

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ В СИСТЕМІ КРИСТАЛ–ВИСОКОЧАСТОТНИЙ НАГРІВАЛЬНИЙ МОДУЛЬ ПРИ ПЛАЗМОВО-ІНДУКЦІЙНОМУ ВИРОЩУВАННІ МОНОКРИСТАЛІВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛІВ

**В.О. Шаповалов, Ю.О. Никитенко, О.М. Гніздило,
В.Р. Бурнашев, О.В. Карускевич, Т.І. Дубова, В.В. Якуша**

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянуто питання оптимізації конструкції індукційного нагрівального модуля при розробці обладнання та технології плазово-індукційного вирощування надвеликих тугоплавких монокристалів вольфраму у формі тіл обертання. Досліджено вплив геометричних параметрів індукційного модуля на енергетичні характеристики системи багатосекційний індуктор–монокристал і розроблено найбільш раціональну конструкцію високочастотного нагрівача. Характер розподілу питомої густини теплової енергії на поверхні кристала, що нагрівається у високочастотному полі індуктора визначеної геометрії, забезпечує формування заданого температурного поля та певного рівня температурних градієнтів у об'ємі. У якості основного інструменту досліджень використано експериментальну методику визначення теплонавантажених вузлів обладнання за допомогою металевого водоохолоджуваного імітатора. Показано, що середній електричний ККД індукційного модуля для першого варіанта конструкції модуля становить — 40, другого — 36, третього — 32 %. Встановлено, що для першого варіанта характерно більш рівномірне нагрівання по висоті зливка із питомою потужністю 51, 53 та 54 Вт/см² відповідно для першої, другої та третьої секцій модуля. Електричний ККД системи, який встановлено згідно застосованої методики, суттєво спрощує процедуру складних розрахунків взаємопов'язаних задач електромагнітного поля та нестационарної теплопровідності та може бути використаний у якості первинної інформації щодо аналізу ефективності та раціональності конструкції модуля високочастотного нагріву. Бібліогр. 14, табл. 3, рис. 3.

Ключові слова: монокристал вольфраму; плазово-індукційний спосіб; індукційний нагрівальний модуль; індуктор; калориметрування

Розвиток електроніки та приладобудування дуже тісно пов'язаний з індустрією вирощування штучних монокристалів. Переважну більшість з них вирощують із рідкої фази за допомогою тигельних способів. Для виготовлення тиглів, як правило, використовують кварц, алунд, графіт, платину, молібден, тантал або вольфрам. Ураховуючи фізико-хімічні властивості тигельних матеріалів, саме вольфрам найбільш повно відповідає вимогам для високотемпературного застосування (понад 1800 К) [1–4]. Окрім найвищої робочої температури (в межах 3073 К) вольфрам має найнижчий коефіцієнт лінійного теплового розширення.

Традиційно практично все промислове одержання тиглів із вольфраму побудоване на технологіях порошкової металургії. Суттєвий недолік таких виробів пов'язаний із низькою щільністю металокерамічного вольфраму в порівнянні зі щільністю вольфраму в переплавленому стані (19,2...19,3 г/см³). Вольфрамові тиглі, вироблені за технологією спікання, мають щільність 18,0...18,5 г/см³. Щільність матеріалу тигля

визначає його стійкість (кількість теплосмін). Більш значущим у порівнянні зі щільністю фактором, що впливає на стійкість тигля, є структурний фактор. Під час технологічного процесу в полікристалічній структурі стінок вольфрамового тигля внаслідок циклічних процесів нагрівання/охолодження набувають суттєвого розвитку рекристалізаційні процеси, які спричиняють появу та розвиток тріщин і призводять до швидкого руйнування тигля.

Одним із перспективних напрямків вирішення проблеми підвищення стійкості тиглів є отримання їх із монокристалічного вольфраму. Відомо, що монокристалічний вольфрам при термоциклічних навантаженнях проявляє більш високу стабільність структури і супроводжується значно меншою незворотною зміною форми, ніж полікристалічний. Порівняно з полікристалічними зразками в монокристалічних гальмуються процеси високотемпературної зернограничної дифузії елементів. Стійкість геометричної форми монокристалічних деталей пов'язана з більш досконалою структу-

В.О. Шаповалов — <http://orcid.org/0000-0003-1339-3088>, Ю.О. Никитенко — <http://orcid.org/0000-0002-3603-2333>,
О.М. Гніздило — <http://orcid.org/0000-0001-7537-6481>, В.Р. Бурнашев — <http://orcid.org/0000-0001-6807-3810>,
О.В. Карускевич — <http://orcid.org/0000-0002-7037-5903>, Т.І. Дубова — <http://orcid.org/0000-0002-2149-9360>,
В.В. Якуша — <http://orcid.org/0000-0001-5962-9194>

© В.О. Шаповалов, Ю.О. Никитенко, О.М. Гніздило, В.Р. Бурнашев, О.В. Карускевич, Т.І. Дубова, В.В. Якуша, 2022

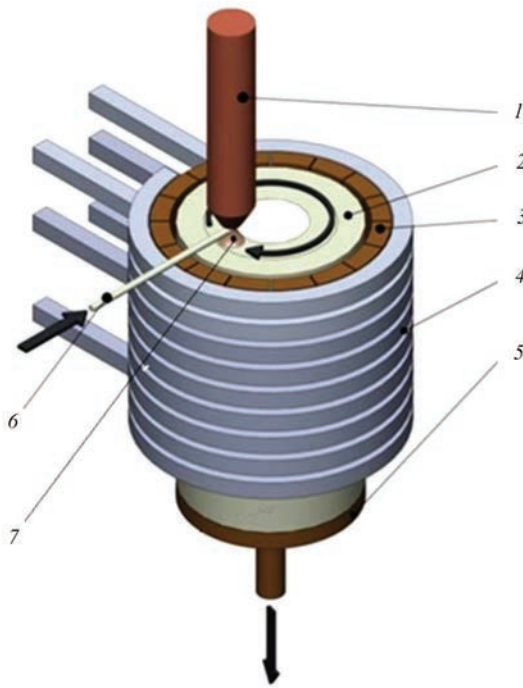


Рис. 1. Схема плазово-індукційного способу вирощування великих монокристалів тугоплавких металів у формі обертання: 1 — плазмотрон; 2 — монокристал; 3 — секційна стінка; 4 — індуктор; 5 — піддон; 6 — витратний пруток; 7 — плазова дуга

рою, високою чистотою та щільністю, яка наближається до теоретичної.

Промислово впроваджені технології дозволяють вирощувати монокристали вольфраму у вигляді стрижнів невеликого діаметру (25...30 мм), що практично унеможливило їх використання у якості заготовок для виробництва монокристалічних тиглів [5].

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено унікальне обладнання та створено інноваційну технологію вирощування найбільших у світі плоских монокристалів вольфраму розміром 170×160×20 мм [6]. Використовуючи цей досвід вирощування монокристалів, співробітниками інституту розроблено новітню плазово-індукційну установку для 3D адитивного виробництва монокристалів вольфраму у вигляді тіл обертання діаметром до 100 мм як перспективних заготовок для монокристалічних тиглів (рис. 1) [7].

Принципово важливою задачею при розробці технології вирощування циліндричних монокристалів є забезпечення заданого температурного поля та певного рівня температурних градієнтів у їхньому об'ємі, які першочергово залежать від розподілу питомої густини теплової енергії на поверхні кристала від індукційного джерела нагрівання. Особливості цього розподілу задаються конструкцією високочастотного нагрівального модуля [8].

Мета досліджень, проведених у цій роботі, полягала в визначенні впливу геометричних параметрів індукційного модуля на енергетичні характеристики системи багатосекційний індуктор–монокристал і розробці найбільш раціональної конструкції високочастотного нагрівача.

Методика проведення експериментів. Експериментальні дослідження були виконані на установці для плазово-індукційного вирощування монокристалів вольфраму у формі тіл обертання діаметром 85 мм (рис. 1). Характерною особливістю високочастотного нагрівального модуля є використання секційної водоохолоджуваної стінки. Така схема індукційного модуля, з одного боку, суттєво ускладнює процес виробництва, монтажу та його узгодження з високочастотним генератором, але з іншого — забезпечує надійну одночасну роботу модуля та дугового плазмотрона у широкому інтервалі електричних потужностей.

В установках ППХТ та ПСК секційний кристалізатор і завантаження розглядаються як єдина електромагнітна система. При цьому секційний кристалізатор суттєво впливає на величину потужності, що виділяється при завантаженні.

Активна теплова енергія складає лише частину потужності, що підводиться до індуктора. Інша — це електричні втрати в охолоджуваних елементах плавильного модуля.

Для оцінки ефективності конструкції високочастотного нагрівального модуля із холодною стінкою використовують величину $\eta_{\text{хт}}$, що характеризує співвідношення між потужністю, що поглинається завантаженням $P_{\text{сад}}$, і електричною потужністю, що підводиться до індуктора [9]:

$$\eta_{\text{хт}} = \frac{P_{\text{сад}}}{P_{\text{ел}}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{ел}} = P_{\text{сад}} + P_{\text{інд}} + P_{\text{кр}}$ — електрична потужність, що підводиться до індуктора; $P_{\text{сад}}$ — потужність, що виділяється в садці; $P_{\text{інд}}$ — електричні втрати в індукторі; $P_{\text{кр}}$ — електричні втрати в секційному кристалізаторі.

Величину $\eta_{\text{хт}}$ ще називають електричним ККД індукційного модуля із холодною стінкою.

Визначення окремих складових балансу енергії в системі індуктор–кристалізатор–монокристал і розрахунок $\eta_{\text{хт}}$ дозволяє оцінити енергетичну ефективність процесу нагріву тіла в індукторі з секційною холодною стінкою та визначити раціональність конструкції нагрівального модуля.

Конструктивно індукційний блок нагрівання установки для вирощування монокристалів (рис. 1) складається з основного (верхнього) двохвиткового індуктора з холодною стінкою заввишки 50 мм,

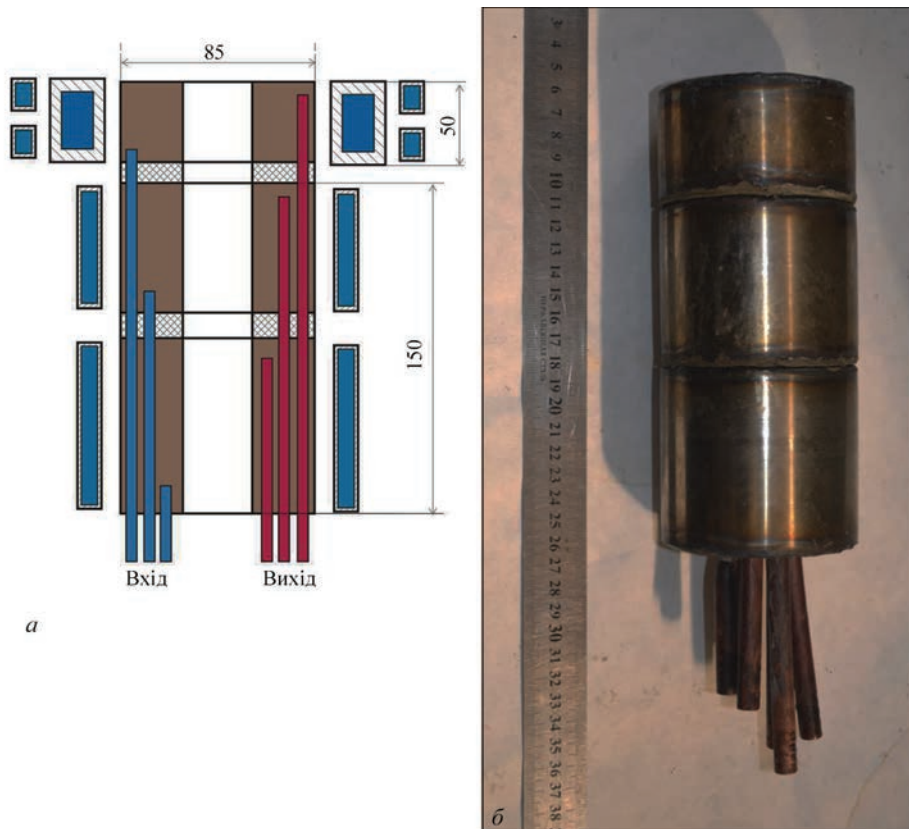


Рис. 2. Калориметричний модуль для вивчення енергетичного балансу в системі індуктор–монокристал: *а* — спрощена схема індукційного нагрівального модуля; *б* — макет калориметра із нержавіючої сталі

який забезпечує нагрівання зародкового кристала на початку плавки, а потім верхньої частини монокристала під час плавки до заданої температури. Додатково до цього основний індуктор забезпечує гарантоване утримання локальної ванни рідкого металу в електромагнітному полі, що перешкоджає її проливанню. Нижній двохсекційний індуктор заввишки 150 мм забезпечує під час вирощування підтримування температури наплавленої частини монокристала на заданому рівні.

В ході виконання задачі щодо пошуку найбільш раціональної конструкції (геометричних розмірів) індукційного модуля було досліджено три варіанти його конфігурації. Незмінними в експериментах були верхні секції індукторів із холодною стінкою із десяти ламелей, утворюючих внутрішній діаметр 90 мм. Перший варіант — друга секція 5 витків, третя — 6 витків діаметром 90 мм. Другий варіант — друга секція 5 витків діаметром 102 мм, третя — 6 витків діаметром 90 мм. Третій варіант — друга секція 4 витки діаметром 102 мм, третя — 5 витків діаметром 90 мм.

Живлення індукторів забезпечувалося від серійного високочастотного лампового генератора ВЧГЗ-160/0,66 із тиристорним регулюванням анодної напруги.

При проведенні досліджень керувалися методикою, описаною в роботі [10], та у подальшому

адаптованою для процесу плазмово-індукційного вирощування плоских монокристалів вольфраму в роботі [11]. Дослідження проводили за допомогою макета (рис. 2), який імітував пустотілий циліндричний монокристал. Макет складався із водоохолоджуваних елементів і за розміром відповідав реальному розміру вирощуваного монокристалічного тигля. Довжина водоохолоджуваного макету становила 200 мм, а його діаметр — 85 мм. Висота кожної секції відповідала висоті відповідної секції багатосекційного індуктора.

Потужність, що підводиться до індуктора, визначали за показами стрілочних приладів $U_{\text{бнк}}$, I_a та U_a на панелі приладів ВЧГЗ-160/0,66, які показують відповідно напругу на блоці контура навантаження, струм та напругу в ланцюзі генераторної лампи.

Витрати води в кожній секції (Q_n) визначали за кількістю води, що проходила через відповідну секцію протягом визначеного часу.

Водоохолоджувані елементи калориметричного модуля були виготовлені з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, суміжні частини макету теплоізолювали один від одного за допомогою азбестової тканини.

Енергетичні показники режимів високочастотного нагрівання та відповідні їм температурна різниця води (Δt_n), що входить і виходить, і її витрата (Q_n) для досліджених варіантів конструкції індукційного модуля зведені в табл. 1.

Таблиця 1. Вихідні показники калориметрування індукційного модуля

Варіант 1								
$U_{\text{бнк}}$	I_a, A	$U_a, \text{кВ}$	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Q_1	Q_2	Q_3
			°C			л/год		
0,15	5,0	2,6	1,4	1,9	1,9	578	530	621
0,20	7,0	3,5	2,3	3,4	3,3	—>—	—>—	—>—
0,25	8,8	4,5	3,4	5,0	4,9	—>—	—>—	—>—
0,30	10,2	5,2	4,0	6,2	6,1	—>—	—>—	—>—
0,35	12,2	6,1	5,6	8,5	8,4	—>—	—>—	—>—
0,40	14,0	7,0	7,1	11,4	11,1	—>—	—>—	—>—
0,45	15,8	7,6	8,9	13,7	13,6	—>—	—>—	—>—
0,50	17,0	8,25	10,2	16,2	16,0	—>—	—>—	—>—
Варіант 2								
0,15	4,5	2,7	1,9	1,3	2,5	609	527	616
0,20	6,1	3,6	2,8	1,9	4,1	—>—	—>—	—>—
0,25	7,9	4,5	4,8	2,5	5,7	—>—	—>—	—>—
0,30	9,2	5,4	4,9	2,8	7,3	—>—	—>—	—>—
0,35	11,0	6,2	6,4	3,4	9,4	—>—	—>—	—>—
0,40	12,7	7,1	8,4	4,5	12,5	—>—	—>—	—>—
0,45	14,0	7,7	10,0	5,2	14,8	—>—	—>—	—>—
0,50	15,2	8,3	11,5	5,8	17,5	—>—	—>—	—>—
Варіант 3								
0,15	4,8	2,5	1,8	1,4	2,2	587	516	625
0,20	6,5	3,5	2,7	1,8	3,4	—>—	—>—	—>—
0,25	7,8	4,3	3,4	2,2	—>—	—>—	—>—	—>—
0,30	9,0	5,0	4,5	2,9	5,5	—>—	—>—	—>—
0,35	1,01	6,0	5,8	3,6	7,9	—>—	—>—	—>—
0,40	12,5	6,6	7,3	4,4	9,9	—>—	—>—	—>—
0,45	14,0	7,4	9,0	5,3	12,1	—>—	—>—	—>—
0,50	15,3	8,0	9,6	6,2	14,5	—>—	—>—	—>—

Результати експериментів. Для оцінки ефективності модуля височастотного нагрівання визначали електричний ККД системи індуктор–секційна стінка–макет за вище наведеною формулою (1).

Теплову потужність, що поглинається секціями мідного водоохолоджуваного макету, визначали, виходячи з питомої теплоємності води і даних Δt_n і Q_n із табл. 1.

Величину електричної потужності, що підводиться до індуктора, розраховували за параметрами височастотного генератора згідно з формулою [12]

$$P_{ai} = \left(\frac{1}{2} \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \xi \right) I_a U_a \approx 0,75 \cdot I_a U_a, \quad (2)$$

де I_a, U_a — струм і напруга в анодному ланцюзі височастотного генератора; ξ — коефіцієнт використання анодної напруги; α_1, α_0 — коефіцієнти розкладання косинусоїдального імпульсу анодного струму.

Розраховані теплові втрати в секціях макету, потужність, що підводиться до індуктора, та електричний ККД для варіантів 1–3 конструкції модуля відповідно до вибраного режиму нагрівання приведені в табл. 2.

Із табл. 2 випливає, що електричний ККД системи мідний індуктор–мідна секційна стінка–макет із нержавіючої сталі складає в середньому 23...27%.

У цілому ККД системи залежить від ступеня ослаблення секційною стінкою електромагнітного поля, що створюється струмом, який протікає в індукторі, та від електромагнітного зв'язку тіла з полем усередині модуля.

Оскільки джерелом енергії, що нагріває тіло, яке розміщене в індукторі, є джоулеве тепло від протікання індуктованих у тілі вихрових струмів, то ККД цієї системи при височастотному нагріві тіла (монокристала вольфраму), яке має дещо відмінний питомий електричний опір від опору матеріалу макета, буде теж або меншим, або більшим від ККД системи, який визначено за нержавіючим водоохолоджуванним макетом. Питомий електричний опір вольфраму в інтервалі температур 20...1800 °C змінюється в 10 разів [13], що суттєво відображається на особливості його нагрівання в електромагнітному полі.

Із теорії індукційного нагріву електричний ККД мідного індуктора може бути розрахований за формулою [14]

Таблиця 2. Показники ефективності індукційного модуля

$U_{\text{бнк}}$	$P_{\text{аі}}, \text{Вт}$	$P_{\text{м}}, \text{Вт}$	$\eta_{\text{і а́дэ}} = \frac{P_{\text{і}}}{P_{\text{а}}} \cdot 100, \%$	$\eta_{\text{w}}^{20...1700}, \%$
Варіант 1				
0,15	9750	3484	36	46
0,20	18375	6025	33	43
0,25	29700	8906	30	40
0,30	39780	10916	27	42
0,35	55815	15070	→—	43
0,40	73500	19816	→—	41
0,45	90060	24249	→—	→—
0,50	105188	28397	→—	40
Варіант 2				
0,15	9113	3933	43	53
0,20	16470	6084	37	47
0,25	26663	9014	34	44
0,30	37260	10416	28	38
0,35	51150	13350	26	36
0,40	67628	17661	→—	→—
0,45	80850	20871	→—	→—
0,50	94620	24236	→—	→—
Варіант 3				
0,15	9000	3668	41	51
0,20	17063	5395	32	42
0,25	25155	6840	27	37
0,30	33750	8811	26	36
0,35	49500	11862	24	34
0,40	61875	14820	→—	→—
0,45	77700	18120	23	33
0,50	91800	20814	→—	32

$$\eta_{\text{і}} = \frac{1}{1 + \frac{F_1}{F_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_2}}}, \quad (3)$$

де F_1, F_2 — периметри індуктора і тіла, що нагрівається; ρ_1, ρ_2 — питомий електричний опір міді та матеріалу тіла, що нагрівається; μ_2 — відносна магнітна проникність матеріалу тіла, що нагрівається.

Використовуючи експериментально отримані значення $\eta_{\text{нерж}}$ (табл. 2) за допомогою виразу (3) для питомого електричного опору вольфраму при 20 та 1700 °С були розраховані величини електричного ККД системи індуктор–секційна стінка–монокристал η_{w} . Вони показують, що процес індукційного нагрівання плоского монокристала вольфраму від температури навколишнього середовища до 1700 °С супроводжується підвищенням ефективності нагрівання більш ніж у два рази.

При цьому усереднений електричний ККД системи в розглянутому діапазоні температур складає 32...40 % (табл. 3).

Отримані експериментальні дані показали, що при 60%-ному навантаженні генератора ($U_{\text{бнк}} = 0,5$) середній електричний ККД індукційного модуля $\eta_{\text{w}}^{20...1700}, \%$ для першого варіанту конструкції становить 40, для другого — 36, а для третього — 32 %. Також встановлено, що для першого варіанту характерно більш рівномірне нагрівання по висоті зливка із питомою потужністю 51, 53 та 54 Вт/см² відповідно для першої, другої та третьої секцій (рис. 3).

Прийнятий підхід не враховує усієї суті фізичних явищ при передачі електромагнітної енергії в досліджуваній системі і визначені величини електричного ККД індукційного модуля характеризують його ефективність з певним наближенням.

Таблиця 3. Порівняльні показники ефективності варіантів конструкції індукційних модулів

Варіант	$U_{\text{бнк}}$	Питома потужність по секціях, Вт/см ²			$\eta_{\text{w}}^{20...1700}, \%$
		I секція	II секція	III секція	
1	0,5	51	53	54	40
2	→—	61	19	59	36
3	→—	49	20	49	32

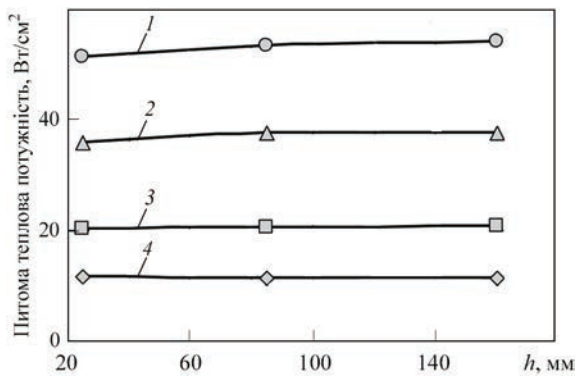


Рис. 3. Розподіл питомої потужності індукційного нагрівання по висоті (h) індукційного модуля (варіант 1) для $U_{\text{бнк}}$: 1 — 0,5; 2 — 0,4; 3 — 0,3; 4 — 0,2

Проте і при такому визначенні вони узгоджуються зі значеннями електричного ККД установок ІПСК та ПХТ, що складають для переплавлення сталі Х18Н9Т 27...40 % [9]. Електричний ККД системи, який встановлено згідно з цією методикою, суттєво спрощує процедуру складних розрахунків взаємопов'язаних задач електромагнітного поля та нестационарної теплопровідності та може бути використаний у якості первинної інформації щодо аналізу ефективності та раціональності конструкції модуля височастотного нагріву.

Висновки

1. Досліджено вплив конструкційних особливостей багатосекційного індуктора на коефіцієнт корисної дії височастотного нагрівального модуля при нагріванні монокристалів вольфраму у формі тіл обертання діаметром 85 мм.

2. Показано, що змінюючи діаметр секцій індуктора та кількість його витків можна у широких межах впливати на характер тепловнесення по висоті тіла та забезпечувати його нагрівання із заданим розподілом питомої густини нагріву.

3. Встановлено, що максимальний коефіцієнт корисної дії індукційного модуля та лінійне розподілення питомої густини нагріву по висоті тіла, що нагрівається, забезпечує модуль із п'ятивитковою другою та шестивитковою третьою секцій внутрішнім діаметром, рівним внутрішньому діаметру секціонованої стінки.

Робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України в рамках проекту «Розроблення інноваційної 3D технології вирощування монокристалічних тиглів із вольфраму».

Список літератури

- Li Juan, Hu Xiao-Bo, Wang Ying-Min et al. (2007) Comparison of different crucible materials for the growth of AlN crystals. *Chinese J. Struct. Chem.*, 26(10), 1203–1207.
- Dhanaraj G., Byrappa K., Prasad V. (2010) *Springer Handbook of Crystal Growth*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.

- Miyagawa C., Kobayashi T., Taishi T. et al. (2013) Demonstration of crack-free c-axis sapphire crystal growth using the vertical Bridgman method. *J. of Crystal Growth.*, 372, 95–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.03.006>
- Schlesser R., Dalmau R., Zhuang D. et al. (2005) Crucible materials for growth of aluminum nitride crystals. *Ibid.*, 281, 75–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.03.014>
- Glebovsky V. (2019) *Crystal growth*. DOI: <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73360>
- Shapovalov V., Yakusha V., Manulyk A. (2015) Large refractory metals single crystals grown by plasma-induction zone melting. *XXIV Inter. Materials Research Congress-2015 (August 16–20, 2015 Cancun, Mexico)*. Sociedad Mexicana de Materiales A.C., S6B-0007 p.
- Shapovalov V., Nikitenko Yu., Yakusha V. et al. (2020) Manufacture of super large tungsten single crystals in the form of rotation bodies. *Problems of Atomic Science and Technology*, 125(1), 60–63. DOI: <https://doi.org/10.46813/2020-125-060>
- Патон Б.Е., Шаповалов В.А., Григоренко Г.М. и др. (2016) *Плазменно-индукционное выращивание профилированных монокристаллов тугоплавких металлов*. Киев, Наукова думка.
- Григоренко Г.М., Шейко И.В. (2006) *Индукционная плавка металлов в холодных тиглях и секционных кристаллизаторах*. Киев, Сталь.
- Шейко И.В., Высоцкий Г.А., Лагаш Ю.В. и др. (1988) Исследование энергетических характеристик системы индуктор–кристаллизатор–садка установок индукционного переплава в секционном кристаллизаторе. *Пробл. спец. электрометаллургии*, 2, 62–65.
- Якуша В.В. (2017) *Удосконалення технології вирощування крупних плоских монокристалів вольфраму в печі з плазмово-індукційним нагрівом*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, ІЕЗ ім. С.О. Патона, 22.
- Юрасов Е.В. (1938) *Ламповые генераторы и передатчики*. Москва, Воениздат.
- Зиновьев В.Е. (1989) *Теплофизические свойства металлов при температурах*. Справочник. Москва, Металлургия.
- Слухотский А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А. и др. (1981) *Установки индукционного нагрева*: учеб. пособ. для вузов. Ленинград, Энергоиздат.

References

- Li Juan, Hu Xiao-Bo, Wang Ying-Min et al. (2007) Comparison of different crucible materials for the growth of AlN crystals. *Chinese J. Struct. Chem.*, 26(10), 1203–1207.
- Dhanaraj G., Byrappa K., Prasad V. (2010) *Springer Handbook of Crystal Growth*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.
- Miyagawa, C., Kobayashi, T., Taishi, T. et al. (2013) Demonstration of crack-free c-axis sapphire crystal growth using the vertical Bridgman method. *J. of Crystal Growth.*, 372, 95–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.03.006>
- Schlesser, R., Dalmau, R., Zhuang, D. et al. (2005) Crucible materials for growth of aluminum nitride crystals. *Ibid.*, 281, 75–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.03.014>
- Glebovsky, V. (2019) *Crystal growth*. DOI: <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73360>
- Shapovalov, V., Yakusha, V., Manulyk, A. (2015) Large refractory metals single crystals grown by plasma-induction zone melting. *Proc. of XXIV Inter. Materials Research Congress-2015 (August 16–20, 2015 Cancun, Mexico)*. Sociedad Mexicana de Materiales A.C., S6B-0007.
- Shapovalov, V., Nikitenko, Yu., Yakusha, V. et al. (2020) Manufacture of super large tungsten single crystals in the form of rotation bodies. *Problems of Atomic Sci. and Technol.*, 125(1), 60–63. DOI: <https://doi.org/10.46813/2020-125-060>
- Paton, B.E., Shapovalov, V.A., Grigorenko, G.M. et al. (2016) *Plasma-induction growing of profiled single crystals of refractory metals*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

9. Grigorenko, G.M., Shejko, I.V. (2006) *Induction melting of metals in cold crucibles and sectional moulds*. Kyiv, Stal [in Russian].
10. Shejko, I.V., Vysotsky, G.A., Latash, Yu.V. et al. (1988) Investigation of energy characteristics of inductor-mould system of induction remelting units in sectional mould. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 2, 62–65 [in Russian].
11. Yakusha, V.V. (2017) *Improvement of technology for growing of tungsten large flat single crystals in furnace with plasma-induction heating*: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
12. Yurasov, E.V. (1938) *Tube generators and transmitters*. Moscow, Voienizdat [in Russian].
13. Zinoviev, V.E. (1989) *Thermophysical properties of metals at temperatures*: Refer. Book. Moscow: Metallurgiya [in Russian].
14. Slukhotsky, A.E., Nemkov, V.S., Pavlov, N.A. et al. (1981) *Induction heating units: Manual for higher school educ.* Leningrad, Energoizdat [in Russian].

INVESTIGATION OF ENERGY BALANCE IN THE SYSTEM OF THE CRYSTAL-HIGH-FREQUENCY HEATING MODULE

AT PLASMA-INDUCTION GROWING OF REFRACTORY METAL SINGLE-CRYSTALS

V.O. Shapovalov, Yu.O. Nykytenko, O.M. Gnizdylo, V.R. Burnashev, O.V. Karuskevych, T.I. Dubova, V.V. Yakusha
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevyeh Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Considered is the issue of optimization of the design of the induction heating module at development of the equipment and technology for plasma-induction growing of superlarge refractory tungsten single-crystals in the form of bodies of revolution. The influence of induction module geometry on energy characteristics of the system of multisection inductor-single crystal was studied and the most rational design of the high-frequency heater was developed. The nature of distribution of the specific density of thermal energy over the surface of the crystal that is heated in the high-frequency field of the inductor of a particular geometry, ensures formation of the specified temperature field and a certain level of temperature gradients in the volume. An experimental procedure for determination of heat-loaded components of the equipment using a metal water-cooled simulator was applied as the main research tool. It is shown that the average electric efficiency of the induction module for the first variant of module design is equal to 40, for the second to 36, and for the third to 32 %. It was established that the first variant is characterized by a more uniform heating along the ingot height with specific power of 51, 53 and 54 W/cm² for the first, second and third sections of the module, respectively. The electric efficiency of the system, established in keeping with the applied procedure, essentially simplifies the process of complex calculations of inter-related problems of the electromagnetic field and non-stationary heat conductivity and it can be used as initial data for analysis of the efficiency and rational design of the high-frequency heating module. Ref. 14, Tabl. 3, Fig. 3.

Key words: tungsten single-crystal; plasma-induction method; induction heating module; inductor; calorimetry

Надійшла до редакції 21.07.2022

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING ENGINEERING —
JOINING, CUTTING, SURFACING



LET'S JOIN THE WORLD!

11. – 15. September, 2023

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com



