

ШЛЯХИ ВИКЛЮЧЕННЯ СУБ'ЄКТИВНИХ ФАКТОРІВ ТА НОВИЙ КОМПЛЕКСНИЙ КРИТЕРІЙ ОЦІНКИ СТАБІЛЬНОСТІ ІСНУВАННЯ ДУГОВОГО РОЗРЯДУ ПРИ ВИПРОБУВАННІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Одной из проблем, которая решается в работе является исключение человеческого фактора при исследовании сварочных материалов для электродуговой сварки и наплавки. Для решения данной проблемы была разработана новая оригинальная методика экспериментального определения эластичности дугового разряда и стабильности его существования, которая позволяет исключить субъективные факторы при испытании различных сварочных материалов. Создан новый комплексный коэффициент стабильности существования дугового разряда, который одновременно объединяет технологические и энергетические параметры дугового разряда. Методика и комплексный коэффициент стабильности существования дугового разряда прошли опробование при испытании промышленных штучных электродов общего назначения предназначенных для ручной дуговой сварки, результаты которого полностью совпадают с общими представлениями про испытываемые электроды.

One of the problems to be solved in the work is to eliminate the human factor in the study of welding consumables for arc welding and cladding. To solve this problem, we developed a new original technique for experimental determination of the elasticity of the arc and the stability of its existence, which eliminates subjective factors when testing various welding materials. A new complex coefficient of the continuity of the arc, which also combines the technological and energy parameters of the arc. The method and the complex coefficient of the continuity of the arc discharge were tested in a test piece of industrial general-purpose electrodes are intended for manual arc welding and the results are completely consistent with general ideas about the subjects the electrodes.

Вступ

Обсяг застосування тих чи інших зварювальних матеріалів, особливо при електродуговому зварюванні невідповідальних конструкцій, у великій мірі залежить від легкості виникнення (підпалу) дугового розряду та стабільності його існування. Ці два поняття, зазвичай, об'єднують в один параметр – „стабільність процесу зварювання”. У той же час, як приклад застосування тих чи інших марок штучних електродів одного класу визначається в основному легкістю підпалу дуги у широкому інтервалі режимів та еластичністю дуги, тобто можливістю збереження наявності дугового розряду при зміні його довжини. Особливо важливо для режимів зварювання, які характеризуються низьким вкладенням енергії, тобто малими значеннями стуму та напруги.

Режими зварювання для зварювальних матеріалів, які виробник радить споживачам продукції, оснований на технічних вимогах, визначених розробниками цих зварювальних матеріалів. У той же час за останні роки суттєво змінилась сировинна база, з якої виготовляються дані матеріали. Зрозуміло, що використання того чи іншого сировинного компонента при виготовленні зварювальних матеріалів визначалось насамперед збереженням механічних властивостей металу шва та можливістю застосування компонента у технологічному процесі виготовлення. Зміною зварюально-технологічних властивостей готової продукції зазвичай нехтують. Одним із найважливіших параметрів зварюально-технологічних властивостей матеріалів є діапазон режимів, які можна використовувати, тобто в загальному випадку максимальний та мінімальний струм зварювання.

Поняття стабільності дугового розряду при зварюванні до теперішнього часу однозначно не визначено. Це пов'язано з проблемами теоретичного аналізу фізики дугового розряду та процесами, що супроводжують його існування. При застосуванні цих теоретичних положень до зварювальної дуги питання, ще більш ускладнюється. Це пов'язано з існуванням дугового розряду при зварюванні в умовах, що постійно змінюються. Зварювальна ванна формується під впливом дугового розряду і має свою динаміку зміни форми та внутрішніх потоків. Електродний метал при зварюванні плавким електродом постійно вносить збурення, пов'язані з формування крапель або потоків металу (при струменевому переносі). Зрозуміло, що при цьому змінюється довжина дугового розряду та умови існування катодної чи анодної плям. Крім того, при зварюванні можуть спостерігатися плазмові токи. Все це призвело до відсутності теоретичного критерію визначення стабільності існування зварювальної дуги, пов'язаного з фізикою дугового розряду. Щодо експериментального визначення стабільності існування зварювальної дуги, то спроби створити такі критерії проводились неодноразово.

Аналіз існуючих методик експериментальної оцінки стабільності існування дугового розряду при зварюванні

В даний час існує безліч методик для оцінки стабільності існування (горіння) дугового розряду при зварюванні [1-10]. Умовно їх можна розділити на методики, в яких оцінюються геометричні характеристики

дугового розряду і методики, що визначають його енергетичні (електричні) параметри. Необхідно відзначити, що останні дозволяють аналізувати фізичні процеси, що супроводжують процес існування дугового розряду.

Найбільш вдалою і розповсюдженою методикою, яка дозволяє зв'язати стабільність дугового розряду з його геометричними характеристиками, є методика академіка К.К.Хренова для визначення розривної довжини дуги [1].

Сутність методики К.К.Хренова визначення розривної довжини дуги полягає в тому, що випробуваний електрод закріплюється вертикально в штативі на відстані приблизно 2 мм від пластини основного металу. Після установки електрода вмикають зварювальний струм і запалюють дугу, замкнувши на мить електрод на пластину вугільним стрижнем із загостреним кінцем.

Дузі дають горіти до природного обриву, який відбувається внаслідок зростання її довжини по мірі плавлення електрода. Після обриву дуги відключають живлення і вимірюють відстань між кінцем електрода і наплавленою ділянкою на пластині за допомогою металевої лінійки. Виміряна у такий спосіб відстань служить числовою характеристикою стійкості дуги. Всі умови випробувань підтримуються строго сталими. Відхилення окремих виміряних значень від середнього складає $\pm 20\%$ [1], що є досить істотною похибкою. Тому випробування вимагають багаторазового повторення.

Методики для визначення стабільності існування дугового розряду за значеннями струму і напруги (електричними параметрами) вимагають фіксації їхніх миттєвих значень під час процесу зварювання. При цьому більшість методик пов'язана з використанням для зварювання змінного струму. Це пов'язано з найбільш складними умовами, що супроводжують процес утворення і існування дугового розряду при зварюванні на змінному струмі промислової частоти і великим обсягом інформації, яку можна отримати за короткий проміжок часу.

Традиційно за даними методиками, стабільність процесу зварювання на змінному струмі оцінюють за величиною напруги повторного запалювання за осцилограмами [2]. Ці піки раніше фіксували за допомогою електронних чи шлейфних осцилографів. Існуючі теоретичні критерії оцінки стабільності передбачають математичний аналіз форми піків запалювання у напівперіоді. [3]. У той же час, наявність піків запалювання при електродуговому зварюванні плавким електродом не є обов'язковим [4]. Проведені нами дослідження, коли миттєві значення зварювального струму фіксувалися за допомогою комп'ютера [5, 6], показують, що зміна полярності повністю змінює характер осцилограм, навіть при зварюванні плавким електродом на змінному струмі. При цьому в залежності від режимів зварювання можна отримати осцилограми взагалі без піків запалювання та з піками запалювання великої амплітуди. Ці дані добре співпадають з даними інших дослідників, які показують, що при зміні полярності характер осцилограм також змінюється [7].

Існують теоретичні критерії для зварювальної дуги змінного струму, основані на аналізі процесу миттєвих швидкостей наростання струму у момент зміни його полярності [8, 9]. За цією методикою більший швидкості зростання струму при запалюванні дугового розряду відповідають кращі умови його утворення. Проте експериментальні дані свідчать, що осцилограми струму після зміни полярності дуже часто мають „поличку”, тобто після перетину осцилограмою струму нульової лінії його значення деякий час не змінюється. У цьому випадку у момент утворення дугового розряду швидкість зміни миттєвих значень струму дуже велика. Зазвичай наявність „полички” на осцилограмі зварювального струму після зміни полярності відповідає великому піку запалювання по осцилограмі напруги, що за класичною схемою аналізу осцилограм при зварюванні змінним струмом свідчить про утруднення утворення дугового розряду.

Існує критерій, що пов'язує амплітудне значення холостого ходу трансформатора (U_m) з енергетичними параметрами зварювання. Таким критерієм є кут зсуву фаз між напругою холостого ходу (U_{xx}), зварювальним струмом та напругою на дузі [10]. Зрозуміло, що експериментальне визначення такого критерію досить ускладнено, тому ці методики, скоріш за все, можуть бути віднесені до теоретичних. Загалом кут зсуву фаз між напругою холостого ходу і струмом та напругою на дузі [10, 11] не може розглядатися у співвідношеннях для оцінки стабільності існування дугового розряду. Це пов'язано з тим, що зазначений вище кут зсуву фаз визначається властивостями джерела живлення, а не властивостями дугового проміжку, який є самостійною фізичною системою, котра повинна розглядатися, як провідник, що крім активного має реактивний опір. Тому крім індуктивного зсуву фаз між струмом та напругою, що традиційно розглядається у літературі і який пов'язаний з характеристиками джерела живлення, спостерігається також емнісний зсув фаз, який визначається фізичними характеристиками дугового проміжку. При цьому фіксація осцилограм струму та напруги за допомогою ПК показує, що такий зсув фаз є обов'язковим та домінуючим [5, 6, 13, 14]. Це свідчить про недоцільність застосування критеріїв, основаних на індуктивному опорі для оцінки стабільності зварювальної дуги при застосуванні конкретних зварювальних матеріалів.

З наведених методик оцінки стабільності дугового розряду за результатами виміру та фіксації миттєвих значень струму та напруги [2, 7, 8, 9] найбільш комплексно оцінює стабільність дугового розряду критерій, що пропонується у роботі [7]. Цей критерій є співвідношенням миттєвих значень сили струму у момент підпаду дугового розряду, відповідної напруги на дузі та часу її запалювання. Дане співвідношення, за думкою авторів, є параметром, що характеризує опір залишкової плазми, а саме середню швидкість зростання електричної провідності міжелектродного проміжку напередодні утворення дугового розряду. Це співвідношення описується рівнянням:

$$B_3 = I_3 / U_3 \times t_3 \quad (1)$$

де, B_3 – показник стабільності дуги ($Om^{-1} \times c^{-1}$)

I_3 – струм зварювання у момент підпаду (А);

U_3 – напруга у міжелектродному проміжку у момент підпаду (В);

t_3 – час до запалювання дугового розряду (с).

Загалом вважається, що збільшенню показника B_3 відповідає покращення стабільності дугового розряду.

З наведених даних зрозуміло, що всі визначені критерії зазвичай описують деякі окремі характеристики осцилограм, що відповідають зміні струму та напруги при зварюванні. Спроба їх поєднати можлива тільки шляхом застосування комп'ютерної техніки, що частково і було зроблено у роботі [7].

У той же час, наведені критерії оцінки стабільності існування дугового розряду за рахунок аналізу миттєвих значень струму та напруги та їх співвідношення не можуть характеризувати деякі параметри дугового розряду, які можливо визначити тільки експериментально безпосереднім вимірюванням. Для електродів, що призначені для ручного дугового зварювання це є „еластичність дугового розряду” та умови його першого запалювання (утворення). З точки зору робочих (технологічних) параметрів штучних електродів загального призначення дані параметри і є визначальними.

Розробка комплексної методики оцінки стабільності дугового розряду при ручному електродуговому зварюванні.

Для вирішення цих технологічних задач нами був розроблений спеціальний вимірювальний комплекс для проведення комплексного аналізу стабільності існування дугового розряду при зварюванні чи наплавленні.

Вимірювальна складова комплексу складається: з персонального комп'ютера(ПК), аналого-цифрового перетворювача (АЦП), пасивних датчиків (шунта і дільника напруги на дузі), сполучних елементів та зварювальної установки (Рис.1).

Схема підключення вимірювального комплексу наступна: на АЦП подається 3 провідника (один загальний(спільний) – „земля” та два інших сигнальні – струм та напруга). Загальні(спільні) провідники підключаються до однієї із клем шунта. Якщо буде потреба відображення осцилограм струму й напруги в протифазі, необхідно загальний провідник підключати до клем шунта, що відповідно розташовується ближче до зварювального стола. Другий провідник із шунта іде як сигнальний на АЦП і передає динаміку зміни струму. Другий сигнальний провідник з'єднується з дільником. На дільник надходить сигнал, що характеризує зміну напруги на дузі, який береться безпосередньо із тримача електрода(струмопідвідного мундштука). В якості шунтів необхідно використовувати стандартизовані зварювальні шунти на 150, 300 й 500 Ампер (75мВ) за ГОСТ 8042- 81 залежно від режиму зварювання або наплавлення.

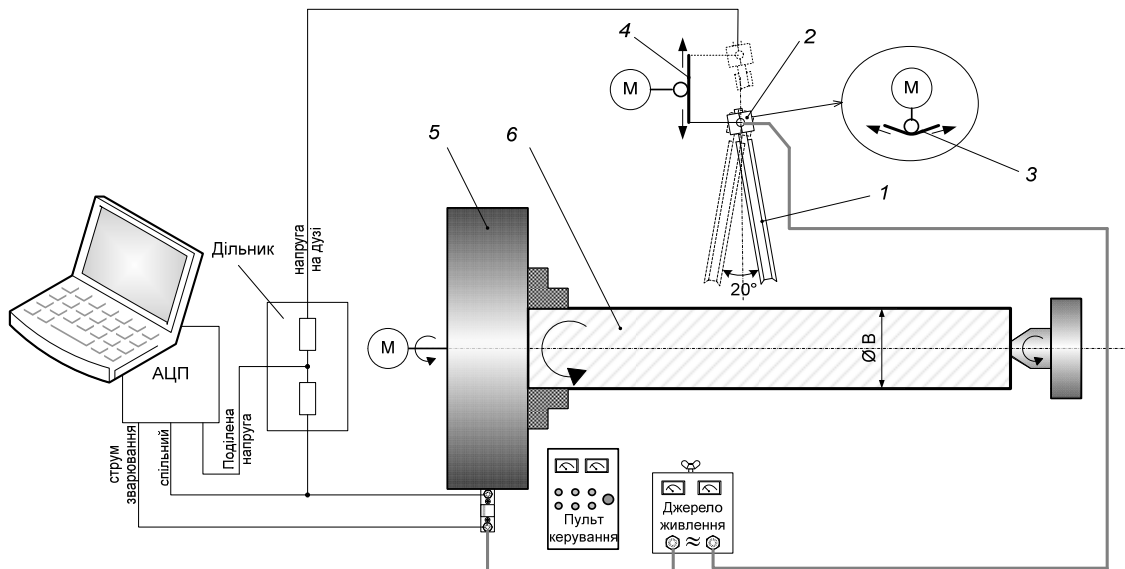


Рис. 1. Схема вимірювального комплексу для аналізу дугових процесів при електродуговому зварюванні.

1– електрод; 2– тримач електрода та струмопідвід; 3– коливальний пристрій; 4– механізм вертикального переміщення; 5–обертач; 6– вал

Використання ПК для запису осцилограм струму і напруги дозволяє з точністю до мілісекунд визначити загальну тривалість зварювання (час плавлення електрода (дроту)) і, як наслідок, обчислити середню швидкість плавлення досліджуваного електрода та спрогнозувати довжину дугового розряду у будь-який момент часу.

Сполучення модифікованої методики виміру розривної довжини дуги з вимірювальним комплексом для фіксації та аналізу енергетичних характеристик дугового розряду змінного струму [12, 13, 15, 16] із спеціальним програмним забезпеченням PowerGraph 2.0 і створеними програмними продуктами [6, 14] дозволяє на новому якісному рівні підійти до визначення такої технологічної характеристики дугового розряду як «стабільність горіння дуги».

При обробці отриманих даних, з нашого погляду, найбільш доцільно використовувати коефіцієнт, що характеризує зміну провідності плазми міжелектродного проміжку при підпалі дуги (B_p) (формула 1) і в процесі її існування (B_c) (формула 2). Саме ці динамічні характеристики містять у собі всі дані, що характеризують дуговий розряд змінного струму з погляду електричних параметрів: значеннях струму, напруги і часу, які відповідають обраним діючим показникам. Зрозуміло, що всі ці параметри досить просто можуть бути визначені за електронними осцилограмами.

$$B_c = I_{\text{зв}} / (U_d \times t_c) \quad (2)$$

де, B_c – коефіцієнт, що характеризує швидкість наростання електричної провідності дуги в процесі її існування ($\text{Om}^{-1} \times \text{c}^{-1}$);

$I_{\text{зв}}$ – амплітудне значення струму зварювання при існуванні дугового розряду (А);

U_d – напруга, що відповідає амплітудному значенню максимального струму зварювання при існуванні дугового (В);

t_c – час існування дугового розряду (с).

Крім того, має сенс розгляд співвідношення цих коефіцієнтів, як загального, комплексного показника. Пов'язано це з тим, що провідність залишкової плазми (у випадку підпалу дугового розряду) і існуючої плазми (при наявності дугового розряду) визначає, з погляду фізичних процесів, характер такого розряду. У загальному випадку можливість утворення дугового розряду і його наступного існування визначається опором газового міжелектродного проміжку, що є зворотною величиною провідності. Швидкість зміни опору (провідності) плазми дугового проміжку дозволяє одержати інформацію про її динамічні характеристики, тобто визначити умови утворення і підтримування дугового розряду.

Установка для проведення випробувань електродів.

Для проведення досліджень нами була сконструйована і виготовлена спеціальна установка, що дозволяє здійснювати коливання електрода з необхідною амплітудою і частотою, а також, при необхідності, здійснювати його вертикальне переміщення (рис. 1).

Установка складається з:

- обертача (5), який дозволяє переміщувати основний метал у даному випадку вал (6) з необхідною швидкістю, яка гарантує рівномірне відкладення електродного металу;
- тримача електрода або пальника (2), який здійснює функції фіксації електроду та струмопідводу;
- коливального пристрою електроду (3) для імітації поперечних коливань зварника;
- механізму вертикального переміщення електрода (4), який разом з коливальним пристроєм (3) забезпечує можливість підпалу дуги методом „чиркання” та наступного виконання запропонованої послідовності дослідів на електроді, що досліджується.

Установка працює наступним чином (на прикладі ручного дугового зварювання, оскільки при цьому способі зварювання використовується максимальна кількість переміщувально-коливальних пристроїв): електрод (1), призначений для випробувань, фіксується тримачем (2), закріпленим на штативі (3). Штативу надається коливальний рух, амплітуду якого вибирають, виходячи з діаметра електрода. Для електродів діаметром 3 мм, які використовувались у досліді в даній роботі, амплітуда коливань складала 20 мм, що при стандартній довжині електрода відповідає 20° . Після цього штативу з закріпленням на ньому електродом надавалося вертикальне переміщення вбік основного металу (у даному випадку вниз) за допомогою штанги (4), на якій закріплений штатив (3). При необхідності, за допомогою даної установки при мінімальних конструктивних змінах можливе проведення випробувань електродів не тільки у вертикальній площині, але й у горизонтальному та стельовому положеннях.

У якості джерела живлення зварювальної дуги використовувався зварювальний трансформатор СТШ 250У4, який має змогу плавно регулювати зварювальний струм.

Попередньо проведені експерименти по оцінці отриманих результатів при визначенні розривної довжини дуги показали, що при використанні в якості основного металу пластини, на її геометричні розміри при незмінних параметрах досить істотно значення чинить термічний цикл. Це пов'язано з утворенням у пластині деформацій жолоблення. Зменшення цих деформацій може бути досягнуте при збільшенні товщини пластини до величин, які у кілька разів перевищують глибину проплавлення. Однак це пов'язано з досить великими матеріальними і технічними труднощами. Тому, нами було запропоновано виконувати наплавлення при визначенні розривної довжини дуги і фіксації осцилограм, які відповідають цьому процесу, використовуючи як основний метал – обертаючий циліндр.

Використання масивного циліндричного тіла як основного металу гарантує відсутність утворення деформацій жолоблення, які можуть змінити величину дугового проміжку в процесі існування дугового розряду. При цьому створюється можливість поєднати наявність зварювальної ванни на поверхні основного металу, відсутність її перегріву, рівномірного відкладення електродного металу і можливість утворення шва, що по параметрах відповідає ручному дуговому зварюванню. Крім цього, в залежності від полярності, що підводиться до зварювальної ванни, імітуються катодні процеси в ній або наявність вторинної емісії електронів з її поверхні.

У результаті задана окружна швидкість обертання циліндра повинна забезпечувати складний взаємозв'язок компонентів, що супроводжує процес ручного дугового зварювання. До основних з них відносяться: рівномірне відкладення електродного металу на основний і сталість електричних параметрів дугового розряду при певній довжині дуги.

На розробленому вимірювальному комплексі нами були проведені дослідження, по визначенню стійкості дугового розряду при застосуванні плавких штучних електродів, піддавалися електроди загального призначення марок МР-3, АНО-36, АНО-4, АНО-21 та АНО-6 діаметром 3 мм виробництва Державного підприємства „Дослідний завод зварювальних матеріалів інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної Академії наук України”.

Комплексний коефіцієнт стабільності дугового розряду

Оскільки для всебічного аналізу та прогнозування стабільності зварювальної дуги необхідно враховувати енергетичні параметри у поєднанні з геометричними розмірами дугового розряду. Тому нами був створений комплексний коефіцієнт, що характеризує стабільність дугового розряду при зварюванні, в якому ми зробили спробу поєднати технологічні властивості зварювальної дуги та енергетичні параметри дугового розряду. В результаті комплексний коефіцієнт стабільності дугового розряду (K_{cm}) включає в себе співвідношення дисперсії розривної довжини зварювальної дуги (еластичності) у кожній серії дослідів (вибірки) (S^2), величину середньої довжини зварювальної дуги на момент розриву (L_d) у серії дослідів та коефіцієнтів, що характеризують зміну провідності міжелектродного проміжку у процесі зварювання (B_z/B_c).

$$K_{cc} = \frac{S^2}{L_d} \cdot \frac{B_z}{B_c} \quad (3)$$

де, K_{cm} – комплексного коефіцієнту стабільності дугового розряду;

S^2 – дисперсії розривної довжини зварювальної дуги у кожній серії дослідів (вибірки);

L_d – середньої довжини зварювальної дуги на момент розриву (м);

B_z – коефіцієнт, що характеризує швидкість наростання електричної провідності дуги в процесі її виникнення ($Om^{-1} \times c^{-1}$) (формула 1);

B_c – коефіцієнт, що характеризує швидкість наростання електричної провідності дуги в процесі її існування ($\text{Om}^{-1} \times \text{c}^{-1}$) (формула 2).

В загальному випадку підвищенню стабільності зварювальної дуги відповідає зменшення величини цього коефіцієнту (K_{cm}). Аналізуючи формулу для визначення комплексного коефіцієнту стабільності дугового розряду (K_{cm}), можна сказати, що з формальної точки зору для кращого існування дугового розряду потрібний мінімальний розкид дисперсії (S^2), максимальна розривна довжина зварювальної дуги (L_d) та мінімальне співвідношення коефіцієнтів, що характеризують провідність міжелектродної плазми. У той же час необхідно враховувати, що якщо співвідношення $(B_3/B_c) < 1$, то умови існування дугового розряду кращі, ніж при його підпалі. Якщо співвідношення більше одиниці, то дуга гарно підпалюється, але погано горить. Найбільш типова ситуація, у останньому випадку, була отримана при застосуванні електродів АНО-6, коли на „малих режимах” взагалі не вдалося отримати стабільного процесу існування дугового розряду. Логічним продовженням цього процесу є те, що на „середніх режимах” отримано велике значення співвідношення B_3/B_c . Тому при аналізі впливу співвідношення зміни провідності плазми на комплексний коефіцієнт стабільності дугового розряду (K_{cm}) треба дотримуватися певної обережності.

Висновки

1. Розроблена оригінальна методика визначення стабільності процесу електро-дугового зварювання.
2. Створено та докладно описано вимірювальний комплекс для аналізу дугових процесів при електродуговому зварюванні та наплавленні.
3. Запропоновано новий комплексний коефіцієнт стабільності дугового розряду, який поєднує технологічні властивості зварювальної дуги та енергетичні параметри дугового розряду і дозволяє виключити суб'єктивні фактори при тестуванні зварювальних матеріалів.
4. Як приклад виконані дослідження стабільності процесу ручного електродугового зварювання штучними електродами загального призначення, які повністю підтвердили адекватність отриманих критеріїв стабільності з загальновідомими даними.

Список літератури

1. Хренов К. К. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машгиз, 1949.—204 с.
2. Б.Е.Патон. Об оценке стабилизирующих свойств флюса для автоматической сварки. –Автоматическая сварка, 1950, №2, с. 85-89.
3. В.А.Троицкий. Влияние параметров электрической цепи на повторное возбуждение дуги переменного тока. Автоматическая сварка, 1975, №11, с. 6-10.
4. Л.А.Жданов, А.М.Сливинский, В.Т. Котик, к.т.н., В.М. Коперсак, інж., В.Л. Коваленко. Можливість використання аналогово-цифрового перетворювача для дослідження зварювальної дуги змінного струму. Машинознавство, 2003, №2 с. 38-41.
5. Л.А.Жданов, А.М.Сливинский, В.М.Коперсак, В.Т.Котик, В.Л.Коваленко. Дослідження зварювальної дуги змінного струму за допомогою персонального комп'ютера. Наукові вісті НТУУ “КПІ”, 2004, №3 с. 49-55.
6. Л.А.Жданов, В.Т.Котик, В.Н.Коперсак, В.Л.Коваленко, В.В.Чабанов. Новая версия программы для анализа сварочных процессов на переменном токе. Сварщик, 2005, №6, с. 38-40.
7. И.К. Походня, В.Н. Горпенюк, А.Е.Марченко и др. Методика определения стабильности дуги переменного тока. Автоматическая сварка, 1979, №12, с. 16-18.
8. И.И. Заруба, В.В. Демченко. Влияние капельного переноса металла на устойчивость сварочной дуги переменного тока. Автоматическая сварка, 1983, №12, с. 14-20.
9. И.И. Заруба, В.В. Демченко, Баргамен В.П.. Сварка переменным током в углекислом газе. – Автоматическая сварка, 1973, №10, с. 64-68.
10. Троицкий В. А. Критерий устойчивости горения дуги переменного тока // Автомат. сварка. – 1982. № 8 с. 82–98.
11. Троицкий В.А., Шигаев Т.Г. Влияние параметров электрической цепи на преддуговые процессы при сварке переменным модулированным током // Автомат. сварка. – 1979, № 3. – с. 8–10.
12. Л.А.Жданов, В.Л.Коваленко, В.Т.Котик, К.О.Зворыкин. Технические системы записи параметров дуговых процессов на переменном токе. Технологические системы, 2005, №2, с. 65-70.
13. Л.А.Жданов, В.Л.Коваленко, К.О.Зворыкин. Измерительный комплекс для фиксации электрических параметров сварки на переменном токе. Технологические системы, 2005, №4, с. 40-45.
14. Жданов Л.А., Коваленко В.Л., Зворыкин К.О.. Расшифровка компьютерных осциллограмм при электродуговой сварке на переменном токе. Технологические системы, 2005, №5-6, с. 63-66.
15. Косенко П.О., Жданов Л.А., Коваленко В.Л.. Установка для імітації процесу ручного дугового зварювання штучними електродами при дослідженні дугових процесів. Технологические системы, 2008, №2, с. 25-28.
16. Жданов Л.А., Коваленко В.Л.. Мобильная установка исследования эластичности и стабильности дугового разряда при электродуговой сварке. Оборудование и инструмент, 2010, №5(129), с. 36-37.

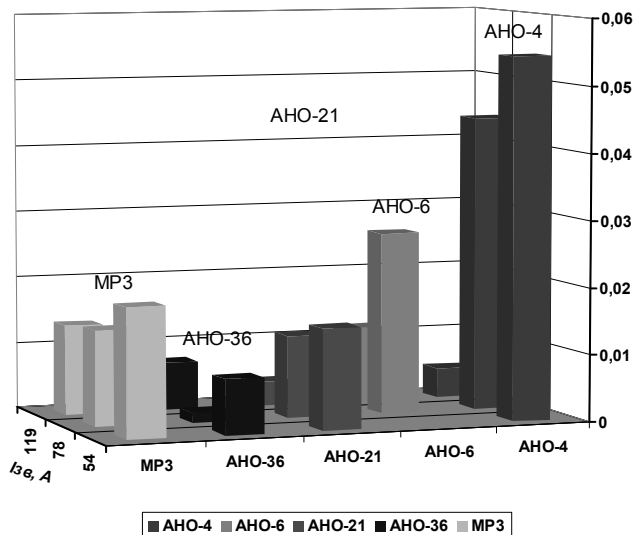


Рис. 2. Гістограма зміни комплексного коефіцієнту стабільності дугового розряду (K_{cm}) на різних режимах для штучних електродів діаметром 3мм, марки: MP-3, АНО-36, АНО-4, АНО-21 та АНО-6