

УДК 621.791.05; 621.791.755

В. І. Білобородченко, А. Є. Забранський, Р. Ю. Свищ
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра зварювального виробництва, діагностики
і відновлення металоконструкцій

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ЗАКЛАДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРЕС-ФОРМ

© Білобородченко В. І., Забранський А. Є., Свищ Р. Ю., 2017

Прес-форми для відливання пластмас можуть мати складну розвинену геометрію, що значно ускладнює виготовлення їх робочої зони. Оптимальним рішенням є їх виготовлення з окремих елементів із застосуванням зварювальних технологій, які забезпечують, крім комплексу фізико-механічних властивостей виробу, також і чіткі вимоги до геометрії виробу. Таким вимогам відповідає плазмове зварювання. Проте його особливості, зокрема висока локалізація теплової енергії, що сприяє мінімізації рівня залишкових напружень та деформацій у зоні зварювання і формуванню не типового для дугового зварювання перерізу шва, не враховані у стандартних нормативах до виконання зварних з'єднань. Застосування сучасного математичного статистичного моделювання до вибірки нормативної геометрії та умов складання під зварювання деталей зі стандартними швами дало змогу з імовірністю 95 % встановити їх базовий установчий параметр (складальний зазор), придатний для плазмового зварювання різних типів зварних швів для розглянутого діапазону товщини деталей та оптимізувати технологічні параметри плазмового зварювання.

Ключові слова: прес-форма, плазмове зварювання, нормативні вимоги на складання під зварювання, форма геометрії шва, режими зварювання.

Molds for casting plastics can have complicated developed geometry, which greatly complicates the fabrication of their working area. The optimum solution, in this case, is their manufacture from individual elements using welding technologies, which, in addition to the complex of physical and mechanical properties of the product, also provide strict requirements for the geometry of the product.

Such requirements corresponds to plasma welding. However, its features, in particular, the high localization of thermal energy, which helps to minimize the level of residual stresses and deformations in the welding zone and the formation of a weld cross-section not typical for arc welding, are not taken into account in standard standards for the implementation of welded joints. The application of modern mathematical statistical modeling to the sample of standard geometry and the conditions of assembly with welding of details with standard seams allowed them to establish their basic installation parameter (assembly gap), suitable for plasma welding of different types of welds for the considered range of thickness of parts and to optimize technological parameters with a probability of 95 % plasma welding

Key words: press - form, plasma welding, standard requirements for welding under welding, seam geometry, welding conditions.

Вступ. Одним з найпоширеніших способів продукування виробів з пластмас є відливання, за допомогою якого виготовляється більше 30 % виробів з полімерних матеріалів. Одним з основних елементів обладнання для відливання полімерних виробів є прес-форма, яка залежно від виробу може мати просторово розвинений вигляд і характеризуватися з рештою рівних умов значною вартістю через складність виготовлення, застосовані у ній матеріали та високими вимогами до експлуатаційного ресурсу [1]: 1. Задана кількість циклів роботи ($n \dots n \cdot 10^5$). 2. Задана геометрична конфігурація, що відповідає формі відливних виробів. 3. Задана розмірна точність елементів прес-форми (розмірна точність відливання не гірше $5 \cdot 10^{-3}$ м). 4. Задані тепло-фізичні показники матеріалу робочої частини прес-форми. 5. Задані фізико-механічні властивості матеріалу прес-форми.

Матеріал робочого вузла прес-форми залежно від технологічних параметрів процесу виготовлення полімерного виробу сприймає ударні, циклічні температурні навантаження;

циклічні знакозмінні механічні навантаження; абразивну та можливо корозійну дію розплавленого продукту у прес-формі.

З метою здешевлення прес-форми можуть виконуватися комбінованими – основне тіло зі стандартних конструкційних матеріалів, а робоча частина, в якій безпосередньо відбувається процес відливання, формування та охолодження полімерного виробу з інших матеріалів, що повною мірою відповідають завданням відливання певного типу пластмаси.

Під час вибору матеріалів для виготовлення елементів прес-форм необхідно враховувати такі вимоги [2]: 1. Механічна міцність. 2. Висока температура розміщення (вища за температуру розплаву пластмаси). 3. Високі показники теплопровідності. 4. Здатність, за необхідності, до термооброблення, наприклад, дисперсійного тверднення. 5. Твердість робочої поверхні не гірше 70–90 % від твердості сталі. 6. Корозійна стійкість. 7. Міцність та жорсткість форми моделі. 8. Мінімальний час охолодження. 9. Точність відливки бездефектного виробу: клас точності 6ГТ, шаруватість поверхні 0,4–0,8 мкм. 10. Здатність до технологічного оброблення.

Традиційні металеві матеріали прес-форм: 1) старіючі сталі мартенситного класу, проте не належні до інструментальних, леговані високим вмістом нікелю та кобальту. Типові показники середньої твердості HRC 30–36, а після термомоброблення мають експлуатаційну твердість на 20–28 одиниць вищу; 2) нержавіючі сталі феритного або мартенситного класів (20X13, 30X13), для яких типовий показник твердості становить HB200. Їх перевагою є достатня легкість всіх технологічних прийомів виготовлення прес-форм, що дає змогу створювати вироби складної геометрії та істотним перепадом перерізів у різних площинах; 3) леговані та вуглецеві конструкційні сталі (20XM, 30XM, 40XФА) з типовими показниками твердості HRC32–35, поліпшеними після термооброблення на 12–17 одиниць.

Позитивні якості сталевих прес-форм: висока стабільність та розмірна точність геометричних параметрів робочої (відливної) зони; додаткове полірування поверхонь такої зони забезпечує високу від'ємність до взаємодії з полімерним матеріалом на усіх стадіях зміни його агрегатного стану. Недоліком масового застосування прес-форм на підставі сталей є висока вартість як самого матеріалу, так і операцій з його оброблення; 4) високоміцний чавун, який застосовується для виготовлення несучих деталей прес-форм (плити, корпус, робочі матриці, пуансони); 5) кольорові метали та сплави. Алюміній та його сплави завдяки високій прийнятності до механічного оброблення широко застосовуються для виготовлення експериментальних прес-форм малого ресурсу експлуатації, а також форм-гнізд під час екструзійного відливання та прес-штамповому виробництві. Завдяки вищій здатності до полірування порівняно зі сталлю та чавуном і високій теплопровідності сплави Д16, АД33, В95 ефективно використовуються у дрібносерійному виробництві відливок (до 5000 циклів), а використання спеціальних сплавів типу 7075-7Т3 або QC-1 дає змогу підняти ресурс прес-форм з $10\text{--}50 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^5$ робочих циклів [3]. Ресурс залежить від застосованого матеріалу, проведення чи відсутності додаткового його термооброблення, конструктивної складності відливного виробу, температурне – механічних умов експлуатації прес-форми.

Використання прес-форм з робочими частинами з легких сплавів вигідне під час відливання виробів із складною геометрією порожнин, особливо якщо їх геометричні осі не збігаються з площиною розкриття прес-форми та збереженням високої працездатності та високої корозійної стійкості в умовах конструктивно важкого забезпечення системи охолодження робочої частини. Позитивом є менша на 20–50 % вартість порівняно зі сталевими прес-формами. Істотним недоліком алюмінієвих сплавів вважається підвищене абразивне зношування та висока чутливість до складного напруженого стану (одночасна дія напружень згину та розтягу), що призводить до тріщиноутворення. Це вимагає ускладнювати конструкцію прес-форми за рахунок додаткових вставок для розвантаження алюмінію. Найоптимальніше залучення алюмінію та його сплавів у прес-формах для виготовлення виробів з пінополістиролу, оскільки робоча температура матеріалу у робочій зоні лежить у межах 150–250 °С, тиск спіненого полістиролу становить 0,6 МПа, час полімеризації – 0,2–0,8 с за товщини стінок форми до 4 мм.

Мідь та мідні сплави на основі берилію, цинку широко застосовуються у видувних формах та прес-формах для відливання під тиском (50–150 Мпа) капрону, епоксидних смол. За основним показником зносостійкості – твердість поверхні HRC 30–42 вони мало поступаються сталям. Перевагою над сталевими прес-формами є їх краща здатність до механічного оброблення.

Виготовлення прес-форм ґрунтується на таких технологічних прийомах: а) типові технологічні процеси механічного оброблення (точіння, різання, фрезерування, стругання, шліфування тощо); б) електро-іскрового оброблення (часто у комбінації з механічним); в) термічне оброблення матеріалу готової прес-форми; г) відливання легкого сплаву, з якого виконана прес-форма, у майстер-моделі з одночасним строгим обмеженням за температурою перегрівання рідкого металу (не більше 30...40 °С від температури плавлення) для запобігання кристалізації металу неевтектичного складу. Далі прес-форма піддається механічному обробленню. У разі складної геометрії прес-форми вона монтується з окремих відливок у єдиний виріб механічним кріпленням або склеюються спеціальними клеями.

Оптимальна технологічність виготовлення складних дрібносерійних та дослідних прес-форм може бути забезпечена комбінованим підходом за матеріалами (робочі поверхні виготовляються з дешевих легких алюмінієвих сплавів), а трудомісткі операції механічного оброблення цілого вузла замінені технологіями зварювання доволі простих деталей – заготовок з подальшим їх механічним дороблянням та складанням у конструктивний вузол прес-форми.

Для вибору способу зварювання елементів прес-форм потрібно використати критерії ефективності зварювання плавленням, а саме: енергетичні показники основних термічних джерел нагрівання металу (табл. 1).

Таблиця 1

Енергетичні характеристики основних термічних джерел енергії для зварювання [4]

Джерело енергії	Температура, К	Мін. площа нагрівання, см ²	Мах. густина енергії в плямі, q_2 , Вт/см ²
Газове полум'я	4000–5000	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^4$
Дуга у парі: лужні метали	4500–5000	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^5$
залізо	5000–6000	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^5$
Дуга у газі: водень, азот	5000–8000	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^5$
аргон, гелій	10000–20000	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^5$
Плазма	20000–70000	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^7$
Електронний промінь	20000–70000	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^8$
Фотонний промінь	20000–70000	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^9$

З табл. 1 випливає, що найбільша питома потужність у плямі нагрівання типова для променевих джерел енергії, проте з істотним застереженням за потужністю – за густини плями $q_2 \geq 1 \cdot 10^7$ Вт/см² спостерігається інтенсивне випаровування зварюваного матеріалу.

Враховуючи комплексні показники (технологічні, експлуатаційні) виробу найприйнятнішими потрібно вважати плазмові та променеві технології зварювання.

Процес плазмового зварювання є малочутливим до коливання технологічного параметра зварювання, яким є довжина дуги завдяки великій жорсткості плазмового циліндричного стовпа дуги; існує практична незалежність відстані від зрізу сопла до плями нагрівання; якісні показники процесу забезпечуються за менш складних систем відслідковування режиму на скерування плазмового потоку по осі шва. Жорсткість плазмової дуги дає змогу гнучко враховувати складну, зокрема просторову орієнтацію швів; якість зварювання задовольняє вимоги до виробу навіть за зміни напрямку щодо осі шва до 45° за швидкості до 7,5 м/с. Такий позитив зменшує вимоги до строгості складання деталей під зварювання в одній площині. Стабільність плями нагрівання дає змогу отримати сталу величину проплавлення металу без складних систем контролю та зворотних зв'язків для керування джерелом. Геометрія плями нагрівання за формою є прямо корельована з геометрією перерізу конструкції сопла плазмотрона. Останнє сприяє різкому зменшенню розмірів ЗТВ на 50–60 % за одночасного підвищення швидкості зварювання на 50–100 % [5].

Як плазмоутворювальні та захисні гази використовують: однокомпонентну систему захисного та плазмоутворювального газів (аргон або гелій); економічно доцільним є змішання двох компонентних систем (аргон – як захисний газ, а гелій – як плазмоутворювальний). Додавання водню у газову плазмоутворювальну суміш дає змогу на 7 % підняти проплавну спроможність, з одночасною нечутливістю якості зварювання від просторового розташування шва.

Додатковим аспектом, що поліпшує якість швів алюмінію та його сплавів, виконаних плазмовим зварюванням, є використання зворотної полярності джерела – завдяки ефекту обернення дуги та вентильних властивостей оксидної плівки, що сприяє її механічному та термічному руйнуванню з одночасним перемішуванням та рафінуванням рідкого металу ванни.

Найефективніше проявляються переваги плазмового зварювання під час зростання відповідальності виробу за збереженням розмірної точності після зварювання, дотримання показників механічної міцності тощо.

Як і для решти способів зварювання плавленням час перебування рідкого металу у ванні залежить від її геометричних параметрів та швидкості зварювання. Оскільки довжина ванни не перевищує 2–5 мм, а швидкість зварювання лежить в діапазоні 10–50 м/год, час перебування металу у рідкій фазі оцінюється всього у 0,1–3 с.

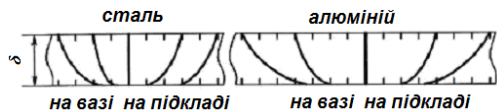


Рис. 1. Регламентовані перерізи зварних швів під час зварювання в інертних газах: максимально допустима товщина основного металу під час зварювання на базі не більше 4 мм

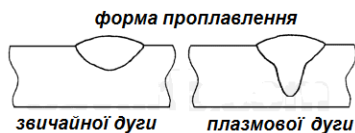


Рис. 2. Типові форми перерізу шва для різних способів зварювання

Проте у ГОСТ 14806 не передбачені розміри швів виконаних плазмовим зварюванням, а форма перерізу швів істотно відрізняється від форми швів, притаманних аргонодуговому зварюванню таких самих товщин (рис. 2). Нормалізовані розміри швів хоча й враховують технологічні особливості їх виконання, проте задають достатньо велику ширину шва, не типову для плазмового зварювання, а також передбачають значні допуски на складання та кінцеві розміри зварного з'єднання.

В основу розрахунку параметрів режиму зварювання закладаються положення [5, 6], у яких не передбачається урахування варіанта реалізації способу зварювання (змінний, імпульсний струм тощо); крім того, зазначається, що подальша оптимізація вибраних режимів проводиться експериментально.

Мета роботи – обґрунтувати вибір оптимальної геометрії шва і вибір оптимальних параметрів режиму плазмового зварювання алюмінієвих закладних елементів прес-форм.

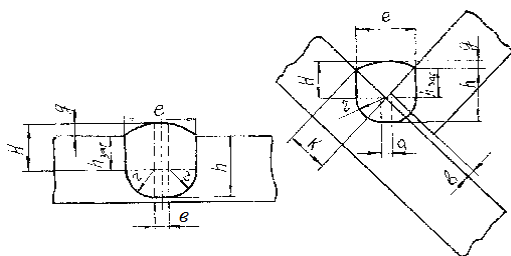


Рис. 3. Приведення різних типів швів до умовного розрахункового

Останнє зумовлює специфічність як металургійних, так і кристалізаційних процесів у концентрованих теплових полях, та менший вплив термодинамічного процесу зварювання на робочі характеристики швів; рівень залишкових деформацій на 25–30 % менший, ніж під час аргонодугового зварювання, міцність шва становить не менше 0,9 від міцності основного металу.

У конструктивних рішеннях зварних елементів прес-форм типовим є застосування бортів, що задовольняє вимоги: а) до розмірної точності; б) зменшення залишкових напружень та деформацій закладних зварних елементів прес-форм; в) вирівнює загальний температурний режим виробів під час експлуатації.

Виклад основного матеріалу. З огляду на різні типи швів, які зустрічаються під час зварювання закладних елементів прес-форм, оптимальна геометрія шва та режим розраховуються для умовного приведеного стикового шва, який виконують без підкладу (товщина металу 2–4 мм). Геометричні параметри такого шва визначені статистичним аналізом показників нормалізованих швів типу С2, С4, С7, У1, У4, У5, Т1, Т3. За базові прийняті складальний зазор “в” та ширина шва “е” (рис. 3).

Статистичному аналізу піддано масив даних з рекомендованих параметрів перерізу шва та аналітичні моделі описання полігонів їх розподілення (рис. 4) за довірчої імовірності $\alpha=0,05$.

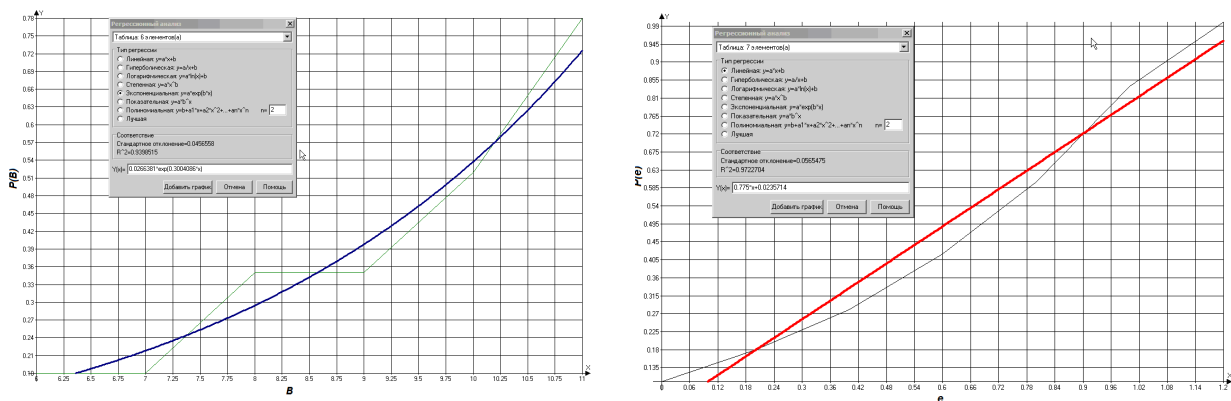


Рис. 4. Полігони щільності розподілення значень складального зазору “B” та ширини шва “e”

Аналітична модель щільності розподілення $P(e)$ ширини шва для цих товщин металу та модель щільності розподілення $P(B)$ їх складального зазору становлять:

Модель 1: $y \equiv P(B) = 0.02663 \exp(0.3004B); B \equiv x$. (1)

Модель 2: $y \equiv P(e) = 0.835 \cdot e + 0.02117; e \equiv x$. (2)

Статистичні характеристики моделей наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Статистичні характеристики аналітичних моделей

Статистичний параметр	$P(B)=\Phi(B)$	$P(e)=\Phi(e)$
	Модель 1	Модель 2
Вибіркові середні (\bar{x}, \bar{y})	8,5; -1,072	0,457; 0,403
Вибіркові дисперсії [$S^2(x); S^2(y)$]	2,92; 0,28	0,17; 0,12
Середнє квадратичне відхилення [$S(x); S(y)$]	1,708; 0,529	0,41; 0,352
Коефіцієнт кореляції [$r(xy)$]	0,969 $(t_p = 7.906 \geq t_{T;a/2} = 2.776)$	0,973 $(t_p = 7.906 \geq t_{T;a/2} = 2.776)$
Довірчий інтервал коефіцієнта кореляції	$0.629 \leq r_{xy} \leq 1.0$	$0.708 \leq r_{xy} \leq 1.0$
Коефіцієнт еластичності E	2,55	0,95
Похибка апроксимації A ($A_{кр}=7\%$)	11,87 %	22,11 %
Емпіричне кореляційне відношення (за шкалою Чеддока) η	0,98	0,973
Коефіцієнт детермінації \bar{R}^2	0,96	0,9468
Стандартна похибка регресії S	0,051	0,096
Довірчий інтервал $y_{низ} \leq y \leq y_{верх}$	$0,34 \leq y \leq 0,46$	$0,7 \leq y \leq 1,01$
Критерій Фішера F	95,92; ($F_{кр}=2,71$)	89,36; ($F_{кр}=2,71$)

Розраховані регресії хоча і мають високі показники (еластичність, коефіцієнт кореляції тощо) проте значна похибка апроксимації, яка демонструє середнє відхилення розрахованих за моделлю даних полігону від експериментальних, є недостатньо коректними та унеможливають розв’язок щодо провідного параметра геометрії для усіх зазначених типів швів, що свідчить про однозначну залежність умов формування шва від просторового його виконання і типу.

Для його визначення створена змішана вибірка даних та її полігон розподілення (рис. 5) і розрахована відповідно до нього аналітична модель описання на підставі множинної регресії виду

$$P(B, e) = \Phi(B; e); y = f(x_1, x_2); y \equiv P(B, e), x_1 \equiv e, x_2 \equiv B$$

або

$$y = 0.06464 + 0.6804 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 \quad (3)$$

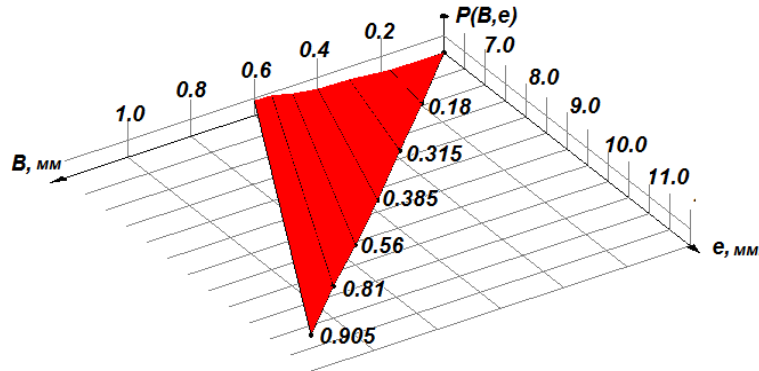


Рис. 5. Полігон щільності розподілення мішаного масиву значень складального зазору “В” та ширини шва “е”

з такими статистичними характеристиками: а) парні коефіцієнти кореляції $r_{yx_1} = 0.981$; $r_{yx_2} = 0.981$; $r_{x_1x_2} = 1.0$ ($t_p = 11.19 \geq t_{T;a/2} = 2.571$); б) похибка апроксимації $A = 15.97\%$; в) частинні коефіцієнти еластичності $E_1 = 0.863$; $E_2 = 0.000$; г) стандартна похибка регресії $S = 0.072$; д) множинний коефіцієнт кореляції $R = 0.9806$; е) коефіцієнт детермінації $\bar{R}^2 = 0.942$; є) критерій Фішера $F = 50.06$ ($F_{кр} = 6.94$).

З моделі (3) випливає, що однозначним провідним параметром під час виконання цих типів швів та товщин металу є складальний зазор; ширина шва обирається з огляду на зварюваний метал. Зокрема для алюмінію, який втрачає механічну міцність за температур, більших за 300°C , останнє є дуже важливим.

Розрахунок режимів зварювання: під час розрахунку площі перерізу шва додатково прийняті такі геометричні його параметри: підсилення шва $g = 0.8$ мм, не стандартна ширина шва $e = 8.5$ мм (з урахуванням просторового положення та типу шва); форма границі сплавлення прийнята як для зварювання в аргоні неплавким електродом (рис. 2). Останнє дає змогу забезпечити надлишок потужності, оскільки під час розрахунку не враховується одночасна дія тепловідведення біля шовної зони.

Розрахункове значення площі перерізу шва становить:

$$F_\Sigma = F_{\text{зазор}} + F_{\text{проплав}} + F_{\text{наплав}} = 52 \text{ мм}^2. \quad (4)$$

Подальший розрахунок параметрів режиму зварювання проведений відповідно до методики [5], у якій підкреслено, що базовим параметром є конструктивний вибір діаметра сопла плазмотрона, з яким корелюються решта технологічних параметрів режиму.

Оптимальний діапазон задавання діаметра d_c сопла для подачі плазмоутворювального газу лежить у межах

$$d_c \geq (0.4 \dots 0.6) \cdot e = 3.4 \dots 5.1 \text{ мм}. \quad (5)$$

Прийняте $d_c = 4$ мм (значення значно завищене за [5], де рекомендована величина становить 2–3 мм). Для усереднення рекомендованої величини для розрахунку прийнятий $d_c = 3$ мм.

Витрати плазмоутворювального газу становлять

$$Q_g \geq 0.12 \cdot (1 + d_c^2) = 1.2 \text{ л/хв}. \quad (6)$$

Подальший розрахунок параметрів режиму плазмового зварювання враховує саме варіант з використанням різнополярних імпульсів струму:

величина струму зварювання

$$I \leq 100 \cdot (d_c - 1) \leq 200 \text{ А}; \quad (7)$$

напруга на дузі: прямої полярності

$$U_+ = C + 0,03 \cdot I = 82 \text{ В}; \quad (8)$$

зворотної полярності

$$U_- \leq C + 0,03I = 90 \text{ В}, \quad (9)$$

де C – коефіцієнт пропорційності, який для прямої полярності становить 22 В, а для зворотної приймається 30 В.

Уточнене значення величини струму відповідно становить [6]:

$$I = \frac{d - 0,27 \cdot Q + 0,1 \cdot S - a}{0,025} = \frac{4 - 0,27 \cdot 1,2 + 0,1 \cdot 8 - 0,4}{0,025} = 153 \text{ А}, \quad (10)$$

де d – товщина зварюваного металу; Q – витрати плазмового газу; S – площа додаткових отворів плазмотрона (для стандартних виробів становить 6–12 мм²); a – коефіцієнт, що враховує властивості зварюваного металу (для алюмінію типове значення 0,4).

Прийняте значення струму $I = 150$ А. Тоді уточнені значення падіння напруги на дузі прямої та оберненої полярності становлять, відповідно, 65 та 75 В.

Ефективна потужність процесу становить

$$Q_e = h_{(+,-)} \cdot I \cdot U_{(+,-)}, \quad (11)$$

де $h_{(+,-)}$ – коефіцієнт корисної дії за дуги різної полярності: для дуги прямої дії він приймається 0,55, а зворотної – 0,45–0,5.

Звідси ефективна потужність процесу у прямій полярності становить 536 Вт, а у зворотній – 506 Вт. Якщо зварювання реалізується різнополярними імпульсами, то потужність одиначної локальної ванни розплавлення, відповідно, становить

$$Q_1 = \frac{804}{v_{3g}} \text{ Вт} \cdot \text{с/м}. \quad (12)$$

Ефективний радіус стисненої дуги:

$$R_e = (1,3 \dots 1,4) d_c = 3,9 \dots 4,2 \text{ мм}. \quad (13)$$

Безрозмірний показник ефективності теплового процесу зварювання:

$$e = \frac{Q_e}{d \cdot a \cdot r \Delta H} = \frac{506 \dots 536}{4 \cdot 2 \cdot 2,8} = 0,02 \dots 0,024, \quad (14)$$

де $a = 2$ мм²/с – температуропровідність; $r \Delta H = 2,8$ Дж/мм² – повний тепловміст одиначного об'єму металу з урахуванням зміни його агрегатних перетворень, зокрема, захищеної теплоти плавлення.

Швидкість зварювання становить

$$v_{3g} = \frac{\bar{Q}_e \cdot \bar{h}}{r \Delta H \cdot F_\Sigma} = 2 \text{ мм/с}, \quad (15)$$

де $\bar{Q}_e \cdot \bar{h}$ – усереднені значення потужності та коефіцієнта корисної дії; F_Σ – розрахункова площа шва.

Швидкість зварювання за [6]

$$v_{3g} = -3 \cdot d + 38 \text{ м/год} = 26 \text{ м/год}. \quad (16)$$

Діаметр неплавкого електрода

$$d_e = \sqrt[3]{\left(\frac{I}{67}\right)^2} = 1,6 \text{ мм.} \quad (17)$$

Довжина зварювальної ванни

$$L = \frac{\bar{Q}_e^2}{v_{зв} \cdot d^2 \cdot 4p \cdot I_T \cdot c_{gr} \cdot g_T \cdot T_{пл}^2} = 1,2 \text{ мм,} \quad (18)$$

де $I_T \cdot c_{gr} \cdot g_T \cdot T_{пл}$ – відповідно, теплопровідність (208 Вт/(м·К)), теплоємність – за температури плавлення (1200 Дж/(кг·К)), питома вага – за температури плавлення (2,4 г/см³), температура плавлення алюмінію – 933 К.

Виміряні параметри поперечного перерізу шва, розрахованого режиму та складального зазору деталей мають відхилення від розрахункового не більше 11 %.

Висновки: 1. Проведений статистичний аналіз геометричних параметрів нормалізованих швів рекомендований для зварювання плавленням. 2. Аналітичні моделі опису полігонів щільності розподілення значень складального зазору та ширини шва дозволяють з надійною імовірністю їх вибір при плазмовому зварюванні. 3. Аналітична модель суміщеного полігону щільності розподілення геометричних параметрів шва демонструє переважальну роль величини складального зазору на формування шва незалежно від його просторового виду. 4. Розраховані параметри режиму плазмового зварювання закладних елементів з алюмінію для прес-форм автоматів для литва полімерів.

1. [www. Harlab. Com/](http://www.Harlab.Com/). 2. [http:// pereosnastka.ru/](http://pereosnastka.ru/). 3. [www. implast.ru](http://www.implast.ru). 4. Сварка, резка, контроль: справочник: у 2-х т.; под ред. Н. П. Алешина. – М.: Машиностроение, 2004. 5. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. – М.: Машиностроение, 2008. – 406 с. 6. Лебедев Б. Д., Перемитько В. В. Расчетные методы в сварке плавлением. – Днепропетровск: ДГТУ, 1998. – 285 с.