

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"

ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ-1

Джерела нагрівання та теплові процеси при зварюванні

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних робіт з навчальної дисципліни
для студентів напряму підготовки 6.050504 "Зварювання"

*Рекомендовано вченою радою
зварювального факультету
НТУУ "КПІ"*

Київ 2013

Теорія процесів зварювання-1. Джерела нагрівання та теплові процеси при зварюванні: методичні вказівки до практичних робіт з навчальної дисципліни для студентів напряму підготовки 6.050504 "Зварювання" /Уклад.: В.М. Коперсак – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 23 с.

*Гриф надано вченою радою
зварювального факультету НТУУ "КПІ"
(Протокол № 7 від 18 березня 2013 року)*

Навчальне електронне видання

ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ-1

Джерела нагрівання та теплові процеси при зварюванні

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних робіт з навчальної дисципліни
для студентів напряму підготовки 6.050504 "Зварювання"

Укладач:	Коперсак Віктор Миколайович
Відповідальний редактор:	Прохоренко О.В., к.т.н. доцент
Рецензент:	Попель Ю.С., к.т.н. доцент

Зміст

Вступ	4
Приклади задач	5
Єдина система одиниць (SI)	17
Фізичні константи і постійні величини	18
Ентальпії $\Delta H_{\text{вип}}^0$ та ентропії $S_{\text{вип}}^0$ випаровування деяких металів	19
Залежність питомої електропровідності шлаків для ЕШЗ від температури	19
Значення поправочного коефіцієнта m в залежності від глибини занурення електрода в шлакову ванну	19
Контактний опір між пластинками з низьковуглецевої сталі при різних способах підготовки поверхні	20
Контактний опір між пластинками з алюмінієвих сплавів при різних способах підготовки поверхні	20
Залежність контактного опору від стискаючого зусилля та від температури	21
Рекомендована література	22

Вступ

Навчальна дисципліна "Теорія процесів зварювання" і її перша частина "Джерела нагрівання та теплові процеси при зварюванні" є, без сумніву, головним стрижнем базової теоретичної підготовки бакалавра за напрямом "Зварювання" та подальшого вдосконалення в цій галузі за спорідненими спеціальностями до рівня спеціаліста та магістра.

Практичним роботам студента з навчальної дисципліни "Теорія процесів зварювання-1. Джерела нагрівання та теплові процеси при зварюванні" відводиться в навчальному процесі чільне місце – до 36 академічних годин впродовж семестру, включаючи самостійну роботу та контрольні заходи.

За традиціями, які склались у вищій школі взагалі, та на зварювальному факультеті особливо, вивчення дисципліни теоретичного спрямування обов'язково передбачає достатню кількість практичних робіт. Сюди входять: виконання індивідуальних завдань, підготовка до практичних занять, обробка результатів, отриманих на лабораторних і практичних заняттях, тощо. Але головним є самостійне вирішення задач і прикладів.

Зрозуміло, що для продуктивного практичного застосування теоретичних положень студенту необхідно надати певні зразки (алгоритми) використання тих чи інших розрахункових форм і методів.

Даний методичний посібник покликаний дещо вирішити цю проблему і допомогти студенту систематизувати способи і методи практичних рішень. Текст включає типові приклади, організацію одиниць вимірювань (система *SI*), які зустрічаються під час виконання лабораторних робіт і проведення практичних занять, значення часто вживаних у розрахунках фізичних величин, розрахункові формули та таблиці значень фізичних величин і специфічних математичних функцій.

Приклад 1.

Для випадку електронно-променевого зварювання визначте орієнтовну середню швидкість електронів, розігнаних в електричному полі різницею потенціалів 150000 В.

Розв'язок: скористаємось для визначення швидкості електрона залежністю $v = \sqrt{2U_a \frac{e_0}{m_e}}$. При цьому зауважимо, що маса електрона

$m_e = 9,1025 \cdot 10^{-31}$ кг, заряд електрона $e_0 = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ (див. Додаток), одержимо:

$$v = \sqrt{2 \cdot 150000 \cdot \frac{1,6022 \cdot 10^{-19}}{9,1025 \cdot 10^{-31}}} = 2,2979 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Швидкість світла у вакуумі $c \approx 2,9979 \cdot 10^8$ м/с. Таким чином, виконаний розрахунок показує, що швидкість електронів буде складати $\sim 77\%$ швидкості світла. Така велика, швидкість руху матеріальної частки, викличе появу релятивістського ефекту збільшення маси в інерційній системі відліку.

Приріст маси матеріального об'єкту в залежності від швидкості руху описується в теорії відносності ґрунтуючись на перетвореннях Лоренца:

$m = m_0 \cdot 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, де: m_0 – маса спокою рухомого об'єкта. Знайдемо масу рухомого електрона:

$$m_{ep} = 9,1025 \cdot 10^{-31} \cdot 1/\sqrt{1 - (2,2979 \cdot 10^8 / 2,9979 \cdot 10^8)^2} = 1,4173 \cdot 10^{-30} \text{ кг.}$$

Як бачимо, збільшення маси електрона при русі з такою швидкістю може бути: $m_{ep} - m_e = 5,0705 \cdot 10^{-31}$ кг або $55,7\%$. Насправді цього не буде, бо збільшеній масі електрона буде відповідати менше значення швидкості руху. Застосуємо метод послідовних наближень: використавши отримане значення дійсної маси рухомого електрона, знайдемо уточнене значення його швидкості, застосувавши знову наведну формулу:

$$v = \sqrt{2 \cdot 150000 \cdot \frac{1,6022 \cdot 10^{-19}}{1,4173 \cdot 10^{-30}}} = 1,8416 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Але уточненому значенню швидкості, буде відповідати й інше значення релятивістської маси в інерційній системі відліку:

$$m'_{ep} = 9,1025 \cdot 10^{-31} \cdot 1 / \sqrt{1 - (1,8416 \cdot 10^8 / 2,9979 \cdot 10^8)^2} = 1,1535 \cdot 10^{-30} \text{ кг.}$$

Відповідно до методу послідовних наближень знайдемо середнє значення маси з отриманих: $\bar{m}_{ep} = \frac{m_{ep} + m'_{ep}}{2} = 1,2854 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$ і використаємо його знову у наведеній залежності. Виконавши по колу такі обчислення кілька разів (поки не буде досягнута прийнятна точність), отримаємо значення дійсної релятивістської швидкості електрона в інерційній системі відліку: $v = 1,9881 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, що складає 66,3 % швидкості світла у вакуумі – найбільшій можливої у нашому просторі-часі.

Приклад 2.

Визначити, якою буде температура кипіння заліза при тиску в установці електронно-променевого зварювання 10^{-3} Па .

Розв'язок: скористаємось формулою $T_{\text{кип}} = \frac{H_{\text{вип}}}{S_{\text{вип}} - R \cdot \ln P}$

де: $H_{\text{вип}}$ – ентальпія випаровування; $S_{\text{вип}}$ – ентропія випаровування;

R – універсальна газова постійна ($R \approx 8,31441 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$);

P – зовнішній тиск (відносний, в долях атмосферного).

Ентальпії та ентропії випаровування речовин є табличні величини, деякі з них наведені в Додатку. Крім того зазначимо, що заданий тиск відповідає у відносних долях $\approx 10^{-8}$ атмосферного. Отже, температура кипіння заліза в заданих умовах буде:

$$T_{\text{кип}}^{Fe} = \frac{354000}{115 - 8,31 \ln(10^{-8})} = 1422 \text{ К.}$$

Приклад 3.

Для виконання термітного з'єднання двох сталевих деталей необхідно 1,25 кг розплавленого заліза. Розрахуйте, скільки необхідно взяти для цього оксиду заліза (окаліни) й алюмінієвого порошку.

Розв'язок: розглянемо уважно хімічне рівняння термітної реакції $3Fe_3O_4 + 8Al = 4Al_2O_3 + 9Fe + Q$ – з 3-ох молів окаліни (при додаванні 8-ми молів алюмінію) утворюється 9-ть молів заліза. В таблиці хімічних елементів Д. І. Менделєєва залізо має 26-й номер, його атомна маса складає 55,85 а.о.м.* Отже, один моль заліза буде мати масу 55,85 кг. Тоді задана кількість заліза складе: $\frac{1,25}{55,85} = 0,0224$ моля.

Отже, щоб відповідати заданій кількості заліза, стехіометричні коефіцієнти хімічного рівняння повинні мати множник $\frac{0,024}{9} = 0,00249$, тоді бу-

де: $0,00747Fe_3O_4 + 0,01992Al = 0,00996Al_2O_3 + 0,0224Fe + Q$

Молекулярна вага оксиду заліза складає $3 \cdot 55,85 + 4 \cdot 16,0 = 215,55$ а.о.м., атомна вага алюмінію (13-й номер таблиці Д. І. Менделєєва) 27,0 а.о.м.

Виходячи з наведеного, для отримання в результаті алюмотермічної реакції 1,25 кг розплавленого заліза, знадобиться:

– оксиду заліза: $0,00747 \cdot 215,55 = 1,61$ кг;

– алюмінієвого порошку: $0,01921 \cdot 27 = 0,512$ кг.

Приклад 4.

Виконується електрошлакове зварювання пластин з низьковуглецевої сталі товщиною 200 мм. При цьому застосовується флюс АНФ-21 та електродний дріт $\varnothing 4$ мм, передбачається висота шлакової ванни 50 мм та глибина занурення електрода в шлакову ванну в межах 30 мм.

* а.о.м. – атомна одиниця маси.

Завдання 1. Знайдіть опір шлакової ванни.

Розв'язок: опір шлакової ванни знаходимо за рівнянням:

$$R_{ш} = \frac{1}{2\pi L \sigma} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \varepsilon m$$

де: σ – питома електропровідність шлаку при середній температурі шлакової ванни;

L – довжина зануреної в шлакову ванну частини електрода;

d – діаметр електрода;

ε – емпіричний коефіцієнт, який враховує значне зменшення опору шлакової ванни при надмірному зближенні електрода і поверхні розплавленого металу, визначається із залежності:

$\varepsilon = 1 - e^{-230a}$, де: a – відстань від торця електрода до поверхні металеві ванни (в метрах): $a = H - L$;

m – поправочний коефіцієнт, залежний від довжини зануреної частини електрода L (визначається за номограмою (в Додатку)).

Приймаємо середню температуру шлакової ванни $\bar{T}_{ш} = 1700$ °С. Тепер визначимо складові рівняння:

– питома електропровідність шлаку (за графіком): $\sigma = 300$ См/м;

– довжина зануреної в шлакову ванну частини електрода (з умови):

$L = 0,03$ м;

– діаметр електрода (з умови): $d = 0,004$ м;

– поправочний коефіцієнт (визначаємо за номограмою) $m = 0,85$;

– емпіричний коефіцієнт знайдемо, визначивши відстань від торця електрода до поверхні металеві ванни, $a = H - L = 0,02$ м, тоді $\varepsilon = 1 - e^{-230a} = 0,990 \approx 1$.

Підставимо числові дані в рівняння (5.31), отримаємо:

$$R_{ш} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,03 \cdot 300} \left(\ln \frac{4 \cdot 0,03}{0,004} - 1 \right) \cdot 1 \cdot 0,85 = 0,051 \text{ Ом.}$$

Завдання 2. Знайдіть, яку робочу напругу повинно забезпечувати джерело живлення, якщо електрод експлуатується з максимальною допустимою густиною струму в ньому $j_{ел} = 110 \text{ А/мм}^2$?

Розв'язок: спочатку знайдемо величину струму, який в електроді $\varnothing 4 \text{ мм}$ буде відповідати заданій густині:

$$I = j_{ел} \frac{\pi d^2}{4} = 1,1 \cdot 10^8 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,004^2}{4} = 1380 \text{ А.}$$

Тепер, необхідну для забезпечення такого струму напругу знайдемо за законом Ома: $U = I R_{ш} = 1380 \cdot 0,051 = 70,4 \text{ В.}$

Знайдене значення виявилось майже рівним напрузі холостого ходу зварювальних джерел живлення ($U_{х.х.} \approx 60 \dots 80 \text{ В}$), тому в робочому режимі вони не здатні його забезпечити (вольт-амперна характеристика зварювальних джерел живлення, зазвичай, спадаюча). Отже, доведеться використовувати не один електрод, а два.

Завдання 3. Для заданих у прикладі параметрів розрахуйте приведенний опір шлакової ванни та необхідну напругу джерела живлення, виходячи з умови використання двох електродів.

Розв'язок: приведенний опір шлакової ванни знаходимо за рівнянням (вважаємо, що відстань між електродами більша за глибину занурення їх в шлакову ванну): $R_{ш}^{np} = \frac{0,051}{2} = 0,0255 \text{ Ом.}$

Для випадку використання двох електродів робоча напруга джерела живлення буде: $U = I R_{ш}^{np} = 1380 \cdot 0,0255 = 35,19 \text{ В.}$

Отриманий результат цілком відповідає характеристикам зварювальних джерел живлення. Таким чином, задані в прикладі умови можна вико-

нати застосувавши два електродних дроти $\varnothing 4$ мм.

Завдання 4. Для заданих у прикладі параметрів і ґрунтуючись на отриманих розв'язках визначте теплову потужність шлакової ванни.

Розв'язок: теплову потужність шлакової ванни знаходимо за рівнянням $R_{ii}^{np} = \frac{R_{ii}}{n}$, не забуваючи, що у випадку використання кількох електродів опір шлакової ванни – це її приведений опір:

$$q_{ii} = 1382^2 \cdot 0,0255 = 48560 \text{ Вт.}$$

Приклад 5.

Визначте і порівняйте значення контактних опорів при температурі 20 °С між ретельно очищеними поверхнями сталевих деталей при стисненні їх із зусиллям 20 кН (2000 кг) і алюмінієвих деталей при стисненні їх із зусиллям 1 кН (100 кг). Яке зусилля необхідно прикласти до алюмінієвих деталей, щоб контактний опір між ними зрівнявся зі сталевими деталями, стиснутими силою 20 кН?

Розв'язок:

При одночасному контактуванні в багатьох точках, що завжди буває при контактному зварюванні, загальний (сумарний) опір всіх цих контактних перешийків, тобто опір всієї зони контакту двох поверхонь R_k , знаходять по аналогії з виразом за формулою: $R_k = \frac{C_n}{P^k}$

При цьому величину C_n розглядають як деякий умовний одиничний контактний опір при зусиллі P , рівному одиниці.

Залежність постулює, що опір контакту не залежить від геометричних розмірів (площі перерізу) деталей, які контактують. Одиничний опір C_n відповідно до цих положень залежить лише від виду металу, який зварюється, і від стану його поверхні. При користуванні Міжнародною системою

одиниць SI виявиться, що при зусиллі стискання $P = 1,0 \text{ Н}$ для дуже ретельно очищених поверхонь (після чистової обробки):

– сталі: $C_n = 0,02 \dots 0,03 \text{ Ом}$;

– алюмінію та його сплавів: $C_n = 0,006 \dots 0,009 \text{ Ом}$.

Показник степені k залежить від виду металу і також від стану його поверхні. Величину цього показника, виходячи з уже цитованих дослідних даних приймають рівною:

– для сталей: $k = 0,65 \dots 0,75$;

– для алюмінію та його сплавів: $k = 0,75 \dots 0,85$.

Щоправда, для сильно окислених або забруднених поверхонь, коли одиничний опір стає надто великим, показник степені рекомендують зменшувати до $k = 0,3 \dots 0,6$.

Для спрощення будемо використовувати середні значення коефіцієнтів. Спочатку розглянемо контакт сталевих деталей. Приймаємо: одиничний опір $C_n = 0,025 \text{ Ом}$, показник степені $k = 0,75$. Тоді, контактний опір між сталевими деталями буде:

$$(R_k)_{ст} = \frac{0,025}{20000^{0,75}} = 1,49 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} = 14,9 \text{ мкОм}.$$

Розглянемо контакт алюмінієвих деталей. Приймаємо: одиничний опір $C_n = 0,0075 \text{ Ом}$, показник степені $k = 0,8$. Тоді, контактний опір між алюмінієвими деталями буде:

$$(R_k)_{ал} = \frac{0,0075}{1000^{0,8}} = 2,99 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} = 29,9 \text{ мкОм}.$$

Тепер визначимо, яке повинно бути зусилля стискання алюмінієвих деталей, щоб контактний опір між ними становив $14,9 \text{ мкОм}$. Для цього логарифмуємо залежність: $\ln(R_k) = \ln(C_n) - k \ln(P)$. Звідси знаходимо:

$$\ln(P) = \frac{\ln(C_n) - \ln(R_k)}{k}, \text{ тоді буде:}$$

$$P = \exp\left(\frac{\ln(C_n) - \ln(R_\kappa)}{k}\right) = \exp\left(\frac{\ln(0,0075) - \ln(1,49 \cdot 10^{-5})}{0,8}\right) = 2384 \text{ Н.}$$

Отже, для досягнення між алюмінієвими деталями контактної опору 14,9 мкОм, їх необхідно стискати із зусиллям $\approx 2,38$ кН.

Приклад 6.

У Вас в розпорядженні машина для контактної зварювання, яка може створити максимальне зусилля стиснення 20 кН. Визначте, який контактний опір буде при такому зусиллі між поверхнями двох деталей з низьковуглецевої сталі в стані поставки (з окалиною) та після чорнової обробки фрезою.

Розв'язок: використаємо те ж саме рівняння, а також дані дослідів та розрахунків з таблиці в Додатках. Одиничний опір деталей в стані поставки (поверхні забруднені окалиною) приймаємо $C_n = 23,9$ Ом. Приймаємо показник $k = 0,45$ (зменшене значення для сильно забруднених поверхонь)

і знаходимо контактний опір: $R_\kappa = \frac{C_n}{P^k} = \frac{23,9}{20000^{0,45}} = 0,277$ Ом.

Одиничний опір цих же деталей після чорнової обробки фрезою буде складати $C_n = 0,36$ Ом. Приймаємо показник $k = 0,75$ і знаходимо контакт-

ний опір: $R_\kappa = \frac{C_n}{P^k} = \frac{0,36}{20000^{0,75}} = 2,14 \cdot 10^{-4}$ Ом = 214 мкОм.

Приклад 7.

Визначте та порівняйте значення контактної опору на різних стадіях процесу при точковому зварюванні листів з низьковуглецевої сталі товщиною $\delta_0 = 3$ мм (поверхні після чорнової обробки, зусилля стискання $P = 8$ кН, діаметр електродів $d = 10$ мм).

Розв'язок: спочатку знайдемо опір холодного контакту між листами (в самий початковий момент зварювання). Скористаємось рівнянням та да-

ними таблиці в Додатках, приймаємо значення одиничного опору $C_n = 0,36$ Ом, коефіцієнта $k = 0,75$, отримаємо:

$$R_k = \frac{C_n}{P^k} = \frac{0,36}{8000^{0,75}} = 4,26 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} = 426 \text{ мкОм.}$$

Опір контакту між електродом і деталлю знайдемо із залежності:

$$R_{el} = \frac{1}{2} R_k = 2,13 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} = 213 \text{ мкОм.}$$

Отже, в холодному стані загальний опір між електродами при заданих умовах буде: $R = R_{el} + R_k + R_{el} = 8,52 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} = 852 \text{ мкОм.}$

Нагадаємо, що опором самих листів R_l у цьому випадку (поки листи холодні) прийнято нехтувати. Але, щоб мати уявлення про те чим знехтували, знайдемо й цю величину $(R_l)_{хол}$. Обмежимося при цьому в матеріалі листів циліндром з основою, рівною діаметру електрода і висотою, рівною двом товщинам листів. Скористаємось залежністю і даними таблиці:

$$(R_l)_{хол} = \rho_0 \frac{\ell}{S} = \rho_0 \frac{2\delta_0}{\pi d^2/4} = \rho_0 \frac{8 \delta_0}{\pi d^2} = 1,3 \cdot 10^{-7} \frac{8}{\pi} \cdot \frac{0,003}{0,01^2} = 9,94 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Як бачимо, опір матеріалу листів складає всього лиш 1,1 % загального контактного опору і ним справді цілком можна знехтувати.

Тепер визначимо, яким буде опір в кінці процесу виконання зварної точки. Прийmemo площу контакту рівною площі фізичного дотикання електрода з деталлю, тоді $S_k = \pi d^2/4 = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Будемо вважати також середню температуру нагрітого металу між електродами $T = 0,9T_{nl} = 0,9 \cdot 1440 \approx 1300$ °С. При цій температурі питомий опір низьковуглецевої сталі буде $\bar{\rho} \approx 13 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Коефіцієнт A знаходимо за графіком: для відношення $d/\delta = 1,67$ ($\delta = 2\delta_0$) він буде: $A \approx 0,63$. Приймаємо також коефіцієнт $k' = 0,8$. При цих умовах контактний опір буде:

$$R_T = 0,63 \cdot 0,8 \frac{0,006}{7,85 \cdot 10^{-5}} 13 \cdot 10^{-7} = 5,01 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} = 50,1 \text{ мкОм.}$$

Нагадаємо, що в цьому випадку – навпаки від холодного – нехтують перехідними контактними опорами, які при високій температурі стають дуже малими.

Для повноти інформаційної картини визначимо ще й опір матеріалу між електродами при кінцевій температурі 1300 °С, без врахування контактних ефектів та неоднорідності поля потенціалів, – просто як опір стовпчика металу, окресленого діаметром електродів та товщинами листів $(R_{л})_{gap}$, для якого вище в холодному стані опір вже був знайдений. Грунтуючись на відомих значеннях площі контакту та середнього питомого опору при температурі 1300 °С, скористаємось знову залежністю (5.29):

$$(R_{л})_{gap} = 13 \cdot 10^{-7} \frac{0,006}{7,85 \cdot 10^{-5}} = 9,94 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} = 99,4 \text{ мкОм.}$$

Приклад 8.

Визначте опір на початку і наприкінці процесу контактного зварювання методом опору та методом оплавлення стержнів прямокутної форми розміром 12×36 мм з низьковуглецевої сталі. Довжина при встановленні (частина стержня, яка виступає із затискача) складає 25 мм, зусилля стискання при зварюванні опором досягає 4 кН, поверхні ретельно зачищені.

Розв'язок: опір виступаючих частин стержнів у холодному стані знайдемо за класичною схемою $(R = \rho \frac{\ell}{S})$, приймаючи значення питомого опору для низьковуглецевої сталі при стандартній термодинамічній температурі $\rho_0 = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$:

$$(R_{cm})_{хол} = \rho_0 \frac{\ell}{S} = 1,3 \cdot 10^{-7} \frac{2 \cdot 0,025}{0,012 \cdot 0,036} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} = 15 \text{ мкОм.}$$

Опір холодного контакту на початку стикового зварювання опором знайдемо із залежності; прийнемо величину одиничного опору для ретельно зачищених поверхонь $C_n = 0,03$ Ом, коефіцієнт $k = 0,7$, тоді контактний опір буде: $R_k = \frac{C_n}{P^k} = \frac{0,03}{4000^{0,7}} = 9,03 \cdot 10^{-5}$ Ом = 90,3 мкОм.

Загальний опір між затискачами на початку процесу контактного зварювання методом опору буде:

$$(R_{opr})_{поч} = (R_{cm})_{хол} + R_k = 1,053 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} = 105,3 \text{ мкОм.}$$

В кінці процесу контактний опір практично зникне, залишиться тільки опір самих деталей, але нагрітих до деякої температури. Знайдемо спочатку цю температуру, приймаючи максимальну температуру стику рівною 1300 °С: $(\bar{T})_{opr} = 0,33T_{max} = 430$ °С і тепер знайдемо опір нагрітих стержнів за рівнянням, приймаючи питомий опір низьковуглецевої сталі при цій температурі $\rho = 4,3 \cdot 10^{-7}$ Ом·см:

$$(R_{opr})_{кін} = \rho \frac{\ell}{S} = 4,3 \cdot 10^{-7} \frac{2 \cdot 0,025}{0,012 \cdot 0,036} = 4,98 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \approx 50 \text{ мкОм.}$$

Виконаємо всі ті ж дії для зварювання методом оплавлення. Опір металу холодних стержнів на початку процесу буде таким же, як і в попередньому випадку: $(R_{cm})_{хол} = 15$ мкОм. Опір контакту знайдемо із залежності, надаючи коефіцієнту форми (k_ϕ) значення відповідно до форми перерізу стержнів (для співвідношення сторін 12:36 = 1:3 вибираємо проміжне значення $k_\phi = 0,8$):

$$(R_k)_{опл} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{k_\phi \sqrt{F}} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{0,8 \sqrt{0,012 \cdot 0,036}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 1200 \text{ мкОм.}$$

Отже, загальний опір між затискачами на початку процесу контактного зварювання методом оплавлення буде дорівнювати:

$$(R_{опл})_{поч} = (R_{см})_{хол} + (R_{к})_{опл} = 1,215 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 1215 \text{ мкОм}.$$

В кінці процесу деталі нагріються до середньозваженої температури, яку визначає в цьому випадку залежність:

$$(\bar{T})_{опл} = 0,25T_{max} = 0,25 \cdot 1500 = 375 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При цій температурі по графіку (в Додатку) питомий опір металу стержнів матиме вигляд: $\rho = 3,6 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Таким чином, наприкінці процесу опір нагрітих деталей буде:

$$(R_{см})_{зар} = \rho \frac{\ell}{S} = 3,6 \cdot 10^{-7} \frac{2 \cdot 0,025}{0,012 \cdot 0,036} = 4,17 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} = 41,7 \text{ мкОм}.$$

Загальний опір між затискачами в кінці процесу оплавлення будуть складати опори нагрітих стержнів та контактний опір, тобто:

$$(R_{опл})_{кін} = (R_{см})_{зар} + (R_{к})_{опл} = 1,242 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 1242 \text{ мкОм}.$$

Насамкінець, коли процес оплавлення припинять і почнуть осадку, контактний опір практично зникне і залишиться тільки опір нагрітих стержнів. В даному випадку він складає $(R_{см})_{зар} = 4,17 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} = 41,7 \text{ мкОм}$.

Єдина система одиниць (SI)

1. Основні та додаткові одиниці

Величина	Одиниця		
	Найменування	Позначення	
		Міжнародне	Українське
ОСНОВНІ ОДИНИЦІ			
Довжина	метр	<i>m</i>	м
Маса	кілограм	<i>kg</i>	кг
Час	секунда	<i>s</i>	с
Електричний струм	Ампер [†]	<i>A</i>	А
Температура	Кельвін	<i>K</i>	К
Кількість речовини	моль	<i>mol</i>	моль
Світло	кандела	<i>kd</i>	кд
ДОДАТКОВІ ОДИНИЦІ			
Плоский кут	радіан	<i>rad</i>	рад
Тілесний кут	стерадіан	<i>sr</i>	ср

2. Похідні одиниці, які мають спеціальні назви.

Величина	Одиниця			Вираз через основні та додаткові одиниці
	Найменування	Позначення		
		Міжнародне	Українське	
Частота	Герц	<i>Hz</i>	Гц	s^{-1}
Сила	Ньютон	<i>N</i>	Н	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Тиск	Паскаль	<i>Pa</i>	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Енергія	Джоуль	<i>J</i>	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Потужність	Ватт	<i>W</i>	Вт	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Кількість електрики	Кулон	<i>C</i>	Кл	$s \cdot A$
Електрична напруга	Вольт	<i>V</i>	В	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Електрична ємність	Фарада	<i>F</i>	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Електричний опір	Ом	<i>Ω</i>	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Електрична провідність	Сіменс	<i>S</i>	См	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Потік магнітної індукції	Вебер	<i>Wb</i>	Вб	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнітна індукція	Тесла	<i>T</i>	Тл	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Індуктивність	Генрі	<i>H</i>	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Світловий потік	люмен	<i>lm</i>	лм	кд·ср
Освітленість	люкс	<i>lx</i>	лк	$m^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Активність радіонукліда	Беккерель	<i>Bq</i>	Бк	s^{-1}
Поглинена доза іонізуючого випромінювання	Грей	<i>Gy</i>	Гр	$m^2 \cdot c^{-2}$
Еквівалентна доза випромінювання	Зіверт	<i>Sv</i>	Зв	$m^2 \cdot c^{-2}$

[†] Найменування та позначення одиниць вимірювання, названих прізвищами видатних людей, пишуться з великої літери

Фізичні константи і постійні величини

а.о.м. – атомна одиниця маси, $1 \text{ а.о.м.} = 1,66056 \times 10^{-27} \text{ кг}$

e_0 – заряд електрона, $e_0 \approx 1,60217733 \times 10^{-19} \text{ Кл}$

m_e – маса електрона, $m_e \approx 9,1093897 \times 10^{-31} \text{ кг}$

S_e – ентропія вільних електронів, так званого «електронного газу»,

$$\Delta S_e^0 = S_e = 20,64 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$$

е.-В. – електрон-вольт, $1 \text{ е.-В.} \approx 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$

k – постійна Больцмана, $k \approx 1,380658 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$

h – постійна Планка, $h \approx 6,6260755 \times 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$

c – швидкість світла у вакуумі, $c \approx 299792458,0 \text{ м/с}$

N_0 – число Авогадро, $N_0 = 6,022 \times 10^{23}$

R – універсальна газова постійна, $R = 8,31451 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$

σ – коефіцієнт Стефана – постійна величина, яка характеризує випромінювання енергії (теплоти) абсолютно чорним тілом:

$$\sigma \approx 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К}^4 \cdot \text{с)}$$

ε – ступінь чорноти тіла: для абсолютно чорного тіла $\varepsilon = 1,0$

e – основа натуральних логарифмів, $e \approx 2,718282$

A – постійна Річардсона (катодної емісії), $A \approx (4 \dots 7) \times 10^5 \text{ А/(м}^2 \cdot \text{К}^2)$, або $40 \dots 70 \text{ А/(см}^2 \cdot \text{К}^2)$, або можливі такі варіанти:

а) для оксидних та плівкових катодів – в межах:

$$A \approx (0,1 \dots 1,0) \times 10^5 \text{ А/(м}^2 \cdot \text{К}^2)$$
, або $1,0 \dots 10 \text{ А/(см}^2 \cdot \text{К}^2)$;

б) в розрахунках, обмежених режимами катодів зварювальної дуги, можна рекомендувати такі значення коефіцієнту Річардсона:

• для тугоплавких металів з температурою кипіння $T_k > 4000 \text{ К}$

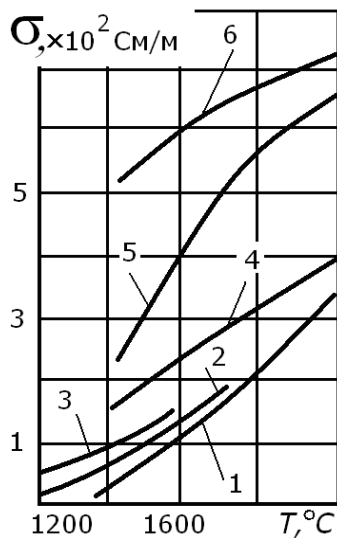
(W , Mo , Ta , ін.) $A \approx 7,0 \cdot 10^5 \text{ А/(м}^2 \cdot \text{К}^2)$; • для інших металів з температурою кипіння $T_k < 4000 \text{ К}$

$$(Fe, Ti, Al, \text{ін}) A \approx 6,0 \cdot 10^5 \text{ А/(м}^2 \cdot \text{К}^2)$$
;

• у випадку, коли катод не являє собою чистий метал (плівковий чи оксидний катод), тоді, з огляду на досить слабку розробку цього питання в літературі, можна використовувати середнє з відомих дослідних значень: $A \approx 0,5 \cdot 10^5 \text{ А/(м}^2 \cdot \text{К}^2)$, якщо немає інших вказівок.

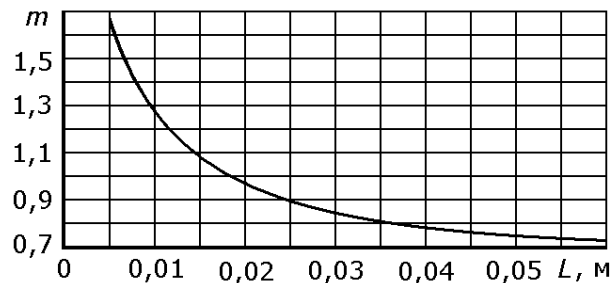
**Ентальпії $\Delta H_{\text{вип}}^0$ та ентропії $S_{\text{вип}}^0$ випаровування
деяких металів**

Елемент	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>W</i>	<i>Zn</i>
$\Delta H_{\text{вип}}^0, \frac{\text{кДж}}{\text{МОЛЬ}}$	272,0	304,8	354,0	365,3	304,0	445,0	830,0	114,8
$S_{\text{вип}}^0, \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ} \cdot \text{К}}$	117,1	106,3	115,0	118,0	104,8	213,4	104,3	97,1



Залежність питомої електропровідності шлаків для ЕШЗ від температури:

- 1 – АНФ-6; 2 – АН-348; 3 – АН-8;
- 4 – АНФ-21; 5 – АНФ-6+5 % Na_2O ;
- 6 – АНФ-1.



Значення поправочного коефіцієнта m в залежності від глибини занурення електрода в шлакову ванну (для питомої електропровідності шлаку

$$\sigma = 100 \dots 300 \text{ См/м)}$$

**Контактний опір між пластинками з низьковуглецевої сталі
при різних способах підготовки поверхні ($T \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$)**

Вид підготовки поверхні	Опір, мкОм*	Одиничний опір C_n , Ом**
Поверхня без обробки, вкрита окалиною та іржею	500000	149,5
Поверхня без обробки вкрита окалиною	80000	23,9
Обробка наждачним кругом з наступним іржавінням	80000	23,9
Обробка різцем або фрезою (чорнова)	1200	0,36
Травлення в кислоті	300	0,09
Обробка напилком	280	0,083
Обробка наждаком	160	0,048
Шліфування	110	0,033

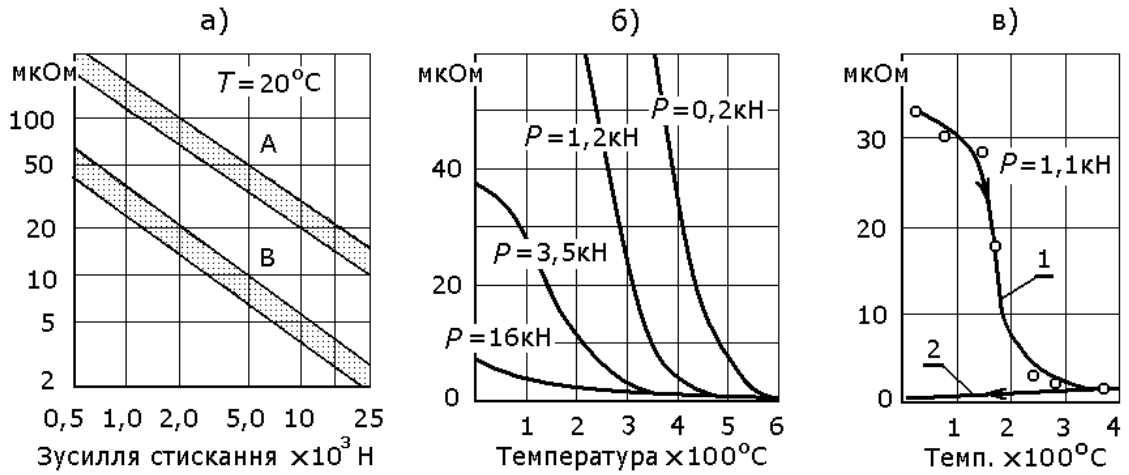
*Досліди виконано на пластинах товщиною 3 мм при зусиллі стискання $P=2000 \text{ Н}$.

Контактний опір між пластинками з алюмінієвих сплавів при різних способах підготовки поверхні ($T \sim 20^\circ$)*

Вид сплаву	Підготовка поверхні	Опір, мкОм*	Одиничний опір C_n , Ом**
24S–Т (дюралюміній)	Без спеціальної підготовки	>1000	>0,81
	Хімічне травлення	<20	<0,016
	Очищення сталевною щіткою	<10	<0,008
3S–1/2Н (типу Амц)	Хімічне травлення	<50	<0,041

*Досліди виконано на пластинах товщиною 1 мм при зусиллі стискання $P=4350 \text{ Н}$.

Залежність контактної опору від стискаючого зусилля та від температури:



- а) для низьковуглецевої сталі (*A*) та алюмінієвого сплаву Дхх (*B*) при 20°C ;
- б) для низьковуглецевої сталі при нагріванні;
- в) для алюмінієвого сплаву Дхх : 1 – при нагріванні; 2 – при охолодженні.

Рекомендована література

1. Основна література:

- 1.1. Коперсак В.М. Теорія процесів зварювання-2. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Текст лекцій., - К., 2011. – 252 с.
<http://library.weld.kpi.ua/welding-processes>
- 1.2. Коперсак В.М. «Теорія процесів зварювання». Текст лекцій. Ч.ІІ; НТУУ “КПІ”, 2001.- 119 с.
- 1.3. Коперсак В.М. Теорія процесів зварювання-1. Джерела нагрівання та теплові процеси при зварюванні. Текст лекцій /, - К., 2011. – 384 с. <http://library.weld.kpi.ua/welding-processes>
- 1.4. Коперсак В.М. «Теорія процесів зварювання». Текст лекцій. Ч.І; НТУУ “КПІ”, 2001.- 141 с.
- 1.5. Теория сварочных процессов. Под. ред. В.В.Фролова.- М.: Высш. шк., 1988.- 560 с.
- 1.6. Петров Г.Л.,Тумарев А.С. Теория сварочных процессов /с основами физической химии.- 2-е изд.- М.: Высш. шк., 1977.- 392 с.
- 1.7. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов.- 2-е изд. переработ.- Киев: Вища. шк., 1976.- 424 с.
- 1.8. Теория сварочных процессов под. ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, - 752 с.
- 1.9. Коперсак В.М. Термодинаміка і теплові процеси при зварюванні. Текст лекцій. Київ НТУУ КПІ, 2006. - 124 с.
- 1.10. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением.- М.: Машиностроение, 1978.- 447 с.

1.11. Кох Б.А. Основы термодинамики металлургических процессов сварки.- Л.: Судостроение, 1975.- 240 с.

2. Додаткова література:

2.1. Сефериан Д. Металлургия сварки.- М.: МашГИЗ, 1963.- 347 с.

2.2. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия.- М.: Металлургия, 1976.- 543 с.

2.3. Підгаєцький В.В. Пори, включення і тріщини в зварних швах.- Київ: Техніка, 1970.- 236 с.

2.4. Петров Г.Л. Сварочные материалы.- М.: Машиностроение, 1972.- 274 с.

2.5. Лившиц Л.С. Металловедение для сварщиков. М.: Машиностроение, 1979.- 243 с.

2.6. Ерёмин Е.М. Основы химической термодинамики.- М.: Машиностроение, 1986.- 274 с.

2.7. Кудрявцев П.С. Курс истории физики.- 2-е изд.- М.: Просвещение, 1982.- 447 с.

2.8. Подгаецкий В.В., Кузьменко В.Г. Сварочные шлаки.- Киев, 1988

2.9. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике.- М. «Мир», 1966

2.10. Хольм Л. Электрические контакты.- М.: Изд-во иностр. лит., 1962

2.11. Орлов Б.Д. Технология и оборудование контактной сварки.- М., «Машиностроение», 1986, 352 с.

2.12. Перцовский Г.А. Тепловой баланс при электрошлаковой сварке.- Сб. 3, «Сварка». М., «Судпромгиз», 1960, с. 11-26