

ДИПЛОМНА РОБОТА СПЕЦІАЛІСТА

на тему “Програмне забезпечення
моделювання динаміки температурного поля
при сплавленні біметалу скануючим лазером”

Виконала:

студент 6 курсу, групи ТР-61с
Остапенко Ганна Анатоліївна

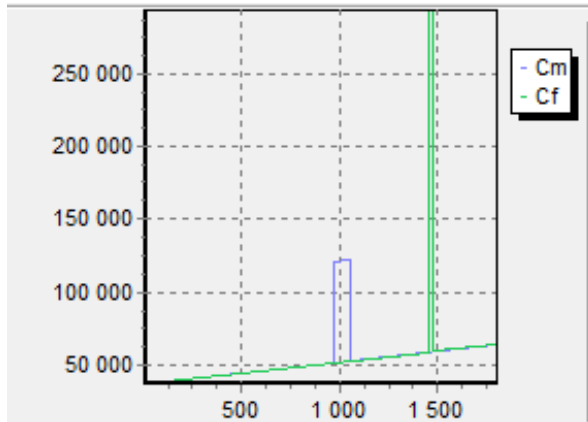
Керівник

к.т.н., доцент

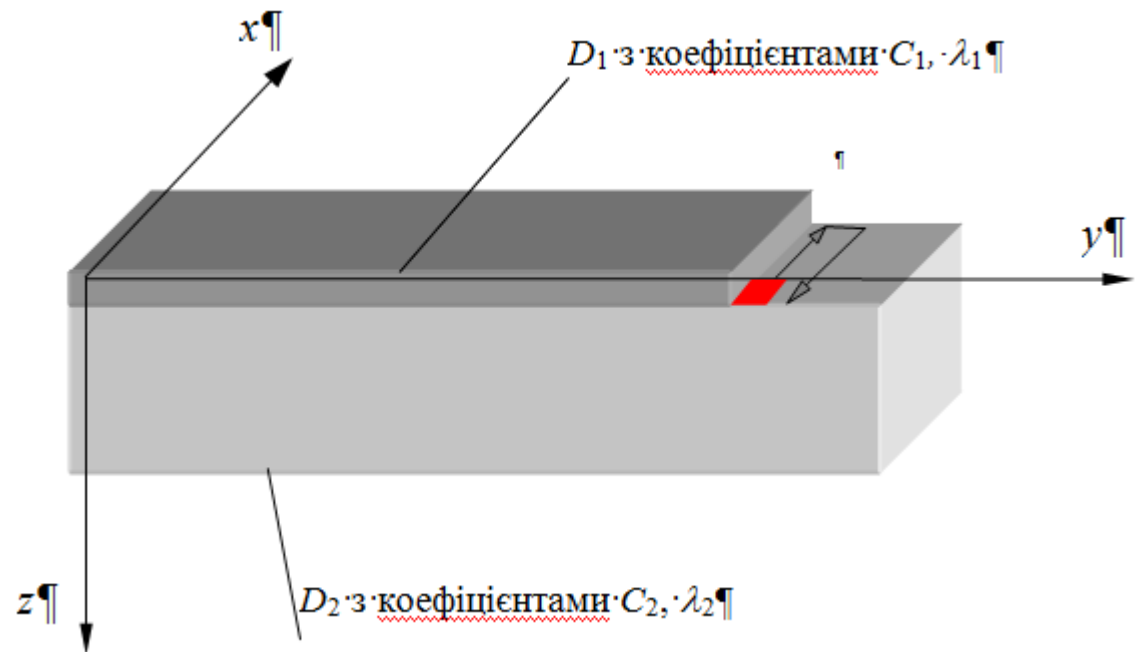
Третяк Валерія Анатоліївна.

- Мета:** Розробити програмне забезпечення моделювання динаміки температурного поля при сплавленні біметалу скануючим лазером.
- Актуальність:** Висока швидкість розплавлення та локальність впливу лазерного випромінювання ускладнює використання традиційних експериментальних методів дослідження, викликаючи необхідність чисельного моделювання процесів.
- Температура є найбільш вагомим чинником, що впливає на кінцеву якість біметалу.

Об'єкт моделювання



Область моделювання складається з двох частин D1(наплавлення) і D2(підкладка), що мають різні теплофізичні параметри матеріалів.
Форма області D1 змінюється в часі.



Математична постановка задачі

$$\frac{\partial}{\partial t}(U \cdot C(U, z)) = \lambda(z) \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right),$$

де t – час;

U – температура (результуюча функція);

$C(U, z)$ – коефіцієнт об'ємної теплоємності (КОТ);

$\lambda(z)$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

Граничні умови взаємодії з середовищем

$$\lambda \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Omega/\Gamma} + h_c(U) = 0,$$

де $\frac{\partial U}{\partial \vec{n}}$ – похідна температури за напрямком нормалі до поверхні ОВ;

Ω – границя ОВ;

h_c – коефіцієнт теплообміну

Граничні умови нагріву

$$\lambda \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Gamma} + q = 0,$$

де $\frac{\partial U}{\partial \vec{n}} = \frac{\partial U}{\partial z}$, оскільки

вважається, що нагрів

відбувається зверху;

Γ – зона нагріву;

q – розподіл щільності потужності джерел енергії.

Двоциклічне покомпонентне розщеплення на основі схеми Кранка-Ніколсона

$$\frac{C(u^{k-1}) \cdot (u^{k-\frac{2}{3}} - u^{k-1})}{\tau} = \lambda \Lambda_1 \frac{u^{k-\frac{2}{3}} + u^{k-1}}{2}$$

$$\frac{C(u^{k-\frac{2}{3}}) \cdot (u^{k-\frac{1}{3}} - u^{k-\frac{2}{3}})}{\tau} = \lambda \Lambda_2 \frac{u^{k-\frac{1}{3}} + u^{k-\frac{2}{3}}}{2}$$

$$\frac{C(u^{k-\frac{1}{3}}) \cdot (u^k - u^{k-\frac{1}{3}})}{\tau} = \lambda \Lambda_3 \frac{u^k + u^{k-\frac{1}{3}}}{2}$$

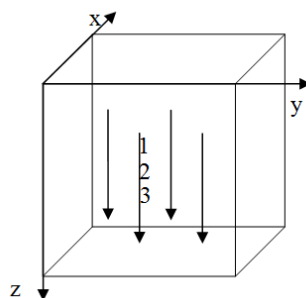
$$\frac{C(u^k) \cdot (u^{k+\frac{1}{3}} - u^k)}{\tau} = \lambda \Lambda_3 \frac{u^{k+\frac{1}{3}} + u^k}{2}$$

$$\frac{C(u^{k+\frac{1}{3}}) \cdot (u^{k+\frac{2}{3}} - u^{k+\frac{1}{3}})}{\tau} = \lambda \Lambda_2 \frac{u^{k+\frac{2}{3}} + u^{k+\frac{1}{3}}}{2}$$

$$\frac{C(u^{k+\frac{2}{3}}) \cdot (u^{k+1} - u^{k+\frac{2}{3}})}{\tau} = \lambda \Lambda_1 \frac{u^{k+1} + u^{k+\frac{2}{3}}}{2}$$

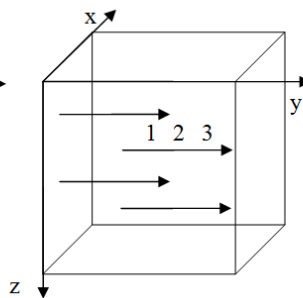
I етап: $t = t_{k-1}$,

$$u(t_{k-1}) = u^{k-1}$$



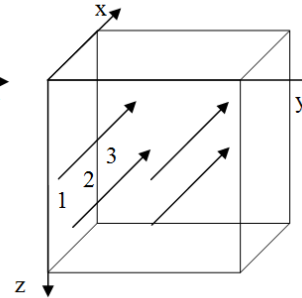
II етап: $t = t_{k-1} + \frac{1}{3}\tau$,

$$u(t_{k-1} + \frac{1}{3}\tau) = u^{k-\frac{2}{3}}$$



III етап: $t = t_{k-1} + \frac{2}{3}\tau$,

$$u(t_{k-1} + \frac{2}{3}\tau) = u^{k-\frac{1}{3}}$$



VI етап: $t = t_k + \frac{2}{3}\tau$,

$$u(t_k + \frac{2}{3}\tau) = u^{k+\frac{2}{3}}$$

V етап: $t = t_k + \frac{1}{3}\tau$,

$$u(t_k + \frac{1}{3}\tau) = u^{k+\frac{1}{3}}$$

IV етап: $t = t_k$

$$u(t_k) = u^k$$

$$\Lambda_1 u_{ijm}^k = \frac{h_{1,i+1} u_{i-1,j,m}^k - 2h_{1,c} u_{ijm}^k + h_{1,i} u_{i+1,j,m}^k}{h_{1,c} h_{1,i} h_{1,i+1}},$$

$$\Lambda_2 u_{ijm}^k = \frac{h_{2,j+1} u_{i,j-1,m}^k - 2h_{2,c} u_{ijm}^k + h_{2,j} u_{i,j+1,m}^k}{h_{2,c} h_{2,j} h_{2,j+1}},$$

$$\Lambda_3 u_{ijm}^k = \frac{h_{3,m+1} u_{i,j,m-1}^k - 2h_{3,c} u_{ijm}^k + h_{3,m} u_{i,j,m+1}^k}{h_{3,c} h_{3,m} h_{3,m+1}}.$$

Система різницьових рівнянь для першого етапу

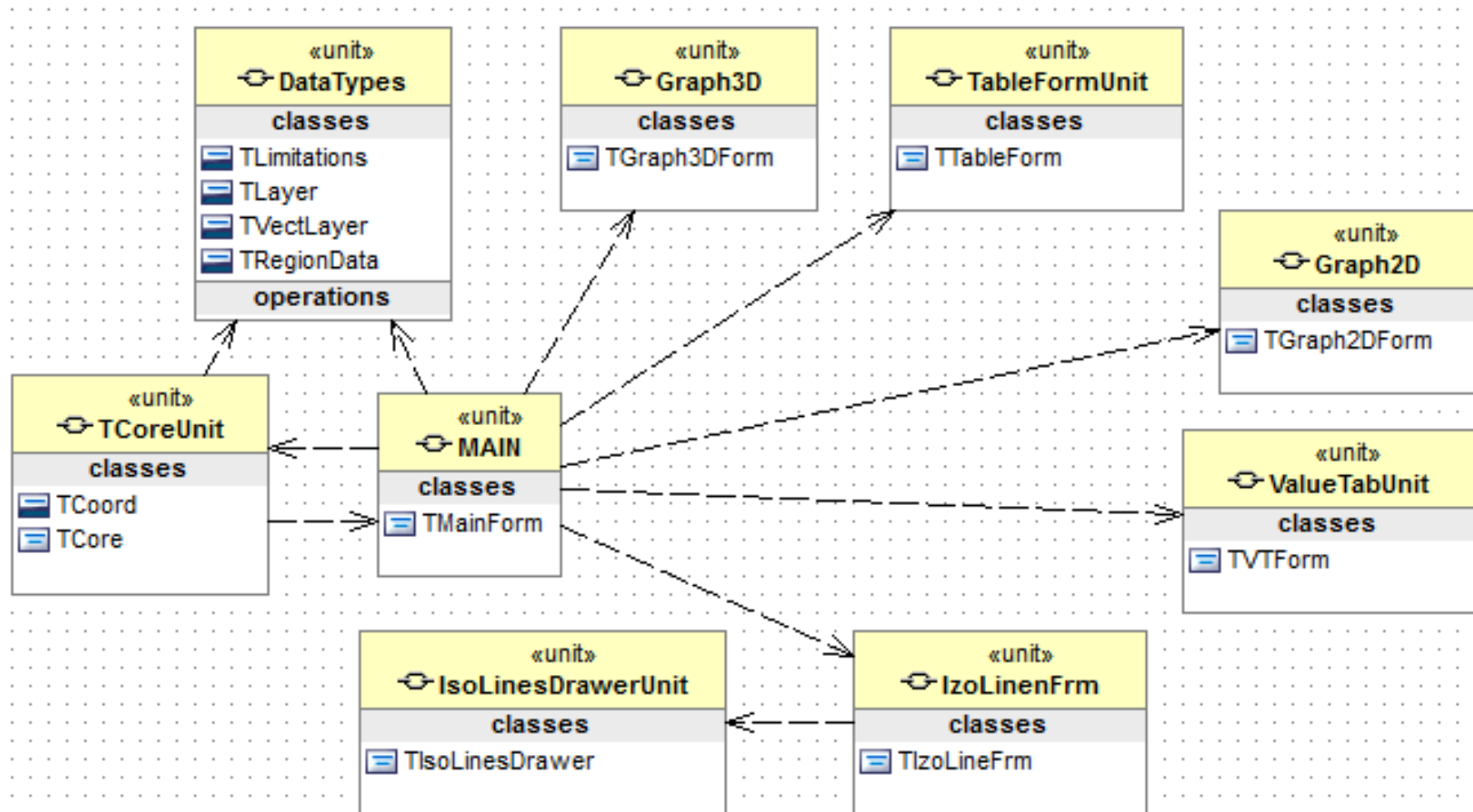
$$\begin{pmatrix} A_{j_s, j_s} & A_{j_s, j_s+1} & & & & \\ a_{j_s+1, j_s} & a_{j_s+1, j_s+1} & a_{j_s+1, j_s+2} & & & \\ & & \dots & & & \\ & & & a_{j, j-1} & a_{j, j} & a_{j, j+1} \\ & & & & \dots & \\ & & & & & a_{j_f-1, j_f-2} & a_{j_f-1, j_f-1} & a_{j_f-1, j_f} \\ & & & & & A_{j_f, j_f-1} & A_{j_f, j_f} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_{i, j_s, m}^{k-2/3} \\ \Delta u_{i, j_s+1, m}^{k-2/3} \\ \dots \\ \Delta u_{i, j, m}^{k-2/3} \\ \dots \\ \Delta u_{i, j_f-1, m}^{k-2/3} \\ \Delta u_{i, j_f, m}^{k-2/3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{j_s} \\ \beta_{j_s+1} \\ \dots \\ \beta_j \\ \dots \\ \beta_{j_f-1} \\ B_{j_f} \end{pmatrix},$$

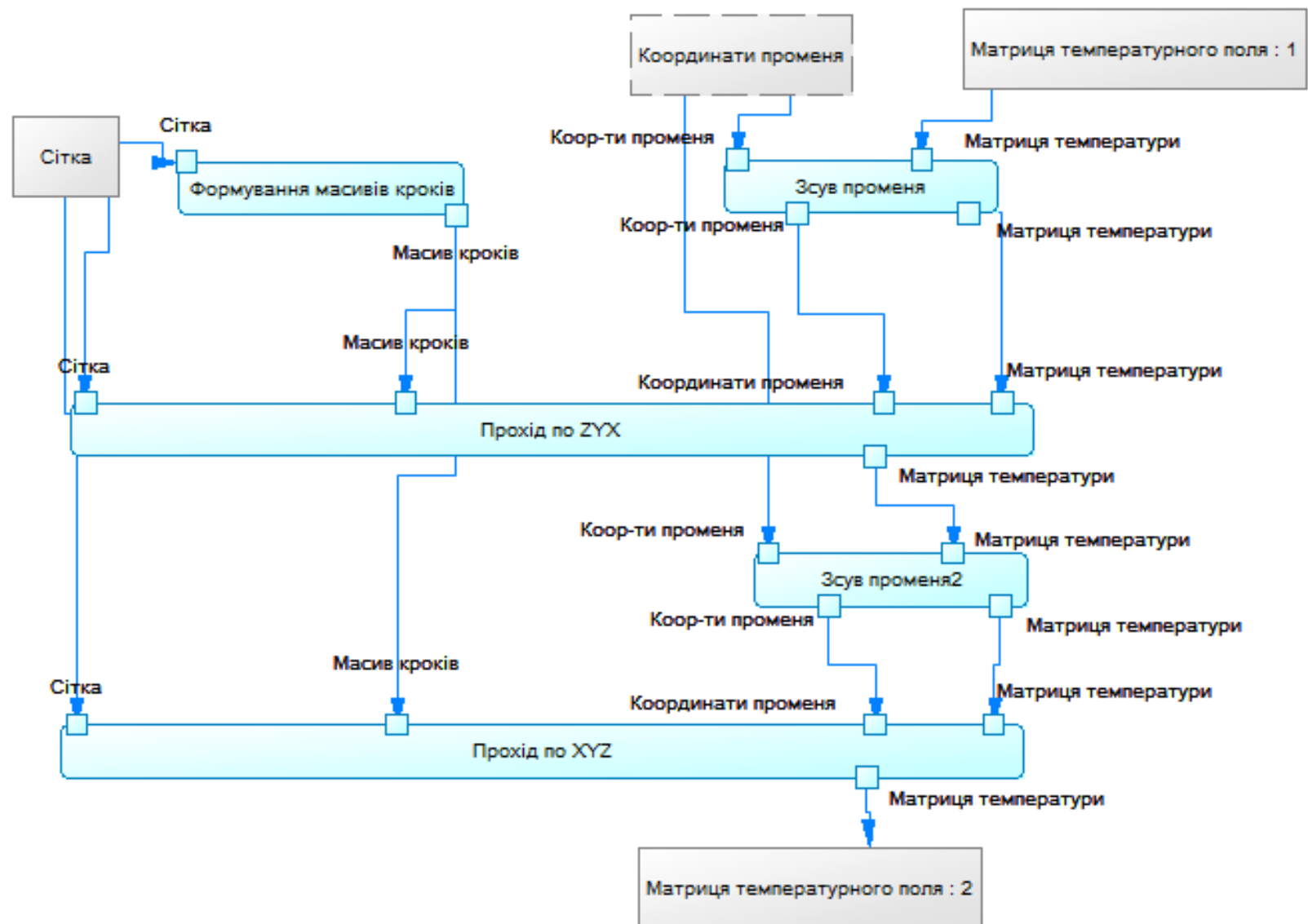
$$u_{i, j, m_s}^{k-\frac{2}{3}} - u_{i, j, m_s+1}^{k-\frac{2}{3}} = \frac{q_{i, j}^{k-\frac{2}{3}}}{\lambda_2 h_{3, m_s+1}}$$

$$\begin{aligned} -\sigma h_{2, j+1} u_{i, j-1, m}^{k-\frac{1}{3}} + (C + 2\sigma h_{2, c}) u_{i, j, m}^{k-\frac{1}{3}} - \sigma h_{2, j} u_{i, j+1, m}^{k-\frac{1}{3}} = \\ = \sigma h_{2, j+1} u_{i, j-1, m}^{k-\frac{2}{3}} + (C - 2\sigma h_{2, c}) u_{i, j, m}^{k-\frac{2}{3}} + \sigma h_{2, j} u_{i, j+1, m}^{k-\frac{2}{3}} \end{aligned} \quad \sigma = \frac{\lambda \tau}{2h_{3, c} h_{3, m} h_{3, m+1}}$$

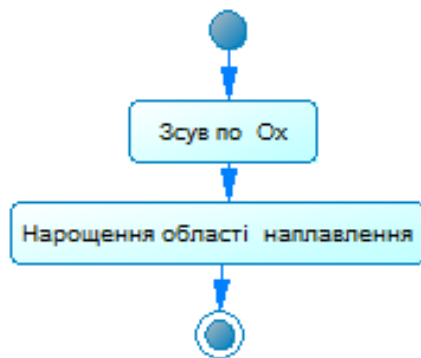
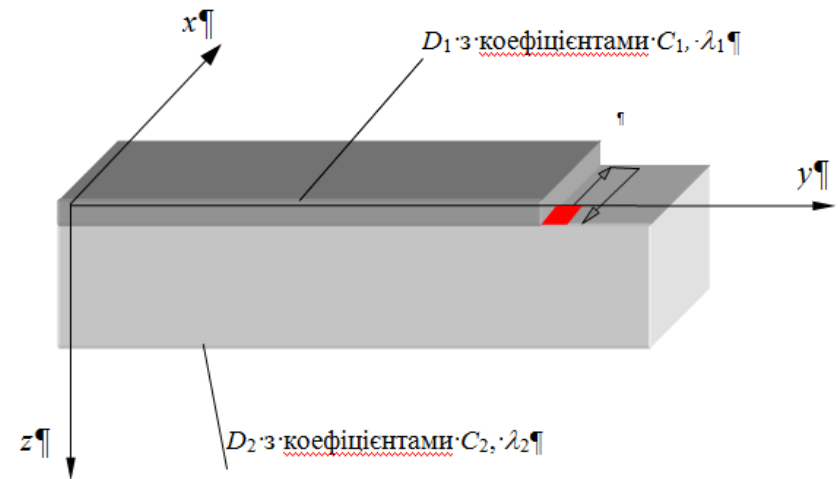
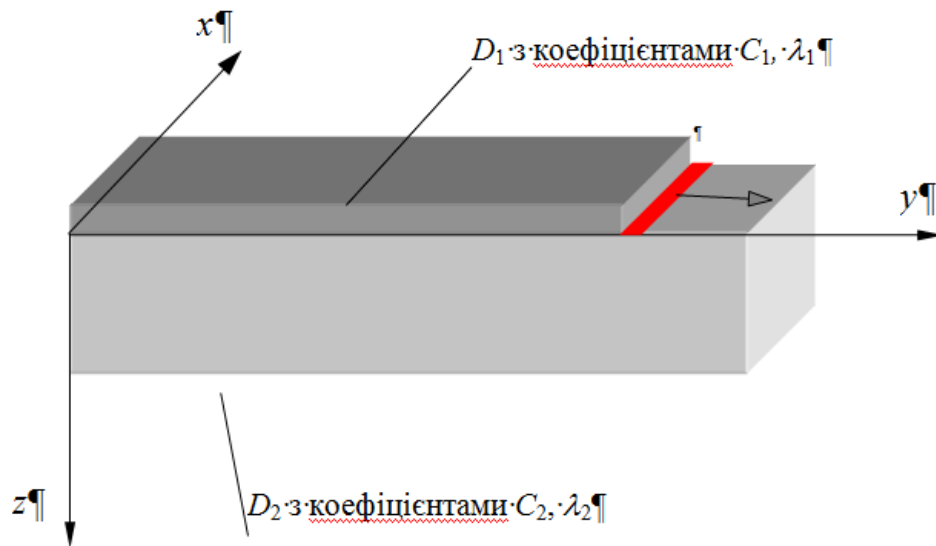
$$\begin{aligned} (\lambda_2 + \alpha h_{3, 1}) u_{i, j, \zeta}^{k-\frac{2}{3}} - \lambda_2 u_{i, j, \zeta+1}^{k-\frac{2}{3}} &= \alpha h_{3, \zeta+1} U_c \cdot (C_1 (\frac{u_{i, j, \zeta-1}^{k-1} + u_{i, j, \zeta}^{k-1}}{2}) - \sigma_\zeta) u_{i, j-1, m}^{k-\frac{1}{3}} + (C_1 (\frac{u_{i, j, \zeta-1}^{k-1} + u_{i, j, \zeta}^{k-1}}{2}) + C_2 (\frac{u_{i, j, \zeta+1}^{k-1} + u_{i, j, \zeta}^{k-1}}{2}) + \\ &+ \sigma_\zeta + \zeta_\zeta) u_{i, j, m}^{k-\frac{1}{3}} + (C_2 (\frac{u_{i, j, \zeta+1}^{k-1} + u_{i, j, \zeta}^{k-1}}{2}) - \zeta_\zeta) u_{i, j+1, m}^{k-\frac{1}{3}} = \\ \lambda u_{i, j, n_3-1}^{k-\frac{2}{3}} - (\lambda + \alpha h_{3, n_3}) u_{i, j, n_3}^{k-\frac{2}{3}} &= -\alpha h_{3, n_3} U_c \\ &= \sigma_\zeta (u_{i, j, \zeta-1}^{k-1} - u_{i, j, \zeta}^{k-1}) - \zeta_\zeta (u_{i, j, \zeta}^{k-1} - u_{i, j, \zeta+1}^{k-1}) + C_1 (\frac{u_{i, j, \zeta-1}^{k-1} + u_{i, j, \zeta}^{k-1}}{2}) (u_{i, j, \zeta-1}^{k-1} + u_{i, j, \zeta}^{k-1}) + \\ &+ C_2 (\frac{u_{i, j, \zeta+1}^{k-1} + u_{i, j, \zeta}^{k-1}}{2}) (u_{i, j, \zeta}^{k-1} + u_{i, j, \zeta+1}^{k-1}) \end{aligned}$$

Взаємодія модулів





Моделювання руху променя лазера



Користувацький інтерфейс

Сплавлення металів за допомогою лазера

Геометричні параметри | Параметри середовища | Параметри розрахунку

Параметри деталі

Розмір по X (см)

Розмір по Y (см)

Розмір по Z (см)

Висота покриття (см)

Параметри променя

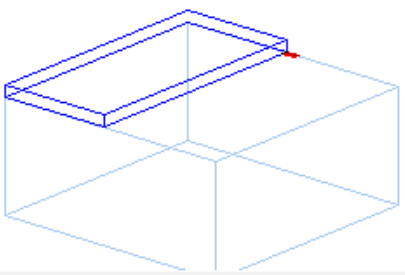
Промінь

Ширина (см)

Потужність (кг/с³)

Швидкість (см/с)

Положення променя по Y



< Поп. крок Наст. крок >

Геометричні параметри | Параметри середовища | Параметри розрахунку

Параметри матеріалу підкладки

C (см²/с²*град)

Ro (кг/см³)

Lambda (кг*см/с³*град)

Alfa (кг/с³*град)

Параметри матеріалу металу покриття

Ro (кг/см³)

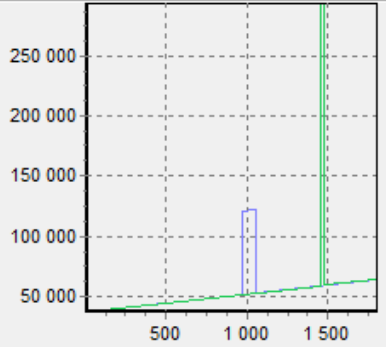
Lambda (кг*см/с³*град)

Концентрація частинок, Vf

Температура

Зовнішня (C)

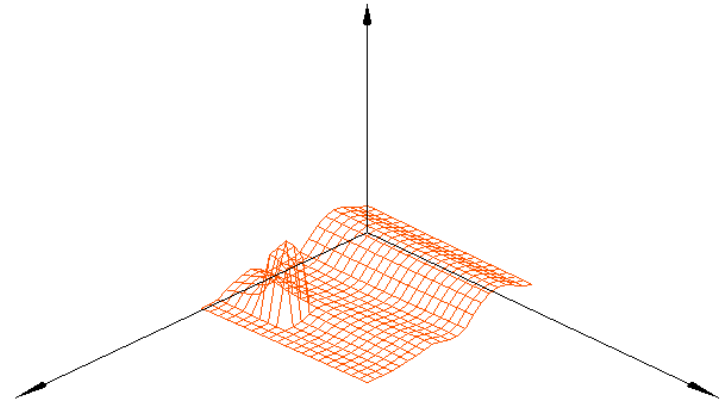
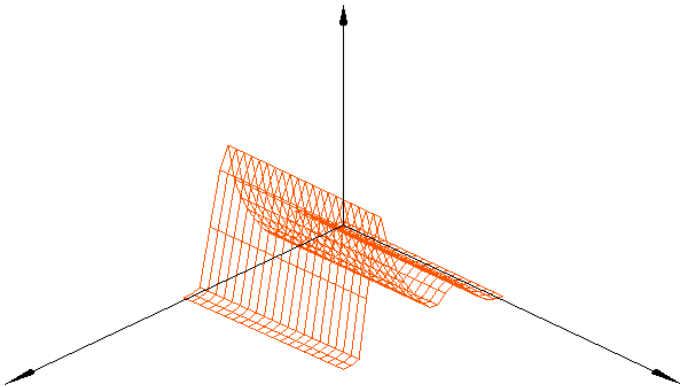
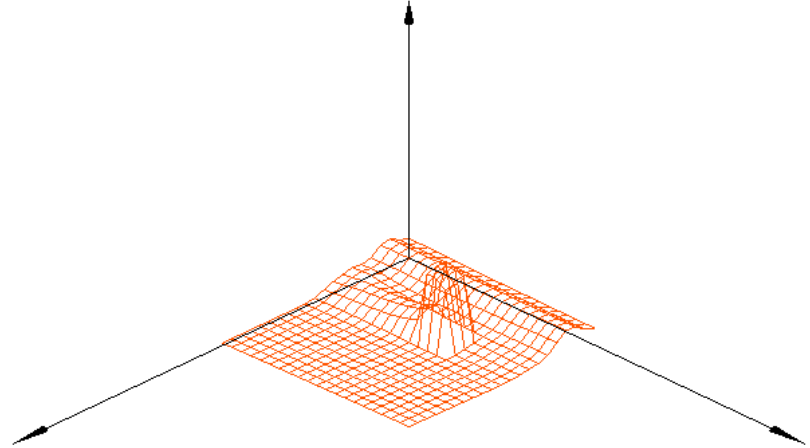
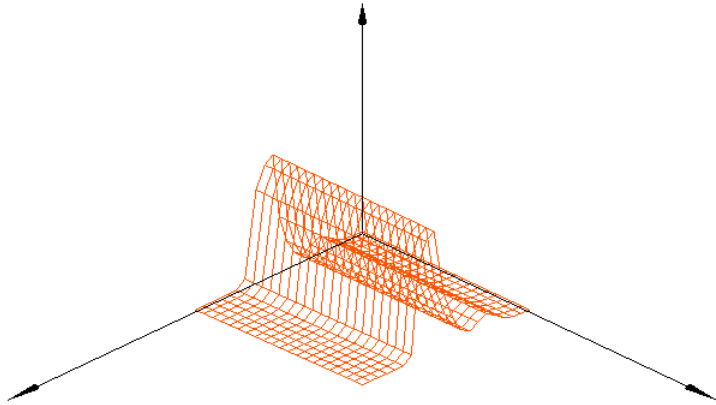
Покриття (C)



Коефіцієнт теплоємності

	підкладка	покриття
C(T0=20):	3,7E4	3,7E4
TS:	970	1450
TL:	1060	1480
Прих. Тп	7E4	2,35E5
Tk (<> T0)	1800	1800
C(Tk)	6,4E4	6,4E4

Графік розподілу



Висновки

- Розроблено програмний засіб моделювання температурного поля в процесі сплавлення рідкого та твердого металу за допомогою лазера.
- Математичною моделлю температурного поля обрано нестационарне нелінійне тривимірне рівняння теплопровідності в частинних похідних. Для лінеаризації моделі обрана двоциклічна по координатна схема, виведені рівняння для систем різницевих рівнянь.
- Системи рівнянь розв'язано методом Гауса для трьохдіагональної матриці. Використана кусково-лінійна апроксимація для коефіцієнту об'ємної теплоємності.
- Запрограмовано алгоритм відслідковування змінної області визначення. Реалізовано два варіанти фокусування променя та розподілу потужності. Реалізовано програмну візуалізацію області визначення, створено користувацький інтерфейс.
- Розроблений програмний засіб впроваджено на кафедрі лазерної техніки та фізико-технічних технологій для виконання чисельних експериментів.