

УДК 621.787.4

С.В. Мілевський, здобувач

В.А. Дутка, к.т.н., с.н.с.

С.А. Клименко, д.т.н., с.н.с.

*Інститут надтвердих матеріалів ім.В.М. Бакуля
НАН України*

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ У СТАЛЕВІЙ ДЕТАЛІ В ПРОЦЕСІ ЇЇ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЮ ДИСКРЕТНОЮ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ

Наведено результати комп'ютерного моделювання температурного поля у сталевій деталі при зміцненні її поверхневого шару дискретною термічною обробкою. Доведено вплив умов термообробки і параметрів нагрівача на характеристики температурного поля у виробках, що оброблюються.

Вступ. Велика кількість деталей промислового обладнання працює при підвищених швидкостях, навантаженнях та температурах. Завдання забезпечення тривалої працездатності цих деталей вирішуються, як правило, шляхом застосування високоміцних сталей та сплавів, що призводить до досить великих витрат як дорогих матеріалів, так і інструмента, котрим треба ці деталі обробляти. Недостача оброблювального інструменту та дефіцит матеріалів призводить до зниження ефективності виробництва, погіршує забезпеченість необхідної якості продукції і як підсумок – ускладнює функціонування підприємств у сучасних умовах виробництва.

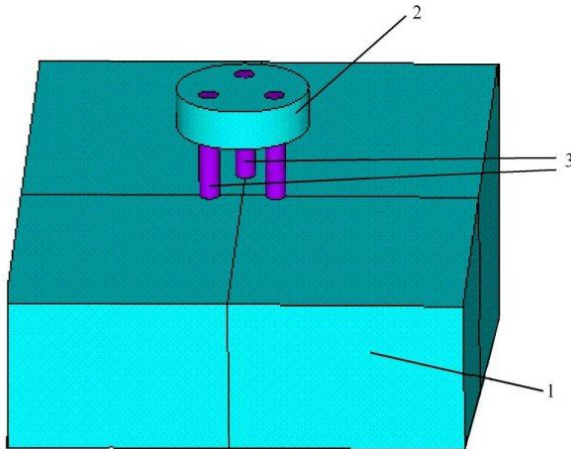
Для підвищення довговічності роботи деталей застосовують різноманітні технологічні способи та методи їх поверхневого зміцнення [1]. До основних з них належать: термічна, хіміко-термічна, фізико-хімічна обробка поверхонь деталей, поверхневе пластичне деформування, гальванічне покриття, напилення та наплавка поверхонь, електроіскрове легування та ін. [2].

Основним завданням методів, які застосовуються при цьому, є підвищення якості параметрів поверхневого шару: підвищення твердості та мікротвердості, зниження шорсткості, підвищення зносостійкості зношених ділянок поверхонь, змінення розміру та знаку остаточних напружень, підвищення стомленої міцності та ін.

Одним з перспективних засобів підвищення експлуатаційних властивостей деталей за рахунок локального термічного впливу є дискретне зміцнення [3]. Ефективним способом такого впливу на

поверхню металевої деталі є її контактний нагрів за допомогою високотеплопровідних електродів, наприклад з міді. У робочому стані електроди щільно притискають до оброблюваної поверхні і протягом певного проміжку часу пропускають через них електричний струм (постійний струм або струм промислової частоти). При цьому нагрівання приповерхневого шару деталі проводять таким чином, щоб внаслідок взаємовпливу температурних полів від сусідніх теплових зон, створюваних електродами, не відбувся відпуск прогрітого шару металу. Як відомо [4], означене явище відпуску нагрітих шарів сталі починається при перевищенні рівня температури $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зоні взаємодії температурних полів від сусідніх теплових зон.

Мета роботи. Отримання інформації про характерні закономірності поведінки температурних полів, що виникають при дискретній термічній обробці поверхні.



*Рис. 1. Розрахункова схема:
1 – фрагмент сталеві деталі;
2 – утримувач електродів;
3 – мідні електроди*

Оперативним та відносно недорогим способом дослідження динаміки температурних полів є комп'ютерне моделювання.

Методика досліджень. У даній роботі представлені математична модель та результати числових досліджень теплового стану приповерхневого шару сталеві деталі при дії на неї одночасно теплового поля від трьох мідних циліндричних електродів (рис. 1). Електроди 3, паралельно закріплені в сталевому утримувачі 2, щільно

притискаються до поверхні деталі 1. Через утримувач, електроди і деталь протікає електричний струм, що призводить до виникнення в них джерел Джоулевого тепла. Однак потужність цих джерел у деталі та в утримувачі незначна порівняно з їх потужністю на торцях електродів, що виступають із утримувача, оскільки густина електричного струму вказаних об'ємах набагато більша, ніж в утримувачі та деталі. Тому нагрівання деталі відбувається практично за рахунок тепловиділення на контактних поверхнях електродів.

Для кількісного описання теплового стану вказаних вище компонентів розрахункової схеми використовується наступна математична модель. У процесі нагрівання температура поверхні деталі та електродів змінюється в широкому діапазоні – від кімнатної до 800...1000 °С – і нагрів цей може тривати в межах декількох секунд чи декількох десятків секунд. Тому в математичній моделі необхідно враховувати нестационарність температурного поля та температурну залежність теплофізичних властивостей матеріалів. Оскільки нагрівання відбувається протягом короткого проміжку часу, а габарити сталевих деталей набагато більші від розмірів електродів та відстані між ними, то в математичній моделі границі фрагмента деталі вибираються на такій достатній відстані від зони контакту з нею електродів, що за час нагрівання температура цих границь майже не змінюється і дорівнює своєму початковому значенню (кімнатній температурі). На оброблюваній поверхні деталі, бічних поверхнях електродів та на зовнішній поверхні утримувача відбувається конвективний теплообмін з навколишнім повітряним середовищем кімнатної температури. Слід зазначити, що оскільки нагрівання поверхні деталі відбувається одночасно трьома однаковими електродами, центри поперечних перерізів яких знаходяться у вершинах правильного трикутника (при тому, що при такому розташуванні є той мінімум електродів, де здійснюється таке взаємодія між ними), то картина розподілу температури в приповерхневій зоні деталі є суттєво тривимірною. Тому необхідно використовувати тривимірну за просторовими координатами математичну модель.

Таким чином, температурне поле $T = T(r, t)$ описується нелінійним рівнянням теплопровідності:

$$c(T)\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T)\operatorname{grad}T) + Q \quad (1)$$

з об'ємними джерелами тепла $Q = Q(r, T)$. Розв'язок $T(r, t)$ цього рівняння задовольняє початкову умову:

$$T(r, 0) = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (2)$$

граничній умові конвективного теплообміну з навколишнім середовищем:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_c - T) \quad (3)$$

та граничній умові відсутності теплового потоку на віддаленій бічній поверхні масиву деталі:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (4)$$

Тут $c(T)$, $\gamma(T)$ і $\lambda(T)$ – відповідно теплоємність, густина та коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $\alpha = \alpha(r, t)$ – коефіцієнт конвективного теплообміну, r – радіус-вектор досліджуваної точки простору, t – час. Потужність об'ємних джерел обчислюється за формулою:

$$Q = Q(r, T) = \rho(T)j^2(r, T),$$

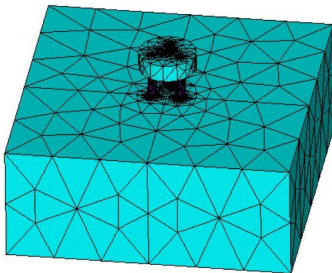
де $\rho(T)$ – питомий електроопір матеріалу, $j(r, T)$ – густина діючого електричного струму. Слід зазначити, що при використанні змінного електричного струму, величина якого змінюється з частотою f , величину $j(r, T)$ потрібно замінити на усереднену за періодом коливань електричного поля густину струму [5].

Розв'язання задачі (1)–(5) здійснювалось чисельно методом скінченних елементів з використанням розробленого пакету програм [6]. В обчисленнях було вибрано такі розміри компонентів розрахункової схеми. Фрагмент деталі вибрано у вигляді паралелепіпеда з розмірами: оброблюваної поверхні – 60x60 мм, його товщини – 24 мм. Діаметр електроду дорівнює 1,5 мм, його загальна висота становить 8 мм. Товщина пластини-утримувача електродів – 3 мм, а її діаметр – 20 мм. Виконано серію варіантів обчислень для трьох значень відстані між осями електродів 5 мм, 7,5 мм і 10 мм при фіксованих величинах електричного струму в електроді 600, 750, 800, 1000 і 1200 А. Величина коефіцієнта конвективного теплообміну α на оброблюваній поверхні деталі, бічній поверхні електродів, нижній і бічній поверхнях утримувача дорівнювала 30 Вт/(м²·К) і була вибрана згідно з методикою [7]; величина коефіцієнта α на верхній площині утримувача дорівнювала 100 Вт/(м²·К), чим враховувався контакт даної пластини з допоміжними засобами її закріплення. Матеріал

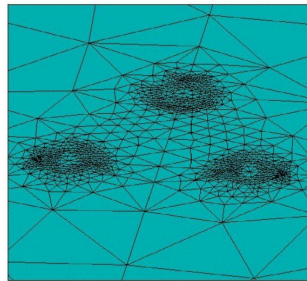
деталі й утримувача – сталь 40 [8], матеріал електродів – електротехнічна мідь [9].

Результати досліджень та їх аналіз. На рис. 2 представлена скінченноелементна дискретизація розрахункової просторової області тетраедральними 10-вузловими квадратичними елементами. З метою економії машинних (об'єм оперативної пам'яті) та часових ресурсів (час обчислень) використовувалась нерівномірна скінченноелементна сітка. В зонах прогнозованих високих градієнтів температури сітка суттєво згущена для отримання достатньої точності апроксимації в цих місцях температурного поля. Причому, як видно з рис. 2, згущення сітки в указаних зонах виконано як по поверхні, так і по об'єму компонентів розрахункової схеми. Кількість вузлів скінченноелементної сітки становило близько 38000, елементів – 25000. Величина кроку за часом вибиралася згідно з відомими обмеженнями її зверху [10], [11] для забезпечення стійкості та відсутності коливань числового розв'язку.

Для кожного з варіантів обчислень отримано результати у вигляді картин розподілу температури в об'ємі деталі, електродів та утримувача в різні моменти часу, а також графіки зміни температури у часі в характерних точках поверхні деталі (рис. 3): в зовнішніх точках А і В та в центрі O_1 контактної ділянки електрода з деталлю, посередині між центрами двох ділянок контакту з деталлю (т. С), а також у центрі (т. D) трикутника $O_1O_2O_3$, утвореного центрами всіх трьох контактних ділянок електродів з поверхнею деталі.



а)



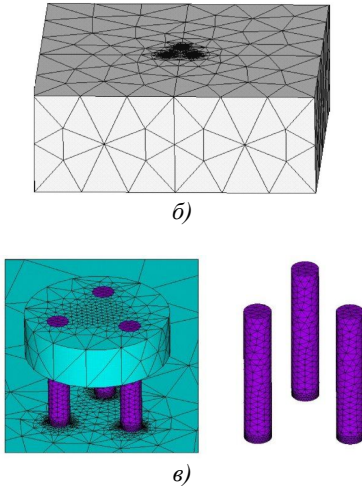


Рис. 2. Скінченноелементна дискретизація просторової області:
 а) – загальний вигляд; б) – вигляд оброблюваної деталі;
 в) – вигляд електродів та утримувача;
 г) – фрагменти об'єму деталі

Числові дослідження дозволяють (при фіксованій відстані між електродами та заданій величині струму в електродах) встановити найближчий момент часу, коли внаслідок взаємовпливу сусідніх теплових джерел (ділянок контакту електродів з деталлю) температура у певних – контрольних – точках поверхні деталі досягне 100 °С.

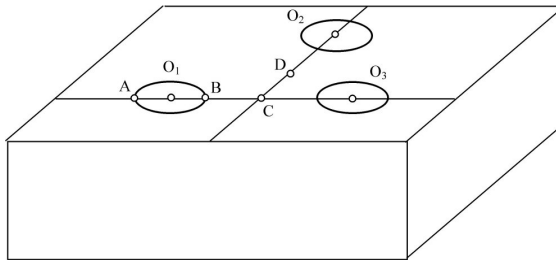


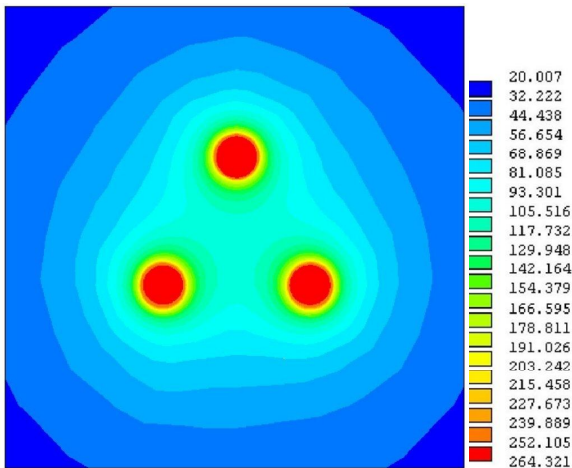
Рис. 3. Схема фрагмента деталі в місці контакту з електродами

Як впливає з результатів обчислень (рис. 4, 5), вказані точки С і D поверхні деталі справді можуть бути вибрані для проведення такого контролю, оскільки, по-перше, значення температури у цих точках знаходяться в ізополосах, які включають величину 100 °С, і по-друге,

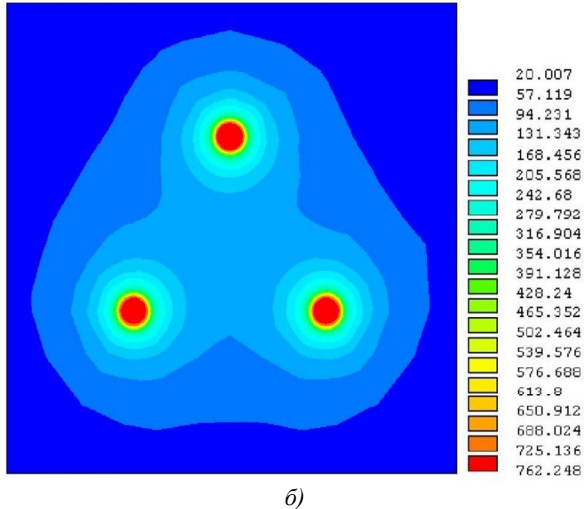
значення температури в точках С і D майже співпадають протягом всього процесу нагрівання для всіх розглянутих вище варіантів значень відстані між осями електродів та сили струму в них.

Як показують результати числових досліджень, розподіл температури по поверхні деталі (рис. 4) та по її товщині має якісно однаковий характер протягом часу нагрівання (рис. 6, а, б), при різних величинах відстані d між електродами (рис. 6, в, з), а також при різних величинах струму в електродах (рис. 6, д, е). З епюр температури видно, що розсіяння тепла в шарах деталі, що знаходяться на однаковій глибині як під точкою С, так і під точкою D, є майже однаковими. Однак ці розсіяння тепла є значно більшими, ніж у самих вказаних точках поверхні деталі. Очевидно, що таке співвідношення величин розсіяння тепла зумовлене тим, що розсіяння тепла в точках С і D поверхні деталі пов'язане в основному з охолодженням даної області поверхні деталі шляхом конвективного теплообміну повітрям, котрий є незначним порівняно із охолодженням шарів металеві деталі шляхом теплопровідності.

Із рис. 6 безпосередньо видно, що вибрані контрольні точки С і D поверхні є такими, в котрих насамперед відбувається взаємодія температурних полів від сусідніх теплових зон.



а)

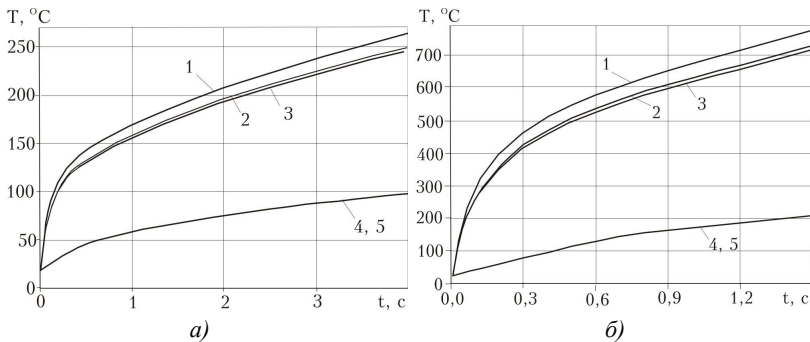


б)

Рис. 4. Розподіл температури на поверхні деталі в момент досягнення в точках С і D температури 100 °С: а) – відстань між осями електродів $d = 5$ мм, $I = 600$ А; б) – $d = 100$ мм, $I = 1200$ А

Із рис. 4–6 видно, що для різних відстаней між електродами із збільшенням сили струму в них характер розподілу температури на поверхні деталі має певні закономірності: ізополоси температури більш витягнуті у напрямку від ділянок контакту електродів з деталлю до центра трикутника $O_1O_2O_3$ – точки D, ніж в протилежному напрямі; при збільшенні сили струму в електродах концентрація температурного поля біля ділянок контакту електродів з деталлю зростає значно швидше, ніж концентрація температурного поля в контрольних точках С і D поверхні деталі (суттєво різні величини нахилу графіків температури в точках С і D та в точках А, В і O_1 поверхні деталі); вказані точки С і D лежать у певній зоні поверхні деталі, в усіх точках котрої (зони) температура є майже однаковою (з точністю до похибки обчислень чи вимірювання) протягом всього процесу нагрівання. Звідси випливає, що кожна точка такої зони може бути вибрана як контрольна в указаному вище сенсі; значення температури в периферійних точках А і В ділянок контакту електродів з деталлю відрізняються між собою несуттєво протягом всього процесу нагрівання поверхні деталі та на 10–15 % менші, ніж у центрі ділянки контакту; видно також, що в нижніх шарах об'єму деталі, що знаходяться під точками С і D на однаковій глибині, рівень температури є майже однаковим, а отже і розсіяння тепла є також майже однаковим. Такий висновок підтверджується результатами, наведеними

на рис. 7 у вигляді графіків розподілу температури на поверхні деталі вздовж прямих O_1O_3 і O_2D та вздовж еквідистантних їм прямих, що знаходяться на глибині, рівній радіусу електрода; із результатів порівняльного аналізу рівня температури в центрі трикутника $O_1O_2O_3$ (точці D, рис. 8) та в точці C (рис. 9) впливає, що величина часу досягнення рівня 100°C в т. С залежить нелінійно як від величини струму в електродах, так і від відстані між електродами. Наприклад при збільшенні відстані d між джерелами поверхневого нагрівання деталі – відстані між електродами – збільшення потужності теплових джерел на однакову величину призводить до більш істотного зменшення величини $t_{100^\circ\text{C}}$ – часу нагрівання деталі до досягнення в контрольних точках (т. С і т. D) рівня 100°C . Так, при $d = 5$ мм збільшення сили струму в електродах подвоюється; від 600 А до 1200 А – призводить до зменшення $t_{100^\circ\text{C}}$ у 10 разів – від 4,0 с до 0,39 с, а при $d = 7,5$ мм таке ж збільшення сили струму в електродах призводить до зменшення $t_{100^\circ\text{C}}$ вже майже в 20 разів – від 27,0 с до 1,37 с. Однак при $d = 5$ мм збільшення сили струму в електродах від 800 А до 1200 А призводить до зменшення $t_{100^\circ\text{C}}$ у 3,3 рази (від 1,29 с до 0,39 с, див. таблицю), а при $d = 7,5$ мм таке ж збільшення сили струму в електродах призводить до зменшення $t_{100^\circ\text{C}}$ вже тільки у 4,6 рази (від 6,25 с до 1,37 с).



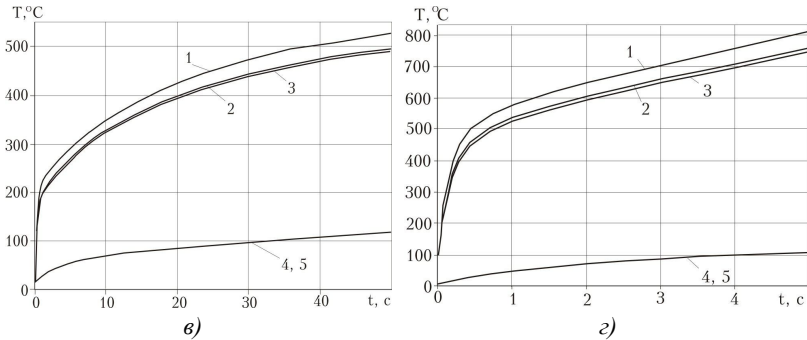
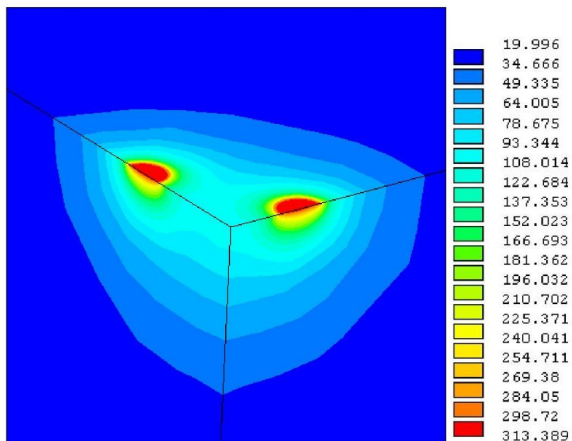


Рис. 5. Зміна в часі температури в контрольних точках поверхні деталі: а), б) – відстань між осями електродів $d = 5 \text{ мм}$; в), з) – $d = 10 \text{ мм}$; а) – $I = 600 \text{ А}$; б), з) – $I = 1200 \text{ А}$; в) – $I = 750 \text{ А}$: 1 – центр ділянки (O_1) контакту електрода з деталлю; 2 – внутрішня сторона ділянки контакту (В); 3 – зовнішня сторона ділянки контакту (А); 4 – посередині між трьома ділянками контакту (D); 5 – посередині між двома ділянками контакту (С)

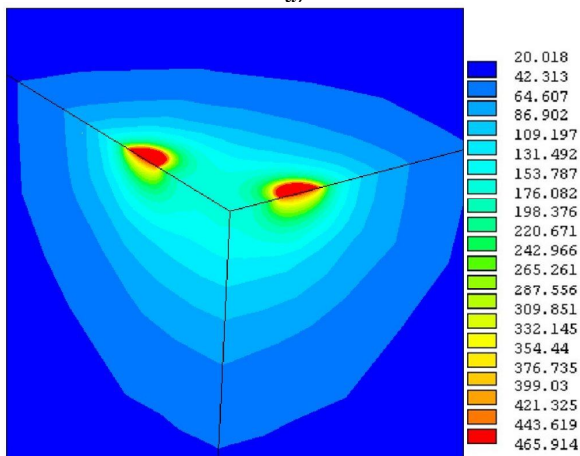
Таблиця

Величина $t_{100 \text{ } ^\circ\text{C}}$ часу досягнення температури $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ посередині між сусідніми джерелами тепла

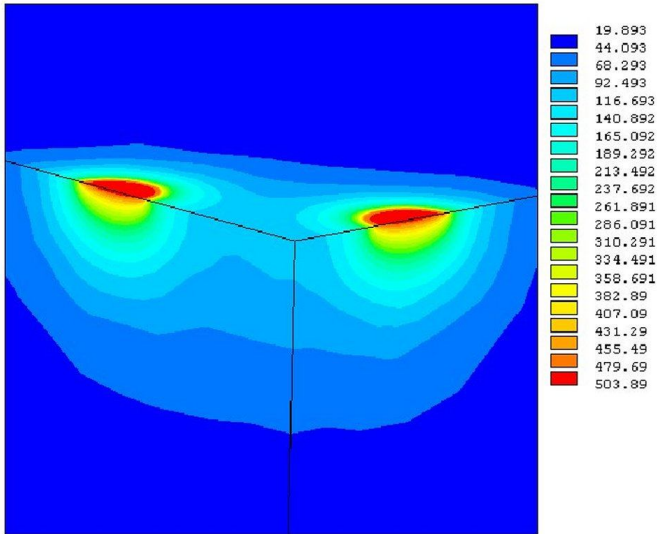
I, A	$t_{100 \text{ } ^\circ\text{C}}, \text{ c}$		
	$d = 5 \text{ мм}$	$d = 7,5 \text{ мм}$	$d = 10 \text{ мм}$
600	4,0	27,0	–
750	–	–	32,0
800	1,29	6,25	21,7
1000	0,69	2,57	8,3
1200	0,39	1,37	4,03



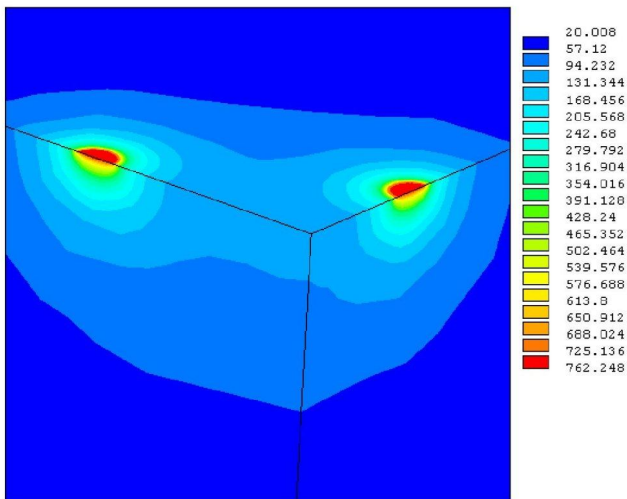
a)



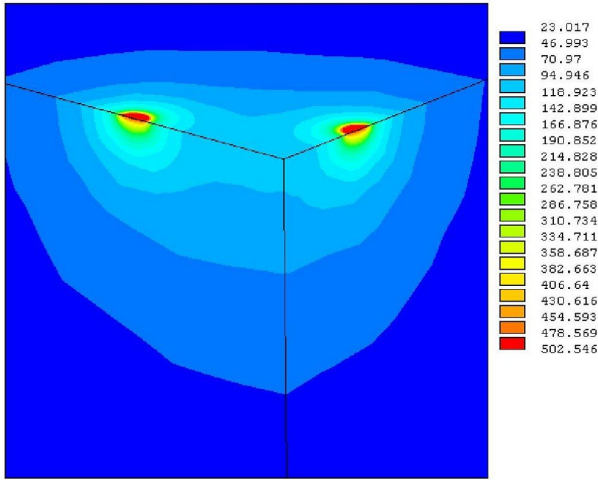
б)



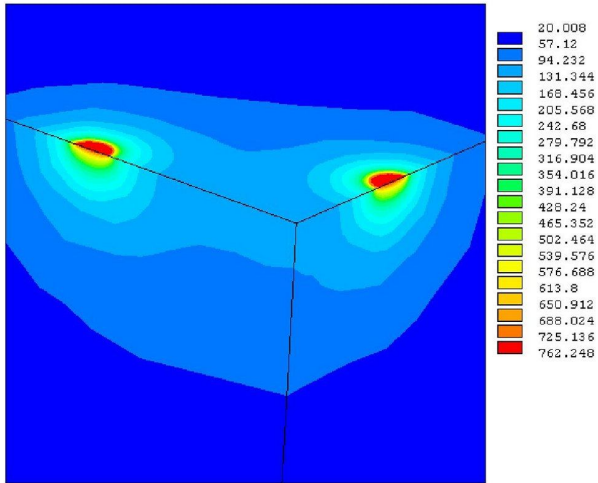
а)



б)



а)



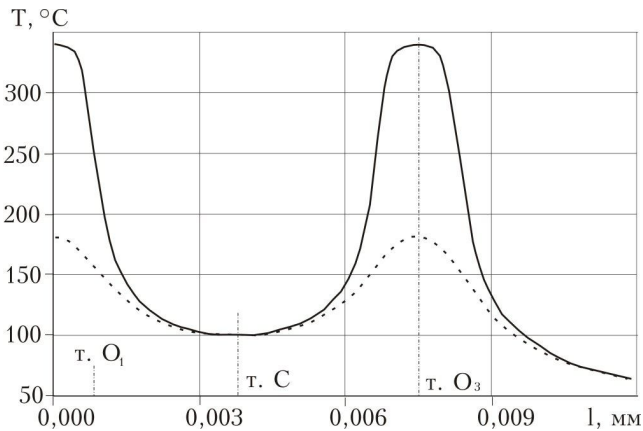
б)

Рис. 6. Температурне поле в деталі: а), б) – в різні моменти часу нагрівання (відстань між осями електродів $d = 5$ мм, $I = 800$ А; а) – в момент досягнення рівня температури 100 °С в точках С і D ($t = 1,29$ с); б) – в момент часу 4 с; в), г) – в момент досягнення в точках С і D температури 100 °С при різних величинах відстані між електродами ($I = 1200$ А; в – $d = 5$ мм; г – $d = 10$ мм); д), е) – в момент досягнення в точках С і D температури 100 °С при різних величинах струму в електродах ($d = 10$ мм; д – $I = 800$ А; е – $I = 1200$ А)

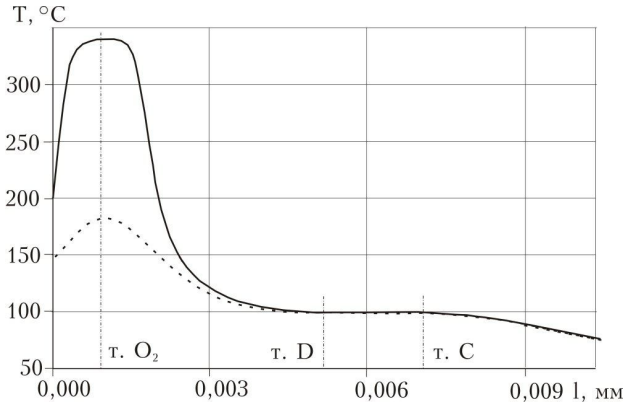
За результатами графіків зміни температури в точці D поверхні деталі (рис. 7), яка (точка) рівновіддалена від поверхневих джерел тепла, можна визначити шуканий момент часу досягнення певної температури у вказаній точці і таким чином прогнозувати процес термічної обробки деталі.

Графіки на рис. 9 побудовані в результаті апроксимації величин часу досягнення температури $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ посередині між центрами двох електродів (т. С) залежно від величини струму в електродах при різних значеннях відстані d між осями електродів. Використовуючи дані графіки, можна за вибраною наперед величиною струму в електродах прогнозувати момент часу досягнення температури $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ внаслідок взаємодії трьох прикладених до поверхні деталі джерел тепла. Це дає можливість керувати процесом нагрівання поверхні деталі.

З рис. 7, б видно, що у всіх точках відрізка CD поверхні деталі температури є майже постійною. Аналіз температурного поля в деталі показує, що на поверхні деталі можна виділити зону у вигляді трикутника (рис. 10) чи многокутника, в усіх точках якої рівень температури є майже однаковий протягом всього часу нагрівання. Даний аналіз також показує, що в об'ємі деталі можна виділити також об'ємну зону постійної температури.

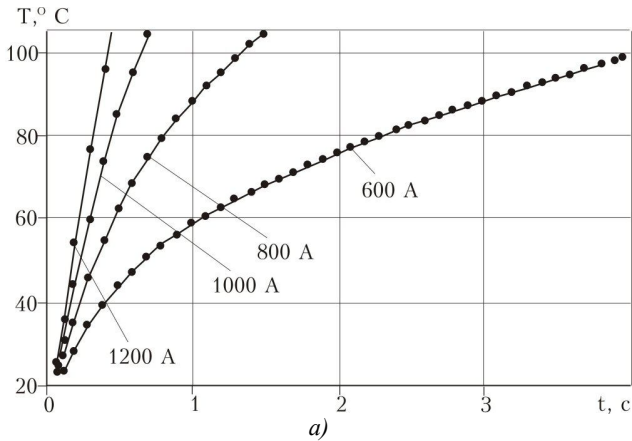


а)

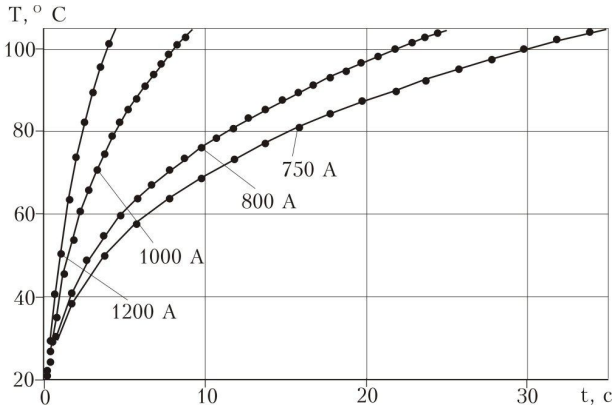


б)

Рис. 7. Розподіл температури вздовж прямої O_1O_3 (а) і O_2C (б) в момент досягнення температури 100°C посередині (в т. С) між двома поверхневими джерелами тепла (суцільна лінія) та вздовж еквідистантної прямої (пунктирна лінія), що проходить на глибині, рівній радіусу електрода ($d = 7,5\text{мм}$, $I = 600\text{ А}$)



а)



б)

Рис. 8. Зміна у часі температури в центрі (т. D) трикутника $\text{O}_1\text{O}_2\text{O}_3$: а) $d = 5$ мм, б) $d = 10$ мм

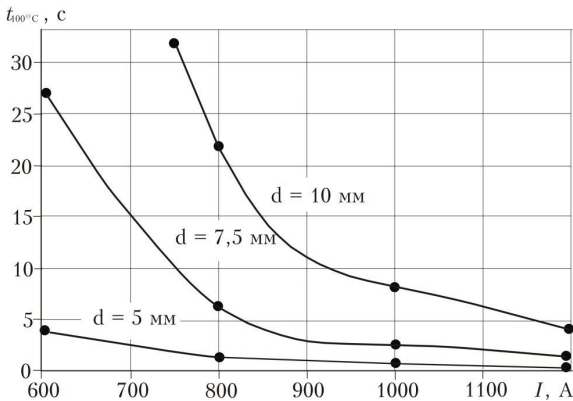


Рис. 9. Зміна часу досягнення температури 100°C посередині (в т. С) між двома сусідніми поверхневими джерелами тепла залежно від величини струму в електродах при різних значеннях відстані між осями електродів

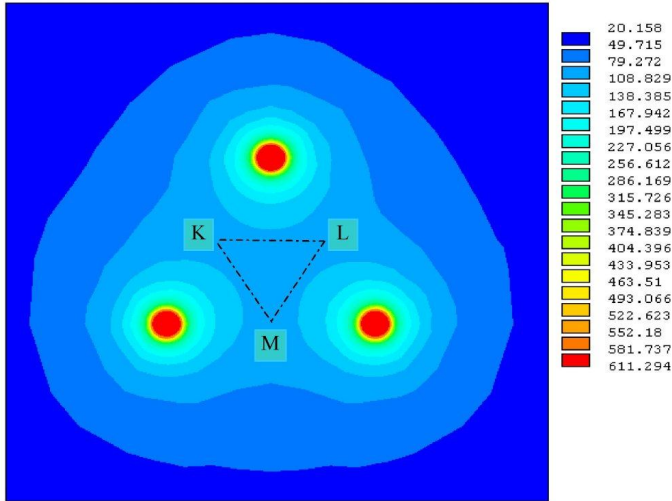


Рис. 10. Зона постійної температури на поверхні деталі

Висновки:

– розрахунковий аналіз процесу моделювання дає можливість визначити діаметри електродів залежно від сили струму та розмірів загартованої площини деталі;

– за отриманими результатами можна рекомендувати регулювання сили струму загартування залежно від відстані між електродами, які застосовуються при цьому, та розподілу температурних полів;

– дані розрахунки дають можливість задавати та комбінувати розташування електродів в утримувачі у різній послідовності, для впливу на гартівну поверхню деталі за епюрою зносу. Цей факт дозволяє уникнути відпуску сусідніх загартованих ділянок та регулювати напруження у поверхневих шарах;

– результати залежності міцності, прикладеної до поверхні деталі, та часу дії, за яким буде отримана необхідна температура, дозволяють одержати задану площу та глибину загартованих ділянок.

На основі викладаного матеріалу можна зробити висновок, що дослідження температурних полів у процесі поверхневої термічної обробки деталей дозволяє прогнозувати найбільш достовірний вибір необхідних факторів, котрі впливають на підвищення якості поверхневого шару виробу.

Процес моделювання дозволяє більш ретельно розробити технологію дискретної поверхневої закалки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гавриш А.П., Киричок П.О., Підберезний М.П. Зміцнення металевих поверхонь деталей машин та механізмів. — К.: Наук. думка, 1995. — 174 с.
2. Ляшенко Б.А., Клименко С.А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине // Сучасне машинобудування. — 1999. — № 1(1). — С. 94–104.
3. Милевский С.В., Колодницький В.Н., Клименко С.А. Дискретная закалка крупногабаритных деталей электрическим током // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Зб. наук. праць / Технології в машинобудуванні. — Харків: НТУ«ХПІ». — 2003. — № 9. — Т. 1. — С. 39–44.
4. Гуляев А.П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1977. — 648 с.
5. Подстригач Я.С., Бурак Я.И., Кондрат В.Ф. Магнито-термоупругость электропроводных тел. — Киев: Наук. думка, 1982. — 248 с.
6. Майстренко А.Л., Дутка В.А., Переяслов В.П., Иванов С.А. Математичне моделювання теплового стану елементів технологічного вузла в процесі швидкісного електроспінання алмазовмісних композитних матеріалів // Сверхтвердые материалы. — 1999. — № 4. — С. 26–35.
7. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справ. / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.И. Зорина. — М.: Энергоиздат, 1982. — 510 с.
8. Варгафтик Н.Б. Теплофизические свойства веществ: Справ. — М.; Л.: Техноэнергоиздат, 1956. — 367 с.
9. Справочник по сталям и методам их испытаний / Под общ. ред. В.К. Григоровича. — М.: Металлургиздат, 1958. — 920 с.
10. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. — М.: Мир, 1986. — 318 с.
11. Метод конечных элементов в механике твердых тел / Под общ. ред. А.С. Сахарова и И.Альтенбаха. — Киев: Выща школа, 1982. — 482 с.

МІЛЕВСЬКИЙ Сергій Володимирович — здобувач Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- технології зміцнення металевих деталей;
- технології машинобудування.

ДУТКА Василь Ананійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- комп’ютерне моделювання теплових процесів;
- комп’ютерне матеріалознавство.

КЛИМЕНКО Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, доцент, завідувач відділом Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- технології зміцнення металевих деталей;
- технологічне забезпечення якості поверхні деталей машин;
- обробка покриттів різанням.

Подано 05.09.2005

Милевский С.В., Дутка В.А., Клименко С.А. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СТАЛЬНОЙ ДЕТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ДИСКРЕТНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Представлены результаты компьютерного моделирования температурного поля в стальной детали при упрочнении ее поверхностного слоя дискретной термической обработкой. Показано влияние условий термообработки и параметров нагревателя на характеристики теплового поля в обрабатываемом изделии.

Milevsky S.V., Dutka V.A., Klimenko S.A. COMPUTER-AIDED MODELING OF THE TEMPERATURE FIELD IN A STEEL WORKPIECE DURING ITS HARDENING BY THE SURFACE DISCRETE THERMAL TREATMENT

The results are given of the computer-aided modeling of the temperature field in a steel workpiece during its hardening by the surface discrete thermal treatment. The effect of the thermal treatment conditions and heater parameters on the characteristics of the temperature field in the workpiece.