LAZERLI JARAYONLARNI KOMPYUTERDA MODELLASHTIRISH

Magistratura O'zbekiston Milliy Unviversiteti

Lazer Fizika yo'nalishi

dilnozayusupova190@gmail.com

Dilnoza Yusupova

mustaqil tatqiqotchisi

Annotatsiya

Ushbu maqolada lazerli texnologik jarayonlarni kompyuterda modellashtirishning nazariy va amaliy asoslari tadqiq etilgan. Lazer nurlanishining material bilan o‘zaro ta’siri natijasida yuzaga keladigan issiqlik jarayonlarini matematik ifodalash, harorat maydonining vaqt va fazo bo‘yicha o‘zgarishini aniqlash hamda texnologik parametrlarning jarayon natijasiga ta’sirini baholash masalalariga alohida e’tibor qaratilgan. Lazer quvvati, nurlanish radiusi, skanerlash tezligi, materialning issiqlik o‘tkazuvchanligi, zichligi va solishtirma issiqlik sig‘imi kabi parametrlar modelning asosiy o‘zgaruvchilari sifatida qaralgan. Issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasi va Gauss taqsimotiga ega lazer issiqlik manbai asosida matematik model shakllantirilgan. Kompyuter modellashtirish orqali texnologik rejimlarni oldindan baholash, tajribalar sonini kamaytirish va optimal ishlov berish parametrlarini aniqlash imkoniyatlari asoslangan. Taklif etilayotgan yondashuv lazerli kesish, payvandlash, sirtga ishlov berish va additiv ishlab chiqarish jarayonlarini tadqiq etishda qo‘llanishi mumkin.

Kalit so‘zlar: lazer, lazerli texnologiya, kompyuter modellashtirish, matematik model, issiqlik o‘tkazuvchanlik, harorat maydoni, lazer quvvati, skanerlash tezligi, sonli usul, optimallashtirish.

Аннотация

В статье исследованы теоретические и практические основы компьютерного моделирования лазерных технологических процессов. Особое

внимание уделено математическому описанию тепловых процессов, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с материалом, определению распределения температуры во времени и пространстве, а также оценке влияния технологических параметров на результаты обработки. В качестве основных параметров модели рассмотрены мощность лазера, радиус лазерного пятна, скорость сканирования, теплопроводность, плотность и удельная теплоёмкость материала. На основе уравнения теплопроводности и гауссовского распределения лазерного источника тепла сформирована математическая модель процесса. Показано, что компьютерное моделирование позволяет предварительно оценивать технологические режимы, сокращать количество экспериментальных исследований и определять оптимальные параметры лазерной обработки.

Ключевые слова: лазер, лазерная технология, компьютерное моделирование, математическая модель, теплопроводность, температурное поле, мощность лазера, скорость сканирования, численный метод, оптимизация.

Abstract

This paper investigates the theoretical and practical foundations of computer modeling of laser technological processes. Particular attention is paid to the mathematical description of thermal phenomena occurring during laser-material interaction, determination of temperature distribution in time and space, and evaluation of the influence of technological parameters on processing results. Laser power, beam radius, scanning speed, thermal conductivity, density, and specific heat capacity of the material are considered as the main model parameters. A mathematical model is developed based on the heat conduction equation and a Gaussian laser heat source distribution. The study demonstrates that computer modeling makes it possible to predict technological regimes, reduce the number of experimental investigations, and determine optimal laser processing parameters.

Keywords: laser, laser technology, computer modeling, mathematical model, heat conduction, temperature field, laser power, scanning speed, numerical method, optimization.

Kirish

Lazer texnologiyalarining rivojlanishi zamonaviy ishlab chiqarish jarayonlarini takomillashtirishda muhim ahamiyat kasb etmoqda. Lazer nurlanishining yuqori energiya zichligi, yo‘naltirilganligi va lokal ta’sir ko‘rsatish imkoniyati undan metall va metall bo‘lmagan materiallarni kesish, payvandlash, burg‘ilash, sirtga ishlov berish hamda additiv ishlab chiqarish jarayonlarida foydalanish imkonini beradi.

Lazerli materiallarga ishlov berish jarayonlari issiqlik, massa almashinuvi va materialning fazaviy o‘zgarishlari bilan bog‘liq murakkab fizik hodisalardan tashkil topadi. Lazer nurlanishi material yuzasiga tushganda energiyaning ma’lum qismi qaytariladi, ma’lum qismi esa material tomonidan yutiladi. Yutilgan energiya natijasida materialning harorati oshadi va tegishli sharoitlarda uning erishi yoki bug‘lanishi yuzaga keladi.

Lazerli jarayonlarning murakkabligi sababli ularni faqat tajriba asosida tadqiq qilish ko‘p vaqt va resurs talab etadi. Shu sababli matematik va kompyuter modellashtirish zamonaviy lazer texnologiyalarini tadqiq qilishning muhim vositalaridan biriga aylangan.

Lazer materiallariga ishlov berish bo‘yicha fundamental adabiyotlarda lazerli kesish, payvandlash, sirtga ishlov berish, issiqlik oqimi nazariyasi, matematik modellashtirish va jarayonlarni avtomatlashtirish masalalari birgalikda ko‘rib chiqilgan.

Tadqiqot maqsadi va vazifalari

Tadqiqotning asosiy maqsadi lazerli jarayonlarning issiqlik xususiyatlarini matematik model asosida ifodalash va kompyuter modellashtirish orqali texnologik parametrlarning jarayon natijalariga ta’sirini aniqlashdan iborat.

Ushbu maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar belgilandi:

- lazer nurlanishining material bilan o‘zaro ta’sir mexanizmini o‘rganish;
- lazer ta’sirida materialda hosil bo‘ladigan issiqlik jarayonlarini matematik ifodalash;
- harorat maydonini aniqlash uchun matematik model ishlab chiqish;
- lazer quvvati va skanerlash tezligining ta’sirini baholash;
- kompyuter modellashtirish algoritmini shakllantirish;
- modellashtirish natijalaridan foydalanib optimal texnologik rejimlarni aniqlash.

Lazerli jarayonning matematik modeli

Material ichida issiqlikning tarqalishi umumiy holda issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

bu yerda:

- ρ — material zichligi, kg/m³;
- c_p — solishtirma issiqlik sig‘imi, J/(kg·K);
- T — material harorati, K;
- t — vaqt, s;
- k — issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti, W/(m·K);
- Q — issiqlik manbai, W/m³.

Mazkur tenglama lazer ta’sirida materialda yuzaga keladigan haroratning vaqt va fazo bo‘yicha o‘zgarishini tavsiflash uchun asosiy matematik model sifatida qabul qilinadi.

Lazer nurlanishining sirt bo‘yicha taqsimlanishini Gauss funksiyasi yordamida ifodalash mumkin:

$$q(x,y) = 2\eta P \pi r^2 \exp f_0 [-2((x-x0)2+(y-y0)2)r2]$$

bu yerda:

- P — lazer quvvati, W;

- η — materialning lazer energiyasini yutish koeffitsiyenti;
- r — lazer nurining radiusi, m;
- x0,y0 — lazer nuri markazining koordinatalari.

Lazer materiali bo‘ylab harakatlanganda uning markaziy koordinatalari vaqtga bog‘liq bo‘ladi:

$x0=x00+vt$

bu yerda v — lazerning skanerlash tezligi.

Ushbu tenglama lazer nurining material yuzasi bo‘ylab harakatlanishini matematik ravishda ifodalash imkonini beradi.

Kompyuter modellashtirish algoritmi

Lazerli jarayonlarni kompyuterda modellashtirish bir necha ketma-ket bosqichlardan iborat.

1-bosqich. Geometrik model yaratish.

Tadqiq qilinayotgan materialning geometrik o‘lchamlari belgilanadi. Model ikki yoki uch o‘lchamli ko‘rinishda shakllantirilishi mumkin.

2-bosqich. Material xususiyatlarini kiritish.

Materialning zichligi, issiqlik o‘tkazuvchanligi, solishtirma issiqlik sig‘imi, erish harorati va boshqa fizik xususiyatlari belgilanadi.

3-bosqich. Lazer parametrlarini belgilash.

Lazer quvvati, nur diametri yoki radiusi, skanerlash tezligi va lazer nurlanishining material tomonidan yutilish koeffitsiyenti kiritiladi.

4-bosqich. Boshlang‘ich va chegaraviy shartlarni berish.

Materialning boshlang‘ich harorati, tashqi muhit harorati va issiqlik almashinuvi shartlari belgilanadi.

5-bosqich. Sonli hisoblash.

Matematik model sonli usullar yordamida yechiladi. Bunda chekli elementlar, chekli ayirmalar yoki chekli hajmlar usullaridan foydalanish mumkin.

6-bosqich. Natijalarni vizuallashtirish.

Hisoblash natijalari harorat xaritalari, grafiklar va jadval ko‘rinishida tasvirlanadi.

7-bosqich. Optimallashtirish.

Turli lazer quvvati va skanerlash tezligi qiymatlari uchun natijalar taqqoslanib, maqsadli texnologik ko‘rsatkichlarga mos optimal parametrlar aniqlanadi.

5. Asosiy texnologik parametrlarning ta’siri

Lazerli jarayonning natijasi ko‘plab parametrlarning o‘zaro bog‘liqligiga bog‘liq. Ulardan eng muhimlari lazer quvvati va skanerlash tezligidir.

Birlik uzunlikka to‘g‘ri keladigan lazer energiyasini quyidagicha ifodalash mumkin:

El=Pv

bu yerda El — chiziqli energiya zichligi, J/m.

Ushbu ifodadan ko‘rinadiki, lazer quvvati oshishi bilan materialga uzatiladigan energiya miqdori ortadi. Aksincha, skanerlash tezligi oshirilganda birlik uzunlikka to‘g‘ri keladigan energiya kamayadi.

Lazer quvvati juda kichik bo‘lsa, materialning yetarli darajada qizimasligi va kerakli texnologik natijaning olinmasligi mumkin. Quvvat haddan tashqari katta bo‘lganda esa ortiqcha qizish, bug‘lanish, deformatsiya yoki boshqa texnologik nuqsonlar yuzaga kelishi ehtimoli ortadi.

Skanerlash tezligi ham muhim parametr hisoblanadi. Past tezlikda lazerning ma’lum nuqtaga ta’sir qilish vaqti ko‘proq bo‘ladi. Natijada issiqlikning materialga uzatilishi ortadi. Yuqori tezlikda esa issiqlik ta’sirining davomiyligi kamayadi.

Shu sababli lazer quvvati va skanerlash tezligini alohida emas, balki o‘zaro bog‘liq parametrlar sifatida ko‘rib chiqish maqsadga muvofiq.

Modellashtirish natijalarini tahlil qilish

Kompyuter modellashtirish natijasida material yuzasida haroratning notekis taqsimlanishi kuzatiladi. Lazer nuri markazida energiya zichligi eng katta bo‘lgani sababli maksimal harorat odatda shu hududda shakllanadi.

Lazer markazidan uzoqlashgan sari issiqlik oqimi kamayadi va natijada harorat ham pasayadi. Bu jarayon Gauss tipidagi issiqlik manbai modelining asosiy xususiyatlaridan biridir.

Model natijalarini tahlil qilishda quyidagi ko‘rsatkichlardan foydalanish mumkin:

№	Ko‘rsatkich	Belgilanishi	O‘lchov birligi
1	Lazer quvvati	P	W
2	Skanerlash tezligi	v	m/s
3	Nur radiusi	r	m
4	Maksimal harorat	Tmax	K
5	Boshlang‘ich harorat	T0	K
6	Chiziqli energiya zichligi	El	J/m
7	Issiqlik o‘tkazuvchanlik	k	W/(m·K)

Modellashtirish natijalari asosida P, v va r parametrlarining harorat maydoniga ta’sirini grafik tarzda ko‘rsatish mumkin.

Masalan, lazer quvvati o‘zgarmas bo‘lganda skanerlash tezligini oshirish natijasida El=P/v qiymati kamayadi. Natijada materialning qizish darajasi pasayadi. Aksincha, skanerlash tezligini kamaytirish chiziqli energiya zichligining ortishiga olib keladi.

Bu bog‘liqlik kompyuter modellashtirish orqali tezkor ravishda tekshirilishi mumkin.

Kompyuter modellashtirishning afzalliklari

Lazerli jarayonlarni kompyuterda modellashtirish bir qator muhim afzalliklarga ega.

Birinchidan, real tajribalar sonini kamaytirish imkonini beradi. Har bir texnologik parametrni amaliy tajribada tekshirish o‘rniga dastlab uning kompyuter modelidagi ta’sirini baholash mumkin.

Ikkinchidan, model yordamida material ichida yuz berayotgan jarayonlarni bevosita kuzatish imkoniyati paydo bo‘ladi. Tajribada o‘lchash qiyin bo‘lgan ichki harorat maydonini matematik model yordamida aniqlash mumkin.

Uchinchidan, turli texnologik rejimlarni qisqa vaqt ichida solishtirish mumkin. Bu esa optimal parametrlarni tanlash jarayonini tezlashtiradi.

To‘rtinchidan, kompyuter modellashtirish yangi lazer texnologiyalarini loyihalashda muhim vosita bo‘lib xizmat qiladi. Lazer materiallariga ishlov berish bo‘yicha ilmiy adabiyotlarda matematik modellashtirish va simulyatsiya texnologik jarayon mexanizmlarini tushuntirish hamda ishlab chiqarish parametrlarini asoslash uchun qo‘llanadi.

Ilmiy yangilik

Tadqiqotning ilmiy yangiligi lazerli jarayonni issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasi va Gauss tipidagi lazer issiqlik manbai asosida yagona matematik model sifatida ifodalash, shuningdek, lazer quvvati va skanerlash tezligining harorat maydoniga ta’sirini kompyuter modellashtirish asosida baholashdan iborat.

Taklif etilgan yondashuv lazerli jarayonlarning texnologik parametrlarini oldindan baholash va optimal rejimlarni tanlash uchun foydalanish imkonini beradi.

Amaliy ahamiyati

Tadqiqot natijalaridan quyidagi yo‘nalishlarda foydalanish mumkin:

- lazerli kesish jarayonlarini optimallashtirish;
- lazerli payvandlash parametrlarini tanlash;
- material sirtiga lazer yordamida ishlov berish;
- lazerli qoplama hosil qilish;

- additiv ishlab chiqarish jarayonlarini modellashtirish;
- termik ta’sir zonasini oldindan aniqlash;
- lazer texnologik uskunalarini boshqarish algoritmlarini ishlab chiqish.

Modelni tajriba natijalari bilan kalibrlash orqali uning aniqligini oshirish mumkin. Bunda real material xususiyatlarining haroratga bog‘liqligi, lazer energiyasining yutilishi, konvektiv va radiatsion issiqlik yo‘qotishlari ham hisobga olinishi maqsadga muvofiq.

Xulosa

Lazerli jarayonlarni kompyuterda modellashtirish zamonaviy ishlab chiqarish texnologiyalarini takomillashtirishning samarali usullaridan biridir. Matematik model yordamida lazer nurlanishining materialga uzatadigan energiyasi, issiqlikning material bo‘ylab tarqalishi va harorat maydonining vaqt bo‘yicha o‘zgarishini aniqlash mumkin.

Tadqiqotda lazerli jarayonning asosiy matematik modeli sifatida issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasidan foydalanildi. Lazer nurlanishining material yuzasidagi taqsimoti Gauss funksiyasi yordamida ifodalandi. Lazer quvvati va skanerlash tezligi jarayonning muhim texnologik parametrlari ekanligi ko‘rsatildi.

Kompyuter modellashtirish yordamida turli texnologik rejimlarni oldindan baholash, tajribalar sonini kamaytirish va materialga ishlov berish sifatini oshirish mumkin. Kelgusidagi tadqiqotlarda materialning fazaviy o‘zgarishlari, haroratga bog‘liq fizik xususiyatlari, konveksiya, issiqlik nurlanishi va termik deformatsiyalarni hisobga oluvchi ko‘p fizikaviy model ishlab chiqish maqsadga muvofiq.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Steen W.M., Mazumder J. *Laser Material Processing*. 4th ed. Springer, 2010. Ushbu manbada lazerli kesish, payvandlash, sirtga ishlov berish, matematik modellashtirish, simulyatsiya va avtomatlashtirish masalalari yoritilgan.
2. Steen W.M. *Laser Material Processing*. 3rd ed. Springer, 2003.

3. Steen W.M. *Laser Material Processing*. 2nd ed. Springer, 1998.
4. Mazumder J., Conde O., Villar R., Steen W. et al. *Laser Processing: Surface Treatment and Film Deposition*. Springer, 1996. Mazkur to‘plamda lazerli jarayonlarning matematik modellashtirilishi, issiqlik va massa almashinuvi hamda sirtga ishlov berish masalalari ko‘rib chiqilgan.
5. Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
6. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press.
7. Ready J.F. *Industrial Applications of Lasers*. Academic Press.
8. Ion J.C. *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*. Elsevier.
9. Duley W.W. *Laser Welding*. Wiley-Interscience.
10. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*. Springer.
11. Majumdar J.D., Manna I. *Laser Processing of Materials*. Springer.
12. Katayama S. *Handbook of Laser Welding Technologies*. Woodhead Publishing.
13. Powell J. *CO2 Laser Cutting*. Springer.