

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Чернігівський державний технологічний університет**  
**Кафедра технологій зварювання та будівництва**

# **ЗВАРЮВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

**Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт  
для студентів за напрямом підготовки 6.050504 “Зварювання”**

Затверджено на засіданні  
кафедри технологій зварювання  
та будівництва  
Протокол № 2 від 20.09.2013 року

**Чернігів ЧДТУ 2013**

Зварювання спеціальних матеріалів. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів за напрямом підготовки 6.050504 “Зварювання” / Укл. Олексієнко С.В. – Чернігів: ЧДТУ, 2013. – 36 с.

Укладач: Олексієнко Сергій Владиславович, кандидат технічних наук, доцент

Відповідальний за випуск: Харченко Геннадій Костянтинович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій зварювання та будівництва

Рецензент: Болотов Геннадій Павлович, доктор технічних наук, професор кафедри технологій зварювання та будівництва Чернігівського державного технологічного університету

## ЗМІСТ

1	Лабораторна робота №1. Зварювання високоміцних сталей.....	4
2	Лабораторна робота №2. Структурний стан і механічні властивості зони термічного впливу.....	9
3	Лабораторна робота №3. Визначення механічних властивостей металу зварного з'єднання.....	13
4	Лабораторна робота №4. Зварювання жароміцних аустенітних сталей.....	19
5	Лабораторна робота №5. Дифузійне зварювання в вакуумі металу зі склом.....	21
6	Лабораторна робота №6. Зварювання в твердій фазі монокристалічного кремнію з боросилікатним склом.....	26
	Рекомендована література.....	32
	Додаток А. Хімічний склад аустенітних і жароміцних сталей.....	34
	Додаток Б. Хімічний склад дротів, що використовуються для зварювання високолегованих сталей.....	35

# Лабораторна робота №1

## ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ

**Мета роботи** – визначити структурний стан металу шва розрахунковим методом при зварюванні високоміцних сталей

### 1.1 Інформація для самостійної підготовки

Працездатність зварного з'єднання значною мірою залежить від структурного стану металу шва, який у свою чергу визначається багатьма чинниками, що мають місце в процесі формування металу шва: хімічний склад електродного металу, параметри режиму зварювання; дольова участь основного і електродного металів у формуванні шва, швидкість охолодження зварного з'єднання.

Температурний режим зварного з'єднання робить найбільший вплив на усі ділянки зварного з'єднання. Надмірно висока погонна енергія зварювання призводить до утворення крупнозернистої структури з низькими показниками ударної в'язкості. Нижня межа допустимої величини погонної енергії може значно понизити пластичність зварного з'єднання і опірність утворенню холодних тріщин.

Структурний стан металу шва і навколошовної зони визначається швидкістю охолодження зварного з'єднання в інтервалі температур 600÷5000 °С (температура найменшої стійкості аустеніту).

Дійсну швидкість охолодження наплавленого металу розраховують в залежності від умов проведення наплавлення на плоский шар:

$$W_{ox} = 2\lambda\pi c\rho \frac{(T - T_0)^3}{q(V_n\delta)^2}, \quad (1.1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\lambda=0,38\div0,42$  Вт/см·К;

$c\rho$  – об'ємна теплоємність,  $c\rho=4,9\div5,2$  Дж/см<sup>3</sup>·К;

$T_0$  – початкова температура при плавленні,  $T_0=293$  К;

$T$  – теплове значення при наплавленні,  $T=773$  К;

$q$  – теплова потужність,  $q=UI\eta_n$ , де  $\eta_n=0,65$ ;

$V_n$  – швидкість наплавки, см/с;

$\delta$  – товщина металу,  $\delta=10$  мм.

Отримане значення швидкості охолодження порівнюють зі швидкістю охолодження, що допускається, і, якщо дійсна швидкість охолодження металу наплавлення на прийнятому режимі виявиться вища за верхню межу допустимих швидкостей, то вирішується питання про застосування попереднього підігрівання.

Для визначення структури металу швів низьколегованих сталей може використовуватися діаграма, побудована на основі експериментальних даних (рисунок 1.1).

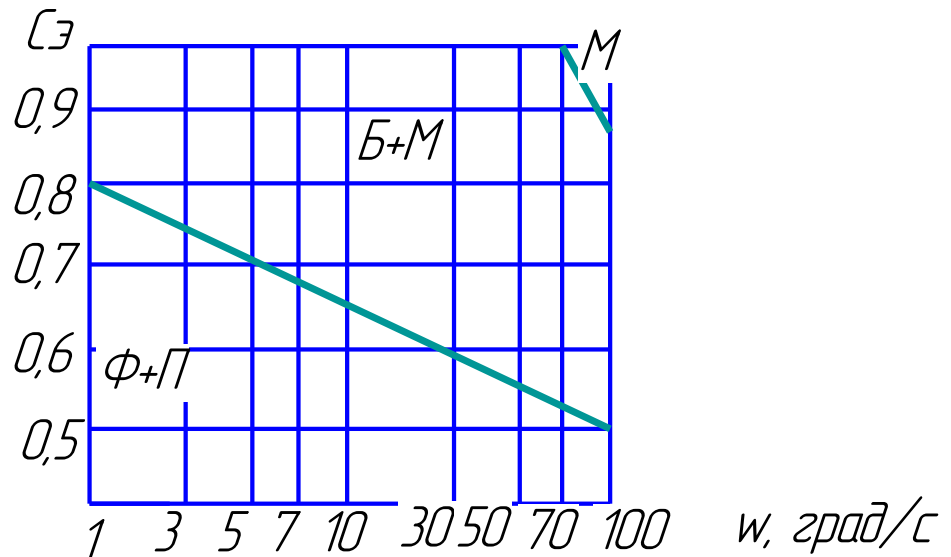


Рисунок 1.1 – Структурна діаграма для металу зварних низьколегованих швів

По осях координат діаграми відкладається швидкість охолодження металу шва  $\omega$  при температурах найменшої стійкості аустеніту (для різних складів швів ця температура знаходиться в межах  $773 \div 873 \text{ K}$ ) і еквівалент вуглецю, визначуваний за виразом

$$C_s = C + \frac{Si}{7} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cr}{9} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{13} + \frac{P}{1,5} [\%], \quad (1.2)$$

де  $C, Si, \dots$  – концентрація легуючого елемента, %;

На діаграмі показані три структурні області: ферито-перлітна, бейніто-мартенситна і мартенситна. Оскільки мартенситна область займає на діаграмі дуже малу площу, то слід вважати, що при зварюванні низьколегованих сталей метал шва, як правило, має ферито-перлітну або бейніто-мартенситну структуру. Пряма, що розділяє на діаграмі Ф+П і Б+М області, описується виразом

$$C_s = 0,8 - 0,15 \lg \omega, \quad (1.3)$$

з якого виходить, що якщо  $C_s < 0,8 - 0,15 \lg \omega$ , структура ферито-перлітна, а якщо  $C_s > 0,8 - 0,15 \lg \omega$ , то бейніто-мартенситна. Для випадку ферито-перлітних структур існує вираз для визначення кількості фериту:

$$\Phi = 65 - 0,23 \omega - 103,6 C_s + 0,35 \omega C_s, \quad (1.4)$$

для якого коефіцієнт множинної кореляції  $R=0,86$  і забезпечується 10%-ний рівень значущості.

Структура металу шва впливає на працездатність зварних конструкцій, зокрема при низьких температурах. Пластичні структури сприяють отриманню волокнистого зламу і підвищують тим самим опірність крихкому руйнуванню. Доля волокнистої складової в зламі металу шва залежить від хімічного складу,

швидкості охолодження і температури випробування. Доцільно, щоб доля волокнистої складової в зламі не була менше 50%.

Касаткін О.Г. запропонував наступну методику визначення долі волокнистої складовою %В при дуговому зварюванні низьколегованих сталей

$$B = 0 \quad \text{при} \quad T_{\text{исп}} < \left( T_x - \frac{50}{K_x} \right);$$

$$B = 50 + K_x (T_{\text{исп}} - T_x) \quad \text{при} \quad \left( T_x - \frac{50}{K_x} \right) \leq T_{\text{исп}} \leq \left( T_x + \frac{50}{K_x} \right);$$

$$B = 100 \quad \text{при} \quad T_{\text{исп}} > \left( T_x + \frac{50}{K_x} \right),$$

де  $T_{\text{исп}}$  – температура випробувань, °С;

$T_x$  – критична температура крихкості, яка складає 50% вмісту волокнистої складової в зламі;

$K_x$  – температурний коефіцієнт крихкості, рівний приросту В при підвищенні  $T_{\text{исп}}$  на 1 °С,

$$\begin{aligned} T_x = & -53,2 + 31,8 \text{ Mn} + 32,1 \text{ Si} + 29,7 \text{ Cr} + 16,7 \text{ Mo} - 8,75 \text{ Ni} + \\ & + 165 \text{ Ti} + 100 \text{ Nb} + 9,56 \text{ W} + 6,66 \text{ Co} + 165 \text{ Zr} + 240 \text{ S} + 967 \text{ P} + \\ & + 1380 \text{ N} - 39,4 \text{ C} \cdot \text{Ni} + 391 \text{ C} \cdot \text{V} + 13,4 \text{ Mn} \cdot \text{Si} - 8,99 \text{ Mn} \cdot \text{Mo} + \\ & + 6,97 \text{ Mn} \cdot \text{Ni} + 12,7 \text{ Si} \cdot \text{Mo} + 31,6 \text{ Si} \cdot \text{V} + 2,22 \text{ Cr} \cdot \text{Ni} - \\ & - 9,48 \text{ Mo} \cdot \text{V} + 147 \text{ C}^2 - 3,25 \text{ Mn}^2 - 1,09 \text{ Cr}^2 + 2,4 \text{ Mo}^2 - 1,59 \text{ Ni}^2 + \\ & + 23,9 \text{ V}^2 - (7,27 \text{ Mn} + 13,2 \text{ Si} + 5,91 \text{ Cr} + 6,46 \text{ V}) \ln t_c, \text{ } ^\circ\text{C}; \end{aligned}$$

$$R = 0,875;$$

$$\begin{aligned} \ln K_x = & 1,08 - 2,07 \text{ C} - 0,250 \text{ Mn} - 0,397 \text{ Si} - 0,395 \text{ Cr} - 0,818 \text{ Mo} - \\ & - 0,426 \text{ Ni} - 2,02 \text{ V} - 0,766 \text{ Ti} - 0,130 \text{ W} - 0,088 \text{ Cu} - 0,108 \text{ Co} - \\ & - 1,20 \text{ Zr} - 11,0 \text{ S} - 8,90 \text{ P} - 11,3 \text{ N} - 0,719 \text{ C} \cdot \text{Cr} + 0,802 \text{ C} \cdot \text{Mo} + \\ & + 0,412 \text{ C} \cdot \text{Ni} - 3,20 \text{ C} \cdot \text{V} + 0,142 \text{ Mn} \cdot \text{Si} + 0,104 \text{ Mn} \cdot \text{Cr} + \\ & + 0,048 \text{ Mn} \cdot \text{Mo} + 0,123 \text{ Si} \cdot \text{Mo} + 0,108 \text{ Si} \cdot \text{Ni} - 0,363 \text{ Si} \cdot \text{V} + \\ & + 2,22 \text{ C}^2 + 0,026 \text{ Mo}^2 + 0,011 \text{ Ni}^2 + (-0,029 - 0,270 \cdot \text{C} + 0,096 \text{ Cr} + \\ & + 0,160 \text{ Mo} + 0,086 \text{ Ni} + 0,694 \text{ V}) \cdot \ln t_c, \% / ^\circ\text{C}; \end{aligned}$$

$$R = 0,954,$$

де  $t_c$  – час охолодження металу шва від 850 °С до 500 °С.

Методика справедлива для наступних меж легування металу шва, %:  
 $\text{C} \leq 0,2$ ;  $\text{Mn} \leq 2,0$ ;  $\text{Si} \leq 0,8$ ;  $\text{Cr} \leq 2,0$ ;  $\text{Mo} \leq 2,0$ ;  $\text{Ni} \leq 2,0$ ;  $\text{V} \leq 0,6$ ;  $\text{Ti} \leq 0,05$ ;  
 $\text{Al} \leq 0,05$ ;  $\text{Nb} \leq 0,3$ ;  $\text{W} \leq 0,6$ ;  $\text{Cu} \leq 0,5$ ;  $\text{Co} \leq 0,5$ ;  $\text{Zr} \leq 0,03$ . Вміст домішок, %:  
 $\text{S} \leq 0,03$ ;  $\text{P} \leq 0,03$ ;  $\text{N} \leq 0,02$ ;  $\text{O} \leq 0,06$ . Час охолодження  $t_c$  10÷40 с.

## 1.2 Порядок виконання роботи

1.2.1 Для заданого хімічного складу металу шва розрахувати  $C_{\text{екв}}$  (таблиця 1.1).

1.2.2 Для заданих параметрів режиму зварювання розрахувати швидкість охолодження  $\omega$  (таблиця 1.2).

1.2.3 Визначити рівняння прямої..

1.2.4 Розрахувати кількість фериту.

1.2.5 Розрахувати кількість волокнистої складової в металі шва.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад металу шва

Варіант	Вміст легуючих елементів, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
1	0,15	0,5	0,6	0,9	0,5	-	0,01	0,01
2	0,1	1,5	0,9	1,0	1,0	0,4	0,02	0,02
3	0,18	0,6	0,3	0,7	0,2	0,2	0,01	0,02
4	0,11	0,8	0,8	0,6	0,9	0,1	0,01	0,01
5	0,12	1,2	1,0	0,3	0,2	0,2	0,03	0,04
6	0,13	1,1	0,9	0,5	0,6	0,4	0,06	0,06
7	0,14	0,3	0,1	0,3	0,5	0,3	0,02	0,02
8	0,18	1,7	1,0	1,0	1,2	0,5	0,06	0,04
9	0,17	1,5	0,4	0,7	1,3	0,3	0,02	0,03
10	0,16	0,4	0,3	0,5	0,6	0,2	0,01	0,02

Таблиця 1.2 – Режими зварювання

Варіант	Ізв, А	Уд, В	Vзв, м/год.	δ металу, мм
1	300	28	16	12
2	320	28	16	20
3	350	29	30	10
4	300	30	15	22
5	380	30	26	16
6	450	32	36	16
7	400	31	26	18
8	420	32	27	16
9	430	30	32	20
10	440	32	34	18
11	500	30	40	18
12	550	28	30	16
13	400	30	30	18
14	500	32	25	18
15	450	30	20	16

### **1.3 Зміст звіту**

- 1.3.1 Назва роботи і її мета.
- 1.3.2 Необхідні теоретичні дані.
- 1.3.3 Порядок виконання роботи.
- 1.3.4 Експериментальні результати.
- 1.3.5 Аналіз отриманих результатів і висновки по роботі.

### **1.4 Питання для самоконтролю**

- 1.4.1 Визначення величини погонної енергії.
- 1.4.2 Вплив величини  $C_{екв}$  на здатність сталей до зварювання .
- 1.4.3 Визначення величини температури попереднього підігріву залежно від  $C_{екв}$ .
- 1.4.4 Залежність механічних характеристик металу зварного з'єднання від виду зламу.



## Лабораторна робота №2

### СТРУКТУРНИЙ СТАН І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ

**Мета роботи** – визначення структурного стану і механічних властивостей металу зони термічного впливу розрахунковими методами

#### 2.1 Інформація для самостійної підготовки

Властивості і працездатність зварного з'єднання залежать значною мірою від розмірів і структурного стану зони термічного впливу (ЗТВ). При цьому найбільшу небезпеку з точки зору експлуатаційної надійності зварного з'єднання являє ділянка ЗТВ, що прилягає безпосередньо до шва – біляшовна ділянка ЗТВ. Стосовно до низьколегованих сталей для визначення структури біляшовної ділянки ЗТВ може бути використана діаграма (рисунок 2.1)

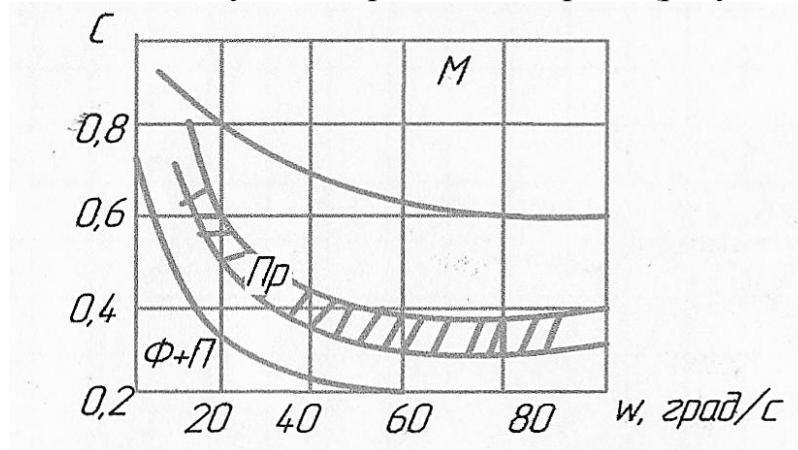


Рисунок 2.1 – Діаграма для визначення структури біляшовної ділянки ЗТВ вуглецевих і низьколегованих сталей

Хімічний склад сталі діаграмою враховується за допомогою еквівалента вуглецю:

$$C_s = C + \frac{Si}{7} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cr}{9} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{13} + \frac{P}{1,5} [\%], \quad (2.1)$$

Діаграма розрахована на наступні концентрації легуючих елементів в сталі, %:  $C < 0,45$ ;  $Mn < 1,80$ ;  $Si < 1,40$ ;  $Ni < 2,0$ ;  $Mo < 0,40$ ;  $V < 0,12$ ;  $Cr < 2,0$ . Швидкість охолодження визначалася при температурах  $873 \div 773$  К. На діаграмі виділені три структурні області: ферито-перлітна Ф+П, область Пр проміжного перетворення (ферит+перліт+бейніт+мартенсит, ферит+бейніт+мартенсит або бейніт+мартенсит) і мартенситна М. Оскільки в області Пр завжди існує мартенсит, то вона розділена на 2 ділянки:  $M < 50\%$  і  $M > 50\%$ . Границя між цими ділянками показана у вигляді вузької зони, для якої можна вважати  $M = 50\%$ . Наведена діаграма дає лише якісне уявлення про структуру біляшовної ділянки, проте нею зручно користуватися при розробці технологічних процесів зварювання.

Експериментальне визначення кількості структурних складових біляшовної ділянки конкретної марки сталі з побудовою діаграм є найбільш точним, але і самим трудомістким способом. Тому, стосовно до низьколегованих сталей розроблені розрахункові методи визначення кількості структурних складових у біляшовній ділянці ЗТВ. Ці методи слід вважати орієнтовними, оскільки вони не в змозі врахувати металургійні особливості виплавки окремих марок сталей і тонкощі високотемпературного перетворення аустеніту при зварювальному нагріванні.

Для визначення кількості мартенситу  $M$  і ферито-перлітної суміші  $\Phi\Pi$  користуються рівняннями:

$$M = 100 \left[ 0,95 - \exp(-K_M \omega^{n_M}) \right] \quad (2.2)$$

$$\Phi\Pi = 100 \exp(-K_{\Phi\Pi} \omega^{n_{\Phi\Pi}}) \quad (2.3)$$

де  $\omega^*$  – швидкість охолодження в інтервалі температур  $873 \div 773$  К, град/с;

$K_M$ ,  $K_{\Phi\Pi}$ ,  $n_M$ ,  $n_{\Phi\Pi}$ , – розрахункові коефіцієнти, що визначаються за виразами:

$$n_M = \frac{3.3475}{\ln\left(\frac{\omega_{M_2}}{\omega_{M_1}}\right)}; \quad (2.4)$$

$$K_M = \frac{0.1054}{(\omega_{M_1})^{n_M}}; \quad (2.5)$$

$$n_{\Phi\Pi} = -\frac{4.067}{\ln\frac{\omega_{\Phi\Pi_2}}{\omega_{\Phi\Pi_1}}}; \quad (2.6)$$

$$K_{\Phi\Pi} = \frac{2.9957}{(\omega_{\Phi\Pi_1})^{n_{\Phi\Pi}}}; \quad (2.7)$$

де  $\omega_{M_1}$ ,  $\omega_{M_2}$  – критичні швидкості охолодження, відповідні утворенню 5 і 90% мартенситу;

$\omega_{\Phi\Pi_1}$ ,  $\omega_{\Phi\Pi_2}$  – критичні швидкості охолодження, відповідні утворенню 5 і 100% ферито-перліту;

$$\omega_{M_1} = 0.343 \cdot C_s^{-4.116} \quad (2.8)$$

$$\omega_{M_2} = 3.217 \cdot C_s^{-3.838} \quad (2.9)$$

$$\omega_{\Phi\Pi_1} \approx \omega_{M_1} \quad (2.10)$$

$$\omega_{\Phi\Pi_2} \approx 0.1 \cdot \omega_{\Phi\Pi_1} \quad (2.11)$$

Для (2.7) і (2.8) еквівалент вуглецю визначається наступним чином:

$$C_s = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{15} + \frac{V}{14} + 5B. \quad (2.12)$$

При утворенні мартенситних структур завжди спостерігається залишковий вміст аустеніту. Він невеликий і може бути прийнятий рівним 5%. Тоді вміст бейніту в біляшовній ділянці, %

$$B = 100 - (M + 5).$$

При феритно-перлітній структурі вміст бейніту визначиться як доповнення до 100%.

Температури початку  $T_{M.H}$  і кінця  $T_{M.K}$  мартенситного перетворення для легованих сталей приблизно можуть бути знайдені за регресійними рівняннями:

$$T_{M.H} = 804.50 - 313.13 \cdot C - 89.71 \cdot Mn - 44.69 \cdot Si \cdot Ni - 680.88 \cdot C \cdot V - 5.37 \cdot Cr^2 + 30.50 \cdot Mn^2 + 15.01 \cdot Cr; \quad (2.13)$$

$$R = 0,859;$$

$$T_{M.H} = 678.18 - 1224.86 \cdot C - 120.28 \cdot Ni - 51.63 \cdot Mn^2 - 17.96 \cdot Mn \cdot Mo - 67.42 \cdot Cr \cdot V - 304.52 \cdot Si \cdot Cr + 590.89 \cdot C \cdot Cr + 65.16 \cdot Mn \cdot Ni + 55.26 \cdot Si + 492.00 \cdot C \cdot Mn + 88.57 \cdot Si \cdot Ni + 6.81 \cdot Ni^2; \quad (2.14)$$

$$R = 0,801.$$

## 2.2 Порядок виконання роботи

2.2.1 Використовуючи діаграму визначити структуру біляшовної ділянки для заданої марки сталі і заданого теплового режиму. Для визначення швидкості охолодження використовувати режими зварювання, задані в роботі 1 (таблиця 1.2).

2.2.2 Розрахувати за наведеними формулами кількість мартенситу і ферито-перлітної суміші для заданої марки сталі і заданого теплового режиму.

2.2.3 Розрахувати температуру початку і кінця мартенситних перетворень для заданої марки сталі.

1.2.4 Для заданого теплового режиму розрахувати необхідну швидкість охолодження в інтервалі температур  $T_{M.H}$   $T_{M.K}$ .

2.2.5 Підібрати швидкість охолодження зварного з'єднання, що виключає вірогідність утворення холодних тріщин. Вміст мартенситу не більше 30%.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталей, %

Варіант	Марка сталі	Вміст легуючих елементів, %						
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu
1	13ХГМРБ	0,1– 0,16	0,9-1,2	0,17- 0,37	0,9-1,3	До 3	0,3-0,4	<0,3
2	14Х2ГМ	0,1- 0,16	0,9-1,2	0,17- 0,37	1,3-1,7	До 3	0,4-0,5	<0,3
3	12Г2СМФАЮ	0,09- 0,15	1,3-1,7	0,4-0,7	-	До 3	0,15- 0,25	<0,3
4	42ХГСНМА	0,41- 0,48	0,75- 1,2	0,9-1,2	1,5-2,0	0,5-0,8	0,4-0,6	
5	12Х2НЧА	0,09- 0,15	0,3-0,6	0,17- 0,37	1,25- 1,65	3,25- 3,65	-	
6	30ХГСНА	0,28- 0,34	1-1,3	0,9-1,2	0,9-1,2	0,8-1,1	-	
7	13ХГНМФ	0,11- 0,16	0,8- 1,15	0,2-0,4	0,7-1,1	0,8- 1,15	0,17- 0,32	
8	14ХГН2МФ	0,12- 0,16	0,8-1,1	0,2-0,4	0,7-1,1	0,33- 0,38	0,33- 0,38	
9	14ХГ2САФД	0,12- 0,18	1,4-1,9	0,4-0,7	0,5-0,8	-	-	0,3-0,6
10	14ХГНМД	0,12- 0,17	1,1-1,4	0,17- 0,37	0,9-1,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,3-0,6

### 2.3 Зміст звіту

2.4.1 Назва роботи і її мета.

2.4.2 Необхідні теоретичні дані.

2.4.3 Обладнання та матеріали.

2.4.4 Порядок виконання роботи.

2.4.5 Експериментальні результати.

2.4.6 Аналіз отриманих результатів і висновки по роботі.

### 2.4 Питання для самоконтролю

2.4.1 Послідовне розташування ділянок в ЗТВ

2.4.2 Основні засоби регулювання швидкості охолодження зварного з'єднання.

2.4.3 Властивості структурних складових .

# Лабораторна робота №3

## ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ

**Мета роботи** – визначення механічних властивостей металу зварного з'єднання розрахунковими методами

### 3.1 Інформація для самостійної підготовки

Експериментальне визначення механічних властивостей металу різних зон зварного з'єднання пов'язано із значними матеріальними та трудовими затратами. Застосування математичних залежностей дозволяє значно прискорити процес прогнозування механічних властивостей зварного з'єднання.

Математичні моделі для розрахунку механічних властивостей металу швів при дуговому зварюванні низьколегованих сталей запропоновані О.Г. Касаткін. Зміст легуючих елементів розглянутих сталей має укладатися в межі, %: C ≤ 0,2; Mn ≤ 2; Si ≤ 0.8; Cr ≤ 2.0; Mo ≤ 2.0; Ni ≤ 2.0; V ≤ 0.6; Ti ≤ 0.05; Al ≤ 0.05; Nb ≤ 0.3, W ≤ 0.6; Cu ≤ 0.5; Co ≤ 0.5; Zr ≤ 0.03. Концентрація домішок обмежена, %: S ≤ 0.03; P ≤ 0.03; [N] ≤ 0.02; [O] ≤ 0.06. Час охолодження металу швів в інтервалі температур 1123 ... 773 К становило 10 ≤ t ≤ 40 с. Міцнісні властивості металу швів визначаються за наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} \sigma_e = & 320 + 14850 + 181 \cdot Mn + 171 \cdot Si + 136 \cdot Cr + 276 \cdot Mo + 113 \cdot Ni + \\ & + 554 \cdot V - 235 \cdot Ti - 96 \cdot Al - 73 \cdot Nb + 48 \cdot W + 45 \cdot Cu - 200 \cdot P - \\ & - 80 \cdot Zr + 1880 \cdot N - 102 \cdot O + 1475 \cdot C \cdot Si + 412 \cdot C \cdot Cr - 260 \cdot C \cdot Mo + \\ & + 309 \cdot C \cdot Ni + 353 \cdot C \cdot V - 16 \cdot Mn \cdot Cr - 9.5 \cdot Mn \cdot Ni + 27 \cdot Si \cdot Cr - 14 \cdot Cr \cdot Mo - \\ & - 65 \cdot Cr \cdot V - 55 \cdot Mo \cdot V - 42 \cdot Ni \cdot V - 10.6 \cdot Mn^2 - 8.1 \cdot Cr^2 - 29 \cdot Mo^2 - 7.1 \cdot Ni^2 - \\ & - 285 \cdot V^2 - (9.4 + 142 \cdot C + 14.6 \cdot Mn + 9.8 \cdot Si + 11.2 \cdot Cr + 28.4 \cdot Mo + 13 \cdot Ni + 29 \cdot V) \times \\ & \times \ln t, МПа \end{aligned}$$

$$R = 0,98; \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{0.2} = & 225 + 1852 \cdot C + 185 \cdot Mn + 42.5 \cdot Si + 109 \cdot Cr + 226 \cdot Mo + 126 \cdot Ni + \\ & + 526 \cdot V - 120 \cdot Ti - 80 \cdot Al - 46 \cdot Nb + 12 \cdot W + 41.5 \cdot Cu - 97 \cdot Zr - \\ & - 1400 \cdot P + 1980 \cdot N - 127 \cdot O - 337 \cdot C \cdot Mn + 310 \cdot C \cdot Si + 234 \cdot C \cdot Ni + \\ & + 518 \cdot C \cdot V - 21.6 \cdot Mn \cdot Ni + 55.3 \cdot Si \cdot Cr - 33.5 \cdot Si \cdot Ni + 89.5 \cdot Si \cdot V - 18 \cdot Mo \cdot Ni - \\ & - 64.3 \cdot Mo \cdot V - 38.3 \cdot Ni \cdot V - 258 \cdot C^2 - 12.6 \cdot Mn^2 - 8.09 \cdot Cr^2 - 18 \cdot Mo^2 - 6.4 \cdot Ni^2 - \\ & - 332 \cdot V^2 - (6.94 + 248 \cdot C + 9.5 \cdot Mn + 8.4 \cdot Cr + 20 \cdot Mo + 6.3 \cdot Ni + 14 \cdot V) \times \\ & \times \ln t, МПа \end{aligned}$$

$$R = 0,98; \quad (3.2)$$

де  $\sigma_{0.2}$  – умовна границя міцності.

Для розрахунку пластичних властивостей застосовують такі залежності:

$$\begin{aligned} \delta_5 = & 38.9 - 63.1 \cdot C - 12.2 \cdot Mn - 7.56 \cdot Si - 12.3 \cdot Cr - 12.6 \cdot Mo - \\ & - 30.4 \cdot V - 9.92 \cdot Ti - 2.41 \cdot Nb - 6.31 \cdot Cu + 1.72 \cdot Co - 5.85 \cdot Zr - 74.2 \cdot S \\ & - 111 \cdot P - 200 \cdot N - 13.2 \cdot O - 9.09 \cdot C \cdot Mn + 7.70 \cdot C \cdot Cr + 15.7 \cdot C \cdot Mo + \\ & + 2.02 \cdot Mn \cdot Si + 1.27 \cdot Mn \cdot Mo + 2.74 \cdot Mn \cdot V + 0.171 \cdot Cr \cdot Ni + 0.392 \cdot Mo \cdot Ni + \\ & + 0.392 \cdot Mo \cdot Ni + 5.70 \cdot Mo \cdot V + 25.4 \cdot C^2 + 0.225 \cdot Cr^2 + 0.531 \cdot Mo^2 + \\ & + 2.94 \cdot V^2 + (2.16 \cdot C + 2.74 \cdot Mn + 1.9 \cdot Si + 2.21 \cdot Cr + 1.51 \cdot Mo - 0.475 \cdot Ni + 5.97 \cdot V) \times \\ & \times \ln t, \% \end{aligned} \quad R = 0,92; \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \psi = & 83.7 - 127 \cdot C - 21.7 \cdot Mn - 15.1 \cdot Si - 29.4 \cdot Cr - 41.9 \cdot Mo - \\ & - 81.2 \cdot V - 18.9 \cdot Ti - 9.02 \cdot Al - 10.5 \cdot Nb - 2.64 \cdot Cu + 3.33 \cdot Co - 30.5 \cdot Zr - 85.0 \cdot S \\ & - 307 \cdot P - 924 \cdot N - 101 \cdot O - 46.8 \cdot C \cdot Mn + 13.3 \cdot C \cdot Cr + 8.73 \cdot Mn \cdot Si + 1.62 \cdot Mn \cdot Mo - \\ & - 1.52 \cdot Mn \cdot Ni + 5.72 \cdot Mn \cdot V - 5.58 \cdot Cr \cdot V + 0.67 \cdot Mo \cdot Ni + \\ & + 2.97 \cdot Ni \cdot V + 53.1 \cdot C^2 + 0.507 \cdot Cr^2 - 18.5 \cdot V^2 + (1.77 + 3.8 \cdot C + 5.48 \cdot Mn + \\ & + 4.01 \cdot Si + 5.64 \cdot Cr + 13.2 \cdot Mo + 0.295 \cdot Ni + 31.1 \cdot V) \cdot \ln t, \% \end{aligned} \quad R = 0,88, \quad (3.4)$$

де  $\delta_5$  – відносне подовження після розриву (на п'ятикратних зразках);

$\psi$  – відносне звуження після розриву;

$t$  – час охолодження металу шва в інтервалі температур 850÷500 °C.

При дуговому зварюванні низьколегованих сталей властивості ЗТВ можуть бути визначені в залежності від хімічного і фазного складу, а також від термічного циклу зварювання:

$$\begin{aligned} \sigma_s = & (798 + 3215C)M + (590 + 960C + 39.7Mn + 200V)B + \\ & + (297 + 1360C + 60Mn + 140V)(\Phi + \Pi), R = 0.91 \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_T = & (662 + 1610C)M + (500 + 460C - 120C^2 + 150V)B + \\ & + (187 + 926C + 47Mn + 90V)(\Phi + \Pi), R = 0.90 \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \delta = & (12.2 - 67C^2 - 1.5Mn + 0.76 \ln t)M + (21.3 - 35.6C - 4.0Mn - 5.0V + 1.84 \ln t)B + \\ & + (36.5 - 127C + 153C^2 - 1.16Mn + 8,0V + 0.66 \ln t)(\Phi + \Pi), \end{aligned} \quad R = 0,91; \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \psi = & (48.5 - 158C - 116C^2 + 0.98 \ln t)M + (53.3 - 35.6C + 103C^2 - 5.1Mn - \\ & - 51V + 3.4 \ln t)B + (64.5 - 88C + 82C^2 - 6.7Mn + 18V + 0.6 \ln t)(\Phi + \Pi), \end{aligned} \quad R = 0,86; \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} a_n = & (1.06 - 2.8C - 1.3C^2 - 0.081Mn + 0.054 \ln t)M + (1.3 - 1.6C + 103C^2 - 0.8Mn)B + \\ & + (1.47 - 1.8C + 0.80C^2 - 0.076Mn - 0.45 \ln t)(\Phi + \Pi), \end{aligned} \quad R = 0,75; \quad (3.9)$$

$$HV = (309 + 494C + 622C^2 + 17.7Mn)M + (234 + 122C)B + (98 + 275C + 15.4Mn)(\Phi + \Pi),$$

$$R = 0,75 \quad (3.10)$$

де  $\sigma_s$  – тимчасовий опір, МПа;

$\sigma_T$  – границя текучості, МПа;

$\delta, \psi$  – відповідно відносне подовження і звуження після розриву, %;

$a_n$  – ударна в'язкість, МДж/м<sup>2</sup>;

$\Phi, \Pi, B, M$  – частка в структурі ЗТВ відповідно фериту, перліту, бейніту і мартенситу ( $\Phi + \Pi + B + M = 1$ );

$t$  – час охолодження в інтервалі 873÷773 К, с.

Час перебування металу в інтервалі заданих температур може бути розрахований через безрозмірні критерії часу  $\tau_2$  і  $\tau_3$ . З теоретичних основ зварювання відомі вирази:

$$\frac{T - T_0}{T_m - T_0} = \frac{r^2}{4at} e^{-\frac{r^2}{4at}} \quad (3.11)$$

$$\frac{T - T_0}{T_m - T_0} = \sqrt{2e} \frac{y^2}{\sqrt{4at}} e^{-\frac{y^2}{4at}} \quad (3.12)$$

Безрозмірні часи  $\tau_3 = \frac{4at}{r^2}$  і  $\tau_2 = \frac{4at}{y^2}$  виражаються в наведених рівняннях

(3.11) і (3.12) через безрозмірні величини  $\frac{T - T_0}{T_m - T_0}$ . На підставі цих залежностей

можна побудувати номограму для визначення  $\frac{\tau_{3H}}{4\pi e}$  і  $\frac{\tau_{2H}}{64\pi e}$ , котрі містяться у виразах (3.13) і (3.14):

$$t_{3H} = \frac{\tau_{3H}}{4\pi e} \cdot \frac{2q}{v\lambda(T_m - T_0)} \quad (3.13)$$

$$t_{2H} = \frac{\tau_{2H}}{64\pi e} \cdot \frac{8}{\lambda c \rho} \left[ \frac{q}{v\delta(T_m - T_0)} \right]^2 \quad (3.14)$$

Номограми наведені на рисунку 3.1.

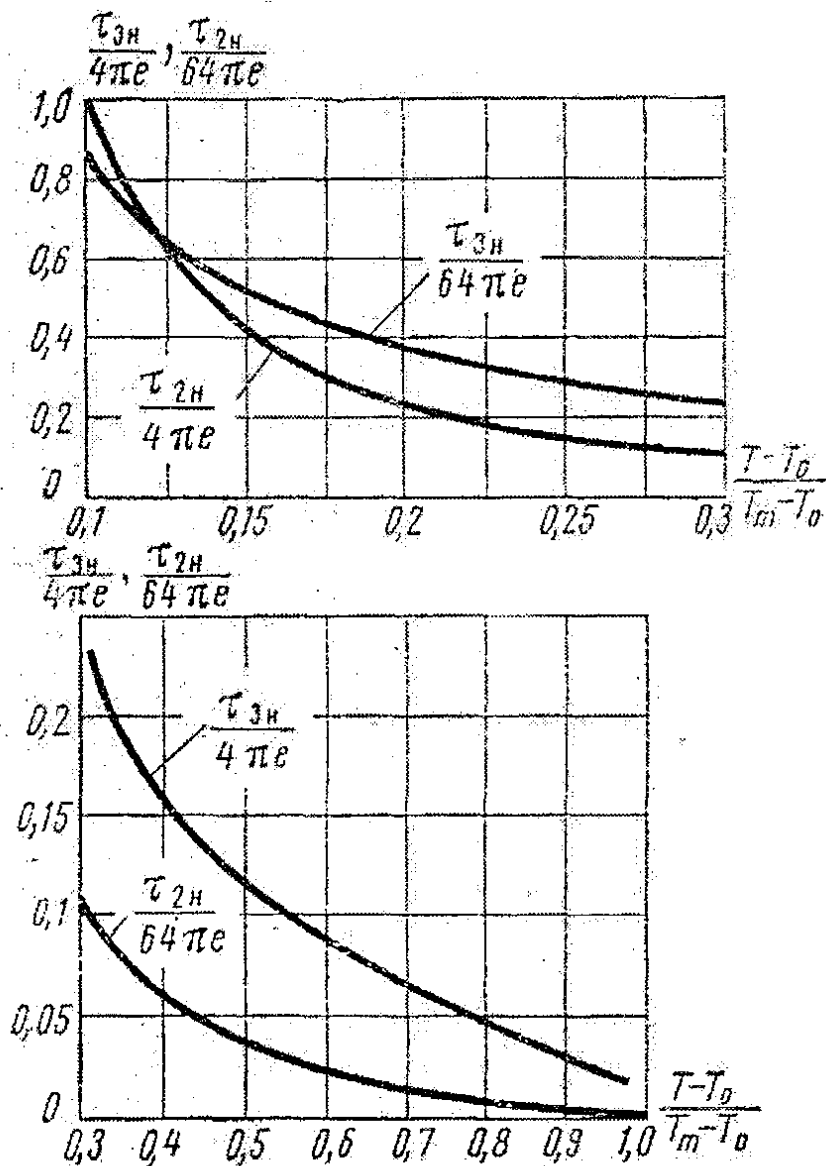


Рисунок 3.1 – Номограми для визначення  $\frac{\tau_{3H}}{4\pi e}$  і  $\frac{\tau_{2H}}{64\pi e}$  при однопрохідному зварюванні

Для визначення тривалості перебування тіла вище даної температури необхідно визначити величину  $\frac{T-T_0}{T_m-T_0}$  для цікавої точки тіла, відкласти її на горизонтальній осі номограми, а потім по відповідній кривій знайти на вертикальній осі  $\frac{\tau_{3H}}{4\pi e}$  або  $\frac{\tau_{2H}}{64\pi e}$ . Підставивши вказані значення у вираз (3.13) або (3.14), знаходимо чисельне значення  $t_{3H}$  або  $t_{2H}$ .

**Приклад.** Визначити тривалість перебування вище 1000 °C точок біля шовної зони ( $T = 1500$  °C) при електрошлаковому зварюванні плит  $\delta = 800$  мм;  $q = 130000$  Дж/с;  $v = 0,3$  м/год. = 0,0083 см/с.

Теплофізичні коефіцієнти:  $\lambda = 0,40$  Дж/(см с °C);  $c_p = 5$  Дж/см<sup>3</sup> °C.



Використовуємо схему лінійного джерела теплоти в пластині. Визначаємо безрозмірний критерій

$$\frac{T - T_0}{T_m - T_0} = \frac{1000 - 20}{1500 - 20} = 0,662 .$$

На рисунку знаходимо

$$\frac{\tau_{2H}}{64\pi e} = 0,018 .$$

Для визначення тривалості перебування металу вище  $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  використовуємо формулу (3.14)

$$t_{2H} = 0,018 \frac{8}{0,4 \cdot 5} \left[ \frac{130000}{0,0083 \cdot 80(1500 - 20)} \right]^2 = 1255c = 21хв.$$

Таблиця 3.1 – Хімічний склад металу шва

Варіант	Хімічний склад металу шва, %													
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	Nb	Co	W	Cu	Zr
1	0,10	1,0	0,3	1,0	1,0	1,0	0,02	-	-	-	0,4	-	-	-
2	0,12	0,9	0,4	0,8	1,5	0,7	-	0,05	0,04	0,3	0,3	-	-	-
3	0,14	0,5	0,2	1,5	0,5	0,8	-	-	-	-	0,5	0,5	0,4	0,02
4	0,16	0,3	0,2	0,3	0,2	0,5	0,1	0,04	-	-	0,4	-	0,4	0,02
5	0,17	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,5 0	0,03	0,03	0,2	-	-	-	-
6	0,2	0,4	0,2	0,1	0,3	1,2	0,5	0,02	0,02	0,1	-	-	-	-
7	0,19	0,8	0,6	0,9	0,2	0,3	0,3	0,01	0,01	0,1	0,5	-	0,1	-
8	0,18	0,6	0,5	1,0	0,5	0,7	0,15	0,05	-	-	0,3	0,4	0,3	0,01
9	0,16	0,5	0,6	1,2	1,1	0,5	0,4	0,02	0,02	0,3	0,1	0,6	0,2	-
10	0,15	0,6	0,4	1,5	1,5	-	-	-	0,0 5	0,3	0,4	0,4	0,3	0,03
11	0,12	0,8	0,5	0,3	0,3	-	-	-	-	0,3	0,1	0,3	0,4	0,02
12	0,1	0,4	0,3	2,0	2,0	2,0	0,01	-	-	-	0,2	0,3	-	0,01
13	0,15	0,5	0,2	1,3	0,9	0,7	0,3	-	-	-	-	-	0,2	-
14	0,2	0,7	0,4	1,7	0,6	-	0,4	0,03	-	0,1	-	-	-	-
15	0,18	1,1	0,7	0,6	1,2	0,6	-	0,01	-	-	-	-	0,3	-

### Продовження таблиці 3.1

Варіант	S	P	[N]	[O]	Час охолодження, с
1	0,02	0,02	0,007	0,005	20
2	0,01	0,03	0,01	0,06	10
3	0,01	0,02	0,015	0,050	15
4	0,02	0,01	0,012	0,030	18
5	0,03	0,01	0,018	0,022	19
6	0,02	0,01	0,035	0,040	21
7	0,03	0,02	0,02	0,010	23
8	0,03	0,03	0,03	0,027	25
9	0,01	0,01	0,01	0,010	27
10	0,02	0,02	0,021	0,015	29
11	0,01	0,01	0,025	0,055	32
12	0,01	0,01	0,010	0,012	35
13	0,015	0,02	0,019	0,035	23
14	0,031	0,018	0,028	0,018	28
15	0,021	0,03	0,035	0,02	30

### 3.3 Порядок виконання роботи

3.3.1 Розрахувати механічні властивості металу шва заданого хімічного складу при зварюванні низьколегованої сталі і для заданого часу охолодження.

3.3.2 Розрахувати механічні властивості металу ЗТВ за формулами (3.5–3.10), використовуючи вихідні дані роботи №1 (таблиця 1.2) і роботи №2 (таблиця 2.1).

### 3.4 Зміст звіту

3.4.1 Назва роботи і її мета.

3.4.2 Необхідні теоретичні дані.

3.4.3 Обладнання та матеріали.

3.4.4 Порядок виконання роботи.

3.4.5 Експериментальні результати.

3.4.6 Аналіз отриманих результатів і висновки по роботі.

### 3.5 Питання для самоконтролю

3.5.1 Залежність механічних властивостей металу зварного шва залежно від хімічного складу.

3.5.2 Вибір зварювальних матеріалів залежно від марки сталі.

3.5.3 Експериментальне визначення міцнісних властивостей зварних з'єднань.

## Лабораторна робота №4

### ЗВАРЮВАННЯ ЖАРОМІЦНИХ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ

**Мета роботи** – визначення хімічного складу і структурного стану металу шва при зварюванні жароміцних аустенітних сталей розрахунково-графічним методом

#### 4.1 Інформація для самостійної підготовки

Аустенітні жароміцні сталі характеризуються високим коефіцієнтом теплового розширення і малою теплопровідністю. Це призводить до високого рівня напружень та деформацій при зварюванні.

Кристалізація однофазних зварних швів аустенітних сталей призводить до формування крупнокристалічної стовбчастої структури з сильно вираженою ліквіаційною неоднорідністю по Cr, Ni, Nb, V, C і т.д. Ці обставини сприяють зародженню і розвитку гарячих тріщин. В металі зони термічного впливу (ЗТВ) аустенітних сталей має місце схильність до крихких локальних руйнувань при високотемпературному експлуатуванні. Вони аналогічні тріщинам при зварюванні. Щоб зменшити негативний вплив вказаних факторів на працездатність зварних з'єднань жароміцні сталі потрібно зварювати матеріалами, які забезпечують в шві обов'язкову присутність феритної фази (2÷5%).

Структура металу шва хромонікелевих сталей визначається за діаграмою Шеффлера, яка побудована для зварювальних швидкостей охолодження (рисунок 4.1).

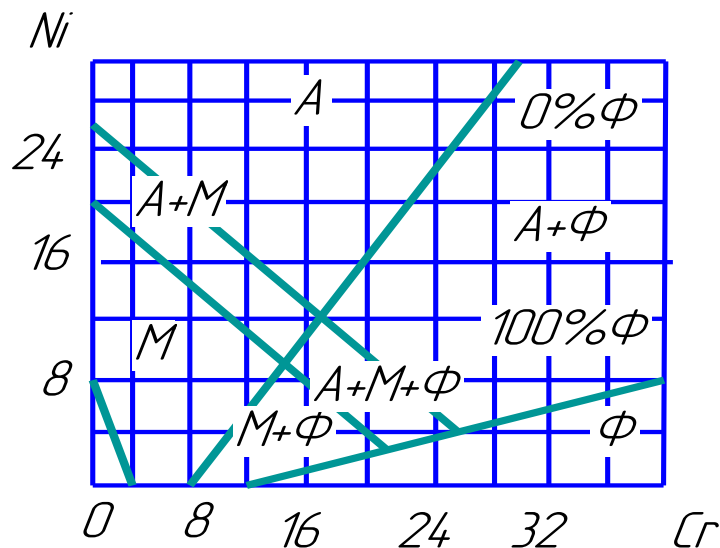


Рисунок 4.1 – Структурна діаграма Шеффлера для хромонікелевих швів

При створенні діаграми всі легуючі елементи розділені на аустенітно- та феритноутворюючі. По осі абсцис відкладається еквівалент хрому  $Cr_{\text{екв}}$ , який враховує дію всіх феритоутворюючих елементів, по осі ординат – еквівалент

нікелю  $Ni_{\text{ЭКВ}}$ , який враховує вплив аустенітноутворюючих елементів. Еквіваленти нікелю та хрому розраховуються так:

$$Ni_{\text{ЭКВ}} = Ni + 30 \cdot C + 0.5 \cdot Mn + 30 \cdot N + 10 \cdot B \quad (4.1)$$

$$Cr_{\text{ЭКВ}} = Cr + 1.25 \cdot Mo + 1.5 \cdot Si + 0.5 \cdot Nb + 3.5 \cdot Ti + 2 \cdot Al + W + V \quad (4.2)$$

Тут індекси елементів вказують на їх вміст у відсотках.

Для визначення структури металу шва необхідно за відомим хімічним складом розрахувати еквіваленти хрому та нікелю та з відповідних точок на координатних осях провести прямі. Точка перетину прямих вказує на структуру металу шва.

При зварюванні хромонікелевих аустенітних сталей для запобігання утворення гарячих тріщин рекомендується мати 2÷5, а іноді до 10% фериту, тобто структура повинна бути А+Ф. За діаграмою Шеффлера можна знайти значення  $Cr_{\text{ЭКВ}}$  та  $Ni_{\text{ЭКВ}}$ , які забезпечують таку структуру.

На основі діаграми Шеффлера запропонований розрахунковий метод визначення кількості фериту виходячи із значень  $Ni_{\text{ЭКВ}}$  та  $Cr_{\text{ЭКВ}}$ .

$$\Phi = 1,05Cr_{\text{Э}} + 53,1 - \sqrt{1,1Cr_{\text{Э}}^2 - 35,4Cr_{\text{Э}} + 45,7Ni_{\text{Э}} + 28,4}, \% \quad (4.3)$$

## 4.2 Порядок виконання роботи

4.2.1 Побудувати діаграму Шеффлера.

4.2.2 Для заданої марки сталі розрахувати  $Ni_{\text{ЭКВ}}$  та  $Cr_{\text{ЭКВ}}$  та нанести отримані значення на діаграму Шеффлера.

4.2.3 Вибрати зварювальний дріт, який забезпечує отримання феритної фази у необхідній кількості в металі шва при заданому коефіцієнті масової участі основного металу в формуванні шва.

4.2.4 Розрахувати фактичну кількість фериту в металі шва за формулою (4.3).

## 4.4 Зміст звіту

4.4.1 Назва роботи і її мета.

4.4.2 Необхідні теоретичні дані.

4.4.3 Обладнання та матеріали.

4.4.4 Порядок виконання роботи.

4.4.5 Експериментальні результати.

4.4.6 Аналіз отриманих результатів і висновки по роботі.

## 4.5 Питання для самоконтролю

4.5.1 Розрахунок площі перерізу проплавлення основного металу.

4.5.2 Розрахунок площі поперечного перерізу наплавленого металу.

4.5.3 Залежність експлуатаційної міцності зварних конструкцій від зварювальних матеріалів.

4.5.4 Вплив хімічного складу металу шва на технологічну міцність.

## Лабораторна робота №5

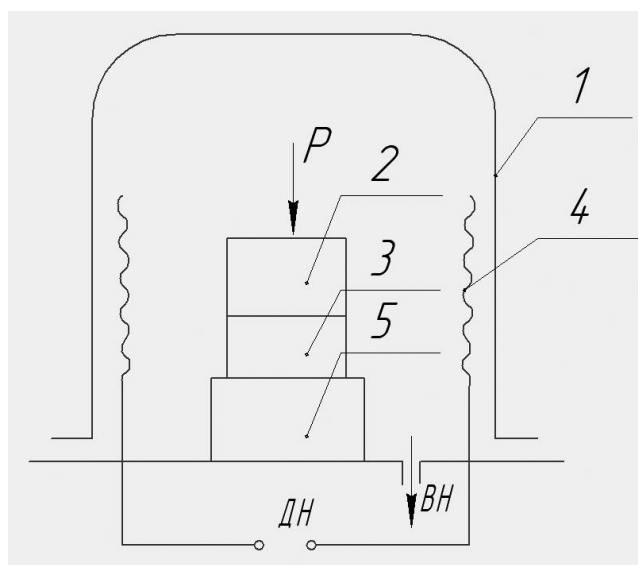
### ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ В ВАКУУМІ МЕТАЛУ ЗІ СКЛОМ

**Мета роботи** – визначити оптимальні параметри режиму дифузійного зварювання у вакуумі скла з металом дослідним шляхом

#### 5.1 Інформація для самостійної підготовки

Дифузійне зварювання являє собою різновидність зварювання тиском. При даному способі утворення з'єднання відбувається за рахунок взаємної дифузії атомів контактуючих поверхонь і обумовлено дією трьох основних параметрів, за якими необхідний ретельний контроль. Це температура зварювання  $T_{зв}$ , тиск зварювання  $P_{зв}$ , та час витримки  $\tau_{зв}$  при заданих температурі та тиску.

Схема процесу дифузійного зварювання в вакуумі показана на рисунку 5.1.



*ДН – джерело нагріву; ВН – вакуумний насос;  
1 – вакуумна камера; 2, 3 – матеріали, що зварюються; 4 – нагрівач;  
5 – зварювальний стіл*

Рисунок 5.1 – Схема дифузійного зварювання в вакуумі

Визначальною властивістю скла є його здатність поступово й безупинно змінювати в'язкість у певному інтервалі температур. Динамічна в'язкість (внутрішнє тертя) – властивість рідин чинити опір переміщенню однієї частини рідини щодо іншої. В'язкість скла в точці трансформації дорівнює  $10^{12,3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . До температури трансформації скло знаходиться в крихкому стані, а вище цієї точки переходить у в'язкий стан і не руйнується ні при механічних ударах, ні при раптовому різкому збільшенні температури. Стан скла при температурі розм'якшення характеризує тугоплавкість даного скла, його в'язкість рівна  $10^{6,6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Зміна температури скла в області точки розм'якшення на  $100 \text{ K}$  приводить до зміни в'язкості приблизно на два порядки. Знання кривої в'язкості скла певної марки має велике значення для правильного ведення не тільки процесу

виробництва скла, але й для розробки технологічних режимів з'єднання стекол один з одним і з металами. Для призначення правильного режиму зварювання особливо важливо знати температуру нижньої зони відпалу, точку трансформації скла  $T_g$ , температуру 15-хвилинного відпалу й температуру розм'якшення  $T_f$  (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Значення  $T_g$  та  $T_f$  для деяких промислових стекол

Скло	$T_g, K$	$T_f, K$	$(T_f - T_g), K$
Листове	823	973	150
Оптичне Ф-2	703	843	140
Пірекс	873	973	100
Кварцове	1523	1773	250

Температуру зварювання вибирають вище температури трансформації, але незначно, щоб не викликати більшу пластичну деформацію скляної деталі, і в той же час стискаюче навантаження варто передавати в той момент, коли скло переходить з крихкої області в пластичну. Після ізотермічної витримки доцільно повністю зняти стискаюче навантаження і провести додаткове нагрівання до температури 15-хвилинного відпалу, коли в'язкість скла ще достатньо низька, з метою зняття залишкових напружень. Теоретично ця температура відповідає температурі склування  $T_g$ . Для більшості стекол вища температура відпалу складає 770–870 K. Нижня температура відпалу відповідає в'язкості скла  $10^{12,3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Так, при в'язкості  $10^{12,3} \text{ Па}\cdot\text{с}$  залишкові напруження знімаються протягом 15 хвилин, а при в'язкості  $10^{13,5} \text{ Па}\cdot\text{с}$  – протягом 4 годин.

Теплопровідність стекол і практично всіх керамічних матеріалів низька, тому нерівномірний нагрів (або охолодження) зварного з'єднання, металевої і скляної деталі приводить до виникнення значних механічних напружень, які знижують міцність, а, в ряді випадків, руйнують зварне з'єднання. Крім того, при нагріві або охолодженні масивних скляних деталей внаслідок низької теплопровідності зовнішні шари охолоджуються значно швидше внутрішніх, особливо тих, які знаходяться в контакті з металевими деталями. Найбільш небезпечними для скла є напруження розтягу. Якщо вони перевищують границю міцності скла, відбувається його руйнування.

У зв'язку з тим, що відпал зварного вузла суміщають з циклом зварювання, операції зварювання та відпалу взаємопов'язані. При нагріванні деталей під зварювання необхідно вибирати таку швидкість нагріву, яка не викликати розтріскування скляних заготовок. В посібниках по відпалу для розрахунку швидкості нагрівання звичайно приводять формулу:

$$v_n = \frac{30}{a^2}, \quad (5.1)$$

де  $a$  – половина товщини скляної деталі.

Невеликі деталі нагрівають зі швидкістю до 120 K/год.

Прискорити процес зняття напружень може навіть незначне підвищення температури відпалу (на 20–30 K) порівняно з температурою зварювання. Особливо це важливо для так названих довгих стекол, у яких великий інтервал між температурою відпалу і температурою початку деформації. Час витримки виробів при вищій температурі відпалу, необхідний для зменшення напружень в будівельних та побутових стеклах, розраховують по емпіричній залежності  $\tau_g = 120a^2$ , а для технічних стекол –  $\tau_g = 150a^2$ .

Знання температури розм'якшення попереджає про небезпеку перегріву скла й деформацію його під власною вагою, а знання температури нижньої зони відпалу дозволяє вибрати такий режим охолодження деталей, що зварюються, при якому в з'єднанні ще вдається за рахунок релаксації понизити залишкові напруження. Цей інтервал охолодження, у якому відбувається зняття залишкових напружень у склі, носить назву *відповідального охолодження*. Нижче цієї температури залишкові напруження в склі практично не релаксують, оскільки в'язкість скла істотно зростає.

Час повільного охолодження залежить від теплофізичних властивостей скла і розмірів скляної деталі. Його визначають із критерію Фур'є:

$$Fo = \frac{c\tau_{ox}}{\delta_{cm}^2}, \quad (5.2)$$

де  $c$  – температуропровідність скла;

$\tau_{ox}$  – час охолодження;

$\delta_{cm}$  – товщина скла.

При регулярному режимі для пластини  $Fo \geq 1$ ;  $\tau_{ox} = a^2/c$ , а для кулі  $Fo \geq 0,34$ ;  $\tau_{ox} = R^2/c$ .

Температура відпалу, підвищена на 20–30 K відносно температури зварювання, дозволяє прискорити зняття напружень в склі, що дає можливість здійснювати відповідальне охолодження зі швидкістю в 5–8 разів більше звичайної. Однак для так названих коротких стекол не можна набагато підвищувати температуру витримки, так як це може привести до деформації скляної деталі.

При охолодженні в певному інтервалі температур відпалу швидкість охолодження можна обирати в залежності від величини допустимих в готових виробах залишкових напружень. Для технічного скла, коли залишкові напруження не повинні перевищувати 5 % від руйнівних,  $v_{ox} = 0,33/a^2$ , а для тарного та інших видів невідповідального скла допустимі напруження, рівні 5–20 % від руйнівного навантаження, тому  $v_{ox} = 1,3/a^2$ .

Швидке охолодження розпочинається після охолодження деталі до нижньої температури відпалу. На цьому етапі напруження пов'язані з градієнтом температур зовнішньої та внутрішньої зон скла, вони зникнуть при вирівнюванні температури. Однак в зварних з'єднаннях цього, як правило, не відбувається, оскільки *КТР* металу і скла ніколи ідеально не співпадають.

При розробці технології дифузійного зварювання конкретних матеріалів оптимальні параметри режиму зварювання встановлюються експериментально.

Встановлена залежність початку деформування скляних зразків від температури зварювання та тиску дозволяє варіювати параметри режиму зварювання у певній області не переходячи границю початку пластичного деформування скла і тим самим забезпечує незмінність геометричних розмірів скляних деталей (таблиця 5.2).

Для отримання надійних зварних з'єднань скла зі склом чи з металом дуже часто використовують проміжні прокладки із металів, які є: 1) активаторами поверхонь, що зварюються, внаслідок більш високих в порівнянні з основним матеріалом пластичних характеристик; 2) компенсаторами напружень, що виникають при створенні з'єднань із матеріалів з різними *KTP*; 3) прискорювачами процесу масообміну чи хімічними активаторами; 4) буферними шарами, що запобігають утворенню небажаних фаз. Найбільш розповсюдженими проміжними матеріалами, що служать для з'єднання стекол, є алюміній та його сплави, мідь, ковар, нікель, ніобій, титан.

Таблиця 5.2 – Рекомендовані режими дифузійного зварювання стекол

Пара, що з'єднується	Матеріал прокладки	Режим зварювання		
		$T_{зв}, K$	$P_{зв}, MPa$	$\tau_{зв}, хв.$
C49-2-29НК	–	863	5	20
ЛК-4-Мо	Al-Ni	803	10	40
ЛК-4-ЛК-4	Al	773	12	40
К-8-К-8	Al	853	5	30
К-8-К-8	Ti	953	4	20

Примітка: Розрідження 0,0133 Па

Проміжні прокладки, не погоджені з основним матеріалом по *KTP*, повинні бути товщиною 0,01–0,3 мм. При збільшенні товщини прокладки метал виступає в ролі самостійного конструкційного матеріалу.

Глибина вакууму залежить від матеріалу металевої деталі чи проміжних прошарків, що використовуються при створенні з'єднання. Слід пам'ятати, що механізм взаємодії металів при дифузійному зварюванні відрізняється від механізму взаємодії стекол, коли з'єднання здійснюється через перехідні оксидні шари. Глибокий вакуум може змінити стехіометрію першопочаткових оксидів, вирощених на металі. Так, при зварюванні кварцу через оксид міді (1) при глибині вакууму більше 0,0133 Па спостерігається дисоціація проміжного шару, що послаблює з'єднання. З'єднання цих матеріалів на повітрі недостатньо міцне в результаті окислення оксиду (1) до оксиду (2). Оптимальний вакуум для даного випадку 1,33–0,133 Па.

Змінюючи глибину вакууму та температуру зварювання можна контролювати процеси окислення металевих поверхонь, що використовуються в якості проміжних прокладок, та відновлення (дисоціації) окислів на цих поверхнях.



## **5.2 Обладнання та матеріали**

5.2.1 Установка вакуумного наплення УВН-2М-2, модернізована для проведення дифузійного зварювання в вакуумі.

5.2.2 Установка для механічних випробувань зварних з'єднань.

5.2.3 Зразки зі скла С48-1 та ковару, підготовлені при виконанні лабораторних робіт № 2 та № 3.

5.2.4 Ацетон.

5.2.5 Інструменти: пінцет, серветки, штангенциркуль.

## **5.3 Порядок виконання роботи**

5.3.1 Ознайомитись з інструкцією з техніки безпеки.

5.3.2 Ознайомитись з будовою та роботою установки.

5.3.3 Вивчити методику роботи, отримати конкретне завдання, розробити план досліджень відповідно до методик, описаних в п. 5.1.

5.3.4 Підготувати зразки до зварювання: протерти (3-4 рази) серветкою, змоченою ацетоном; просушити на повітрі при кімнатній температурі.

5.3.5 Встановити зразки зі скла та ковару у вакуумній камері та провести зварювання на режимах відповідно до розробленого плану досліджень.

5.3.6 Провести механічні випробування зварних з'єднань на статичний згин.

5.3.7 Провести аналіз отриманих результатів та зробити висновки.

## **5.4 Зміст звіту**

5.4.1 Назва роботи і її мета.

5.4.2 Необхідні теоретичні дані.

5.4.3 Обладнання та матеріали.

5.4.4 Порядок виконання роботи.

5.4.5 Експериментальні результати.

5.4.6 Аналіз отриманих результатів і висновки по роботі.

## **5.5 Питання для самоконтролю**

5.5.1 Стадії утворення зварного з'єднання при зварюванні металу зі склом.

5.5.2 Вплив властивостей скла на вибір параметрів режиму зварювання.

5.5.3 Вплив режимів нагрівання та охолодження на якість зварних з'єднань.

5.5.4 Роль проміжних прокладок при дифузійному зварюванні металів зі стеклами та особливості їх вибору.

5.5.5 Вплив величини розрідження в вакуумній камері на якість з'єднань.

## **5.6 Інструкція з техніки безпеки**

5.6.1 Всі роботи проводити з дозволу викладача.

5.6.2 Працювати на установці для дифузійного зварювання в вакуумі тільки під керівництвом викладача.

5.6.3 Забороняється працювати на установці при відкритих щитках.

5.6.4 Не доторкатись до різного роду струмопровідних дротів.

5.6.5 Знімати зразки пінцетом.

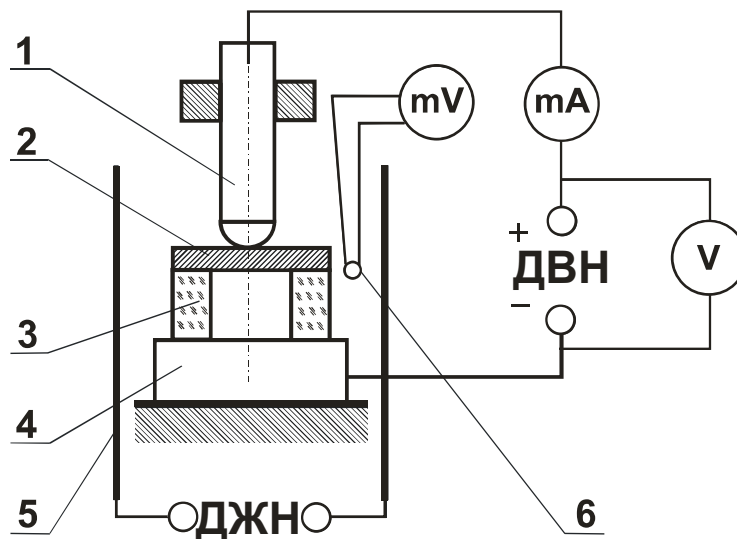
## Лабораторна робота №6

# ЗВАРЮВАННЯ В ТВЕРДІЙ ФАЗІ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ З БОРОСИЛІКАТНИМ СКЛОМ

**Мета роботи** – вивчити вплив параметрів режиму зварювання на кінетику формування зварних скло-кремнієвих з'єднань

### 6.1 Інформація для самостійної підготовки

Зварювання в твердій фазі в електростатичному полі здійснюють за схемою, представленою на рисунку 6.1. Для цього необхідні фіксація, підігрів деталей та прикладення електричного потенціалу [18].



*ДЖН – джерело живлення нагрівача; ДВН – джерело високої напруги;  
1 – електрод; 2 – кремнієва деталь; 3 – скляна деталь; 4 – столик;  
5 – нагрівач; 6 – термопара*

Рисунок 6.1 – Схема зварювання в твердій фазі в електростатичному полі [18]

Відмінною особливістю зварювання в твердій фазі в електростатичному полі є його можливість застосування для зварювання матеріалів, один із яких повинен бути діелектриком, що включає оксиди лужних матеріалів (боросилікатне скло).

Основними параметрами процесу є температура, величина зварювальної напруги та час зварювання. Зварюванню повинно передувати отримання плоскопаралельних поверхонь деталей високого класу шорсткості ( $R_z = 0,025 \dots 0,1 \text{ мкм}$ ).

В основу процесу покладені нагрів матеріалів із відполірованими та приведеними в контакт поверхнями та подача високої напруги, причому повинна дотримуватись певна електрична полярність: на провідник подається позитивний потенціал, а на діелектрик – від'ємний. Виключення зовнішнього стискаючого зусилля як одного із параметрів зварювання в твердій фазі стало можливим в силу того, що при цьому способі зварювання виникають

електростатичні сили стиснення між контактуючими поверхнями. Під дією електростатичних сил стиснення поверхні притягуються одна до одної, в результаті чого утворюється фізичний контакт. Витримка під напругою на протязі певного часу сприяє збільшенню міцності зварного з'єднання завдяки проходженню через скло струму і розвитку міграційної поляризації та електрохімічних процесів в зоні зварювання [12, 16, 17].

Основою процесу з'єднання металів (напівпровідників) з оксидовмісними матеріалами (склом) є топохімічна взаємодія за участю іонів кисню, що протікає по реакціям заміщення та приєднання. При цьому формування з'єднання прийнято розглядати по тристадійній схемі, що припускає послідовне протікання стадій утворення фізичного контакту, активації поверхонь, що зварюються, хімічної взаємодії.

Як вказується в [21], всі явища, що відбуваються при зварюванні кремнію зі склом, пов'язані з рухомістю іонів натрію. Пов'язаний з іонним струмом "натрієвий ефект" призводить до протікання гетерогенних електрохімічних процесів. В результаті цих процесів в прианодній області скла, що безпосередньо прилягає до аноду, залишаються некомпенсовані заряди аніонів кисню, які беруть участь в утворенні з'єднання скла з кремнієм на основі окислювальних процесів. За допомогою пошарової Оже-спектроскопії вдалося встановити, що перехідна зона з'єднання складається в основному із діоксиду кремнію.

В цілому відмічається, що чим більша величина зварювальної напруги, тим вища якість з'єднання та менший час зварювання. Однак збільшення напруги зварювання можливе до деякої межі, вище якої розпочинається пробій, здатний призвести як до локального чи повного руйнування матеріалів, що з'єднуються, так і до загального порушення процесу зварювання.

Більш детально, стосовно зварювання в твердій фазі в електростатичному полі боросилікатного скла "Пірекс" з монокристалічним кремнієм, це питання досліджувалось в роботі [20], де відмічається, що величина напруги перекриття (напруги, що викликає поверхневі розряди на склі) залежить від відстані між електродами на поверхні скла, температури зварювання та конструкції вузла, що зварюється (рисунок 6.2).

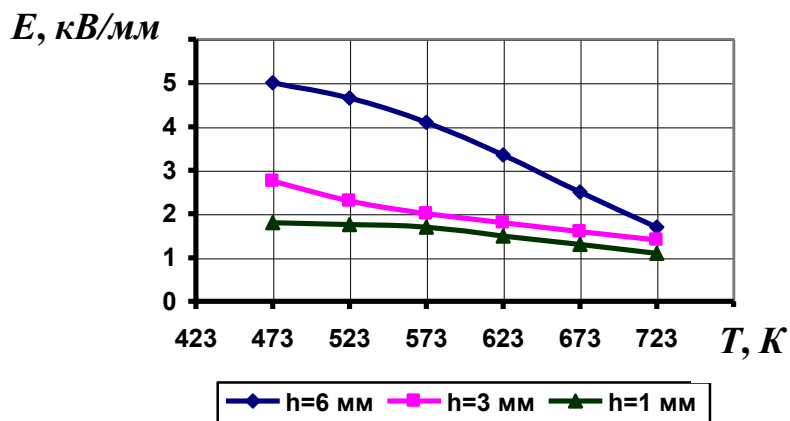


Рисунок 6.2 – Залежність напруги перекриття для скла "Пірекс" різної товщини від температури зварювання [15, 20]

В роботі [21] показана можливість візуального контролю за процесом зварювання: по різкому спаданню струму зварювання та по сірому кольору, що з'являється в зоні з'єднання (рисунок 6.3).

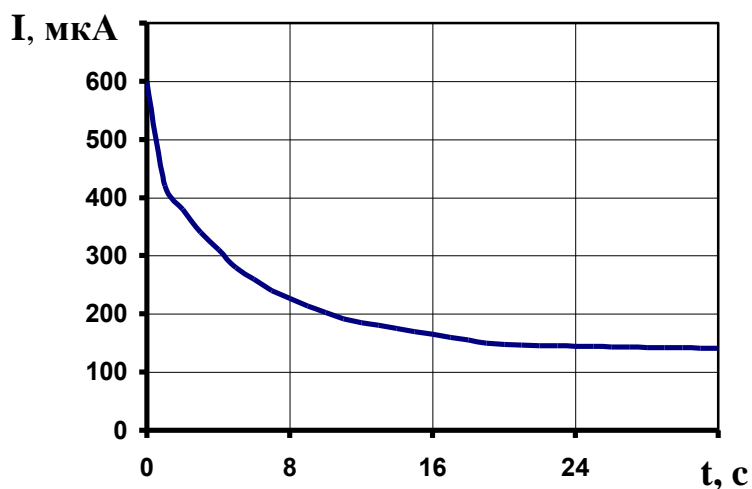


Рисунок 6.3 – Характер зміни зварювального струму в процесі зварювання [21]

Експеримент, що відображає формування з'єднання у часі і заповнення повітряного зазору продуктом реакції, був проведений автором [19]. Доказом наявності повітряного зазору перед зварюванням є інтерференційні смуги рівної товщини, виявлені при спостереженні збірки скла з кремнієм перед зварюванням зі сторони скла в білому світлі (рисунок 6.4, а). При зварюванні від'ємний потенціал подавали на скло за допомогою тонкого дротяного електроду.

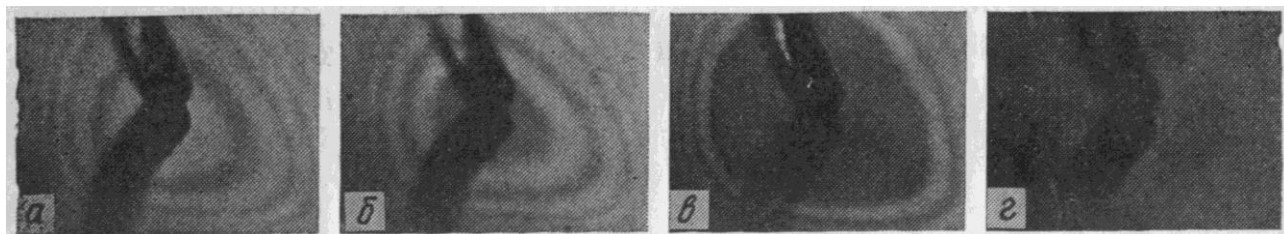


Рисунок 6.4 – Зміна інтерференційної картини в контактній зоні скла з кремнієм у часі ( $U_{зв} = 400 \text{ В}$ ,  $T_{зв} = 673 \text{ К}$ ) [19]

Під дією прикладеної електричної напруги інтерференційні смуги поступово зміщувались до периферії пластинки, а потім повністю зникали. Після цього утворювалось однотонне сіре забарвлення в зоні з'єднання кремнію зі склом.

По отриманій кривій спадання струму зварювання у часі можна здійснювати контроль над завершеністю процесу зварювання шляхом визначення повного заряду (кількості електрики), що пройшов через з'єднання:

$$Q = \int_0^t I dt, \quad (6.1)$$

де  $Q$  – кількість заряду, *мкКл*;

$I$  – зварювальний струм, *мкА*;

$t$  – час зварювання, *с*.

“Універсальність” цієї кривої автори обумовлюють тим, що вона не залежить від того, при яких температурі та електричній напрузі отримано з’єднання, важливо, щоб через з’єднання в усіх випадках пройшла певна кількість електрики. Також слід відмітити, що розроблена методика є способом неруйнівного контролю міцності.

Кількісну характеристику процесу зварювання в електростатичному полі кремнію марки КЕФ-4,5/0,1 зі склом “Пірекс” дав автор роботи [18]. Для вказаної пари матеріалів питома кількість електрики складає 411 *мкКл/мм<sup>2</sup>* номінальної площі контакту.

Графічним інтегруванням залежності зміни зварювального струму в процесі зварювання можна вчислити кількість електрики яка пройшла через з’єднання.

Вказані матеріали в процесі виготовлення із них деталей, піддають різній механічній, хімічній та термічній дії (шліфування, полірування, дифузійне насичення домішками, розділення на заготовки, напилення тензорезистивних схем та захисних покриттів). При цьому в них виникають дефекти, що знижують їх механічну міцність (наявність на поверхнях і в об’ємі елементів тріщин, подряпин, включень та неоднорідностей).

Міцність кремнієвих елементів у з’єднаннях також може різко змінитись при використанні завищених зварювальних режимів (температури зварювання та питомого тиску). Зокрема, при температурі вище 673 *К* у кремнію під дією зовнішнього навантаження з’являється пластична деформація, і руйнівне напруження зменшується з ростом температури. Тому важливим при цьому є використання в процесі зварювання некритичних зовнішніх стискаючих зусиль, а у випадку виготовлення мініатюрних виробів і повне їх виключення.

З указаних причин максимально можлива температура зварювання має бути не більшою 673 *К*, оскільки, як вказується у [21], при збільшенні температури зварювання збільшується вихід якісних вузлів. Така температура зварювання не вплине на зміну початкових розмірів деталей із скла при зварюванні, оскільки для боросилікатних стекол температура склування, тобто нижня температура розм’якшення скла, не нижча 673 *К* [10].

## 6.2 Обладнання та матеріали

6.2.1 Модернізована промислова установка УСЭПВН-4Н для зварювання в електростатичному полі.

6.2.2 Мембрани з напівпровідникового кремнію марки КЭФ-4,5/0,1 та трубчасті деталі зі скла марки “Пірекс” висотою 1 *мм*.

6.2.3 Оптичний мікроскоп МИМ-7.

6.2.4 Електроплитка, термостакани.

6.2.5 Реактиви: розчин їдкого натрію (з розрахунку 25 г натрію на 1 л дистильованої води), дистильована вода, ацетон, етиловий спирт.

6.2.6 Інструменти: пінцет, серветки, термометр.

### **6.3 Порядок виконання роботи**

6.3.1 Ознайомитись з інструкцією з техніки безпеки.

6.3.2 Ознайомитись з будовою та роботою зварювальної установки.

6.3.3 Вивчити методика роботи, отримати конкретне завдання, розробити план досліджень.

6.3.4 Підготувати зразки скла та кремнію перед зварюванням: протерти (3-4 рази) серветкою, змоченою етиловим спиртом або ацетоном; просушити на повітрі при кімнатній температурі; промити у розчині їдкого натрію при температурі 343 K протягом 5-15 хв.; промити в гарячій та холодній дистильованій воді; зневоднити в етиловому технічному спирті; просушити в печі при температурі 383 K.

6.3.5 Скласти деталі зі скла та кремнію, як показано на рисунку 6.1, та помістити їх на столик зварювальної установки з наступним притисканням збірки електродом для подачі позитивного потенціалу.

6.3.6 Закрити камеру установки, нагріти зразки до визначеної температури, провести ізотермічну витримку, подати зварювальну напругу, вимкнути всі джерела живлення і дати зварним зразкам охолонути до температури 293–303 K.

6.3.7 На діаграмній стрічці самописця відмітити величину зварювального струму і позначити номер досліду.

6.3.8 Зняти діаграмну плівку з записом  $I = f(\tau)$  і, визначивши масштаби, розрахувати кількість електрики методом графічного інтегрування.

6.3.9 Встановити зразки на штатив мікроскопа та визначити площу зон з'єднання точковим методом за методикою, наведеною в [14].

6.3.10 Провести аналіз отриманих результатів та зробити висновки.

### **6.4 Зміст звіту**

6.4.1 Назва роботи і її мета.

6.4.2 Необхідні теоретичні дані.

6.4.3 Обладнання та матеріали.

6.4.4 Порядок виконання роботи.

6.4.5 Експериментальні результати.

6.4.6 Аналіз отриманих результатів і висновки по роботі.

### **6.5 Питання для самоконтролю**

6.5.1 Сутність методу зварювання в твердій фазі в електростатичному полі.

6.5.2 Стадії процесу зварювання.

6.5.3 Механізм утворення зварного з'єднання ?

6.5.4 Що входить в поняття кількості електрики?

6.5.5 Що таке графічне інтегрування?

## **6.6 Інструкція з техніки безпеки**

6.6.1 Всі роботи проводити з дозволу викладача.

6.6.2 Увага! В роботі використовується електрична напруга до 1000 В. Не доторкатися до струмопідводних дротів.

6.6.3 Не доторкатись до нагрівача.

6.6.4 Після виключення зварювальної напруги дати охолонути зразкам.

6.6.5 Знімати зразки пінцетом.

## Рекомендована література

1. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.
2. Бачин В.А. Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
3. Бачин В.А., Квасницкий В.Ф., Котельников Д.И., Новиков В.Г., Полушкин Г.П. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки: Учебник для вузов по специальности “Оборудование и технология диффузионного соединения металлических и неметаллических материалов”. – М.: Машиностроение, 1991. – 352 с.
4. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 312 с.
5. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1981. – 271 с.
6. Каховский Н.И. Сварка высоколегированных сталей. – К.: Техніка, 1984. – 362 с.
7. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
8. Лебедев Б.Д. Расчеты в теории сварочных процессов. – К.: НМК ВО, 1992. – 320 с.
9. Любимов М.Л. Спаи металла со стеклом. – М.: Энергия, 1968. – 280 с.
10. Мачулка Г.А. Лазерная обработка стекла. – М.: Сов. радио, 1979. – 136 с.
11. Окерблом Н.О., Демянцевич В.П., И.П. Байкова. Проектирование технологии изготовления сварных конструкций. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 602 с.
12. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. – М.: Высш. школа, 1977. – 448 с.
13. Прецизионные сплавы. Справочник. Под ред. Б.В. Молотилова. – М.: Металлургия, 1974. – 448 с.
14. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 272 с.
15. Хоменко Н.Н. Влияние некоторых факторов на технологичность и надежность соединений кремния со стеклом // Электронная техника. – 1983. – Сер. 6, вып. 11. – С. 75-77.



- 16.Хоменко Н.Н. Использование свойств стекла в процессе соединения его с кремнием во внешнем электрическом поле // Электронная техника. – 1982. – Сер. 6, вып. 2 (163). – С. 61-64.
- 17.Хоменко Н.Н. Исследование поляризации стекол при их сварке с кремнием в электрическом поле // Электронная техника. – 1986. – Сер. 6, вып. 1(212). – С. 60-62.
- 18.Хоменко Н.Н. Научные и технологические основы электрохимической сварки в твердой фазе кристаллических материалов с ионопроводящими стеклами: Дис... докт. техн. наук: 05.03.06. – К., 1997. – 319 с.
- 19.Хоменко Н.Н. О некоторых физических процессах при сварке кремния со стеклом в электрическом поле // Автоматическая сварка. – 1990. – №3. – С. 27-31.
- 20.Хоменко Н.Н. Соединение полупроводниковых и прецизионных материалов со стеклом. – Чернигов: ВСНТО, 1984. – 54 с.
- 21.Хоменко Н.Н. Технология и оборудование получения сварно-паяных соединений кремния и кобальта со стеклом: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06. – Чернигов, 1985. – 210 с.



Додаток А  
Хімічний склад аустенітних і жароміцних сталей

Марка сталі	Вміст елементів, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Nb	Mo	Ti	Інші елементи
08X16H9M2	0,08	0,60	1,0-1,5	15,5-17,0	8,5-10,0	-	-	1,0-1,5	-	-
10X14H16Б	0,07-0,12	0,60	1,0-2,0	13,0-15,0	14,0-17,0	-	0,9-1,3	-	-	-
10X18H12Т	0,12	0,75	1,0-2,0	17,0-19,0	11,0-13,0	-	-	-	(C-0,02) 50,7	-
10X14H14B2M	0,15	0,80	0,70	13,0-15,0	13,0-16,0	3,0-4,0	-	0,45-0,60	-	-
10X16H14B2BP	0,07-0,12	0,60	1,0-2,0	15,0-18,0	13,0-15,0	2,0-2,75	0,9-1,3	-	-	0,005B
09X14H18BBP	0,07-0,12	0,60	1,0-2,0	13,0-15,0	18,0-20,0	2,0-2,75	0,9-1,3	-	-	0,005B
10X15H18B4T	0,07-0,12	0,50	0,5-1,0	14,0-16,0	18,0-20,0	4,0-5,0	-	-	1,1	0,005B
10X14H18B2BP1	0,07-0,12	0,60	1,0-2,0	13,0-15,0	18,0-20,0	2,0-2,75	0,9-1,3	-	-	0,011 – 0,016B
20X23H13	0,20	1,0	2,0	22,0-25,0	12,0-15,0	-	-	-	-	0,025B
08X23H8	0,1	1,0	2,0	22,0-25,0	17,0-20,0	-	-	-	-	-
1X15H25M6A	0,12	0,5-1,0	1,0-2,0	15,0-17,0	24,0-27,0	-	-	5,5-7,0	-	0,1-0,2
40X18H25C2	0,32-0,4	1,5	2,0-3,0	17,0-19,0	23,0-26,0	-	-	-	-	-
20X25H20C2	0,2	2,0-3,0	1,5	24,0-27,0	18,0-21,0	-	-	-	-	-
10X12H20T3P	0,10	1,0	1,0	10,0-12,5	18,0-21,0	-	-	-	2,3-2,8	0,5-0,008B
10X15H35BT	0,12	0,6	1,0-2,0	14,0-16,0	34,0-38,0	2,8-3,5	-	-	1,1-1,5	-
X15H35BTP	0,10	0,6	1,0	14,0-14,0	35,0-38,0	4,0-5,0	-	-	1,1-1,5	0,25-0,005B

Додаток Б  
Хімічний склад дротів, що використовуються для зварювання  
високолегованих сталей

Марка дроту	Вміст елементів, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Інші елементи
						не більше		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
СВ-12Х11НМФ	0,08-0,15	0,35-0,65	0,25-0,55	10,5-12,0	0,6-0,9	0,025	0,030	Mo 0,60-0,90 V 0,25-0,50
СВ-10Х11НВМФ	0,08-0,13	0,35-0,65	0,30-0,60	10,5-12,0	0,8-1,1			Mo 1,0-1,3 V 0,25-0,50 W 1,0-1,4
СВ-12Х13	0,09-0,14	0,30-0,70	0,30-0,70	12,0-14,0	≤ 0,6			-
СВ-20Х13	0,16-0,24	≤ 0,60	≤ 0,60	12,0-14,0	-			-
СВ-06Х14	≤ 0,08	0,30-0,70	0,30-0,70	13,0-15,0	≤ 0,6			-
СВ-08Х14ГНТ	≤ 0,10	0,90-1,30	0,25-0,65	12,5-14,5	0,4-0,9			Ti 0,6-1,0
СВ-10Х17Т	≤ 0,12	≤ 0,70	≤ 0,80	16,0-18,0	≤ 0,6			Ti 0,2-0,5
СВ-13Х25Т	≤ 0,15	≤ 0,80	≤ 1,0	23,0-27,0	≤ 0,6	Ti 0,2-0,5		
СВ-06Х24Н6ТАФМ	≤ 0,08	≤ 0,80	≤ 0,70	23,0-25,5	5,5-6,5	0,025	0,035	Mo 0,06-0,12 V 0,08-0,15 Ti 0,08-0,20 N 0,1-0,2
СВ-01Х19Н9	≤ 0,03	1,0-2,0	0,5-1,0	18,0-20,0	8,0-10,0	0,015		-
СВ-04Х19Н9	≤ 0,06	1,0-2,0	0,5-1,0	18,0-20,0	8,0-10,0	0,018	0,025	Mo 1,5-2,0
СВ-08Х16Н8М2	0,05-0,1	1,5-2,0	≤ 0,6	15,0-17,0	7,5-9,0			Mo 1,5-2,0
СВ-08Х18Н8Г2Б	0,05-0,1	1,8-2,3	0,3-0,7	17,5-19,5	8,0-9,0			Nb 1,2-1,5
СВ-07Х18Н9ТЮ	≤ 0,09	≤ 2,0	≤ 0,8	17,0-19,0	8,0-10,0	0,015	0,030	Ti 1,0 – 1,4 Al 0,6-0,95
СВ-06Х19Н9Т	≤ 0,08	1,0-2,0	0,4-1,0	18,0-20,0	8,0-10,0	0,015	0,030	Ti 0,5-1,0
СВ-04Х19Н9С2	≤ 0,06	1,0-2,0	2,0-2,75	18,0-20,0	8,0-10,0	0,018	0,025	V 1,8-2,4
СВ-08Х19Н9Ф2С2	≤ 0,10	1,0-2,0	1,3-1,8	18,0-20,0	8,0-10,0	0,025	0,030	V 2,2-2,7
СВ-05Х19Н9Ф3С2	≤ 0,07	1,0-2,0	1,3-1,8	18,0-20,0	8,0-10,0	0,025	0,030	Nb 1,2-1,5
СВ-07Х19Н10Б	0,05-0,09	1,5-2,0	≤ 0,7	18,5-20,5	9,0-10,5	0,018	0,025	Nb 0,9-1,3
СВ-08Х19Н10Г2Б	0,05-0,10	1,8-2,2	0,20-0,4	18,5-20,5	9,5-10,5	0,020	0,030	Mo 2,0-3,0
СВ-06Х19Н10М3Т	≤ 0,08	1,0-2,0	0,3-0,8	18,0-20,0	9,0-11,0	0,018	0,025	Ti 0,5-0,8
СВ-08Х19Н10М3Б	≤ 0,10	1,0-2,0	≤ 0,6	18,0-20,0	9,0-11,0	0,018	0,025	Mo 2,0-3,0 Nb 0,9-1,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
СВ-04Х19Н11М3	≤0,06	1,0-2,0	≤0,6	18,0-20,0	10,0-12,0	0,018	0,025	Mo 2,0-3,0
СВ-05Х20Н9ФБС	≤0,07	1,0-2,0	0,9-1,5	19,0-21,0	8,0-10,0	0,20	0,030	Nb 1,0-1,4; V 0,9-1,3
СВ-08Х20Н9С2БТЮ	≤0,10	1,0-2,0	2,0-2,5	19,0-21,0	8,0-10,0	0,020	0,035	Ti 0,6-1,0 Nb 0,6-1,0 Al 0,3-0,7
СВ-06Х20Н11М3ТБ	≤0,08	≤0,80	0,5-1,0	19,0-21,0	10,0-12,0	0,018	0,030	Mo 2,5-3,0 Nb 0,6-0,9 Ti 0,6-1,1
СВ-10Х20Н15	≤0,12	1,0-2,0	≤0,8	19,0-22,0	14,0-16,0	0,018	0,025	-
СВ-07Х25Н12Г2Т	≤0,09	1,5-2,5	0,3-1,0	24,0-26,5	11,0-13,0	0,020	0,035	Ti 0,6-1,0
СВ-06Х25Н12ТЮ	≤0,08	≤0,80	0,6-1,0	24,0-26,5	11,5-13,5	0,020	0,030	Ti 0,6-1,0 Al 0,4-0,8
СВ-07Х25Н13	≤0,09	1,0-2,0	0,5-1,0	24,0-26,5	12,0-14,0	0,018	0,025	-
СВ-13Х25Н18	≤0,15	1,0-2,0	≤0,5	24,0-26,5	17,0-20,0	0,015	0,025	-
СВ-08Х20Н9Г7Т	≤0,10	5,0-8,0	0,5-1,0	18,5-22,0	8,0-10,0	0,018	0,035	Ti 0,6-0,9
СВ-08Х21Н10Г6	≤0,10	5,0-7,0	0,2-0,7	20,0-22,0	9,0-11,0		0,030	-
СВ-30Х25Н16Г7	0,25-0,33	6,0-8,0	≤0,3	24,5-27,0	15,0-17,0		0,025	Mo 5,5-7,0 N 0,1-0,2
СВ-10Х16Н25АМ6	0,8-0,12	1,0-2,0	≤0,6	15,0-17,0	24,0-27,0		0,018	Mo 5,5-7,0 V 0,7-1,0
СВ-09Х16Н25М6АФ	0,07-0,11	1,0-2,0	≤0,4	15,0-17,0	24,0-27,0		0,018	N 0,1-0,2
СВ-01Х23Н28М3Д3Т	≤0,03	≤0,55	≤0,55	22,0-25,0	26,0-29,0		0,018	0,030
СВ-30Х15Н35В3Б3Т	0,27-0,33	0,5-1,0	≤0,6	14,0-16,0	34,0-36,0	0,015	0,025	W 2,5-3,5 Nb 2,8-3,5 Ti 0,2-0,7
СВ-08Н50	≤0,10	≤0,5	≤0,5	≤0,3	48,0-53,0	0,020	0,030	-
СВ-08Х18Н2ГТ	≤0,10	0,00-1,30	0,25-0,65	17,0-19,0	2,0-2,5	0,030		Mo 1,0-1,3 Ti 0,8-1,3
СВ-08Х25Н13БТЮ	≤0,10	≤0,55	0,6-1,0	24,0-26,0	12,0-14,0	0,020		Ti 0,5-0,9 Nb 0,7-1,1; Al 0,4-0,9