

УДК 517.9:621.74
©2014

В.І. ЦОЦКО,
старший викладач

Б.Г. ПЕЛІШЕНКО,
кандидат фізико-математичних наук,
професор
Дніпропетровський державний
аграрно-економічний університет,
Україна
E-mail: info@dsau.dp.ua

**ШВИДКІСТЬ КРИСТАЛІЗАЦІЇ
ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ
ВУШОК ТРАКІВ
У КОНТЕКСТІ ПОВЕРХНЕВОГО
ЛЕГУВАННЯ ВИЛИВКІВ**

Досліджено динаміку розподілу температури в системі ливарний стрижень–розплав у формі в процесі кристалізації вушок виливків траків. Поставлена задача про фазовий перехід для поверхневого шару вушок вирішувалася методом скінчених різниць з використанням неявної схеми для складання системи різницевої рівнянь. Одержано часову залежність переміщення фронту кристалізації в графічній і аналітичній формах. Визначено швидкості охолодження поверхневих шарів вушок виливків траків у процесі їх кристалізації, які дозволяють оцінити величину механічних напруг і темпи зміни коефіцієнтів дифузії компонентів за поверхневого легування вушок.

Ключові слова: вушка виливків траків, рівняння теплопровідності, швидкість кристалізації, нестационарне температурне поле, розплав, поверхневе легування.

Для поверхневого зміцнення різноманітних деталей і цілісних виробів з металу широко використовуються методи ТО та ХТО. Насичення поверхневого шару металів, пов'язане з тривалими їх витримками в умовах підвищених температурах, що дуже енергоємно та призводить до значних неконтрольованих енергетичних втрат. Сучасні тенденції розвитку виробництва конструкційних матеріалів та виробів з них спрямовані на поліпшення їх якості з максимальною економічністю та ефективністю умов виробництва. У даному аспекті проводяться дослідження в напрямку прискорення процесів ХТО, зокрема шляхом інтенсивної обробки імпульсного характеру [1].

До ряду деталей, особливо тих, що функціонують в умовах абразивного зношування, наприклад до робочих органів ґрунтообробних машин [2], пред'являють підвищені вимоги по міцностних характеристиках, зокрема по твердості, зносостійкості та корозійній стійкості. Використання місцевого нагріву в поєднанні з гартуванням та легуванням дозволяє підвищити міцність інструмен-

тів, штампів, валків для прокатних станів і блюмінгів, різальних кромки знарядь та машин, у тому числі сільськогосподарського призначення. Наприклад, місцева ТО може бути використана під час ремонту та з метою зміцнення деталей та вузлів сільськогосподарської техніки на базі майстерень малих та середніх підприємств агропромислового сектору економіки, у фермерських господарствах. Тому розробка простих та ефективних методів зміцнення поверхонь тертя деталей сільськогосподарських машин шляхом хіміко-термічної дії в локальних критичних об'ємах металу достатньо актуальна і вимагає нових технологічних рішень.

У сучасних технологіях локальної обробки поверхонь металу використовуються високоінтенсивні джерела енергії з густиною потоку від 10^3 до 10^9 Вт/см². При цьому досягаються надвисокі швидкості нагрівання $\sim(10^7-10^8)$ К/с, охолодження $\sim(10^4-10^6)$ К/с, а також граничні градієнти температури $\sim 10^6$ К/см, наприклад в умовах лазерної обробки або обробки вибухом. Електродуговий нагрів є одним із найбільш оптимальних

та технологічних джерел місцевого нагріву, оскільки за порівняно невисокої собівартості дозволяє формувати енергетичні потоки великої тривалості інтенсивністю понад 10^3 Вт/см².

На локальну дію енергетичного джерела значний інерційний вплив створюють периферійні частини оброблюваних деталей. Дифузійні процеси споріднені з нагріванням, вони обмежуються температурними полями, виявлення характеру яких у заданих умовах нагрівання є надзвичайно важливим для формування в поверхневому шарі деталей необхідних фізичних властивостей.

В умовах місцевої термічної обробки заданих ділянок поверхні металу в багатьох випадках, з метою збільшення ефективності дифузійного насичення поверхневого шару металу, застосовують максимально високі температури теплової дії, часто на межі з температурою плавлення. Для вказаної мети, зокрема, може бути використана енергетична дія прямої або непрямої електричної дуги.

Так, співробітниками Дніпропетровського агроуніверситету під керівництвом проф. Г.М. Воробйова був розроблений метод ХТО поверхневого шару низьковуглецевої сталі зі застосуванням непрямої дуги (рис. 1) [3, 4]. Впровадження розробки показало необхідність детального дослідження нестационарного температурного поля поверхневого шару металу.

Для контролю фазових перетворень і можливості керувати ними в процесі високоінтенсивних енергетичних дій на поверхню металу необхідно точно знати поле температур поверхневого шару і динаміку його формування. Для швидкоплинних нерівноважних процесів в умовах локального нагрівання і охолодження поверхні металу експериментально визначити температуру в реальному часі, швидкості її зміни, інші параметри теплових потоків досить важко, а інколи просто неможливо.

Тому при вирішенні багатьох задач динамічної металофізики звертаються до математичного моделювання досліджуваних явищ, тим більше, що рівень інформаційних технологій неухильно зростає. По-перше, це істотно заощаджує матеріальні та енергетичні ресурси, по-друге, досягається значний вигреш у часі, що інколи має переважаче значення в сучасному конкуруючому науковому та технічному середовищі.

Виходячи з цього, дослідження особливостей розподілу температури в поверхневому шарі оброблюваного металу є актуальними як у пізнавальному аспекті, так і у прикладному значенні. Виявленням поведінки нерівноважних температурних полів, що формуються під впливом локальної енергетичної дії на поверхню металу, для оптимального

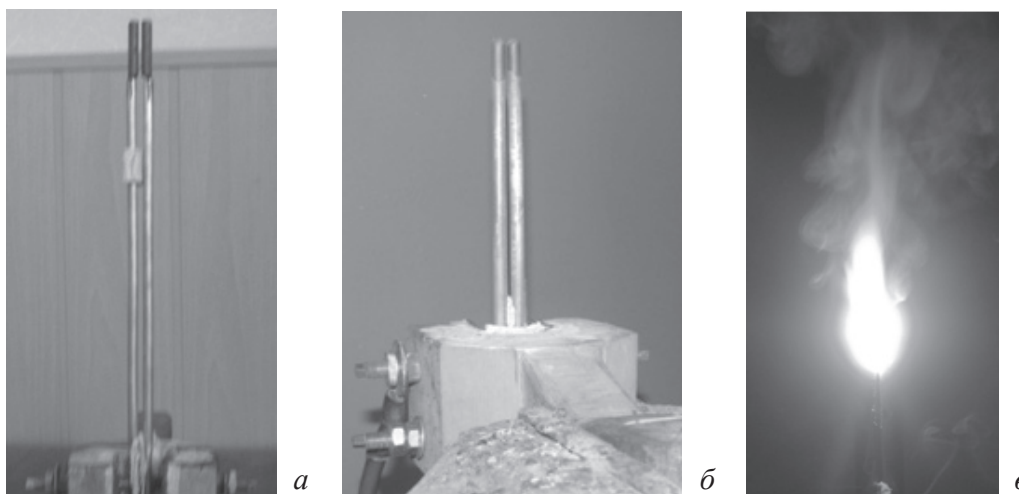


Рис. 1. Апробація дії непрямої дуги: а – графітових електродів; б – композитних електродів на основі графіту; в – демонстрація робочого режиму

поєднання термічної дії з дифузійним насиченням поверхневого шару і контрольованих твердофазних перетвореннях у ньому постає важливою науковою і технічною задачею.

Експериментальні дослідження поверхневого легування отворів вушок траків гусениць, що використовуються в сільськогосподарській та будівельній техніці (рис. 2), показали [5] обмеженість глибини насичення поверхневого шару виливків траків в області вушок легуючими компонентами та недостатню якість зміцненого шару металу.

Мета дослідження – підвищення глибини та якості зміцненого шару виливків траків в області їх отворів.

Для цього:

- проведено математичне моделювання поведінки температурного поля в поверхневому шарі виливків траків в області їх отворів при кристалізації металу;
- визначена швидкість кристалізації поверхневого шару вушок виливків траків в області їх отворів;
- оптимізовано дифузійне насичення поверхневого шару вушок.

Поверхня вушок в області отворів має циліндричну форму і достатньо протяжна уздовж осі ливарних стрижнів, так що задачу про фазовий перехід (задачу Стефана) для поверхневого шару вушок зручно подати в циліндричних координатах. Припускаючи однорідність температурного поля по кутовій і осьовій координатах, можна обмежитися лише радіаль-

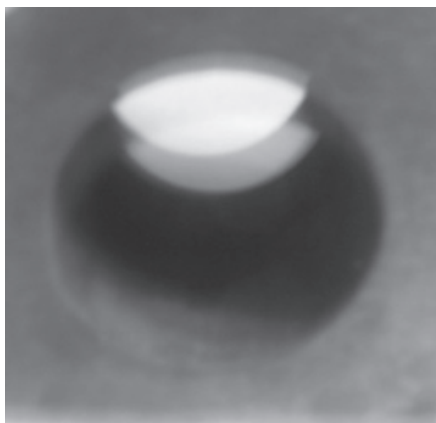


Рис. 2. Вушко траків гусениць

ною складовою оператора Лапласа в рівнянні теплопровідності, в якому температура T буде функцією лише відстані від осі ливарного стрижня уздовж його радіуса – r та часу – t .

У процесі охолодження і кристалізації розплаву розподіл температури в ливарному стрижні буде змінюватися, але, внаслідок радіальної симетрії системи, градієнт температури на осі стрижня весь час дорівнюватиме нулю. Температура розплаву у формі також змінюється за рахунок передачі енергії в ливарний стрижень та крізь ливарну форму в оточуюче середовище. Серцевина виливка завжди матиме температуру, вищу від поверхневих шарів. Тому для серцевинного шару вушок з певною радіальною координатою $r = r^{\wedge}$ градієнт температури повинен змінювати знак, тобто приймати нульове значення. Вважається, що область нульового градієнта розплаву $r = r^{\wedge}$ знаходиться посередині стінки вушок, у крайньому разі дана умова виконується під час кристалізації поверхневого шару вушок трака.

На поверхні контакту ливарного стрижня з розплавом повинна виконуватись умова збереження теплових потоків.

Кристалізація розплаву, що вступив у тепловий контакт з ливарним стрижнем, починається не відразу, а через деякий час t_0 , уздовж якого розплав на поверхні контакту $r = r_0$, де r_0 – радіус ливарного стрижня ($r_0 = 12$ мм), охолонуть до температури кристалізації. Чисельним методом був розрахований час t_0 досягнення температури кристалізації на межі ливарного стрижня з розплавом $t_0 = 2,48$ мс.

Після досягнення температури кристалізації на поверхні контакту ливарного стрижня з розплавом починається утворення нової, твердої фази. Зміна температури в системі ливарний стрижень–твердий розплав–рідкий розплав описується рівняннями:

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial T_0}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_0}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_0}{\partial r}, \quad 0 < r < r_0; \quad (1)$$

$$\frac{1}{a_1^2} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r}, \quad r_0 < r < r^*; \quad (2)$$

$$\frac{1}{a_2^2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad r^* < r < r^{\wedge}, \quad (3)$$

де $T_0(r,t)$, $T_1(r,t)$, $T_2(r,t)$ – температури відповідно в стрижні, твердому та рідкому роз-

плавів; a_0^2 , a_1^2 та a_2^2 – відповідні коефіцієнти температуропровідності; $r^* = \zeta(t)$ – радіальна координата точок фронту кристалізації в момент часу t .

Граничні умови задачі фіксуються співвідношеннями:

$$\left. \frac{\partial T_0}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=r^*} = 0; \quad k_0 \left. \frac{\partial T_0}{\partial r} \right|_{r=r_0} = k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=r_0},$$

$$k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=r^*} - k_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=r^*} = \lambda \rho \frac{dr^*}{dt},$$

де k_0 , k_1 та k_2 – коефіцієнти теплопровідності ливарного стрижня твердого та рідкого розплавів відповідно; λ – питома теплота кристалізації; $\rho = \rho_l$ – густина твердої фази при температурі кристалізації.

Початковий розподіл температури в системі задається відповідно до часу t_0 .

Методи дослідження. Розв'язання поставленої задачі проводили методом скінчених різниць за неявною схемою обчислень [6, с. 561].

Неявні схеми для рівняння теплопровідності ведуть до системи алгебраїчних рівнянь для значень невідомої функції $T_{i,j+1}$ на новому (після вихідного $t = t_j$) часовому шарі $t = t_{j+1}$ ($j = 0, 1, 2, \dots$) [6, с. 590] виду $A_i T_{i-1} - C_i T_i + B_i T_{i+1} + D_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, N$, (4) ($0 < i < 120$ – для температури ливарного стрижня, $120 < i < 170$ – для температури твердого та рідкого розплаву) з виразами для різних коефіцієнтів рівнянь (1)–(3):

$$A_i = a^2 \frac{\tau}{h^2}, \quad B_i = a^2 \frac{\tau}{h^2} \left(1 + \frac{1}{i} \right),$$

$$C_i = a^2 \frac{\tau}{h^2} \left(2 + \frac{1}{i} \right) + 1, \quad D_i = T_{ij},$$

де a^2 – відповідний коефіцієнт температуропровідності; τ – часовий крок обчислень (значення коефіцієнта D_i у кожному новому часовому кроці замінюється попередніми значеннями температури в розрахункових вузлах).

Згідно з граничними умовами при $r = r_0$ та $r = r^*$:

$$A_0 = k_0, \quad B_0 = k_1, \quad C_0 = k_0 + k_1, \quad D_0 = 0;$$

$$A_{r^*} = k_1, \quad B_{r^*} = k_2, \quad C_{r^*} = k_1 + k_2, \quad D_{r^*} = \lambda \rho \frac{h^2}{\tau}.$$

Обчислення температурного поля системи (4) проводили методом прогонки [6, с. 591–592]. За опорну температуру, що за-

дає розрахунок усіх інших температур у вузлах, була вибрана температура на осі ливарного стрижня. У цьому випадку рішення системи (4) шукають у вигляді (обернена прогонка)

$$u_{i+1} = \alpha_{i+1} u_i + \beta_{i+1}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (5)$$

де коефіцієнти α_{i+1} та β_{i+1} визначаються за рекурентними формулами:

$$\alpha_i = \frac{A_i}{C_i - B_i \alpha_{i+1}}, \quad \beta_i = \frac{B_i \beta_{i+1} + D_i}{C_i - A_i \alpha_{i+1}}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1.$$

З граничної умови для $r = r^*$ визначали $\alpha_N = 1$ і $\beta_N = 0$, а потім послідовно знаходили всі інші коефіцієнти α_i та β_i системи (5). З початкових умов температура на осі стрижня відома, і за її значенням розраховували температури в інших вузлах – від i до $i+1$. У подальшому часовому шарі, відповідно до граничної умови на осі ливарного стрижня, опорну температуру переносили на значення температури в найближчому розрахунковому вузлі. Тим самим відбувалася перебудова температурного градієнта на нульове значення і вирішувалася невизначеність температури на осі.

Змінюючи часовий крок τ , так щоб розрахункова температура в кожному наступному вузлі досягала температури кристалізації $T^* = 1360$ °C, визначали переміщення фронту тверднення.

Крок радіальної координати h вибирали достатньо малим порівняно з r_0 (12 мм) і r^* (17 мм) – $h = 0,1$ мм. Чисельні значення коефіцієнтів: $k_0 = 0,33$ Вт/(м·К), $k_1 = 26$ Вт/(м·К), $k_2 = 9$ Вт/(м·К), $\lambda = 270 \cdot 10^3$ Дж/кг, $\rho = 7,3 \cdot 10^3$ кг/м³; розрахункові величини: $a_0^2 = k_0 / (c_0 \rho_0) = 0,265 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $a_1^2 = k_1 / (c_1 \rho_1) = 5,24 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $a_2^2 = k_2 / (c_2 \rho_2) = 1,56 \cdot 10^{-6}$ м²/с визначали за даними [7].

Результати досліджень та їх обговорення. Залежність переміщення фронту кристалізації $\Delta r^* = r^* - r_0$ від часу t , відрахованого з моменту досягнення температури кристалізації на межі ливарного стрижня та розплаву, наведена на рис. 3.

Лінійна залежність між переміщенням фронту та часом в логарифмічних координатах (коефіцієнт кореляції понад 0,997) дозволяє стверджувати про існування лінійної кореляційної залежності між $\ln(\Delta r^*)$ та $\ln(t)$. Вирівнювання даних чисельного експерименту за показниковою кривою методом

найменших квадратів дає емпіричну формулу: $\Delta r^* = \alpha \cdot t^\beta$ (при розмірності $[\Delta r^*] = \text{мм}$ та $[t] = \text{с}$; $\alpha = 0,149$ і $\beta = 0,623$). (6)

Відмінність величини β від значення $\beta = 1/2$ [6, с. 255, 263] обумовлено порушенням однорідності граничних умов по-

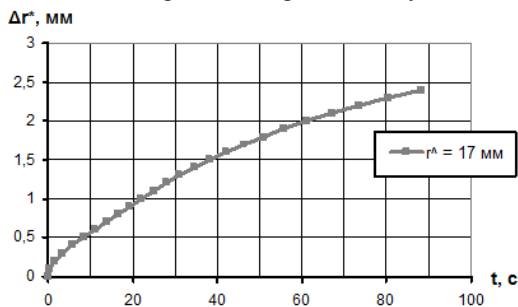


Рис. 3. Залежність переміщення фронту кристалізації Δr^* від часу t

рівняно з напівнескінченною моделлю і некоректністю застосування методу подібності до вирішення поставленої задачі. Відхилення показника ступеня β у формулі (6) від значення $1/2$ можна трактувати як зміну з часом сталої α в законі руху кристалізаційного фронту при $\beta = 1/2$.

$$\Delta r^* = \alpha(t) \cdot t^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Указаний тезис підтверджується стабілізацією параметра в рівнянні (7) за достатнього віддалення фронту кристалізації від поверхні виливка, коли температура в зоні нульового градієнта ($r = r^0$) практично не змінюється, наближаючись

до температури кристалізації розплаву.

Швидкість кристалізації (рис. 3) має перехідний характер на початку процесу (< 6 с), коли вона різко падає з 0,24 до 0,04 мм/с. Наступного періоду часу (6–24 с) швидкість стабілізується поблизу 0,036–0,037 мм/с і в подальшому плавно знижується до 0,01–0,02 мм/с.

Товщина поверхневого шару вушок, утвореного в умовах різко спадаючої швидкості кристалізації досягає 0,4 мм. За стабільної швидкості кристалізації формується шар товщиною 0,6–0,7 мм. Наступний серцевинний шар у декілька разів переважає за розмірами вказані поверхневі шари виливка.

На нашу думку, найбільш контрольованим і ефективним процес дифузійного насичення поверхневого шару вушок буде під час стабілізації швидкості тверднення, коли насичуючі елементи, розчинені після теплового удару розплаву, рівномірно розподілятимуться в межах поверхневого шару, формуючи необхідну структуру і властивості в заданому місці виливка. Для цього насичуючі елементи потрібно вводити на відстані 0,5 мм від поверхні виливка. Крім того, час перебування насичуючих елементів у взаємодії з рідким розплавом на кілька порядків стає вищим, що значно підсилює ступінь гомогенізації насичення. Незначна тривалість часу між початком контактування рідкого розплаву з поверхнею ливарного стрижня і початком кристалізації розплаву підтверджує дану думку.

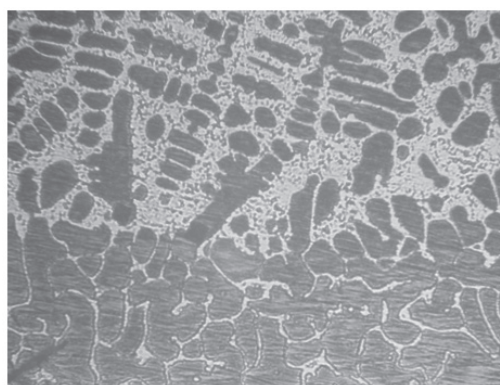
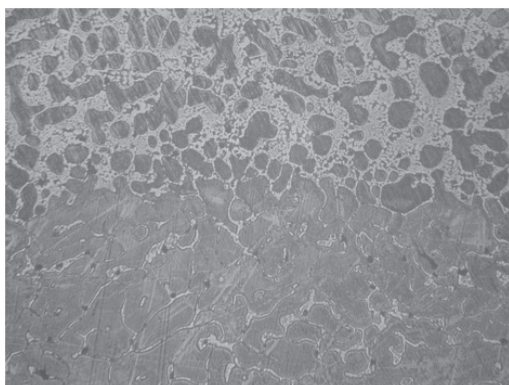


Рис. 4. Область переходу між металом основи (сталь 110Г13Л) та:
а – насиченим вуглецем поверхневим шаром вушок;
б – борованим поверхневим шаром вушок ×200

У роботі [5] експериментально доведено, що зі зростанням товщини цементуючого покриття ливарних стрижнів до величини 1,5–2,0 мм втрачається якість поверхні отворів вушок траків. Оптимальний діаметр частинок одношарового насичуючого покриття ливарних стрижнів становив 0,2–0,4 мм, причому у виливках формувалася якісний дифузійний шар глибиною 0,32–0,65 мм. Це означає, що енергії поверхневого шару розплаву не завжди достатньо для розчинення насичуючих елементів, іншими словами – швидкість кристалізації поверхневого шару виступає обмежувальним фактором насичення, її потрібно знати і враховувати.

Існування яскраво вираженої межі між поверхневим, насиченим вуглецем або борованим шаром та серцевиною виливка (рис. 4), згідно з результатами поверхневого легування вушок траків в області їх отворів [5], підтверджує ефективне насичення поверхневого шару в зоні розплаву. Швидкість

кристалізації детермінує процес насичення. Кристалізація розплаву фіксує результат.

По розрахункових точках температурного поля поверхневого шару вушок у процесі кристалізації була досліджена швидкість охолодження поверхневого шару. Максимальна швидкість охолодження 24200 °C/с розвивається на поверхні виливка в початковий, докристалізаційний період, на глибині 0,1; 0,2; 0,3 мм вона становить 5550; 1270; 291 °C/с відповідно. У більш віддалених від поверхні шарах максимум швидкості охолодження настає з деяким запізненням і затуханням. Можна констатувати утворення температурної хвилі, що рухається від поверхні в глибину виливка зі швидкістю ~ 0,5 мм/с.

Одержані швидкості охолодження поверхневих шарів виливків у процесі кристалізації дозволяють оцінити величину механічних напруг і темпи зміни коефіцієнтів дифузії насичуючих елементів за поверхневого легування виливків.

Висновки

Поставлена задача визначення швидкості кристалізації поверхневого шару вушок виливків траків в області їх отворів вирішена методом скінчених різниць за неявною схемою обчислень. Розрахунки проводили методом прогонки.

Визначений час початку кристалізації розплаву після заливки у форму становить 2,5 мс, що вказує на практичну відсутність фази максимального розчинення насичуючих компонентів у поверхневому шарі виливок. Встановлений розподіл температури в системі упродовж кристалізації поверхневого шару розплаву доводить формування в поверхневому шарі виливок, де реалізується процес дифузійного насичення, стабільного температурного поля, близького до температури

кристалізації. Можна стверджувати, що обмежувальним фактором насичення виступає не температура, а швидкість кристалізації металу.

Обчислена швидкість кристалізації металу в області отворів вушок траків дозволяє визначити час активного розчинення легуючих компонентів у поверхневому шарі металу і спрогнозувати необхідну дисперсність фракцій насичуючих компонентів у складі легуючої обматки ливарних стрижнів у межах 0,2–0,4 мм.

Одержані результати добре узгоджуються з експериментальними даними по поверхневому насиченню вушок виливків траків в області їх отворів і можуть бути використані для подальшого удосконалення процесу поверхневого легування виливків.

Бібліографія

1. Цоцко В.І. Формування температурних хвиль в умовах періодичної енергетичної дії на поверхню металу. / В.І. Цоцко, І.М. Спиридонова, Б.Г. Пелешенко // Фізика і хімія твердого тіла. 2010. – Т. 11, № 4. – С. 1037–1043.
2. Верняев О.В. Активные рабочие органы культиваторов / О.В. Верняев. – М.: Машиностроение, 1983. – 80 с.
3. А. с. № 1477778. Способ упрочнения малоуглеродистой стали / Воробйов Г.М., Цоцко В.І. (СССР). МКИ С 23 С 10/00; БИ; 1989, № 17.
4. А. с. № 1436527. Способ химико-термической обработки стальных изделий / Воробйов Г.М., Цоцко В.І.

- (СССР). МКИ С 23 С 8/24, С 21 D 1/08; БИ; 1988, № 42.
5. Tsotsko V. I., Burya A. I., Shetavnev V. I., Vorobyev G. M. Application of casting surface alloying for hardening surface of track pin holes. // 2nd international Conference "Research and Development in Mechanical Industry" RaDMI 2002, (01–04 September 2002), Vrnjačka Banja, Yugoslavia, V. 2. – S. 1100–1105.
6. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1972. – 736 с.
7. Енохович А.С. Справочник по физике / А.С. Енохович. – М.: Просвещение, 1978. – 415 с.

Рецензент – доктор технічних наук,
професор **С.С. Тищенко**