

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №7
«Розрахунок параметрів режиму електроконтактного зварювання
тиском»

з дисципліни
«Технологія та устаткування зварювання тиском»

для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка» освітніх програм
«Технології та устаткування зварювання» та
«Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» усіх
форм навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №7 «Розрахунок параметрів режиму електроконтактного зварювання тиском» з дисципліни «Технологія та устаткування зварювання тиском» для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка» освітніх програм «Технології та устаткування зварювання» та «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» усіх форм навчання / Укл.: В.В. Нетребко, Р.А. Куликовський. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024.– 32с.

Укладачі: В.В. Нетребко, професор, докт. техн. наук

Р.А. Куликовський, доцент, канд. техн. наук

Рецензент: М.Ю. Осіпов, доцент, канд. техн. наук

Відповідальний

за випуск: В.В. Нетребко, професор, докт. техн. наук

ЗАТВЕРДЖЕНО:

на засіданні кафедри ІТЗ та МК
Протокол №5 від 29.11.2024 р.

Рекомендовано
до видання НМК ІФФ
Протокол №4
від 17.12.2024 р.

ЗМІСТ

1 МЕТАРОБОТИ	4
2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ.....	4
3 МАТЕРІАЛИ, ІНСТРУМЕНТ, ПРИЛАДИ, ОБЛАДНАННЯ	28
4 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ	28
5 ВКАЗІВКИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ.....	29
6 ЗМІСТ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ	29
7 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	29
Рекомендовані інформаційні джерела	29
ДОДАТОК	32

1 МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є засвоєння методик розрахунку параметрів режиму електроконтактного точкового зварювання за заданою маркою матеріалу та товщиною зварюваних зразків.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Вплив різних факторів на розрахунок та вибір параметрів режимів зварювання. На режим зварювання істотно впливають багато властивостей металів: теплофізичні (див. додаток), фізико-хімічні, механічні, тип та параметри кристалічної ґратки, інтервал кристалізації та температурний інтервал крихкості, властивості окисних плівок та інші.

Питомий опір (ρ_0) в багатьом визначає зварювальний струм та тип машини. Чим менше ρ_0 , тим більше повинен бути струм зварювання ($I_{зв}$). Наприклад, при зварюванні алюмінієвих сплавів необхідні струми значно більше, ніж при зварюванні сталей. *Коефіцієнт теплопровідності (λ)* та пов'язаний з ним коефіцієнт температуропровідності α обумовлюють розсіяння теплоти в біляшовній зоні, її розмірів, а також температуру в контакті електрод-деталь. Зі збільшенням λ зменшують $t_{зв}$, використовують більш жорсткі режими. *Температура плавлення сплаву ($T_{пл}$)* впливає на витрати теплоти, на значення $I_{зв}$, а також на температуру в контакті електрод-деталь та інтенсивність масопереносу. Зі збільшенням коефіцієнту лінійного розширення α та умовного опору пластичної деформації σ_d металу підвищується здатність до внутрішніх виплесків, зростає рівень залишкових напружень та деформацій. При зварюванні металів з більшими значеннями σ_d необхідно різко підвищувати $F_{зв}$, встановлювати більш «м'який» режим. *Інтервал кристалізації та температурний інтервал крихкості (ТІК)* визначають схильність до утворення гарячих тріщин. Чим ширший ТІК, тим вище схильність до гарячих тріщин. *Тип та параметр кристалічної ґратки, температура плавлення* визначають спорідненість при зварюванні різнорідних сплавів, кінцеву структуру та властивості металу ядра. Деякі метали змінюють свої властивості (ρ_0 , λ , α) за збільшенням температури. Тому часто додають попередній підігрів додатковим імпульсом струму (для

підвищення ρ_0 зі зменшення λ та α). Це дозволяє знизити зварювальний струм та полегшити формування з'єднань. Електричні та фізико-механічні властивості поверхневих плівок впливають на тепловиділення в контактах та масоперенос.

Параметри режиму електроконтактного зварювання. Якість зварювання та максимальна продуктивність процесу, для даної товщини, форми та матеріалу виробу, визначається тим, як вірно обрано режими зварювання. *Режимом зварювання* називається сукупність електричних, механічних та часових параметрів, що забезпечуються зварювальним обладнанням та необхідних для отримання якісного зварного з'єднання. Параметри режиму обирають за таблицями, номограмами, розраховують або встановлюють дослідним шляхом. Обрані чи розраховані режими перевіряють або уточнюють для конкретних умов. Основними параметрами режиму точкового зварювання, від яких залежить якість зварних з'єднань, являються:

- розміри та форма робочої (контактної) поверхні електродів d_e , R_e ;
- зусилля стискання електродів – $F_{зв}$;
- час зварювання – $t_{зв}$;
- сила зварювального струму – $I_{зв}$.

Розмір контактної поверхні електродів d_e , R_e (мм) та її форма істотно впливають на міцність зварної точки, вибір та розрахунок інших параметрів режиму зварювання. При зварюванні низьковуглецевих сталей робоча частина електрода зазвичай виконується у вигляді усіченого конуса з пласкою контактною поверхнею, рідше зі сферичною контактною поверхнею. Існує деяке оптимальне значення площі контактної поверхні електрода. Зменшення площі контактної поверхні призводить до зменшення розмірів зварної точки й зниженню міцності зварного з'єднання. Збільшення площі контактної поверхні понад деякої оптимальної величини при певній потужності машини також небажано тому, що це призводить до зменшення щільності струму, у зв'язку із чим розміри ядра й міцність зварної точки також знижуються.

При пласкому контакті діаметр поверхні електрода, d_e визначають в залежності від товщини металу – s , що зварюється:

- при $s \leq 2$ мм $d_e = 2s + 3$,
- при $s > 2$ мм $d_e = 1,5s + 5$,

де s – товщина більш тонкої з деталей, що зварюються, мм.

Сферична контактна поверхня електродів при зварюванні сталі зазвичай має радіус 50...100 мм.

Зусилля стискання електродів – $F_{зв}(H)$ впливає на електричний опір у зоні зварювання і, як наслідок, на кількість тепла, що виділяється при зварюванні, а також на ступінь ущільнення ядра точки в процесі кристалізації. Зусилля стискання електродів залежить від товщини та механічних властивостей зварюваних деталей, а також від тривалості нагрівання. Необхідне зусилля стискання електродів зростає зі збільшенням товщини металу. Орієнтовно, при зварюванні гарячекатаної низьковуглецевої сталі зусилля $F_{зв}$ становить:

- на «жорстких» режимах

$$F_{зв} = (1000 \dots 2000) \text{ s};$$

- на «м'яких» режимах:

$$F_{зв} = (600 \dots 1000) \text{ s}.$$

При зварюванні холоднокатаної сталі зусилля зварювання підвищується на 20...30%.

Час протікання зварювального струму (час зварювання) – $t_{зв}$ (с) визначається властивостями та товщиною матеріалу, що зварюється. При зварюванні низьковуглецевої сталі на «жорстких» режимах час зварювання може бути приблизно визначено за формулою:

$$t_{зв} = (0,1 \dots 0,2) \text{ s},$$

При зварюванні на «м'яких» режимах:

$$t_{зв} = (0,8 \dots 1,0) \text{ s}.$$

Величину зварювального струму $I_{зв}(A)$ розраховують за законом Джоуля-Ленца:

$$I_{зв} = \sqrt{\frac{Q_{ee}}{r_{ee} \cdot t_{зв}}}$$

де – m_r коефіцієнт, що враховує зміну загального опору між електродами (r_{ee}) в процесі зварювання (для низьковуглецевих сталей $m_r \approx 1$, для алюмінієвих та магнієвих сплавів – 1,15, корозійностійких сталей – 1,2, сплавів титану – 1,4);

– Q_{ee} – повна кількість теплоти що виділяється між електродами на електричних опорах при проходженні через них зварювального струму за час зварювання $t_{зв}$), Дж;

r_{ee} – загальний опір в зоні зварювання, Ом.

Загальний опір в зоні зварювання. Величина r_{ee} та його розподіл залежить від способу зварювання та істотно впливають на опір нагріву. При зварюванні двох деталей рівної товщини з однакового металу загальний опір r_{ee} (Ом) металу між електродами становить:

$$r_{ee} = 2r_d + 2r_{ед} + r_{дд},$$

де – r_d – власний активний опір зварюваних деталей, Ом;

$r_{ед}$ – перехідний опір в приконтактній зоні деталі з електродом, Ом;

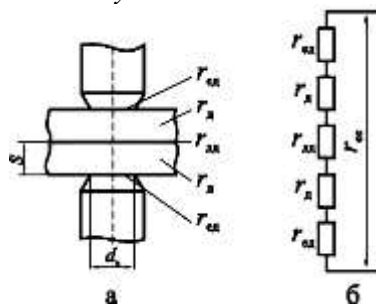
$r_{дд}$ – опір на ділянці контакту обох деталей (рис. 2.1), Ом.

Опір на ділянці контакту електрод-деталь та деталь-деталь та деталей називають контактним опором r_k :

$$r_k = 2r_{ед} + r_{дд}$$

Наявність контактних опорів пов'язана з обмеженістю площі електричного контакту із-за нерівної поверхні деталей та електродів, а також із-за різноманітних поверхневих утворень: окисних та гідроокисних плівок, адсорбованої води, мастил, продуктів корозії, пилу та інше. Тому фактична площа контакту до нагріву значно менше контурної площини контакту. В цих умовах відбувається згущення силових ліній на окремих електропровідних мікровиступах. Такий «ситовий» характер призводить до різкого збільшення щільності струму та інтенсивному тепловиділенню в зоні контакту. Значення та

характер зміни контактної опору залежить від наступних факторів: стану поверхні деталей; зусилля стиску деталей; роду матеріалу; температури в зоні контакту.



а – розподіл опорів; б – еквівалентна електрична схема
Рисунок 2.1 – Електричний опір зони зварювання

Опір на ділянці електричного ланцюга між електродами при точковому зварюванні в початковий момент визначається в основному контактним опором (рис. 2.2).

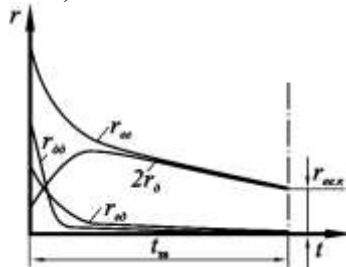


Рисунок 2.2 – Кінетика зміни електричних опорів при точковому електроконтактному зварюванні

Після включення зварювального струму мікроконтакти швидко нагріваються, знижується опір металу пластичній деформації, полегшуються умови руйнування поверхневих плівок, та при певних критичних температурах T_{KP} , які характерні для даного металу, r_K різко знижується до нуля (рис. 2.2). Власний опір холодних деталей відносно невеликий, при подальшому нагріванні опір деталей спочатку збільшується внаслідок збільшення питомого опору – ρ_0 , а потім дещо знижується, внаслідок збільшення площини електричних контактів. Ступінь зниження опору залежить від зусилля стискання. При цьому r_{ec} визначається в основному опором самих деталей. Значення T_{KP} для

сталей становить 600...700°C, для алюмінієвих сплавів – 400...500°C.

При збільшенні зусилля зварювання $T_{кр}$ дещо знижується. Зниження r_k від моменту контакту та до зникнення досягається за час $(1...3)10^{-3}$ с для сталей та $(5...6)10^{-3}$ с для алюмінієвих сплавів.

Експериментально встановлено, що доля теплоти, яка виділяється на опору r_k , зазвичай (при зварюванні сталей товщиною не більш 1мм) не перевищує 5% загальної енергії, що генерується в зоні зварювання. Не дивлячись на те, що r_k існує відносно короткий час, він може оказати вплив на наступне нагрівання, особливо при зварюванні деталей малої товщини, де висота мікрорельєфу поверхні сумірна з товщиною деталей. Попередньо нагріта зона контакту, що має підвищений опір, сприяє більшому тепловиділенню. Але, при збільшенні $r_{дд}$ стабільність тепловиділення невелика, а з підвищенням $r_{ед}$ знижується стійкість електродів.

Таким чином, загальний омичний опір на ділянці ланцюга між електродами в процесі контактного зварювання буде визначатися власним опором деталей, що зварюються.

При точковому зварюванні електричний струм підводиться до зварюваної деталі через два нерівних за діаметром контакти: перший з них дорівнює діаметру електроду d_e , інший – діаметру контакту між зварюваними деталями d_k (рис. 2.3). Зварювані деталі нерівномірно нагріті по товщині. Їх температури постійно змінюються по мірі збільшення часу проходження струму.

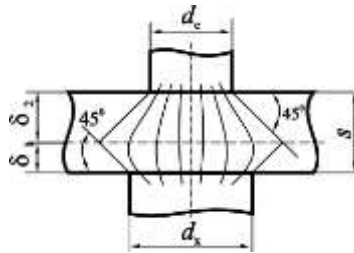


Рисунок 2.3 – Схема поля струму для розрахунку опору деталі з неоднаковими розмірами контактів

Діаметр контакту між деталями к закінченню нагрівання:

$$d_k = d_e + \alpha s,$$

де α – коефіцієнт, що залежить від зусилля стискання електродів.

При зварюванні на «жорстких» режимах (за великого значення $F_{зв}$) $\alpha = 1,5 \dots 1,7$; а при зварюванні на «м'яких» режимах (при відносно малої $F_{зв}$) $\alpha = 1,0$. При $d_k > d_e$ схема ліній струму має несиметричну форму по товщині деталі (рис. 2.3). Лінії струму за рахунок шунтування струму в метал розтікаються по об'єму умовно обмеженому лініями, що проведені під кутом 45° від границі контакту. Для визначення перетину об'єму, у якому перебуває поле ліній струму, з кінців діаметрів проводяться прямі під кутом 45° . При цьому деталь умовно розбивається на дві пластинки нерівної товщини δ_1 і δ_2 :

$$s = \delta_1 + \delta_2$$

$$s = (d_k - d_e)/2 + \delta_2$$

Власний опір пластинки товщиною $\delta_1 + \delta_2$, нерівномірно нагрітої в умовах точкового зварювання з контактами неоднакового розміру, можна приблизно розрахувати по формулі як півсуму опорів двох пластинок товщиною δ_1 та δ_2 , затиснутих відповідно між рівними електродами d_k і d_e . Фактичний опір деталі менше опору циліндру металу, затиснутого між електродами діаметром d_k і d_e , коригуючий коефіцієнт (A) визначається за графіком, представленим на рис. 2.4. Нагрівання впливає на коефіцієнт питомого опору. Залежність коефіцієнту питомого опору від температури для деяких сплавів показано на рис. 2.5.

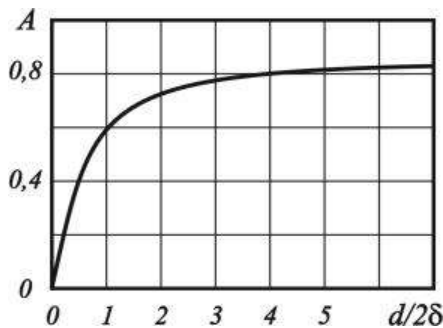


Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнту A від співвідношення $d / 2\delta$

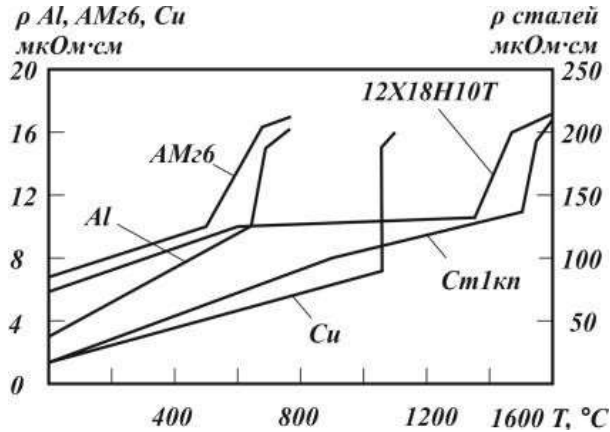


Рисунок 2.5 – Коефіцієнти питомого опору деяких металів в залежності від температури нагріву

Нагрівання деталей при точковому зварюванні. В умовах точкового зварювання виділення теплоти викликано дією рядом джерел. Головне джерело – об’ємно розподілене, яке визначається питомою потужністю електричного струму. Другорядні – плоскі джерела пов’язані з генеруванням теплоти на відповідних контактних опорах. Доля плоских джерел в загальному тепловому балансі не перевищує 10 %.

Кількість тепла Q_{ee} (Дж), необхідного для зварювання окремої точки, можна розрахувати через теплоту що знаходиться в металі к закінченню процесу зварювання та кількість теплоти, що відведена від зони зварювання в процесі формування з’єднання. Для цього використовують умовні схеми теплопередачі в зоні зварювання та розподілу в ній температури (рис. 2.6). Такий розподіл теплоти описується так званим «рівнянням теплового балансу», котре було запропоноване ще у 30-х роках минулого століття та використовується по наш час в інженерних методиках розрахункового визначення зварювального струму:

$$Q_{ee} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

де Q_1 – кількість теплоти, що витрачається на нагрівання до температури плавлення $T_{пл}$ умовно виділеного центрального

стовпчика металу висотою $2s$ і діаметром d_e , затиснутого між електродами (рис. 2.6) ($Q_1 \approx 20 \dots 30\%$ від Q_{ee}), Дж;

Q_2 – кількість теплоти, що витрачається на нагрівання металу у вигляді кільця шириною x_1 , що оточує центральний стовпчик ($Q_2 \approx 20\%$ від Q_{ee}), Дж;

Q_3 – кількість теплоти, що передана в електроди за рахунок теплопровідності ($Q_3 > 50\%$ від Q_{ee}), Дж;

Q_4 – втрати тепла випромінюванням з поверхні деталей, що зварюються, радіаційним і конвективним теплообміном (теплообмін з навколишнім середовищем), Дж.

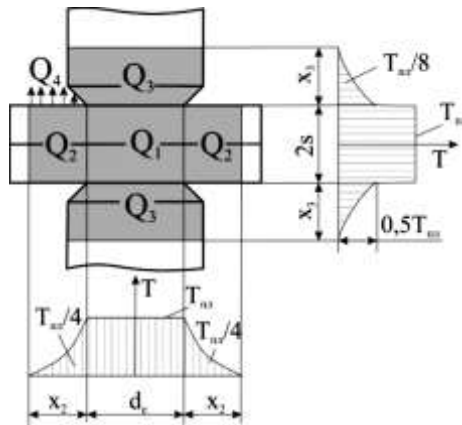


Рисунок 2.6 – Розрахункова схема теплового балансу при точковому зварюванні

При точковому зварюванні, особливо на «жорстких» режимах, втрати тепла Q_4 , через короткочасність процесу, незначні, тому в розрахунках ними можна зневажити. Зазвичай кількість тепла Q_1 , яке необхідне безпосередньо на утворення зварної точки, називають корисним теплом Q_{KOP} , а тепло, що витрачається на нагрівання ядра що оточує метал та електроди називають втратами тепла $Q_{BTP} = Q_2 + Q_3$.

У деяких визначених межах Q_{KOP} не залежить від тривалості нагріву та визначається об'ємом нагрітого металу V до температури T при умовній теплоємності c та густині γ ($Q_{KOP} = Vc\gamma T$).

Втрати теплоти збільшуються зі збільшенням часу нагрівання, тому підвищується і загальна кількість теплоти Q_{ee} , тобто зі збільшенням часу зварювання ККД процесу нагрівання завжди

зменшується. При цьому неминуче розширюється зона нагріву при високому коефіцієнті температуропровідності зварюваного матеріалу.

Розрахунок і відпрацювання параметрів режиму точкового зварювання здійснюється двома різними шляхами :

- на основі літературних даних (таблиці, номограми та інше.) вибирають параметри режиму зварювання;
- використовуючи формули і деякі табличні дані проводять розрахунок параметрів режиму зварювання.

Отримавши параметри режиму зварювання порівнюють величини одержані різними шляхами уточнюють і вибирають їх кінцеві значення.

Для здійснення підбору і розрахунку параметрів режиму зварювання необхідно мати наступні вихідні дані:

- марка зварювального матеріалу, його хімічний склад, механічні і фізичні властивості;
- товщина зварюваних деталей;
- особливості конструкції;
- вимоги до зварної конструкції або шва.

Дані про марки зварюваного матеріалу, хімічний склад, умови постачання, механічні і фізичні властивості необхідні для вибору діаметру електродів, зусилля стиску деталей, типу режиму зварювання, необхідності попереднього підігріву і наступної термообробки. Товщина деталей, механічні і фізичні характеристики матеріалу впливають також і на основні параметри режиму зварювання. Складність конструкції і вимоги до неї визначають розміри і тип електродів, вимоги до якості швів, величину перекриття точок, або крок між ними, а також величину напустки.

Розрахунок параметрів процесу точкового зварювання визначається:

- геометричними і фізичними характеристиками з'єднання;
- складністю конструкції виробу;
- вимогами до якості з'єднання (герметичності і надійності).

Порядок проведення розрахунку і вибору основних параметрів режиму точкового зварювання наступний:

- а) проводиться аналіз властивостей матеріалу, його зварюваність, визначаються вимоги до якості зварювання;
- б) вибираємо циклограму процесу точкового зварювання;

в) вибираємо конструкцію вузла, діаметр електродів та визначаємо можливий діаметр зварної точки;

г) вибираємо форму електродів, марку матеріалу, з якої їх необхідно виготовити;

д) розраховуємо необхідне зусилля стиску електродів;

е) визначаємо величину часу імпульсу та інші параметри у відповідності з вибраною циклограмою процесу;

є) розраховуємо величину струму зварювання;

ж) в таблицю зводимо всі дані, які відповідають вибраній циклограмі процесу зварювання і по них підбираємо машину для реалізації процесу.

Аналіз властивостей матеріалу виконується на підставі даних довідників, виходячи із марки зварюваних матеріалів, вибираємо їх хімічний склад та механічні властивості. Виявляємо можливі труднощі при виконанні зварювання та вибираємо технологічні операції, які б покращили зварюваність і зменшили ймовірність утворення різного роду дефектів. Визначаємо вимоги до якості з'єднання.

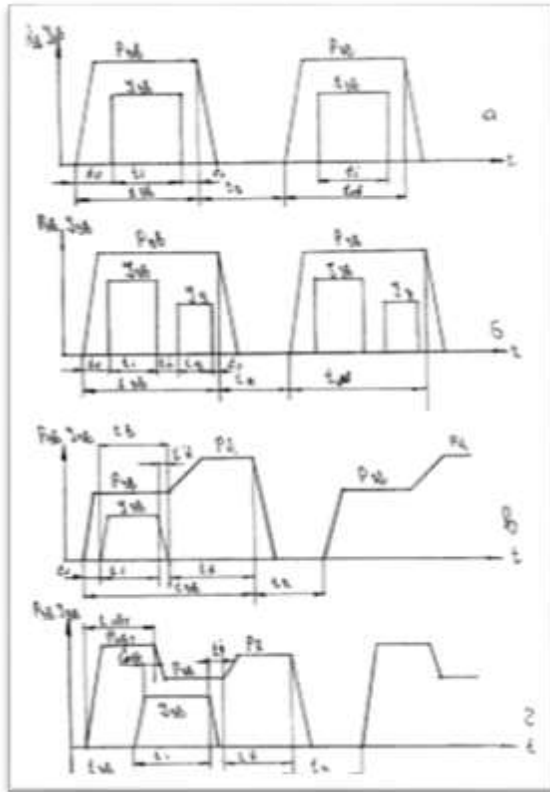
Циклограму процесу точкового зварювання здійснюють в залежності від марки матеріалу, товщини деталей, вимог до якості з'єднання, вибираємо тип циклограми процесу точкового зварювання. Типи циклограм приведені на рисунку 2.7.

Показані циклограми можуть бути використані в переважній більшості в наступних випадках:

а) при зварюванні низьковуглецевих і низьколегованих сталей, алюмінію і його сплавів, міді і її сплавів, титану, аустенітних і аустенітно-феритних сталей; б) при зварюванні низьковуглецевих, середньо і високолегованих (аустенітних, аустенітно-феритних) сталей товщиною 3-5 мм;

в) при зварюванні середньо і високовуглецевих та середньолегованих хромистих сталей;

г) при зварюванні низьковуглецевих та інших сталей товщиною 4 – 5 мм.

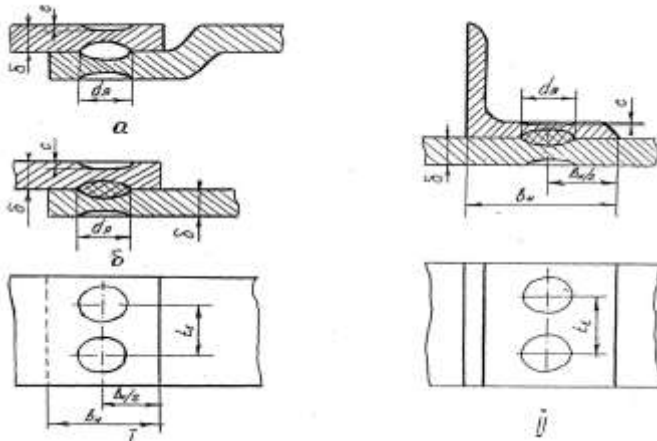


а – циклограма з постійним зусиллям стиску і одним імпульсом струму; б - циклограма з постійним зусиллям зварювання і додатковим імпульсом струму; в - циклограма з змінним зусиллям стиску (із куванням); г - циклограма з попереднім обтиском і кувальним зусиллям. $P_{зв}$ P_k $P_{обт}$ – зусилля стиску, кування і обтиску; $I_{зв}$, I_d – струм зварювання і струм додаткового підігрівання; - час імпульсу струму і паузи; $t_{зв}$ – час дії зусилля стиску; - час паузи між імпульсом струму зварювання і додатковим імпульсом струму; t_d – час додаткового імпульсу струму; P_k – зусилля кування; t_k^i – час запізнення включення зусилля кування по відношенню до включення струму; $t_{обт}$ – час попереднього обтискання; $t_{обт}^i$ – час попередження включення струму по відношенню до виключення зусилля обтискання.

Рисунок 2.7 – Циклограми точкового зварювання

Вибір конструкції вузла і визначення діаметра ядра. У більшості випадків використовують двостороннє точкове зварювання. При обмеженому доступі до місця зварювання використовують

одностороннє точкове зварювання. При проєктуванні конструкції зварюваних вузлів, необхідно правильно вибирати тип з'єднання (внапуск, з підсічкою чи без підсічки). Типи з'єднань показано на рисунку 2.8.



I – з'єднання в напуск; а – з підсічкою; б – без підсічки; II – з'єднання кутника;
 δ – товщина деталі; $d_{я}$ – діаметр ядра; t_k – крок між точками; v_n – величина напуску; c – глибина відбитків.

Рисунок 2.8 – Типи з'єднань при точковому зварюванні

Вибір форми і марки матеріалу електродів. Електроди – це інструмент, який здійснює безпосередній контакт машини із зварюваними деталями. Електроди в процесі зварювання виконують три основних завдання;

- стискають деталі;
- підводять струм зварювання;
- відводять частково тепло, яке виділяється в процесі зварювання.

До електродів ставлять наступні основні вимоги:

- забезпечення високої електропровідності;
- збереження форми робочої поверхні в процесі зварювання.

Для забезпечення приведених вище вимог при виготовленні електродів використовують спеціальні мідні сплави, які забезпечують високу жароміцність та електропровідність. Найбільше поширення для точкового зварювання дістали електроди з площинною і сферичною робочою поверхнею (рис. 2.9).

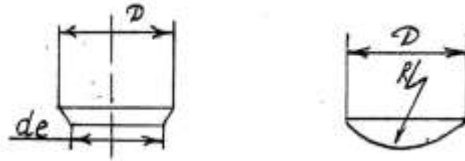


Рисунок 2.9 – Форма електродів для електроконтактного зварювання

Для забезпечення необхідної зварної точки необхідно врахувати форму його робочої поверхні (табл. 2.1). Розмір робочої поверхні вибирають відповідно товщини зварюваних деталей.

Таблиця 2.1 – Розміри електродів

Товщина тоншої деталі, мм	Розміри електродів		
	D	d_e	R
0,3	12	3,0	15-25
0,5	12	4,0	25-50
0,8	12	5,0	50-75
1,0	12	5,0	75-100
1,2	16	6,0	75-100
1,5	16	7,0	100-150
2,0	20	8,0	100-150
2,5	20	9,0	150-200
3,0	25	10,0	150-200
3,5	25	12,0	200-250
4,0	30	13,0	200-250
4,5	30	14,0	250-300
5,0	35	16,0	250-300

Діаметр електродів можна розраховувати в залежності від товщини зварюваних деталей за формулою:

$$d_e = 2\delta + 3$$

де δ – товщина тоншої деталі, мм.

При цьому необхідно чітко дотримуватися розмірів зварних з'єднань, в першу чергу величину напуски, яка встановлюється в залежності від товщини і матеріалу деталей (табл. 2.2)

Таблиця 2.2 – Розміри конструктивних елементів зварних з'єднань

Товщ тоншої деталі, мм	Діаметр литого ядра, мм	Мінімальний напуск при однор. шві, мм		Мінімальний технологічний крок точок, мм		
		Легкі сплави	Сталі, титанові сплави	Легкі сплави	Низьколеговані та середньо; низько, середньо вугл. сталі	Високолеговані сталі і сплави
0,3	2,5+1	8	6	8	7	5
0,5	3,0+1	10	8	11	10	7
0,8	3,5+1	12	10	13	11	9
1,0	4,0+1	14	12	14	12	10
1,2	5,0+1	16	13	15	13	11
1,5	6,0+1	18	14	20	14	12
2,0	7,0+1,5	20	16	25	18	14
2,5	8,0+1,5	22	18	30	20	16
3,0	9,0+1,5	26	20	35	24	18
3,5	10+2	28	22	40	28	22
4,0	11+2	30	26	45	32	24
4,5	12+2	34	30	50	36	26
5,0	13+2	36	34	55	40	30
5,5	14+2	38	38	60	46	34
6,0	15+2	43	44	65	52	40

Величина зусилля стиску деталей $P_{зв}$ при точковому зварюванні, в момент проходження струму, залежить від механічних властивостей матеріалу деталей, їх товщини і може бути визначена за формулами:

– для низько-, середньовуглецевих і низьколегованих сталей;

$$P_{зв} = 500 + 2 \cdot 10^6 \delta$$

– для високовуглецевих і середньолегованих сталей;

$$P_{зв} = 1,5 \cdot 500 + 2 \cdot 10^6 \delta$$

– для нержавіючих, жароміцних сталей і титану

$$P_{зв} = 2 \cdot 500 + 2 \cdot 10^6 \delta$$

При неякісному складанні, вузла із жорсткою конструкцією, а також при використанні матеріалу зі значними значеннями σ_T зусилля стискання приймається на 10 % більше. При зварюванні деталей з використанням циклограм із змінним зусиллям стиску величину зусилля кування (P_K) визначають за формулою:

$$P_K = (2 \dots 3) P_{ЗВ}$$

При зварюванні деталей з використанням циклограм з попереднім обтиском і наступним зусиллям кування їх значення визначають за формулами:

$$P_K = (2 \dots 3) P_{ЗВ}$$

$$P_K = (1,5 \dots 2,3) P_{ЗВ}$$

Визначення часу імпульсу зварювального струму. Одним із основних параметрів процесу точкового зварювання є час проходження зварювального струму, тобто час імпульсу t_i . Час проходження струму в основному залежить від марки зварюваного матеріалу деталей. Цей параметр визначають виходячи із імперичних формул чи з таблиць. При цьому слід відмітити, що в ряді випадків, ці дані зовсім не співпадають. Вибрана чи розрахована величина часу імпульсу перевіряється дослідним шляхом, а при необхідності корегується. Час імпульсу зварювального струму визначають за імперичними формулами (t_i – в с, δ – в м):

– для низько-, середньовуглецевих і низьколегованих сталей;

$$t_i = 0.04 \cdot 1 + \delta^2 \cdot 10^6$$

– для високовуглецевих і середньолегованих сталей;

$$t_i = 0.06 \cdot 1 + \delta^2 \cdot 10^6$$

– для нержавіючих, жароміцних сталей, титану і його сплавів;

$$t_i = 0.03 \cdot 1 + \delta^2 \cdot 10^6$$

– для міді і її сплавів;

$$t_i = 0.025 \cdot 1 + \delta^2 \cdot 10^6$$

– для алюмінію і його сплавів;

$$t_i = 0.02 \cdot 1 + \delta^2 \cdot 10^6$$

Розрахунок і відпрацювання параметрів режиму шовного зварювання. Шовне зварювання широко використовується для зварювання напусткових з'єднань листів. Воно забезпечує щільне і міцне зварне з'єднання. Розрізняють три різновиди шовного зварювання: безперервне, переривчасте і крокове. Найпоширенішим є переривчасте шовне зварювання. (рис. 2.10, а та 2.11, а).

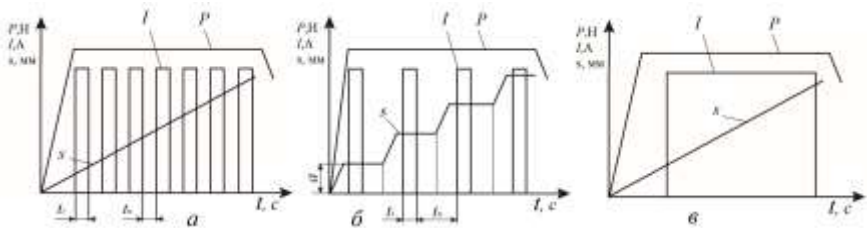


Рисунок 2.10 – Циклограми переривчастого (а), крокового (б) і безперервного (в) шовного зварювання

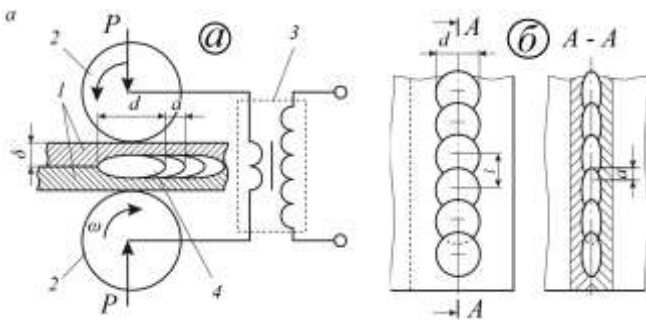


Рисунок 2.11 – Схема процесу шовного зварювання (а) і шовного зварного з'єднання (б)

Під час переривчастого шовного зварювання заготовки 1 затискаються між електродними (дисками) 2 зусиллям P , з початком

обертання електродів через зварювані заготовки від трансформатора з пропускається зварювальний струм I імпульсами, що чергуються з паузами. Зусилля стискання на електродах і швидкість обертання електродів незмінні в процесі виконання зварного з'єднання. Тривалість імпульсів t_i і тривалість пауз між імпульсами t_n формуються програмним регулятором шовного зварювання ПК-200.

Під час проходження одного імпульсу струму метал в контакт між заготовками розплавляється, кристалізується і утворюється зварна точка 4 (див. рис. 2.11). Після паузи, при проходженні через заготовки наступного імпульсу струму утворюється нова точка.

Тривалість імпульсів t_i зварювального струму, пауз між ними t_n і швидкість зварювання (обертання електродів – ω) вибираються такими, щоб кожна наступна точка перекривала попередню на величину $l = d - a$; $l = (0,4 \dots 0,6) d$ (d – діаметр точки, l – крок між точками, a – величина перекриття) (див. рис. 2.11). Як наслідок – забезпечується щільність зварного з'єднання.

Під час крокового шовного зварювання, на відміну від переривчастого, зварювальний струм через заготовки пропускають імпульсами при нерухомих електродах. Переміщення заготовок на величину кроку між точками l здійснюється під час паузи (див. рис. 2.10, б). Цей спосіб зварювання використовується для виготовлення відповідальних конструкцій, він поєднує в собі переваги точкового і шовного зварювання.

Під час безперервного шовного зварювання, на відміну від переривчастого, зварювальний струм пропускають через заготовки безперервно (див. рис. 2.10, в). Цей спосіб шовного зварювання має певні недоліки і використовується обмежено.

Промисловістю випускаються машини для шовного зварювання, відмінні за потужністю, призначенням і конструкцією. Але до їх складу входять однакові за призначенням складові: енергетична, механізми стискання електродів та їх обертання, система керування.

Основні параметри режимів переривчастого шовного зварювання (див. рис. 2.10): I – зварювальний струм, А; P – зусилля стискання заготовок, Н; t_i – тривалість імпульсу зварювального струму, с; t_n – тривалість паузи між імпульсами струму, с; $v_{зв}$ – швидкість зварювання (ω – обертання), м/год.

Для зварювання пластичних металів та сплавів застосовують шовне зварювання з роздавлюванням кромek (рис. 2.12). Таке

зварювання може відбуватися в твердому стані або з розплавленням (виникненням рідкого ядра). Утворене з'єднання має меншу масу у порівнянні із звичайним зварюванням внапуск та більш високі показники механічних властивостей, особливо при циклічних та знакозмінних навантаженнях та покращені антикорозійні властивості.

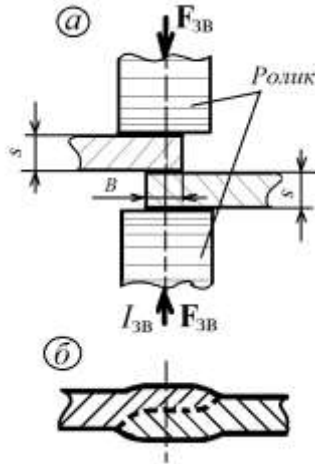
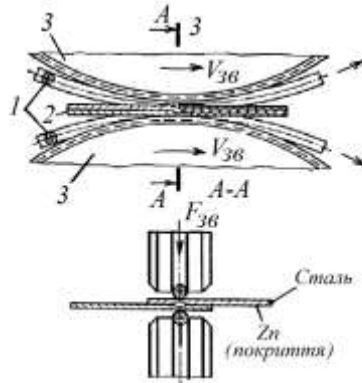


Рисунок 2.12 – Схема процесу шовного зварювання з роздавленням кромки до зварювання (а) та після зварювання (б)

При шовному зварюванні алюмінію, алюмінієвих сплавів та сталей із покриттям, для усунення налипання на електроди застосовують зварювання із використанням мідного дроту (рис. 2. 13).



1 – мідний дріт; 2 – деталі зі сталі із цинковим покриттям; 3 – дискові електроди
Рисунок 2.13 – Схема процесу шовного зварювання з використанням мідного дроту

Контроль якості зварювання. Дефекти зварних з'єднань та причини їх утворення. Основними видами дефектів точкового контактного зварювання є: *непровар*, вихід литої зони на поверхню деталей, зовнішній та внутрішній *виплески*, надмірні *вм'ятини від електродів*, несприятливі *зміни структури металу*, дефекти *порушення щільності металу*. Головною причиною виникнення цих дефектів є недотримання оптимальних параметрів режиму зварювання.

Непровар – відсутність литої зони, або її малі розміри. Загальною причиною неспроможності є порушення співвідношення між кількістю тепла, що вводиться в зону зварювання та кількістю тепла, яке необхідне для формування зварного з'єднання. Крім дотримання цього співвідношення необхідно також забезпечити певний закон введення тепла в зону зварювання за час протікання зварювального струму. Зниження тепловиділення відбувається внаслідок зменшення зварювального струму $I_{зв}$ та $t_{зв}$, за збільшення зварювального зусилля $F_{зв}$ та робочої поверхні електродів. Розміри литої зони також зменшуються внаслідок шунтування струму в сусідні точки через малий шаг зварних точок.

Вихід литої зони на поверхню деталей відбувається через використання надмірно форсованих режимів зварювання. Інші причини: зменшення $F_{зв}$ та забруднена поверхня деталей та електродів. Наслідком дефекту є зменшення корозійної стійкості з'єднань.

Надмірні вм'ятини від електродів можуть утворюватись при використанні електродів з пласкою робочою поверхнею для зварювання легких, мідних та титанових сплавів. Внаслідок великої вм'ятини відбувається пластичне видавлювання металу навколо литої зони в зазор між деталями. Іншою причиною видавлювання металу є невірне встановлення зварюваного вузла по відношенню до електродів машини, перекіс або поперечний зсув електродів.

Внутрішній виплеск виникає при прориві пластичного паска що оточує рідкий метал ядра, або при місцевому інтенсивному розплавленні металу в контакті деталей – деталь, при якому пластичний ущільнюючий пасок ще не встиг сформуватися. Основною причиною внутрішнього виплеску вважаються надмірно високі швидкості нагріву металу та великі розміри зони розплавлення. Розрізняють *початковий внутрішній виплеск*, що виникає коли об'єм розплавленого металу незначний та *кінцевий внутрішній виплеск*, при якому об'єм зони розплавлення досяг значних розмірів.

Початкові виплески пояснюються перегрівом окремих ділянок (локальних контактів) відносно малої площі внаслідок незадовільної підготовки поверхні металу, або через перекіс електродів. При зварюванні металів з малим опором деформації виплески не характерні. Вірогідність їх появи збільшується при використанні жорстких режимів зварювання та невеликих зусиль. Утворення кінцевого внутрішнього виплеску пов'язано з розкриттям зазору, яке обумовлене розширенням металу, втратою герметичності з'єднання та викидом рідкого металу під високим тиском.

Зовнішній виплеск представляє собою викид металу в контакт електрод – деталь. Основною причиною виплеску вважають інтенсивне тепловиділення в контакт, що виникає за поганої підготовки поверхні (високий опір контакту), забруднень робочої поверхні електродів, а також при недостатньому $F_{зв}$. Виплеск також може утворюватись через локальне підвищення тепловиділення в контакт електрод – деталь, яке виникає за перекошу деталей по відношенню до електродів та непаралельності плоских робочих поверхонь електродів. Місцеве розплавлення металу на периферії контакту електрод – деталь може відбуватися через різко нерівномірну щільність зварювального струму $I_{зв}$ по перерізу контакту, котра виникає, наприклад, за зварювання деталей з відносно невеликою або нерівною товщиною електродами з великою робочою поверхнею.

Несприятливі зміни структури металу спостерігаються при використанні відносно жорстких режимів для зварювання деталей з вуглецевих, низьколегованих та деяких хромистих сталей, що призводить до утворення в литій та біля шовних зонах структури гартування, яка має високу твердість та низьку пластичність. Подібне явище спостерігається коли при зварюванні з термічною обробкою невірно обрано величину та тривалість струму, що виконує відпуск зони зварювання та не забезпечується покращення механічних властивостей з'єднання.

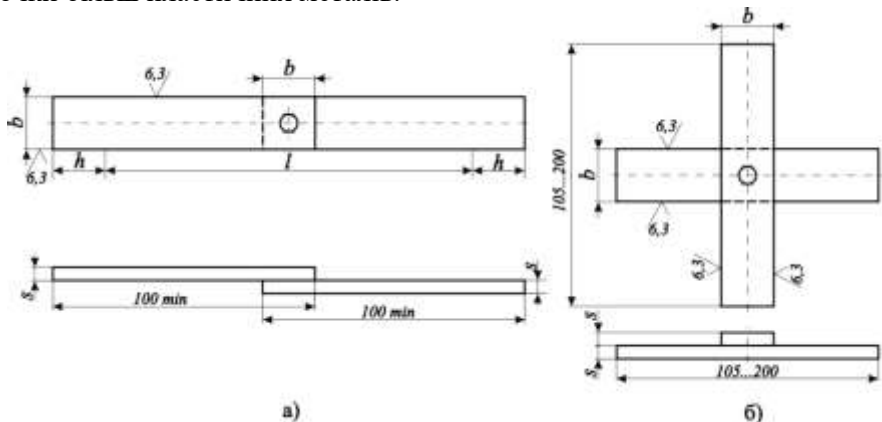
Дефекти порушення щільності металу виникають через усадку розплавленого металу при його кристалізації та охолодженні. Кристалізація розплавленого металу відбувається в жорсткій, зачиненій з усіх сторін формі, зі стінками якої зростається рідкий метал в процесі охолодження. Якщо деформація стінок цієї форми недостатня для компенсації об'ємних змін, що виникають при твердінні, то після кристалізації металу ядра утворюються усадкові порожнечі у вигляді

пор та раковин.

Контроль зварних з'єднань буває руйнівний та не руйнівний. Не руйнівний контроль здійснюється візуально та за допомогою збільшувального скла (лупи) за збільшення $\times 10$. Оцінюється зовнішній вид відбитків електродів, перекіс деталей та інші.

Руйнівний контроль здійснюють шляхом випробувань технологічних зразків для визначення показників міцності місця зварювання. Міцність з'єднань визначають випробовуванням контрольних зразків на зріз, або на відрив. Матеріал та товщина зразків призначених для механічних випробовувань зварних з'єднань повинні бути ідентичні зварюваним деталям. Форма зразків для випробовувань точкових з'єднань на зріз та відрив наведена на рис. 2.14; розміри зразків вказані в табл. 2.3. При випробовуваннях визначають навантаження руйнування на точку у ньютонках. Для запобігання вигину та забезпечення можливості випробування, зразки для випробувань на відрив закріплюють у спеціальному оснащенні, яке повинно забезпечувати їх жорсткість.

При випробовуваннях на зріз зварні точки руйнуються як зі зрізом литого металу, так і з виривом ядра (наскрізним або не наскрізним) з основного металу. З наскрізним виривом зазвичай руйнуються зварні точки більш пластичних металів.



s – товщина основного металу, мм; h – довжина захватної частини (обирається в залежності від конструкції випробувальної машини), мм; l – довжина робочої частини зразка, мм

Рисунок 2.14 – Зразки для механічних випробовувань точкових з'єднань на зріз (а) та відрив (б)

Таблиця 2.3 – Розміри зварних точкових зразків для механічних випробовувань на зріз

Товщина основного металу s , мм	Ширина зразка b (див. рис. 2.14), мм
До 1 включно	20
Більше 1 до 2 включно	25
Більше 2 до 3 включно	30
Більше 3 до 4 включно	35
Більше 4 до 5 включно	40
Більше 5	45

Точки металів, що мають високу міцність, руйнуються зі зрізом. Але чіткого розмежування за характером руйнування односточкових зразків немає і в залежності від розмірів литої зони, ширини зразка та напустки, а також загальної жорсткості з'єднання, можуть бути зріз або відрив точок. Якщо зразки точкових з'єднань руйнуються зі зрізом, то у зламі можна заміряти діаметр литого ядра, а також виявити внутрішні дефекти: тріщини, пори та виплески. Руйнування одно точкових зразків по основному металу свідчить про недостатню ширину зразка та не дозволяє судити про міцність зварної точки. Міцність зварних з'єднань визначається розмірами литої зони та властивостями литого металу й біляшовної зони. Найбільший вплив на міцність точкових з'єднань має діаметр литого ядра в площині з'єднання. Міцність точок на зріз зростає майже пропорційно площині литої зони.

Для більшості металів режим зварювання (жорсткий або м'який) за умови однакових розмірів литої зони істотно не впливає на міцність з'єднань. Виключення складають метали, що мають високу чутливість до термічного циклу зварювання, наслідком якого є утворення структур гартування. Міцність цих металів значно залежить від режиму зварювання та наступної термічної обробки. Дослідження зварних точок на відрив виконують на хрестоподібних зразках (див. рис. 2.14, б). При випробовуванні на відрив руйнування у більшості випадків відбувається з наскрізним виривом металу по біляшовній зоні; рідше зустрічається не наскрізний вилив, наприклад у зразків значної товщини (більш 4 мм), та з невеликим проплавленням (15...30%). Однак, характер руйнування з'єднань практично не впливає на величину зусилля відриву (міцність) зварних точок.

В табл. 2.4 та 2.5 наведені середні зусилля руйнування зварних точок на зріз та відрив для з'єднань різних металів.

Таблиця 2.4 – Середні зусилля руйнування зварних точок на зріз, даН

Товщина тонкої деталі	Середній діаметр ядра, мм	X18H9T, ЭИ703	OT4, BT5	ЭИ654, CH2	ЭИ602, ЭИ435	ЭИ 696 А, ЭИ437Б	30ХГСА відпалена	Л62 м' яка	АМц	Д16АТ, АМг6	МА2-1	08кп
0,3	3,0	140	158	163	175	180	150	65	27	43	33	118
0,5	3,5	240	275	282	310	330	275	145	60	91	70	200
0,8	4,0	485	545	565	625	640	540	280	130	176	115	405
1,0	4,5	700	770	795	875	895	730	395	170	265	160	580
1,5	6,5	1380	1585	1680	1810	1865	1480	775	270	463	320	1167
2,0	7,7	1930	2300	2370	2530	2590	2210	1170	425	695	415	1625
3,0	9,7	3050	3450	3525	3610	3695	2950	1730	680	1195	770	2550

Таблиця 2.5 – Середні зусилля руйнування зварних точок на відрив, даН

Товщина тонкої деталі, мм	Середній діаметр ядра, мм	X18H9T	OT4	АМг3	Д16АТ	В95АТ	МА2
0,3	3,0	125	38	-	11	-	-
0,5	3,5	190	60	18	23	20	-
0,8	4,0	385	135	35	176	45	25
1,0	4,5	575	200	48	265	60	40
1,2	5,5	785	290	80	463	100	75
1,5	6,5	1150	475	100	695	140	100
2,0	7,5	1660	765	170	1195	230	200
3,0	9,5	2550	1210	450		485	355
4,0	13,0	3340	-	-		770	-
5,0	15,0	-	-	-		1140	-
6,0	17,0	-	-	-		1770	-

З МАТЕРІАЛИ,ІНСТРУМЕНТ,ПРИЛАДИ,ОБЛАДНАННЯ

1. Машина для електричного контактного точкового зварювання МТ-1816, паспорт контактної машини або її опис.
2. Зразки для зварювання з різних матеріалів та товщиною (матеріал зразків – низьковуглецева сталь, алюміній; товщина зразків за пропозиції викладача).
3. Набір слюсарного та вимірювального інструментів(динамометр, штангенциркуль, молоток, зубило).
4. Засоби індивідуального захисту (окуляри, рукавиці, халат, лупа х4, тощо).
5. Демонстраційні матеріали.

4 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

1. Перед тим, як приступати до виконання лабораторної (практичної) роботи студент зобов'язаний вивчити методичні вказівки, або за допомогою рекомендованої літератури самостійно ознайомитися з матеріалами конкретних робіт; вивчити інструкцію по техніці безпеки; відповісти на контрольні запитання викладача та отримати у нього дозвіл на виконання роботи.
2. Студенти ознайомлюються з технологічним процесом та обладнанням для електроконтактного зварювання тиском. Для зразків запропонованих викладачем студенти визначають режими зварювання відповідно до циклограми зварювання. Проводять випробування на міцність з'єднання та визначають оптимальний режим зварювання зразків.
3. Зробити ескізи досліджуваних зразків (об'єктів) та зон руйнування.
4. Зробити вимірювання, розрахунки чи опис об'єктів.
5. Оформити звіт на загальних засадах. Зробити опис та призначення елементів обладнання.
6. Опрацювати контрольні запитання.

5 ВКАЗІВКИЗ ОХОРОНИ ПРАЦІТА ТЕХНІКИБЕЗПЕКИ

До лабораторних (практичних) робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці, при роботі з електроустановками до 1000 В та пожежної безпеки.

Забороняється вмикати електричні прилади та обладнання без дозволу завідуючого лабораторією або викладача.

Для захисту від бризок та виплесків металу при зварюванні зварник (студент) повинен працювати в спеціальних прозорих окулярах або за прозорими щитами та мати відповідний спецодяг. Перебуваючи біля рухомих частин машин при подачі повітря та електричного живлення необхідно дотримуватися заходів безпеки (можливе спрацювання пневматичного приводу машини при несправних регуляторі або елементах пневматичного пристрою).

Вимірювання необхідно виконувати тільки після відключення машин від мережі автоматичним вимикачем. Рукоятку автомата необхідно перевести в положення «вимкнено».

У випадку виявлення неполадок обладнання студент повинен негайно повідомити викладача або завідуючого лабораторією.

У випадку виникнення пожежі або враження електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими інструкціями з охорони праці та пожежної безпеки.

6 ЗМІСТ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт по виконаній роботі повинен містити наступні відомості:

- мета роботи;
- опис методики проведення експериментів чи досліджень;
- результати експериментів чи досліджень відобразити у вигляді таблиць, графіків чи ескізів або опис вивченого об'єкту;
- аналіз отриманих результатів, опис та висновки по роботі повинні містити інформацію про проведені дослідження.

7 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

7.1 Назвіть основні параметри режиму точкового зварювання.

7.2 Як визначаються параметри режиму точкового зварювання?

7.3 Як записується рівняння теплового балансу для точкового зварювання?

7.4 Як по заданим зварювальному струму та загальному опору зони зварювання визначити необхідний ступінь зварювального трансформатора?

7.5 Від чого залежить значення та характер зміни контактного опору?

7.6 Які дефекти можуть утворитись в зварному з'єднанні внаслідок невірного вибору наступних параметрів контактного точкового зварювання: $F_{зв}$, $t_{зв}$, $I_{зв}$, $d_{сл}$?

7.7 Поясніть характер зміни залежності $F_{руйн} = f_1(t_{зв})$ та $F_{руйн} = f_2(I_{зв})$.

7.8 Як параметри точкового контактного зварювання впливають на якість зварного з'єднання?

7.9 Поясніть ефект шунтування струму, як він впливає на якість зварного з'єднання?

7.10 Поясніть, чому зусилля руйнування зварних точкових з'єднань на зріз в 1,5...2 рази більше ніж на відрив.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Крівцун, І. В. Спеціальні способи зварювання: підручник. [Текст] / І. В. Крівцун, В. В. Квасницький, С. Ю. Максимов, Г. В. Єрмолаєв, за загальною редакцією академіка НАН України, доктора технічних наук, професора Б. Є. Патона. – Миколаїв : НУК, 2017. – 346с.

2. Бугаєнко, Б. В. Технології та устаткування зварювання тиском : навчальний посібник. [Текст] / Б. В. Бугаєнко, А. М. Тубальцев, Є. А. Бутурля. – Миколаїв : НУК, 2018. – 135 с.

Рекомендовані інформаційні джерела

1. Журнал «Автоматичне зварювання». Вид. Міжнародна Асоціація "Зварювання". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as> – 18.04.2024. Заголовок з екрану.

2. Журнал «Сварщик». Вид. ІЕЗ ім. Е.О. Патона. Київ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://welder.stc-paton.com/ru/> – 18.04.2024. Заголовок з екрану.

3. Національна бібліотека України ім. В.І. Вернадського. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.nbuv.gov.ua/> – 18.04.2024. Заголовок з екрану.

4. Наукова бібліотека НУ "Запорізька політехніка". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://library.zntu.edu.ua/> – 18.04.2024. Заголовок з екрану.

5. Кафедра Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zp.edu.ua/kafedra-integrovanih-tehnologiy-zvaryuvannya-ta-modelyuvannya-konstrukciy> – 18.04.2024. Заголовок з екрану.

Додаток

Теплофізичні властивості деяких металів та сплавів

Метал	Питомий електроопір при 0° С ρ_0 , мОм·см	Коефіцієнт теплопровідності при 20° С λ , кВт/(м·К)	Коефіцієнт температуропровідності α , 10 ⁻⁶ м ² /с	Питома теплоємність при 20° С c_p , кДж/(кг·К)	Густина при 20° С γ , кг/м ³	Температура плавлення $T_{пл}$, °С
Алюміній	2,7	0,2	-	1	2800	658
Алюмінієві сплави:						
АМц	4,2	0,16	25	0,82	2800	654
Д16Т	7,3	0,125	-	0,9	2900	633
АМг6	7,5	0,1	-	0,82	2780	620
Бронза БрБ2	6,5	0,08	52	0,47	8230	-
Вольфрам	5,5	0,17	-	0,25	19300	3500
Жароміцні сплави:						
ХН78Т	98	0,015	-	0,46	8350	-
ХН60ВТ	120	0,01	-	0,44	8800	1400
Магнієвий сплав МА2-	12	0,1	45	1,04	1780	632
Мідь	1,75	0,36	83	0,38	8900	1083
Молібден	5,5	0,17	-	0,25	10220	2622
Сталі:						
Низьковуглецева 08кп	13	0,06	8	0,46	7800	1530
30ХГСА	21	0,04	-	0,48	7850	1480
X15H5Д2Т	85	0,018	-	0,46	7760	-
12Х18Н10Т	75	0,016	3	0,46	7860	1440
Титанові сплави:						
ОТ4	142	0,01	2	0,58	4590	1660
ВТ6	160	0,008	-	0,54	4600	-
ВТ15	155	0,008	-	0,5	4890	-
Цирконій	41	0,017	-	0,28	6500	-