

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний морський технічний університет
імені адмірала Макарова

ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з курсу "Термодинаміка і теплові процеси
зварювання"

Рекомендовано Методичною радою УДМТУ



Миколаїв
УДМТУ
2003

УДК 621.79.01

Лебедєв Ю.М., Лой С.А., Самохін С.М.

Збірник лабораторних робіт з курсу "Термодинаміка і теплові процеси зварювання". – Миколаїв: УДМТУ, 2003 . – 40 с.

Кафедра зварювального виробництва

Збірник містить вісім лабораторних робіт з дослідження фізичних процесів у зварювальній дузі, визначення технологічних характеристик при зварюванні плавленням, ефективної потужності зварювальних джерел нагріву та вивчення процесів розповсюдження тепла при зварюванні. Необхідні довідкові дані наведені в додатку.

Призначений для студентів спеціальності 7.050107 при вивченні курсу "Термодинаміка і теплові процеси зварювання", також може бути використаним як посібник при виконанні ряду досліджень в процесі дипломного проектування.

Рецензент канд. техн. наук, доцент Л.П. Кравченко

© Український державний морський
технічний університет, 2003

© Видавництво УДМТУ, 2003

Робота № 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ

Мета роботи: ознайомитися з основними видами зварювальних дуг і фізичними процесами, що протікають в них, експериментально визначити вплив іонізуючих компонентів покриттів і флюсів на стійкість горіння дуги.

Короткі теоретичні відомості

Зварювальна дуга є однією з форм стійкого електричного розряду в газовому середовищі. Розрізняють дуги прямої і непрямої дії, з плавким і неплавким електродами, відкриті і закриті, постійного і змінного струмів, вільні і стислі, сталі і несталі.

У дузі прямої дії метали, що підлягають нагріванню або плавленню, є електродами розряду. Електроди дуг непрямої дії електрично не сполучені з виробами. У дугах з плавкими електродами при зварюванні обидва електроди розплавляються, утворюючи метал зварювальної ванни. Якщо при горінні дуги один з електродів (наприклад, з вольфраму або графіту) не плавиться, то вона називається дугою з неплавким електродом. У відкритих дугах відсутні перешкоди циркуляції газу в навколодуговому просторі або її випроміненню. У разі повного обгороджування дуги вона стає закритою (наприклад, дуга під флюсом). Для дуг постійного струму характерні незмінність напрямку струму і незначні коливання його величини. У дугах змінного струму відбувається зміна його напрямку і величини, а тривалість стійкого горіння істотно перевищує час протікання перехідних процесів.

Розрізняють три зони дугового розряду: катодна, стовп дуги і анодна. Стійкість горіння дуги залежить від кількості електронів і іонів в стовпі дуги і їх здатності переміщуватись в напрямі електродів. Головним джерелом електронів, підтримуючих стовп дуги, є катодна зона. Головні значення тут мають процеси термічної і автоелектронної емісії. Термічна емісія грає основну роль в дугах з тугоплавкими катодами (вольфрам, графіт), коли при температурі катода 3500...4000 К забезпечується щільність струму близько 1000 А/см². У зварювальних дугах з плавким електродом, наприклад із залізним катодом ($T_{\text{кат}} = 3013$ К), термоемісійного струму недостатньо для дугового розряду. У цих випадках переважає автоелектронна емісія. Електрони, рухаючись в напрямку анода, потрапляють в стовп дуги і сприяють розвитку процесу іонізації газу. Чисельно робота іонізації в електрон-вольтах дорівнює потенціалу іонізації атомів U_i . Величини потенціалу первинної іонізації для атомів, що найчастіше знаходяться в стовпі зварювальних дуг, наведені в додатку.

Іонізація здійснюється опроміненням (фотоіонізація), зіткненням і нагріванням (термічна іонізація).

Для іонізації опроміненням необхідно, щоб квант променистої енергії був більшим або дорівнював роботі іонізації, тобто

$$h\nu \geq eU_i \quad (1.1)$$

де e – заряд електрона; U_i – потенціал іонізації; h – постійна Планка ($6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); ν – частота електромагнітних коливань.

Для здійснення іонізації атомів довжина хвилі електромагнітного випромінювання $\lambda = c/\nu$ (c – швидкість світла) повинна лежати в далекій ультрафіолетовій ділянці спектра. Так, для атома калію, одного з найбільш легко іонізуємих, вона має дорівнювати не більше за $0,287 \cdot 10^{-6}$ м (0,287 мкм).

При іонізації зіткненням, що відбувається частіше за все шляхом зіткнення швидких електронів з малорухомими молекулами або атомами, кінетична енергія електрона повинна бути більшою або дорівнюватиме роботі іонізації, тобто

$$\frac{m_e v_e^2}{2} \geq eU_i, \quad (1.2)$$

де m_e – маса електрона; v_e – швидкість його руху.

Термічна іонізація обумовлена тим, що з підвищенням температури зростає частота або кількість зіткнень атомів і збільшується ймовірність утворення іонів. Водночас з процесом іонізації відбувається також зворотній процес-рекомбінація, тобто з'єднання іонів з електронами і утворення нейтральних атомів. Необхідна температура для повної іонізації атомів конкретного газу дуже висока. Так, наприклад, для повної іонізації азоту необхідно нагріти його до 11300 К. Найбільш висока температура в стовпі звичайної зварювальної дуги становить 3000...6000 К і тільки у стислій дузі досягає 10000...30000 К. При температурах звичайної зварювальної дуги відбувається лише часткова термічна іонізація атомів складових повітря, захисних газів або пару металів, що зварюються. Для однорідного газу вона характеризується ступінню іонізації χ , тобто відносною часткою іонізованих атомів, і визначається за рівнянням

$$\frac{\chi^2}{1-\chi^2} = \frac{3,32 \cdot 10^{-2}}{P} a^2 T^{\frac{5}{2}} e^{\frac{-eU_i}{kT}}, \quad (1.3)$$

де P – тиск газу, Па; a^2 – квантовий коефіцієнт.

При малих значеннях ступінь іонізації розраховується за наближеним рівнянням

$$\chi = \frac{0,182}{\sqrt{P}} a T^{\frac{5}{4}} e^{\frac{-eU_i}{2kT}}. \quad (1.4)$$

У звичайних умовах дуговий розряд існує в суміші газів і пару металів, тому додається поняття ефективного потенціалу іонізації U_0 . Це потенціал іонізації деякого умовного однорідного газу, в якому кількість заряджених часток дорівнює їх кількості в газовій суміші:

$$U_0 = -\frac{T}{5800} \ln \left(\sum \sqrt{\gamma_i} e^{\frac{-5800 U_i}{T}} \right), \quad (1.5)$$

де γ_i – концентрація даного газу в суміші; U_i – його потенціал іонізації.

За розрахунками домішки легко іонізуючих елементів 5...10 % зменшують ефективний потенціал іонізації суміші до потенціалу іонізації газу, що легко іонізується. Чим нижче потенціал іонізації, тим стійкіше горить зварювальна дуга.

Температура стовпа дуги залежить від потенціалу іонізації. Для ручного дугового зварювання плавким електродом можна користуватися співвідношенням $T_{\text{ст}} \approx 810 U_0$. При зварюванні під флюсом $T_{\text{ст}} \approx 1100 U_0$.

Загальна напруга дуги U_d визначається як сума спадів напруг катодної U_k і анодної U_a ділянок та спаду напруги в стовпі $U_{ст}$: $U_d = U_k + U_a + U_{ст}$.

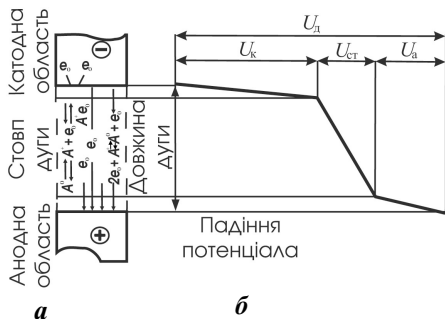


Рис. 1.1. Будова дуги (а) і спад напруги в різних зонах дуги (б)

Найбільш різко змінюється напруга в катодній і анодній зонах (рис. 1.1), в стовпі дуги вона зростає слабкіше і пропорційно довжині стовпа $l_{ст}$, тобто $U_{ст} = b l_{ст}$, де b – коефіцієнт, що залежить від складу газового середовища стовпа, розміру його перерізу і температури.

При стабільному дуговому розряді між електродами з конкретних матеріалів і постійно-

му складі газового проміжку встановлюється певне співвідношення між силою і густиною струму в катодній плямі, напругою і довжиною дуги, температурою електродів і стовпа дуги. Зміна одних параметрів обумовлює зміну і інших. Залежність між напругою на дузі і силою струму при постійних довжині дуги і перерізу електрода називається статичною вольт-амперною характеристикою дуги.

Характерний вигляд її показаний на рис. 1.2.

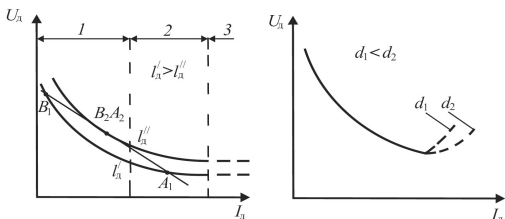


Рис. 1.2. Вольт-амперна характеристика дуги

Її можна розбити на три ділянки: 1 – падаюча ділянка характеристики; 2 – жорстка; 3 – зростаюча. На ділянці малих струмів збільшення сили струму помітно знижує напругу. При подальшому зростанні струму

напруга залишається практично незмінною. При цьому відбувається збільшення катодної плями. Коли катодна пляма зростає до площини перерізу електрода, подальше збільшення струму спричиняє підвищення напруги. Вольт-амперна характеристика зміщується вгору або вниз при збільшенні або зменшенні довжини дуги. При збільшенні перерізу електрода (інші умови рівні) зростаюча гілка вольт-амперної характеристики з'являється при більшому значенні струму.

Вольт-амперна характеристика дуги довжиною l'_d перерізає зовнішню характеристику джерела струму в точках A_1 і B_1 . Точка A_1 характеризує режим стійкого горіння, а точка B_1 – режим збудження дуги. При збільшенні довжини дуги до напруга на дузі зростає, а струм – зменшується. У випадку торкання характеристик режими стійкого горіння і збудження дуги співпадають і вона горить нестабільно. Довжина дуги в момент самовільного обриву залежить від матеріалу електрода, типу покриття або флюсу і потенціалу іонізації газу. Про вплив покриттів, флюсів і їх складових на іонізацію та стійкість горіння дуги можна судити за розмірами обривної довжини дуги, які можна визначити експериментально.

Порядок виконання роботи

1. За допомогою спеціальної установки визначити розміри обривної довжини дуги при додаванні різних компонентів електродних покриттів або без них.

2. Встановити вплив роду і полярності струму на стійкість зварювальної дуги.

Зміст звіту: короткі відомості про фактори, що впливають на стійкість дуги; таблиці експериментальних даних впливу параметрів режиму і компонентів на розміри обривної довжини дуги; теоретична оцінка ступеню іонізації для одного складу газової суміші стовпа дуги; висновки по роботі.

Робота № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи: засвоїти методику осцилографування і вивчити особливості будови осцилограм зварювальної дуги змінного струму.

Короткі теоретичні відомості

Для дуг, що живляться змінним струмом частотою f , кожний з

електродів почергово f разів буває катодом і анодом. Цей процес супроводжується зміною напрямку і величини струму відповідно до зміни ЕРС джерела і процесів в дузі. Дуга гасне і розгорається повторно. Тривалість її існування помітно перевищує час протікання в ній перехідних процесів (рис. 2.1).

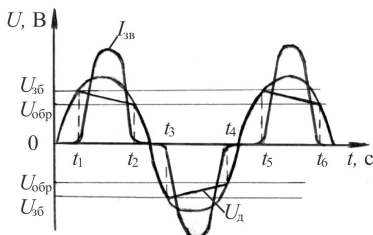


Рис. 2.1. Динамічна характеристика дуги змінного струму

Для збудження дуги потрібна певна напруга $U_{зб}$. За час горіння в напівперіоді електроди і стовп дуги нагріваються і напруга, при якій дуга мимовільно обірветься, $U_{обр}$ буде менше $U_{зб}$. Через синусоїдальний характер зміни напруги джерела існують проміжки часу, при яких

дуга не горить ($0 - t_1, t_2 - t_3, t_4 - t_5, \dots$).

Після обриву дуги провідність між електродами протягом деякого часу підтримується з різогрітої катодної плями. Згідно [3], при змінінні струму на величину ΔI час існування іонів Δt_i в секундах визначається співвідношенням

$$\Delta t_i = \Delta I / 1,44 U_i^{5,5} I^{1/3} \text{ с}, \quad (2.1)$$

де U_i — потенціал іонізації, В; I — початкове значення струму, А.

Теоретична оцінка цього часу для процесів зварювання сталевими електродами показує, що він змінюється в межах від 10^{-4} до 10^{-3} с.

Як видно з формули (2.1), значення Δt_i істотно залежить від потенціалу іонізації залишившихся іонів. При більш низькому потенціалі іонізації повний струм після обриву дуги підтримується протягом більш тривалого часу.

Час існування термоелектронної емісії з моменту обриву дугового розряду Δt_e визначає тривалість охолодження катодної плями до температури, при якій практично припиняється термоемісія електронів.

Визначимо Δt_e , використовуючи формулу змінення температури від дії миттєвого джерела тепла в стрижні без урахування теплообміну з навколишнім середовищем:

$$\Delta t_e = \frac{W^2}{(c\gamma S)^2 4\pi a} \left(\frac{1}{T_0^2} - \frac{1}{T_k^2} \right), \quad (2.2)$$

де $c\gamma$ – об'ємна теплоємність; S – площа перерізу електрода; a – коефіцієнт температуропровідності; T_{κ} – температура катодної плями (приблизно дорівнює температурі кипіння металу); T_0 – температура, при якій практично припиняється термоємність (приблизно $T_{\text{пл}}$ для сталевих електроду); W – енергія, що виділилася на аноді, який з наступного напівперіоду стане катодом,

$$W = (U_a + \phi) I \frac{1}{2f}, \quad (2.3)$$

де U_a – падіння напруги в прианодній зоні; ϕ – потенціал виходу електрона з металу; I – струм дуги; f – частота змінного струму.

Для сталевих електродів $\Delta t_e \approx 10^{-3}$ с.

Потрібно також указати: якщо в міжелектродному проміжку знаходяться елементи з великою спорідненістю до електрона (F, Cl та інші), то вони захоплюють електрони і погіршують стійкість горіння дуги на змінному струмі. Тому електроди, в покритті яких міститься плавиковий шпат (CaF_2), застосовують тільки для зварювання на постійному струмі. Нестійкість горіння дуги зумовлює труднощі при зварюванні на змінному струмі.

Стійкість горіння дуги на змінному струмі можна підвищити:

- 1) зниженням напруги збудження і обриву дуги;
- 2) підвищенням напруги джерела живлення;
- 3) збільшенням частоти змінного струму;
- 4) зсувом фаз між струмом і напругою.

При першому способі до складу електродного покриття або флюсу додаються з'єднання лужних металів (Na, K, Ca і інших), що мають низький потенціал іонізації. Це веде до зменшення напруги на дузі, в тому числі напруги збудження, що збільшує час горіння дуги в напівперіоді. Другий спосіб реалізується шляхом підвищення напруги холостого ходу трансформатора.

При цьому, як видно з рис. 2.2, збільшується час горіння дуги у напівперіоді.

Однак практично застосування цього способу обмежене, оскільки напруга холостого ходу зварювальних трансформаторів не перевищує 80 В.

Третій спосіб передбачає використання в зварювальних джерелах змінного струму осциляторів. З підвищенням частоти змінного струму зменшуються час обриву дуги у напівперіоді і тепловідда-

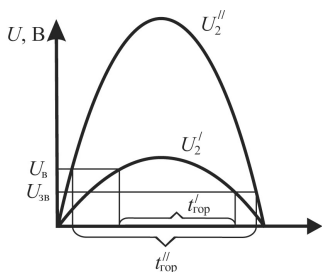


Рис. 2.2. Вплив напруги U_2 холостого ходу на час горіння дуги $t_{гор}$ в напівперіоді змінного струму

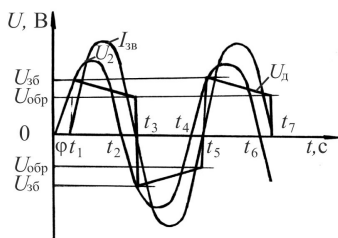


Рис. 2.3. Зміна U_2 , U_B та I_{3B} в зварювальному колі з індуктивним опором

отримали 1-й і 4-й способи підвищення стійкості горіння дуги.

Експериментальне визначення особливостей зварювальної дуги може здійснюватися шляхом запису миттєвих значень струму і напруги дуги на осцилографі.

Від джерела світла 1 (рис. 2.4) промінь фокусується лінзою 2 на

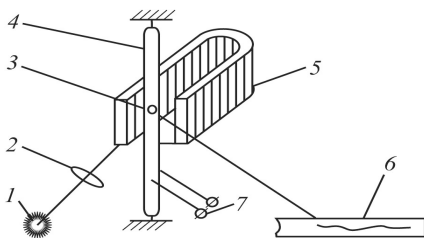


Рис. 2.4. Схема запису осцилограм

ча в навколишнє середовище. Це сприяє підвищенню температури дуги та електродів, збільшує електронну емісію та іонізацію газу.

За четвертим способом у зварювальний ланцюг послідовно вмикають індуктивний опір дросель.

З рис. 2.3 видно, що обривання дуги в моменти часу t_2 , t_4 , t_6 не відбувається за рахунок ЕРС, що індукується в дроселі,

$$E_L = -L \frac{dI}{dt},$$

де L – індуктивність дроселя.

Напруга дуги в моменти часу t_3 , t_5 , t_7 стрибкоподібно змінює величину і напрям, досягаючи значень U_{36} . Найбільш широке практичне застосування

отримали 1-й і 4-й способи підвищення стійкості горіння дуги. Експериментальне визначення особливостей зварювальної дуги може здійснюватися шляхом запису миттєвих значень струму і напруги дуги на осцилографі. Від джерела світла 1 (рис. 2.4) промінь фокусується лінзою 2 на дзеркало 3 вібратора 4 осцилографа і відбивається від дзеркала на екран 6. До струмопідводів 7 вібратора подається постійний струм від джерела. Вібратор знаходиться в сильному полі постійного магніту 5. При проходженні струму по проводах вібратора останній повертається на деякий кут, внаслідок чого промінь на екрані переміщується.

Якщо замість екрана встановити рухому з певною швидкістю фотоплівку або фотопапір, то буде фіксуватися змінення струму (або іншого показника) у часі. Характерний запис осцилограм при зварюванні наведено на рис. 2.5.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з методикою осцилографування струму і напруги при зварюванні.

2. Виконати зварювання за режимами, наданими викладачем, і записати параметри зварювальної дуги на осцилографі.

3. Провести обробку отриманих осцилограм.

Зміст звіту: короткі відомості про особливості горіння дуги змінного струму; графіки осцилограм і результати їх обробки; висновки по роботі.

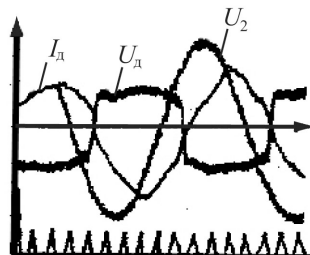


Рис. 2.5. Осцилограма змінного струму

Робота № 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГОРІННЯ ДУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ НЕПЛАВКИМ ВОЛЬФРАМОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ

Мета роботи: вивчити процеси, що відбуваються в дузі при зварюванні неплавким вольфрамовим електродом.

Короткі теоретичні відомості

Звичайно неплавкі вольфрамові електроди застосовують при зварюванні кольорових сплавів і спеціальних сталей. Аргон або гелій використовують як захисний газ. Найбільш доцільно проводити зварювання на постійному струмі прямої полярності. Ефективність зварювального процесу в цьому випадку витікає з того, що на катоді виділяється менше тепла, ніж на аноді, і тому на прямій полярності можна пропускати більший струм, не побоюючись розплавлення вольфрамового електрода. Термічну стійкість вольфра-

мового електрода можна оцінити з рівняння теплового балансу. Потужність, що передається катоду (вольфрамовому електроду),

$$P_{\kappa} = I_{\text{зв}}(U_{\kappa} - \phi_{\text{в}}), \quad (3.1)$$

де U_{κ} – катодне падіння напруги; $\phi_{\text{в}}$ – потенціал виходу електрона з металу (для W).

Потужність йде на нагрівання електрода. Оскільки його теплопровідність відносно низька і він розігрівається на великій довжині, допускаємо, що теплові втрати пов'язані переважно з випромінюванням. Звідси потужність втрат $P_{\text{п}} = S\xi\sigma T^4$, де S – площа випромінювальної поверхні катода; ξ – ступінь чорноти; σ – постійна Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,71 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{K}^4)$.

Прирівнявши прихід витрат і вважаючи, що S приблизно дорівнює площі перерізу електрода, знайдемо допустиму густину струму:

$$j \leq \frac{\xi\sigma T_{\text{плW}}^4}{U_{\kappa} - \phi_{\text{в}}}. \quad (3.2)$$

Згідно рівняння (3.2) підвищення густини струму можливе переважно тільки шляхом зниження катодного падіння напруги. У свою чергу,

$$U_{\kappa} = 2,3 \cdot 10^2 \frac{\Delta T^{3/5} \lambda^{3/5}}{j^{2/5} b_i^{1/5}}, \quad (3.3)$$

де $\Delta T = T_{\text{с}} - T_{\kappa}$; $T_{\text{с}}$ – температура стовпа дуги; T_{κ} – температура катода; λ – коефіцієнт теплопровідності газу в катодній зоні; b_i – рухливість іонів.

Таким чином, знизити U_{κ} можна шляхом зменшення величини ΔT або температури стовпа дуги. Це досягається введенням в стовп легко іонізуючих компонентів, оскільки $T_{\text{с}}$ пропорційна ефективному потенціалу іонізації ($T_{\text{с}} = 1000 U_{\text{ієф}}$). Другий шлях – використання захисних газів з більш низькою теплопровідністю. За цієї умови захисний газ аргон краще, ніж гелій.

Анодне падіння напруги і потужність, що передається аноду, практично не залежать від умов горіння дуги. Тому заходи щодо захисту катода від термічного руйнування не впливають на енергетичні характеристики анодної зони. Зі збільшенням густини струму підвищується ефективність зварювальної дуги.

Для алюмінію і його сплавів переважне застосування зварювання на зворотній полярності. При їх зварюванні на поверхні утво-

рюється оксидна плівка, яка погіршує формування шва і якість металу. Якщо катодом зробити алюміній, то катодне розпилення плівки, що відбувається переважно за рахунок емісії електронів, буде сприяти отриманню швів високої якості. У цьому випадку потужність, що передається аноду (вольфрамовому електроду), $P_a = I_d(U_a + \phi_v)$, де U_a – анодний спад напруги.

При цьому оптимальна густина струму

$$j \leq \frac{\xi \sigma T_{плW}^4}{U_a + \phi_v}. \quad (3.4)$$

Оскільки всі величини, що входять у рівняння (3.4), постійні, то верхня межа густини струму різко обмежена і практично не піддається регулюванню. Тому при зварюванні алюмінієвих сплавів використовують дугу змінного струму. Тут виріб є катодом лише частину часу, якого досить для розпилення оксидної плівки. При цьому можливе істотне підвищення густини струму.

Вплив роду і полярності на допустимі значення струму при зварюванні вольфрамовим електродом в аргоні можна бачити з наступного прикладу. Для електрода діаметром 3 мм величина зварювального струму складає: на прямій полярності 140...180 А; на зворотній полярності 20...40 А; на змінному струмі 100...140 А.

При зварюванні неплавким вольфрамовим електродом на змінному струмі спостерігається випрямляюча дія дуги. З'являється постійна складова струму, яка погіршує роботу трансформатора і формування шва. Величина струму постійної складової I_0 , що віднесена до струму короткого замикання $I_{к3}$, є функцією відношення напруги дуги U_1 і U_2 в різних напівперіодах:

$$\frac{I_0}{I_{к3}} = f\left(\frac{U_1}{U_2}\right).$$

Вигляд цієї функції для випадку $U_d / U_{х.х} = 0,5$ зображений на рис. 3.1. Зміна напруги холостого ходу $U_{х.х}$ слабо відображується на цій залежності. Таким чином, основною величиною, яка визначає постійну складову струму, є

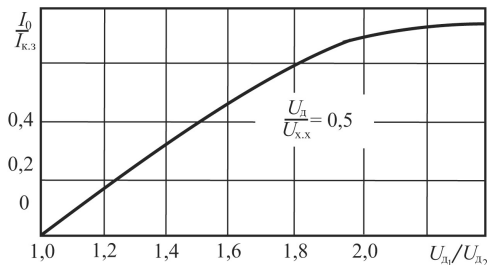


Рис. 3.1. Залежність $I_0 / I_{к3}$ від відношення $U_{д1} / U_{д2}$ в різних напівперіодах

напруга дуги $U_{д1}$ і $U_{д2}$ в сусідніх напівперіодах. Їх складові $U_{к1} + U_{с1} + U_{а1}$ і $U_{к2} + U_{с2} + U_{а2}$ з огляду на порівняльну постійність умов існування стовпа можна вважати однаковими, тобто $U_{с1} \approx U_{с2}$ і $U_{а1} \approx U_{а2}$.

Тоді різниця напруг в двох напівперіодах буде залежати лише від катодних падінь напруг:

$$\Delta U_{д} = U_1 - U_2 \approx U_{к1} - U_{к2}.$$

Використовуючи співвідношення (3.3), отримаємо

$$\Delta U_{д} = 2,3 \cdot 10^2 \frac{\lambda^{3/5}}{j^{2/5} b_i^{1/5}} (\Delta T_1^{3/5} - \Delta T_2^{3/5}). \quad (3.5)$$

Основний вплив на $\Delta U_{д}$ надають величини ΔT_1 і ΔT_2 . Оскільки $\Delta T_1 = T_c - T_{к1}$, $\Delta T_2 = T_c - T_{к2}$, де температура стовпа постійна, значення ΔT_1 і ΔT_2 визначаються різницею температур активних плям на катодах Al і W. Приймаючи для алюмінію $T_{к1} = 2333$ К (температура кипіння) і для вольфраму $T_{к2} = 3500$ К (температура плавлення) і враховуючи, що дуга горить в парах алюмінію з $U_i = 5,95$ В, знаходимо: $T_c \approx 1000 \cdot 5,95 = 5950$ К; $\Delta T_1 = 3720$ К; $\Delta T_2 = 2450$ К. Підставляння цих величин в рівняння (3.5) дає $\Delta U_{д} = 10$ В, що добре узгоджується з експериментом. Таким чином, поява постійної складової при зварюванні неплавким електродом зумовлена суттєвою відмінністю теплофізичних властивостей матеріалів електрода і металу, що зварюється. Відмінність в температурах нагріву катодів зумовлює і їх різну емісійну здатність. Постійна складова ($\Delta U_{д} \approx 2$ В) спостерігається також при зварюванні тонким електродом масивного виробу. Поява її пов'язана з інтенсивним тепловідводом від активних плям у масивний виріб. При низьких напругах $U_{х.х}$ і малій густині струму має місце повна випрямляюча дія дуги. Струм не проходить в тих напівперіодах, коли катодом є виріб. У цьому випадку різниця $\Delta U_{д}$ в сусідніх напівперіодах може значно перевищувати обчислену за рівнянням (3.5). Використовуючи осцилятор або генератор імпульсів, можна усунути випрямляючу дію такої дуги.

Порядок виконання роботи

1. За допомогою осцилографа на швидкості протягнення плівки 500 мм/с здійснити запис осцилограм напруги холостого ходу, а також струму і напруги дуги при зварюванні алюмінієвого сплаву вольфрамовим електродом в аргоні на малій, середній і великій погонній енергії.

2. Отриману осцилограму замалювати і зробити вимір пока-

зань U_1 , U_2 , I_1 , I_2 в різних напівперіодах, а також напруг збудження дуги U_{361} і U_{362} .

3. Проаналізувати отримані результати, виконати теоретичні розрахунки за формулою (3.5) і зробити висновки про особливості горіння дуги з вольфрамовим неплавким електродом в аргоні при зварюванні на змінному струмі алюмінієвих сплавів.

Зміст звіту: короткі теоретичні відомості по зварюванню сплавів вольфрамовим електродом; осцилограми струму і напруг при зварюванні алюмінієвого сплаву на різній погонній енергії; теоретичні розрахунки і таблиця експериментальних результатів; висновки по проведених дослідженнях.

Робота № 4. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ РУЧНОМУ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ПОКРИТИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ

Мета роботи: ознайомитися з основними технологічними характеристиками і практично оцінити їх залежність від параметрів режиму ручного електродугового зварювання.

Короткі теоретичні відомості

Основними параметрами режиму ручного електродугового зварювання є тип, марка і діаметр електрода, рід і полярність струму, напруга на дузі. Додаткові параметри: довжина електрода, склад і товщина електродного покриття, положення електрода і виробу в просторі. Тип і марку електродів вибирають по каталогами з урахуванням хімічного складу матеріалу, що зварюється, вимог міцності і корозійної стійкості, що пред'являються до конструкції. Діаметр електрода назначають в залежності від товщини металу, що зварюється, положення шва в просторі і розмірів виробу. Величину зварювального струму при зварюванні конструкційних сталей електродами діаметром 3...6 мм розраховують по формулі

$$I_{\text{зв}} = (20 + 6d_e) d_e, \quad (4.1)$$

де d_e – діаметр електрода, мм.

Продуктивність процесу зварювання електродами різних марок залежить від технологічних характеристик плавлення електродів, які визначаються експериментально.

Коефіцієнт розплавлення α_p , г/(А·год), характеризує швидкість плавлення електрода і обчислюється за формулою

$$\alpha_p = \frac{G_p}{I_{зв} t}, \quad (4.2)$$

де G_p – маса розплавленого за час t металевого стержня, г; t – час горіння дуги, с; $I_{зв}$ – зварювальний струм, А.

Коефіцієнт наплавлення α_n , г/(А·год), характеризує швидкість наплавлення і визначається за формулою

$$\alpha_n = \frac{G_n}{I_{зв} t}, \quad (4.3)$$

де G_n – маса наплавленого за час t металу, г.

Різниця в коефіцієнтах α_p і α_n визначає втрати електродного металу на чад, розбризкування, випаровування. Коефіцієнт втрат

$$\psi_b = \frac{\alpha_p - \alpha_n}{\alpha_p} \cdot 100 \%. \quad (4.4)$$

Аналогічним чином визначають α_n , α_p и ψ_b для зварювання в середовищі захисних газів, порошковим дротом і під флюсом.

Знання технологічних характеристик дозволяє встановити науково обгрунтовані норми часу на зварювальні роботи і норму витрат електродів. Основний час зварювання обчислюють за формулою $T_0 = t = G_n / \alpha_n I_{зв}$, а масу електродів, необхідних для зварювання даної конструкції, – за формулою $G_{ел} = G_n k(1 + \phi_b)$, де коефіцієнт $k = k_n k_o$; $k_n = m_e / m_{ст}$ – коефіцієнт маси покриття, який визначається відношенням маси електрода з покриттям до маси металічного стрижня; $k_o = L_{ел} / (L_{ел} - L_o)$ – коефіцієнт, враховуючий масу огарків; $L_{ел}$ – довжина всього електроду для даного діаметра, а L_o – довжина огарка ($L_o \approx 40$ мм).

Продуктивність зварювання g визначається кількістю наплавленого металу G_n за одиницю часу:

$$g = G_n / t_n \text{ кг/год.}$$

Підвищення продуктивності досягають шляхом збільшення зварювального струму, застосування електродів великих діамет-

рів і з підвищеною товщиною покриття, а також електродів, що містять в покритті залізний порошок.

Порядок виконання роботи

1. Визначити технологічні характеристики дуги: α_p , α_n , ψ_v .

2. Розрахувати час і витрату електродів, необхідні для зварювання конструкції завданням G_n .

Зміст звіту: визначення технологічних характеристик процесів зварювання плавленням; таблиця експериментальних даних і результатів розрахунку; висновки по роботі.

Робота № 5. ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО ККД ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДЖЕРЕЛА НАГРІВУ

Мета роботи: ознайомитися з методикою експериментального визначення ефективної теплової потужності зварювальної дуги.

Короткі теоретичні відомості

Кількість тепла, що виділяється при горінні дуги, визначається за законом Джоуля-Ленца

$$Q = I_{зв} U_d t_r, \quad (5.1)$$

де $I_{зв}$ – величина струму в зварювальному ланцюгу; U_d – падіння напруги на дузі; t_r – час горіння дуги.

Повна теплова потужність дуги дорівнює $q_n = I_{зв} U_d$. Однак не все тепло, що виділяється дугою при зварюванні, іде на нагрів металу. Деяка його частина втрачається в навколишнє середовище, а при зварюванні неплавким електродом в захисному газі ще і на їх нагрів.

Кількість тепла, введена в одиницю часу в метал виробу, характеризує ефективну теплову потужність джерела нагріву q . Відношення ефективної теплової потужності до повної визначає ефективний ККД нагріву:

$$\eta = \frac{q}{q_n}. \quad (5.2)$$

На значення ефективного ККД дуги значний вплив мають спосіб зварювання і довжина дуги. Значно менш η залежить від теплофізичних властивостей металу, що нагрівається, його товщини, величини зварювального струму, його роду і полярності. Останнє твердження відноситься лише для зварювання плавким електродом.

Таким чином, для визначення η необхідно знати повну і ефективну теплову потужність джерела нагріву. Повна теплова потужність дуги обчислюється значеннями зварювального струму і падіння напруги в дузі, а ефективна визначається експериментально калориметричним методом.

Після наплавлення шва на пластину її відразу ж вміщують в калориметр. Ефективна потужність наплавлення складає величину q , тоді за весь час зварювання $t_{зв}$ в планку буде введено кількість тепла $qt_{зв}$. Це тепло переважно віддається калориметру (Q_k). Деяка його частка ($Q_{рад}$) втрачається на теплообмін пластини з навколишнім середовищем за час від початку наплавлення до занурення пластини в калориметр, також частка тепла втрачається на утворення пара (Q_n) при зіткненні гарячої пластини з водою калориметра і залишається в зразку ($Q_{зр}$) через нерівність кінцевої температури води в калориметрі і початкової температури зразка перед зварюванням. Складемо тепловий баланс:

$$qt_{зв} = Q_k + Q_{рад} + Q_n + Q_{зр}. \quad (5.3)$$

Втрати тепла $Q_{рад}$ залежать від тепловмісту пластини, яке за час наплавлення вважається зростаючим пропорційно $t_{зв}$, а за час перенесення t_n приймається постійним:

$$Q_{рад} = bq \int_0^{t_{зв}} t dt + bqt_{зв}t_n = bq \left(\frac{1}{2} t_{зв}^2 + t_{зв}t_n \right) = 0,5qbt_{зв}(t_{зв} + 2t_n), \quad (5.4)$$

де $b = (\alpha_1 + \alpha_2) / c\gamma\delta$ – коефіцієнт температуровіддавання; α_1, α_2 – коефіцієнти тепловіддавання поверхонь пластини; $c\gamma$ – об'ємна теплоємність металу пластини; δ – товщина пластини.

Підставивши (5.4) в (5.3) і вирішивши відносно ефективної теплової потужності, отримаємо

$$q = \frac{Q_k + Q_n + Q_{зр}}{[1 + b(t_{зв} + 2t_n)]t_{зв}}. \quad (5.5)$$

Теплофізичні дані:

теплоємність Дж/(г·К):

посудини $c_{\kappa} = 0,382$;

мешалки $c_{\text{м}} = 0,382$;

води $c_{\text{в}} = 4,17$;

коефіцієнт тепловіддавання пластини, Дж/(см²·с·К):

верхньої поверхні $\alpha_1 = 1,875 \cdot 10^{-3}$;

нижньої поверхні $\alpha_2 \approx \alpha_1$.

Витрачено на пароутворення тепло можна обчислити, якщо знати масу води, що випарилася:

$$Q_{\text{п}} = m_{\text{вп}} [\lambda_{\text{п}} + c_{\text{в}} (100 - T_0)], \quad (5.6)$$

де $I_{\text{п}}$ – питома теплота пароутворення ($I_{\text{п}} = 2255$ Дж/г); $c_{\text{в}}$ – питома теплоємність води; $(100 - T_0)$ – зміна температури води від початкової до кипіння.

Для звично застосованих умов досліду (розмірів сталевієї пластини) значення $Q_{\text{п}}$ з достатньою точністю можна визначити, використовуючи експериментальні дані:

$I_{\text{зв}}, \text{ А}$	– 100	200	400	600	1000
$Q_{\text{п}}, \text{ Дж}$	– 1665	2500	3300	4170	5000

Кількість тепла, яку отримає калориметр, знаходимо за формулою

$$Q_{\kappa} = \left(m_{\text{в}} c_{\text{в}} + m_{\kappa} c_{\kappa} + \frac{2}{3} m_{\text{м}} c_{\text{м}} \right) (T_{\kappa} - T_0), \quad (5.7)$$

де $m_{\text{в}}$, m_{κ} , $m_{\text{м}}$ – відповідно маси води в калориметрі, калориметричної посудини і мішалки; $c_{\text{в}}$, c_{κ} , $c_{\text{м}}$ – відповідно питомі теплоємності води і матеріалу посудини та мішалки; T_0 і T_{κ} – температура води, посудини та мішалки до і після досліду.

Кількість тепла, одержана зразком,

$$Q_{\text{зр}} = m_{\text{зр}} c_{\text{зр}} (T_{\kappa} - T_{\text{зр}}), \quad (5.8)$$

де $m_{\text{зр}}$, $c_{\text{зр}}$ – маса і питома теплоємність пластини зі швом; $T_{\text{зр}}$ – температура пластини до наплавлення.

Порядок виконання роботи

1. Залити водою калориметр, визначити її масу і температуру.
2. Наплавити шов на планку протягом 30...40 с, фіксуючи при цьому $I_{\text{зв}}$, $U_{\text{д}}$ и $t_{\text{зв}}$.

3. Занурити в калориметр планку зі швом на ребро, ввімкнути мішалку і зафіксувати максимальну температуру нагрівання води в калориметрі.

4. Визначити масу планки з наплавленим швом.

5. За отриманими даними вирахувати ефективний ККД нагрівання металу дугою.

Кількість дослідів, спосіб наплавки, рід і полярність струму задаються викладачем.

Зміст звіту: короткі теоретичні відомості; таблиця експериментальних даних; розрахунок ефективного ККД; висновки по роботі.

Робота № 6. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ І ТЕРМІЧНИХ ЦИКЛІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТОНКИХ ПЛАСТИН І МАСИВНИХ ТІЛ ВЕЛИКОГО ПРОТЯГУ

Мета роботи: 1. Вивчити експериментальні методи визначення термічних циклів і температурних полів в металі при зварюванні.

2. Ознайомитися з методикою теоретичного розрахунку температурних змін при однопрохідному заварюванні пластин і наплавленні на масивний виріб.

Короткі теоретичні відомості

Джерела нагріву, що застосовуються при зварюванні, характеризуються високою концентрацією тепла. Тепло, що вводиться при зварюванні, розповсюджується по об'єму виробу. Для опису процесів поширення тепла в точках на певній відстані від області дії джерела тепла, останній можна уявити зосередженим в крапці, на лінії або в площині, що залежить від форми нагріваемого тіла.

За часом дії джерела тепла розподіляються на миттєві і безперервно діючі. У останньому випадку джерело може залишатися нерухомим або переміщуватися з певною швидкістю.

Процес поширення тепла в будь-якій точці тіла і в будь-який момент часу задовольняє диференційному рівнянню теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

де $a = \lambda / c\gamma$ – коефіцієнт температуропровідності; λ – коефіцієнт теплопровідності; $c\gamma$ – об'ємна теплоємність тіла; T – температура в точці, що розглядається в певний момент часу.

Для розрахунку процесів нагрівання і охолодження металу при зварюванні необхідно правильно вибрати розрахункову схему, яка віддзеркалює головні особливості процесу.

Крім характеристик джерела тепла сюди входять розміри і форма тіла, що зварюється. За розмірами тіла можуть бути обмеженими і необмеженими. Необмежене теплопровідне тіло характеризується тим, що у всьому його об'ємі процес поширення тепла підкоряється рівнянню теплопровідності. Таких тіл насправді не існує, однак в багатьох випадках, коли розглядається локальний процес віддалений від границь, тіло можна вважати необмеженим. Це дозволяє набагато спростити розрахункові формули і отримати точність, задовільну для інженерних розрахунків. Все різноманіття зварних тіл в залежності від їх форми і потужності зварювального джерела зводиться до чотирьох типів: напівнескінченне тіло, плоский шар, пластина і стрижень.

Напівнескінченному тілу відповідає масивний виріб, розміри якого великі в трьох просторових напрямках осей ox , oy , oz , з плоскою поверхнею $z = 0$. За пластину приймається лист малої товщини. У цьому випадку температура за товщиною розподіляється рівномірно. Плоскому шару відповідає лист середньої товщини, коли товщина листа не настільки мала, щоб вважати розподіл температури рівномірним за товщиною, і не настільки велика, щоб можна було знехтувати впливом обмеженості на поширення тепла від зосереджених джерел при наплавленні шва на напівнескінченне тіло і при однопрохідному зварюванні пластин.

У разі рівномірно рухомого джерела зі швидкістю v найбільш прості розв'язки диференціального рівняння теплопровідності виходять в пересувній системі координат, коли вона суміщена з джерелом і переміщається разом з ним.

При переміщенні точкового швидкорухомого джерела на поверхні напівнескінченного тіла (наплавка валика на масивний виріб) температура в будь-якій точці тіла з координатами x , y , z на момент часу t визначається за рівнянням

$$T(x, y, z, t) = T_{\text{гр}}(R, x) \psi_3(\rho_3, \tau_3), \quad (6.1)$$

де $T_{\text{гр}}$ – температура граничного стану,

$$T_{\text{np}} = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{v}{2a}(R+x)\right]; \quad (6.2)$$

$\psi_3(\rho_3, \tau_3)$ – коефіцієнт теплонасичення, що залежить від безрозмірних критеріїв відстані

$$\rho_3 = \frac{vR}{2a} \quad (6.3)$$

і часу

$$\tau_3 = \frac{v^2 t}{4a}; \quad (6.4)$$

$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – відстань від джерела нагріву до точки, що розглядається; час t відлічується з моменту початку дії джерела тепла.

Рівняння (6.1) показує, що по мірі введення тепла джерелом метал поступово нагрівається. При цьому для точок тіла з однаковими координатами в пересувній системі координат температура поступово підвищується і потім досягає граничного стану, або насичення. За цей період часу насичення значення ψ_3 змінюється від нуля до одиниці. Теоретично $\psi_3 = 1$ досягається при $t \rightarrow \infty$. Однак для значень ψ_3 трохи менше одиниці, наприклад $\psi_3 = 0,99$, цей час набагато менше часу дії зварювального джерела. Для заданих ρ_3 і τ_3 значення ψ_3 можна визначити за номограмою (рис. 6.1) або вирахувати за формулою

$$\psi_3(R, t) = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi\left(\frac{R}{\sqrt{4at}} - v\sqrt{\frac{t}{4a}}\right) \right] + \frac{1}{2} \exp\frac{vR}{a} \left[1 - \Phi\left(\frac{R}{\sqrt{4at}} + v\sqrt{\frac{t}{4a}}\right) \right],$$

$$\text{де } \Phi(\omega) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\omega} e^{-u^2} du.$$

Якщо в якості зварювального джерела тепла використовується електрична дуга, то в (6.2) $q = I_{\text{зв}} U_{\text{д}} \eta$ є ефективна теплова потужність дуги.

За рівнянням (6.1) можна розрахувати температурне поле, тобто сукупність значень температури у всіх точках тіла, або термічний цикл в будь-якій точці тіла, тобто зміну її температури у часі.

Час, поки діє зварювальне джерело, називають періодом теплонасичення. Після припинення його дії настає період вирівню-

вання. Для зручності розрахунку зміни температури тіла в цьому періоді уявно передбачають, що джерело продовжує рухатися далі в напрямку осі x , а для ліквідації його дії в

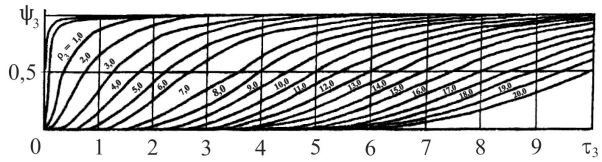


Рис. 6.1. Номограма для визначення коефіцієнта теплонасичення при наплавленні на масивний виріб

момент завершення зварювання t_k вводиться стік тепла такої ж потужності, як і джерело. Введення фіктивних джерела і стоку тепла дозволяє розрахувати зміну температури в будь-якій точці тіла у період вирівнювання за тими ж законами, що і для періоду теплонасичення, але з урахуванням дії стоку. Температуру у періоді вирівнювання можна розглядати як алгебраїчну суму температур $T(x, y, z, t)$ від уявного зварювального джерела, що продовжує діяти, і температури $T[x, y, z, (t - t_k)]$ стоку, який почав діяти з моменту часу t_k :

$$\begin{aligned} T_b(x, y, z, t) &= T(x, y, z, t) - T[x, y, z, (t - t_k)] = \\ &= T_{\text{пр}}[\psi_3(\rho_3, \tau_3) - \psi_3^{\text{ст}}(\rho_3^{\text{ст}}, \tau_3^{\text{ст}})], \end{aligned} \quad (6.5)$$

де $T_{\text{пр}}$, ρ_3 , τ_3 визначаються за формулами (6.2)–(6.4); $\psi_3^{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплонасичення для точки, що розглядається, яка почала діяти з моменту часу t_k стоку теплоти.

Безрозмірні критерії відстані $\rho_3^{\text{ст}}$ і часу $\tau_3^{\text{ст}}$ визначаються за рівняннями:

$$\rho_3^{\text{ст}} = \rho_3 = \frac{vR}{2a}; \quad \tau_3^{\text{ст}} = \frac{v^2(t - t_k)}{4a}.$$

Якщо зварювальне джерело швидкорухоме, градієнт температур у напрямку осі переміщення джерела ox буде дуже малий в порівнянні з градієнтами за oy і oz :

$$\frac{\partial T}{\partial x} \ll \frac{\partial T}{\partial y}; \quad \frac{\partial T}{\partial x} \ll \frac{\partial T}{\partial z}.$$

У цьому випадку можна нехтувати процесом поширення тепла

вздовж джерела і для розрахунку температур в точках тіла застосувати вирази

$$T(r_0, t) = \frac{q}{2\pi\lambda vt} \exp\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right). \quad (6.6)$$

Час t відлічується з того моменту, коли зварювальне джерело переміститься в площину yoz , де знаходиться точка, що розглядається, яка віддалена від нього на відстань $r_0 = \sqrt{y_0^2 + z_0^2}$.

Застосовуючи рівняння (6.6), легко визначити максимальну температуру нагрівання точок

$$T_m = \frac{0,368q}{\frac{\pi}{2} c \gamma_0^2 v} \quad (6.7)$$

і миттєву швидкість охолодження центра шва при температурі T

$$\omega = 2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{q_n}, \quad (6.8)$$

де $q_n = q/v$ – погонна енергія зварювання; T_0 – початкова температура тіла.

При дії лінійного джерела, що швидко рухається в пластині товщиною δ (однопрохідне зварювання пластин), використовують наступні розрахункові формули:

$$T(x, y, z) = T_{np}(r, x) \Psi_2(\rho_2, \tau_2); \quad (6.9)$$

$$T_{np}(r, x) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(r_0 \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right); \quad (6.10)$$

$$\rho_2 = r \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; \quad \tau_2 = t \left(\frac{v^2}{4a} + b \right); \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Тут $K_0\left[r\sqrt{(v^2/4a^2) + (b/a)}\right]$ – функція Бесселя другого роду нульового порядку від уявного аргументу, визначається за математичними таблицями або розраховується за наближеною формулою

$$K_0(U) = \exp(-U) \sqrt{\frac{\pi}{2U}} \left(1 - \frac{1^2}{8U} + \frac{1^2 3^2}{2!(8U)^2} - \frac{1^2 3^2 5^2}{3!(8U)^3} + \dots \right).$$

Коефіцієнт температуровіддавання b враховує теплообмін поверхні пластини з навколишнім середовищем:

$$b = \frac{2\alpha}{c\gamma\delta},$$

де α – коефіцієнт теплообміну.

Коефіцієнт теплонасичення $\psi_2(\rho_2, \tau_2)$ визначається за номограмою (рис. 6.2) в залежності від безрозмірних критеріїв відстані ρ_2 і часу τ_2 або визначається формулою

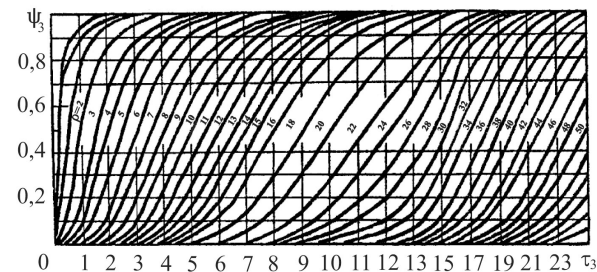


Рис. 6.2. Номограма для визначення коефіцієнта теплонасичення при однопрохідному зварюванні пластин

$$\psi_2 = \frac{1}{2} [1 + \mu(\rho_2, \omega)],$$

де $\omega = (vt/r) \sqrt{1 + (4ab/v^2)}$; $\mu(\rho_2, \omega)$ – допоміжна функція,

$$\mu(\rho_2, \omega) = \frac{1}{K_0(\rho_2)} \int_0^{\omega} \frac{d\omega}{\omega} \left[-\frac{\rho_2}{2} \left(\omega + \frac{1}{\omega} \right) \right].$$

У період вирівнювання, наступаючий з моменту припинення дії зварювального джерела, температура точок пластини визначається за формулою

$$\begin{aligned} T_{\text{в}}(x, y, t) &= T_{\text{пр}}(x, y, t) - T_{\text{пр}}[x, y, (t - t_{\text{к}})] = \\ &= T_{\text{пр}}[\psi_2(\rho_2, \tau_2) - \psi_2^{\text{ст}}(\rho_2^{\text{ст}}, \tau_2^{\text{ст}})]; \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$\rho_2^{\text{ст}} = \rho_2 = r \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; \quad \tau_2^{\text{ст}} = (t - t_{\text{к}}) \left(\frac{v^2}{4a} + b \right),$$

де $T_{\text{пр}}$ розраховується згідно рівняння (6.10).

Для джерела, що швидко рухається, термічний цикл і максимальна температура точки, розташованої на відстані y_0 від осі нагріву, розраховуються по формулам:

$$T(y_0, t) = \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\gamma t}} \exp\left(-\frac{y_0^2}{4at} - bt\right); \quad (6.12)$$

$$T_m = \frac{0,484q}{2\delta y_0 c \gamma v} \quad \text{при } b = 0; \quad (6.13)$$

$$T_m = \frac{0,484q}{2\delta y_0 c \gamma v} \left[1 - \frac{by_0^2}{2a} + \frac{1}{2!} \left(\frac{by_0^2}{2a} \right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{by_0^2}{2a} \right)^3 + \dots \right] \quad \text{при } b \neq 0.$$

Миттєва швидкість охолодження центра шва при температурі T

$$w = 2\pi\lambda c \gamma \frac{(T - T_0)^3}{\left(\frac{q_n}{\delta} \right)^2}. \quad (6.14)$$

Порядок виконання роботи

1. На поверхні пластини і масивного виробу за допомогою конденсаторного розряду приварити спаї хромель-алюмелевих термопар з діаметром дротів 0,2...0,3 мм в точки, вказаних на рис. 6.3. Термопари підключити до гальванометрів шлейфового осцилографа типу Н-700.

2. Здійснити прогрівання тіл вздовж осі x дугою з неплавким вольфрамовим електродом на вказану довжину прогрівання. При цьому зафіксувати зварювальний струм, напругу на дузі, час дії зварювального джерела і записати на фотопapіp осцилографом термічні цикли.

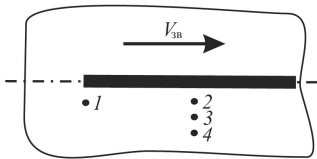


Рис. 6.3. Схема розміщення термопар для реєстрування термічних циклів

3. Після проявлення осцилограм визначити термічні цикли в точках 1...4 за допомогою їх проміру і градуювальних графіків.

4. Побудувати графіки термоциклів на міліметровці.

5. Для точок 1,2 виконати теоретичну оцінку термічних циклів за формулами (6.1), (6.5) або (6.9), (6.11) в залежності від форми тіла, що прогривається.

6. Для точок 2...4 розрахувати термічні цикли, максимальні температури за формулами (6.6), (6.7) або (6.12), (6.13).

7. Визначити відхилення розрахункових даних від експериментальних.

8. За формулами (6.8) і (6.14) вирахувати швидкість охолоджу-

вання центра шва при температурі 550 °С і оцінити структуру та властивості шва по заданому хімічному складу сталі, використовуючи дані роботи [5].

Зміст звіту: схема прогрівання тіл, що нагріваються, і розташування термопар, таблиця експериментальних даних, а також розрахункові формули і таблиці розрахунків; експериментальні і теоретичні термічні цикли точок тіла у вигляді графіків, виконаних на міліметрівці; аналіз експериментальних даних і теоретичних розрахунків; висновки по роботі.

Робота № 7. ВПЛИВ ОБМЕЖЕНОСТІ РОЗМІРІВ ТІЛ НА ПРОЦЕСИ ПОШИРЕННЯ ТЕПЛА ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПЛАСТИН

Мета роботи: вивчити особливості впливу обмеженості розмірів тіл на поширення тепла при зварюванні пластин.

Короткі теоретичні відомості

Найбільш проста форма розв'язку диференційного рівняння теплопровідності можлива при досить великих розмірах зварюваних тіл, коли можна нехтувати впливом теплообміну на границях цих тіл. Однак на практиці дуже часто виникає необхідність розрахунку теплових полів і термічних циклів у випадках, коли зварювальне джерело знаходиться поблизу краю тіла, що зварюється. Враховуючи істотну відмінність теплопровідності металів і навколишнього середовища (повітря), в першому наближенні можна вважати, що за межами тіла тепло не поширюється, тобто задовольняється адіабатична гранична умова. У цьому випадку тепло нагромаджується поблизу границь. Для отримання аналітичних виразів, що дозволяють обчислити температуру в граничних точках у будь-який момент часу, застосовують метод фіктивних джерел. Розглянемо його для найпоширеніших випадків.

1. *Нагрівання пластин поблизу краю тіла.* Нехай зварювальне джерело тепла переміщується на деякій відстані від краю пластини

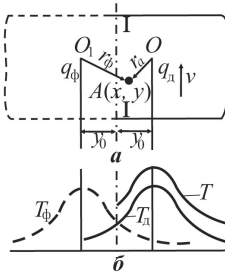


Рис. 7.1. Схема врахування відбивання тепла при зварюванні поблизу краю пластини (а) і характер розподілу температури (б)

(рис. 7.1,а). Вважаючи границю 1–1 адіабатичною, створимо відображення тепла від неї. Для цього уявимо, що пластина нескінченна, і введемо на такій же відстані від краю пластини фіктивне джерело, яке рухається синхронно з дійсним джерелом. Відстань між дійсним і фіктивними джерелами дорівнює $2y_0$. Температура в точці A з координатами x, y в момент часу t визначиться як сума змін температури від дійсного і фіктивного джерел.

Для випадку зварювального джерела, рухомого по поверхні тонкої пластини з постійною швидкістю,

$$T = T_{\text{д}} + T_{\text{ф}} = T_{\text{пр}}^{\text{д}} \Psi_2(\rho_2^{\text{д}}, \tau_2^{\text{д}}) + T_{\text{пр}}^{\text{ф}} \Psi_2(\rho_2^{\text{ф}}, \tau_2^{\text{ф}}); \quad (7.1)$$

$$T_{\text{пр}}^{\text{д}} = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} K_0 \left[r_1 \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \right]; \quad (7.2)$$

$$T_{\text{пр}}^{\text{ф}} = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} K_0 \left[r_2 \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \right], \quad (7.3)$$

де r_1 – відстань від дійсного джерела до точки, що визначається; r_2 – відстань від фіктивного джерела до точки, що визначається,

$r_2 = \sqrt{x^2 + (2y_0 - y)^2}$; $\tau_2^{\text{д}}, \tau_2^{\text{ф}}$ – безрозмірні критерії часу;

$\tau_2 = t \left[\frac{v^2}{4a} + b \right]$, а оскільки фіктивне і дійсне джерела починають

рухатися одночасно і синхронно, то $\tau_2^{\text{д}} = \tau_2^{\text{ф}} = \tau_2$; t – час, що відлічується від початку руху джерела; ρ_2 – безрозмірний критерій від-

стані; $\rho_2^{\text{д}} = r_1 \sqrt{(v^2/4a^2) + (b/a)}$, $\rho_2^{\text{ф}} = r_2 \sqrt{(v^2/4a^2) + (b/a)}$.

Таким чином, зміну температури в точці A в будь-який момент часу для періоду теплонасичення можна обчислити за формулою (7.1).

Зміна температури в момент часу t показана на рис. 7.1,б.

2. Зварювання пластин від краю тіла. Для розрахунку зміни

температури, яка знаходиться поблизу краю пластин, що зварюються, продовжимо її уявно в нескінченність і одночасно з дійсним джерелом тепла ведемо фіктивне, що рухається в протилежну сторону від дійсного з тією ж швидкістю (рис. 7.2). Тоді температуру в точці $A(x, y)$ в період теплонасичення визначаємо як суму зміни температури від дійсного і фіктивного джерела за рівнянням (7.1), $r_1 = \sqrt{(x_0 - x)^2 + y^2}$; $r_2 = \sqrt{(-x_0 - x)^2 + y^2}$ – відстань від краю пластини джерела в момент часу t ; $x = vt$.

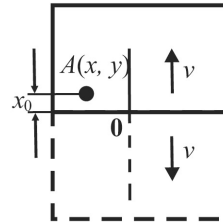


Рис. 7.2. Схема врахування відбивання тепла при зварюванні від краю пластини

Порядок виконання роботи

1. До тонкої пластини $\delta = 2...4$ мм (рис. 7.3) приварити хромель-алюмелеві термопари 1 на відстані $x = 0,5$ см, $y = 0,5$ см і 2 в центрі з координатою $y = 0,5$ см. Вісь x сумістити з напрямком руху зварювального джерела.

2. Проплавити пластину по осі x від краю 0 вольфрамовим електродом в аргоні.

3. За допомогою осцилографа Н-700 записати термічні цикли.

4. По отриманій осцилограмі побудувати термічні цикли для точок 1 і 2.

5. Порівняти експериментальні дані з теорією, розрахувати також термічні цикли у цих точках.

Для цього поділити час на два періоди: теплонасичення і вирівнювання. Оскільки точка 1 знаходиться поблизу краю пластини, потрібно врахувати відображення тепла від кромки I–I. Розрахунки виконати за наступними формулами.

Точка 1

Період теплонасичення ($t \leq t_n$). Розрахунок виконувати за формулою (7.1), де $t_n = l_{ш} / v_{зв}$ ($l_{ш}$ – довжина шва; $v_{зв}$ – швидкість зварювання). Величину q – ефективну теплову потужність зварювальної дуги – визначити за значеннями параметрів режиму проплавлення: $q = I_{зв} U_d \eta$, де $I_{зв}$ – зварювальний струм; U_d – напруги дуги; η –

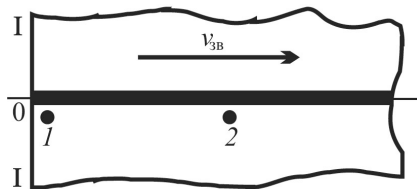


Рис. 7.3. Схема розміщення термопар для реєстрування термічних циклів

ефективний ККД нагрівання металу дугою (визначається експериментально за даними лабораторної роботи № 5).

Відстані $r_1 = \sqrt{(x_0 - x)^2 - y^2}$, де $x = v_{\text{зв}} t$; $r_2 = \sqrt{(-x_0 - x)^2 + y^2}$, де $y = 0,5$; $x_0 = 0,5$.

Період вирівнювання ($t > t_{\text{н}}$)

$$T(x, y, z) = T_{\text{пр}} (\sum \Psi_2^{\text{н}} - \sum \Psi_2^{\text{ф}}),$$

де

$$T_{\text{пр}} = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{yx}{2a}} \left[K_0 \left(r_1 \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \right) + K_0 \left(r_2 \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \right) \right];$$

$\Psi_2^{\text{н}}$ вибирається за номограмою Рикаліна в залежності від безрозмірних критеріїв ρ_2 і τ_2 ;

$$\sum \Psi_2^{\text{н}} = \Psi_{2\text{д}}^{\text{н}} + \Psi_{2\text{ф}}^{\text{н}};$$

$$\Psi_{2\text{д}}^{\text{н}}(\rho_{2\text{д}}^{\text{н}}; \tau_{2\text{д}}^{\text{н}}); \quad \rho_{2\text{д}}^{\text{н}} = r_1 \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; \quad \tau_{2\text{д}}^{\text{н}} = t \left(\frac{v^2}{4a^2} + b \right);$$

$$\Psi_{2\text{ф}}^{\text{н}}(\rho_{2\text{ф}}^{\text{н}}; \tau_{2\text{ф}}^{\text{н}}); \quad \rho_{2\text{ф}}^{\text{н}} = r_2 \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; \quad \tau_{2\text{ф}}^{\text{н}} = \tau_{2\text{д}}^{\text{н}};$$

$$\sum \Psi_2^{\text{в}} = \Psi_{2\text{д}}^{\text{в}} + \Psi_{2\text{ф}}^{\text{в}};$$

$$\Psi_{2\text{д}}^{\text{в}}(\rho_{2\text{д}}^{\text{в}}; \tau_{2\text{д}}^{\text{в}}); \quad \rho_{2\text{д}}^{\text{в}} = r_1 \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; \quad \tau_{2\text{д}}^{\text{в}} = (t - t_{\text{н}}) \left(\frac{v^2}{4a^2} + b \right);$$

$$\Psi_{2\text{ф}}^{\text{в}}(\rho_{2\text{ф}}^{\text{в}}; \tau_{2\text{ф}}^{\text{в}}); \quad \rho_{2\text{ф}}^{\text{в}} = r_2 \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; \quad \tau_{2\text{ф}}^{\text{в}} = \tau_{2\text{д}}^{\text{в}}.$$

Точка 2

Розрахунок виконати аналогічно, але без урахування фіктивного джерела.

6. За отриманими даними побудувати термічні цикли і порівняти розрахункові дані з експериментальними.

7. За результатами досліджень сформулювати висновки.

Зміст звіту: теоретичні відомості про вплив обмеженості роз-

мірів тіл на поширення тепла при зварюванні; експериментальні і розрахункові дані у вигляді таблиць і графіків; висновки по роботі.

Робота № 8. ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУР НАГРІВАННЯ ЕЛЕКТРОДА

Мета роботи: ознайомитись з методикою вимірювання температур; вивчити схему розрахункового визначення температур нагрівання електрода; дослідити вплив режиму зварювання на розподіл температур уздовж електрода.

Короткі теоретичні відомості

Електрод при зварюванні нагрівається теплом дуги та внаслідок протікання електричного струму.

Тепло дуги впливає на ділянку прилеглу до торця електрода довжиною не більше за 5...10 мм. Внаслідок опору електрода зварювальному струму має місце виділення тепла вздовж електродного стержня. Можливі і інші, додаткові джерела тепла, наприклад контактний опір між електродом і електроутримувачем. Але при справному обладнанні і оптимальній технології вклад цих джерел незначний. При розрахунках нагріву всього електрода вплив дуги можна не враховувати.

Розрахунки нагріву електрода зварювальним струмом можна проводити за рівняннями:

$$\frac{D_1 + T_T}{T_{np} - T_T} = \frac{D_1 + T_0}{T_{np} - T_0} e^{nt}; \quad T_{np} = md_1 j^2 + T_0; \quad n = \frac{A}{md_1} \left(\frac{T_{np}}{D_1} + 1 \right),$$

де A , D_1 , m – дослідні величини (див. таблицю); T_T – температура нагрівання електрода струмом, °C; T_{np} – гранична температура, за умов нескінченно тривалого протікання струму по електроду, °C; T_0 – початкова температура електрода, °C; t – час протікання струму, за яким визначається температура, с; $j = \frac{4I}{\pi d_1^2}$ – густина струму, А/мм²; d_1 – діаметр електродного стержня, мм.

Дослідні величини A , D_1 , t для деяких режимів зварювання

Електрод		Вид струму	A , мм ⁴ ·°C/(A ² ·с)	D_1 , °C	m , мм ³ ·°C/A ²
Дріт	Покриття				
Маловуглецевий Св-08А	Крейдяне	Постійний	0,031	240	2,65
	ОММ-5	Змінний	0,037	300	2,65
	УОНИ-13	Постійний	0,024	200	2,50
	Інші	Змінний	0,027	240	2,50

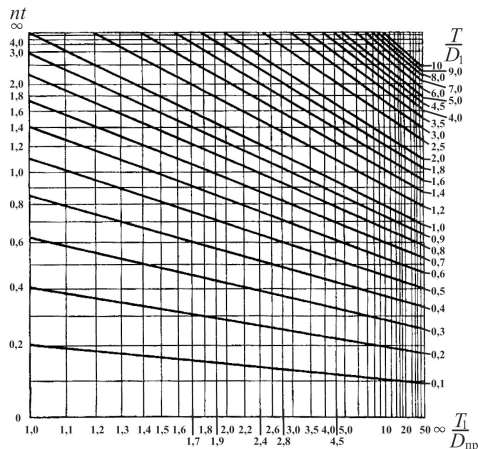


Рис. 8.1. Номограма розрахунку нагрівання сталевих електродів струмом

Визначити T_t можна скориставшись номограмою (рис. 8.1).

У цьому випадку визначають безрозмірні критерії:

$$K_1 = \frac{T_{np}}{D_1}; \quad K_2 = nt.$$

Потім за допомогою K_1 та K_2 , скориставшись номо-

грамою, визначають $K_3 = \frac{T_1}{D_1}$.

За одержаним значенням K_3 розраховується T_t , де $T_t =$

$= K_3 D_1$. Частка електрода, що межує з дугою, нагрівається додатково її теплом. Змінення температури у даному випадку визначається шляхом розрахунку у напівнескінченному стрижні під впливом постійнодіючого плоского джерела нагріву.

Розподіл температури $T(x)$ біля нагріваемого дугою торця електрода задовільно описує рівняння граничного стану процесу нагріву стрижня постійнодіючим плоским джерелом.

Оскільки електрод постійно подається в дугу, то нагрів його буде відповідати гілці температурної кривої, розташованій поперед рухомої дуги, тобто $x > 0$. З цих умов слушним є рівняння

$$T(x) = (T_k - T_t) \cdot e^{-\frac{wx}{a}} + T_t,$$

де x – відстань від торця електрода до дослідної точки, см; w – швидкість плавлення електрода, см/с; T_t – температура нагрівання стрижня струмом, °C; T_k – температура нагріваемого дугою торця

електрода, $^{\circ}\text{C}$; ω – швидкість подачі електрода, см/с. Умовно вважається, що $T_{\text{к}}$ дорівнює середній температурі крапель (для сталі $T_{\text{к}} = 2300 \dots 2500$ $^{\circ}\text{C}$).

На рис. 8.2 зображено температурне поле вздовж електрода при ручному дуговому зварюванні. При збільшенні часу нагрівання збільшується тепловміст, що веде до зростання швидкості розплавлення.

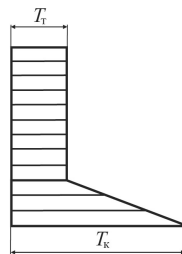


Рис. 8.2. Розподіл температури уздовж електрода

Порядок виконання роботи

1. Підготувати потенціометр до роботи. Прогріти його протягом 15 хв. Перемкнути тумблер на режим "електрод".
2. Встановити на електроді в трьох точках термопари, визначивши їх відстань від торця електрода.
3. Увімкнути запис на потенціометрі. Зробити наплавку електродом, визначивши час по секундоміру.
4. Визначити температури досліджуваних точок електрода на момент закінчення наплавки.
5. Розрахувати теоретичні значення температур дослідних точок на момент обриву дуги, враховуючи відстань від торця електрода після закінчення зварювання до точок.
6. Порівняти отримані експериментальні і розрахункові дані.
7. Побудувати діаграми розподілу температур уздовж електрода на момент обриву дуги (розрахункову і експериментальну).

Зміст звіту: схема розташування термопар, таблиця експериментальних даних, а також розрахункові формули і розрахунки; експериментальні і теоретичні температури точок електрода у вигляді графіків, виконаних на міліметрівці; аналіз експериментальних даних і теоретичних розрахунків; висновки по роботі.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К.* Теория сварочных процессов. – Харьков: ХГУ, 1968. – 503 с.
2. *Лебедев Ю.М., Самохин С.М.* Сборник лабораторных работ по курсу "Тепловые процессы сварки". – Николаев: НКИ, 1989. – 33 с.
3. *Лесков Г.И.* Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 334 с.
4. *Петров Г.Л., Тумарев А.С.* Теория сварочных процессов. – М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.
5. *Рыкалин Н.Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1952. – 296 с.
6. Сварка в машиностроении / Под ред. *Н.А. Ольшевского*. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 501 с.
7. Сварка в машиностроении: В 4 т. / Под ред. *В.А. Винокурова*. – М.: Машиностроение, 1979. – Т. 3. – 567 с.
8. Теоретические основы сварки / Под ред. *В.В. Фролова*. – М.: Высшая школа, 1970. – 591 с.
9. Теория сварочных процессов / Под ред. *В.В. Фролова*. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
10. *Шоршоров М.Х., Белов В.В.* Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке. – М.: Наука, 1970. – 219 с.

ДОДАТОК

Таблиця 1. Потенціал виходу електрона j , потенціал іонізації U_i та спорідненість з електроном деяких речовин E

Речовини	Φ	U	E , еВ	Речовини	Φ	U	E , еВ
	В				В		
Алюміній	4,20	5,98	0,09	Фтор (газ)	–	17,42	3,62
Вуглець	4,81	11,26	2,10	Хлор (газ)	–	13,01	3,82
Кальцій	3,20	6,11	–	Водень (газ)	–	13,59	0,747
Хром	4,60	6,76	–	Кисень (газ)	–	13,61	2,33
Мідь	4,36	7,72	–	ОН (газ)	–	13,18	2,16
Залізо	4,71	7,90	–	Калій	2,25	4,34	0,69
Нікель	5,01	7,63	–	Натрій	2,28	5,14	1,21
Титан	4,10	6,83	–	Аргон	–	15,76	–
Вольфрам	4,51	7,98	–				

Таблиця 2. Теплофізичні властивості деяких матеріалів

Матеріали	$c\gamma$, Дж/(см ³ ·К)	λ , Дж/(см·с·К)	$\alpha = \lambda/c\gamma$, см ² /с
Маловуглецева сталь	4,77	0,40	0,085
Вуглецева сталь	4,77	0,38...0,46	0,079...0,096
Низьколегована сталь	4,77	0,33...0,38	0,070...0,079
Хромиста сталь	4,77	0,25	0,053
Хромонікелева сталь	4,77	0,17...0,25	0,035...0,053
Алюміній	2,72	2,63	1,00
Алюмінієві сплави АМг-5, АМг-6, ВАД-1	2,72	1,34...1,38	0,5...0,51
Мідь червона	3,97	3,77	0,95

Таблиця 3. Ефективний ККД процесу нагрівання виробів для різних джерел нагрівання

Джерело нагрівання	η_u
Металева дуга під флюсом	0,80...0,95
Відкрита металева дуга (при ручному зварюванні)	0,65...0,85
Вуглецева дуга	0,50...0,70
Вольфрамова дуга в аргоні	0,48...0,52
При зварюванні в аргоні плавким електродом	0,68...0,74
Дуга в СО ₂ (стальний електрод)	0,80...0,84
Дуга відкрита (при зварюванні порошковим дротом)	0,80...0,86
Ацетиленово-кисневе полум'я пальника	0,25...0,72

Таблиця 4. Хімічний склад зварювального дроту, %

Марка	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
Св-08	≤ 0,1	0,35...0,6	≤ 0,03	≤ 0,15	≤ 0,30	≤ 0,04	≤ 0,04
Св-08А	≤ 0,1	0,35...0,6	≤ 0,03	≤ 0,15	≤ 0,25	≤ 0,03	≤ 0,03

Таблиця 5. Хімічний склад плавлених флюсів, %, для механізованого автоматичного і електрошлакового зварювання сталей

Марка	SiO ₂	MnO	CaF ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	S	P
ОСЦ-45	38...44	38...47	6,0...9,0	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 5,0		≤ 2,0	≤ 0,15	≤ 0,5
ОСЦ-45М	38...44	38...47	6,0...9,0	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 5,0		≤ 2,0	≤ 0,15	≤ 0,0
АН-348А	41...44	34...38	4,0...5,5	5,5...7,5	≤ 6,5	≤ 4,5	0,1...0,3	≤ 2,0	≤ 0,15	≤ 0,2
АН-348АМ	41...44	34...38	3,5...4,5	5,0...7,5	≤ 6,5	≤ 4,5	0,1...0,3	≤ 2,0	≤ 0,50	≤ 0,2

Таблиця 6. Технологічні характеристики деяких електродів для ручного зварювання мало вуглецевих сталей

Показники	Тип електродів по ГОСТ 9467-75				
	342-Ф		342-Т	346-Т	
	Марка електродів				
	СК-11	УОНИ-13/45	АНО-6	АНО-4	МГ-3
Застосований струм:					
змінний	×	—	×	×	×
зворотньої полярності	—	×	×	×	×
прямой полярності	×	—	×	×	×
Номінальна напруга на дузі, В		22...26	29...30		
Рекомендована величина струму при зварюванні електродами $d_e = 5$ мм у нижньому положенні, А	250	230	180...270	190...270	180...260
Продуктивність наплавки, кг/год		2,06	1,7...3,3	1,7...3,3	
Коефіцієнти:					
розплавлення електроду, кг/(А·год)	9,5	9,0...10,0	8,5...9,0	8,0...8,3	7,8
наплавлення, г/(А·год)		8,5...10,5			
втрат, %	4	10,0...15,0	5,0...5,5		

Продовж. табл. 6

Показники	Тип електродів по ГОСТ 9467-75				
	342-Ф		342-Т	346-Т	
	Марка електродів				
	СК-11	УОНИ-13/45	АНО-6	АНО-4	МГ-3
Витрата електродів на 1 кг наплавленого металу, кг	1,45	1,6	1,7	1,7	1,7

ЗМІСТ

<i>Робота № 1.</i> Дослідження електричної зварювальної дуги ...	3
<i>Робота № 2.</i> Дослідження зварювальної дуги змінного струму	7
<i>Робота № 3.</i> Дослідження особливостей горіння дуги змінного струму неплавким вольфрамовим електро- дом	11
<i>Робота № 4.</i> Визначення технологічних характеристик при ручному електродуговому зварюванні покрити- ми електродами	15
<i>Робота № 5.</i> Визначення ефективного ККД зварювального джерела нагріву	17
<i>Робота № 6.</i> Визначення температурних полів і термічних циклів при зварюванні тонких пластин і масив- них тіл великого протягу	20
<i>Робота № 7.</i> Вплив обмеженості розмірів тіл на процеси по- ширення тепла при зварюванні пластин	27
<i>Робота № 8.</i> Визначення розподілу температур нагрівання електрода	31
Рекомендована література	34
Додаток	35

ЛЕБЕДЄВ Юрій Михайлович
ЛОЙ Сергій Анатолійович
САМОХІН Сергій Михайлович

ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

з курсу "Термодинаміка і теплові процеси зварювання"

Видавництво УДМТУ, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Технічний редактор В.Н. Крохіна
Комп'ютерна правка Т.В. Митрохіна, А.Й. Тріщ
Комп'ютерна верстка А.Й. Тріщ
Коректор Н.О. Шайкіна

Підписано до друку 12.11.02. Формат 60×84/16. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 2,2. Обл.-вид. арк. 2,4. Тираж 225 прим.
Вид. № 51. Зам. № 221. Ціна договірна.



ВИДАВНИЦТВО УКРАЇНСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО МОРСЬКОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ



Шановні панове!

Запрошуємо Вас ознайомитись з можливостями книжкового видавництва, висококваліфіковані спеціалісти якого забезпечать оперативне та якісне виконання замовлення будь-якого рівня складності.

Наш головний принцип – задовольнити потреби замовника в повному комплексі поліграфічних послуг, починаючи з розробки та підготовки оригіналу-макета, що виконується на базі IBM PC, і закінчуючи друком на офсетних машинах.

Крім цього, ми маємо повний комплекс післядрукарського обладнання, що дає можливість виконувати:

- ✓ аркушепідбір;
- ✓ брошурування на скобу, клей;
- ✓ порізку на гільйотинах;
- ✓ ламінування.

Видавництво також оснащено сучасним цифровим дублюкатором фірми "Duplo" формату А3, що дає можливість тиражувати зі швидкістю до 130 копій за хвилину.

Для постійних клієнтів – гнучка система знижок.

Отже, якщо вам потрібно надрукувати ***підручники, книги, брошури, журнали, каталоги, рекламні листівки, прайс-листи, бланки, візитні картки***, – ми до Ваших послуг.

© Український державний морський технічний університет

✉ Україна, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5,

видавництво УДМТУ

☎ 8(0512) 37-33-42; 39-81-46, 39-73-39, fax 8(0512) 39-73-26;

E-mail: publishing@usmtu.edu.ua