

УДК 621.375.826:621

**М.І. Анякін, д-р техн. наук, В.С. Коваленко, проф., д-р техн. наук, Р.О.Жук, ас.,
О.М.Степура, мол. наук.співр., П.В.Кондрашев, канд.техн.наук,ст.викл., М. Наєбі,
асп.**

*Механіко-машинобудівний інститут Національного технічного університету України
«КПІ»*

Система для моніторингу лазерної обробки

В роботі приводиться методика визначення оптичних параметрів різноманітних матеріалів та система для моніторингу технологічних процесів лазерної обробки матеріалів.
лазерне випромінювання, технологічний процес, оптичні властивості

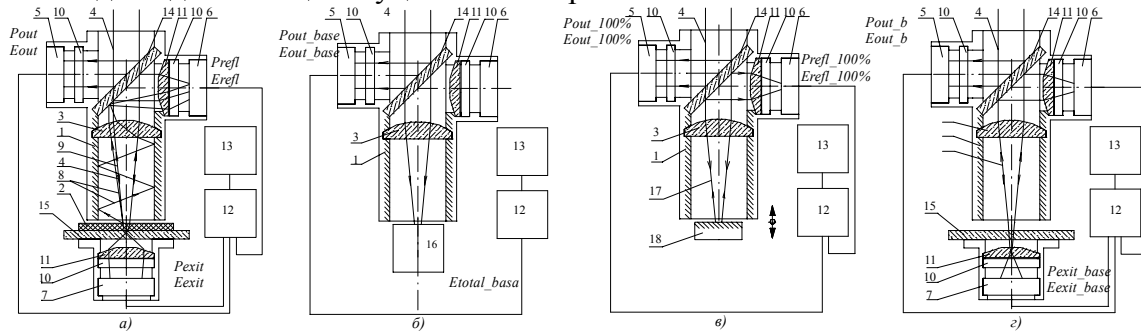
При створенні систем моніторингу процесів лазерної обробки матеріалів (зміцнення, зварювання, наплавки та інше) широке застосування знайшли системи, які контролюють віддзеркалений від поверхні деталі тепловий потік, віддзеркалене лазерне випромінювання, густину та наявність плазми, акустичні хвилі та інше [1, 2]. Вказані методи контролю мають певні вади. Так, наприклад, фіксування акустичних хвиль, котрі виникають під час руйнування поверхневого шару деталі, можливе лише при значній густині потужності сфокусованого лазерного випромінювання. Це не дозволяє його використання при моніторингу стану поверхні деталі, або створювати адаптивні системи лазерного відпалу та зміцнення. У даній роботі запропоновано просту систему моніторингу технологічних процесів лазерної поверхневої обробки та методику розрахунків залежності поглинальних здібностей матеріалів, які обробляються, від температури. Вказана система дозволяє контролювати як дзеркально, так і дифузно відбите від поверхні деталі лазерне випромінювання.

Експерименти проводились на експериментальних стендах, які були обладнані випромінювачами на алюмо-іттрієвому гранаті (довжина хвилі $\lambda=1.06\mu\text{м}$), що працюють у імпульсному та безперервному режимах генерації. Діаметр плями фокусування d_p утворювали методом діафрагми, що сканує. Вимірювання енергії (потужності) лазерного випромінювання здійснювали калориметричним вимірювачем ІМО-2.

Для дослідження процесів взаємодії сфокусованого потоку лазерного випромінювання з матеріалом, що оброблюється, та контролю якості лазерної обробки, був розроблений спеціальний простий пристрій [3], схема якого зображена на рис.1. Завдяки наявності дзеркального полого світловоду 1, який встановлений між зразком, що обробляється 2 та об'єктивом 3, що фокусує лазерне випромінювання 4, завдяки наявності датчиків променю 5, 6, 7 вказаний пристрій дозволяє контролювати дзеркальний 7 та дифузний потік 8 лазерного випромінювання, який відбивається від поверхні зразка. При дослідженні процесу взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами, їх обробка велась у повітряному середовищі. У якості матеріалів, що досліджуються використовували суцільні матеріали та їх порошкові аналоги: цирконій, мідь, сталь 65, нітрид бору, сплав ЖС6К та інші. Густина порошкової суміші, яка була накочувана на предметну скляну пластину, визначали за допомогою вимірювання її товщини (між двома пластинами), площі та наперед відомій вазі порошку. У кожній експериментальній точці виконувалось по 5 дослідів по вимірюванню залежностей потужності від часу випромінювання, яке потрапляє на зразок $P_{out}(t)$, відбилась від нього $P_{refl}(t)$, або пройшла наскрізь $P_{exit}(t)$ та проводилась їх стандартна статистична

обробка. В подальшому, у розрахунках, використовували середні значення результатів вимірювань, котрі інтерполювались кубічними сплайнами. Для контролю стану поверхні матеріалу, який був оброблений сфокусованим лазерним випромінюванням, ділянки зразка, котрі були оброблені, через певний час (близько 60 с) повторно опромінювались, та обробка велась за стандартною процедурою.

Лазерне опромінення порошкових матеріалів вели на однакових з суцільними режимах. При чому, товщина шару порошку складала від 0,1 мм до 5 мм. Останнє значення відповідало товщині суцільних матеріалів.



1 – полий дзеркальний світловод; 2- зразок, що обробляється; 3- об'єктивом, що фокусує; 4- лазерне випромінювання; 5, 6, 7 - датчики променю; 8, 9 - дзеркальний та дифузний потік; 10- інтерференційні фільтри; 11- об'єктиви; 12 – АЦП, 13- ПЕОМ; 14 – світло подільна пластина; 15 – предметне скло; 16 – вимірювач енергії; 17 – випромінювання, що відбите від 100% дзеркала 18

Рисунок 1 – Схема пристрою для контролю процесу обробки (а) та головні етапи його тарування (в-г)

Відомо, що лазерні технологічні процеси описуються нелінійним нестационарним рівнянням теплопровідності з урахуванням фазових перетворень (1). Тобто, описуючи процес нагріву системою (1), при застосуванні розробленого пристрою, який дозволяє визначити $P_{out}(t)$ та $P_{refl}(t)$, та відомому d_p , для заданого матеріалу ми, вирішуючи (1), можемо визначати температуру зразка у зоні обробки. Слід додати, що у нашому випадку теплове джерело буде дорівнювати (2) .

При рішенні задачі, система (1) замінювалася кінцево-різницевою аналогою із неявною схемою апроксимації похідних з нерівномірними кроками по просторовій і часовій координатам та вирішувалася методом прогонки з ітераційною схемою урахування нелінійностей. Причому, залежності теплофізичних властивостей матеріалу зразка від температури інтерполювались кубічними сплайнами.

$$\left. \begin{aligned} c_f(T) \cdot \rho_f(T) \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_f(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ c_v(T) &= c_v(T) + Q_f \delta(T - T_f) \\ T_{start} &= 25^\circ C \\ \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0; -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = A(T) \cdot W_p(t); \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = 0; \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{4}{\pi d^2} (P_{out}(t) - P_{refl}(t)), \quad (2)$$

де $c_f(T)$, $\rho_f(T)$, $\lambda_f(T)$ - залежності теплоємності, густоти і теплопровідності матеріалів покриття та деталі від температури T ;

$W_p(t)$ – залежність густини потужності лазерного випромінювання від часу;

y, t - просторові і часові координати;

$c_v(T)$ - об'ємна теплоємність, що дорівнює $c_v(T) = c(T) \rho(T)$;

δ - δ функція Дірака;

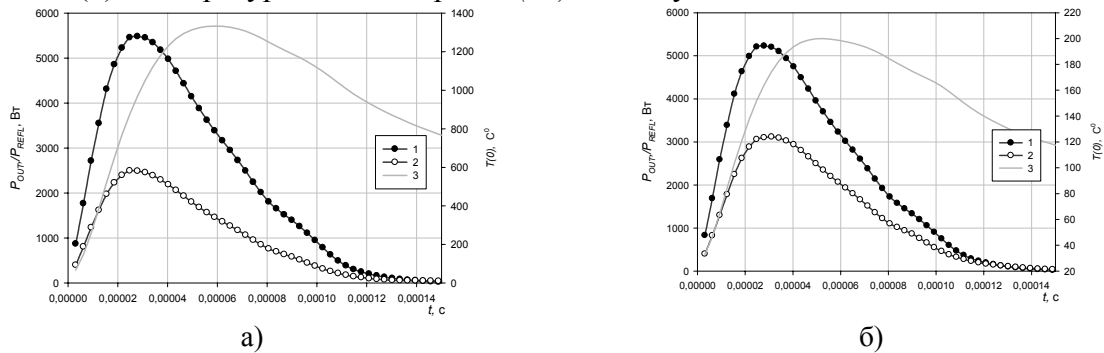
Q_f - скрита теплота фазового перетворення;

T_{Start} - початкова температура оброблюваної деталі;

HY – товщина оброблюваної деталі;

$A(T)$ - залежність коефіцієнту поглинання лазерного випромінювання від температури T .

На рис. 2 приведені виміряні та розраховані залежності потужності лазерного випромінювання $P_{out}(t)$ (довжина хвилі $\lambda=1,06$ мкм) що надійшло до зразка (а-цирконій, б-мідь), віддзеркалилось від нього $P_{refl}(t)$, та розрахована, за допомогою рішення (3) температура його поверхні $T(0,t)$ від часу t .



1, 2- виміряні залежності $P_{out}(t)$ та $P_{refl}(t)$ відповідно; 3- розрахована залежність $T(0,t)$ від часу t ;
а) – матеріал зразка Zr; б) - матеріал зразка Cu

Рисунок 2 – Залежності потужності лазерного випромінювання $P_{out}(t)$ ($d_p=1.6$ мм), що надійшло до зразка (а-цирконій, б-мідь), віддзеркалилось від нього $P_{refl}(t)$ та температура його поверхні $T(0,t)$ від часу t

Як видно з наведених залежностей, при заданих режимах обробки, температура поверхні зразка з цирконію сягає 1300°C , причому, спостерігається явне відставання (у часі) появи максимуму температури поверхні зразка від максимуму потужності лазерного випромінювання, причому вказана величина сягає 60 мкс. Обробка на вказаних режимах зразків з міді (рис. 2б) характеризується зниженням температури зразка та приближенням (у часі) її піку до максимуму потужності лазерного випромінювання. Це легко пояснюється високою теплопровідністю міді, яка перевищує теплопровідність цирконію у 12 раз. Крім того, на залежностях $P_{out}(t)$ та $P_{refl}(t)$ (рис. 2.) помітно, що величина потужності відбитого лазерного випромінювання для зразка з міді значно більша, ніж у зразка з цирконію.

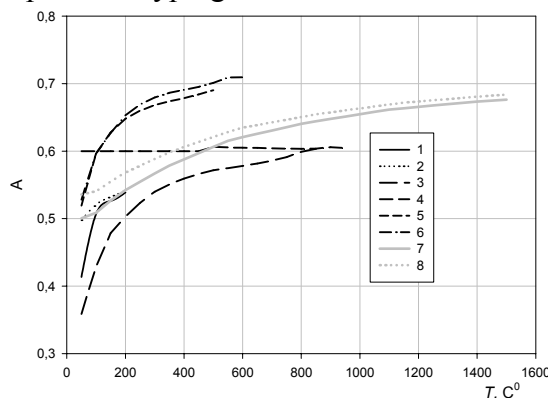
Застосування розробленого пристрою та методики проведення експериментів [3] ідеально підходить для визначення температурних залежностей поглинальних здібностей матеріалів, що досліджуються: залежність коефіцієнта поглинання лазерного випромінювання від температури $A(T)$ визначається шляхом заміни систем координат у залежностях $P_{out}(t)$ та $P_{refl}(t)$ (відповідно коефіцієнта поглинання лазерного випромінювання від часу t): час t на температуру поверхні $T(0,t)$ (3).

$$A(t) = \left. \frac{(P_{out}(t) - P_{refl}(t)) / P_{out}(t)}{P_{out}(t) \neq 0} \right\}. \quad (3)$$

Так, на рис. 3 приведені залежності коефіцієнтів поглинання суцільних матеріалів від температури T , які були встановлені під час проведення досліджень.

Аналізуючи залежності, що наведені на рис. 3 слід відмітити, що при зростанні температури поверхні, поглинаюча здібність матеріалів зростає. Повторна лазерна обробка деяких матеріалів (Cu, Zr) більш ефективна, що пояснюється знищенням поверхневих забруднень, котрі мають місце на їх поверхні.

На відміну від поглинання металами лазерної енергії, коли лазерне випромінювання поглинається у тонкому поверхневому шарі (скін – шар), поглинання у порошку відбувається по значній глибині та залежить від складу порошку, його розміру, густини суміші та інше. Врахування даного явища, при моделюванні технології Rapid Prototyping (особливо при створенні деталі з металевих або керамічних матеріалів з накочуванням порошку шар за шаром), дуже важливе. Це пов'язано з тим, що густина порошкової суміші незначна, зернистість порошку сягає 20-100 мкм, що дозволяє лазерному випромінюванню, за рахунок дифракції та віддзеркалення від частинок суміші, проникати на значну глибину та, відповідно, спікати “товстий” шар матеріалу. Спінання товстого шару спостерігається при формоутворенні початкового шару деталі, або формоутворенні шарів, котрі “нависають” над порожнинами. При малому кроці нарощування деталі, який дорівнює 20-200 мкм та дорівнює, або перевищує розмір окремої порошокинки в декілька разів, лазерне випромінювання проникає до спеченого, майже суцільного матеріалу, який, у свою чергу, поглинає та віддзеркалює лазерне випромінювання. Віддзеркалене випромінювання потрапляє до верхнього шару порошку та процес повторюється. Це явище робить процес чисельного моделювання процесу Rapid Prototyping ще складнішим.



1- залежність коефіцієнту поглинання $A(T)$ для Si , перший імпульс; 2 - $A(T)$ для Si при повторному опроміненні; 3 - $A(T)$ для Zr перший імпульс; 4 - $A(T)$ для Zr при повторному опроміненні; 5, 6 – аналогічні залежності $A(T)$ для сталі 65Г; 7,8 - $A(T)$ для кубічного нітриду бору

Рисунок 3 – Залежності коефіцієнтів поглинання A суцільних матеріалів від температури T

Запропоновані багатьма авторами методи розрахунків процесу поглинання лазерного випромінювання порошковими матеріалами, які базуються на геометричній оптиці та вірогідних методах, дають задовільні результати, але є прийнятними лише при статичних розрахунках [5]. Так, в динаміці, в процесі поглинання випромінювання, елементарна частка порошку є більш тепло ізольована, більше нагрівається, збільшує розмір (наприклад, коефіцієнт лінійного розширення міді при $1000^{\circ}C$ збільшується у порівнянні з кімнатною температурою у 1,5 рази) та “ворушить” своїх сусідів. “Ворушінню” порошку найбільш сприяє збільшення обсягу робочого газу, котрим вкриті його краплини. Крім того, за рахунок миттєвого зростання температури та термодифузії, частки порошку “злипаються”, перетворюючись у суцільне тіло. Також, в залежності від атмосфери, що оточує порошок, можливе його термохімічне перетворення (при обробці в атмосфері повітря – утворення окислів). Моделювання даних явищ дуже трудомістке та не дає вірогідності отримання адекватного рішення. Для узагальнення теплофізичних та оптичних властивостей порошкового матеріалу можна скористатись рівняннями адитивності (4) [4] з врахуванням процентного складу атмосфери суміші та складових порошку.

Використовуючи розроблений пристрій та (1)–(4), для товстого шару порошкового матеріалу (зразок порошок міді товщиною 5 мм, з 5,6 %повітря) ми можемо, вимірюючи залежності потужності лазерного випромінювання $P_{out}(t)$ (довжина хвилі $\lambda=1.06\text{мкм}$) що надійшла до зразка з порошкового матеріалу та віддзеркалилась від нього $P_{refl}(t)$, розрахувати з врахуванням (4) температуру його поверхні $T(0,t)$ від часу t (рис. 4).

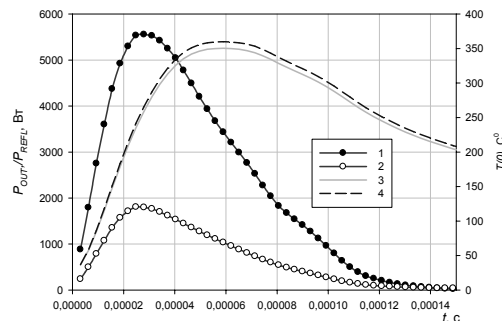
$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n C_i k_i; \lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i k_i; \rho_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \rho_i k_i, \quad (4)$$

де c_i , λ_i , ρ_i - залежності теплоємності, теплопровідності та густини i матеріалу суміші від температури T ;

n - кількість компонентів суміші;

k – кількісний вміст i компоненту у суміші;

c_{Σ} , λ_{Σ} , ρ_{Σ} - залежності теплоємності, теплопровідності та густини матеріалу суміші від температури T .



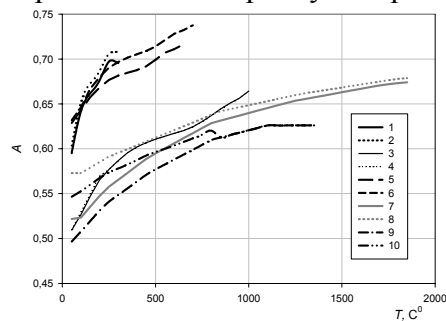
1- залежність $P_{out}(t)$ від часу t ; 2- залежність $P_{refl}(t)$ від часу t ; 3- залежність температури його поверхні $T(0,t)$ від часу t при умові, коли теплофізичні властивості порошкового матеріалу відповідають суцільному; 4 - залежність $T(0,t)$ від часу t коли теплофізичні властивості порошкового матеріалу враховують вміст атмосфери (4).

Рисунок 4 – Залежності потужності лазерного випромінювання $P_{out}(t)$ ($d_p=1,6$ мм), що надійшла до зразка з порошкового матеріалу (Cu), віддзеркалилась від нього $P_{refl}(t)$, та розрахована залежність температури його поверхні $T(0,t)$ від часу t (товщина шару порошку 5 мм)

Аналізуючи залежності, що наведені на рис. 4 зазначимо, що в порівнянні з суцільним аналогом (рис. 2б), поглинання лазерного випромінювання товстим шаром порошкової суміші є більш ефективним. Крім того, при розрахунках, врахування вмісту атмосфери у суміші за допомогою (4), котра зменшує теплопровідність порошку, веде до зростання розрахункової температури поверхні, і, відповідно, у тілі зразка (залежність 4, рис. 4). Очевидно, що при збільшенні товщини порошкового шару лазерне випромінювання повністю поглинається у його тілі. Також, очевидно, що при низькій густині енергії сфокусованого лазерного випромінювання, коли температура суміші незначна, та коефіцієнт відбивання окремих порошочок вищий, ніж при високій температурі, лазерне випромінювання проникає у глибину суміші більш ефективно. Так, на рис.5 приведені залежності коефіцієнтів поглинання суцільних матеріалів від температури T , які були встановлені під час проведення досліджень.

Порівнюючи залежності, які приведені на рис. 3 та рис. 5 відмітимо, що поглинання лазерного випромінювання порошковими матеріалами при низькій температурі є більш ефективним ніж у суцільних аналогів. Зі зростанням температури (або відповідно зі зростанням густини енергії сфокусованого лазерного випромінювання) поглинальні здібності матеріалів вирівнюються. Дане явище можливо пояснити протіканням процесу хімічної реакції з навколишньою атмосферою (в

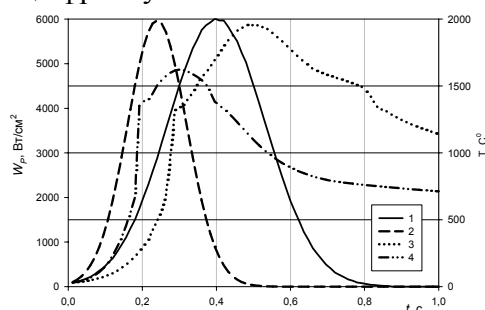
нашому випадку утворенням окислів), котрі нівелюють оптичні властивості матеріалів. Крім того, за рахунок більш інтенсивного поглинання лазерного випромінювання порошковим матеріалом (рис. 4) на початковій стадії їх взаємодії та за рахунок зменшення теплопровідності порошку (наявність атмосфери) температура порошкового матеріалу є більшою. Відчутна різниця в коефіцієнті поглинання лазерного випромінювання порошковими та суцільними аналогами робить можливим застосування вказаного пристрою для моніторингу лазерних технологічних процесів.



1 - залежність коефіцієнту поглинання $A(T)$ для Cu , перший імпульс; 2 - $A(T)$ для Cu при повторному опроміненні; 3 - $A(T)$ для Zr перший імпульс; 4 - $A(T)$ для Zr при повторному опроміненні; 5, 6 – аналогічні залежності $A(T)$ для заліза; 7, 8 - $A(T)$ для кубічного нітриду бору, 9) – залежність $A(T)$ для порошку на основі Ni ; 10) - $A(T)$ для порошку на основі Co

Рисунок 5 – Залежності коефіцієнтів поглинання A порошкових матеріалів від температури T

При проведенні досліджень розроблена система була використана для контролю якості формування шарів матеріалу заготовки. Моніторингу підлягали процеси, що відбуваються в порошкових та спечених (або сплавлених) зразках. Так, на рис. 6, рис. 7 приведені розраховані (за допомогою вирішення системи (1)–(4) температури поверхні зразків та положення границь фронту плавлення.

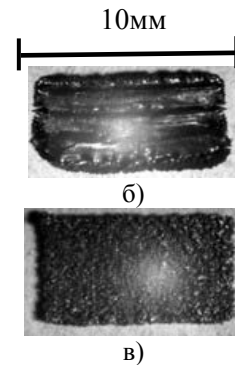
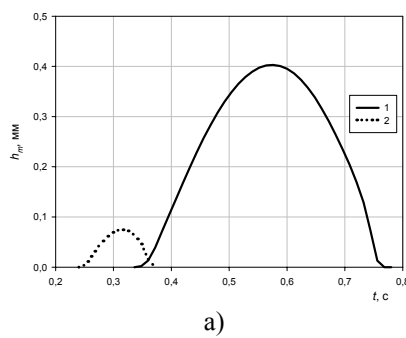


1 – залежність $W_p(t)$ від часу t для $V_x=0,1$ см/с; 2 - залежність $T(0,t)$ від часу t для $V_x=0,1$ см/с; 3 – залежність $W_p(t)$ від часу t для $V_x=0,167$ см/с; 2 - залежність $T(0,t)$ від часу t для $V_x=0,167$ см/с

Рисунок 6 – Залежність температури $T(0,t)$ на поверхні, що оброблюється, та густини потужності сфокусованого лазерного променя $W_p(t)$ від часу t при обробці порошкової суміші з заліза лазерним променем з $P_{out}(t)=30$ Вт, сфокусованим в пляму з $d_p=0,8$ мм, та рухається з різною швидкістю

Як видно з залежностей, котрі приведені на Рис.7, при швидкості обробки, що дорівнює 1,67 мм/с відбувається легке “підплавлення” порошку, що позначається малою глибиною та часом існування ванни розплаву (залежність 2 на рис. 7а, та рис. 7в). При зменшенні швидкості переміщення променя температура поверхні зростає до 2000°C (рис. 6), збільшується глибина проплаву та час його існування (залежність 1, рис. 7а, рис. 7б). Обробка на останньому режимі, за рахунок значних деформацій розплаву, що охолоджується, веде до утворення “хвиль” з кроком 1 мм. Різна температура поверхні відзначається на залежностях, що наведені на рис.6. Температура поверхні суміші, що сягає 500°C , відповідає коефіцієнту поглинання, що рівний 0,7, а коефіцієнти

поглинання 0,74 та 0,75 відповідають температурам 1600⁰С та 2000⁰С відповідно.



- 1 - залежність глибини розплаву $h_m(t)$ від часу t при швидкості $V_X = 0,1$ см/с;
2 - залежність $h_m(t)$ від часу t при швидкості $V_X = 0,167$ см/с

Рисунок 7 – Залежність глибини розплаву $h_m(t)$ у порошковій суміші з заліза (а) та зовнішній вигляд зразків (б, в), які отримані при лазерній обробці. Обробка лазерним променем з $P_{out}(t) = 30$ Вт, сфокусованим в пляму з $d_p = 0,8$ мм, швидкість $V_X = 0,1$ см/с (б) та $V_X = 0,167$ см/с (в)

При проведенні досліджень було розроблено пристрій для моніторингу процесу лазерної обробки матеріалів; методика визначення оптичних властивостей матеріалів від температури; встановлено залежності коефіцієнтів поглинання порошкових матеріалів від температури. Крім того, відмічено той факт, що при низькій температурі коефіцієнти поглинання порошкових матеріалів перевищують коефіцієнти суцільних аналогів в середньому у 1,5 раз. При температурі, що перевищує 800⁰С коефіцієнт поглинання порошкових матеріалів знижується та нівелюється із значенням коефіцієнту поглинання суцільних матеріалів.

Список літератури

1. LIA Handbook on Laser Materials Processing / [John f. Ready, V.S.Kovalenko, L.F.Golovko] - Ed. in Chief: John f. Ready - Laser Institute of America, Magnolia Publishing, Inc., 2001 - 715 p.
2. Коваленко В.С. Справочник по технологии лазерной обработки/В.С.Коваленко, В.П.Котляров, В.П. Дятел и др.- К.:Техніка, 1985.-161 с.
3. Studying of Laser Processed Material Optical Parameter Dependencies from Temperature /V. Kovalenko, M. Anyakin, J..Meijer [at al.] //“Proceedings of International Congress “ICALEO’2002”, Scottsdale, USA, Oct. 2002., [Електронний ресурс] LIA; 1 електрон.опт.диск (CD-ROM): цв; 12см – Заголовок з титул.екрану
4. Рыкалин Н. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы /Под общ. ред. Н.Рыкалина. – М.: Наука, 1985.- 246 с.
5. Progress in selective laser sintering / J.P.Kruth, X.Wang, T.Loui, L.Froen // Proceeding of the 13th International Symposium for Electromachining. (ISEM-XIII), Bilbao, Spain. – 2001.-V.1. - p. 21-38

Н. Анякин, В. Коваленко, Р.Жук, А.Степура, П.Кондрашев, М. Наебі
Система для мониторинга лазерной обработки

В статье приводится методика определения оптических параметров материалов и система для мониторинга технологических процессов лазерной обработки материалов

M. Anyakin, V. Kovalenko, R. Zhuk, O. Stepura, P. Kondrashev, M. Naebi
System for monitoring of laser processing

The methodology of the determination of material's optical properties as well as the monitoring system of the technological processes that occur at laser material processing are presented in this article.

Одержано 24.10.12