

УДК 621.791.754.264

Корінець І. П., Бойко В. П., Бойко Д. В.

НАГРІВАННЯ І ПЛАВЛЕННЯ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ АУСТЕНІТНОЇ СТАЛІ

Одним із перспективних способів зварювання високолегованих аустенітних сталей є дугове зварювання порошковим дротом. Більшість розроблених марок порошкового дроту є газозахисними, тобто потребують додаткового газового захисту, і лише незначна кількість дротів є самозахисними. Застосування самозахисних порошкових дротів має переваги перед ручним дуговим зварюванням покритим електродом: більш високу продуктивність при високій мобільності процесу, тому що не потрібен захист зони зварювання газом. Але самозахисні дроти не допускають перегрівання на вильоті і завчасної дисоціації карбонатів, які забезпечують газовий захист зварювальної ванни. До того ж металева оболонка із високолегованої сталі має в декілька разів більший питомий електроопір, ніж оболонка із низько-вуглецевої сталі, що сприяє перегріванню дроту на вильоті. Нагрівання і плавлення порошкових дротів для зварювання високолегованих сталей, на відміну від дротів для зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей, недостатньо представлено в літературі [1–3].

Легування металу шва при використанні порошкових дротів для високолегованих сталей має декілька варіантів: 1) нелегована стрічка і легувальна шихта, 2) легувальна стрічка і не легувальна шихта. 3) легувальні стрічка і шихта. Стрічка із аустенітної сталі забезпечує легування металу шва подібно за складом основному металу, але вона схильна до наклепу при деформації, що ускладнює протяжку дроту (потрібні проміжні відпали). Використання стрічки із аустенітної сталі ускладнюється також її високим електроопором. Більш доцільним може бути 3-й комбінований варіант легування, коли стрічка є менш легованою, має менший електроопір і високу здатність до пластичного деформування без наклепу, а необхідне додаткове легування виконується за рахунок шихти.

Метою роботи являється розробка математичної моделі нагріву та плавлення порошкового дроту під час зварювання аустенітних сталей.

Розробка математичної моделі дає можливість вирішення 2-х задач: 1) визначення максимальної температури нагріву дроту на вильоті; 2) визначення лінійної або масової швидкості плавлення дроту. Вирішення 1-ї задачі дозволяє оцінити хімічні процеси в шихті (дисоціацію компонентів, окислення легувальних елементів тощо). Вирішення 2-ї задачі необхідне для оцінки продуктивності і оптимізації режиму зварювання. Для розробки математичної моделі складаємо баланс енергії на вильоті електродного дроту [1].

На схемі фізичної моделі (рис. 1) показано, що надходження теплової енергії до дроту має місце від нагрівання вильоту струмом – Q_e і від дії дуги з торця електродного дроту – Q_{me} . Витрачається тепла енергія на нагрів і плавлення металевої оболонки дроту – Q_{mo} і на нагрів і плавлення шихти Q_{sh} . Втратами енергії на випромінювання та конвекцію бічною поверхнею дроту нехтуємо.

$$Q_e + Q_{me} = Q_{mo} + Q_{sh} \quad (1)$$

На вильоті L_e згідно закону Ленця-Джоуля нагрівається металева оболонка дроту і виділяється тепла енергія:

$$Q_{\epsilon} = I_3^2 \cdot R_{\epsilon} \cdot t_{\epsilon} = I_3^2 \cdot \frac{r_{mo} \cdot L_{\epsilon}}{F_{mo}} \cdot t_{\epsilon}, \quad (2)$$

де I_3 – сила зварювального струму; R_{ϵ} – опір дроту на вильоті; t_{ϵ} – час перебування елемента вильоту під дією струму; ρ_{mo} і F_{mo} – питомий електричний опір і площа поперечного перерізу металевої оболонки дроту.

На торці електродного дроту енергія виділяється переважно на анодній плямі і дорівнює:

$$Q_{me} = I_3 \cdot (U_a + j_{\epsilon}) \cdot t_{\epsilon}, \quad (3)$$

де U_a – падіння напруги на аноді; j_{ϵ} – робота виходу електрона.

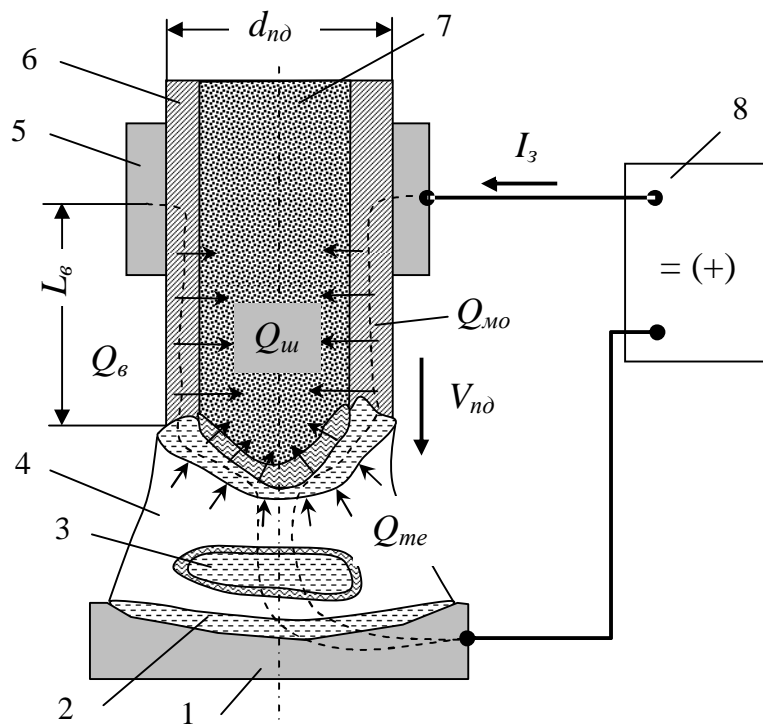


Рис. 1. Фізична модель нагріву і плавлення порошкового дроту:

1 – основний метал; 2 – зварювальна ванна; 3 – крапля електродного металу, вкрита шлаком; 4 – дуга; 5 – струмовідвід; 6 – металева оболонка дроту; 7 – шихта; 8 – джерело живлення

Витрачається теплова енергія на нагрів металевої оболонки до температури плавлення і далі майже до температури кипіння металу (приймаємо $0,9 \cdot T_{кип}$):

$$Q_{mo} = M_{mo} \cdot H_{кр.} = F_{mo} \cdot L_{\epsilon} \cdot g_{mo} \cdot H_{кр.} = F_{mo} \cdot L_{\epsilon} \cdot g_{mo} \cdot [C_{mo} \cdot (T_{пл} - T_o) + \Delta H_{пл} + C_{mo.рід} \cdot (0,9 \cdot T_{кип} - T_{пл})], \quad (4)$$

де M_{mo} , F_{mo} , g_{mo} – маса, площа поперечного перетину і густина металевої оболонки дроту; $H_{кр.}$, $\Delta H_{пл}$ – тепловміст крапель і прихована теплота плавлення електродного металу; C_{mo} і $C_{mo.рід}$ – питома теплоємність металевої оболонки в твердому і рідкому стані; T_o , $T_{пл}$ і $T_{кип}$ – температура початкова, плавлення і кипіння металевої оболонки.

Частина теплової енергії витрачається на нагрівання шихти до температури плавлення і далі, припускаємо, що шлак перегрівається від дії дуги теж до $0,9 \cdot T_{кип}$:

$$Q_{ш} = M_{ш} \cdot H_{ш} = F_{ш} \cdot L_{ш} \cdot g_{ш} \cdot H_{ш} = \\ = F_{ш} \cdot L_{ш} \cdot g_{ш} \cdot [C_{ш} \cdot (T_{шл} - T_o) + \Delta H_{шл} + C_{шл} \cdot (0,9 \cdot T_{кип} - T_{шл})], \quad (5)$$

де $M_{ш}$, $F_{ш}$, $g_{ш}$ – маса, площа поперечного перетину і густина шихти; $H_{ш}$, $\Delta H_{шл}$ – тепло-вміст шихти і прихована теплота плавлення шихти; $C_{ш}$ і $C_{шл}$ – питома теплоємність шихти і шлаку; T_o , $T_{шл}$ і $T_{кип}$ – температура початкова, плавлення і кипіння шлаку.

Для визначення температури нагріву $T_{ш}$ електродного дроту на вильоті за час дії $t_{ш}$ струму запишемо рівняння балансу енергії без витрат на плавлення:

$$I^2_{з} \cdot \frac{r_{мо} \cdot L_{ш}}{F_{мо}} \cdot t_{ш} = F_{мо} \cdot L_{ш} \cdot g_{мо} \cdot [C_{мо} \cdot (T_{ш} - T_o)] + F_{ш} \cdot L_{ш} \cdot g_{ш} \cdot [C_{ш} \cdot (T_{ш} - T_o)]. \quad (6)$$

Звідси температура нагріву $T_{ш}$ елемента дроту $\Delta L_{ш}$ на вильоту за час дії струму $t_{ш}$ складає:

$$T_{ш} - T_o = \frac{r_{мо}}{F_{мо} \cdot (C_{мо} \cdot F_{мо} \cdot g_{мо} + C_{ш} \cdot F_{ш} \cdot g_{ш})} \cdot I^2_{з} \cdot t_{ш}. \quad (7)$$

Коли елемент дроту $\Delta L_{ш}$ на вильоті сягає дуги (рис. 2.), то настає максимальний час його перебування під дією струму, який дорівнює:

$$t_{ш, \max} = \frac{L_{ш}}{V_{нд}}. \quad (8)$$

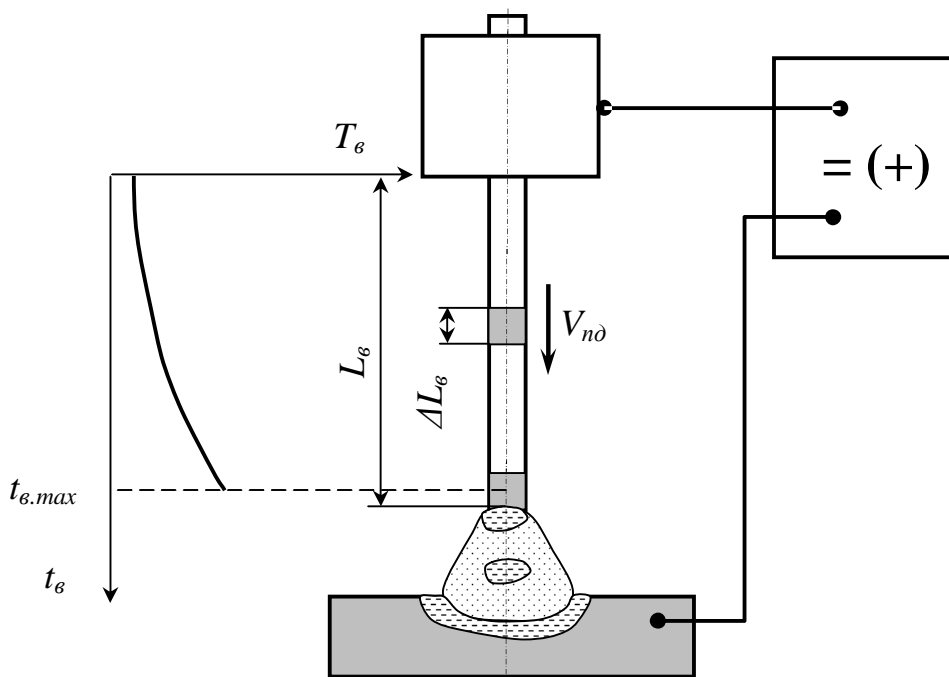


Рис. 2. Схема нагрівання струмом дроту на вильоті

Звідси максимальна температура нагріву $T_{ш, \max}$ елемента вильоту $\Delta L_{ш}$ у торця дроту дорівнює:

$$T_{ш, \max} - T_o = \frac{r_{мо}}{F_{мо} \cdot (C_{мо} \cdot F_{мо} \cdot g_{мо} + C_{ш} \cdot F_{ш} \cdot g_{ш})} \cdot \frac{L_{ш} \cdot I^2_{з}}{V_{нд}}. \quad (9)$$

Для визначення швидкості плавлення порошкового дроту складаємо баланс енергії з додаванням витрат на плавлення і перегрівання металевої оболонки і шихти. Якщо ліву частину балансу (2) і (3) і праву частину (4) і (5) поділити на час t_e , то отримаємо швидкість плавлення дроту $V_{пд}$:

$$V_{пд} = \frac{U_a + j_e}{g_{мо} \cdot F_{мо} \cdot H_{кр} + g_{ш} \cdot F_{ш} \cdot H_{ш}} \cdot I_3 + \frac{r_{мо} \cdot L_e}{F_{мо} (g_{мо} \cdot F_{мо} \cdot H_{кр} + g_{ш} \cdot F_{ш} \cdot H_{ш})} \cdot I_3^2. \quad (10)$$

За даними довідників Варгафтика Н. Б. [4] і Неймарка Б. Е. [5] побудовано графіки залежності теплофізичних властивостей низьковуглецевої сталі 08кп і високолегованої хромистої 08X13, із яких виготовляються оболонки порошкових дротів.

Відомості про теплофізичні властивості компонентів шихти дуже обмежені. Відомості про густину компонентів шихти використано із роботи [6], теплоємність і тепловміст розраховано за даними робіт [7, 8]. В розрахунках також використано експериментально визначений тепловміст крапель електродного металу при зварюванні порошковим дротом [9]. Із порівняння фізичних властивостей металу оболонки дротів (рис. 3) звертаємо увагу на те, що за електроопором сталей 08кп і 08X13 спостерігається суттєва різниця в 1,5...4 рази в діапазоні низьких температур 20...800 °С, характерних для нагріву вильоту.

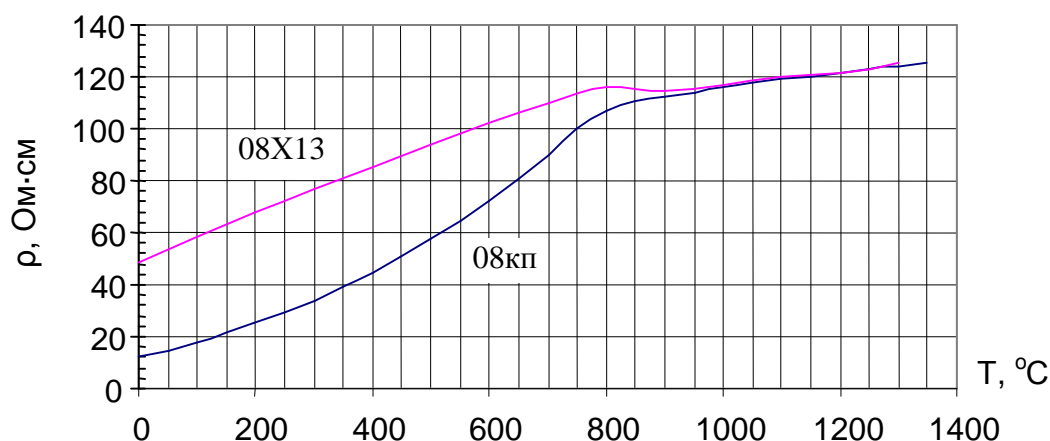


Рис. 3. Залежність питомого електроопору металу оболонки дроту від температури

Для перевірки адекватності математичної моделі використано дріт ПП-АНВ12 для зварювання аустенітних сталей типу X18H10 [10]. Цей дріт має трубчасту конструкцію і газошлакову систему компонентів $\text{CaCO}_3\text{--CaF}_2\text{--TiO}_2$ карбонатно-флюоритового типу. До складу шихти входять також легувальні компоненти: металеві порошки хрому, нікелю, марганцю і феросплави кремнію і ніобію. Діапазон режимів зварювання: діаметр дроту $d_d = 1,6$ мм, металева оболонка із феритної сталі, зварювальний струм зворотної полярності $I_3 = 120\text{...}240$ А, напруга $U = 24\text{...}34$ В, швидкість подачі дроту $V_{пд} = 36,5\text{...}97,0$ мм/с, швидкість зварювання $V_3 = 3\text{...}10$ мм/с, виліт дроту $L_b = 12$ мм.

Нагрівання дроту на вильоті суттєво залежить від питомого електричного опору металевої оболонки дроту (рис. 4, а, б). Витрати енергії на нагрівання шихти дещо зменшують температуру нагріву вильоту (рис 4, в). Діапазон максимальної температури нагріву вильоту складає:

- оболонки із сталі 08кп – 90...110 °С;
- оболонки із сталі 08X13 – 400...500 °С;
- порошкового дроту з оболонкою із сталі 08X13 – 280...400 °С.

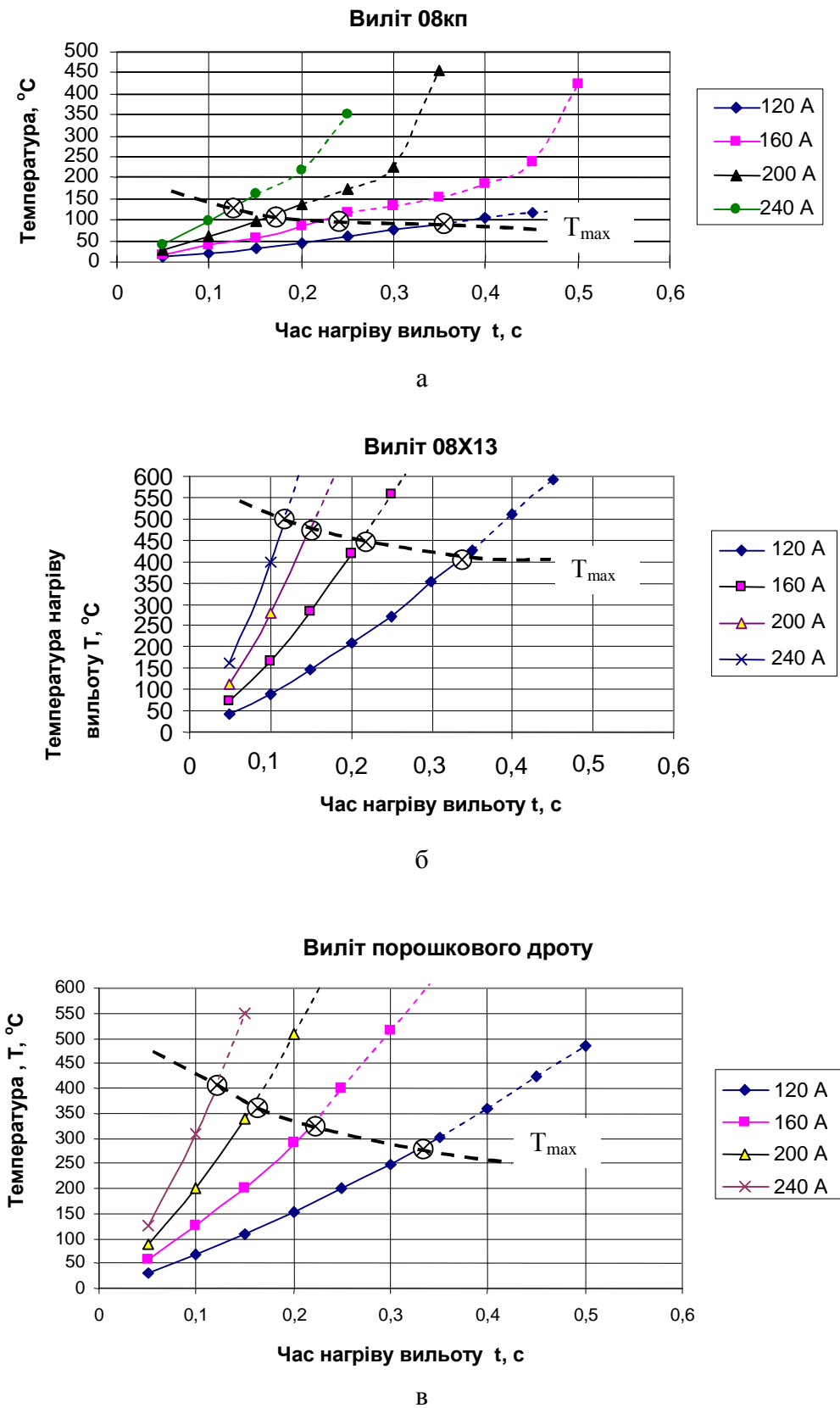


Рис. 4. Нагрівання вильоту:
 а – із сталі 08кп; б – із сталі 08X13; в – порошкового дроту

Після спрощень і підстановки фізичних характеристик для металевої оболонки і шихти порошкового дроту $d_{nd} = 1,6$ мм з $L_в = 12$ мм отримуємо просту формулу для інженерних розрахунків:

$$V_{nd} = 0,313 \cdot I_з + 3,15 \cdot 10^{-4} \cdot I_з^2. \quad (11)$$

Порівняння експериментальної швидкості плавлення дроту з розрахунковою показує достатній рівень адекватності моделі (табл. 1) при зварюванні на струмах 160...240 А.

Таблиця 1

Порівняння експериментальної і розрахункової швидкостей плавлення порошкового дроту

| $I_з$, А | Експериментальна V_{nd} , мм/с | Розрахункова V_{nd} , мм/с | Похибка, % |
|-----------|----------------------------------|------------------------------|------------|
| 120 | 36,5 | 42,11 | + 15 |
| 160 | 56,0 | 58,16 | + 4 |
| 200 | 77,0 | 72,22 | - 2 |
| 240 | 97,0 | 93,28 | - 4 |

ВИСНОВКИ

1. Математичні експерименти показали, що нагрівання дроту на вильоті і швидкість плавлення суттєво залежать від струму і довжини вильоту, електроопору металевої оболонки дроту, анодного падіння напруги і тепловмісту крапель електродного металу і шлаку. Похибки пов'язані з неможливістю врахування залежності анодної напруги ($U_a = 1,2...3,3$ В) і тепловмісту крапель електродного металу ($H = 1900...2200$ Дж/г) від струму.

2. При виготовленні порошкового дроту для зварювання високолегованих сталей доцільно використовувати комбінований метод легування: обмежене легування металевої оболонки дроту з метою зменшення електроопору і додаткове легування через шихту.

3. Швидкість плавлення порошкового дроту може бути використана для вирішення задач практичного характеру – розрахунку та оптимізації режимів зварювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Коринец И. Ф. Математическая модель плавления электродной проволоки при дуговой сварке / И. Ф. Коринец // Автоматическая сварка. – 1995. – № 10. – С. 39–43.
2. Потапьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А. Г. Потапьевский. – М. : Машиностроение, 1974. – 240 с.
3. Рабкин Д. М. Энергетическое исследование приэлектродных областей мощной сварочной дуги / Д. М. Рабкин, Д. М. Рабкин // Автоматическая сварка. – 1951. – № 2. – С. 3–25.
4. Теплофизические свойства веществ : справочник / Под ред. проф. Варгафтика Н. Б. – Москва – Ленинград : Энергия, 1956. – 367 с.
5. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: справочник / Под ред. канд. техн. наук Б. Е. Неймарка. – Москва – Ленинград : Энергия, 1967. – 300 с.
6. Тархов Н. А. Производство покрытых электродов / Н. А. Тархов, З. А. Сидлин, А. Д. Рахманов. – М. : Высшая школа, 1986. – 288 с.
7. Уикс К. Е. Термодинамические свойства 65 элементов, их окислов, галогенидов, карбидов и нитридов / К. Е. Уикс, Ф. Е. Блок. – М. : Металлургия, 1965. – 240 с.
8. Кэй Дж. Таблицы физических и химических постоянных / Дж. Кэй, Т. Лэби. – М. : Физматгиз, 1962. – 248 с.
9. Походня И. К. Сварка порошковой проволокой / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепков. – Киев : Наукова думка, 1972. – 224 с.
10. Сварочные материалы для сварки сталей и чугуна : справочник / Под ред. канд. техн. наук В. Н. Горпенюка. – Киев : 1996. – 530.