

Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт

Матеріалознавство

СТУДЕНТСЬКА НАУКОВА РОБОТА

На тему: *«Моделювання процесів лазерної поверхневої обробки»*

Шифр: «L.Model»

2021

АНОТАЦІЯ

студентської наукової роботи, шифр: «L.Model»

Студентська наукова робота: 24 сторінки, 8 рисунків , 3 таблиці, 12 джерел.

Об'єкт дослідження – взаємодія лазерного випромінювання з діелектричними матеріалами.

Мета роботи – створення програми для перевірки можливості симуляції лазерного нагрівання металів та неметалевих матеріалів.

Метод дослідження – комп'ютерний пакет мультифізичного моделювання COMSOL Multiphysics.

В аналітичному огляді літератури досліджені особливості і характер взаємодії лазерного випромінювання з речовиною, досліджено метод скінченних елементів, а також програмний пакет COMSOL, який працює за цим методом.

Експериментально створено програму, що моделює процес взаємодії лазерного променя з матеріалом. Отримано графічне розподілення тепла на поверхні, а також ізотермічний графік для глибини розповсюдження тепла всередині матеріалу.

ЛАЗЕРНЕ НАГРІВАННЯ, CO₂-ЛАЗЕР, ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ,
МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, COMSOL MULTIPHYSICS, ПЕРЕДАЧА
ТЕПЛА У ТВЕРДИХ ТІЛАХ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА МАТЕРІАЛИ ТА ЙОГО МОДЕЛЮВАННЯ	5
1.1 Фізика лазерного нагрівання	5
1.2 Метод скінченних елементів	9
1.3 COMSOL Multiphysics.....	10
2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	13
3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ	16
3.1 Моделювання процесів поверхневої обробки акрилового скла	16
3.2 Моделювання процесів поверхневого зміцнення сталі	20
ВИСНОВКИ	23
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	24

ВСТУП

Використання лазера для обробки матеріалів відомо людству не один десяток років. Лазерний промінь – потік когерентного, монохроматичного світла. Завдяки цьому вдається локалізувати випромінювання лазера в малому просторовому обсязі. У поєднанні з імпульсним режимом роботи це дозволяє реалізовувати щільності потужності, при яких спостерігаються нелінійні оптичні ефекти, відбувається випаровування і оптичний пробій речовини [1].

В останні часи великий розвиток отримали програми для мультифізичного симулювання, які можуть симулювати модель з одразу декількома різними фізичними інтерфейсами, що пов'язані один з одним. Частіше за все такі програми потребують глибоких фізичних знань, а також великих потужностей обчислювальної техніки, тому вони не отримували оголошення у широкій публіці. Але технології не стоять на місці. Розвиток мікроелектроніки привів до того, що обчислювальні машини, потужностей яких вистачає для серйозних задач з моделювання фізичних процесів та складних математичних формул, мають доволі низьку ціну і їх можуть дозволити собі не тільки наукові центри, а навіть загальна публіка. Завдяки програмам, що працюють з методом скінченних елементів, стає можливим моделювати складні об'єкти інтерактивно.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА МАТЕРІАЛИ ТА ЙОГО МОДЕЛЮВАННЯ

1.1 Фізика лазерного нагрівання

Лазерна обробка матеріалів - це керований процес нагріву, в якому лазер діє як джерело енергії. Більшість лазерних технологій засновані на тепловій дії випромінювання. При попаданні лазерного променя на поверхню оброблюваного матеріалу, деяка кількість випромінювання поглинається, а якась - відбивається. Це співвідношення, в основному, визначається оптичними властивостями оброблюваної поверхні. Та частина енергії лазерного променя, яка поглинається поверхнею матеріалу, витрачається на його нагрівання. Нагрівання можна проводити без або з оплавленням поверхні, в деяких випадках нагрівання може проводитися аж до випаровування оброблюваного матеріалу.

Велика частина видів лазерної обробки вже успішно застосовується в промисловості, а деякі знаходяться в стадії дослідження. Висока ступінь концентрації енергії, відсутність необхідності ведення процесу в вакуумі (на відміну від електронно-променевої обробки), внаслідок цього можливість лазерної обробки елементів конструкцій будь-яких розмірів, легкість транспортування енергії лазерного випромінювання в просторі і простота автоматизації процесу є безперечними перевагами лазерної обробки матеріалів [1,3]. В останні роки спостерігається підвищений інтерес до використання лазерів в обробці матеріалів у всіх промислово розвинених країнах.

Одним з видів лазерної обробки металів і сплавів є лазерне поверхнєве зміцнення. На відміну від загартування струмами високої частоти, електричним і, загартуванням з розплавом та інших відомих процесів, нагрівання при лазерному загартуванні не є об'ємним процесом, а здійснюється з поверхні. При

цьому не потрібно застосовувати будь-які охолоджуючі середовища. Ця умова спрощує технологію термозміцнення [2].

Лазерне термозміцнення характеризується малим часом впливу і забезпечує відсутність деформацій деталей. Тепловий вплив при лазерному термозміцненні регулюється в широких межах за рахунок зміни параметрів лазерного випромінювання і режимів обробки. Це забезпечує регулювання швидкостей нагріву і охолодження металу, часу перебування металу при високих температурах, що дозволяє отримувати необхідну структуру поверхневої ділянки і відповідні властивості.

Найбільш важливими параметрами лазерного пучка при поверхневій обробці є: довжина хвилі випромінювання, його потужність або енергія при безперервному і імпульсному випромінюванні відповідно, форма і площа «плями» фокусування, характер розподілу інтенсивності випромінювання в «плямі» фокусування, час впливу випромінювання на поверхню оброблюваного матеріалу.

Взаємодія лазерного випромінювання з сильно поглинаючими матеріалами в широкому діапазоні щільності світлових потоків добре описується тепловою моделлю, згідно з якою весь процес в цілому може бути умовно розділений на кілька стадій.

1. Поглинання світла і передача енергії тепловим коливанням решітки твердого тіла.
2. Нагрівання матеріалу без руйнування.
3. Руйнування матеріалу і розліт продуктів, що утворюються (абляція).
4. Охолодження після закінчення взаємодії [2].

Уже перші експерименти впливу лазерного випромінювання на матеріали, проведені в 60-х роках минулого століття, показали, що лазерний нагрів по своїй фізичній суті не відрізняється від інших видів нагріву. Як і при будь-якому іншому нагріванні, однозначною характеристикою теплової дії є температура, а сам нагрів полягає в збільшенні амплітуди теплових коливань решітки. Перенесення тепла в твердому тілі здійснюється механізмами

теплопровідності, з яких для металів і сильно вироджених напівпровідників основним є електронна теплопровідність, а для неметалів – решіткова [3].

Лазерне нагрівання може супроводжуватися зміною оптичних і теплофізичних властивостей матеріалу, його тепловим розширенням, а також фазовими переходами в твердому стані і плавленням. У ряді випадків при нагріванні можуть активуватися дифузійні процеси в твердому тілі і деякі хімічні реакції на його поверхні і в приповерхневих шарах. Таким чином, нагрівання матеріалів лазерним випромінюванням супроводжують звичайні, досить вивчені явища. У той же час високі швидкості нагрівання і охолодження і великі просторові градієнти температури зумовлюють особливості лазерного нагріву. Вони можуть привести і приводять до значних відмінностей у протіканні теплових процесів, стимульованих лазерним впливом [4].

Важливу роль при нагріванні лазерним випромінюванням відіграє зміна оптичних властивостей речовини, так як від величин поглинальної здатності і коефіцієнта поглинання безпосередньо залежить кількість виділеного тепла і його просторовий розподіл. Утворення зворотних зв'язків по оптичних параметрах поверхні матеріалу, які змінюються в процесі лазерного впливу, вносить принципові особливості в хід процесів, що протікають [5].

Стадія нагрівання матеріалів лазерним випромінюванням є основною при вивченні фізичної сутності технологічних операцій, що проводяться без руйнування матеріалу, наприклад, зварювання, термообробки, дифузії і тощо. Для операцій лазерної обробки матеріалів, пов'язаних з руйнуванням і видаленням деякої їх частини, стадія нагрівання є попередньою, але разом з тим досить важливою, так як її аналіз дозволяє визначити умови початку руйнування [6]. Поширення випромінювання в речовині, як правило, описується законом Бугера:

$$q(x) = q_0(1 - R) \exp(-\alpha x), \quad (1.1)$$

де $q(x)$ – щільність потужності випромінювання в речовині на відстані від його поверхні,

q_0 – щільність потужності падаючого випромінювання,

R – коефіцієнт відбиття поверхні,

α – показник ослаблення світла в речовині.

При поглинанні випромінювання речовина нагрівається. Розрізняють режими нагрівання матеріалу, відповідні сильному (поверхневому) і слабкого (об'ємному) поглинанню випромінювання [6]. Для більшості технологічних процесів використовується лазерне випромінювання довжин хвиль, що знаходяться в спектральній області сильного поглинання речовини, так як це забезпечує локальність впливу і більшу ефективність використання енергії. Сильне поглинання світла має місце в металах, в напівпровідниках при їх «металізації» досить потужним випромінюванням, а також в напівпровідниках і діелектриках, коли довжина хвилі випромінювання лежить в області їх фундаментального поглинання. При цьому глибина проникнення випромінювання зазвичай багато менше характерного розміру теплопровідності ($\frac{1}{\alpha} \ll \sqrt{a\tau}$, где τ – час впливу випромінювання, a – температуропровідність матеріалу. Теплове джерело в матеріалі в таких умовах є практично поверхневим. Математично при вирішенні рівняння теплопровідності це враховується в граничній умові на поверхні. Товщина прогрітого шару в матеріалі визначається характерним розміром теплопровідності $\sqrt{a\tau}$.

Режими опромінення, що забезпечують об'ємне поглинання випромінювання, $\frac{1}{\alpha} > \sqrt{a\tau}$, використовують при необхідності створення в оброблюваному матеріалі об'ємного теплового джерела або при фокусуванні випромінювання (і локальній обробці) всередині об'єму.

Поширення теплоти в матеріалі визначається його теплоємністю і теплопровідністю. Від цих показників залежить як швидко і на яку глибину прогріється матеріал.

Для вирішення рівнянь теплопровідності існують різні математичні методи, серед яких найбільш уживані методи інтегральних перетворень (в тому числі перетворення Лапласа), метод Фур'є (поділ змінних) і метод джерел. Зауважимо, що при нагріванні матеріалу його оптичні та теплофізичні властивості змінюються, особливо коефіцієнт відбиття R . Крім того великий вплив на процес нагрівання надає тимчасова і просторова структура випромінювання.

1.2 Метод скінченних елементів

При проектуванні конструкцій або розробці процесів обробки матеріалів з використанням потужних джерел енергії проектувальник повинен спочатку задати визначальні рівняння, які здатні описати поведінку моделі досліджуваного об'єкту в тих чи інших умовах. Виникаюча в зв'язку з цим основна складність, не кажучи вже про аспекти розв'язання вибраних рівнянь, полягає у вирішенні питання: чи можуть дані рівняння адекватно відображати фізичні явища у матеріалі.

Беручи до уваги виникаючі через описані вище обставини відмінності в поведінці досліджуваного об'єкту та його моделі, далі потрібно перейти до вирішення обраних рівнянь. Якщо досліджуваний об'єкт є двовимірним або тривимірним, то його поведінка описується рівняннями з частковими похідними. Вельми рідко існують точні рішення подібних рівнянь, і ненабагато частіше виявляється можливим будувати адекватні наближені рішення з невеликою кількістю членів апроксимації. Для отримання досить точного рішення потрібна велика кількість цих членів. Значною мірою ці проблеми можна подолати за допомогою методу скінченних елементів.

Метод скінченних елементів є аналітичної процедурою, інтенсивна розробка якої велася протягом порівняно короткого проміжку часу. Ключова ідея методу при аналізі поведінки конструкцій полягає в наступному: суцільне середовище (конструкція в цілому) моделюється шляхом розбиття її на області

(скінченні елементи), в кожній з яких поведінка середовища описується за допомогою окремого набору певних функцій, що представляють напруги і переміщення в зазначеній галузі. Ці набори функцій часто задаються в такій формі, щоб задовольнити умовам безперервності описуваних ними характеристик у всій середовищі. В інших випадках вибрані уявлення полів не забезпечують безперервності, і, тим не менш, дають можливість отримати задовільний рішення. При цьому на відміну від повністю безперервних моделей, немає повної впевненості в збіжності рішення. Якщо поведінка конструкції описується єдиним диференціальним рівнянням, то отримати наближене рішення цього рівняння можна як методом кінцевих елементів, так і за допомогою техніки розкладання в ряди або скінченно-різницевої схем. Якщо ж конструкція неоднорідна і складається з великої кількості окремих конструктивних елементів, поведінка кожного з яких описується своїм диференціальним рівнянням, то в цьому випадку, як правило, можна безпосередньо застосувати лише метод скінченних елементів. Поряд із зазначеними альтернативними методиками чисельного рішення прикладних задач механіки конструкцій, в методі скінченних елементів потрібно будувати і вирішувати систему алгебраїчних рівнянь. Особливі переваги методу полягають у зручності формування рівнянь і можливості подання абсолютно нерегулярних і складних конструкцій і умов навантаження [7].

1.3 COMSOL Multiphysics

Відомо досить багато скінченно-елементних пакетів прикладних програм (ППП), в яких розрахунки магнітних систем доведені до досконалості.

Весь розрахунок за допомогою таких програм проводиться зазвичай в інтерактивному режимі. При цьому не потрібно писати складні векторні рівняння теорії поля. Такий розрахунок цілком доступний студентам і інженерам зі знаннями середнього рівня. Програма сама розбиває простір моделювання на скінченні елементи (трикутники, прямокутники, тетраедри,

паралелепіеди і ін.). Необхідно тільки побудувати модель, ввести властивості матеріалів і граничні умови, запустити розрахунок і вивести його результати в числовому і графічному вигляді. Весь процес аналізу досить наочний, як правило, він супроводжується графічними побудовами на екрані комп'ютера.

Всі скінченно-елементні програми можна розбити на дві групи: програми, спеціально призначені для розрахунку магнітних полів, і програми загального призначення, в яких метод кінцевих елементів використовується для вирішення багатьох науково-технічних завдань. Програми першої групи (ELCUT) легкі в освоєнні, але, як правило, призначені для розрахунку тільки двовимірних полів, що сильно звужує коло завдань, які стоять перед ними. Програми другої групи (ANSYS Multiphysics, Maxwell, COMSOL Multiphysics) мають набагато більші можливості. Освоїти їх складніше, вартість їх теж істотно вище.

Варто відзначити також вільне програмне забезпечення. Тут існує велика кількість вузькоспеціалізованих програм, і ще більшу кількість вільних бібліотек. Але це скоріше цікаво для програмістів. Крім того, так історично склалося, що є велика кількість вільних вирішувачів для скінченно-елементних розрахунків. Деякі з них включені до складу COMSOL, ANSYS і CFD-ACE. А ось комплексних пакетів, що включають препроцесор для побудови геометрії та сітки, вирішувачів і постпроцесорів для виведення результатів, не так вже й багато [8].

COMSOL® Multiphysics® – це потужний вирішувач, що працює на системах скінченних елементів (Finite element (FEM)) та часткового диференційного рівняння (partial differential equation (PDE)). Базовий програмний пакет COMSOL Multiphysics має вісім додаткових модулів, що розширюють базові можливості програми у наступних можливостях застосування: AC/DC, Акустика, Хімічна інженерія, Фізика Землі, Передача Тепла, MEMS, Радіочастоти та Механіка Структур. Пакет COMSOL Multiphysics також має інші допоміжні пакети, такі як Модуль імпорту з CAD, а також Бібліотека Матеріалів [9].

Основна перевага, яку можна отримати з об'єднання комп'ютерної симуляції та аналізу базових принципів – це те, що моделюючий має можливість спробувати стільки різних підходів до розв'язку однієї задачі, скільки потрібно для того, щоб вирішити її правильно (чи максимально близько до цього) в майстерні або лабораторії до того, як перші деталі пристрою будуть зроблені та протестовані. Моделюючий також може використати результати тесту реального пристрою щоб модифікувати параметри моделі та підійти до фінального розв'язку набагато швидше, ніж при використанні методу збірки та тестування [8].

Для даної задачі моделювати повноцінну хвилю не потрібно, так як набагато простіше буде представити її у вигляді теплового поля, яке розповсюджується по поверхні досліджуваного об'єкта. Це можливо зробити за допомогою модуля «Теплопередача».

У модулі Теплопередача, що входить до складу програмного продукту COMSOL Multiphysics®, можна виконати аналіз теплопередачі теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням. У модулі Теплопередача передбачені інструменти для моделювання неізотермічних течій і сполученого теплообміну.

Модель термічно тонкого шару використовується для моделювання високопровідних матеріалів у випадках, коли участь шару в процесі теплопередачі здійснюється в основному по дотичній і коли різницею температур між сторонами шарів можна знехтувати. Такі процеси характерні, наприклад, при лазерній термічній обробці. За допомогою функцій мультифізичного моделювання програмного забезпечення COMSOL® можна виконати повний і ретельний аналіз в єдиному середовищі моделювання, послідовно розглядаючи всі фізичні явища. За допомогою інтуїтивно зрозумілого підходу до моделювання можна врахувати теплопередачу в усіх фізичних явищах, що відбуваються в досліджуваній системі [9, 10].

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

У даній роботі основною задачею є створення програми для перевірки можливості застосування пакету COMSOL® Multiphysics® 5.5 для симуляції обробки матеріалів (неметалів – акрилове скло, та металів – сталь ШХ15). Фізичні властивості досліджуваних матеріалів, що будуть використовуватися у програмі, наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізичні властивості органічного скла (ГОСТ 10667-90)

Матеріал	Щільність, кг/м ²	Теплопровідність, Вт/м·К	Теплоємність при незмінному тиску, Дж/(кг·К)	Відбивна здатність поверхні
Скло акрилове органічне, ГОСТ 10667-90	1100	0,3	1270	0,86
Сталь конструкційна підшипникова ШХ15, ГОСТ 801-78	7812	40	460	0,8

При падінні променю лазерного випромінювання на поверхню матеріалу частина випромінювання відбивається від неї, а частина проходить вглиб матеріалу, поглинаючись в ньому. Відбивна здатність металів зменшується зі зменшенням довжини хвилі (рис. 2.1), тому ефективність нагріву металів збільшується при використанні лазера з меншою довжиною хвилі. Отже, обробка металів з використанням Nd:YAG-лазера, що має довжину хвилі $\lambda = 1,06$ мкм, більш ефективна в порівнянні з обробкою CO₂-лазером, що має довжину хвилі $\lambda = 10,6$ мкм [4].

В якості неметалевого матеріалу для лазерної обробки обрано органічне (акрилове) скло. Завдяки тому, що органічне скло на довжині хвилі 10,6 мкм

має практично нульовий коефіцієнт пропускання (рис. 2.2) [11], це дає нам право моделювати лазерну хвилю не як електромагнітну хвилю, а як поверхнєве джерело тепла з розповсюдженням Гауса.

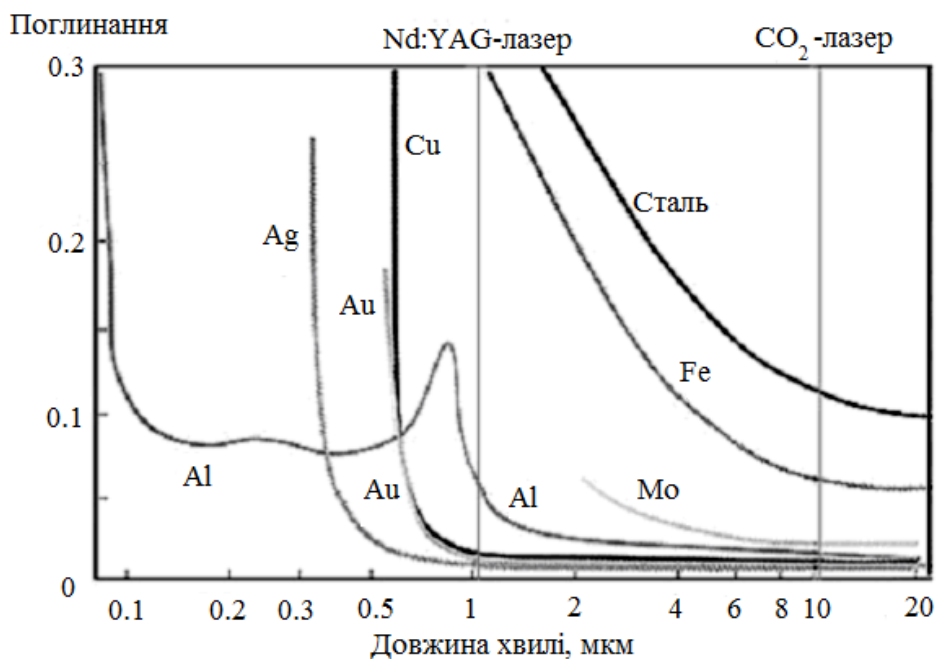


Рисунок 2.1 – Коефіцієнт поглинання деяких металів в залежності від довжини хвилі випромінювання [4]

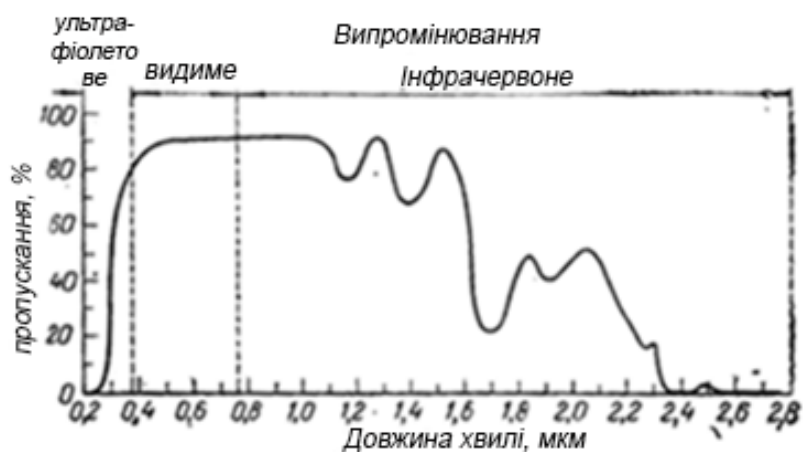


Рисунок 2.2 – Коефіцієнт пропускання випромінювання для поліметілметакрілату залежно від довжини хвилі [11]

Таким чином, для обробки неметалів було обрано CO₂-лазер, а для металів Nd:YAG-лазер, обидва середньою потужністю до 100 Вт. Характеристики режимів лазерної обробки досліджуваних матеріалів наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Характеристики режиму лазерної обробки

Матеріал	Потужність, Вт	Швидкість переміщення лазерного випромінювання, мм/с	Довжина хвилі випромінювання, мкм	Діаметр плями фокусування, мм
Сталь конструкційна підшипникова ШХ15	10	40	1,064	0,8..1,0
Скло акрилове органічне,	10	40	10,6	0,8...1,0

Енергія в імпульсі визначалася фотоелектричним методом. Ширина обробленої доріжки оцінювалася на мікроскопі МБС-9 з точністю до 0,05 мм.

Зразки сталі ШХ15 піддавалися попередній термічній обробці - гартуванню з охолодженням у воді та відпуску при температурі 200°C. З метою збільшення поглинальної здатності поверхні зразки після відпуску не полірувалися

Як параметр контролю властивостей зміцненого шару була обрана мікротвердість. Випробування мікротвердості найчастіше проводять на приладі ПМТ-3 шляхом вдавнення стандартної 136-градусної алмазної піраміди з квадратною основою і навантаженнями 2, 5, 10, 20, 50, 100 і 200 м [7]. Великою перевагою приладу є пряме навантаження індентора, що забезпечує високу точність і стабільність величин яких докладають навантажень. Загальне

збільшення мікроскопа приладу ПМТ-3 при візуальних спостереженнях і вимірах дорівнює 485-487.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Моделювання процесів поверхневої обробки акрилового скла

На початку розробки моделі потрібно створити робочий простір з необхідними для цієї задачі елементами. Перший етап – це вибір вимірності простору моделювання. Можна створити від точкової (0D) до повноцінної тривимірної моделі (3D). У даному випадку правильніше буде створити тривимірну модель.

Далі йде вибір фізичних модулів, які будуть використовуватися у програмі. Як було зазначено вище, модель буде сприймати промінь лазера як поверхове джерело тепла, тож буде використано лише модуль Heat Transfer (теплопередача), вузол Heat Transfer in Solids (передача тепла у твердих тілах). Інтерфейс дозволяє вибирати назви базових змінних (у цьому випадку це температура).

Після цього потрібно вибрати режим дослідження моделі. Так як лазерний промінь рухається по об'єкту за певний час, то тут необхідно використати режим Time Dependent (залежність від часу). Також задаються геометричні параметри зразка.

Після завершення розрахунків, програма автоматично створить необхідні базові рисунки, які показують розраховані дані. В даному випадку це поверхневий графік температури (рис.3.1) і ізотермічний контур (рис. 3.2). Обидва зображення синхронізовані із часом впливу, тому можна побачити зміну температури на поверхні, а також рух лазерного променя впродовж часу обробки.

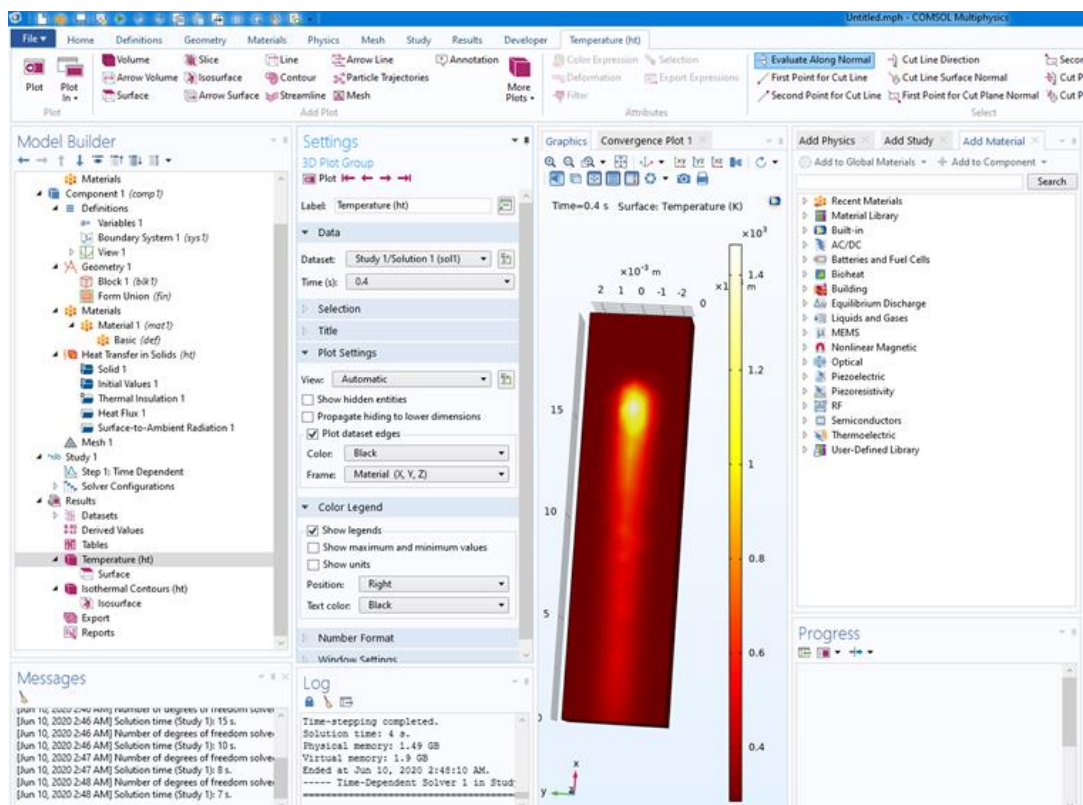


Рисунок 3.11 – Поверхневий графік температури в момент часу 0,4 с

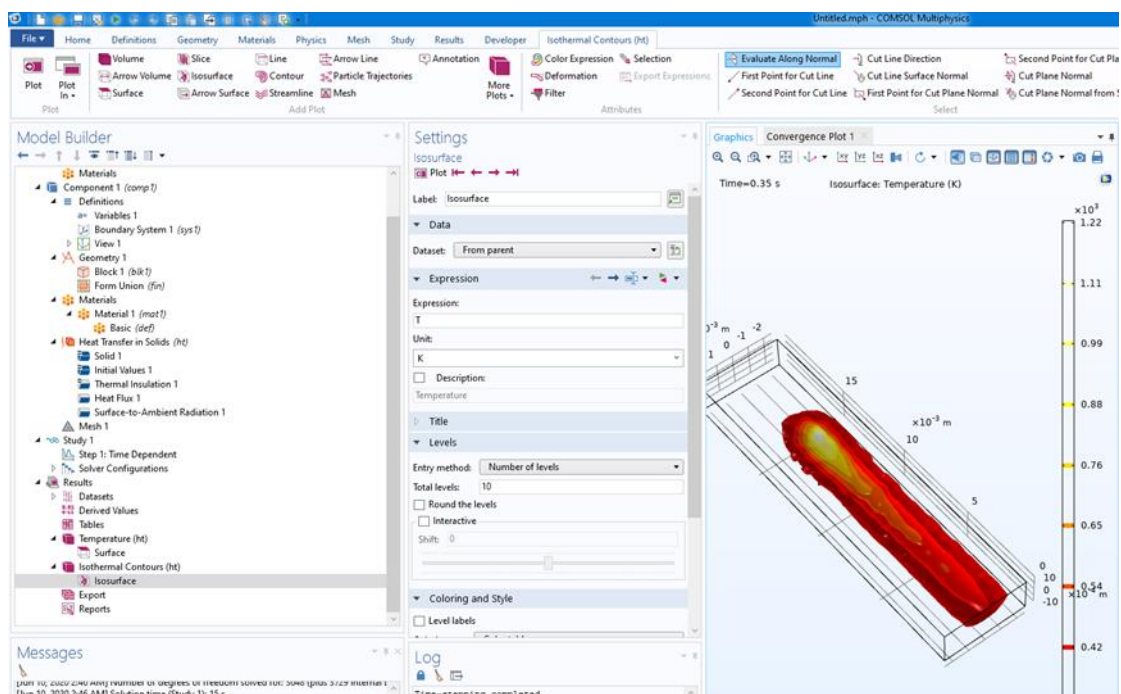


Рисунок 3.12 – Ізотермічний контурний графік температури в момент часу 0,35 с

Глибину гравіювання також можна визначати за ізотермічним графіком. Для того, щоб дізнатися точні значення параметрів, а також побудувати графіки на їх основі, потрібно додати Зонд, який буде зчитувати ці дані і додавати їх у таблиці. Це робиться в розділі Component 1, підрозділі Definitions. Щоб додати зонд, який сканує площину, потрібно натиснути ПКМ на Definitions і в списку Probes (Зонди) вибрати Boundary Probe. Він автоматично створиться з основною змінною моделі (T), охоплюватиме усі площі, і буде шукати середнє значення температури. Для того, щоб Зонд працював правильно, потрібно зняти усі виділенні площини окрім площини , а також змінити Probe Type (Тип Зонду) на Maximum. Таким чином було створено зонд, який буде сканувати площину і знаходити у ній максимальне значення температури за кожний крок.

Для запуску зондування потрібно натиснути на Update Results (Оновити результати). Буде створено таблицю з двома стовбцями, у яких буде значення температури, і час (табл. 3.1)

Таблиця 3.1 – Значення, отриманні з зонду

Time (Час). мс	Площинний Зонд 1, Температура
0.0000	293.18
0,5	1408.7
0,10	1118.3
0,15	1272.8
0,20	1478.6
0,25	1247.1
0,30	1262.8
0,40	1276.9
0,45	1490.2
0,50	1203.9
0,55	1169.8

Як видно зі значень температури, вона більше, ніж температура абляції органічного скла. Це означає, що в реальних умовах при даних налаштуваннях, лазер буде виконувати гравіювання скла (рис.3.3).



Рис. 3.3 – Гравіювання на акриловому склі, виконане за зазначеними режимами

Створена модель представляє собою перевірку можливості моделювання обробки поверхні неметалевої речовини лазерним променем. Можливостями пакету COMSOL можна розвинути дану модель, наприклад додати можливість розрахунку деформування поверхні через випаровування матеріалу завдяки математичному інтерфейсу Deformed Geometry (Деформована геометрія), а також створити повноцінну програму зі своїм графічним інтерфейсом завдяки вбудованому редактору програм Application Builder (Будівник Програм). Скористувавшись зондуванням, можна знайти глибину лінії гравіювання. Через аналітичні функції можна зробити налаштування частоти лазерного випромінювання.

3.2 Моделювання процесів поверхневого зміцнення сталі

Лазерне термічне зміцнення полягає у впливі інтенсивного потоку лазерного випромінювання на локальну ділянку поверхні, поглинання лазерного випромінювання в приповерхневих ділянках матеріалів і, внаслідок цього, швидкому розігріву цих ділянок до високих температур. Після припинення дії випромінювання, нагріта ділянка охолоджується в основному внаслідок теплопровідності у внутрішньому обсязі матеріалу, а також за рахунок тепловіддачі з поверхні. При цьому досягаються високі швидкості охолодження. В процесі нагрівання і охолодження відбуваються фазові перетворення. Якщо при цьому має місце зміцнення, то воно класифікується як зміцнення при фазових переходах. Таким чином, лазерне зміцнення сталей полягає в нагріванні локальних ділянок поверхні до температур вище критичних і наступному охолодженні з високою швидкістю, що призводить до утворення мартенситних структур.

Результати моделювання лазерного нагрівання сталі свідчать, що вже через 0,1 мс при досліджуваних параметрах випромінювання температура на поверхні становить 1899...2057K, що перебільшує температуру плавлення сталі.

Загартування із розплавленого стану часто спостерігається при лазерній обробці і дає максимальне зміцнення.

Важливою характеристикою лазерної обробки є тривалість імпульсу [4]. Відомо, що зі збільшенням тривалості імпульсу значення щільності потужності зростають. При обробці одиночними імпульсами тривалістю 0,2 мс спостерігається не тільки плавлення, а й вспінення металу (рис. 3.3), а при тривалості 0,4 мс після кристалізації на поверхні утворюються мікротріщини (рис. 3.4). Зменшення тривалості імпульсу до 10мс хоч і призводить до

плавлення, що в ряді випадків не бажано, все ж забезпечує більш високу якість поверхні (рис. 3.5).

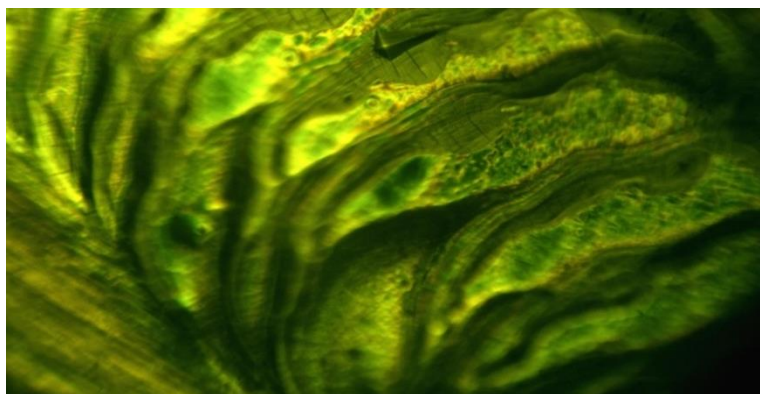


Рисунок 3. 3 — Сталь ШХ15, тривалість імпульсу 0,2 мс.

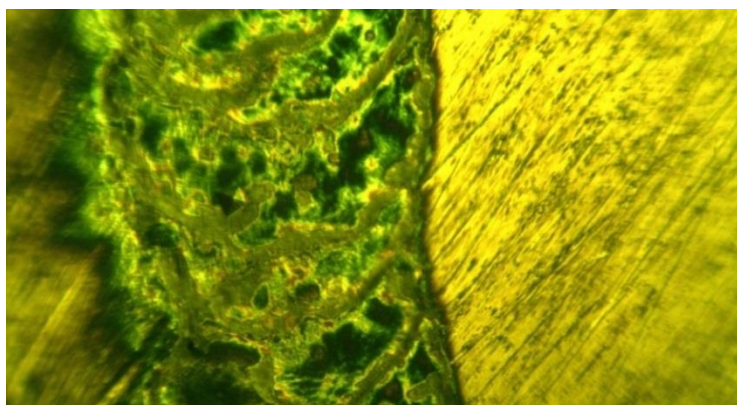


Рисунок 3.4 — Сталь ШХ15, тривалість імпульсу 0,4 мс



Рисунок 3. 5 – Сталь ШХ15, тривалість імпульсу 10 мкс

Залежність мікротвердості від тривалості імпульсу має нелінійний характер. Результати досліджень мікротвердості представлені на рис. 3.6.

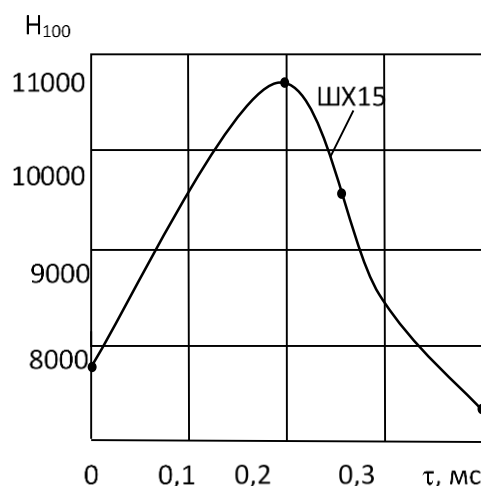


Рисунок 3.6 – Залежність мікротвердості сталі ШХ15 від тривалості імпульсу

Порівняння отриманих значень з мікротвердості контрольних зразків (об'ємне загартування) показує, що лазерне зміцнення дає більш високі значення. Максимальна мікротвердість спостерігається при тривалості імпульсу 0,2 мс [12].

При гартуванні для уникнення розплавлення поверхні потрібно зменшувати тривалість імпульсів, ретельно підбираючи частоту їх повторення, або використовувати багатоімпульсну обробку. Результати моделювання свідчать про можливість нагрівання вище критичних точок, але нижче температури плавлення існує при скороченні тривалості імпульсу з одночасним поданням серії (2...10) імпульсів в точку. Але ця теорія потребує подальшої розробки.

ВИСНОВКИ

1. В роботі проведено аналіз літератури з дослідження взаємодії лазерного випромінювання з речовиною.
2. Проаналізовано метод скінченних елементів, а також пакет COMSOL Multiphysics, як представника програм, що моделюють з методом скінченних елементів.
3. У пакеті COMSOL змодельовано процес проходження лазерного променя по поверхні матеріалу, знято показники максимальної температури.
4. Доведено можливість моделювання лазерної обробки матеріалів методом скінченних елементів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дудкин В. И., Пахомов Л. Н. Квантовая электроника. Приборы и их применение М., Техносфера, 440 стр. , 2006 г
2. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. Пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под общ. Ред. А. Г. Григорьянца ; МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М. : ЮНИТИ, 2006. – 664 с.
3. Айхлер Ю. И. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. И. Айхлер, Г. И. Айхлер. – М. : Техносфера, 2008. – 440 с.
4. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / В.П. Вейко, М.Н. Либенсон, Г.Г. Червяков, Е.Б. Яковлев. М.: Физматлит, 2008. – 312 с.
5. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
6. Вейко В.П. Лазерная обработка / В.П. Вейко, М.Н. Либенсон. Л.: Машиностроение, 1973. – 191 с.
7. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. - 428 с.
8. Беззубцева М.М., Волков В.С. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 6 (часть 2) – URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6869>
9. COMSOL Multiphysics / COMSOL Multiphysics Modeling Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> – 15.05.2018.
10. Анализируйте тепловые процессы с помощью модуля Теплопередача – URL: <https://www.comsol.ru/heat-transfer-module>
11. Дебский В. Полиметилметакрилат М.: Химия, 1972 — 151 с.
12. Afanasieva Olga, Lalazarova Nataliia, Kirieiev Bohdan, Laser surface hardening// Materials of the XVI International scientific and practical Conference

Cutting-edge science, May 30 - June 7, 2020. Sheffield. Science and education
LTD – p. 110-114