

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ МАГНІТНОКЕРОВАНОЮ ДУГОЮ ТРУБ МАЛОГО ДІАМЕТРУ З ВИКОРИСТАННЯМ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

В.С. Качинський¹, D. Allford², М.П. Драченко¹, І.В. Зяхор¹, В.І. Клименко¹, С.М. Самотрясов¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vskweld@gmail.com

²ARC SPECIALTIES, 1730 Stebbins Drive, Houston, TX 77043-2807 USA. E-mail: dan@arcspecialties.com

На різноманітних промислових та сільськогосподарських об'єктах використовують труби малих діаметрів до 100 мм, для з'єднання яких традиційно використовують метод ручного дугового або автоматичного зварювання. Розглянуто питання використання суперконденсаторів в обладнанні для процесу пресового зварювання магнітокерованою дугою з метою зменшення пікових навантажень потужності на електричну мережу. Потреба в такому обладнанні визначається в першу чергу завданнями «зелених» технологій. Використання суперконденсаторів в джерелах живлення, дозволяє забезпечити в подальшому оптимальні параметри імпульсних зварювальних процесів з метою підвищення їх якості та продуктивності. Розроблено та виготовлено дослідний зразок нового покоління джерела живлення для пресового зварювання труб малого діаметру в польових та стаціонарних умовах з використанням автономного джерела енергопостачання. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: формувачі зварювального струму, пресове зварювання труб магнітокерованою дугою, автономні джерела потужних імпульсів струму та енергопостачання, суперконденсатори

Вступ. Світ стає все більш залежним від електроенергії, як основного джерела енергії. Через цю тенденцію та посилення глобальної конкуренції виробники зосередилися на підвищенні ефективності та зменшенні споживання електроенергії.

Енергоефективність зварювального устаткування є одним із основних завдань його подальшого вдосконалення. Це також відноситься й до імпульсних процесів зварювання різноманітних деталей. Використання суперконденсаторів, як джерел живлення для контактного точкового зварювання забезпечує значне зменшення ваги в порівнянні зі звичайними підходами (трансформатор і джерело живлення) з подальшими економічними перевагами [1]. Одним із розроблених в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ (ІЕЗ) процесів з'єднання труб є пресове зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД) [2]. З метою зменшення пікових навантажень потужності устаткування на електричну мережу, при виконанні зварювання труб у польових і стаціонарних умовах виробництва [3], проведено дослідження по створенню зварювального комплексу для процесу ПЗМД з енергопостачанням від автономної електростанції (АЕС) на базі суперконденсаторів. Для оптимального вибору її потужності проведено попередній аналіз споживання електроенергії, виходячи з величини електричної енергії, що витрачається при навантаженні.

Конденсатори заряджаються з низькою швидкістю протягом тривалого періоду часу та швидко розряджаються, забезпечуючи високі струми з мінімальним впливом на пікове споживання від електричної мережі. Зарядка конденсаторів при низьких рівнях струму також дозволяє виробникам підключати зварювальні системи без модернізації розподільної потужності своїх заводів. Суперконденсатори накопичують енергію так само, як маховик, накопичуючи енергію протягом тривалого періоду часу, а потім швидко вивільняючи цю енергію, коли це необхідно. Цей підхід є більш ефективним у використанні електроенергії та зменшує витрати на інфраструктуру та капітальне обладнання.

При використанні класичних схем живлення отримання високих коефіцієнтів корисної дії (ККД) зварювального обладнання пов'язано із значними труднощами. Очікується, що застосування ємнісних накопичувачів енергії на суперконденсаторах дозволяє вирішити питання енергозберігання. Застосування суперконденсаторів в устаткуванні для зварювання труб дозволить знизити енергоспоживання та вимоги до електропостачання, значно зменшить вагу та габаритні розміри зварювального устаткування, дозволить розробляти автономні зварювальні комплекси з енергопостачанням від мобільних електростанцій для роботи в польових та стаціонарних умовах.

Качинський В.С. – <https://orcid.org/0000-0001-9695-6434>, Драченко М.П. – <https://orcid.org/0000-0002-4485-2403>,

Зяхор І.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7780-0688>, Клименко В.І. – <https://orcid.org/0000-0002-8709-5924>,

Самотрясов С.М. – <https://orcid.org/0000-0003-4891-9625>

© В.С. Качинський, D. Allford, М.П. Драченко, І.В. Зяхор, В.І. Клименко, С.М. Самотрясов, 2024

Питання розробки генераторів імпульсних струмів (ГІС) для ПЗМД є актуальним. В основі дослідного макету устаткування для ПЗМД був покладений метод формування потужного імпульсу зварювального струму, який ґрунтується на застосуванні в якості енергетичного накопичувача суперконденсаторів (СК) [4–6]. Це дозволяє значно знизити рівень пікових навантажень на електричну мережу і, як наслідок, величину встановленої потужності джерела живлення. Одним з важливих завдань при створенні устаткування для ПЗМД є формування потужного імпульсу струму на завершальному етапі зварювання перед осадкою нагрітих торців труб. До останнього часу для цього використовувалися джерела постійного зварювального струму Lincoln Electric-DC1000 або Miller-DC1000 з піковим імпульсом струму до 1000 А. За результатами проведених досліджень було розроблено та випробувано схему (рис. 1) імпульсного джерела зварювального струму, де для формування імпульсу струму було використано батарею СК.

До схеми входять два інверторних перетворювача ІНВ1 та ІНВ2 з номінальним зварювальним струмом 150 А DC, розділюючі діоди $D1$, $D2$, $D3$; зворотний захисний діод $D4$; формуючі індуктивності $L1$, $L2$; комутатори режимів роботи схеми $SV1$, $SV2$, $SV3$ і енергетичний накопичувач, який виконаний на батареї послідовно сполучених СК C_{ion} . Робочий цикл пристрою складається з трьох фаз: 1 – фаза зарядки імпульсного накопичувача енергії; 2 – фаза прогрівання зварюваних кромок черговою дугою; 3 – фаза імпульсного підвищення струму дуги для оплавлення торців труб.

Заряд імпульсного накопичувача енергії C_{ion} виконується через розділюючий діод $D2$ від з'єднаних послідовно через комутатор $SV1$ інверторів

ІНВ1 та ІНВ2. Напруга заряду конденсатора контролюється схемою контролю та управління (на рис. 1 не показана). Прогрівання зварюваних труб виконується від інверторів ІНВ1 та ІНВ2, які сполучені паралельно комутатором $SV1$ і підключені через діоди $D1$, $D3$, дросель $L1$ і комутатор $SV2$ до виробу. Імпульс форсування струму дуги виконується при замиканні контактора $SV3$ по колу: + C_{ion} , $SV3$, $L2$, навантаження, – C_{ion} . Діод $D4$ захищає контактор $SV3$ від руйнування при гасінні імпульсу струму форсування дуги. Керування комутаторами $SV1$, $SV2$, $SV3$ виконується схемою контролю та керування (на рис. 1 не показано).

Для подальших робіт з дослідження зварювальних процесів був виготовлений лабораторний макет ГІС з контрольованою формою імпульсу струму, в якому були застосовані силові комутатори струму на повністю керованих напівпровідникових структурах [7, 8].

Відповідно до сучасних тенденцій в силовій електроніці [8], стосовно зварювальних процесів при умовно низькій напрузі імпульсу струму, були застосовані силові транзистори з MOSFET структурою, вибір яких обґрунтований особливостями її властивостей, що дозволяє виконувати паралельне з'єднання транзисторів в умовно необмеженій кількості та дає можливість створювати потужні комутатори струму. У якості джерела енергії для формування потужних імпульсів струму були застосовані батареї суперконденсаторів (БСК). Використання БСК в якості потужних джерел струму дозволяє істотно зменшити ваго-габаритні показники ГІС у порівнянні з традиційними рішеннями, в яких у якості джерела імпульсного струму використовується промислова електрична мережа. Крім того, потужність електромережі може бути значно менша, оскільки імпульс струму формує

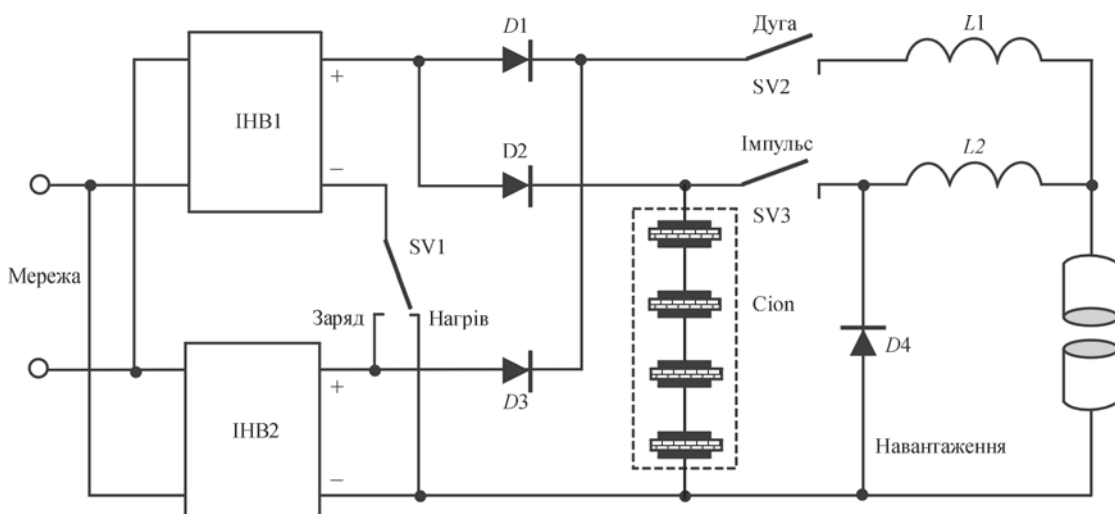


Рис. 1. Схема імпульсного форсування зварювальної дуги: ІНВ1, ІНВ2 – інверторні перетворювачі напруги; $SV1, \dots, SV3$ – механічні перемикачі струму; $D1, \dots, D4$ – діоди; C_{ion} – батарея суперконденсаторів; $L1, L2$ – формуючі індуктори; навантаження – пристрій для зварювання ПЗМД

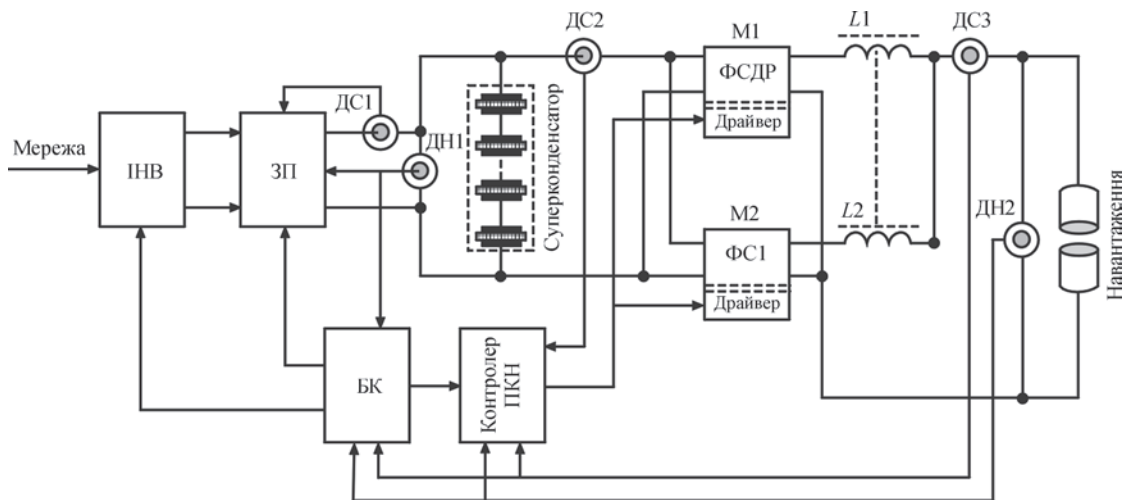


Рис. 2. Узагальнена структурно-функціональна схема генератора імпульсного струму для ПЗМД: ІНВ – інвертор живлення; ЗП – зарядний пристрій; БК – блок керування; ПКН – контролер понижуючих конверторів напруги; ФСДР – формувач струму дуги розігріву; ФСІ – формувач струму імпульсу; ДС, ДН – датчики струму та напруги

Таблиця 1. Хімічний склад металу труби, мас. %

Марка сталі	C	Si	Mn	Ni	S	Cu	P	Cr	V
09Г2С	0,11	0,61	1,48	0,21	0,021	0,21	0,02	0,23	0,11

БСК. При цьому з мережі споживається тільки потужність, яка необхідна для заряду БСК, розподілена на час заряду.

Узагальнену структурно-функціональну схему генератора імпульсного струму з оптимізацією зарядного кола для застосування в ПЗМД устаткуванні наведено на рис. 2.

У схемі ПС в якості формувачів імпульсу струму застосовуються конвертори напруги понижуючого типу (ПКН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), де модуль М1 формує струм нагріву кромки труби, а модуль М2 – імпульс струму опалення кромки. Використання модульної структури побудови ГІС дозволяє поліпшити умови дисипації потужності втрат, а також гнучкіше адаптувати силову частину схеми для різних зварювальних застосувань.

Загальний контроль і управління роботою схеми здійснюється блоком керування (БК). Заряд батареї СК виконується зарядним пристроєм (ЗП), який, у свою чергу, живиться від вхідного інвертора напруги з коректором потужності ІНВ1. Управління ПКН виконується від локальних ШІМ контролерів.

Розробка дослідної технології ПЗМД зварювання з використанням автономного джерела енергопостачання. Для досліджень було використано труби з конструкційної низьколегованої сталі 09Г2С, яка витримує широкий діапазон робочої температури $-70...+450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Висока механічна міцність дозволяє використовувати сталь цієї марки в нафтовій промисловості, будівництві трубопроводів і сільському господарстві. Хімічний склад металу труби наведено в табл. 1.

Для проведення досліджень зі зварювання сталевих труб діаметром $38\times3\text{ мм}$ програмували зварювальний струм і напругу дуги та взаємне переміщення труб, що зварювалися, згідно з циклограмою (рис. 3). На початку процесу, протягом часу t_1 , стискають труби для забезпечення надійного контакту їх торців і вмикають джерело живлення дуги, а потім труби розводять на дуговий проміжок, таким чином збуджуючи дугу. Спочатку дуга горить на підвищеному струмі I_1 протягом часу t_2 . Потім зварювальний струм знижується до струму I_2 і протягом часу t_3 прогріваються труби. Після досягнення необхідного нагріву торців труб короткочасно, на час t_4 , підвищується зварювальний струм від СК до величини I_3 , а потім виконується осадка труб та формування зварного з'єднання. Через час t_5 вимикається джерело живлення дуги. А через час t_6 знімається зусилля осадки. Цикл зварювання завершено.

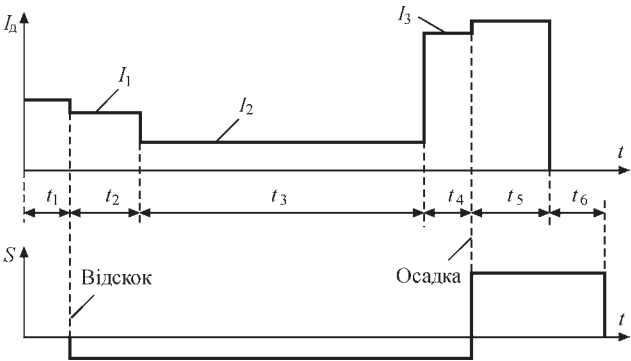


Рис. 3. Циклограма процесу ПЗМД зварювання: I_d , А – зварювальний струм; S, мм – переміщення труби в процесі зварювання; t, с – час зварювання

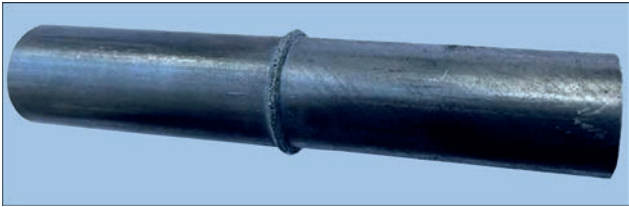


Рис. 4. Зварне з’єднання труби діаметром 38×3 мм

Зразок звареної труби показано на рис. 4. Зварювання виконувалось за допомогою розробленого автономного джерела живлення ГІС для ПЗМД устаткування.

Додатково було проведено дослідження з підвищенням струму після нагрівання, але без виконання осадки (рис. 5). Результати показали, що торці труб перед осадкою мають рівномірне оплавлення по всій поверхні нагрітого металу, що сприяє оптимальному формуванню зварного з’єднання.

Результати механічних випробувань. Механічні випробування, проводилися відповідно до

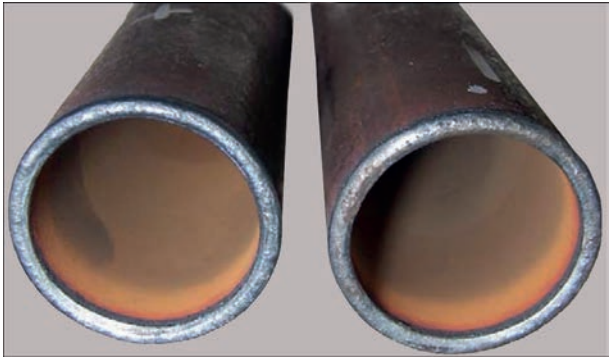


Рис. 5. Зовнішній вид торців труб перед осадкою стандарту API 1104 [9]. Результати випробування наведено в табл. 2.

Розроблення специфікації процедури ПЗМД зварювання з автономним джерелом живлення. На основі розроблених параметрів процесу ПЗМД, було проведено запис процедури зварювання з використанням суперконденсаторів від автономного джерела живлення. По результатах виконаних механічних випробувань, запис процедури зварю-

Таблиця 2. Механічні властивості зварних з’єднань труб

Марка сталі	Діаметр/товщина стінки труби, мм	σ_b , МПа		$KCV_{+20\text{ }^{\circ}\text{C}}$, Дж/см ²	
		Основний метал	Зварне з'єднання	Основний метал	Зварне з'єднання
09Г2С	38×3	488 ± 11	492 ± 12	56 ± 12	52 ± 13

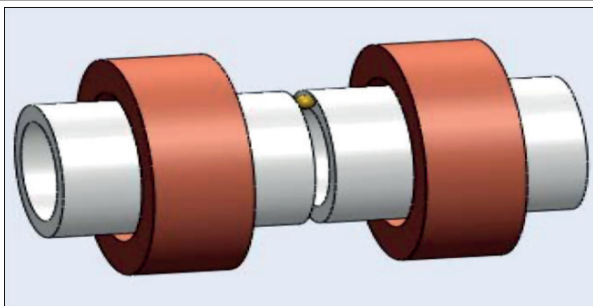
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України					
Специфікація процедури ПЗМД з автономним джерелом живлення					
Специфікація: API 1104 Процес зварювання: ПЗМД Марка сталі: 09Г2С Модель ПЗМД машини: МД-101	ІЕЗ СПЗ/ПЗМД – 001 Метод процесу: Автоматичний Мета СПЗ: Процедура для вуглецевих сталей Діаметр труби: 38 мм Товщина стінки: 3 мм				
Конфігурація з'єднання	Деталі з'єднання				
					
Характеристика з'єднання	Захисні гази та матеріали				
Тип з'єднання – стикове	Захисні гази: не використовуються Зовнішній обдув: не використовується Внутрішній продув: не використовується Зварювальна проволока: не використовується Водяне охолодження: не використовується				
Зварювальні параметри для труб діаметром 38 мм					
Номер етапу	Зварювальний струм, А	Час зварювання, t	Напруга дуги, В	Дуговий зазор, мм	Зусилля осадки, кН
1	220...240	2,5...2,7	24...27	1,7	41...44
2	180...190	10...12			
3	570...610	0,2...0,4			
Підготовлено: _____			Сертифіковано: _____		
Дата: _____			Дата: _____		

Рис. 6. СПЗ для ПЗМД з використанням автономного джерела живлення

вання був далі розроблений у специфікацію процедури зварювання (СПЗ). На рис. 6 наведено специфікацію процедури зварювання, розробленої для труб діаметром 38×3 мм зі сталі 09Г2С.

Результати металографічних досліджень. Дослідження проводились на мікрошліфах зварних з'єднань труб діаметром 38×3 мм, які полірували на високо швидкісних кругах з використанням алмазних паст різної дисперсності. Структуру металу виявляли шляхом хімічного травлення в 4 %-му спиртовому розчині HNO_3 . Дослідження виконували на мікроскопах «Neophot-32» та «Versomet» при різних збільшеннях. Мікротвердість визначали при навантаженні 1 Н на мікротвердомірі М-400 фірми «Лесо». Розмір зерна визначали за шкалами ГОСТ 5639-82. Цифрове зображення мікроструктур отримано за допомогою фотокамери «Olympus».

Лінія з'єднання досить виражена по всій висоті шва. Ширина смуги лінії з'єднання становить в центрі 30...50 мкм, у грата доходить до 180 мкм (рис. 7). Мікроструктура являє собою ферито-перлітну суміш, де перліт спостерігається у вигляді тонких пластин по межах феритних виділень.

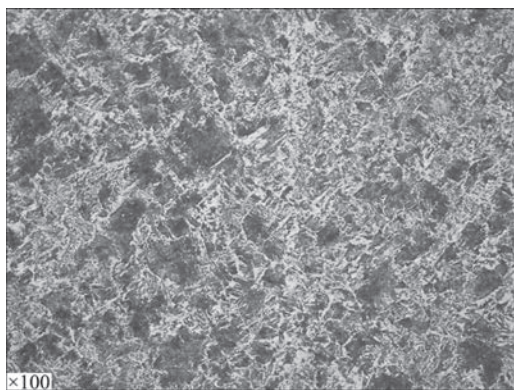


Рис. 7. Лінія з'єднання та ЗТВ зварного з'єднання, ×200

Вимірювання твердості було зроблено у зварному шві, ЗТВ та основному металі. Виміряні значення твердості на зразках для випробування наступні:

- зварне з'єднання: $HV1-2070...2200$ МПа;
- ЗТВ: ділянка перегріву $HV1-1910...2210$ МПа, ширина ділянки перегріву ~ 1200...1300 мкм;
- ділянка повної перекристалізації $HV1-1610...1790$ МПа, ширина ділянки 1400 мкм;
- основний метал: $HV1-1510...1710$ МПа.

За результатами механічних випробувань і металографічних досліджень встановлено, що зварні з'єднання труб знаходяться в допустимих межах відповідно до застосовуваних у промисловості України та інших країн.

Технічні засоби для автономного ПЗМД комплексу. У разі потреби проведення ПЗМД труб в польових та стаціонарних умовах виробництва [2, 10–12], при низьких потужностях вхідної електроенергії, виникає необхідність використання суперконденсаторів та енергопостачання від АЕС. Аналіз і оптимізація зарядно-розрядних процесів ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) є одним з головних завдань при проектуванні імпульсних технологічних установок, до яких також відноситься й устаткування для ПЗМД. При виборі методу заряду ЄНЕ виходять, зазвичай, з техніко-економічних показників, при цьому використовується критерій ціна–якість. Як відомо [13,14], при технічній реалізації зарядних пристроїв, в основному, використовуються три способи заряду:

1. Заряд від джерела постійної напруги ($U_3 = \text{const}$);
2. Заряд від джерела постійного струму ($I_3 = \text{const}$);
3. Заряд в режимі постійної потужності ($P_3 = \text{const}$).

У роботі [15] показано, що використання індуктивно-ємнісних перетворювачів (ІЄП) в якості

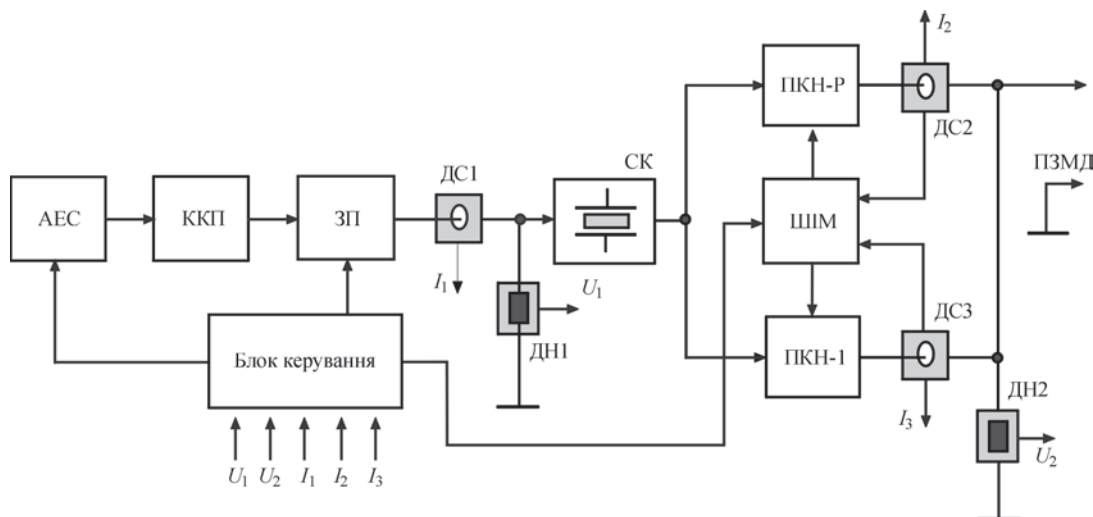


Рис. 8. Структурно-функціональна схема системи живлення для зварювання методом ПЗМД з енергетичним накопичувачем на суперконденсаторах: АЕС; ККП – коректор коефіцієнта потужності; ЗП – зарядний пристрій для батареї суперконденсаторів; СК – батарея суперконденсаторів; ПКН-Р – понижуючий конвертер напруги живлення дуги розігріву; ШІМ – контролер широтно-імпульсної модуляції; ПКН-І – понижуючий конвертер напруги живлення дуги імпульсу; ДН і ДТ – датчики напруги та струму

джерел струму в зарядних пристроях здатне забезпечити ККД близький до 100 %.

Що стосується технічної реалізації пристроїв для ПЗМД, на рис. 8 показано варіант структурно-функціональної схеми пристрою з використанням БСК для накопичення енергії. Така схема є найтехнологічнішою з точки зору оптимального використання ресурсів АЕС у зв'язку з відсутністю пікових навантажень у процесі роботи зварювального комплексу. Заряд СК виконується від спеціального зарядного пристрою – ЗП з використанням технології ІЕП, що дозволяє максимально використати можливості СК, а застосування ККП на вході пристрою підвищує ефективність використання потужності електростанції. Це відбувається тому, що при роботі пристрою протягом зварювального циклу потужність навантаження електростанції практично постійна, що пов'язано із застосуванням енергетичного накопичувача на СК.

Роботу джерела живлення для ПЗМД можна розкласти на наступні основні фази рис. 9: заряд енергетичного накопичувача СК ($t_0 - t_1$); прогрівання зварюваних кромок низькоамперною дугою ($t_2 - t_3$); оплавлення кромок форсованою дугою ($t_3 - t_4$); осадка (t_4). У режимі осадки, відбувається гасіння імпульсу струму.

Кожен режим роботи джерела живлення характеризується своїм алгоритмом роботи схеми, і, як

наслідок, різними втратами в самому блоці живлення, які треба теж враховувати при виборі рівня потужності АЕС.

Для стійкої роботи знижуючих конверторів напруги на зварювальну дугу, напруга на вході ПКН не повинна опускатися менш ніж $1,5U_d$. Для максимального використання властивостей енергетичного накопичувача на СК розряд батареї СК більш ніж на $0,5U_{СК, \max}$ є недоцільним.

На рис. 10, а наведено один з варіантів дослідного зразка системи живлення для ПЗМД зварювальної машини (рис. 10, б), на базі 6 кВт міні-електростанції, а на рис. 11 – його структурно-функціональну блок-схему.

Технічні характеристики експериментального автономного енергокомплексу для зварювання труб малого діаметру методом ПЗМД:

- потужність автономного бензоагрегату: $P = 6$ кВА, $\cos \varphi > 0,8$;
- батарея суперконденсаторів: $C = 60$ Ф, $U = 68$ В;
- діапазон значень амплітуди імпульсу струму: $I_{\text{ІМП}} = 0,4 \dots 2,0$ кА;
- діапазон значень струму дуги прогрівання: $I_{\text{ІПР}} = 75 \dots 200$ А;
- діапазон значень тривалості імпульсу струму: $T_I = 0,05 \dots 1,0$ с.

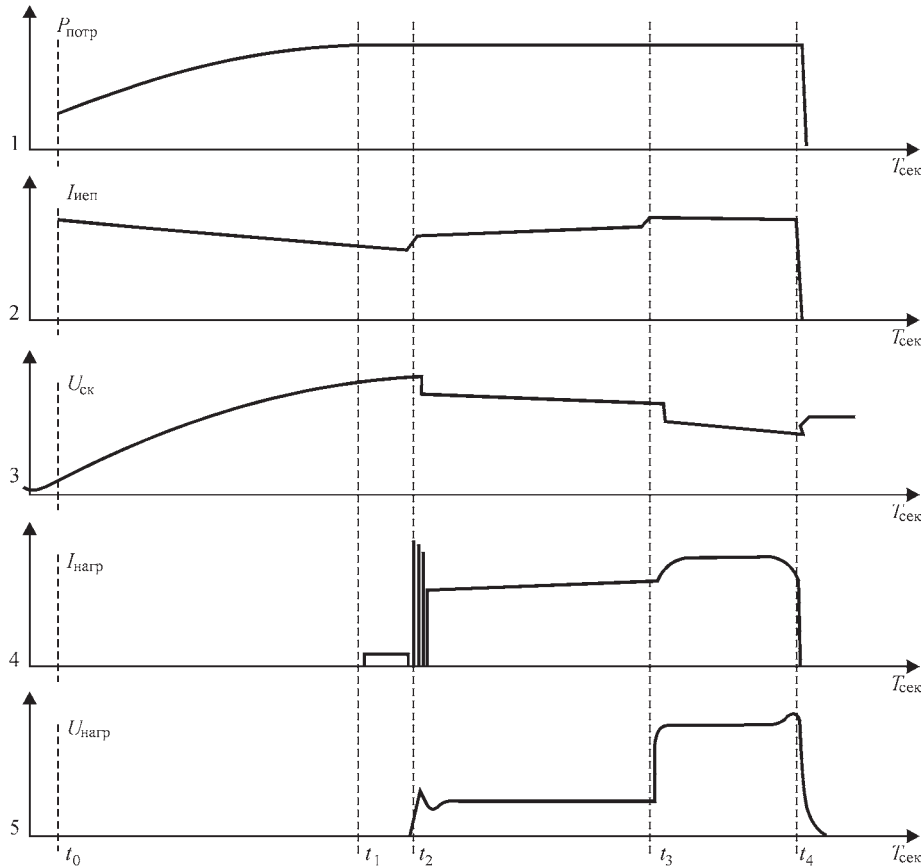


Рис. 9. Діаграми струмів і напруги в інтервалі часу робочого циклу комплексу: 1 – потужність, споживана від АЕС; 2 – зарядний струм БСК; 3 – напруга на БСК; 4 – струм навантаження; 5 – напруга навантаження

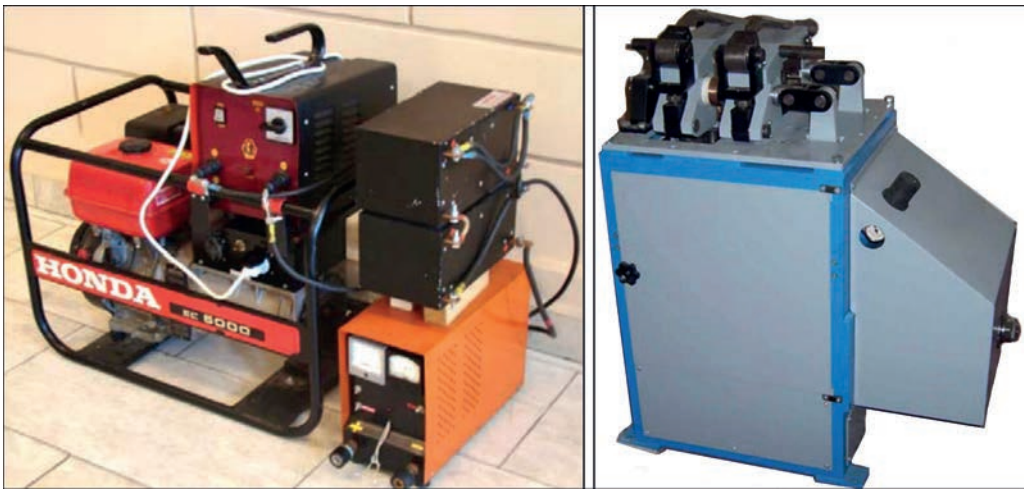


Рис. 10. Автономний енергокомплекс на базі міні-електростанції 6 кВА (а) та установка для ПЗМД зварювання труб МД101 (б)

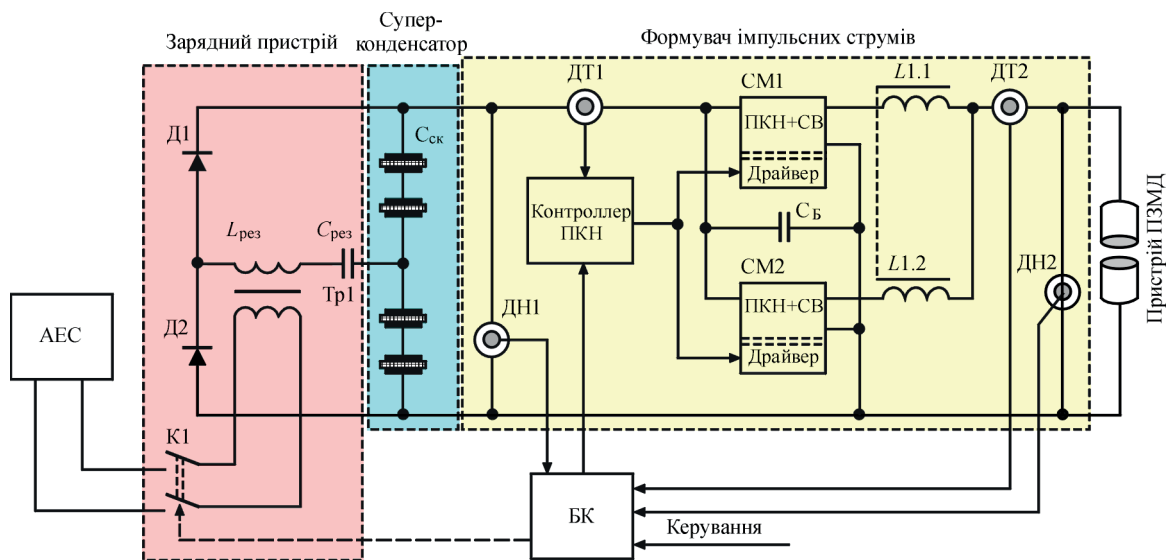


Рис. 11. Структурно-функціональна блок-схема автономного енергокомплексу для ПЗМД: АЕС; Д1, Д2, К1, $C_{рез}$, $L_{рез}$, $Tp1$ – зарядний пристрій; $C_{ск}$ – батарея суперконденсаторів; СМ1 – понижуючий конвертер напруги живлення дуги нагріву; Контролер ПКН – контролер широтно-імпульсної модуляції; СМ2 – понижуючий конвертер напруги живлення дуги імпульсу; БК – блок керування комплексом; ДН і ДТ – датчики напруги і струму; L1.1, L1.2 – дроселі індуктивних накопичувачів

Висновки

- 1. За допомогою процесу ПЗМД з автономним джерелом живлення на базі суперконденсаторів витрати споживаної енергії можна знизити на 50...70 % порівняно зі звичайним процесом зварювання.
- 2. Для ПЗМД з суперконденсаторами було розроблено дослідно-промислову технологію зварювання.
- 3. Суперконденсатори мають технічний потенціал для створення необхідного зварювального струму з заданою напругою дуги та тривалістю імпульсів при ПЗМД труб малих діаметрів.
- 4. Сучасні тенденції розвитку в області електричних накопичувачів енергії свідчать про те, що для імпульсних технологічних установок найперспективнішими є пристрої ємнісного типу. Особливо це стосується конденсаторів з подвійним електричним шаром – суперконденсаторів, питома ємність яких для промислових зразків вже зараз перевищує 20 Ф/г. Оскільки їх внутрішній опір складає одиниці мОм,

- вони можуть ефективно використовуватися в імпульсних технологічних установках.
- 5. При розробці установок для імпульсних процесів зварювання необхідно враховувати такий важливий параметр конденсаторів, як енергетична ефективність. Це пов'язано, з тим, що ступінь розряду визначається мінімальним рівнем напруги, при якій можливе протікання конкретного технологічного процесу, та з оптимізацією у процесах заряду – розряду ємнісних накопичувачів енергії.
- 6. Застосування суперконденсаторів в установках для ПЗМД значно підвищує енергоефективність зварювання, покращує технологічну якість зварних з'єднань, знижує собівартість зварювального устаткування, зменшує пікові навантаження на електричну мережу.
- 7. Подальші роботи по визначенню ефективності використання суперконденсаторів у процесах зварювання будуть спрямовані на досліджен-

ня процесу ПЗМД і формування зварних з'єднань труб більших діаметрів із сталей різного класу.

Список літератури

1. Jerry E. Gould, Hee Chang (2013) Estimations of compatibility of supercapacitors for use as power sources for resistance welding guns. International Institute of Welding, III-1208-02. *Welding in the World*, 57(6), 887–894.
2. Kachynskiy, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Koval, M.P., Goncharenko, E.I. (2016) Technology and equipment for press magnetically-impelled arc welding of position joints of small-diameter pipes in site and stationary conditions. *The Paton Welding J.*, 5–6, 33–38, <https://doi.org/10.15407/as2016.06.05>
3. Kachinskiy, V.S., Krivenko, V.G., Ignatenko, V.Yu. (2002) Magnetically impelled arc butt welding of hollow and solid parts. International Institute of Welding, III-1208-02. *Welding in the World*, 46, (7/8).
4. Gautham Prasad, G., NidheeshShetty, Simran Thakur, Rakshitha, Bommegowda K.B. (2019) Supercapacitor technology and its applications: a review, IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering* 561, 012105. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012105>
5. Коротинский А.Е., Драченко Н.П., Шапка В.А. (2014) Особенности применения суперконденсаторов в устройствах для импульсных технологий сварки. *Автоматич. сварка*, 9, 36–40. <https://doi.org/10.15407/tpwj.2014.09.05>
6. Коротинський О.Є., М.І. Скопюк, І.В. Вертецька (2021) Високоєфективні джерела для дугового зварювання на основі ємнісних накопичувачів електричної енергії. *Автоматичне зварювання*, 3, 47–53. <https://doi.org/10.37434/tpwj.2021.03.08>
7. Коротинський О.Є., Драченко М.П., Жерносков А.М., Вертецька І.В. (2023) Формувачі зварювальних струмів з використанням штучних довгих ліній. *Автоматичне зварювання*, 12, 53–57. <https://doi.org/10.37434/tpwj.2024.01.04>
8. Шидловский А.К., Щерба А.А., Супруновская Н.И. (2009) *Энергетические процессы в электроимпульсных установках с емкостными накопителями энергии*. Киев, НАНУ–ІЗД.
9. API Standart 1104 (2013) *Welding of pipelines and related facilities*. American Petroleum Institute.
10. Leigh, F., Cec, S., Gabriel, S. (2003) *MIAB welding: breakthrough technology for high productivity field welding of pipelines*. APIA National Convention Pipelines – Yesterday, Today and Tomorrow Convened by the Australian Pipeline Industry Association.
11. Edson, D.A. (1982) *Magnetically impelled arc faying surfaces welding of thick wall tubes*. International Institute of Welding, IM-726–82.
12. Hiller, F., Schmidt, M., Breiksch, J. (2003) *Use of the magnetarc welding process in the production of truck cab suspension systems*. ThyssenKrupp Techforum, 40–43.
13. Опрє В.М. (2008) Генераторы прямоугольных импульсов тока. *Силовая электроника*, 1, 56–61.
14. Громовенко В.М., Опрє В.М., Щеголева Н.А. (1997) Зарядные устройства расщепленных емкостных накопителей. *Электротехника*, 3, 46–48.
15. Пентегов И.В. (1982) *Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии*. Киев, Наукова думка.

References

1. Jerry E. Gould, Hee Chang, (2013) Estimations of compatibility of supercapacitors for use as power sources for resistance welding guns. Doc. IIW III-1208-02, *Welding in the World*, 57(6), 887–894.
2. Kachinsky, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Koval, M.P., Goncharenko, E.I. (2016) Technology and equipment for press magnetically-impelled arc welding of position joints of small-diameter pipes in site and stationary conditions. *The Paton Welding J.*, 5–6, 29–34. <https://doi.org/10.15407/as2016.06.05>
3. Kachinskiy V.S., Krivenko V.G., Ignatenko V.Yu. (2002) Magnetically impelled arc butt welding of hollow and solid parts. Doc. IIW III-1208-02, *Welding in the World*, 46 (7/8).
4. Gautham Prasad G, NidheeshShetty, Simran Thakur, Rakshitha and Bommegowda K.B. (2019) Supercapacitor technology and its applications: A review. IOP Conf. Series: *Mater. Sci. and Engin.*, 561 012105. doi:10.1088/1757-899X/561/1/012105.
5. Korotynsky, A.E., Drachenko, N.P., Shapka, V.A. (2014) Peculiarities of application of supercapacitors in devices for pulse welding technologies, *The Paton Welding J.*, 9, 34–38. <https://doi.org/10.15407/tpwj.2014.09.05>
6. Korotynskiy, O.E., Skopyuk, M.I., Vertetska, I.V. (2021) High-efficient sources for arc welding on the base of capacitive energy storage systems. *The Paton Welding J.*, 3, 43–48, <https://doi.org/10.37434/tpwj.2021.03.08>
7. Korotynskiy, O.Ye., Drachenko, M.P., Zhernosekov, A.M., Vertetska, I.V. (2024) Welding current formers using artificial long lines. *The Paton Welding J.*, 1, 27–31. <https://doi.org/10.37434/tpwj.2024.01.04>
8. Shidlovsky, A.K., Shcherba, A.A., Suprunovskaya, N.I. (2009) *Energy processes in electropulse installations with capacitive energy storage*. Kyiv: NANU – IED
9. API standard 1104 (2013) *Welding of pipelines and related facilities*, API.
10. Leigh, F., Cec, S., Gabriel S. (2003) *MIAB welding: Breakthrough technology for high productivity field welding of pipelines*, APIA National Convention Pipelines – Yesterday, Today and Tomorrow Convened by the Australian Pipeline Industry Association.
11. Edson, D.A. (1982), *Magnetically impelled arc faying surfaces welding of thick wall tubes*, Doc. IIW, IM-726–82.
12. Hiller, F., Schmidt, M., Breiksch J. (2003) Use of the magnetarc welding process in the production of truck cab suspension systems, Thyssen Krupp Techforum, 40–43.
13. Opre, V.M. (2008) Generators of rectangular current pulses. *Power Electronics*, 1, 56–61.
14. Gromovenko, V. M., Opre, V. M., Shchegoleva, N. A. (1997) Charging devices of split capacitive storage devices. *Electrical Engineering*, 3, 46–48.
15. Pentegov, I.V. (1982) *Fundamentals of the theory of charging circuits of capacitive energy storage*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF PRESS WELDING WITH A MAGNETICALLY IMPELLED ARC OF SMALL-DIAMETER PIPES USING SUPERCAPACITORS

V.S. Kachynskiy¹, D. Allford², M.P. Drachenko¹, I.V. Ziakhor¹, V.I. Klymenko¹, S.M. Samotryasov¹,

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: vskweld@gmail.com

²ARC SPECIALTIES, 1730 Stebbins Drive, Houston, TX 77043-2807 USA. E-mail: dan@arcspecialties.com

Pipes of small diameters of up to 100 mm are used at various industrial and agricultural facilities. The methods of manual arc welding or automatic welding are traditionally used for welding the pipes. The issue of using supercapacitors in equipment for magnetically impelled arc butt welding (MIAB) process, in order to reduce peak loads on the electrical network is considered. The need for such equipment is primarily determined by the tasks of «green» technologies. Application of supercapacitors in power sources allows ensuring further on the optimal parameters of pulse welding processes, in order to improve their quality and work productivity. A prototype of a new generation of power source for MIAB welding of pipes of a small diameter in the field and stationary conditions using an autonomous power supply source has been developed and manufactured. 15 Ref., 2 Tabl., 11 Fig.

Keywords: generators of welding current, magnetically impelled arc butt welding, autonomous sources of powerful current pulses and power supply, supercapacitors.

Отримано 24.04.2024

Отримано у переглянutoму вигляді 18.07.2024

Прийнято 09.09.2024