

УДК 621.791

А.Є. Пірумов, Є.П. Чвертко, М.В. Шевченко

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ З КОРОТКИМИ ЗАМИКАННЯМИ
ДЛЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ**

The paper analyzes the influence of basic parameters of electric arc MAG welding — welding current, arc voltage, electrode diameter and outlet — on electrical processes in welding circuit. Also, we determine basic time parameters of electrode metal transfer for different transfer modes as well as their relationship with basic welding parameters. Furthermore, we develop the stochastic dynamical mathematical model of the welding process. The model includes electrical, physical and welding characteristics of equipment, preset values of welding parameters and electrode metal transfer mode. The model output is presented as electrical process parameters (current and voltage) oscillograms. Statistical tests prove the model adequacy. We determine that it is actually possible to apply the developed model in the quality monitoring system for electric arc welding.

Вступ

Науково-технічний прогрес зумовив поширення використання комп'ютерних технологій на стадії підготовки виробництва, зокрема при розробленні спеціального програмного забезпечення, яке дає можливість віртуально відтворювати технологічні процеси. Наприклад, для дугового зварювання розроблено програми, за допомогою яких можна моделювати формування шва, розраховувати напруження та деформації у зварних конструкціях тощо. Математичне моделювання процесів зварювання також широко застосовують при створенні нового обладнання або при розробленні систем моніторингу [1, 2].

При створенні систем моніторингу якості зварних з'єднань доцільно використовувати статистичні моделі. Побудова таких моделей не потребує детального математичного опису всіх процесів, які відбуваються під час зварювання, і базується на статистичному аналізі вхідних і вихідних параметрів. Тому такі моделі відображають закономірності процесу зварювання конкретного виробу із застосуванням обладнання конкретного типу. Такий підхід дає змогу врахувати комплексний вплив багатьох факторів, складних для математичного опису з використанням традиційних математичних моделей, нехтування якими призводить до значних відмінностей при зіставленні результатів реального та "віртуального" процесів зварювання.

Постановка задачі

Побудова систем моніторингу якості зварних з'єднань на основі штучних нейронних мереж потребує великої кількості статистичних

даних про електричні процеси у зварювальному колі. Отримати ці дані можна або в результаті проведення серії натурних експериментів, або за допомогою математичного моделювання. Тому метою роботи є створення математичної моделі електричних процесів, які відбуваються під час зварювання плавким електродом у вуглекислому газі, для побудови системи моніторингу якості зварних з'єднань.

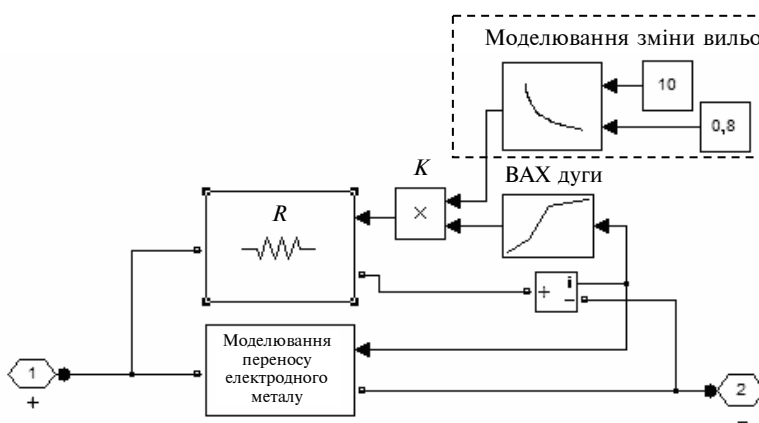
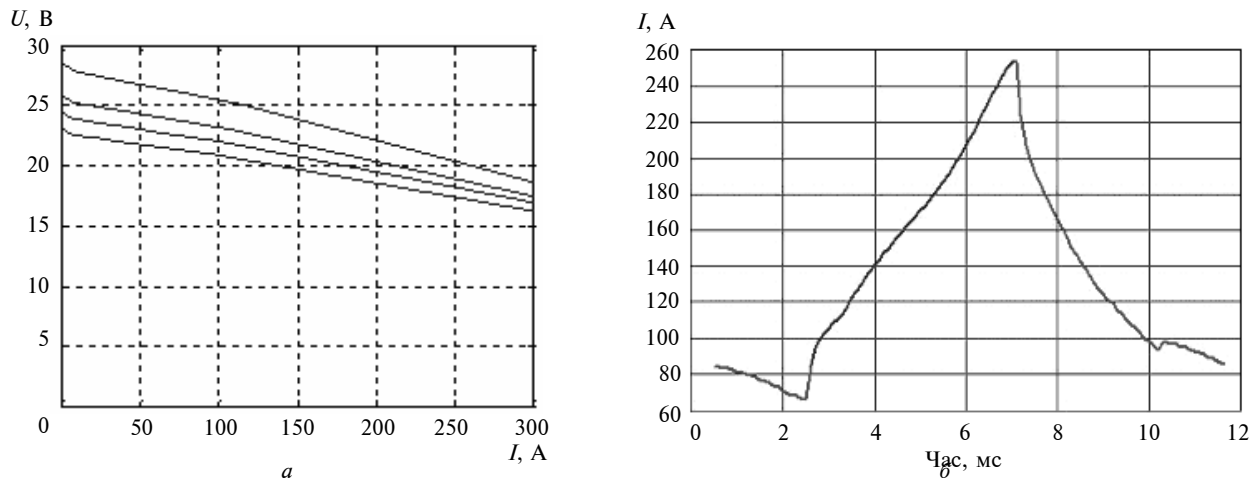
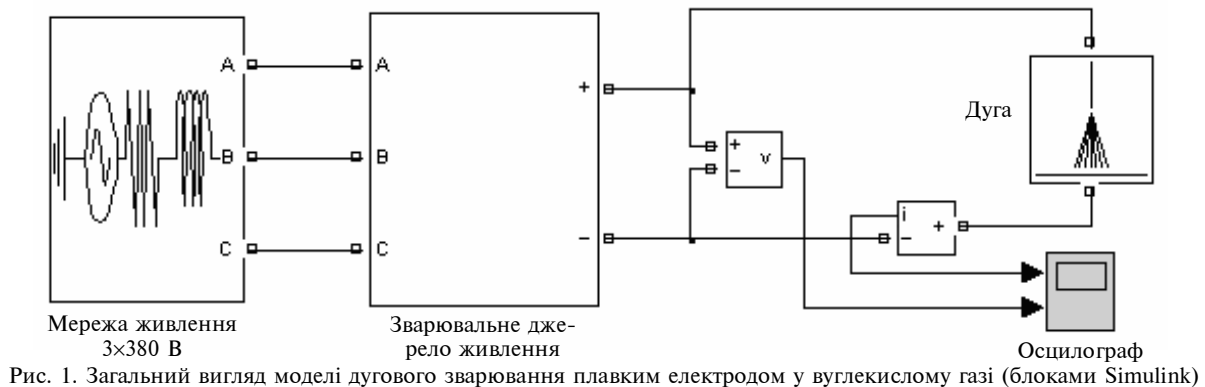
Модель дугового зварювання плавким електродом у вуглекислому газі

Для розроблення математичної моделі (комп'ютерної імітації) процесу використовували пакет графічного моделювання лінійних та нелінійних динамічних систем Simulink 6.0, що входить до складу середовища прикладних програм MatLab.

Модель складається з трьох основних блоків: "Мережа живлення", "Зварювальне джерело живлення", "Дуга" (рис. 1).

Блок "Мережа живлення" є стандартним блоком, що входить до набору бібліотек Simulink [3], і являє собою джерело трифазної напруги з амплітудою 380 В і частотою 50 Гц. Блок дає можливість здійснювати моделювання зміни внутрішнього активного опору й індуктивності мережі живлення і тим самим відтворити властивості промислової мережі. При моделюванні не враховували коливання частоти мережі, оскільки вони є досить малими (менше 2 %) й істотно не впливають на роботу зварювального джерела живлення.

Джерело живлення являє собою математичну модель трифазного випрямляча, що описується вольт-амперною характеристикою (рис. 2, а) (в даному випадку жорсткою із нахилом



–0,04 В/А), швидкістю наростання струму зварювання (рис. 2, б), напругою неробочого ходу. Зазначені властивості при моделюванні можна змінювати в широких межах.

Робота блока “Дуга” (рис. 3) основана на статистичній оцінці емпіричних даних, отри-

маних дослідженням зварювання в CO_2 із різними параметрами режиму зварювання (струм, напруга, діаметр і виліт електрода).

Струм при моделюванні горіння дуги формується за допомогою змінного активного опору R , значення якого визначається статичною вольт-амперною характеристикою дуги та величиною вильоту електрода I_B . Статичну ВАХ дуги отримали експериментально, в моделі її задано за допомогою блоку табличної інтерполяції Simulink.

Зміну вильоту електрода I_B враховували через введення додаткового коефіцієнта K зміни напруги на виході блоку “ВАХ дуги”:

$$K = -0,029 \cdot I_B^2 + 0,1 \cdot I_B + 0,93.$$

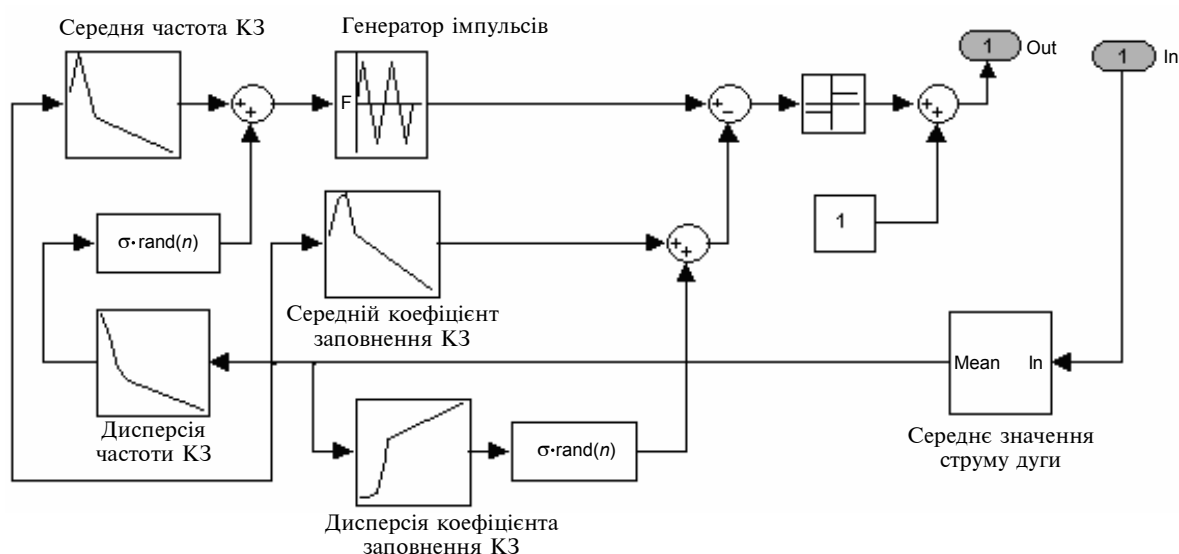
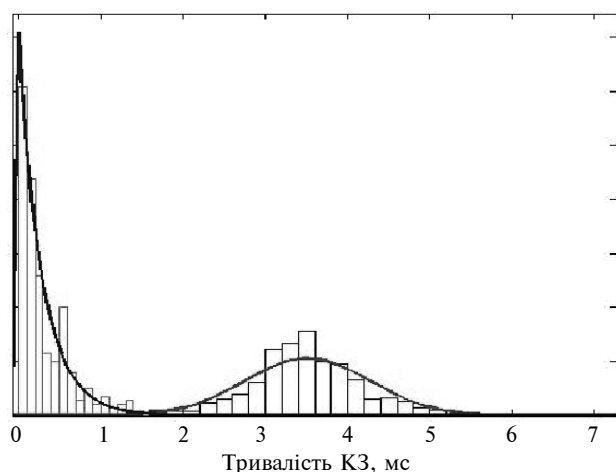
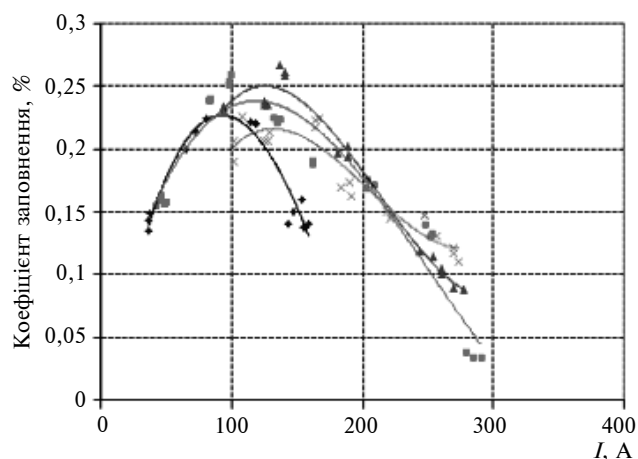


Рис. 4. Блок моделювання переносу електродного металу

Рис. 5. Типова гістограма розподілу тривалості КЗ при зварюванні в CO_2 Рис. 6. Залежність коефіцієнта заповнення КЗ від струму зварювання; діаметр дроту: \blacklozenge — 0,8 мм; \blacksquare — 1,0 мм; \blacktriangle — 1,2 мм; \times — 1,6 мм

Для процесу зварювання у вуглекислому газі характерні регулярні короткі замикання (КЗ) дугового проміжку. Параметри цих КЗ: тривалість $t_{\text{к.з}}$, частота $f_{\text{к.з}}$ і коефіцієнт заповнення D (відношення тривалості коротких замикань $t_{\text{к.з}}$ до часу одного періоду зварювання $T_{\text{ц}}$), залежать від режиму зварювання. Вони визначаються блоком “Моделювання переносу електродного металу” (рис. 4), який побудовано на базі емпіричних залежностей.

Встановлено, що тривалість коротких замикань залежить від режиму зварювання. Закон розподілу випадкової величини — тривалості КЗ, визначався за допомогою оцінки максимальної різниці між теоретичною та емпірич-

ною функціями розподілу (критерій Колмогорова). Гістограми розподілу тривалості КЗ, як правило, двомодальні (рис. 5), що свідчить про наявність двох видів КЗ: випадкових, за яких електродний метал не переходить до зварювальної ванни (ліва частина гістограми), та КЗ, за яких відбувається перехід електродного металу (права частина гістограми) [4].

Аналіз частин гістограм окремо показує, що найчастіше значення тривалості КЗ розподіляються таким чином: ліва частина (випадкові КЗ) — за розподілом Вейбула, права частина (КЗ із переходом розплавленого металу) — за логарифмічно нормальним розподілом.

Експериментально встановлено, що зі збільшенням струму коефіцієнт заповнення і часто-

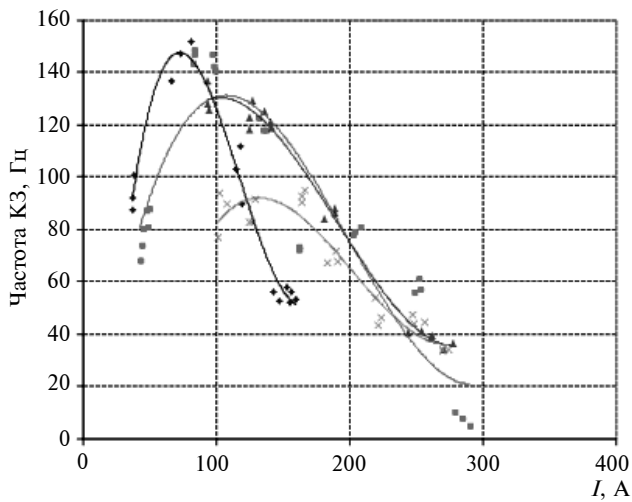


Рис. 7. Залежність частоти КЗ від струму зварювання; діаметр дроту: —◆— 0,8 мм; —■— 1,0 мм; —▲— 1,2 мм; —×— 1,6 мм

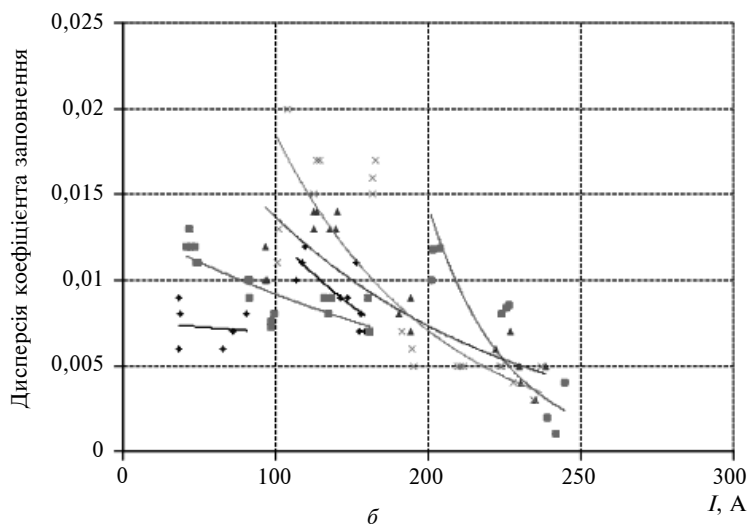
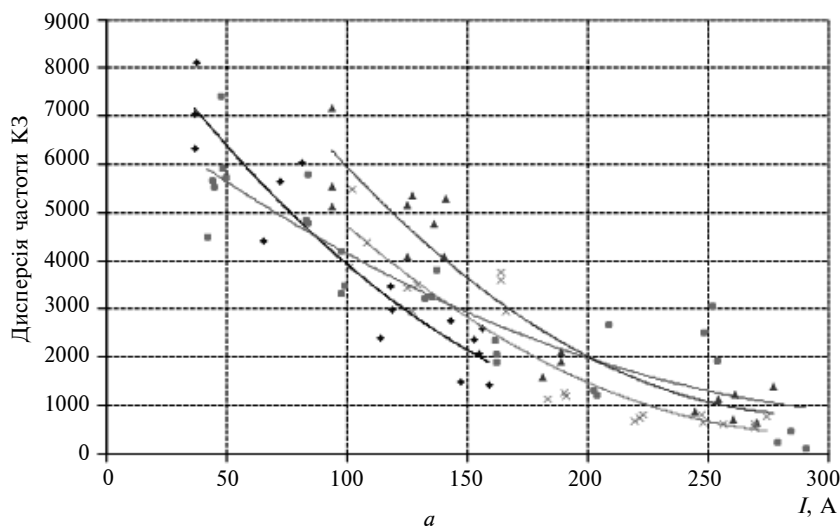


Рис. 8. Залежність дисперсії частоти (а) та коефіцієнта заповнення (б) КЗ від струму зварювання; діаметр дроту: —◆— 0,8 мм; —■— 1,0 мм; —▲— 1,2 мм; —×— 1,6 мм

та КЗ спочатку зростають, а потім спадають (рис. 6, 7), що свідчить про збільшення розмірів крапель розплавленого металу на першій ділянці графіка та поступовий перехід до крапельного переносу без КЗ на другій ділянці.

Дані про значення частоти $f_{к.з}$ та коефіцієнт заповнення D коротких замикань у модель вводили за допомогою блоку табличної інтерполяції.

Оскільки модель стохастична, велике значення для її побудови мають параметри відхилення відповідних величин, зокрема дисперсія. Залежність дисперсій частоти $f_{к.з}$ та коефіцієнта заповнення D коротких замикань від зварювального струму наведено на рис. 8.

Із збільшенням значення струму зварювання частота КЗ збільшується, діаметр крапель і втрати на розбризкування зменшуються [5]. Розрив на графіку (рис. 8, б) відповідає зміні виду переносу електродного матеріалу з крапельного із КЗ на крапельний.

Дані про значення дисперсій частоти та коефіцієнта заповнення КЗ у модель вводили способом, аналогічним введенню даних про частоту та коефіцієнт заповнення КЗ.

Адекватність розробленої моделі перевіряли за допомогою порівняння таких параметрів [4]: середнього значення тривалості КЗ ($t_{к.з\text{ сеп}}$), частоти КЗ ($f_{к.з\text{ сеп}}$), коефіцієнта заповнення КЗ ($D_{\text{сеп}}$) (таблиця). Також проводили двовибірковий F -тест (критерій Фішера) для дисперсії та парний двовибірковий t -тест (критерій Стюдента) для середніх значень електричних параметрів, отриманих у результаті моделювання (рис. 9). При цьому середні значення струму зварювання та напруги на дузі становили відповідно 80 А і 19 В для реального та "віртуального" зварювання, діаметр зварювального дроту 0,8 мм. Для перевірки використовувалися два джерела живлення: типу ПС-250 і Fronius TPS-5000.

Таблиця. Порівняння основних часових параметрів модельованого та реального зварювальних процесів

Характер процесу	Зварювальне джерело живлення ПС-250			Зварювальне джерело живлення Fronius TPS-5000		
	$t_{к.з\text{ сер}}, \text{ мс}$	$f_{к.з\text{ сер}}, \text{ Гц}$	$D_{\text{сер}}, \%$	$t_{к.з\text{ сер}}, \text{ мс}$	$f_{к.з\text{ сер}}, \text{ Гц}$	$D_{\text{сер}}, \%$
Змодельований процес	2,51	153	25,6	1,46	142	23,1
Реальний процес	2,4	147	24,2	1,65	143	22,5

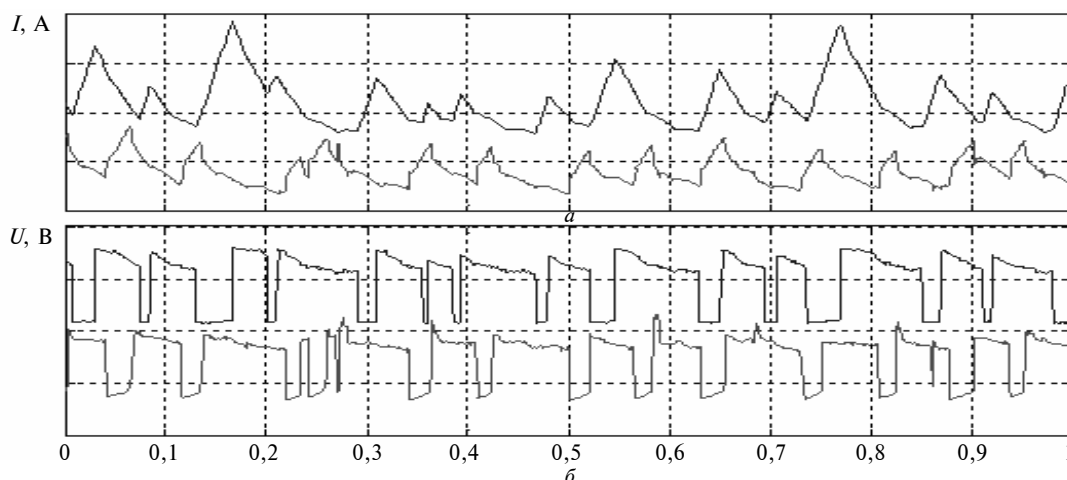


Рис. 9. Осцилограми реального (нижні криві) та змодельованого (верхні криві) процесів зварювання

Результати статистичних тестів підтверджують адекватність розробленої моделі.

Висновки

Розроблено модель електричних процесів у зварювальному колі при дуговому зварюванні плавким електродом у вуглекислому газі, яка дає змогу врахувати характеристики зварювального обладнання, параметри режиму зварювання та характер переносу електродного металу. Адекватність розробленої моделі підтверджено

результатами статистичних тестів. Отже, розроблена модель може бути застосована при створенні систем моніторингу на основі систем штучного інтелекту.

Подальші дослідження доцільно проводити в напрямі формалізації отриманих даних та підвищення точності розрахунків, що дасть можливість повністю автоматизувати процес обчислень, у т.ч. для процесів зварювання, параметри режимів яких відрізняються від використаних у ході досліджень.

1. Пірумов А.Є., Шевченко М.В., Скачков І.О. Моніторинг якості зварювання за електричними параметрами процесу // Наукові вісті НТУУ "КПІ". — 2011. — № 5. — С. 84–88.
2. Чвертко Є.П. Моделювання електричних параметрів процесу контактного стикового зварювання безперервним оплавленням // Вісник Донбаської держ. машинобуд. академії. — 2011. — № 1. — С. 172–177.
3. Дьяконов В.П., Круглов В.В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. — СПб.: Питер, 2001. — 480 с.
4. Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов / И.К. Походня, В.Н. Горпенюк, С.С. Миличенко и др.; под ред. И.К. Походни; АН УССР. Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. — К.: Наук. думка, 1990. — 224 с.
5. Потаповский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.