

УДК 621.785.5

М.А. Погрібний, канд. техн. наук

О.Є. Вуєць

Національний технічний інститут «Харківський політехнічний інститут»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ПІД

ЧАС ВІДПУСКУ З НАГРІВОМ СТРУМАМИ ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ

Ключові слова: струми високої частоти (СВЧ), температура, модельне тіло

Анотація

Досліджено можливість прогнозування термічних процесів шляхом моделювання температурних полів під час нагріву струмами високої частоти (СВЧ) при термічній обробці (відпуску) деталей машин та механізмів. Розроблена методика побудови температурних полів на модельних тілах різної геометричної форми і складу, які є прототипом реальних виробів, за допомогою пакету MatLab. Проведене порівняння впливу часу нагріву, розмірів та хімічного складу матеріалу на розподіл температури по перетину виробів. Побудовані номограми, які дозволяють визначити необхідні технологічні параметри нагріву під час швидкісного відпуску СВЧ.

Исследована возможность прогнозирования термических процессов путем моделирования температурных полей во время нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) при термической обработке (отпуска) деталей машин и механизмов. Разработана методика построения температурных полей на модельных телах различной геометрической формы и состава, которые являются прототипом реальных изделий, с помощью пакета MatLab. Проведено сравнение влияния времени нагрева, размеров и химического состава материала на распределение температуры по сечению изделий. Построены номограммы, которые позволяют определить необходимые технологические параметры нагрева во время скоростного отпуска ТВЧ.

This paper presents the possibilities research of forecasting thermal processes by temperature fields simulation during the heating of high-frequency currents (HFC) with the heat treatment (tempering) details of machines and mechanisms. The technique for constructing the temperature fields on the bodies model of various geometrical shapes and composition, which are the prototype of the real products, with the help of MatLab is developed. The comparison of the influence of heating time, the sizes and chemical composition of the material on the temperature distribution on the cross-section of the products is given. The nomograms, which allow to determine the necessary technological parameters of the heat during the high-speed tempering of HFC are plotted.

Вступ та постановка задачі

Відомо [1,2], що застосування високих швидкостей нагріву ($V > 100$ °C/c) під час проведення індукційного (СВЧ) чи електровідпуску деталей призводить до суттєвого покращення механічних та експлуатаційних властивостей матеріалів у порівнянні з повільним нагрівом (наприклад, пічним).

Виходячи з особливостей індукційного нагріву однієї з головних задач при проведенні відпуску за допомогою СВЧ є отримання рівномірного прогріву по перетину виробів або відпуск на певну глибину, наприклад, на глибину загартованого шару. Тільки в цьому випадку можлива реалізація всіх переваг від застосування швидкісного відпуску. В той же час прямий вимір температури по перетину виробів під час швидкісного індукційного нагріву є досить ускладненим, а в багатьох випадках взагалі неможливим: по-перше, введення термоелектричних датчиків всередину виробу призводить до порушення його цілісності, а по-друге, зміна геометрії в місці введення призводить до підвищення концентрації індукційного струму, що суттєво спотворює показники вимірювання температури [3].

Тому метою дослідження було отримання моделей температурних полів при швидкісному відпуску СВЧ для теоретичної оцінки розподілу температури в зоні нагріву. Це в свою чергу дасть можливість розрахувати оптимальні параметри швидкісного нагріву, і цим самим досягти однорідний розподіл мікроструктури та властивостей від поверхні до серцевини або на задану глибину виробів.

Методика дослідження

В основу методу моделювання температурних полів покладено рівняння теплового балансу для кожного елемента розрахункової області:

$$\rho * C * dT/dt - \text{div}(k * \text{grad}T) = Q + h * (T_{ext} - T), \quad (1)$$

де ρ - густина речовини, кг/м³; C - питома теплоємність речовини, Дж/кг*К; k – теплопровідність речовини, Вт/К*м; Q - об'ємна густина потужності додаткових об'ємних джерел тепла, Вт/м³; h - коефіцієнт конвективного або кондуктивного теплообміну розрахункової області з навколишнім середовищем, Вт/м²*К; T_{ext} - температура навколишнього середовища при нескінченному віддаленні від розрахункової області, К; T - температура розрахункової області на границі теплообміну, К.

При виведенні диференціального рівняння теплопровідності використано закон збереження енергії, який у даному випадку може бути сформульовано таким чином: кількість теплоти dQ , введене в елементарний об'єм ззовні за певний час внаслідок

теплопровідності, а також від внутрішніх джерел, дорівнює зміні внутрішньої енергії речовини, що міститься в елементарному об'ємі [4].

Виходячи з цього перша складова у лівій частині формули (1) визначає зміну внутрішньої енергії матеріалу при зміні температури за проміжок часу dt . Вона базується на законі Джоуля:

$$dQ = \rho * C * dT \quad (2)$$

Друга складова виражає рівняння теплообміну на границях певного елемента із сусідніми і описується законом Фур'є:

$$dQ/dt * S = \text{div}(k * \text{grad}T), \quad (3)$$

де S – одиниця площини контакту.

Побудова температурних полів при швидкісному відпуску з нагрівом СВЧ проводилась стосовно модельних тіл різної геометричної форми - циліндричної та кубічної, і різного хімічного складу – високолегованої сталі 15X11МФ та вуглецевої сталі 45. Їх прототипом є цілий ряд реальних виробів та зразків. Температура нагріву при моделюванні була обрана $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає температурі високого відпуску, який широко розповсюджений у машинобудуванні. Швидкість нагріву зразків складала $100\text{-}700\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$; вона визначалась за допомогою експериментальних кривих нагріву (рис. 1).

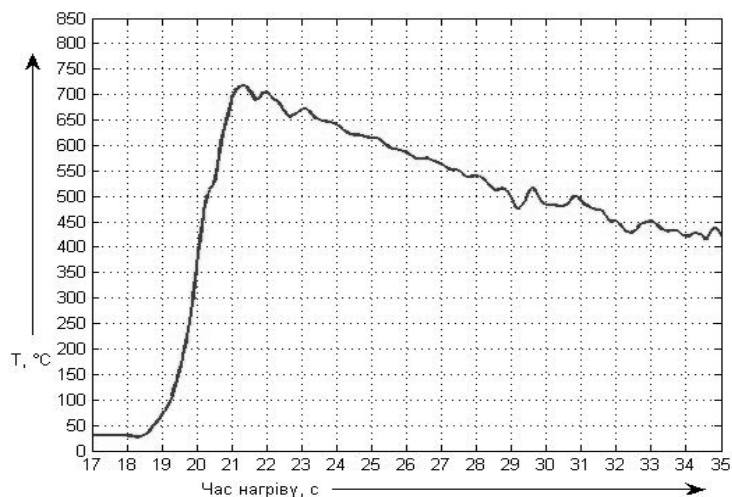


Рис. 1. Крива нагріву під час швидкісного відпуску СВЧ при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$

Розрахунок теплових процесів при СВЧ нагріві неможливий без урахування особливостей індукційного нагріву. При нагріві СВЧ на відміну від пічного, виділення теплоти відбувається безпосередньо в тих зонах металу, що піддаються впливу змінного магнітного поля і електричного струму від генератора СВЧ. Як відомо [2], глибина проникнення струму в метал залежить від його частоти та фізичних властивостей металу, що нагрівається. При цьому на початку нагріву теплота виділяється лише в поверхневому шарі

(скін-шарі), розміри якого дорівнюють глибині проникнення струму в холодний метал, який при низьких температурах має феромагнітні властивості. В подальшому, коли температура поверхневого шару металу досягне точки Кюрі, магнітна проникність його стане близької до одиниці і кількість теплоти, що виділяється в цьому шарі, зменшиться. Це призведе до вповільнення підвищення температури. Оскільки кінцевий розподіл температури встановлюється за певний проміжок часу, частина теплової енергії за рахунок теплопровідності буде відводитися вглиб.

Таким чином для зменшення перепаду температури по перетину зразка при нагріві СВЧ час нагріву необхідно збільшувати, а, отже, знижувати швидкість нагріву, що забезпечить перенос значно більшої кількості теплоти в серцевину металу. З іншого боку зниження швидкості можливе лише до певних меж для попередження втрати переваг швидкісного відпуску. При цьому прогрів вважається рівномірним, коли перепад температури по перетину виробу досягає не більше ніж $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2].

Крім того при побудові моделей враховували глибину скін-шару, починаючи з якої проводився розрахунок розподілу температурних полів. Для визначення товщини скін-шару використовували формулу [3]:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu * f}} , \quad (4)$$

де ρ - питомий опір, Ом*м;
 μ - відносна магнітна проникність;
 f - частота струму, Гц.

Під час нагріву частота струму є величиною постійною і в нашому випадку складала 440 кГц. Підставивши у формулу (4) значення μ та ρ при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ і усереднивши отримані величини, знаходимо величину скін-шару: для сталі 15X11МФ ($\delta_1 = 0,405$ мм) та сталі 45 ($\delta_2 = 0,42$ мм).

Розрахунок розподілу температурних полів по перетину модельних тіл проведений з використанням додатку PDEToolbox шляхом вирішення диференціального рівняння теплопровідності (1) в часткових похідних методом кінцевих елементів у двомірній постановці. При цьому область побудови розбивалась на кінцеве число елементарних підмножин стандартної форми (кінцеві елементи). У системі MatLab ці кінцеві елементи являли собою криволінійні трикутники. На границях кожного елемента підтримувались умови безперервності температурного поля. Точність обчислення задавалась розміром елемента, тобто густиною сітки. Початкові та граничні умови, необхідні для розгляду

динаміки зміни температурного поля, задавали разом з параметрами матеріалу в розрахунковій області. Динаміка розподілу температур для кожного моменту часу може надаватись або графічно або у вигляді анімації [5].

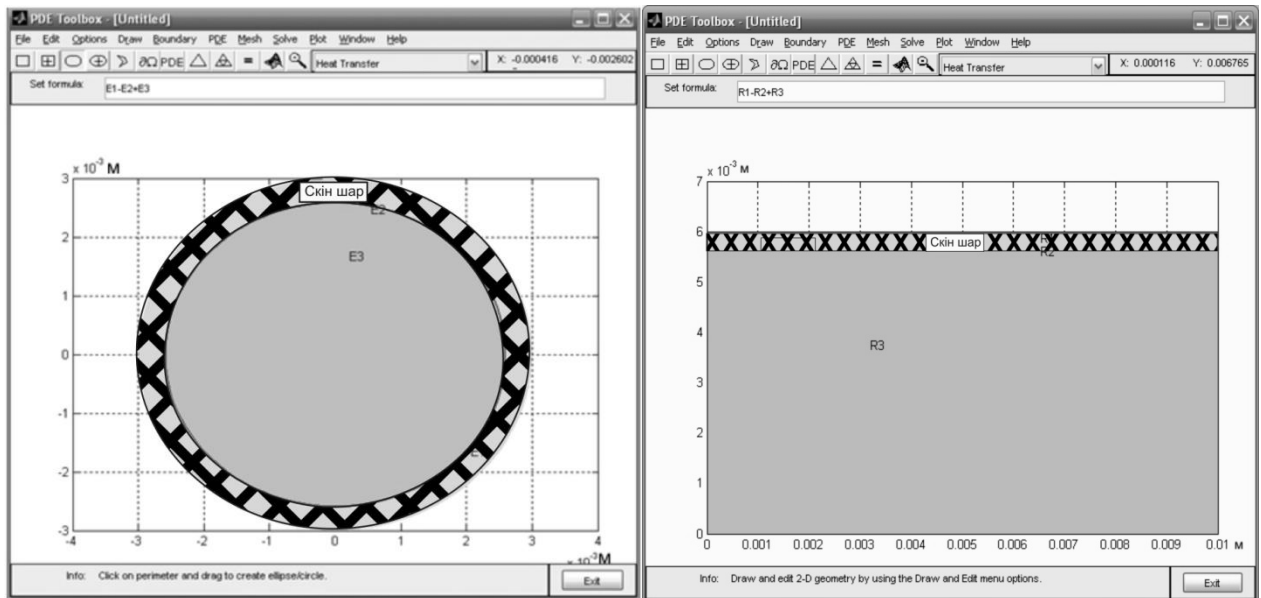
Для коректності вирішення диференціального рівняння теплопровідності значення величин вводились в системі СІ. Кінцевою величиною розрахунків є температура (в додатку PDETool величина U), що виражена в градусах Кельвіна. Для спрощення сприйняття моделі при графічному виводі маємо можливість вивести показання температури в градусах Цельсія. Для цього у вікні встановлення графічних параметрів моделі прописували задану функцію « $U-273$ », що і є переводом у градуси Цельсія.

Виходячи з можливостей додатку PDETool та особливостей індукційного нагріву при розрахунку моделі розповсюдження температурних полів були реалізовані певні обмеження:

- не враховувався вплив попередньої термічної обробки, в нашому випадку загартування (вплив типу мікроструктури на теплофізичні властивості вважаємо достатньо малим, тобто ним можна знехтувати);
- не враховувалась швидкість нагріву скін-шару до заданої температури (приймаємо, що скін-шар по всій товщині має постійну температуру $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ і досягає її миттєво);
- відсутні додаткові джерела тепла, крім основного (нагрів СВЧ), тобто об'ємна щільність потужності сторонніх потоків Q дорівнює 0;
- конвективний теплообмін досліджуваних областей з навколишнім середовищем достатньо малий, що їм можна знехтувати, тобто коефіцієнт конвективного теплообміну h дорівнює 0.

Розрахунок теплових полів доповнювався геометричними, граничними, фізичними та часовими умовами:

1. Геометричні умови визначають форму й розміри області, у якій протікає досліджуваний процес. Побудова моделі температурного поля для модельних тіл циліндричної або кубічної форми має деяку відмінність. Так, на модельних тілах кубічної форми температуру задавали лише з однієї сторони, на відміну від циліндру, в якому температуру задавали по всій поверхні. Для моделювання температурних полів нами обрані модельні тіла діаметром від 1 до 14 мм. Розміри модельних тіл кубічної форми – 6×10 мм. Величина скін-шару залишається постійною і не залежить від геометрії тіл, а тільки (як було зазначено раніше) від частоти струму і фізичних властивостей досліджуваного матеріалу. Формування вихідної геометрії модельних тіл і глибини скін-шару в графічному інтерфейсі PDETool показано на рис. 2.



а)

б)

Рис. 2 . Формування вихідної геометрії і глибини скін-шару в інтерфейсі PDETool

а) – модельне тіло циліндричної форми; б) – модельне тіло кубічної форми

2. Граничні умови визначають протікання процесу на поверхні та межах областей модельного тілу і задаються по Дирихле [5], тобто температуру $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ задавали безпосередньо на поверхні досліджуваних областей.

3. Фізичні умови характеризують теплофізичні властивості у досліджуваній області, тобто властивості матеріалу (сталей). Крім того вони характеризують об'ємну щільність потужності сторонніх джерел тепла і характер теплообміну розрахункової області з навколишнім середовищем.

4. Часові умови визначають час, необхідний для протікання процесів. Вони не залежать від геометричних і фізичних умов, а залежать лише від умов експерименту, в нашому випадку, від часу прогріву.

Результати дослідження

Зазначена методика для проведення розрахунку температурних полів дозволила отримати у графічному вигляді розподіл температури по перетину модельних тіл різної геометричної форми та хімічного складу (рис. 3-7). Також шляхом зміни часових умов (часу нагріву) був визначені оптимальний час для проведення рівномірного наскрізного прогріву тіл циліндричної форми (при різниці температури між поверхнею та серцевиною $\Delta T \leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) та час прогріву на задану глибину.

Як видно з рис. 3, а модельне тіло циліндричної форми діаметром 6 мм зі сталі 15X11МФ при швидкісному нагріві до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 1 секунду прогривається досить рівномірно,

оскільки різниця температури між поверхнею і серцевиною складає $\Delta T = 48 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Збільшення часу нагріву до 2 секунд (рис. 3, б) призводить до отримання майже однакової температури на поверхні та в серцевині ($\Delta T = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

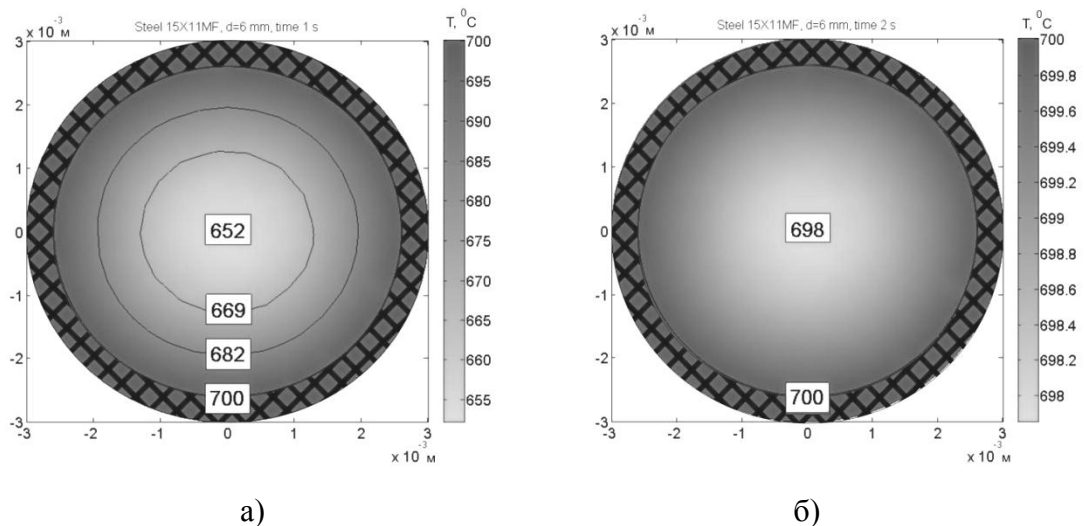


Рис. 3. Розподіл температурного поля при швидкісному нагріві модельного тіла діаметром 6 мм зі сталі 15X11МФ

а) – час нагріву 1 секунда; б) – час нагріву 2 секунди

Моделювання нагріву тіла діаметром 8 мм за 1 секунду показує (рис. 4, а), що температурне поле від поверхні до центру розподіляється нерівномірно ($\Delta T = 209 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Збільшення тривалості нагріву до 3 секунд (рис. 4, б) призводить до мінімальної різниці температур між поверхнею й серцевиною ($\Delta T = 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

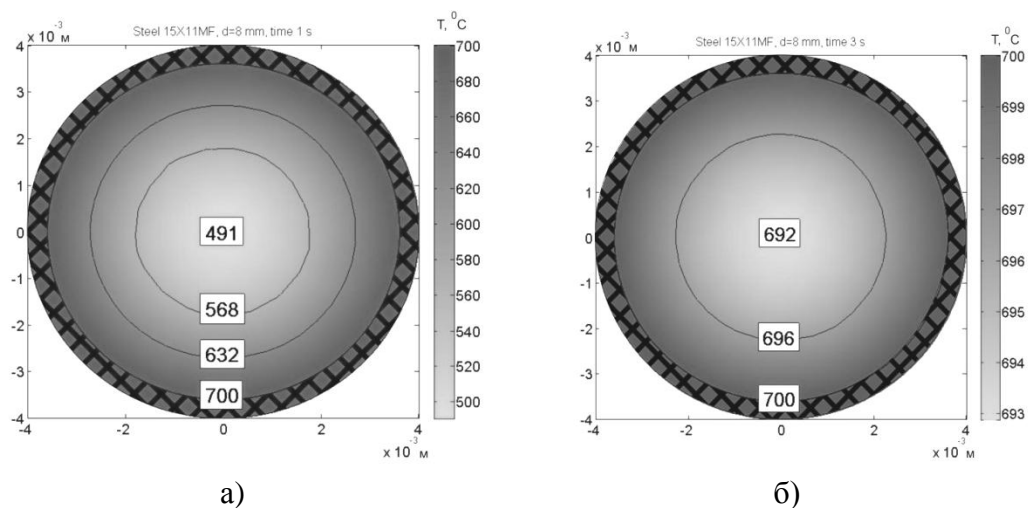
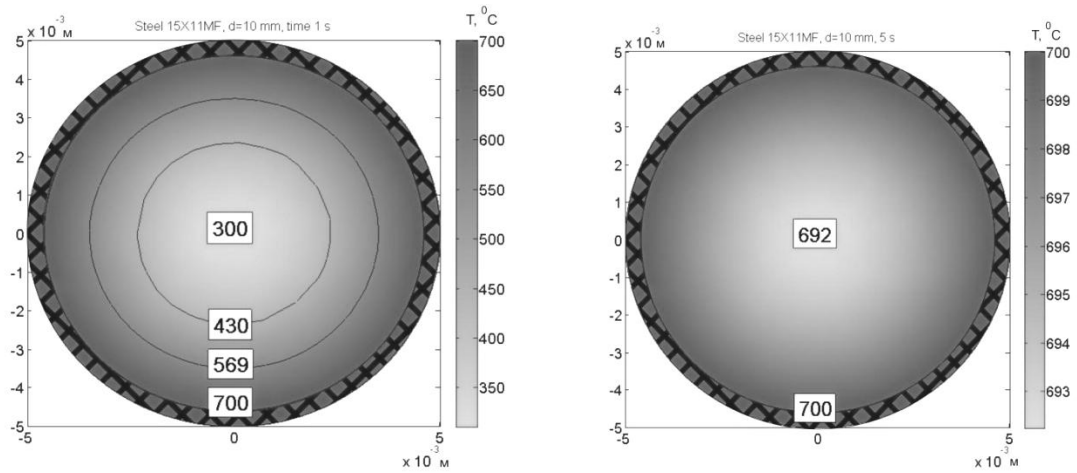


Рис. 4. Розподіл температурного поля при швидкісному нагріві модельного тіла діаметром 8 мм зі сталі 15X11МФ

а) – час нагріву 1 секунда; б) – час нагріву 3 секунди

У модельному тілі діаметром 10 мм температурне поле за 1 секунду (рис. 5, а) розподіляється вкрай нерівномірно ($\Delta T = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Шляхом моделювання встановлено, що

збільшення тривалості нагріву до 5 секунд (рис. 5, б) дозволяє отримати мінімальну різницю температур між поверхнею й серцевиною ($\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$).



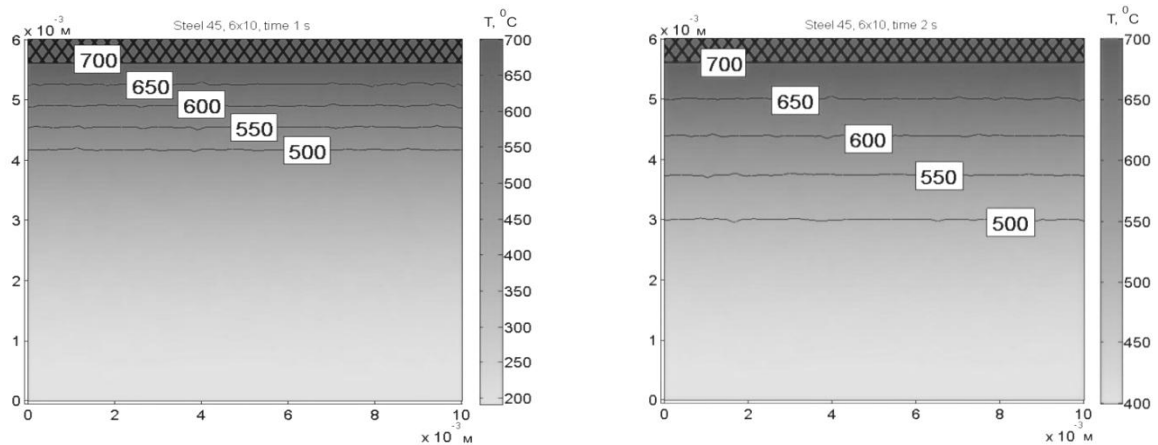
а)

б)

Рис. 5. Розподіл температурного поля при швидкісному нагріві модельного тіла діаметром 10 мм зі сталі 15X11МФ

а) – час нагріву 1 секунда; б) – час нагріву 5 секунд

На рис. 6 приведений розподіл температурних полів в кубічному модельному тілі зі сталі 45 в залежності від часу нагріву. Таке моделювання допомагає розрахувати температуру на заданій глибині, наприклад, для проведення швидкісного відпуску поверхневого шару, попередньо загартованого СВЧ. Видно, що за 1 секунду нагріву допустима різниця температур відпуску $\Delta T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ досягається на глибині 0,8 мм від поверхні (рис. 6, а); за 2 секунди нагріву аналогічна різниця температур досягається на глибині 1 мм (рис. 6, б).



а)

б)

Рис. 6. Розподіл температурного поля при швидкісному нагріві в модельному тілі кубічної форми (матеріал – сталь 45, розмір 6x10 мм)

а) – час нагріву 1 секунда; б) – час нагріву 2 секунди

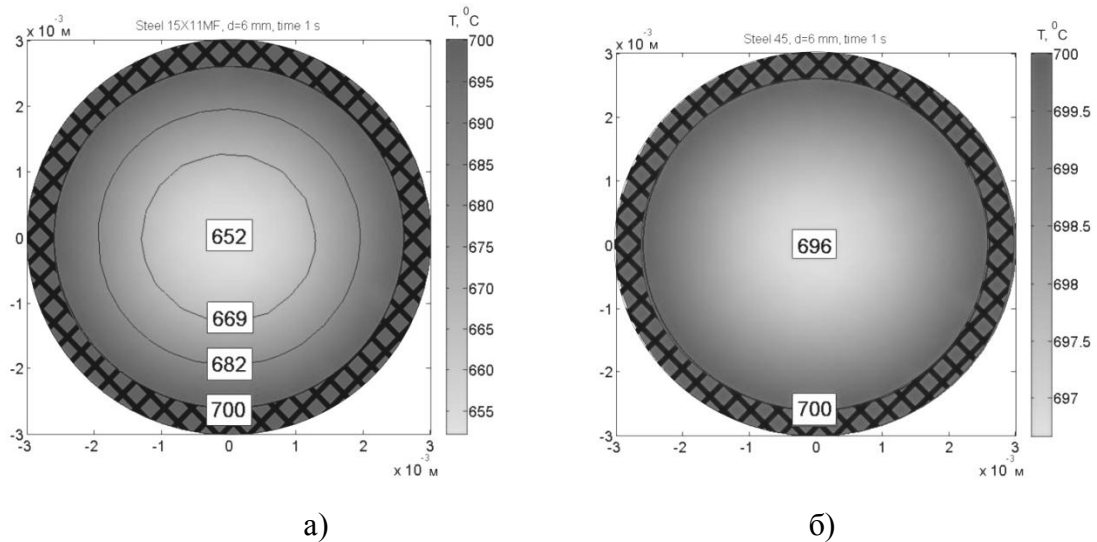
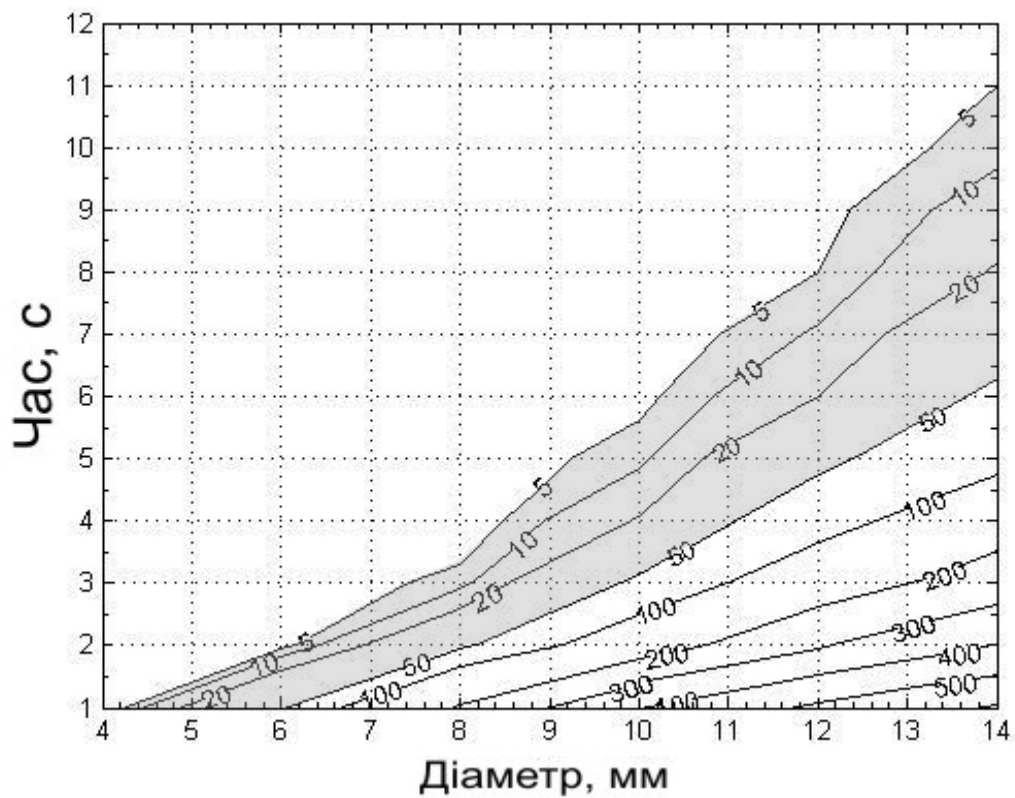


Рис. 7. Розподіл температурного поля при швидкісному нагріві модельних тіл різного хімічного складу (діаметр модельного тіла 6 мм, час нагріву 1 с)

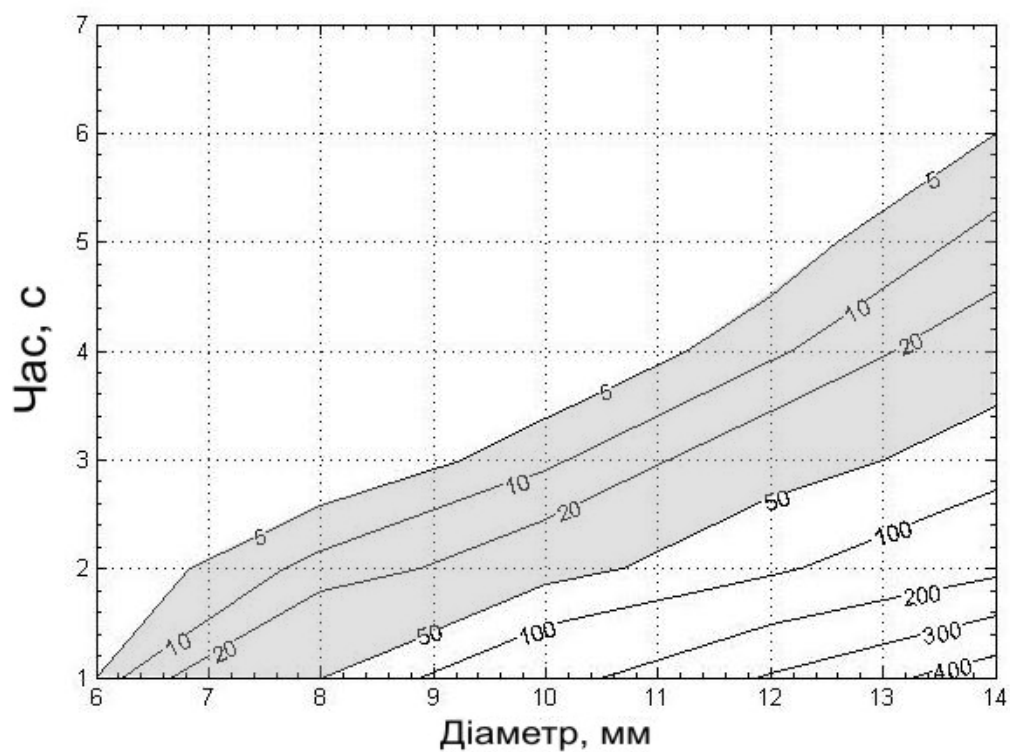
а) – сталь 15X11МФ; б) – сталь 45

З рис. 7 видно, що розподіл температури у модельних тілах циліндричної форми, що мають однаковий розмір, але різний хімічний склад, є неоднаковим. Це пояснюється різними теплофізичними властивостями матеріалів - теплопровідність вуглецевої сталі 45 вища, ніж у високолегованій сталі 15X11МФ, тобто у вуглецевій сталі більша кількість теплоти за заданий проміжок часу проходить углиб металу. Це призводить до меншого перепаду температури між поверхнею та серцевиною тіла саме у вуглецевих сталях.

За допомогою пакету MatLab, на основі отриманих даних, були побудовані номограми для модельних тіл циліндричної форми зі сталей 45 та 15X11МФ під час нагріву СВЧ до $700\text{ }^\circ\text{C}$, які описують залежність різниці температури між поверхнею та серцевиною від діаметру та часу нагріву (рис. 8).



а)



б)

Рис. 8. Номограми залежності різниці температур ($^{\circ}\text{C}$) між поверхнею та серцевиною модельних тіл циліндричної форми при нагріві СВЧ до 700°C в залежності від діаметру та часу нагріву

а) – сталь 15X11МФ; б) – сталь 45

Номограми дають змогу визначити оптимальний час прогріву циліндричних виробів різних діаметрів для отримання мінімального перепаду температури між поверхнею та серцевиною. Так, наприклад, з номограми на рис. 8 видно, що вироби зі сталі 15X11МФ діаметром до 4 мм включно, а зі сталі 45 діаметром до 6 мм включно, прогріваються рівномірно вже за 1 с. Зі збільшенням діаметру збільшується і час нагріву для досягнення мінімального перепаду температури по перетину. Для отримання перепаду температури відпуску не більше допустимої (50°C) існує певний часовий інтервал швидкісного нагріву СВЧ в залежності від діаметру циліндричного тіла: для сталі 15X11МФ він становить від 1 до 6 секунд, для сталі 45 – від 1 до 4 секунд (рис. 8).

Достовірність даних моделювання була підтверджена експериментальним шляхом замірами мікротвердості та дослідженнями мікроструктури по перетину реальних зразків зі сталі 15X11МФ різних діаметрів, що піддавалися швидкісному відпуску за допомогою нагріву СВЧ.

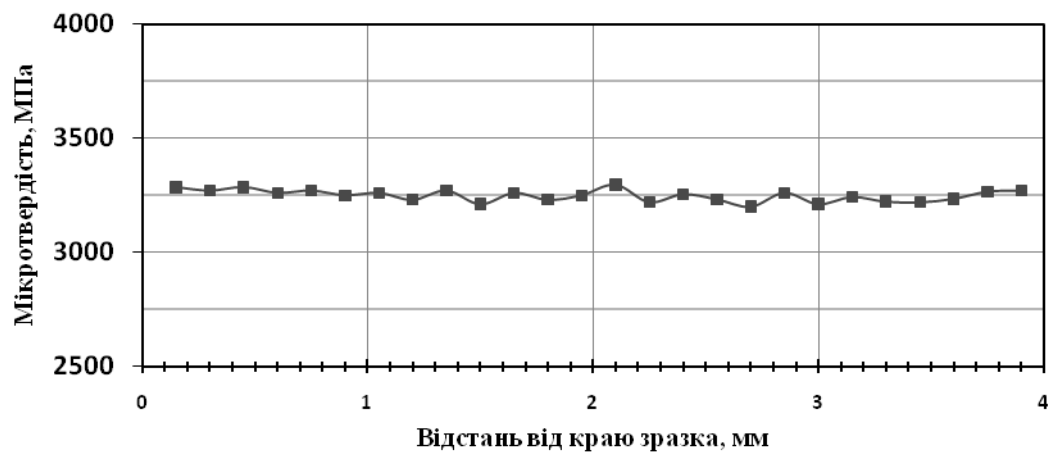


Рис. 9. Розподіл мікротвердості по перетину зразка зі сталі 15X11МФ діаметром 4 мм після відпуску СВЧ при температурі 700°C

Як видно з рис. 9, коливання значень мікротвердості по перетину циліндричного зразка зі сталі 15X11МФ діаметром 4 мм після відпуску СВЧ при 700°C знаходиться в інтервалі 3200-3300 МПа, що свідчить про практично однакові умови нагріву по перетину зразка. Такий характер розподілу мікротвердості зберігається також для усіх інших зразків зі сталі 15X11МФ (з діаметром більше, ніж 4 мм), оптимальний час прогріву яких був визначений за допомогою приведеної раніше номограми, що також підтверджує достовірність результатів моделювання.

Висновки

Отримані графічні моделі та побудовані номограми дозволяють визначити оптимальні технологічні параметри термічної обробки виробів із різних сталей під час швидкісного відпуску СВЧ з рівномірним прогрівом по перетину до 700 °С.

Для отримання температурних полів у виробках, що піддаються індукційному нагріву СВЧ до інших температур відпуску (окрім 700 °С) та з іншою частотою струму, можна використати розроблену методику моделювання, попередньо задавши відповідні граничні умови (температуру досліджуваних областей) і розрахувавши відповідну глибину скін-шару.

Література

1. *Физические основы электротермического упрочнения стали* / В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, С. П. Ошкадеров, В. И. Трефилов. – Киев, Наук. думка, 1973. – 335 с.
2. *Головин Г.Ф., Замятин М. М. Высокочастотная термическая обработка: Вопросы металловедения и технологи.* – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1990. - 240 с.
3. *Термическая обработка в машиностроении: Справочник* / под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. - М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.
4. *Владимиров В. С. Уравнения математической физики.* — М.: Наука, 1971. — 512 с.
5. *В.Е.Шмелев. Partial Differential Equations Toolbox. Инструментарий решения дифференциальных уравнений в частных производных.*
<http://matlab.exponenta.ru/pde/index.php>

Pogribnyi M.A., Vuets O.E. The research of the temperature fields during the tempering with the heating of high-frequency currents using mathematical modeling

This paper presents the possibilities research of forecasting thermal processes by temperature fields simulation during the heating of high-frequency currents (HFC) with the heat treatment (tempering) details of machines and mechanisms. The technique for constructing the temperature fields on the bodies model of various geometrical shapes and composition, which are the prototype of the real products, with the help of MatLab is developed. The comparison of the influence of heating time, the sizes and chemical composition of the material on the temperature distribution on the cross-section of the products is given. The nomograms, which allow to determine the necessary technological parameters of the heat during the high-speed tempering of HFC are plotted.

М.А. Погрібний, О.Є. Вуєць Дослідження температурних полів під час відпуску з нагрівом струмами високої частоти за допомогою математичного моделювання

Дана робота присвячена дослідженню можливості прогнозування термічних процесів шляхом моделювання температурних полів під час нагріву струмами високої частоти (СВЧ) при термічній обробці (відпуску) деталей машин та механізмів. Розроблена методика побудови температурних полів на модельних тілах різної геометричної форми і складу, які є прототипом реальних виробів, за допомогою пакету MatLab. Проведене порівняння впливу часу нагріву, розмірів та хімічного складу матеріалу на розподіл температури по перетину виробів. Побудовані номограми, які дозволяють визначити необхідні технологічні параметри нагріву під час швидкісного відпуску СВЧ.