

О.О. ВОЛКОВ, В.В. СУББОТИНА, С.А. КНЯЗЬВ, В.А. РЯБОШТАН, Ж.В. КРАЄВСЬКА, В.М. ШЕВЦОВ

ТЕПЛОВІ РОЗРАХУНКИ ШВИДКОГО НАГРІВАННЯ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИ ВИПРОБУВАННІ ТЕХНОЛОГІЇ КОМБІНОВАНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ГАРТУВАННЯ НАПЛАВЛЕНИХ ДЕТАЛЕЙ З РОБОЧОЮ ЧАСТИНОЮ ІЗ СТАЛІ 15X11МФ

Зміцнення поверхонь, що контактують, спрямоване на покращення властивостей матеріалів вузлів з метою забезпечення більш ефективної роботи механізмів та пристроїв. Комбіноване поверхнє гартування з використанням тертя – це спосіб зміцнення, який дозволяє суттєво покращити механічні та трибологічні властивості матеріалів. Важливим аспектом для керування даним методом зміцнення є теплові розрахунки процесу. У зв'язку з цим актуальною є потреба в проведенні теплових розрахунків процесу швидкого нагрівання та охолодження після нагрівання при випробуванні технології комбінованого поверхневого гартування наплавлених деталей. метою даної роботи є проведення теплових розрахунків циклу швидкого нагрівання та охолодження після нагрівання при поверхневому гартуванні наплавлених деталей з робочою частиною із сталі 15X11МФ. Дана марка сталі є конструкційною легованою з підвищеною корозійною стійкістю. Комбіноване поверхнє гартування проводили на установці для оброблення за допомогою тертя. Джерелом нагрівання в технології комбінованого поверхневого гартування є тертя, яке відбувається між інструментом – сталевим диском, що обертається та поверхню деталі, що оброблюється. Для аналізу розподілення температури від поверхні вглиб зразків при комбінованому поверхневому гартуванні розв'язувалася задача теплопровідності з використанням методу джерел. Вхідними параметрами для розрахунку теплових явищ при комбінованому поверхневому гартуванні матеріалу, що досліджували: a – коефіцієнт температуропровідності; λ – коефіцієнт теплопровідності; $a_{\text{ф}}$ – фактичне значення глибини оброблення, взяте з того боку, де був зроблений мікрошліф; r – радіус диска; L – довжина контакту диска з поверхню зразка при обробленні зразків; y – критерій теплового джерела – значення ізотерми в 150 °С, взяте з того боку, де був зроблений мікрошліф. Результатом теплових розрахунків відповідно до форми джерела є температурне поле від миттєвого джерела відповідної форми. Для оцінки і аналізування термічного циклу нагрівання – охолодження сталі при обробленні був розрахований і побудований відповідний графік нагрівання – охолодження, з використанням якого стає можливим розрахунок реальної швидкості охолодження в поверхневому шарі зразків при обробленні.

Ключові слова: сталь 15X11МФ, тертя, нагрівання, охолодження, поверхня, комбіноване поверхнє гартування, теплові розрахунки, теплове джерело, тепловий потік, теплове поле, ізотерми

O. VOLKOV, V. SUBBOTINA, S. KNYAZEVA, V. RYABOSHATAN, Zh. KRAIEVSKA, V. SHEVTSOV

THERMAL CALCULATIONS OF RAPID HEATING AND COOLING DURING TESTING THE TECHNOLOGY OF COMBINED SURFACE HARDENING OF WELDED PARTS WITH A WORKING PART MADE OF 15X11MF STEEL

Hardening of contacting surfaces is aimed at improving the material properties of components to ensure more efficient operation of mechanisms and devices. There are many surface modification technologies, such as: creating surfacing on the surface, creating coatings, forming surface layers using various techniques, and other technologies. Such technologies are aimed at improving the mechanical and tribological properties of materials and products made of them. Combined surface hardening using friction is a hardening method that can significantly improve the mechanical and tribological properties of materials. Thermal calculations of the process are an important aspect for controlling this hardening method. In this regard, there is an urgent need to perform thermal calculations of the process of rapid heating and cooling after heating during testing the technology of combined surface hardening of welded parts. the purpose of this work is to perform thermal calculations of the cycle of rapid heating and cooling after heating during surface hardening of welded parts with a working part made of 15X11MF steel. This steel grade is a structural alloy steel with increased corrosion resistance. Combined surface hardening was performed on a friction treatment unit. The source of heating in the combined surface hardening technology is the friction that occurs between the tool, a rotating steel disk, and the surface of the workpiece. To analyze the temperature distribution from the surface deep into the samples during combined surface hardening, the heat conduction problem was solved using the source method. The problem of heat conduction was solved in a coordinate system that moves with the heat source, i.e., with the contact surface. The input parameters for calculating thermal phenomena during the combined surface hardening of the studied material were: a - thermal conductivity coefficient; λ - thermal conductivity coefficient; $a_{\text{ф}}$ - actual value of the machining depth taken from the side where the microgroove was made; r is the radius of the disk; L is the length of contact between the disk and the sample surface during sample processing; y is the heat source criterion - the isotherm value of 150 °C, taken from the side where the grinding was performed. The result of thermal calculations according to the shape of the source is the temperature field from an instantaneous source of the corresponding shape. The temperature field is shown in the boundary plane of the sample plate section and demonstrates to what depth and temperature the sample was heated during processing. To evaluate and analyze the thermal cycle of steel heating and cooling during machining, a corresponding heating-cooling graph was calculated and plotted, which makes it possible to calculate the actual cooling rate in the surface layer of the samples during machining. The expediency of applying this technology in terms of a high-speed method of heating and cooling the surface layer of the processed parts is shown. The data obtained make it possible to calculate the cooling rate of the surface after heating in the process of combined surface hardening, or the cooling rate at any depth of the part sample within the temperature field that occurs during its processing, which is planned in further research.

Keywords: 15X11MF steel, friction, heating, cooling, surface, combined surface hardening, thermal calculations, heat source, heat flux, heat field, isotherms

Вступ. Актуальність задачі. Зміцнення поверхонь, що контактують, спрямоване на покращення властивостей матеріалів вузлів з метою забезпечення більш ефективної роботи механізмів та пристроїв. Цей процес може бути виконаний за допомогою різних методів та технологій. Серед них

можуть бути технології модифікування поверхні такі як: створення наплавок на поверхні, створення покриттів, формування поверхневих шарів з використанням різних методик, та інші технології, що спрямовані на покращення механічних та трибологічних властивостей матеріалів та виробів з

них [1-8]. Наприклад лазерне зміцнення поверхні — це процес, який базується на точному контролі теплової енергії, що подається на металеву поверхню, щоб змінити її мікроструктуру та покращити механічні властивості [9]. Під час оброблення конкретних матеріалів за допомогою лазерного випромінювання необхідно точно контролювати кілька ключових параметрів, щоб оптимізувати взаємодію та досягти бажаних результатів. Цими параметрами є [9-12]: довжина хвилі, інтенсивність лазерного променя, тривалість імпульсу, частота повторення, якість променя. Правильно підібрані параметри дають можливість точно контролювати взаємодію лазера з матеріалом, забезпечуючи ефективне та високоякісне оброблення широкого діапазону матеріалів [9]. Базовий механізм лазерного поверхневого зміцнення передбачає наступні кроки:

1. Поглинання енергії лазера – лазерний промінь фокусується на металевій поверхні, де енергія поглинається, спричиняючи швидке нагрівання. Ефективність поглинання залежить від стану поверхні матеріалу та довжини хвилі лазера. Оскільки метали зазвичай мають високу відбивну здатність, поверхневі оброблення, наприклад нанесення поглинаючих покриттів, можуть покращити поглинання енергії.

2. Теплова дифузія – поглинена енергія швидко нагріває поверхневий шар металу до температур, що перевищують точку його фазового перетворення. Це створює тепловий градієнт, де найвища температура знаходиться на поверхні і поступово знижується в глибину матеріалу. Теплова енергія дифузує в матеріал відповідно до його теплопровідності.

3. Фазові перетворення – в міру підвищення температури поверхневого шару відбуваються фазові перетворення. Наприклад, у сталях температура може перевищувати точку аустенізації, що призводить до утворення аустеніту. Під час швидкого охолодження цей аустеніт перетворюється на мартенсит — тверду й крихку фазу, яка підвищує твердість поверхні.

4. Швидке охолодження та самозагартування – нагрітий поверхневий шар швидко охолоджується через теплопровідність до більш холодних підлеглих шарів матеріалу та навколишнього середовища. Це швидке охолодження, або самозагартування, є критично важливим для утворення мартенситу у сталі. Швидкість охолодження значно перевищує традиційні методи загартування, що призводить до формування дрібнозернистих мікроструктур і підвищення твердості [9].

К.В. Михайленков та О.В. Бердова-Бушура вважають, що довговічність роботи конструкцій і машин залежить від опору втомлюваності. Руїнування деталі в процесі експлуатації, як правило, починається з поверхневого шару [13]. Погрелюк І.М., Ткачук О.В., Самборський О.В. Сірик З.О. знайшли пояснення цьому в тому, що поверхневі шари знаходяться в найбільш напруженому стані, є межами поділу фаз і

піддаються впливу навколишнього середовища [14]. Проведені дослідження показують, що методи поверхнево-пластичного деформування можуть служити одними із ефективних засобів підвищення якості деталей. Розглянуті методи поверхневого пластичного деформування призводять до підвищення втомної міцності сплаву Ti-45 ат. % Al легованого Nb. Дробоструминне оброблення керамічним дробом приводить до підвищення втомної міцності поверхні матеріалу на 14 %. Завдяки прокатки поверхні роликками можна підвищити втомну міцність лише на 4 % [13].

Принципово іншим є зміцнення поверхні за допомогою азотування. Азотування є ефективним процесом хімікотермічного оброблення для зміцнення несучих деталей, шляхом дифузії атомів азоту в поверхню з утворенням твердого сполученого шару (або так званого «білого шару») і дифузійної зони. Для залізних сплавів після процесу азотування поверхневий шар, як правило, складається з нітридів заліза, тобто $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ і $\epsilon\text{-Fe}_2\text{N}$ [15,16]. Хоча нітридний шар характеризується високою твердістю, але зі зростанням його товщини, зміцнений шар починає втрачати свою структурну стійкість і стає надзвичайно крихким, що суттєво впливає на його механічні властивості [15,17,18]. Yao, J. W., Yan, F. Y., Yan, M. F., Zhang, Y. X., Huang, D. M., & Xu, Y. M в своїй роботі вперше запропонували формулу для обчислення еквівалентного вмісту хрому, яка базується на електронегативностях заміщуючих розчинених елементів. Це дозволяє розглядати нітридований багатоконпонентний сплав як трирозчинну систему Fe-Cr-N для термодинамічних розрахунків. Також розроблено термодинамічну модель, яка передбачає, що система є псевдобінарним розчином між N-збагаченою фазою ОЦК-Fe та N-збагаченою мартенситною фазою. Сталь 40CrNi (сталь 40XH) використовується як приклад матеріалу для демонстрації розробки термодинамічної моделі та оцінки стабільності розчину за різних температур. Для підтвердження термодинамічних передбачень щодо утворення нанокристалічної структури зразки сталі 40CrNi (сталь 40XH) піддавали плазмовому нітруванню за розрахованих умов. Дослідження (характеризація) матеріалу проводилося методами рентгенівської дифракції та трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) [15].

Метод поверхневого зміцнення, при якому лише поверхневий шар заготовки із заліза відповідної товщини нагрівається електромагнітним впливом до температури, що перевищує верхню границю допустимої температури, і відразу ж загартується [19]. Системи індукційного нагрівання забезпечують швидкий, ефективний і економічний спосіб нагрівання будь-якого електропровідного матеріалу до заданої температури. Обладнання використовує доступну електричну енергію для нагрівання всієї поверхні деталі або окремих зон. Глибина нагрівання може обмежуватися лише поверхневими шарами або охоплювати весь поперечний переріз. Індукційне

нагрівання однаково ефективно як для майстерень, так і для масового виробництва [19,20]. Однак у цього методу є певні недоліки. Складність конструкції індукторів і обмеження за формою деталей звужують сферу застосування індукційного нагрівання. Неправильна форма деталей вимагає виготовлення індивідуальних індукторів, що ускладнює процес загартування. Крім того, потрібне використання високочастотних джерел живлення, які є дорогими і складними. Для дрібносерійного виробництва цей метод є економічно не вигідним через високу вартість експлуатації та обслуговування [19-21]. Індукційне нагрівання широко застосовується для часткового або наскрізного зміцнення, зняття внутрішніх напружень, відпускання, нормалізації та відпалення. Однак індукційне нагрівання також використовується для багатьох інших цілей, таких як з'єднання, зміцнення зубчастих коліс, паяння, склеювання, полімеризації та сушіння. Серед інших важливих застосувань можна виділити теплове та гаряче ущільнення, а також формування деталей із порошкових металів із високою точністю до готової форми. Крім того, індукційне нагрівання широко використовується для плавлення, гарячого кування та теплового штампування [19].

Науковці Toh, D., Van Bui, P., Isohashi, A., Matsuyama, S., Yamauchi, K. and Sano, Y досліджували електрохімічні покриття, а саме (автокаталітичне (або безелектродне) покриття — це метод отримання тонкої металевої плівки на металах, кераміці чи пластиках за кімнатної температури шляхом простого занурення основи в електролітний розчин. Цей метод широко використовується у виробництві електронних компонентів та інших промислових виробів. Розчин для автокаталітичного покриття — це складний електролітний склад, який містить металеві іони, відновники, ліганди та інші додаткові компоненти. На сьогодні загальноприйнято, що процес безелектродного покриття відбувається за електрохімічним механізмом, який включає одночасну реакцію катодного осадження металу та анодного окислення відновників, відповідно до теорії змішаного потенціалу [19,22].

Щодо покриттів, вважається, що якість, надійність та довговічність деталей вузлів механізмів забезпечується, в тому числі, застосуванням захисних покриттів. А підвищення абразивної зносостійкості покриттів багато авторів пов'язують з утворенням дрібнодисперсних карбідних частинок, що мають високу твердість і перешкоджають впровадженню абразивних частинок у поверхню при контакті з ними. Механічні властивості характеризують та визначають поведінку матеріалу під дією докладених до нього зовнішніх впливів та механічних навантажень. Трибологічні дослідження можуть вивчати певні аспекти поведінки та зношування поверхні при різних умовах тертя, що може сприяти вирішенню проблеми підвищення опору вузлів тертя абразивному та іншим видам зношення.

Комбіноване поверхне гартування з використанням тертя – це спосіб зміцнення, який дозволяє суттєво покращити зазначені властивості матеріалів. Ця технологія передбачає висококонцентрований тепловий вплив на поверхню при її обробленні, адже джерелом нагрівання є тертя. Тож важливим аспектом для керування даним методом зміцнення є теплові розрахунки процесу. У зв'язку з цим актуальною є потреба в проведенні теплових розрахунків процесу швидкого нагрівання та охолодження після нагрівання при випробуванні технології комбінованого поверхневого гартування наплавлених деталей. З посиланням на вищезазначене, метою даної роботи є проведення теплових розрахунків циклу швидкого нагрівання та охолодження після нагрівання при поверхневому гартуванні наплавлених деталей з робочою частиною із сталі 15X11MФ.

Експериментальна частина. В рамках даного дослідження застосовано деталь з робочою частиною із сталі 15X11MФ, яка є матеріалом для випробування. Дана марка сталі є конструкційною легованою з підвищеною корозійною стійкістю. Проте така сталь дещо обмежена в набутті високого рівня механічних та трибологічних характеристик при застосуванні класичних методів термічного зміцнення. Комбіноване поверхне гартування проводили на установці для оброблення за допомогою тертя. Джерелом нагрівання в технології комбінованого поверхневого гартування є тертя, яке відбувається між інструментом – сталевим диском, що обертається та поверхнею деталі, що оброблюється. При цьому тепло, яке генерується в результаті тертя при її обробленні, розповсюджується в деталь за рахунок теплопровідності в напрямку від поверхні, як показано на рис. 1.

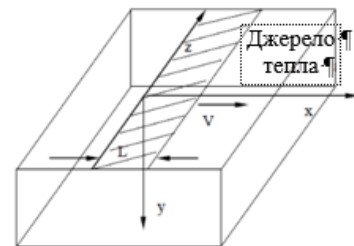
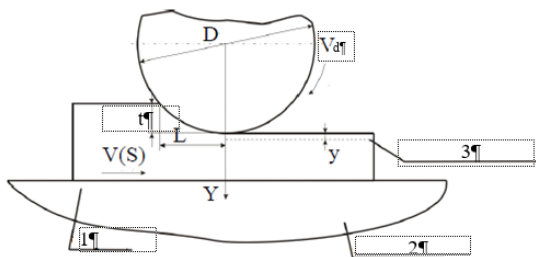


Рисунок 1 – Схема розташування джерела тепла на поверхні зразка в момент оброблення - комбінованого поверхневого гартування

Розігрівання поверхні залежить від інтенсивності теплового потоку в деталь, який генерується силами тертя, що виникають в процесі оброблення поверхні. Зразки у вигляді пластин гальванічно покривали тонким шаром олова. Це необхідно для визначення, за допомогою експериментально-розрахункового підходу, глибини розповсюдження в зразки температури 150 °С при розігріванні в процесі оброблення. Визначення глибини розповсюдження температури в 150 °С дозволяє розрахувати температурні поля,

що утворюються в процесі оброблення в поверхневому шарі матеріалу. Для аналізу розподілення температури від поверхні вглиб зразків при комбінованому поверхневому гартуванні розв'язувалася задача теплопровідності з використанням методу джерел. Дане розв'язання здійснювалося без урахування тепловіддачі від поверхні $y = 0$ в навколишнє середовище, тобто без урахування конвективного охолодження поверхні $y = 0$ повітрям. При цьому для описання температурного поля в зразку приймаємо, що джерело тепла плоске, смугове, тобто нескінченне уздовж осі z , і довжиною, що дорівнює довжині дуги контакту L , рухається по поверхні напівпростору зі швидкістю V . Разом з джерелом рухається і прямокутна система координат (див.рис. 1).

Вхідними параметрами для розрахунку теплових явищ при комбінованому поверхневому гартуванні матеріалу, що досліджували: a – коефіцієнт температуропровідності, $\text{см}^2 / \text{с}$; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{кал}/\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{град}$; a_f – фактичне значення глибини оброблення, взяте з того боку, де був зроблений мікрошліф, (рис. 2); r – радіус диска, см ; L – довжина контакту диска з поверхнею зразка при обробленні зразків, см ; y – критерій теплового джерела – значення ізотерми в 150°C , взяте з того боку, де був зроблений шліф, см . (вимірювалося після оброблення зразка з використанням мікроскопа – це відстань від обробленої поверхні до границі зміни кольору на півці нанесеного олова.



1 – зразок; 2 – стіл установки; 3 – границя зміни кольору нанесеного олова (критерій теплового джерела)

Рисунок 2 – Схема проведення комбінованого поверхневого гартування

Суть методу джерел полягає у використанні фундаментального розв'язання рівняння теплопровідності для точкового джерела, що миттєво виникло і згасло в нескінченному однорідному просторі і внесло в нього певну кількість тепла Q . Дане рівняння має наступний вигляд:

$$T(x, y, z, t) = \frac{Q}{\lambda \sqrt{a} (4\pi t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}{4at}\right], \quad (1)$$

де $T(x, y, z, t)$ – температура будь-якої точки тіла з координатами x, y, z через t секунд після того, як в точці з координатами x_0, y_0, z_0 має місце тепловий

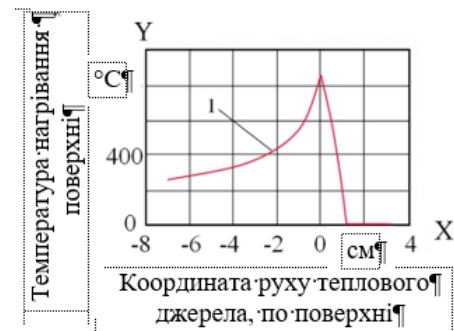
імпульс; Q – кількість теплоти, внесене точковим джерелом в нескінченний однорідний простір, кал ; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу оброблюваної сталі, $\text{кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$; a – коефіцієнт температуропровідності, $\text{см}^2/\text{с}$.

Результати та їх обговорення.

Результатом розв'язання рівняння (1) відповідно до форми джерела є температурне поле від миттєвого джерела відповідної форми. Щоб врахувати рух джерела тепла, наприклад, уздовж осі x , необхідно додати $(x - x_0)^2$ в експоненційній функції рішення (1) замінити на $[x - x_0 + V(\tau - t)]$. Відсутність тепловіддачі від поверхні $y = 0$ в навколишнє середовище, тобто дотримання граничних умов другого роду

$$\frac{dT}{dy} = 0, y = 0 \quad (2)$$

досягається подвоєнням щільності (густини) теплового потоку q в джерелі. Тепловий потік q графічно може бути представлений у вигляді зміни температури на будь-якій глибині. Розглянемо тепловий потік на глибині $0,35$ мм від поверхні в зразку деталі з робочою частиною із сталі 15X11МФ при його комбінованому поверхневому гартуванні (рис. 3).



1 – крива зміни густини теплового потоку

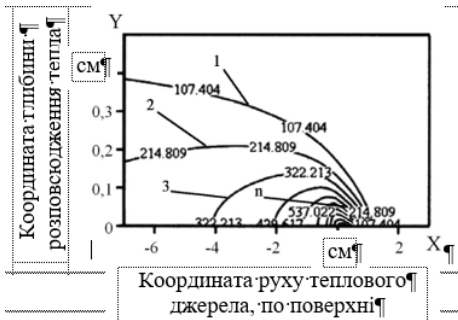
Рисунок 3 – Графік густини (інтенсивності) теплового потоку на глибині $0,35$ мм від поверхні в зразку із сталі 15X11МФ при його комбінованому поверхневому гартуванні

Температурне поле представляється у вигляді ізотерм в координатах $y = f(x)$, де x – вісь декартової системи координат, в протилежному напрямку якої рухається джерело тепла, тобто координата руху теплового джерела по поверхні або відстань від переднього фронту джерела тепла (рис. 4).

При цьому координата x є паралельною до напрямку подачі при обробленні, y – вісь координат, що показує глибину перерізу зразка, тобто відстань від поверхні контакту до протилежної нижньої поверхні зразка. Ця вісь демонструє на яку глибину та до якої температури прогрівся зразок при обробленні (рис. 4). Таким

чином, температурне поле показано в граничній площині перерізу пластини-зразка. Задача теплопровідності розв'язувалася в системі координат, яка рухається разом з тепловим джерелом, тобто з поверхнею контакту.

Крім того, за допомогою отриманих температурних полів можна визначити максимальну температуру нагрівання поверхні зразків, температуру на відстані у від поверхні та час, впродовж якого були реалізовані нагрівання та охолодження точки поверхневого шару і, відповідно, його ділянки.



1,2,3 ... n – ізотерми поширення тепла на різну глибину в зразку

Рисунок 4 – Графік температурного поля в зразку

із сталі 15X11МФ при його обробленні - комбінованому поверхневому гартуванні

При цьому значення величини у може варіюватися від 0 до будь-якої глибини в межах температурного поля і з будь-яким кроком вимірювання при наявності даних про температуру нагрівання поверхні. З урахуванням того, що остання ізотерма на графіку температурного поля, відповідно до умов даного експерименту, складає близько 100 °С, що нижче за температуру будь-яких перетворень для сталі, можна досить чітко визначити глибину поширення цієї чи іншої температури та можливість і глибину протікання того чи іншого перетворення в сталі в процесі зазначеного оброблення. Для оцінки і аналізування термічного циклу нагрівання – охолодження сталі при обробленні був розрахований і побудований відповідний графік нагрівання – охолодження, з використанням якого стає можливим розрахунок реальної швидкості охолодження в поверхневому шарі зразків при обробленні. В результаті всіх описаних дій отримано наступне рівняння:

$$T(x, y, z, t) = \int_0^t \int_0^{\infty} \frac{Q}{2\sqrt{\pi a(t-\tau)}} \exp\left[-\frac{y^2 + [(x-x_0)^2 + V(t-\tau)^2 + (z-z_0)^2]}{4a(t-\tau)}\right] d\tau dx, \quad (3)$$

де $T(x, y, z, t)$ – температура будь-якої точки тіла з координатами x, y, z через t секунд після того, як в точці з координатами x_0, y_0, z_0 має місце тепловий імпульс; Q – кількість теплоти, внесене точковим джерелом в нескінченний однорідний простір, кал; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу оброблюваної сталі, кал/(см·с·°С); a – коефіцієнт температуропровідності, см²/с.

Результат розв'язання рівняння (3) представлений графічно у вигляді кривої охолодження зразка після нагрівання при обробленні на конкретній глибині від поверхні. Так, на рис. 5 наведено графік для розрахунку швидкості охолодження, який є частиною графіка термічного циклу комбінованого поверхневого гартування. Він має вигляд спадаючої гілки охолодження зразка із сталі 15X11МФ після нагрівання при обробленні за режимом $S = 100$ мм/с, $t = 0,7$ мм на глибині від поверхні 0,35 мм.

З використанням отриманої кривої охолодження може бути розрахована швидкість охолодження поверхні після нагрівання в процесі комбінованого поверхневого гартування, або швидкість охолодження на будь-якій глибині зразка в межах температурного поля, що виникає під час його оброблення (рис. 4).

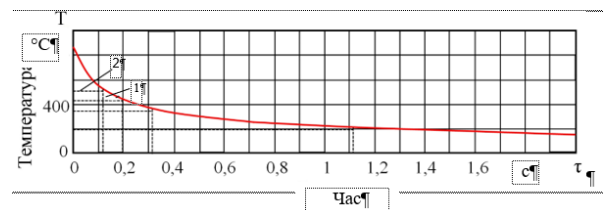
Швидкість охолодження за відрізки часу, що взяті послідовно, тобто при малих значеннях різниці температур, розраховувалася за формулою (4) за допомогою диференціювання температури за часом:

$$V_{\text{охол}} = \frac{dT}{dt} \text{ або } \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad (4)$$

Тобто

$$V_{\text{охол}} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}} \text{ (град/с)}, \quad (5)$$

Так, за час 1,1 с температура з 854 °С знизилася до 200 °С. Таким чином, швидкість охолодження $(854 - 200) / 1,1 = 594,55$ °С/с на глибині 0,35 мм (рис. 5).



1 – зміна температури dT; 2 – зміна часу dt

Рисунок 5 – Графік для розрахунку швидкості охолодження після нагрівання при обробленні - комбінованому поверхневому гартуванні на глибині від поверхні 0,35 мм в зразку із сталі 15X11МФ

Висновки.

1. Розв'язано задачу теплопровідності для комбінованого поверхневого гартування з використанням тертя сталі 15X11МФ з якої виготовлено робочу частину наплавленої деталі. Задача теплопровідності розв'язувалася в системі координат, яка рухається разом з тепловим джерелом, тобто з поверхнею контакту.

2. Розраховано та побудовано графік температурного поля від миттєвого джерела відповідної форми. Температурне поле показано в граничній площині перерізу пластини-зразка.

3. Визначено на яку глибину та до якої температури відбулося нагрівання зразка деталі при обробленні, що показано на графіку температурного поля у вигляді відповідних ізотерм.

4. Показано доцільність застосування зазначеної технології в аспекті швидкісного способу нагрівання та охолодження поверхневого шару деталей, що оброблюються.

5. Отримані дані дозволяють розрахувати швидкість охолодження поверхні після нагрівання в процесі комбінованого поверхневого гартування, або швидкість охолодження на будь-якій глибині зразка деталі в межах температурного поля, що виникає під час його оброблення, що заплановане в подальших дослідженнях.

Список літератури

1. Arulvel, S., Jain, A., Kandasamy, J., & Singhal, M. (2023). "Laser processing techniques for surface property enhancement: Focus on material advancement". *Surfaces and Interfaces*, Vol. 42, 103293.
2. Volkov O., Subbotina V., Subbotin O., Vasilchenko A., Shyogoleva M. (2023), "Methods of structural engineering of surface in solving the problems of multifactorial increase of the level of operational characteristics of materials", *Solid state phenomena*, Vol. 350, pp. 3–12.
3. Volchuk, V.M., Hlushkova, D.B. (2024), "Application of new plasma coatings for restoration of the surface of material", *Functional Materials*, Vol. 31(2), pp. 205–209.
4. Matykina, E., Arrabal, R., Mohedano, M., Mingo, B., Gonzalez, J., Pardo, A. (2017), "Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys", *Transactions of nonferrous metals society of China*, Vol. 27, pp. 1439–1454.
5. Sun, X., Zhang, J., Pan, W., Wang, W., & Tang, C. (2022). "Research progress in surface strengthening technology of carbide-based coating". *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 905, 164062.
6. Damodaram, R., Rai, P., Daniel, S. C. J., Bauri, R., & Yadav, D. (2021). "Friction surfacing: A tool for surface crack repair". *Surface and Coatings Technology*, Vol. 422, 127482.
7. Knyazev, S., Rebrova, R., Riumin, V., Nikichanov, V., Rebrova, A. (2021), "Establishment of structure and operational properties of borated layers on 40X steel obtained from paste by induction heating", *Functional Materials*, 28(1), pp.76–83
8. Aswad, Mokhalad F., Aseel J. Mohammed, and Sahar R. Faraj. (2021), "Induction Surface Hardening: A review." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1973 (1), pp. 1-16.
9. Łach, Ł. (2024). Recent advances in laser surface hardening: Techniques, modeling approaches, and industrial applications. *Crystals*, Vol. 14(8), 726.
10. Weingarten, C.; Uluz, E.; Schmickler, A.; Braun, K.; Willenborg, E.; Temmler, A.; Heidrich, S. Glass processing with pulsed CO₂ laser radiation. *Appl. Opt.* 2017, 56, 777–783
11. Mahrle, A.; Beyer, E. Theoretical evaluation of radiation pressure magnitudes and effects in laser material processing. *Phys. Scr.* 2019, 94
12. Metzner, D.; Olbrich, M.; Lickschat, P.; Horn, A.; Weißmantel, S. Experimental and Theoretical Determination of the Effective Penetration Depth of Ultrafast Laser Radiation in Stainless Steel. *Lasers Manuf. Mater. Process.* 2020, 7, 478–495.
13. Бердова-Бушура, О. В., & Михаленков, К. В. (2016). "Ефект дробеструйної обробки та прокатки поверхні роликками на механічні характеристики сплаву γ -TiAl".
14. Погрелок І.М., Ткачук О.В., Самборський О.В. Сірик З.О. (2011). "Механічні характеристики титанових сплавів з поверхневими зміцненими шарами". *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Вип. 39. С. 157–162.
15. Yao, J. W., Yan, F. Y., Yan, M. F., Zhang, Y. X., Huang, D. M., & Xu, Y. M. (2019). The mechanism of surface nanocrystallization during plasma nitriding. *Applied Surface Science*, 488, 462–467.
16. Kurelo, B. C., de Souza, G. B., da Silva, S. L. R., Serbena, F. C., Foerster, C. E., & Alves Jr, C. (2015). Plasma nitriding of HP13Cr supermartensitic stainless steel. *Applied Surface Science*, 349, 403–414.
17. Bell, T., Sun, Y., & Suhadi, A. (2000). Environmental and technical aspects of plasma nitrocarburising. *Vacuum*, 59(1), 14–23.
18. Pye, D. (2003). *Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing*. ASM international.
19. Aswad, M. F., Mohammed, A. J., & Faraj, S. R. (2021, August). Induction Surface Hardening: A review. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1973, No. 1, p. 012087). IOP Publishing.
20. Mohammad, J. H. A., Afify, R. M., Mansour, E. H., & Gafer, A. M. (2019). Effect of heat treatment of steel AISI X 210 Cr 12 on surface roughness quality during turning operation. *Engineering Research Journal*, 1(39), 6–11.
21. Kakani, S.L., 2006. Material science. New Age International
22. Toh, D., Van Bui, P., Isohashi, A., Matsuyama, S., Yamauchi, K., & Sano, Y. (2020). An abrasive-free chemical polishing method assisted by nickel catalyst generated by in situ electrochemical plating. *Review of Scientific Instruments*, 91(4).
1. Arulvel, S., Jain, A., Kandasamy, J., & Singhal, M. (2023). "Laser processing techniques for surface property enhancement: Focus on material advancement". *Surfaces and Interfaces*, Vol. 42, 103293.
2. Volkov O., Subbotina V., Subbotin O., Vasilchenko A., Shyogoleva M. (2023), "Methods of structural engineering of surface in solving the problems of multifactorial increase of the level of operational characteristics of materials", *Solid state phenomena*, Vol. 350, pp. 3–12.
3. Volchuk, V.M., Hlushkova, D.B. (2024), "Application of new plasma coatings for restoration of the surface of material", *Functional Materials*, Vol. 31(2), pp. 205–209.
4. Matykina, E., Arrabal, R., Mohedano, M., Mingo, B., Gonzalez, J., Pardo, A. (2017), "Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys", *Transactions of nonferrous metals society of China*, Vol. 27, pp. 1439–1454.
5. Sun, X., Zhang, J., Pan, W., Wang, W., & Tang, C. (2022). "Research progress in surface strengthening technology of carbide-based coating". *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 905, 164062.
6. Damodaram, R., Rai, P., Daniel, S. C. J., Bauri, R., & Yadav, D. (2021). "Friction surfacing: A tool for surface crack repair". *Surface and Coatings Technology*, Vol. 422, 127482.
7. Knyazev, S., Rebrova, R., Riumin, V., Nikichanov, V., Rebrova, A. (2021), "Establishment of structure and operational properties of borated layers on 40X steel obtained from paste by induction heating", *Functional Materials*, 28(1), pp.76–83
8. Aswad, Mokhalad F., Aseel J. Mohammed, and Sahar R. Faraj. (2021), "Induction Surface Hardening: A review." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1973 (1), pp. 1-16.
9. Łach, Ł. (2024). Recent advances in laser surface hardening: Techniques, modeling approaches, and industrial applications. *Crystals*, Vol. 14(8), 726.
10. Weingarten, C.; Uluz, E.; Schmickler, A.; Braun, K.; Willenborg, E.; Temmler, A.; Heidrich, S. Glass processing with pulsed CO₂ laser radiation. *Appl. Opt.* 2017, 56, 777–783
11. Mahrle, A.; Beyer, E. Theoretical evaluation of radiation pressure magnitudes and effects in laser material processing. *Phys. Scr.* 2019, 94
12. Metzner, D.; Olbrich, M.; Lickschat, P.; Horn, A.; Weißmantel, S. Experimental and Theoretical Determination of the Effective Penetration Depth of Ultrafast Laser Radiation in Stainless Steel. *Lasers Manuf. Mater. Process.* 2020, 7, 478–495.
13. Бердова-Бушура, О. В., & Михаленков, К. В. (2016). "Ефект дробеструйної обробки та прокатки поверхні роликками на механічні характеристики сплаву γ -TiAl".
14. Погрелок І.М., Ткачук О.В., Самборський О.В. Сірик З.О. (2011). "Механічні характеристики титанових сплавів з поверхневими зміцненими шарами". *Вісник*

- Penetration Depth of Ultrafast Laser Radiation in Stainless Steel. *Lasers Manuf. Mater. Process.* 2020, 7, 478–495.
13. Berdova-Bushura, O. V., & Mykhalenkov, K. V. (2016). “The effect of shot peening and surface rolling on the mechanical properties of the γ -TiAl alloy.”
 14. Pohrelyuk, I. M., Tkachuk, O. V., Samborskyi, O. V., & Siryk, Z. O. (2011). “Mechanical properties of titanium alloys with surface-hardened layers.” *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, Vol. 39, pp. 157–162.
 15. Yao, J. W., Yan, F. Y., Yan, M. F., Zhang, Y. X., Huang, D. M., & Xu, Y. M. (2019). The mechanism of surface nanocrystallization during plasma nitriding. *Applied Surface Science*, 488, 462–467.
 16. Kurelo, B. C., de Souza, G. B., da Silva, S. L. R., Serbena, F. C., Foerster, C. E., & Alves Jr, C. (2015). Plasma nitriding of HP13Cr supermartensitic stainless steel. *Applied Surface Science*, 349, 403–414.
 17. Bell, T., Sun, Y., & Suhadi, A. (2000). Environmental and technical aspects of plasma nitrocarburising. *Vacuum*, 59(1), 14–23.
 18. Pye, D. (2003). Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing. ASM international.
 19. Aswad, M. F., Mohammed, A. J., & Faraj, S. R. (2021, August). Induction Surface Hardening: A review. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1973, No. 1, p. 012087). IOP Publishing.
 20. Mohammad, J. H. A., Afify, R. M., Mansour, E. H., & Gafer, A. M. (2019). Effect of heat treatment of steel AISI X 210 Cr 12 on surface roughness quality during turning operation. *Engineering Research Journal*, 1(39), 6–11.
 21. Kakani, S.L., 2006. *Material science*. New Age International
 22. Toh, D., Van Bui, P., Isohashi, A., Matsuyama, S., Yamauchi, K., & Sano, Y. (2020). An abrasive-free chemical polishing method assisted by nickel catalyst generated by in situ electrochemical plating. *Review of Scientific Instruments*, 91(4).

Дослідження та фінансування здійснені у рамках проєктів: EU #3055 EURIZON “Combined technologies of metallic surface modification by micro-arc oxidation and boriding for critical machine parts with high contact loads” та NRFD ID: 2023.04/0036 “Research and development of device for restoring elements of military equipment by means of discrete-continuous strengthening of structures”.

Відомості про авторів / About the Authors

Волков Олег Олексійович / Volkov Oleh – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (093)950-85-39; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8797-0322>; e-mail: volkovoleg1978@gmail.com

Субботіна Валерія Валеріївна / Subbotina Valeriia – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (067)933-20-68; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3882-0368>, e-mail: subbotina.valeri@gmail.com

Князев Сергій Анатолійович / Knyazev Sergiy кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: +38 (050)-160-87-36; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6422-3658>; e-mail: obmeninfoserg@ukr.net

Рябоштан Валентин Анатолійович / Ryaboshtan Valentyn – PhD, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (093)- 778- 69- 46; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5826-5085>; e-mail: obibobbivalkinobi@gmail.com

Краєвська Жанна Владиславівна / Kraievska Zhanna – аспірантка кафедри «Матеріалознавство», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (099)329-42-80; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8741-2623>; e-mail: 3294280@gmail.com

Шевцов Вадим Михайлович / Shevtsov Vadym – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автомобіле- і тракторобудування», м. Харків, Україна; тел.: (098)978-26-52; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5115-4398>; e-mail: shevtsovvadim@ukr.net