

УДК 517.946.9

## Дослідження температурного поля дроту під час електропластичного волочіння

О. Б. Кобильська

*Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, Україна*

Рассматривается математическая модель температурного поля в движущейся изотропной осесимметрической среде с циклически действующим импульсным источником тепла. Изучаются особенности действия импульсных источников тепла на температурное распределение. В данной работе исследуется температурное распределение в осесимметрической среде во время электропластического волочения в зависимости от вида импульсного источника тепла. Получены численные расчеты для материалов цинк и медь, построены графики температурных распределений во время электропластического волочения.

**Ключевые слова:** *начально-краевая задача, волочение, импульсный источник тепла*

Розглядається математична модель температурного поля у рухомому ізотропному осесимметричному середовищі з циклічно діючим імпульсним джерелом тепла. Вивчаються особливості дії імпульсних джерел тепла на температурний розподіл. В даній роботі досліджується температурний розподіл в осесимметричному середовищі під час електропластичного волочіння в залежності від виду імпульсного джерела тепла. Отримано чисельні розрахунки для матеріалів цинк і мідь, побудовані графіки температурних розподілів під час електропластичного волочіння.

**Ключові слова:** *початково-крайова задача, волочіння, імпульсне джерело тепла*

In the paper the mathematical model of temperature field in the mobile isotropic axisymmetric environment with periodically operating heat sources is considered. Features of action of pulse sources of heat on temperature distribution are studied. In this paper the temperature distribution in axisymmetric medium during electroplastic drawing is investigated depending on a type of a pulse source of heat. Numerical calculations for materials zinc and copper are received. Graphs of temperature distributions during electroplastic drawing are built.

**Key words:** *boundary value problem, drawing, pulsed heat source.*

### 1. Актуальність роботи.

Виробництво тугоплавкого і важко деформованого дроту без попереднього розігріву перед пластичною деформацією призводить до зниження якості продукції і часто буває неможливим. Застосування технології електропластичного волочіння (ЕПВ) в процесі виробництва тонкого дроту під впливом періодично діючого імпульсного внутрішнього джерела тепла дозволяє знизити зусилля пластичної деформації та проводити процес волочіння при понижених температурах [1]. Температурне поле під час процесу волочіння можна визначити, досліджуючи математичну модель теплового процесу ЕПВ. Математична модель такого процесу у найбільш повній постановці приводить до дослідження та розв'язання нелінійних та нелокальних задач для рівняння теплопровідності [2,3].

## 2. Постановка задачі.

З математичної точки зору температурне поле рухомого дроту під час процесу ЕПВ можна розглядати як температурне поле рухомого осесиметричного ізотропного середовища з імпульсними внутрішніми джерелами тепла, які породжуються дією електричного струму силою  $I$  в зоні нагрівання. При таких умовах температурне поле в зоні нагрівання може бути визначено за допомогою розв'язку крайової задачі для рівняння теплопровідності [2,3].

Розглянемо загальну постановку задачі визначення температурного поля в обмеженому рухомому зі швидкістю  $v(t)$  середовищі, яке розігрівається внутрішніми джерелами тепла. Коли нагрівання дроту відбувається одночасно з пластичною деформацією, а температура не дозволяє проводити процес волочіння не порушуючи умову нерозривності, це призводить до обриву дроту [1]. Тому одночасно з питанням визначення температурного розподілу, під час перехідного процесу, виникає проблема визначення таких параметрів керування процесом нагрівання, при яких температурне поле під час руху середовища зі змінною  $v(t)$  швидкістю стає стаціонарним. Цього можна досягти, обравши відповідним чином щільність джерел тепла та підібравши відповідним чином режими імпульсного джерела тепла, а саме скважність, тривалість одного імпульсу.

Починаючи з деякого моменту часу, при  $t \geq t_0$ , швидкість руху дроту стає постійною  $v = const$ . Вибір параметрів керування та режиму імпульсного джерела тепла дозволить підтримувати в зоні ЕПВ необхідний, з технологічної точки зору, температурний розподіл. Методи визначення параметрів керування тепловим процесом під час ЕПВ розглянуті в [2]. В даній роботі досліджується залежність теплового процесу під час ЕПВ від виду імпульсного джерела тепла. Розглянемо початково-крайову задачу для рівняння теплопровідності, розв'язання якої дозволяє визначити температурне поле рухомого дроту, в зоні нагрівання якого, діє джерело тепла з щільністю  $w(z, t, T)$ , що залежить від координат та температури [2].

Оскільки перехід від нестационарного температурного поля (перехідний процес) до стаціонарного процесу відбувається неперервно в часі, то на початку стаціонарного процесу повинна виконуватися умова узгодження температурних розподілів, тобто  $\lim_{t \rightarrow t_0 - 0} T(r, z, t) = \lim_{t \rightarrow t_0 + 0} T(r, z, t)$ .

## 3. Мета роботи.

З'ясувати вплив імпульсного джерела тепла на температурний розподіл у рухомому середовищі.

## 4. Матеріал і результати досліджень.

Визначення нестационарного температурного розподілу приводить до розв'язання наступної початково-крайової задачі для рівняння теплопровідності в області  $\Omega_t$ ,  $\Omega_t : \{(z, r, t) | 0 < z < l, 0 < r < r_0, 0 < t \leq t_0\}$  [3]

$$\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \nu c \rho_n \frac{\partial T}{\partial z} - c \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = -W(z, t, T), (r, z) \in \Omega_t \quad (1)$$

$$T(r, z, 0) = T_0, \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = f_{12} \left[ \alpha(T_c - T) - \varepsilon \sigma (T_c^4 - T^4) \right], \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = f_{12} \left[ \alpha(T - T_c) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4) \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = f_{12} \left[ -\alpha(T)(T - T_c) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4) \right], \quad (4)$$

де  $w(z, t, T)$  у випадку залежності джерел тепла від координати і часу має вигляд

$$W(z, t, T) = f_{11}(z) f_2(T), \quad (5)$$

$$W(z, t, T) = f_{12}(z) f_2(T),$$

$$f_2(T) = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \beta T)}{\pi^2 r_0^4}, \quad \rho_0, \beta - \text{питомий опір і температурний коефіцієнт}$$

опору дроту. Функції  $f_{11}(z), f_{12}(z), f_{13}(z)$  в залежності від технологічних особливостей процесу можуть мати вигляд

$$f_{11}(t) = \left| \sin \left( \frac{t\pi}{t_0} \right) \right|,$$

$$f_{12}(t) = \begin{cases} m \frac{t}{t_0} - mn, & nt_0 \leq t \leq \left( n + \frac{1}{m} \right) t_0 \\ 0, & \left( n + \frac{1}{m} \right) t_0 < t \leq (n+1)t_0, t < 0 \end{cases},$$

$$f_{13}(t) = \begin{cases} \frac{2kt}{t_0} - 2kn, & nt_0 \leq t \leq (n + \frac{1}{2mk})t_0 \\ \frac{1}{m}, & (n + \frac{1}{2mk})t_0 < t \leq (n + \frac{2m-1}{2mk})t_0 \\ -\frac{2kt}{t_0} + 2(kn+1), & (n + \frac{2m-1}{2mk})t_0 < t \leq (n + \frac{1}{k})t_0 \\ 0, & (n + \frac{1}{k})t_0 < t < (n+1)t_0 \end{cases}$$

Тут параметри  $m, n$  визначають циклічний характер дії джерел тепла. Функції  $f_{11}(z), f_{12}(t), f_{13}(t)$  є кусково-неперервними і додатно визначеними. Розв'язок шукаємо чисельним методом. Використовуємо консервативну різницеву схему. Лінії розриву функцій  $f_{1i}(t)$  паралельні вісі  $x$ . Оберемо спеціальну сітку, коли усі точки розриву є вузлами. У даному випадку сітка буде рівномірною. Для чисельних розрахунків було обрано матеріал цинк та мідь.

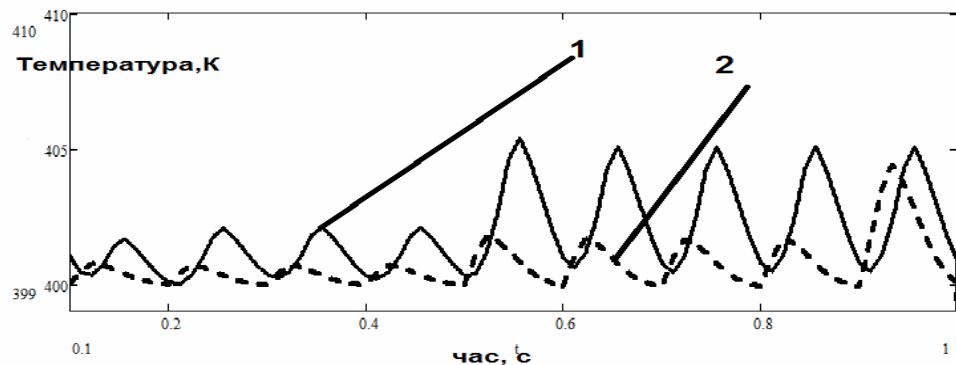


Рис. 1. а  
крива 1  $m=2$ , крива 2  $m=5$

Зміна скважності  $m$  та тривалості одного імпульсу  $t_0$  дозволяє змінювати температуру, що в свою чергу впливає на проведення процесу електропластичного волочіння. рис. 1.а, 1. б

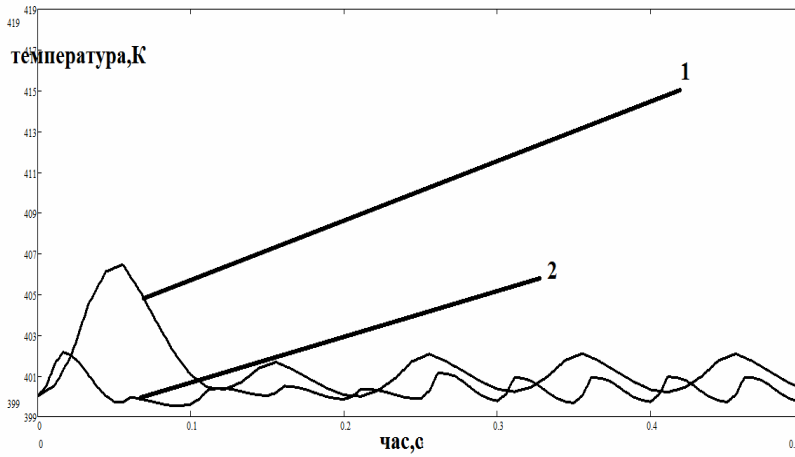


Рис. 1. б  
крива 1–  $t_0=0.1$ , крива 2–  $t_0=0.05$ .

Рис. 1 Температурні розподіли отримані із розв'язку (1)- (5) при  $f_{12}(t)$  та при різних значеннях  $t_0$

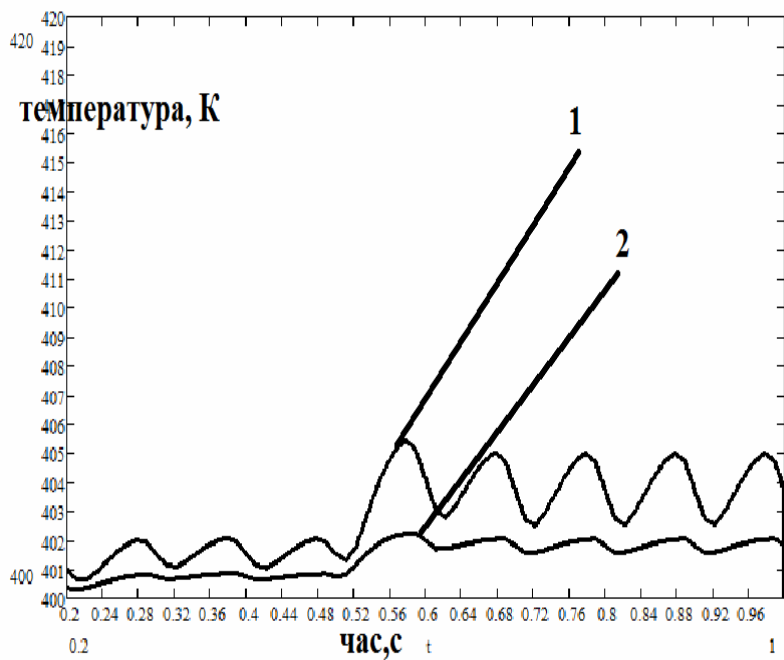


Рис. 2 Температурні розподіли отримані із розв'язку (1)- (5) для  $f_{13}(t)$  та для значеннях струму крива 1–  $I=10$  А, крива 2–  $I=30$  А

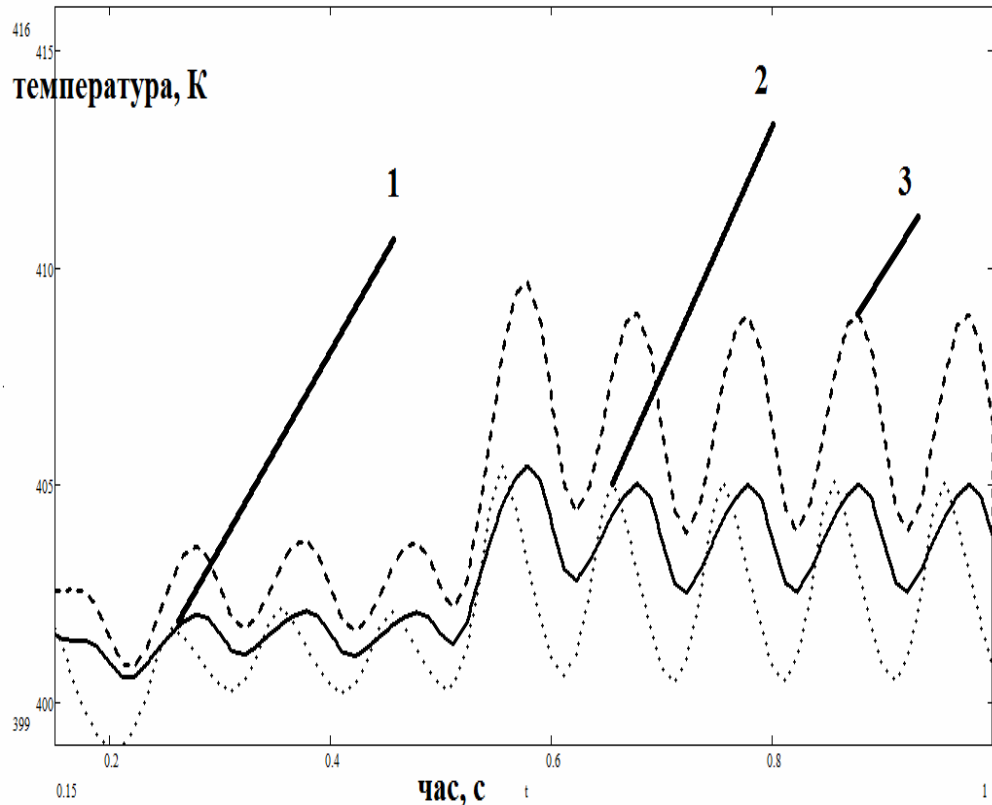


Рис. 3 Температурні розподіли отримані із (1)-(5) при різних типах імпульсних джерел тепла. крива 1–  $f_{12}(t)$ , крива 2–  $f_{13}(t)$ , крива 3–  $f_{11}(t)$ .

Температурні розподіли отримані для різних типів імпульсів джерел тепла свідчать, що графіки температурного розподілу подібні. Із рисунку 3 видно, що не змінюючи інших параметрів проведення процесу, а лише змінюючи тип імпульсу можна змінити значення температури в різних точках рухомого середовища.

### 5. Висновки.

Розглянута математична модель теплового процесу, що відбувається в рухомому осесиметричному ізотропному середовищі з діючими імпульсними внутрішніми джерелами тепла, що породжуються дією електричного струму силою  $I$  в зоні нагрівання. Досліджено вплив характеру імпульсного джерела тепла на температурний розподіл в рухомому дроті під час процесу електропластичного волочіння

Результати чисельних розрахунків температурних розподілів взяті із натурних експериментів волочіння дроту, що проводились раніше і описані в роботах [4-9], показали, що температура підвищується несуттєво, в межах  $5-10^0 C$ . Отримано картину температурних розподілів, із якої видно, що підбір

характеру імпульсів і зміна параметрів імпульсного джерела тепла дозволяє підбирати необхідний режим електропластичного волочіння.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Влияние электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов: Монография / О. А. Троицкий, В.П. Ляшенко, Е.Б. Кобыльская и др. под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во «СибГИУ», 2011. – 218 с.
2. Троицкий О.А. Электропластическое волочение и новые технологии создания облегченных проводов / О.А. Троицкий, В. И. Сташенко, В.Г. Рыжков, В.П. Ляшенко, Е.Б. Кобыльская // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). – Харьков, 2011. – Вып. 4/2011. – С. 111–117.
3. Ляшенко В.П. Исследование влияния термической составляющей на свойства проволоки при электропластическом волочении / В.П. Ляшенко Е. Б. Кобыльская, Т.А. Григорова, О.А. Троицкий // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2011. – Вип. 4/2011 (69), част. 1. – С. 57–62.
4. Троицкий О.А., Моисеенко В.М., Спицын В.И. и др. Электропластическая деформация вольфрама // ДАН СССР. – 1987. – Т. 295. – № 5. – С. 251–255.
5. В.П. Ляшенко Исследование влияния импульсного действия тока на температурное распределение в движущейся проволоке/ В.П. Ляшенко, О.Б.Кобыльська //Сборник научных трудов международного форума-конкурса молодых ученых "Проблемы недропользования". Санкт-Петербург, 2010. – С. 211 – 215.
6. Ляшенко В.П. Математична модель термоциклічної обробки металевих матеріалів/ В.П. Ляшенко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2003. – Вип. 6/2003 (23). – С. 8–11.
7. Ляшенко В.П. Математичні моделі та методи розв'язку крайових задач у рухомій циліндричній області / В.П. Ляшенко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2012. – Вип. 5/2012 (76). – С. 28–33.
8. Ляшенко В.П., Григорова Т.А. Моделювання процесів спікання у контейнері. // Вестник Херсонского национального технического университета. – Вып. 3(39). – Херсон: ХНТУ, 2010. – С. 292 – 296.
9. Ляшенко В.П., Ванін В.А. Задачі для рівняння теплопровідності у порошковій металургії. // Вісник НТУ «ХПІ» Математичне моделювання в техніці та технологіях. –Харків, 2010. – Вип. 68. – С. 108 – 113.