі [16]. Зокрема у відповідності до результатів вказаної роботи ці процеси суттєво впливають на параметри комірчастої структури, що утворюється, а відповідно і на рівень пластичності даного сплаву при температурі 20 °C.

Для більш зручного використання даної математичної моделі у виробництві вказаних сплавів її перевели в іменовані величини внаслідок чого вона набула наступного виду

$$\varphi = -4927,8 + 203,2C + 11,05t + 4,04\psi_1 + 3,36\psi_2 - 121,6C^2 - 0,00614t^2 - 0,061\psi_1^2 - 0,084\psi_2^2,$$

де φ – кут закручування дроту до його руйнування;
 C – вміст ThO₂ в сплаві, % мас.;
 T – температура волочіння, °C;
 ψ₁ – обтиснення за 1-й перехід;

ψ_2 – обтиснення за наступні переходи.

В умовах реального виробництва отриману модель можливо застосовувати для пошуку раціональних режимів волочіння, які забезпечать максимальну продуктивність при необхідному рівні пластичності. Або за допомогою даної моделі можна визначити такі значення параметрів волочіння, які забезпечать максимально-можливу пластичність при конкретному вмісті ThO₂ в сплаві, яка в свою чергу, забезпечить мінімальну схильність дроту до руйнування при температурі 20 °С, що необхідно для запобігання браку в процесі виготовлення дроту і виробів з нього.

Висновки

1. З використанням відомих методик створено математичну модель, що адекватно описує вплив вмісту ThO₂ в сплаві, температури волочіння, обтиснення за перший перехід і обтиснення за наступні переходи на кут закручування до руйнування вольфрамоторієвого дроту.

2. Показано, що як зниження концентрації ThO₂ в сплаві з вмістом 1,0 %, так і її підвищення вище вказаної концентрації приводить до зменшення пластичності вольфрамоторієвого дроту при температурі 20 °С.

3. Встановлено, що підвищення температури волочіння до 1000 °С, ступеня обтиснення за перший перехід до 30 % і за наступні переходи до 20 % приводить до збільшення пластичності вольфрамоторієвого дроту, а подальше підвищення значень цих параметрів знижує пластичність вказаного матеріалу.

Список літератури

1. Фізичні основи електронної техніки / З. Ю. Готра, І. Є. Лопатинський, Б. А. Лукіянець та ін. – Львів : Бескид Бід, 2004. – 808 с.
2. Ударное уплотнение порошка вольфрама в широком диапазоне температур / А. И. Толочин, А. В. Лаптев, И. Ю. Окунь, Я. И. Евич // *Металлофиз. новейшие технол.* – 2014. – Т. 36, № 2. – С. 217–228.
3. Advanced processing and machining of Tungsten and its alloys / S. Omole, A. Lunt, S. & Kirk, A. Shokrani // *Journal of Manufacturing and Materials Processing.* – 2022. – 6(1). – 15 p.
4. Small-scale analysis of brittle-to-ductile transition behavior in pure tungsten / Y. Oh, W. S. Ko, N. Kwak et al. // *Journal of Materials Science & Technology.* – 2022. – 105. – P. 242–258.
5. Поварова К. Б. Исследование влияния фазового состава, деформации и термообработки на хладноломкость вольфрама и его сплавов / К. Б. Поварова, Л. С. Косачев, В. А. Балашов. // *Изв. АН СССР. Металлы.* – 1983. – № 5. – С. 150–154.

6. Трефилов В. И. О физической природе низкотемпературной хрупкости металлов с ОЦК-решеткой / В. И. Трефилов, О. А. Белоус, В. Н. Минаков. // *Физика металлов и металловедение.* – 1982. – Т. 53. – Вып. 1. – С. 164–169.

7. Савицкий Е. М. Исследование примесей в монокристаллическом вольфраме / Е. М. Савицкий, М. И. Буцки, Г. С. Бурханов. // *Изв. АН СССР. Металлы.* – 1981. – № 5. – С. 180–187.

8. Selective laser melting of tungsten-rhenium alloys / С. С. Eckley, R. A. Kemnitz, С. P. Fassio et al. // *JOM.* – 2021. – 73. – P. 3439–3450.

9. Виниченко В. С. Исследование влияния структуры на свойства вольфрамоторієвого сплава ВР10Т2 / В. С. Виниченко, В. Е. Ольшанецкий, Т. М. Кесаев // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2004. – № 2. – С. 34–37.

10. Трефилов В. И. Деформационное упрочнение и развитие дислокационной структуры в поликристаллических ОЦК-металлах / В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский, // *Металлофизика.* – 1986. – Т. 8. – № 2. – С. 89–96.

11. Исследование влияния технологии производства штабиков на склонность проволоки из торированных вольфрамоторієвых сплавов к расслаиванию / В. С. Виниченко., Ю. И. Кононенко, В. Е. Ольшанецкий, М. Р. Орлов // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2004. – № 1. – С.84–88.

12. Перераспределение примесей внедрения по структуре порошковых малолегированных сплавов вольфрама при деформации / О. Г. Радченко, Н. И. Даниленко, С. С. Пономарев, В. В. Паничкина. // *Порошковая металлургия,* 1990. – № 12.– С. 65–68.

13. Hierarchical microstructures enabled excellent low-temperature strength-ductility synergy in bulk pure tungsten / X. F. Xie, Z. M. Xie, R. Liu et al. // *Acta Materialia,* 2022. – 228 p.

14. Rate-controlling deformation mechanisms in drawn tungsten wires / M. Fuhr, T. Höschen, J. Riesch et al. // *Philosophical Magazine,* 2023. – 103 (11). – P. 1029–1047.

15. Мильман Ю.В. Развитие представлений о рекристаллизации дисперсноупрочнённых металлов на основе теории диффузионного движения включений / М. А. Мильман, Ю. В. Кривоглаз // *Металлофизика и новейшие технологии,* 2005. – Т. 27, № 1. – С. 59–74.

16. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических параметров / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

Одержано 11.10.2023

Після доробки 30.11.2023

STUDY OF THE POSSIBILITY OF INCREASING THE PLASTICITY OF TUNGSTEN WIRE AT NORMAL TEMPERATURES BY OPTIMIZING THE DRAWING TECHNOLOGY

- Vinichenko V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physical Materials Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: valeryi_v@ukr.net*, ORCID: 0009-0001-7631-9822
- Yershov A. Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Physics, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: eav.nuzp@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Ol’shanetskii V. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Physical Material Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: olshanolshan@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Volkov G. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine parts and lifting-transport mechanisms, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: gpvolkov@ukr.net*, ORCID: 0009-0006-9810-5805
- Ivanchenko E. Post-graduate student of the Department of Physical Material Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: metodist26.08@meta.ua*

Purpose. *The development of a mathematical model for the process of drawing a tungsten-thorium wire for the analysis of the influence of technological factors of the specified process on the plasticity of the material and the recommendations on how to choose their optimal values, from the point of view reaching the plasticity of the wire at the maximum productivity of the wire drawing process.*

Research methods. *The problem of creating a mathematical model for investigating the influence of technological parameters into the process of drawing on the plasticity of a tungsten-thorium rod was considered to be based on the theory of experiment, in particular the method of experiment planning. Various material samples were prepared using methods of powder metallurgy and pressure treatment, in particular wire drawing. Experiments were carried out in real production conditions using industrial equipment. The plasticity of the tungsten-thorium rod was determined by torsion testing using the K-5 machine.*

Results. *A mathematical model has been created that adequately describes the impact of technological factors on the plasticity of tungsten wire, which allows thoroughly analyze the physical processes that occur during wire drawing, and, if necessary, correct regimes without conducting a large number of physical experiments.*

Scientific novelty. *The mathematical model has been proposed as it allows to analyze the impact of technological factors of drawing process on plasticity of tungsten-thorium wire produced at real manufacturing.*

Practical value. *It can be useful for the technologists for higher productive application of industrial equipment and decrease of expenses for production of experiment consignment.*

Key words: *tungsten-thorium alloys, plasticity at 20 °C, drawing process, torsion testing, mathematical model, conditions of real manufacturing, powder metallurgy methods.*

References

1. Gotra Z. Yu., Lopatinskij I. Ye., Lukyanec, B. A. (2004). Fizichni osnovi elektronnoyi tehniki [Physical foundations of electronic equipment]. Lviv, Ukraine: Beskid Bid, 808.
2. Tolochin A. I., Laptev A. V., Okun I. Yu., Evich Ya. I. (2014). Udarnoe uplotnenie poroshka volframa v shirokom diapazone temperatur. [Study of the possibility of increasing the plasticity of tungsten wire at normal temperatures by optimizing the drawing technology]. Metallofiz. novejshe tehnol, 36, 2, 217–228.
3. Omole S., Lunt A., Kirk S., & Shokrani A. (2022). Advanced processing and machining of Tungsten and its alloys. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 6(1), 15.
4. Oh Y., Ko W. S., Kwak N., Jang J. I., Ohmura T., & Han H. N. (2022). Small-scale analysis of brittle-to-ductile transition behavior in pure tungsten. Journal of Materials Science & Technology, 105, 242–258.
5. Povarova K. B., Kosachev L. S., Balashov V. A. (1983). Issledovanie vliyaniya fazovogo sostava, deformatsii i termoobrabotki na hladnolomkost volframa i ego splavov [Study of the influence of phase composition, deformation and heat treatment on the cold brittleness of tungsten and its alloys]. Izv. AN SSSR. Metally, 5, 150–154.

6. Trefilov V. I., Belous O. A., Minakov V. N. (1982). O fizicheskoy prirode nizkoterperaturnoj hrupkosti metallov s OCK-reshetkoj [On the physical nature of low-temperature brittleness of metals with a bcc lattice]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1 (53), 164–169.
7. Savickij E. M., Bucki M. I., Burhanov G. S. (1981). Issledovanie primesej v monokristallicheskom volframe [Study of impurities in single-crystal tungsten]. *Izv. AN SSSR. Metally*, 5, 180–187.
8. Eckley C. C., Kemnitz R. A., Fassio C. P., Hartsfield, C. R., & Leonhardt, T. A. (2021). Selective laser melting of tungsten-rhenium alloys. *JOM*, 73, 3439–3450.
9. Vinichenko V. S., Olshanetskiy V. E., Kesaev T. M. (2004). Issledovanie vliyaniya struktury na svoystva volframorenievogo splava VR10T2 [Study of the influence of structure on the properties of tungsten-rhenium alloy VR10T2] *Novi materiali i tehnologii v metalurgsyi ta mashinobuduvanni*. 2, 34–37.
10. Trefilov V. I., Moiseev V. F., Pechkovskiy E. P. (1986). Deformatsionnoe uprochnenie i razvitie dislokatsionnoy struktury v polikristallicheskih OTsK-metallah [Strain hardening and development of dislocation structure in polycrystalline bcc metals]. *Metallofizika*. T. 8, 2, 89–96.
11. Vinichenko V. S., Kononenko Yu. I., Olshanetskiy V. E., Orlov M. R. (2004). Issledovanie vliyaniya tehnologii proizvodstva shtabikov na sklonnost provoloki iz torirovannykh volframorenievyykh splavov k rasslaivaniyu [Study of the influence of bead production technology on the tendency of wires made of thoriated tungsten-rhenium alloys to delamination]. *Novi materiali i tehnologii v metalurgiyi ta mashinobuduvanni*. 1, 84–88.
12. Radchenko O. G., Danilenko N. I., Ponomarev S. S., Panichkina V. V. (1990). Pereraspredelenie primesey vnedreniya po strukture poroshkovykh malolegirovannykh splavov volframa pri deformatsii [Redistribution of interstitial impurities along the structure of powder low-alloy tungsten alloys during deformation]. *Poroshkovaya metallurgiya*, 12, 65–68.
13. Xie X. F., Xie Z. M., Liu R., Fang Q. F., Liu C. S., Han W. Z., Wu X. & (2022). Hierarchical microstructures enabled excellent lowtemperature strengthductility synergy in bulk pure tungsten. *Acta Materialia*, 228 p.
14. Fuhr M., Höschen T., Riesch J., Boleininger M., Almanstötter J., Pantleon W., Neu R. & (2023). Rate-controlling deformation mechanisms in drawn tungsten wires. *Philosophical Magazine*, 103, (11), 1029–1047.
15. Milman Yu. V., Krivoglaz Yu. V. (2005). Razvitie predstavlenij o rekristallizacii disprsnouprochnyonykh metallov na osnove teorii diffuzionogo dvizheniya vklyuchenij [Development of ideas about the recrystallization of dispersion-strengthened metals based on the theory of diffusion movement of inclusions] *Metallofizika i novejshe tehnologii*. 1, 59–74.
16. Spiridonov A. A. (1981). Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tehnologicheskikh parametrov [Planning an experiment when studying technological parameters]. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 184.