

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсового проекту №2
з дисципліни «Теорія зварювальних процесів» для студентів освітньої
програми „Технології та устаткування зварювання” всіх форм навчання

2016

Методичні вказівки до курсового проекту №2 з дисципліни «Теорія зварювальних процесів» для студентів освітньої програми „Технології та устаткування зварювання” всіх форм навчання / Укл.: О.В. Овчинников, О.Є. Капустян. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016 – 22 с*.

Укладачі: О.В. Овчинников, д-р техн. наук, проф.;

О.Є. Капустян, старш. викладач.

Рецензент: М.Ю. Осіпов, канд. техн. наук, доцент

Редактор: І.П. Аверченко

Відповідальний за випуск: О.Є. Капустян

Затверджено

на засіданні кафедри ОТЗВ

Протокол № 8 від 1.06.2016

Рекомендовано до видання

НМК ІФФ

Протокол № 10 від 21.06.2016

* Методичні вказівки складено на основі «Методичних вказівок до виконання розрахунково-графічних робіт з дисципліни «Теорія зварювальних процесів» для студентів спеціальності: 6.092301 для всіх форм навчання / Укл.: Ю.М. Ткаченко»

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 РОЗРАХУНКИ ТА ПОБУДОВА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ЛИСТІВ УСТИК.....	4
2 ВИЗНАЧЕННЯ ОДНООСНИХ ПОЗДОВЖНІХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ЛИСТІВ УСТИК З ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФОАНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ Г.О. НІКОЛАЄВА	12
ЛІТЕРАТУРА	16
Додаток А.....	17
Додаток Б	19
Додаток В.....	20
Додаток Г	20
Додаток Д.....	21

ВСТУП

Вивчення курсу "Теорія зварювальних процесів", сприяє формуванню теоретичного фундаменту для засвоєння дисципліни зварювального профілю. Розуміння суті явищ, які відбуваються при зварюванні плавленням, кристалізації та послідовних структурних перетворень у швах та колошовних зонах допоможе студентам навчатися керувати процесами, які визначають одержання фізичних, механічних та інших властивостей зварних з'єднань на потрібному рівні.

Велику роль у глибокому засвоєнні матеріалу грає самостійна проробка студентами підручників, навчальних посібників, монографій за спеціальністю у процесі виконання курсового проекту. Проект включає інженерні задачі розрахунків температурних полів та рівня напруги при зварюванні сталей, а також висвітлює зв'язані з ними теоретичні запитання.

1 РОЗРАХУНКИ ТА ПОБУДОВА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ЛИСТІВ УСТИК

В залежності від товщини елементів металоконструкції, які зварюються, розрізняють три основних випадки розповсюдження теплоти рухомою зварювальною дугою - в нескінчену пластину, плоский шар, напівнескінчене тіло та стержень.

Випадок 1. Пластина – Зварювання виконується за один прохід з повним проплавленням всієї товщини елемента. По всій товщині елемента встановлюється однакова температура нагрівання біля зварювальної дуги.

Випадок 2. Плоский шар – Зварювання виконується в декілька приходів або здійснюється наплавлення на елемент конструкції с частковим проплавленням його товщини. При цьому поряд зі зварювальною дугою температура нагрівання розподіляється по товщині нерівномірно і у точках з однаковими координатами X та Y

по обмежуючим товщину елемента поверхням, температура нагріву значно відрізняється.

Випадок 3. Напівнескінченне тіло - Зварювання або наплавлення виконується на масивному елементі, температурне поле загасає в товщині метала.

Для кожного випадку розрахунок температурного поля виконується по відповідним формулам [1, 2].

1.1 Пластина

Для випадку пластини граничну температуру знаходять за формулою:

$$T_{ep} = \frac{q}{2p l d} \cdot \exp\left(\frac{VX}{2a}\right) \cdot K_o \left(r \sqrt{\frac{V^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \right) \quad (1.1)$$

$$q = hUI.$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$a = \lambda / (c \cdot \rho)$$

$$b = \frac{2a}{c r d}$$

де q - потужність джерела тепла, Вт;

η - ефективний ККД, який являє собою відношення кількості тепла, введенного дугою в метал до теплового еквіваленту потужності дуги. Для плавкого електроду відкритою дугою $\eta = 70-85 \%$;

для плавкого електроду під флюсом $\eta = 85-95 \%$;

для не плавкого вугільного електроду $\eta = 50-70 \%$;

U – напруга, В;

I – сила струму, А;

V - швидкість зварювання, м/с;

λ - коефіцієнт теплопровідності; Вт/м К (додаток Б);

δ - товщина листа, м;

α - коефіцієнт температуропровідності, характеризує теплоенергійні властивості тіла м²/с (додаток Б);

x, y, z - координати, м;

K_0 (И) - функція Бесселя (додаток В);

r - плоский радіус-вектор рухомого температурного поля, м;

b - коефіцієнт температуровіддачі, враховуючий інтенсивність зниження температури внаслідок тепловіддачі з поверхні листа в оточуюче середовище, 1/с (двійка у чисельнику показує, що тепловіддача йде з двох площин $z = 0$ та $z = \delta$);

a - коефіцієнт тепловіддачі, який характеризує інтенсивність взаємодії поверхні листа та оточуючого середовища, Вт/м² К;

C - теплоємність, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$;

ρ - густина, кг/м³;

Для періоду вирівнювання теплонасичення температур обчислювання виконують за формулою:

$$T_b = \Psi_2(\rho_2; \tau_2) T_{гр} \quad (1.2)$$

$$\tau_2 = \tau(v^2/4a + b)$$

$$r_2 = r \sqrt{\frac{V^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}$$

$\Psi_2(\rho_2; \tau_2)$ - коефіцієнт теплонасичення для лінійного джерела тепла у нескінченній пластині, (рис. 1.1);

τ_2 - безрозмірний критерій часу;

ρ_2 — безрозмірний критерій відстані.

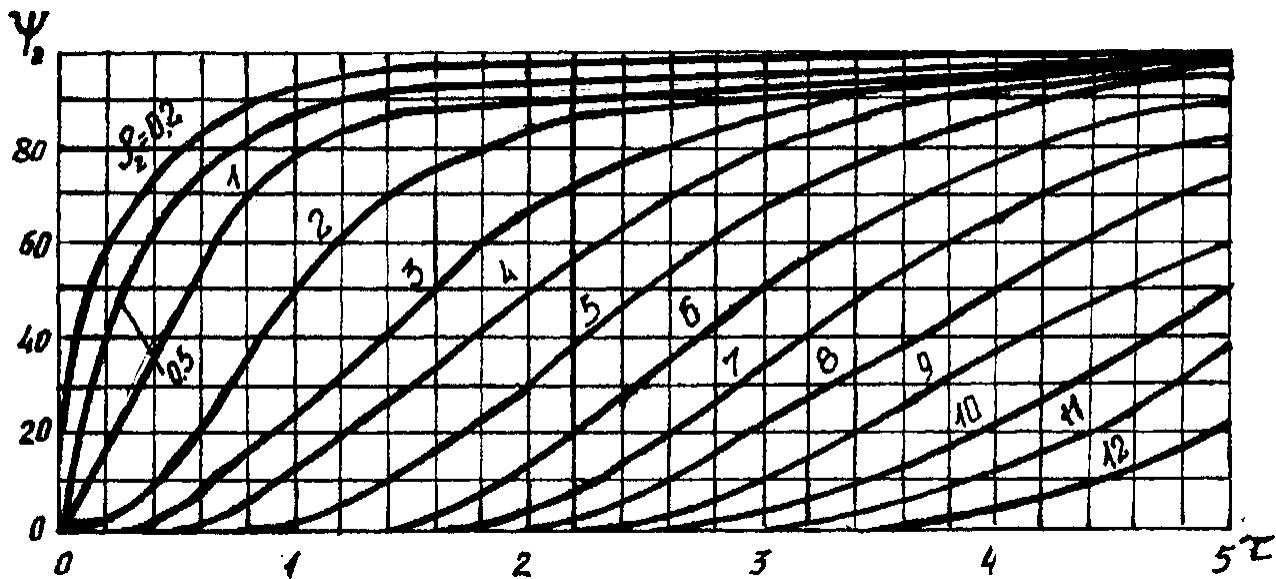


Рисунок 1.1 — Номограма для визначення коефіцієнта теплонасичення лінійного джерела у нескінченній пластині [1,2].

1.2 Плоский шар

Для другого випадку, розглядається зварювальна дуга як крапкове джерело теплоти, діючий на плоскості елемента, температурне поле поза віссю OZ на верхній $Z = 0$ и нижній $Z = \delta$ площинах описують формулою:

$$T(r, x, z) = m(r, z) * T(r, z)_{пред}$$

$$T(r, z)_{пред} = \frac{q}{2pld} * \exp\left[-\frac{Vx}{2a}\right] * K_0\left[\frac{Vr}{2a}\right]$$

Для вісі OZ, що проходить через крапкове джерело теплоти, температуру граничного стану знаходять за формулою:

$$T(z) = k(z) \frac{q}{2lpz} * \exp\left[-\frac{Vz}{2a}\right]$$

де $m(r, z)$ - коефіцієнт, враховуючий зосередження джерела на верхній поверхні плоского шару, знаходять по рис. 1.2;

$k(z)$ - коефіцієнт, враховуючий обмеженість тіла нижньою площиною $z=\delta$ знаходять по рис. 1.3.

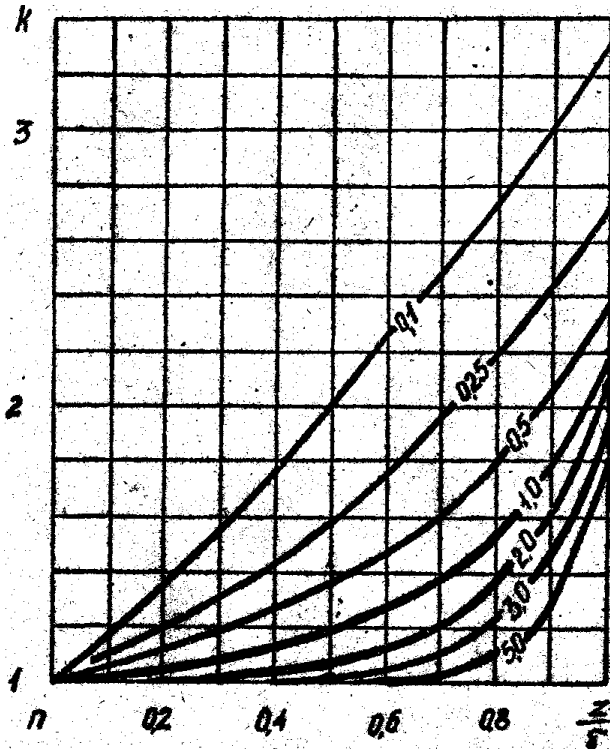
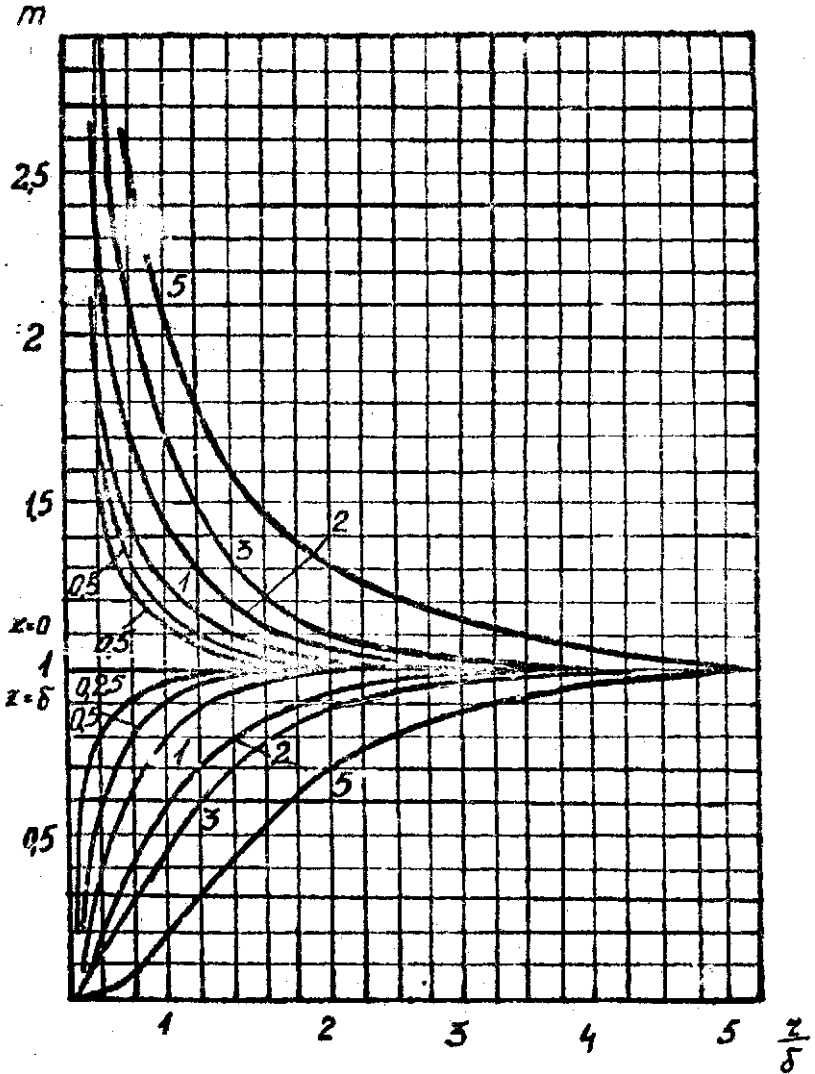


Рисунок 1.2 - Коефіцієнт k , що виражає відношення температури вісі OZ плоского шару, який нагрівається за допомогою крапкового джерела, що знаходиться у точці O , до температури напівнескінченного тіла, яке нагрівається за допомогою крапкового джерела.



для $Z = 0$ $m > 1$, для $Z = \delta$ $m < 1$

Рисунок 1.3 - Коефіцієнт m , що виражає відношення температури на поверхнях плоского шару, який нагрівається за допомогою крапкового джерела теплоти, до температури пластини, яка нагрівається за допомогою лінійного джерела теплоти.

1.3 Напівнескінченне тіло

Для третього випадку приймаючи зварювальну дугу як крапкове джерело теплоти, діючий на площину напівнескінченного тіла, отримуємо формулу температурного поля

$$T(x, R) = \Psi_3(r_3, t_3) * T(x, R)_{пред},$$

де $R = x^2 + y^2 + z^2$ - просторовий радіус - вектор точки рухомого температурного поля, тобто відстань розглянутої точки від миттєвого положення джерела теплоти;

$\Psi_3(r_3, t_3)$ - коефіцієнт теплонасичення для крапкового джерела у напівнескінченному тілі; на рис. 1.4 наведено у залежності від безрозмірних критеріїв відстані ρ_3 та часу τ_3 .

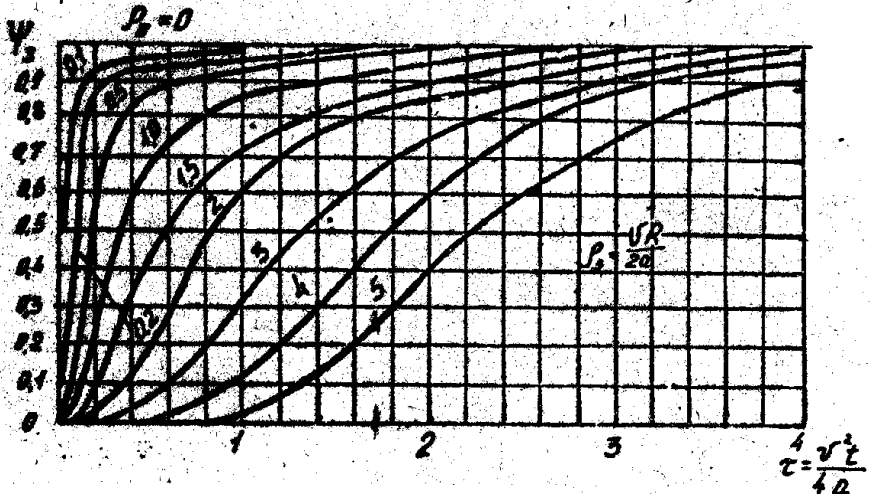


Рисунок 1.4 - Номограма для визначення коефіцієнта теплонасичення точкового джерела у напівнескінченному тілі

$$T(x, R)_{пред} = \frac{q}{2plR} * \exp \left[-\frac{V(x+R)}{2a} \right]$$

$$r_3 = \frac{VR}{2a},$$

$$t_3 = \frac{V^2 t}{4a}$$

Розрахунок температурного поля проводиться за програмою FIELDS, EXE.

При розрахунках $T_{гр}$ за формулою (1.1) координата "X" дорівнює -5, -10, -15, -20... - 100 мм, таким чином значення "X" приймають позаду лінійного джерела тепла у пластині.

Для кожного значення "X" приймають значення "У" рівними 5, 10, 15, 20 ...100 мм.

Результати розрахунків температурного поля упорядковуються у виді табл. 1.1.

Таблиця 1.1- Результати розрахунків температурного поля

$X_m \cdot 10^{-3}$, м	$Y \cdot 10^{-3}$, м	$T_{гр}(x,y)$, °C

В алгоритмі розрахунку температурних полів (додаток Д), обчислювання для лінійного джерела тепла у необмеженій пластині проводиться за умовою, що $z = 0$, $\alpha \neq 0$. У інших випадках $\alpha = 0$ йде обчислювання температурних полів плоского шару (при $z = 0$, $\alpha = 0$) та напівнескінченному тілі (при $z = 0$, $\alpha = 0$). Позначення прийняті в алгоритмі приведені в додатку Д.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОДНООСНИХ ПОЗДОВЖНІХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ЛИСТІВ УСТИК З ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФОАНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ Г.О. НІКОЛАЄВА

Графоаналітичний метод Г.О. Ніколаєва розглядає механізм виникнення поздовжніх деформацій та напружень при зварюванні листів устик.

У цьому графоаналітичному методі прийняті наступні

допущення:

- розглядаються тільки одноосні поздовжні напруження;
- поперечні перерізи плоскі;
- приймається схематизована залежність межі текучості від температури;
- модуль пружності "Е" та коефіцієнт лінійного розширення "а" у всьому діапазоні температур прийняті постійними.

Переріз 1-1 (рис. 2.1) проводиться через точки доторкання прямої, паралельної осі шва, до ізотерми 600°C. Температурні деформації поздовжніх волокон пластини дорівнюють $\epsilon_a = \alpha T$.

На рис. 2.1а деформації скорочення показані зі знаком "мінус", а подовження - "плюс". Пластичні деформації показані скісним штрихуванням, пружні деформації - вертикальним. Величина пружних деформацій на ділянці між температурами 500 та 600° С показана згідно із схематизованою залежністю межі текучості низьковуглецевої сталі від температури.

Пряма m-m' проводиться на відстані ΔX рівній одиниці масштабу із умови рівнозваженості епюр і підбирається послідовним приближенням.

Переріз II-II (рис. 2.1 в) проводиться після повного остигання пластини; пряма n – n' проводиться таким чином, що і пряма m-m'.

Розв'язання задачі зводиться до визначення власних деформацій та напружень у перерізі 1-1 у напрямку осі ОХ.

Власні деформації $\epsilon_{пр} + \epsilon_{пл}$ можуть бути представлені як різниця спостерігаємих $\sigma_{сп}$ та температурних деформацій:

$$\epsilon_a = \alpha \cdot \Delta T, \quad (2.1)$$

Тоді

$$\epsilon_{пр} + \epsilon_{пл} = \epsilon_{сп} - \alpha \Delta T, \quad (2.2)$$

де ΔT - приріст температури;

α - коефіцієнт лінійного розширення;

$\epsilon_{пр}$ - пружні деформації;

$\epsilon_{пл}$ - пластичні деформації;

$\epsilon_{сп}$ - деформації, що спостерігаються.

Проведемо поряд з перерізом 1-1 пряму $m-m'$ I на відстані ΔX . Температурні деформації полоски металу між перерізами 1-1 та $m-m'$ у напрямку ОХ, рівні $a\Delta T$ за своїм характером будуть співпадати з температурною кривою у перерізі 1-1, оскільки коефіцієнт a прийнятий незалежним від температури. Через те, що переріз 1-1 не викривлюється, $\epsilon_{\text{сп}}$ буде по ширині пластини $2B$ однаковим.

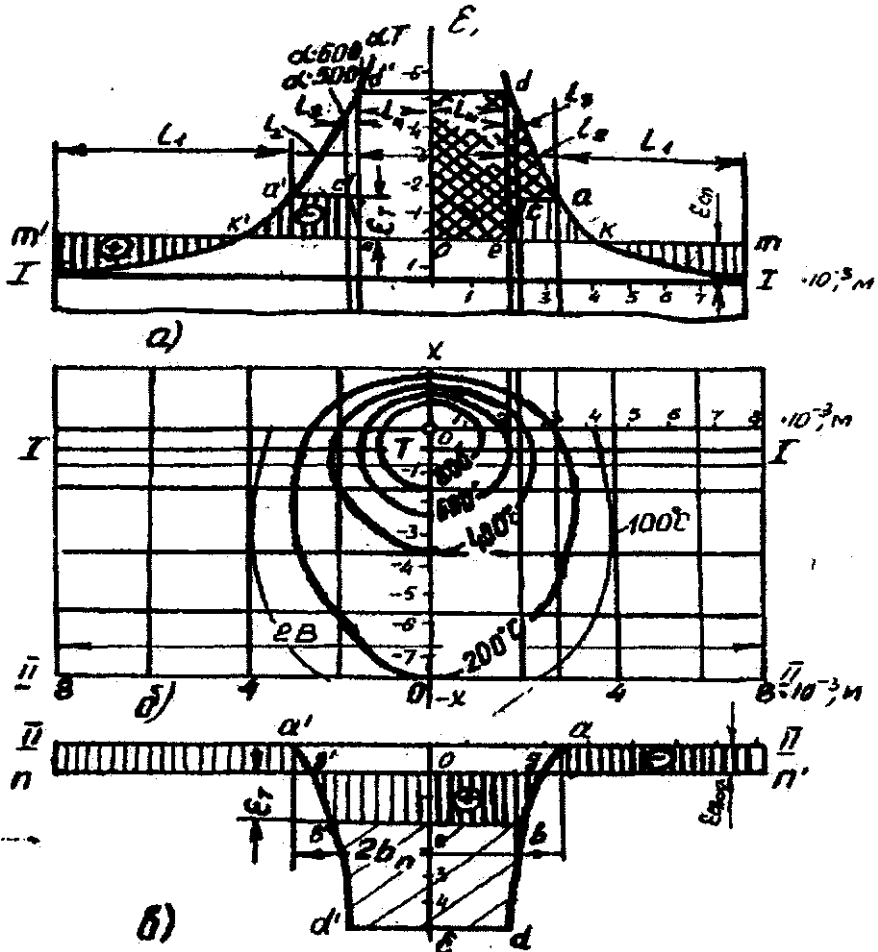


Рисунок 2.1 - Визначення поздовжніх деформацій та напружень при зварюванні пластин

Власні напруження при одноосному напруженому стані

пропорційні пружним деформаціям, тоді $\sigma = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot E$. Після проведення лінії $m-m'$, яка показує передбачуване положення $\varepsilon_{\text{сп}}$, відкладаємо угору від неї значення граничної можливої пружної деформації

$$e_T = \frac{S_T}{E}, \quad (2.3)$$

та проводимо лінію "са". Значення ε_T постійне у залежності від схематизованої діаграми $\sigma_T - T$ до температури 500° С [3]. Від 500 до 600° С межа текучості змінюється лінійно до нуля. Перевіряється рівність площі пружної додатної (+) та від'ємної (-) деформації.

Якщо вони зрівноважні (рівні), визначається значення $\varepsilon_{\text{сп}}$ та обчислюється значення діючих у перерізі 1-1 напружень σ_0 . Якщо площі зрівноважені, необхідно задатися новим положенням лінії $m-m'$ та повторити побудову з тим, щоб різниця площин додатної та від'ємної була менша 5 %.

Залишкові деформації та напруження визначаються на стадії повного остигання пластини у перерізі II-II, що знаходяться при нормальній температурі для фази остигання, але оскільки після повного остигання $T = 0$, то $\varepsilon_a = 0$, тоді:

$$e_{n_{\text{зал}}} + e_{unp_{\text{зал}}} = e_{n_{\text{зал}}} - e_a - e_{n_{\text{ноч}}} \quad (2.4)$$

$$e_{n_{\text{зал}}} + e_{unp_{\text{зал}}} = e_{n_{\text{зал}}} - e_{n_{\text{ноч}}} \quad (2.5)$$

де $\varepsilon_{\text{пл/поч}}$ - пластична деформація у перерізі 1-1.

Для графічного визначення деформації відкладаємо на рис. 2.1в величину початкових пластичних деформацій $\varepsilon_{\text{пл/поч}}$, яка дорівнює скісно заштрихованій епюрі на рис. 2.1а і обмежену лінією "ad". Вона виражає скорочення волокон, яке сталося у зоні пластичних деформацій при нагріванні.

Задамося деяким від'ємним значенням $\varepsilon_{\text{сп/поч}}$ та зсунемо початок координат ε у положення лінії $n-n'$.

Внаслідок прийнятої гіпотези плоских перерізів спостерігаємо,

що деформація остигання буде однаковою по всій ширині пластини. Ординати "add/a/" виражають суму пластичних та пружних деформацій ($\epsilon_{пл/зал} + \epsilon_{пр/зал}$), які виникли на стадії остигання. Для того, щоб виділити із суми пружну деформацію, розрахуємо значення максимально можливої пружної деформації при нормальній температурі.

Відкладаємо ϵ_t на рис. 2.1в від перерізу n-n' униз. Тоді ламана лінія "ав" виражає пружні деформації, а лінія "vd" - пластичні деформації скорочення, що виникли на стадії остигання.

Заштрихована прямокутними лініями частина епюри на рис. 2.1 в представляє собою епюру пружних деформацій.

Якщо положення лінії n-n' вибрано вірно, то сума площин епюр пружних від'ємної та додатної деформацій будуть рівними. Якщо ж епюри пружних деформацій незрівноважені, необхідно задатися новим положенням лінії n-n' та повторити побудову до зрівноваження площин додатної та від'ємної пружних деформацій.

На основі отриманих значень пружних спостерігаємих деформацій $\epsilon_{сп}$ при нагріванні та остиганні, розрахувати значення діючих у пластині напружень та порівняти з допустимими напруженнями; зробити висновок [3, 4].

ЛІТЕРАТУРА

1. Теоретические основы сварки / Под ред. В.В. Фролова. - М.: Высш. шк., 1970. - 592 с.
2. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов. - К.: Вища шк., 1976. - 423 с.
3. Казимаров А.А., Недосека А.Я., Лобанов А.И., Радченко И.С. Расчёт температурных полей в пластинах при электросварке плавлением: Справочник. - К.: Наук. думка, 1968. - 850 с.
4. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. - М.: Машиностроение, 1984. - 280 с.

Додаток А

Індивідуальні завдання для курсової роботи

№	δ , мм	Діаметр електроду, мм	$U_{д}$ В	$I_{зв}$, А	$V_{зв}$ м/ч
АДФ					
1.	3,0	2,0	28-30	275-300	48-50
2.	4,0	3,0	28-30	350-400	44-46
3.	5,0	4,0	28-32	400-425	38-40
4.	5,0	4,0	28-32	550-600	38-40
5.	5,0	5,0	28-30	575-625	48-50
6.	8,0	5,0	34-38	700-750	28-30
7.	8,0	4,0	32-36	675-725	30-32
8.	10,0	5,0	34-38	700-750	28-30
9.	12,0	5,0	36-40	750-800	25-27
10.	14,0	5,0	36-40	850-900	25-27
11.	16,0	5,0	38-42	900-950	20-22
12.	20,0	5,0	40-44	950-1000	18-20
13.	8,0	5,0	34-38	650-700	32-34
14.	10,0	4,0	34-38	600-650	30-32
15.	12,0	4,0	36-40	650-700	30-32
16.	14,0	5,0	36-40	700-750	28-30
17.	16,0	5,0	36-40	700-750	25-27
18.	20,0	5,0	38-42	750-800	22-24
19.	30,0	5,0	40-44	950-1000	16-18
20.	40,0	5,0	40-44	1100-1200	12-14
21.	50,0	5,0	44-48	1200-1300	8-10
22.	50,0	2,0	28-30	250-300	36-38
23.	50,0	4,0	28-32	550-600	38-40
24.	50,0	4,0	30-34	400-450	38-40
25.	50,0	5,0	34-38	650-700	32-34
26.	50,0	5,0	36-40	700-750	28-30
27.	50,0	5,0	36-40	750-800	23-25
28.	50,0	5,0	38-42	900-950	38-40
29.	50,0	5,0	40-44	950-1000	38-40
30.	50,0	5,0	44-48	950-1000	43-45

	АДГ				
31.	1,0	1,0	24-26	80-90	48-50
32.	1,0	1,2	24-26	110-120	48-50
33.	2,0	1,6	28-30	130-140	30-32
34.	2,0	2,0	30-32	190-200	58-60
35.	0,6	0,5	18-20	50-60	25-30
36.	1,0	0,8	18-20	50-60	20-25
37.	1,2	0,8	18-20	70-100	18-24
38.	3,0	2,0	28-30	180-200	14-16
39.	6,0	2,0	28-30	280-300	16-18
40.	8,0	2,0	28-30	280-300	14-16

Примітки.

1 Тип шву - односторонній з повним проваром, без оброблення пружків.

2 Матеріал (Додаток Г), та схема нагрівання (І, ІІ, ІІІ) - за вказівкою викладача. Таким чином кількість варіантів перевищує 250 шт.

Додаток Б

Теплофізичні властивості сталей

Матеріал	Інтервал темпера- тур, °С	Коефіцієнт теплопровідн ості λ , Вт/м·К	Об'ємна теплоємність, $C_p \cdot 10^{-6}$ Дж/м ³ К	Коефіцієнт температуропр овідності, м ² /с
Низько- вуглецеві та низько- леговані сталі	500..600	38...42	4,9...5,2	0,075..0,09
Корозійно стійкі аустенітні сталі	600	25...33	4,7...4,8	0,053..0,07
Мідь	400	370..380	3,85..4,0	0,95...0,96
Латунь	350...400	117	3,45	0,34
Алюміній	300	270	2,7	1,0
Технічний титан	700	17	2,8	0,06

Додаток В

Функція Бесселя мнимого аргументу другого роду нульового порядку $K_0/I/$

И	$K_0/I/$	И	$K_0/I/$	И	$K_0/I/$
0,0		1,5	0,214	3,1	0,0314
0,1	2,447	1,6	0,188	3,2	0,0283
		1,7	0,165	3,3	0,0251
0,2	1,753	1,8	0,146	3,4	0,0220
0,3	1,373	1,9	0,129	3,5	0,0196
0,4	1,115	2,0	0,114	3,6	0,0173
0,5	0,924	2,1	0,100	3,7	0,0157
0,6	0,775	2,2	0,089	3,8	0,0141
0,7	0,661	2,3	0,078	3,9	0,0126
0,8	0,565	2,4	0,071	4,0	0,0112
0,9	0,487	2,5	0,062	4,5	0,0064
1,1	0,366	2,7	0,049	5,0	0,0037
1,2	0,318	2,8	0,044		
1,3	0,278	2,9	0,039		
1,4	0,244	3,0	0,0347		

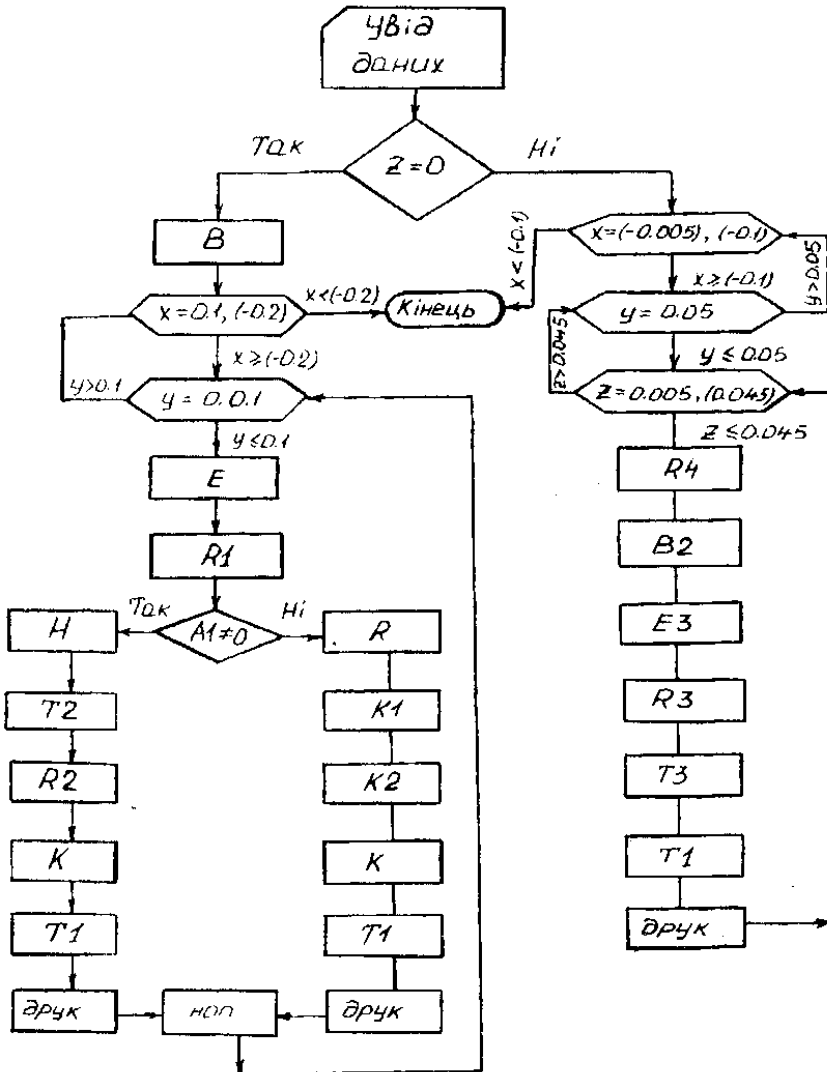
Додаток Г

Механічні властивості швів, виконаних автоматичним дуговим зварюванням [4]

Сталь	Дріт	Захист	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %
зварюванням під флюсом					
ВСт. 3	Св-08А	АН-348А	250	440	25
10ХСНД	Св-08А	АН-348А	510	590	26
17Г1С	Св-08А	АН-60	360	550	27
у захисному газі					
ВСт. 3	Св-08Г2С	CO ₂	400	540	20
ВСт. 3	Св-08Г2С	CO ₂	300	500	22

Додаток Д

Блок-схема програми розрахунку температурних полів у пластині, плоскому шарі та напівнескінченному тілі



В приведеній блок-схемі прийняті наступні позначення

теплофізичних величин

№	Теплофізична величина або параметр	Схема розрахунку		
		1	2	3
1.	Потужність q , Дж		Q	
2.	Швидкість, v , м/с		Y	
3.	Час, t , с		T	
4.	Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/м·К		L	
5.	Коефіцієнт температуропровідності, α , м ² /с		A	
6.	Коефіцієнт тепловіддачі, α , Вт/м ² ·К		AI	
7.	Множник, $ср$, Дж/м ³ ·К		C	
8.	Товщина листа, δ , м		D	
9.	Координати, x, y, z , м		X, Y, Z	
10.	Функція Бесселя, K_0	K	K	
11.	$q/2\pi\lambda\delta$	B	B	
12.	$\exp\left(\frac{VX}{2a}\right)$	E	E	
13.	плоский радіус-вектор, r , м	R1	R1	
14.	коефіцієнт температуровіддачі, b , 1/с	H		
15.	безрозмірний критерій часу, τ_2	T2		
16.	безрозмірний критерій відстані, ρ_2	R2		
17.	Температура гранична, $T/x, y, K$	TI	TI	TI
18.	$Vr/2a$		R	
19.	r/δ		KI	
20.	$V\delta/2a$		K2	
21.	$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$			R4
22.	$\exp\left(-\frac{V(X+R)}{2a}\right)$			E3
23.	$q/2\pi\lambda R$			B2
24.	$r_3 = \frac{Vr}{2a}$			B3
25.	$\frac{V^2 T}{4a}$			T3