

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

ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ З'ЄДНАННЯ МАТЕРІАЛІВ

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

Затверджено на засіданні
кафедри технологій зварювання та
будівництва
Протокол № 7 від 04.05.2023 року

Чернігів 2023

Прогресивні технології з'єднання матеріалів. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної та самостійної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 131 Прикладна механіка освітньо-професійної програми «Технології та устаткування зварювання» /Укл.: Болотов М.Г., Болотов Г.П. – Чернігів: НУ (Чернігівська політехніка), 2023. – 20с.

Укладачі: Болотов Максим Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент;
Болотов Геннадій Павлович, доктор технічних наук, професор.

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

Рецензент: Ганєєв Тимур Рашитович, 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 ОПРАЦЮВАННЯ.....	6
3. ВАРІАНТИ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ ДО САМОСТІЙНОГО ВИРІШЕННЯ.....	7
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	15
ДОДАТКИ.....	16

ПЕРЕДМОВА

Зварювання та паяння є провідними спорідненими технологічними процесами, що здобули широкого поширення в різних галузях виробництва. Ефективність машин, енергетичних установок, багатьох інших виробів значною мірою визначають конструкційні матеріали, що постійно вдосконалюються та створюються їх нові марки і класи. У судно- та машинобудуванні розширюється застосування високоміцних та високолегованих сталей, сплавів алюмінію, титану, міді тощо як в однорідних, так і в різнорідних сполученнях. Успішне використання цих матеріалів забезпечується розвитком цих процесів.

Підвищення ефективності отримання нероз'ємних з'єднань різнорідних матеріалів може бути досягнуте як за рахунок удосконалення існуючих способів зварювання та паяння, так і застосування нових, більш прогресивних методів та технологій.

Так, наприклад, створені для зварювання певних матеріалів або конструкцій, ці новітні способи виявилися більш ефективними, ніж традиційні електродугові та електроконтактні, також при виготовленні деталей, вузлів і конструкцій, що звичайно вироблялися за допомогою традиційних способів. Разом із тим новітні технології отримання з'єднань змінили уявлення про здатність металів до зварювання та паяння: багато з них перейшли з розряду металів, що погано зварюються, у розряд металів із доброю або задовільною зварюваністю.

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

Методичні рекомендації включають в собі два завдання. Перше пов'язане з реферативним описом одного з питань, що стосується особливостей техніки, технологій та обладнання прогресивних способів отримання з'єднання різнорідних матеріалів. Друге завдання пов'язано з вирішенням практичних задач, що стосується визначення основних характеристик отримання з'єднань при різних способах зварювання в твердій фазі.

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 ОПРАЦЮВАННЯ

1. Магнітно-імпульсне зварювання;
2. Високочастотне зварювання;
3. Зварювання та паяння неметалів та полімерних матеріалів;
4. Зварювання під водою;
5. Зварювання та паяння у космосі;
6. Зварювання оптоволокна;
7. Зварювання у нанотехнологіях;
8. Зварювання в медицині;
9. Паяння та паяння-зварювання;
10. Зварювання металів тертям з перемішуванням;
11. Дифузійне зварювання в полі нормального тліючого розряду;
12. Дифузійне зварювання в полі тліючого розряду із порожнистим катодом;
13. Дифузійне зварювання в рідких середовищах;
14. Зварювання магнітокерованою дугою;
15. Електрохімічне зварювання (Зварювання а електростатичному полі);
16. Дугове зварювання модульованим струмом;
17. Ультразвукове паяння;
18. Паяння в печах;
19. Паяння плат BGA;
20. Холодне зварювання.

3. ВАРІАНТИ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ ДО САМОСТІЙНОГО ВИРІШЕННЯ

3.1 Практична задача №1. Визначення мінімальної температури термонатягу при зварюванні тиском охоплюючих з'єднань

3.1.1. Теоретичні відомості

При зварюванні тиском охоплюючих з'єднань суттєві труднощі виникають у зв'язку із необхідністю створення тиску в контакті виробів, що зварюються. При з'єднанні металів, що мають суттєво відмінні коефіцієнти термічного розширення (КТР), тиск при зварюванні можна регулювати в широких межах шляхом зміни параметрів процесу та задаючись різними геометричними параметрами зони з'єднання.

В даній роботі розглядається задача визначення мінімальної температури зварювання із використанням різниці КТР деталей, що зварюються в залежності від геометричних параметрів зони з'єднання та КТР металів.

Будемо вважати, що деталі являють собою дві концентрично розташовані тонкі циліндричні оболонки (як показано на рис.1) і мають наступні параметри: r_1 та r_2 - відповідні радіуси оболонок 1 і 2; α_1 та α_2 - КТР металів оболонок 1 і 2; δ_1 та δ_2 - товщини цих оболонок; T_{n1} , T_{n2} , T_{e1} і T_{e2} - температури на зовнішніх та внутрішніх поверхнях оболонок 1 і 2.

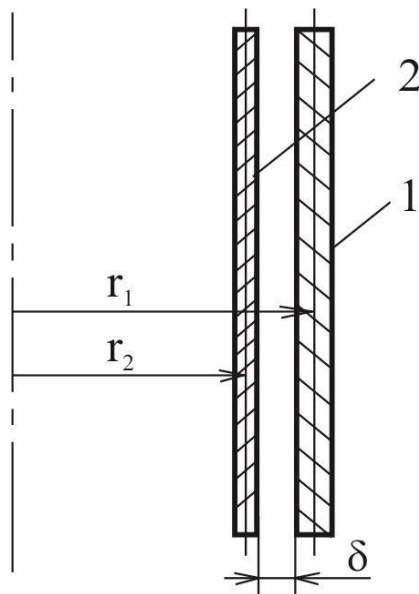


Рис.1. Схема розташування деталей, що зварюються: 1 – зовнішня деталь; 2 – внутрішня деталь.

Роздивимось осе симетричні термопружні деформації цих оболонок. На середній поверхні положення точки визначається координатами x – вздовж утворюючої та y – вздовж напрямлюючої оболонки. Третя координата z – нормальна до середньої поверхні оболонки. Переміщення W вздовж цієї нормалі пов'язано з пружною деформацією ε_y відношенням:

$$\varepsilon_y = \frac{W}{r}; \quad (1)$$

Відомо, що в тонкостінних оболонках температура розподілена лінійно, по товщині оболонки. При чому вважаємо, що відбувається рівномірний пічний нагрів усього вузла. Тоді із рівняння рівноваги оболонки, записаного з урахуванням закону Гука:

$$\varepsilon_y = \alpha T_0; \quad (2)$$

де $T_0 = (T_n - T_\varepsilon)/2$ – середня температура по товщині оболонки.

Із формули (1) з урахуванням (2) слідує:

$$W_1 = \alpha_1 T_{01} r_1; W_2 = \alpha_2 T_{02} r_2; \quad (3)$$

де T_{01} та T_{02} – середні температури для оболонок 1 та 2.

Із співвідношення між параметрами оболонок в вихідному стані та при температурі T' , котра відповідає температурі вичерпання зазору, отримаємо рівняння, що пов'язує значення переміщень оболонок і зазора:

$$\delta + W_1 - W_2 = 0; \quad (4)$$

Для випадку лінійного розподілення температури по товщині оболонок при їх контакті:

$$T_{02} = \kappa T_{01}; \quad (5)$$

Підставляючи (4) в (3), отримуємо:

$$T_{01} = \frac{\delta}{(\alpha_1 k_T r_2 - \alpha_1 r_1)}; \quad (6)$$

Коефіцієнт κ_T - характеризує розподіл температури по товщині оболонок. Оскільки в контакті:

$$T_{n2} = T_{\varepsilon1} m a \left(\frac{T_{\varepsilon1} - T_{\varepsilon2}}{b_2} \right) = \left(\frac{T_{n1} - T_{\varepsilon2}}{b_1 + b_2} \right); \quad (7)$$

Підставляючи (7) в (5), визначаємо величину κ_T :

$$k_T = \frac{b_2}{(b_1 + b_2)} + 2\left(\frac{b_1}{(b_1 + b_2)}\right) \cdot \left(\frac{T_{\epsilon 2}}{T_{н1} + T_{\epsilon 2}}\right); \quad (8)$$

Як вже було зазначено вище, зварювання відбувається в печах, де забезпечується рівномірне нагрівання вузла, то вочевидь, за таких умов ($T_{\epsilon 2} = T_{н1}$) $k_T = 1$.

Залежність КТР для різних металів від температури з достатньою для практичних цілей може бути знайдена по відповідних таблицях в додатках 1-3.

Тоді мінімальна температура термонатягу T' може бути визначена за наступною формулою:

$$T' = \frac{\left[-(\alpha_{02}r_2 - \alpha_{01}r_1 + \sqrt{(\alpha_{02}r_2 - \alpha_{01}r_1)^2 + 4\delta(\alpha_2r_2 + \alpha_1r_1)} \right]}{(2(\alpha_2r_2 - \alpha_1r_1))}; \quad (9)$$

Де α_{01} та α_{02} – початкові значення КТР 1 та 2 металів при температурі $T \approx 20$ °С; α_1 та α_2 – значення КТР 1 та 2 металів при температурі зварювання; δ – величина зазору між деталями.

3.1.2. Вихідні дані до розрахунку

Варіанти завдань для розрахунку наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Варіанти практичних завдань

№ вар	Пари металів, що зварюються		Радіуси поверхонь оболонок		Значення величини зазору, δ мм
	Зовнішня	Внутрішня	r_1 , мм	r_2 , мм	
1	Вольфрам	Молибден	105	95	1
2	Нікель	Мідь	100	90	2
3	Молибден	Хром	110	105	3
4	Сталь 20	Мідь	105	95	1
5	Титан	Сталь 20	95	85	2
6	Вольфрам	30ХН3	115	105	3
7	Молибден	Срібло	105	95	1
8	Хром	Мідь	100	90	2
9	12ХМФ	Мідь	110	105	3
10	Срібло	Цинк	105	95	1
11	Мідь	Срібло	95	85	2
12	Хром	Нікель	115	105	3
13	08кп	Алюміній	105	95	1
14	Нікель	Срібло	100	90	2
15	Вольфрам	Хром	110	105	3

16	Мідь	Алюміній	105	95	1
17	Х6М	Срібло	95	85	2
18	Залізо	Цинк	115	105	3
19	Молібден	Нікель	100	90	1
20	Вольфрам	Кобальт	110	105	2

3.2 Практична задача №2. Визначення умов утворення зварних з'єднань при зварюванні прокаткою

3.2.1. Теоретичні відомості

Зварювання прокаткою (ЗП) – високопродуктивний технологічний процес. При ЗП утворення з'єднання відбувається в умовах малої тривалості взаємодії t_e . Тому при визначенні температуро-швидкісних умов деформування при ЗП процеси релаксації (самодифузія, гетеродифузія) в зоні з'єднання не встигають розвинути настільки суттєво, щоб значно змінити структуру зони з'єднання. Це дозволяє вважати, що при ЗП стадія об'ємної взаємодії закінчується схопленням контактних поверхонь.

Для такого випадку зварювання тиском отримання якісного з'єднання (коли всі атоми контактуючих поверхонь утворили міжатомні зв'язки) забезпечується при виконання наступних умов:

$$\begin{aligned} t_e &\geq t_c \geq t_p; \\ t_u &\geq t_n + t_{ox}; \end{aligned} \quad (1)$$

де t_e – тривалість взаємодії, що визначається тривалістю дії стискаючих напружень на метали, що зварюються; t_c – тривалість схоплення атомів контактуючих поверхонь по всій площі з'єднання; t_p – тривалість релаксації напружень в металах, що зварюються; t_u – тривалість інкубаційного періоду утворення термодинамічно стійкого зародку нової крихкої фази; t_n – тривалість контактування поверхонь при постійній температурі, більше за $(0.4 - 0.5) T_{nl}$; t_{ox} – тривалість охолодження зони з'єднання після зварювання до температури $\leq 0.4 T_{nl}$.

При зварюванні тиском однорідних металів, а також різнорідних з обмеженою розчинністю, утворюючих крихкі фази, при температурах зварювання $\leq 0.4 T_{nl}$ виконання умови (1) є достатньою. Для ЗП замість умови (1) повинна виконуватись наступна умова:

$$t_d \geq t_e \geq t_c; \quad (2)$$

де t_d – тривалість деформації.

При ЗП тривалість взаємодії можна виразити у вигляді:

$$t_{\varepsilon} = \frac{l}{V}; \quad (3)$$

де l – довжина дуги захвату; V – швидкість прокатки.

До основних параметрів ЗП можна віднести: T – температура заготовок перед зварюванням; D – діаметр прокатних вальців; n – число обертання вальців; Δh або ε – величина обтиснення. Похідними цих параметрів є дуга захвату l , швидкість прокатки V , швидкість деформації в осередку деформації ε' , температура в осередку деформації T_0 . Ці параметри можуть бути визначені як:

$$V = n\pi D; \quad (4)$$

$$l = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)D\Delta h}; \quad (5)$$

$$\varepsilon' = \left(\frac{V}{l}\right) \ln\left(\frac{h_0}{h_k}\right); \quad (6)$$

де h_0 та h_k – початкова та кінцева товщини елемента, що прокатується.

Із рівнянь (4), (5), (6) видно, що зі зміною параметрів D , n , Δh та T можна в широких межах змінювати значення t_{ε} , t_c , і t_0 при ЗП.

Визначимо t_c за рівнянням:

$$t_c = \frac{bL}{(\varepsilon'S)}; \quad (7)$$

Шлях руху дислокацій до бар'єру L і щільність дислокацій в металі ρ пов'язані між собою співвідношенням $L = \rho^{-1/2}$. Значення ρ відповідно даним Ван Бюрена при $\varepsilon = 45\%$ складає $\approx 0.82 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$; при $\varepsilon = 55\%$ складає $\approx 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$; при $\varepsilon = 65\%$ складає $\approx 1.2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

При визначенні t_c припустимо, що при ЗП на повітрі площа активного центру S має мінімальне значення $S_{min} = 2.2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$. Значення t_c розраховані по рівнянню (7) при різних значеннях ε' у вигляді залежності $t_c(\varepsilon')$ при $\varepsilon = 45, 55, 65\%$ наведено на рис. 2. На всьому досліджуваному діапазоні ε' права частина умови (2) не виконується, оскільки $t_{\varepsilon} < t_c$, тобто не всі атоми контактуючих поверхонь при будь-якому значенні ε' встигають утворювати міжатомні зв'язки.

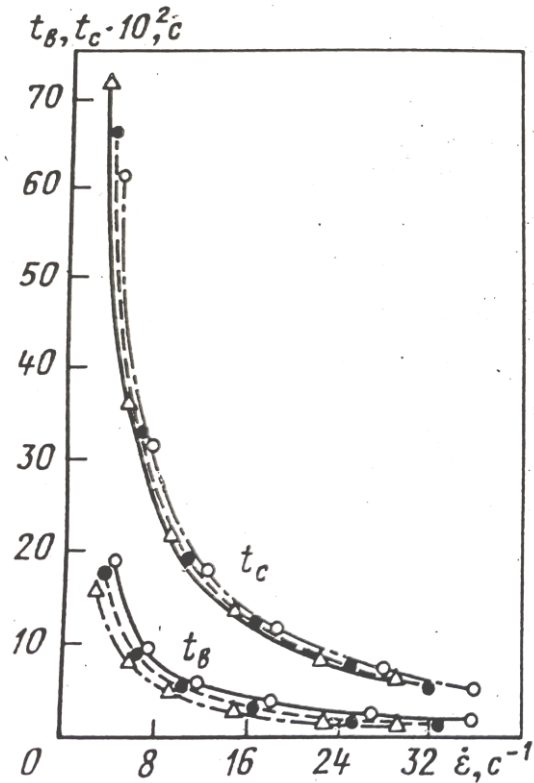


Рис. 2. Залежність $t_b(\epsilon')$ та $t_c(\epsilon')$: — $\epsilon=65\%$; - - - $\epsilon=55\%$; - · - · - $\epsilon=45\%$.

Рівень напружень σ_n , що відповідає моменту виходу металів, що зварюються із валків, буде залежати від T , ϵ та ϵ' , де T — температура заготовок перед зварюванням, може бути визначена як:

$$\sigma_n = 235 \sqrt{\epsilon'} \sqrt[3]{t_0}; \quad (8)$$

Визначмо значення ефективної енергії активації процесу E , що контролює зміни в σ_n по тангенсу кута нахилу залежностей $\lg \sigma_n - 1/T$ до осі $1/T$, наведеного графіку на рис.3.

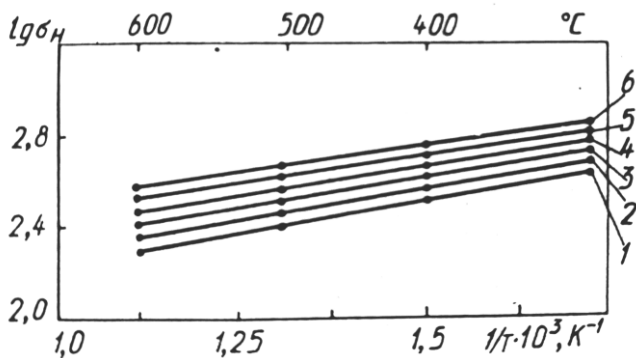


Рис. 3. Залежність $\lg \sigma_n - 1/T$ при $\epsilon=60\%$: 1 - $\epsilon'=2c^{-1}$; 2 - 5; 3 - 10; 4 - 20; 5 - 30; 6 - 40.

Таким чином, відповідні значення E : при $\epsilon' = 2c^{-1}$, $E = 10.7$ кДж\моль; при $\epsilon' = 5c^{-1}$, $E = 10.3$ кДж\моль; при $\epsilon' = 10c^{-1}$, $E = 9.3$ кДж\моль; при $\epsilon' =$

$10c^{-1}$; при $\varepsilon' = 20c^{-1}$, $E = 7.7 \text{ кДж/моль}$; при $\varepsilon' = 30c^{-1}$, $E = 7.2 \text{ кДж/моль}$; при $\varepsilon' = 40c^{-1}$, $E = 7.7 \text{ кДж/моль}$.

Близькі значення E при різних ε' дозволяють дійти висновку, що в діапазоні температур $T=300-600^\circ\text{C}$ зміни σ_n контролюється єдиним механізмом, а середнє значення $E_{сер} = 8.8 \text{ кДж/моль}$. При такому припущенні можна записати:

$$\sigma_n \approx \exp\left(\frac{E}{RT}\right); \quad (9)$$

Тоді з урахуванням (8) знаходимо:

$$\sigma_n = k \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \sqrt{\varepsilon'} \sqrt{t_\delta}; \quad (10)$$

де коефіцієнт k визначається із співвідношення $k \cdot \exp(E/RT) = 235$; $k = 70.4$.

Вирішуючи рівняння (10) відносно t_δ отримаємо:

$$t_\delta = \left[\frac{\sigma_n}{\left[k \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \sqrt{\varepsilon'} \right]} \right]^3; \quad (11)$$

Сутність рівняння (11) полягає в тому, що при температурі деформації T зі швидкістю ε' напруження σ_n досягається при тривалості деформації t_δ .

Роздивимось праву частину виразу (2). Підставимо в нерівність $t_\delta \geq t_c$ відповідні вирази для t_δ і t_c і вирішимо цю нерівність відносно ε' :

$$\varepsilon' \geq \left(\frac{V}{l}\right) \left(\frac{bL}{S}\right); \quad (12)$$

Тоді із урахуванням цього, вираз для визначення величини ε_{min} , при якій забезпечується активація і захоплення усіх атомів поверхонь, що з'єднуються матиме наступний вигляд:

$$\varepsilon_{min} \geq \frac{bL}{S}; \quad (13)$$

де $b = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$.

Вище було показано, що мінімальна площа активного центру $S_{min}=2.2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$, а максимальна площа активного центру, що визначається процесом обрізання полей напружень навколо дислокацій, що виходять в зону з'єднання, для $\varepsilon = 100\%$ та, відповідно, $\rho = 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ складає приблизно $S_{max} \approx 1 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$.

3.2.2. Вихідні дані до розрахунку

Варіанти завдань для розрахунку наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Варіанти завдань до розрахунку

№ вар.	Діаметр вальців D, мм	Число обертів вальців n, хв ⁻¹	Вихідна товщина елемента, h ₀ , мм	Кінцева товщина елемента, h _к , мм	Температура заготовок, T, °C	Рівень пластичної деформації, ε, %
1	100	11,7	3	1,65	200	45
2	100	23,58	3,25	1,47	250	55
3	155	33	3,5	1,25	300	65
4	155	40,92	3,75	2,07	350	45
5	210	127,38	4	1,8	400	55
6	210	81,9	4,15	1,45	450	65
7	350	10,62	4,25	2,35	500	45
8	350	18,3	4,5	2	550	55
9	100	27,9	3	1,65	600	65
10	100	49,9	3,25	1,47	650	45
11	155	144,6	3,5	1,25	200	55
12	155	136,8	3,75	2,07	250	65
13	210	92,2	4	1,8	300	45
14	210	12,4	4,15	1,45	350	55
15	350	33,3	4,25	2,35	400	65
16	350	51,3	4,5	2	450	45
17	100	110,1	3	1,65	500	55
18	100	64,6	3,25	1,47	550	65
19	155	82,2	3,5	1,25	600	45
20	155	21,7	3,75	2,07	650	55

Рекомендована література

1. Прогресивні технології з'єднання матеріалів: метод. вказівки до виконання лаб. робіт для здобувачів вищ. освіти другого (магістер.) рівня спец. 131 "Прикладна механіка" за освіт.-проф. програмою «Технології та устаткування зварювання» / уклад.: Г. П. Болотов, М. Г. Болотов, С. В. Олексієнко. – Чернігів : НУ "Чернігівська політехніка", 2021. – 28 с.
2. Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. Спеціальні способи зварювання: Навчальний посібник. Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 437 с.
3. Паяння матеріалів. Підручник за заг. ред. В. Ф. Хорунова і В. Ф. Квасницького. – Миколаїв : НУК, 2015. – 340 с.
4. Кривцун І. В., Квасницький В. В., Максимов С. Ю., Єрмолаєв Г. В. (2017) Спеціальні способи зварювання. Патон Б. Є. (ред.). Миколаїв, НУК, 345с.
5. G. P. Bolotov, M. G. Bolotov and I. V. Nahorna, "Hollow cathode glow discharge as a heating source in welding and brazing," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, UKraine, 2017, pp. 1197-1202.
6. M. G. Bolotov and I. O. Prybytko, Application of Glow Discharge Plasma for Cleaning (Activation) and Modification of Metal Surfaces while Welding, Brazing, and Coating Deposition, Progress in Physics of Metals, 22, No. 1: 103–128 (2021).
7. Болотов М. Г. Дослідження локальних властивостей плазми тліючого розряду з порожнистим катодом стосовно до умов зварювального нагріву. Вісник ЧДТУ. 2013. № 1(63). С. 112–119.
8. Болотов Г. П., Болотов М. Г. Розрахункове визначення температури нагріву деталей при дифузійному зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом. Вісник ЧДТУ. 2009. № 40. С. 29–37.
9. Zhang, Y., L'Eplattenier, P., Daehn, G.S., Babu, S. (2009) Numerical simulation and experimental study for magnetic pulse welding process on AA6061-T6 and Cu101 sheet. ASM International, 715–720.
10. Kore, S.D., Date, P.P., Kulkarni, S.V. (2007) Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminum sheets. International J. of Impact Engineering, 34, 1327–1341.
11. Baumann J. A., Lederich R. J., Mishra R. Evolution of thick section friction stir welding of 7050 aluminium alloys // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah (USA), 2003.
12. Friction Stir Welding and Processing / Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, editors, ASM International, 2007.

Таблиця 4 - Середнє значення КТР низьколегованих сталей $\beta \cdot 10^6$ /град, в інтервалі температур від 50 до $t^\circ\text{C}$

Марка сталі	Температура, $^\circ\text{C}$												
	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
15XM	—	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	—	—	—	—	—	—
30XMA	—	12,3	12,6	—	14,5	—	14,6	—	—	—	—	—	—
15XФ	—	11,9	12,4	13,1	13,7	14,2	14,5	14,9	—	—	—	—	—
30X	11,8	12,2	12,8	13,3	13,7	14,1	14,5	14,8	12,1	12,6	13,7	14,4	15,1
30XH3	10,9	11,4	12,3	12,8	13,2	13,4	13,7	13,7	10,7	12,0	13,1	14,0	14,7
X6M	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	—	—	—	—	—	—	—
30T2	11,5	11,9	12,7	13,4	13,9	14,3	14,7	15,1	12,1	12,5	13,7	14,7	15,5
15M	—	12,0	12,6	13,2	13,7	14,2	14,7	—	—	—	—	—	—
12MX	—	12,7	13,2	13,6	14,2	14,5	14,9	15,1	—	—	—	—	—
20XM	—	11,8	12,5	13,0	13,6	14,0	14,3	—	—	—	—	—	—
12XMФ	—	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	—	—	—	—	—
10X2Ф	—	12,2	12,7	13,0	13,5	13,8	14,2	14,5	—	—	—	—	—
10X2ФТ	—	12,1	12,8	13,8	13,6	13,7	14,1	14,3	—	—	—	—	—
10X2ФМ	—	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	—	—	—	—	—
10X2ФВ	—	10,5	11,3	12,6	12,9	13,4	13,6	13,8	—	—	—	—	—
10X2МФ (ЭИ531)	—	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	—	—	—	—	—
10X2МБ (ЭИ454)	—	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	—	—	—	—	—
25X2МФ (ЭИ10)	—	11,3	11,7	—	13,9	—	14,4	14,8	—	—	—	—	—
12X5CMA	—	11,0	—	—	—	12,0	12,2	—	—	—	—	—	—
50C2T	10,6	11,2	12,2	12,9	13,4	13,7	14,1	14,4	13,6	13,7	14,6	15,3	15,9

Таблиця 5 - Середні значення КТР вуглецевих сталей $\beta \cdot 10^6 1/град$, в інтервалі температур від 0 до $t^{\circ}C$

$t, ^{\circ}C$	08кп	08	20	40	У8	У12
50	12,38	11,74	11,92	10,72	10,84	10,30
100	12,62	12,19	12,18	11,21	11,11	10,60
150	12,86	12,63	12,43	11,69	11,39	10,90
200	13,08	12,99	12,66	12,14	11,72	11,25
250	13,27	13,27	12,88	12,60	12,11	11,68
300	13,46	13,51	13,08	13,00	12,49	12,11
350	13,64	13,71	13,27	13,31	12,84	12,51
400	13,83	13,91	13,47	13,58	13,15	12,88
450	14,04	14,11	13,67	13,82	13,41	13,21
500	14,25	14,30	13,92	14,05	13,65	13,53
$t, ^{\circ}C$	08кп	08	20	40	У8	У12
550	14,45	14,49	14,17	14,33	13,90	13,85
600	14,65	14,68	14,41	14,58	14,16	14,16
650	14,88	14,91	14,85	14,98	14,56	14,50
700	15,00	15,05	14,88	14,85	14,74	14,69
750	15,01	15,10	13,75	13,22	14,19	14,38
800	14,72	14,79	12,64	11,84	13,83	14,33
850	13,68	13,57	12,33	12,04	14,45	15,32
900	12,89	12,60	12,41	12,65	15,19	16,33
950	13,20	12,88	12,91	13,14	15,47	16,60
1000	13,79	13,49	13,37	13,59	15,72	16,84
1050	14,24	13,96	13,78	13,99	15,95	17,06
1100	14,65	14,38	14,16	14,36	16,15	17,26
1150	15,02	14,77	14,50	14,69	16,34	17,44
1200	15,37	15,12	14,81	15,00	16,52	17,60