

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Кафедра технологій зварювання та будівництва

ЗВАРЮВАННЯ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної та самостійної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 131 Прикладна механіка, за освітньо-професійною програмою «Технології та устаткування зварювання»

Затверджено на засіданні
кафедри технологій зварювання та
будівництва
Протокол № 8 від 07.06.2023 року

Чернігів 2023

Зварювання різнорідних матеріалів. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної та самостійної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 131 Прикладна механіка, за освітньо-професійною програмою «Технології та устаткування зварювання» /Укл.: Болотов Г.П., Болотов М.Г., Олексієнко С.В.– Чернігів: НУ (Чернігівська політехніка), 2023. – 18с.

Укладачі: Болотов Геннадій Павлович, доктор технічних наук, професор;
Болотов Максим Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент;
Олексієнко Сергій Владиславович, кандидат технічних наук,
доцент

Відповідальний за випуск: Прибитько Ірина Олександрівна, завідувач
кафедри технологій зварювання та будівництва,
кандидат технічних наук, доцент Національного
університету «Чернігівська політехніка»

Рецензент: Ющенко Світлана Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент
кафедри технологій зварювання та будівництва Національного
університету «Чернігівська політехніка»

ЗМІСТ

Передмова.....	4
1. Вимоги до оформлення розрахунково-графічної роботи.....	5
2. Варіанти теоретичних завдань до самостійного розглядання.....	6
3. Особливості утворення з'єднання при зварюванні металів тиском в твердому стані.....	7
4. Розрахунок площі контактування зварюваних поверхонь та тиску їх стискання.....	7
5. Розрахунок тривалості основних стадій процесу зварювання тиском в твердому стані.....	9
Рекомендована література.....	16

ПЕРЕДМОВА

Розвиток та вдосконалення та сучасного приладобудування, електронної авіаційної та інших галузей промисловості неможливо уявити без використання нових конструкційних матеріалів на основі кераміки, ситалів, кварцу, сапфіру, феритів та інших неметалевих матеріалів. Ці матеріали створені на основі оксидів різноманітних елементів і володіють унікальними фізико-хімічними властивостями. Їх часто використовують в сполученні з іншими матеріалами, із них виготовляють елементи простої конфігурації, які в подальшому за допомогою зварювання з'єднують в складні конструкції.

Способи зварювання плавленням, як правило, непридатні для з'єднання металів з неметалевими матеріалами внаслідок природної несумісності. Існує думка, що при дифузійному зварюванні перед початком процесу необхідно видаляти оксидні плівки із зони з'єднання. Така концепція вірна лише при з'єднанні металевих матеріалів, а при з'єднанні металів з неметалевими матеріалами потрібно враховувати, що більшу частину відомих металів та сплавів вдається з'єднати з керамічними матеріалами в результаті взаємодії оксидів, спеціально вирощених на металі, з оксидними системами керамічних матеріалів. Це питання є основним при розробці технології з'єднання металів з неметалевими матеріалами.

Метою розрахунково-графічної роботи є закріплення теоретичного матеріалу з основних питань, що стосуються технологій зварювання різнорідних матеріалів отриманого студентами на лекційних заняттях та лабораторних роботах і надбання практичних навичок щодо вирішення основних задач отримання нероз'ємних зварних з'єднань матеріалів в різних їх поєднаннях.

Методичні рекомендації включають в собі два завдання. Перше пов'язане з реферативним описом одного з питань, що стосується особливостей механізмів та кінетики утворення твердофазного з'єднання різнорідних пар матеріалів. Друге завдання пов'язано з вирішенням практичних задач, що стосується визначення основних параметрів, що впливають на механізм утворення твердофазних зварних з'єднань на різних стадіях його утворення.

Робота виконується паралельно з прослуховуванням лекцій і виконанням лабораторних занять.

1. Вимоги до оформлення розрахунково-графічної роботи

Розрахунково-графічна робота включає варіант індивідуального завдання та дві практичні задачі. В першому розділі студент приводить теоретичні відомості за варіантом індивідуального завдання. В другому розділі відповідно до варіанту необхідно вирішити обидві практичні задачі.

Практичні задачі необхідно розв'язувати з короткими поясненнями, достатніми для розуміння ходу рішення. Формули повинні наводитись в загальному вигляді з розкриттям символів, а потім з підстановкою чисел без наведення проміжних розрахунків. Всі формули повинні оформлюватись у редакторі формул із дотриманням всіх норм ЄСКД.

Кожен з двох розділів повинен бути розділений на пункти і закінчуватись короткими висновками. В кінці РГР приводиться перелік літератури, яка використовувалась при виконанні роботи.

Робота, виконана не за варіантом, а також не у відповідності із зазначеними вимогами, не приймається до захисту.

РГР оформляється у вигляді структурованого звіту на 10...15 сторінках згідно стандарту ДСТУ 3008-2015 і виноситься на залік.

2. Варіанти теоретичних завдань до самостійного розглядання

1. Особливості технології зварювання різнорідних металів.
2. Структура, хімічна і механічна неоднорідність зварних з'єднань різнорідних металів.
3. Твердофазна взаємодія металів із неметалами.
4. Утворення фізичного контакту при зварюванні металів з неметалевими матеріалами.
5. Утворення активних центрів і осередків взаємодії при зварюванні металів з неметалами.
6. Зварювання сталей з міддю та її сплавами.
7. Зварювання титану з іншими металами.
8. Зварювання золота та срібла з іншими металами.
9. Зварювання міді з вольфрамом.
10. Зварювання міді з молібденом.
11. Зварювання міді з титаном.
12. Зварювання різнорідних сталей.
13. Зварювання жаростійких сталей і сплавів.
14. Зварювання магнітних матеріалів.
15. Зварювання твердих сплавів зі сталями
16. Зварювання тугоплавких металів із іншими металами
17. Дифузійне зварювання скла.
18. Зварювання кварцового скла з металами.
19. Зварювання ситалів з металами.
20. Зварювання глиноземистої кераміки з металами.
21. Зварювання п'єзокераміки з металами.
22. Зварювання феритів з металами.
23. Зварювання мідних і магнієвих сплавів.
24. Зварювання алюмінію з іншими металами і сталями.
25. Механізм і кінетика топохімічних реакцій в зоні контакту металів з неметалами.

3. Особливості утворення з'єднання при зварюванні металів тиском в твердому стані

Зварювання тиском в твердій фазі, зокрема дифузійне зварювання, здійснюється при температурах нижче температури плавлення з'єднуваних матеріалів, і дозволяє отримувати зварні конструкції як з однорідних, так і різнорідних металів із мінімальними деформаціями.

Процес утворення з'єднання при зварюванні в твердому стані протікає у декілька стадій, головними з яких є:

- 1) утворення і розвиток фізичного контакту (стадія фізичної адсорбції). Утворення фізичного контакту при зварюванні в твердому стані представляє собою процес зближення поверхонь під дією зовнішнього тиску за рахунок пластичної деформації на відстань, при якій виникає фізична взаємодія, обумовлена Ван-дер-ваальсовими силами.
- 2) активація контактних поверхонь із утворенням активних центрів (в першу чергу, на поверхні більш твердого із з'єднуваних металів).
- 3) об'ємна взаємодія (стадія хемосорбції) із утворенням міцних хімічних зв'язків як у площині контакту, так і в об'ємі зони контакту.

Утворення з'єднання при дифузійному зварюванні обумовлено сумісною дією трьох основних параметрів: температура, тиск, час ізотермічної витримки (зварювання).

Температура нагріву при зварюванні повинна складати 0,6,...0,8 від температури плавлення більш легкоплавкого матеріалу у зварному вузлі.

Тиск, із яким контактуючі поверхні в процесі зварювання притискаються одна до одної, повинен бути достатнім для утворення суцільного контакту між поверхнями в результаті їх пластичної деформації. Величина тиску обмежується припустимою деформацією контактуючих поверхонь при температурі зварювання і межі пластичності цій температурі найбільш пластичного із з'єднуваних матеріалів.

Час зварювання (тривалість витримки деталей під тиском при заданій температурі) характеризує тривалість усіх трьох стадій утворення дифузійного з'єднання і може бути визначений розрахунковим методом у відповідності до інших параметрів процесу (температура, тиск), та характеристик зварюваних матеріалів.

4. Розрахунок площі контактування зварюваних поверхонь та зусилля їх стискання

Під дією тиску поверхні, наведені у зіткнення, утворюють контакт. В першу чергу утворюються елементарні одиничні контакти по вершинах мікроступів шорсткості поверхні. По мірі стискання деталей кількість таких контактів збільшується, а їх площа зростає. В результаті на поверхнях утворюється деяка контурна площа контакту A_c , в межах якої розташовуються всі елементарні контакти, тобто формується фізичний контакт двох поверхонь.

Для підвищення міцності зварного з'єднання необхідно, щоб контурна площа дорівнювала, або наближалась до номінальної площі контакту A_a , яка обмежується розмірами зварюваних поверхонь.

Зміна площі контакту A при дифузійному зварюванні залежить, водночас, від прикладеного тиску σ та температури нагріву T , тому між ними існує залежність: $Z = f(\sigma, T)$.

Зміну площі контакту в цьому випадку можна описати диференціальним рівнянням:

$$\frac{dA}{dZ} = A_a - A; \quad (4.1)$$

де A – поточна величина площі контакту. Оскільки ця площа в даному випадку представляє собою контурну площу контакту, яка неперервно збільшується, тобто $A = A_c$, то рішення рівняння (4.1) буде мати вигляд:

$$A_c = A_a(1 - e^{-Z}); \quad (4.2)$$

Граничним значенням контурної площі A_c буде номінальна площа A_a . Ця умова виконується при значенні експоненційної функції $Z \approx 4$, коли A_c становить приблизно 95% від номінальної площі A_a , що є припустимим. Сама експоненційна функція Z залежить від умов зварювання (температури нагріву та тиску) і визначається у вигляді:

$$Z = \alpha \frac{\sigma T}{\sigma_{od} T_{nl}}; \quad (4.3)$$

де $\frac{T}{T_{nl}}$ – відносна (гомологічна) температура, що дорівнює відношенню температури у площині контакту (температури зварювання) T , K , до абсолютної температури плавлення даного металу T_{nl} , K ; σ – питома навантаження на контакт (тиск зварювання), H/m^2 ; σ_{od} – опір деформації металу в межах нерівності поверхні, H/m^2 ; α – коефіцієнт, що характеризує властивості металу.

Опір деформації σ_{od} можна вважати рівним межі текучості металу $\sigma_{od} = \sigma_m$ при температурі зварювання.

Тоді рівняння (4.3) запишеться як:

$$Z = \alpha \frac{\sigma T}{\sigma_m T_{nl}}; \quad (4.4)$$

Значення межі текучості в залежності від температури нагріву можна орієнтовно визначити за формулою:

$$\sigma_T = \sigma_{T_0} \left(1 - \frac{T}{T_{nl}}\right)^2; \quad (4.5)$$

де σ_{T_0} – межа текучості металу при $T = 293 \text{ K}$.

При зварюванні різнорідних металів величина σ_T визначається для більш пластичного матеріалу.

Залишається визначити значення коефіцієнту α .

За фізичним змістом формули (4.2), в момент повного зминання контакту контурна площа A_c стає рівною номінальній площі A_a . Це здійснюється при показнику експоненціальної функції $Z \approx 4$. В момент рівності $A_c = A_a$ діючий тиск дорівнює опору деформації, тобто $\sigma = \sigma_m$. Така умова дійсна в усьому діапазоні температур від $T_0 = 293 \text{ K}$ до температури плавлення $T_{nl}, \text{ K}$. Тоді з рівності (4.4):

$$\alpha = \frac{4T_{nl}}{293}; \quad (4.6)$$

При зварюванні різнорідних металів значення температури нагріву T , межі текучості σ_m та коефіцієнту α необхідно обирати для більш легкоплавкого та більш пластичного металу.

За наведеною методикою можна також вирішити зворотну задачу: за заданою температурою нагріву і умовою рівності контурної та номінальної площі контакту $A_c = A_a$ знайти тиск, який необхідно прикласти до деталей для забезпечення цієї рівності.

5. Розрахунок тривалості основних стадій процесу зварювання тиском в твердому стані

Згідно із сучасною теорією трьохстадійності процесу утворення зварного з'єднання при зварюванні тиском тривалість цього процесу визначається як сума відрізків часу, необхідних для протікання стадій утворення фізичного контакту, активації поверхонь та розвитку об'ємної взаємодії: $t_{3\phi} = t_\phi + t_a + t_{об}$.

5.1. Тривалість утворення фізичного контакту.

Першим етапом процесу зварювання тиском в твердій фазі (дифузійного зварювання) є утворення фізичного контакту, який закінчується із наближенням зварюваних поверхонь на відстань початку дії сил міжатомної взаємодії (сил Ван-дер-Ваальса). Розвиток фізичного контакту залежить від стану контактуючих поверхонь, властивостей матеріалів, що вступають у контакт, умов термодформаційного впливу на з'єднувані поверхні.

Розрізняють два способи дифузійного зварювання:

- без проміжних прокладень;
- із проміжними пластичними прокладеннями.

5.1.1. Утворення фізичного контакту при зварюванні без проміжних прокладень. Стан поверхонь зварюваних металів, що приводяться до контакту, оцінюється їх мікрорельєфом, який, в свою чергу, характеризується шорсткістю, тобто висотою мікровиступів поверхні. Розрахунок початкової стадії утворення з'єднання, а саме, утворення фізичного контакту здійснюють на основі деформації мікрорельєфу поверхонь під дією прикладеного до деталей тиску зварювання в умовах їх нагріву.

За цих умов фізичний контакт утворюється в результаті згладжування мікронерівностей поверхні. При цьому мікровиступи поверхні моделюють, в основному, у вигляді конусів (рис. 5.1).

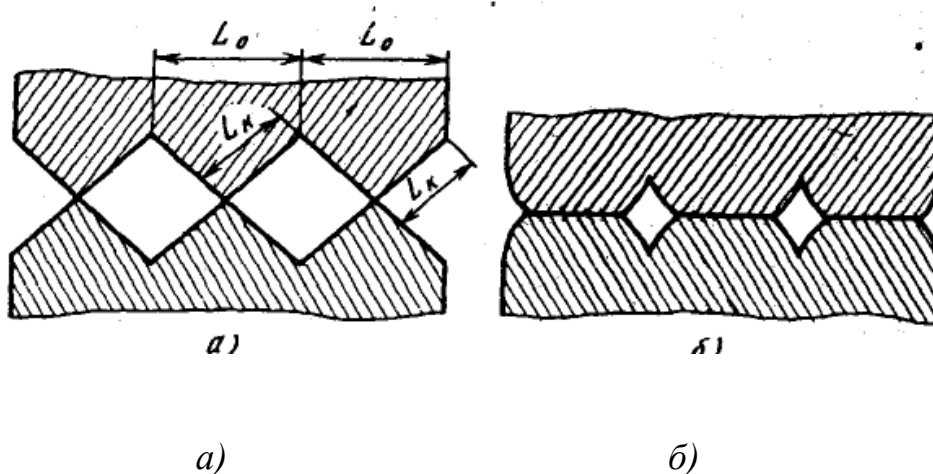


Рис. 5.1. Схема утворення фізичного контакту в результаті деформації мікровиступів під дією тиску: а) до зварювання; б) в процесі зварювання

Для такої моделі швидкість згладжування поверхні (деформації мікровиступів):

$$V = \frac{2L_k - L_0}{2L_k} \frac{1}{t_\phi}; \quad (5.1)$$

де L_k - довжина твірної конуса; L_0 - довжина основания мікровиступа; t_ϕ - тривалість згладжування (утворення фізичного контакту). Звідси тривалість згладжування:

$$t_\phi = A \frac{1}{B\rho t} \exp\left(\frac{E}{KT}\right); \quad (5.2)$$

де A - коефіцієнт, що залежить від якості обробки контактуючих поверхонь (табл. 1); B - частотний множник; p - прикладений тиск, Н/м²; t - коефіцієнт, звичайно $t = 2 \dots 5$; E - енергія активації повзучості металу, Дж (табл. 2); $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постійна Больцмана; T - температура зварювання, К.

Таблиця 1

Клас обробки поверхні	Висота виступів шорсткості Ra , мкм	Коефіцієнт A в рівнянні (2)
5	6,3	$2 \cdot 10^{-2}$
6	3,2	$1 \cdot 10^{-2}$
7	1,6	$5 \cdot 10^{-3}$
8	0,8	$2,2 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 2

Матеріал	Температура, °C	Енергія активації повзучості, еВ
Алюміній	93...593	1,45
Мідь	700...1000	2,42
Нікель	800...1000	2,83
Титан	600...900	2,4
Залізо	1000	2,56
Кремній	500	1,93

Примітка: 1 еВ (електрон-вольт) = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

Дифузійне зварювання відноситься до процесів із низькоінтенсивним силовим впливом, тому приймають коефіцієнт $m = 2$.

Значення коефіцієнта B для умов зварювання знаходяться у межах $B = (2...3) \cdot 10^{-9}$.

5.1.2. Формування фізичного контакту при дифузійному зварюванні через проміжні пластичні прокладення. При дифузійному зварюванні твердих матеріалів через пластичне прокладення процес утворення фізичного контакту можливий лише за рахунок пластичного деформування прокладення. В цих випадках мікрорельєф з'єднаних поверхонь матеріалів не деформується і їх рельєф повністю повторюється поверхнями прокладення.

Оскільки у якості прокладень застосовують метали із підвищеними пластичними властивостями, а процес зварювання здійснюється при достатньо високій температурі і тиску, то прокладення повинно знаходитись у стані текучості. Ця умова є обов'язковою для утворення надійного фізичного контакту.

Для описання процесу утворення фізичного контакту в умовах текучості метали розглядають як рідини із високою в'язкістю.

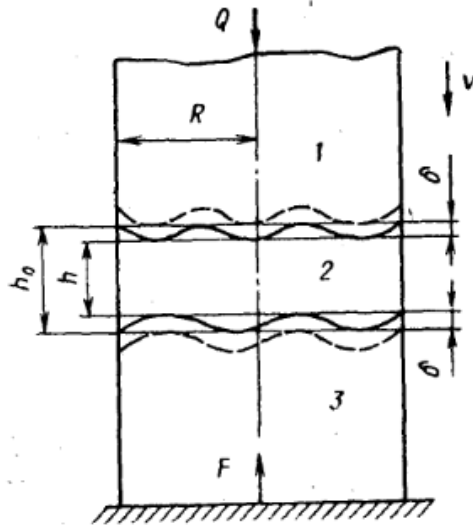


Рис. 5.2. Схема процесу зварювання через пластичне прокладення

Для вирішення задачі встановлення фізичного контакту поверхонь за наявності пластичного прокладення розглядають (рис. 5.2) процес стискання в'язкого шару 2 товщиною h_0 між двома циліндричними зразками 1 та 3 у припущенні, що поточна товщина шару h значно менша радіуса R циліндрів. Нижній зразок спирається на масивну основу і є нерухомим, а верхній зразок, до якого прикладене стискаюче зусилля Q , переміщується з деякою швидкістю. При цьому товщина в'язкого шару буде постійно зменшуватись. Поточна товщина цього шару:

$$h = h_0 R^2 \sqrt{\frac{3\pi\mu}{3\pi\mu R^4 + 4Qh_0^2 t}}; \quad (5.3)$$

де h_0 – початкова товщина пластичного прокладення, м; h – поточна товщина прокладення, м; R – радіус зварних зразків, м; Q – зусилля стискання, Н; μ – коефіцієнт в'язкості пластичного шару (при температурі $0,8 \dots 0,9$ від температури плавлення шару його в'язкість складає, відповідно, $\mu \approx 10^4 \dots 10^3$ Па·с); t – час.

Ця формула поєднує основні параметри дифузійного зварювання у стадії встановлення фізичного контакту.

Якщо у формулі (5.3) зусилля стискання Q представити через тиск $p = \frac{Q}{S}$, де $S = \pi R^2$ – площа круглого прокладення, то час утворення фізичного контакту:

$$t_\phi = \frac{3\mu R^2}{p} \left(\frac{(h_0 + h)(h_0 - h)}{h_0^2 h^2} \right); \quad (5.4)$$

При деформуванні прокладення лише на величину шорсткості поверхонь твердих матеріалів виконується умова $h_o \gg h_o - h = 2\delta$ (де δ – висота мікроступів шорсткості зварюваних поверхонь, таблиця 1), тому можна вважати $h_o + h \approx 2h_o$, а $h^2 h_o^2 \approx h^4$. Тоді для круглого прокладення час утворення фізичного контакту:

$$t_\phi = \frac{3\mu R^2 \delta}{ph_0^3}; \quad (5.5)$$

Час утворення такого контакту при дифузійному зварюванні через кільцеве прокладення (при зварюванні труб встик, приварюванні втулок та ін..)

$$t_\phi = \frac{3\mu b^2 \delta}{ph_0^3}; \quad (5.6)$$

де $b^2 = R_2^2 + R_1^2 - \frac{R_2^2 + R_1^2}{\ln R_2 / R_1}$; R_2 та R_1 – зовнішній та внутрішній радіуси кільцевого прокладення.

5.2. Тривалість стадії активації контактуючих поверхонь.

При зварюванні однорідних металів, або різнорідних, що мають практично однаковий опір пластичній деформації, перша і друга стадії фактично зливаються у одну, оскільки активація обох контактуючих поверхонь починається вже в процесі їх наближення при зминанні окремих мікроступів за рахунок їх сумісної пластичної деформації.

При зварюванні різнорідних матеріалів із суттєво відмінним опором пластичній деформації фізичний контакт утворюється за рахунок більш пластичного матеріалу, тобто за рахунок матеріалу, що володіє в даних умовах більш високою швидкістю повзучості.

Другий матеріал при цьому починає випробовувати силовий вплив із деяким запізненням, оскільки процеси, що призводять до активації його поверхні, йдуть більш повільно. За своєю суттю ці процеси представляють собою також повзучість із виходом дислокацій та вакансій на поверхню металу.

Кінетичні особливості процесу повзучості більш твердого матеріалу, що визначають активацію його поверхні, складаються у генерації на етапах нестационарної та прискореної повзучості надлишкової кількості дефектів, які виходять на поверхню з боку твердого матеріалу в зону контакту з більш м'яким матеріалом.

Тривалість періоду активації поверхні більш твердого матеріалу оцінюють за рівнянням:

$$t_a = \frac{1}{V} \frac{N}{N_0} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right); \quad (5.7)$$

де N_0 – кількість зв'язків на одиницю поверхні;

N – необхідна кількість розривів зв'язків (звичайно приймають $N = (0,7 \dots 0,9)N_0$ – доля поверхневих атомів, що повинні бути активовані для отримання міцного з'єднання);

E_a – енергія одиничного зв'язку атомів, в залежності від природи речовини і температури нагріву (приймається для більш твердого металу), Дж (табл. 3); k – постійна Больцмана;

T – температура зварювання, К.

ν – частота власних коливань атомів або частота переміщень дислокацій; ν може змінюватись в інтервалі від 1 до 10^{14} c^{-1} .

При швидкості повзучості $10^{-6} \dots 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ (що відповідає умовам дифузійного зварювання) величина ν складає, відповідно, $\nu = 10^7 \dots 10^9 \text{ c}^{-1}$. При цьому, більш високі значення швидкості повзучості обирають за наявності у зварюваній композиції, більш твердих або тугоплавких металів.

Таблиця 3

Метал	Енергія зв'язку атомів E_{a0} , Дж
Fe	$(6,6 \dots 7,42) \cdot 10^{-19}$
Ni	$(5,98 \dots 6,98) \cdot 10^{-19}$
Ti	$(7,81 \dots 8,64) \cdot 10^{-19}$
W	$(13,9 \dots 14,6) \cdot 10^{-19}$
Mo	$(10,7 \dots 11,1) \cdot 10^{-19}$
Ta	$12,9 \cdot 10^{-19}$
Nb	$12,8 \cdot 10^{-19}$
V	$(76,4 \dots 83) \cdot 10^{-19}$

Примітка: у табл. 3 дані наведені для температури $T_0 = 20^\circ \text{C}$.

Величина енергії зв'язку для будь-якої іншої температури розраховується за формулою:

$$E_a = E_{a0} \exp\left(-\frac{4T}{T_{\text{кип}}}\right); \quad (5.8)$$

де E_a – енергія зв'язку при температурі зварювання $T, ^\circ \text{C}$; E_{a0} – енергія зв'язку при кімнатній температурі; $T_{\text{кип}}$ – температура кипіння металу, $^\circ \text{C}$.

5.3. Розрахунок тривалості стадії ізотермічної витримки (об'ємної взаємодії)

Третя стадія формування зварного з'єднання характеризується інтенсивністю протікання дифузійних процесів у об'ємі приконтактної зони із утворенням міцних зв'язків між з'єднуваними матеріалами.

Зв'язок між температурою зварювання і дифузії встановлюють, враховуючи, що енергія активації самодифузії атомів визначається як:

$$Q_T = 20RT_{пл}; \quad (5.9)$$

де $R = 8,31$ Дж/К·моль – молярна газова постійна; $T_{пл}$ – температура плавлення металу, К.

Коефіцієнт самодифузії металів залежить від енергії активації і температури зварювання:

$$D_T = D_0 \exp\left(-\frac{Q_T}{RT}\right); \quad (5.10)$$

де D_0 – передекспоненційний множник. Для більшості металів його значення можна прийняти $D_0 \approx 1$ см²/с; T – температура зварювання, К.

Залежність часу зварювання від коефіцієнта самодифузії та критерію утворення об'ємного, тобто міцного з'єднання, визначають рішенням другого рівняння Фіка для нестационарного концентраційного потоку для випадку дифузії у безмежне тіло.

Користуючись спрощеним рішенням цього рівняння знаходимо час стадії об'ємної взаємодії (дифузії) у вигляді:

$$t_{об} = \frac{1}{\pi D_T} \left(\frac{C_0 \cdot X}{C_0 - 2C_x} \right)^2; \quad (5.11)$$

де задаються оптимальною глибиною дифузії X (звичайно в межах 5...20 мкм) та концентрацією на заданій глибині $C_x = 0,2C_0$ (де C_0 – концентрація атомів у вихідному матеріалі), у кінцевому вигляді отримуємо:

$$t_{об} \approx \frac{X^2}{D_T}; \quad (5.12)$$

Якщо задається інша концентрація C_x , то для визначення $t_{об}$ необхідно користуватись формулою (5.11).

Рекомендована література

1. Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, М. М. Руденко, та В. В. Свириденко, «Дифузійне зварювання вольфрам кобальтових твердих сплавів», Вісник Чернігівського державного технологічного університету, №. 40, С. 14–17, 2009.
2. Ю. Фальченко, Л. Петрушинець, А. Устінов, Т. Мельниченко, О. Новомлинець, та І. Гусарова, «Дифузійне зварювання в вакуумі тонколистового нікелевого сплаву», Технічні науки та технології, № 4 (6), С. 87–98, 2016.
3. Спеціальні способи зварювання : підручник / І. В. Кривцун, 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.– 346 с.
4. Болотов, М. Г., Прибитько, І. О., & Нагорна, І. В. (2020). Тліючий розряд як джерело поверхневого нагріву в процесах з'єднання різнорідних матеріалів (огляд). Технічні науки та технології, (2(20)), 022–036.
5. Болотов Г. П., Болотов М. Г., Рижов Р. М. Активаційна дія тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання // Вісник ДДМА. – 2011. – № 1 (22).
6. Болотов, Г.П. і Болотов, М.Г. 2018. Прецизійне зварювання тиском волокнистих композиційних матеріалів на металевій основі. Технічні науки та технології. 1(11), 2018, ст.58–67.
7. Олексієнко, С. В. Зварювання у твердій фазі в електростатичному полі вузлів кремній-скло-кремній / С. В. Олексієнко, Р. А. Куликовський // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2009. – №2. – С. 70-72.
8. Борц Б. В. Метод зварювання у твердій фазі аустенітної та дисперсно-зміцненої оксидами сталей / Б. В. Борц, І. М. Короткова, О. Т. Лопата, В. І. Ситін, В. І. Ткаченко, І. О. Воробйов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. - 2017. - Т. 53, № 2. - С. 36-40.
9. В. А. Пахаренко, Зварювання тиском. Київ: «Екотехнологія», 2011.
10. Y. Falchenko, O. Novomlynets, and E. Polovetskyi, «Special features of precision pressure welding of carbon steel with chemical activation of surfaces», Scientific and educational journal, Geneve, Switzerland, № 6, P. 65-70, July, 2016