Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Г. Д. Гуреев, Д. М. Гуреев, Сопоставительный анализ скоростей нагрева поверхности лазерными импульсами различной временной формы, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2009, выпуск 1(), 191–197

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu637>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.84.234.179

26 апреля 2023 г., 17:38:14

Физика твёрдого тела

УДК 621.373.826

СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СКОРОСТЕЙ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ РАЗЛИЧНОЙ ВРЕМЕННОЙ ФОРМЫ

Г. Д. Гуреев, Д. М. Гуреев

Самарский государственный технический университет,
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

E-mail: anton_gureev@samaradom.ru

В одномерной линейной модели нагрева поверхности полубесконечной среды лазерными импульсами различной временной формы проведен сопоставительный анализ зависимостей скоростей нагрева от времени лазерного воздействия. Выявлены предпочтения использования характерных временных форм лазерных импульсов для оптимальной реализации лазерных технологических процессов модифицирования поверхности.

Ключевые слова: лазерное модифицирование поверхности, временная форма лазерного импульса, скорость лазерного нагрева.

Настоящая работа является продолжением работы [1] с целью выявления предпочтения использования характерных временных форм лазерных импульсов для оптимальной реализации лазерных технологических процессов модифицирования поверхности.

Используя приближение одномерной линейной модели нагрева поверхности полубесконечной среды и условия его применения, описанные в [1], при проведении сопоставительного анализа скоростей нагрева поверхности одиночными лазерными импульсами с различной временной формой, но с одной и той же энергией излучения ограничимся следующими аппроксимациями реальных временных форм лазерных импульсов.

Прямоугольная временная форма (рис. 1):

$$\varphi(t) = 1, \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (1)$$

где t — текущее время, τ — длительность лазерного импульса.

Треугольная временная форма (рис. 1):

$$\varphi(t) = \begin{cases} \varphi_1(t) = \frac{2}{\tau_0}t, & \text{если } 0 \leq t \leq \tau_0, \\ \varphi_2(t) = \frac{2}{\tau - \tau_0}(\tau - t), & \text{если } \tau_0 \leq t \leq \tau, \end{cases} \quad (2)$$

где временной параметр τ_0 характеризует крутизну переднего фронта импульса, $\varphi_1(\tau_0) = \varphi_2(\tau_0)$.

Гуреев Глеб Дмитриевич — студент.

Гуреев Дмитрий Михайлович — профессор кафедры общей физики и физики нефтегазового производства; д.ф.-м.н., профессор.

Рис. 1. Прямоугольная (1) и треугольные (2–5) временные формы лазерных импульсов: 2 – $\tau_0/\tau = 0$, 3 – $\tau_0/\tau = 0,1$, 4 – $\tau_0/\tau = 0,9$, 5 – $\tau_0/\tau = 1$

Временная форма, описываемая линейными функциями, с крутым передним фронтом (рис. 2):

$$\varphi(t) = \begin{cases} \varphi_1(t) = \frac{2n\tau}{\tau_0(\tau+n\tau_1-\tau_0)}t, & \text{если } 0 \leq t \leq \tau_0, \\ \varphi_2(t) = \frac{2(n-1)\tau}{(\tau_1-\tau_0)(\tau+n\tau_1-\tau_0)} \left(\frac{n\tau_1-\tau_0}{n-1} - t \right), & \text{если } \tau_0 \leq t \leq \tau_1, \\ \varphi_3(t) = \frac{2\tau}{(\tau-\tau_1)(\tau+n\tau_1-\tau_0)}(\tau - t), & \text{если } \tau_1 \leq t \leq \tau, \end{cases} \quad (3)$$

где дополнительный временной параметр τ_1 наряду с $n = \varphi_2(\tau_0)/\varphi_2(\tau_1)$ задаёт крутизну заднего фронта импульса, $\varphi_1(\tau_0) = \varphi_2(\tau_0)$, $\varphi_2(\tau_1) = \varphi_3(\tau_1)$.

Временная форма, описываемая линейными функциями, с пологим передним фронтом (рис. 2):

$$\varphi(t) = \begin{cases} \varphi_1(t) = \frac{2\tau}{\tau_0[n(\tau-\tau_0)+\tau_1]}t, & \text{если } 0 \leq t \leq \tau_0, \\ \varphi_2(t) = \frac{2(n-1)\tau}{(\tau_1-\tau_0)[n(\tau-\tau_0)+\tau_1]} \left(t - \frac{n\tau_0-\tau_1}{n-1} \right), & \text{если } \tau_0 \leq t \leq \tau_1, \\ \varphi_3(t) = \frac{2n\tau}{(\tau-\tau_1)[n(\tau-\tau_0)+\tau_1]}(\tau - t), & \text{если } \tau_1 \leq t \leq \tau, \end{cases} \quad (4)$$

где $n = \varphi_2(\tau_1)/\varphi_2(\tau_0)$, $\varphi_1(\tau_0) = \varphi_2(\tau_0)$, $\varphi_2(\tau_1) = \varphi_3(\tau_1)$.

Для временной формы (1) скорость нагрева поверхности будет определяться выражением

$$\frac{dT(0, t)}{dt} = \frac{T_0}{2\sqrt{\tau}} \frac{1}{\sqrt{t}}, \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (5)$$

где $T_0 = T_0(0, \tau) = \frac{2q(1-R)\sqrt{a\tau}}{\lambda\sqrt{\pi}}$; q — плотность мощности лазерного излучения, падающего на поверхность материала; R — коэффициент отражения излучения заданной длины волны поверхностью; a и λ — коэффициенты температуропроводности и теплопроводности материала соответственно.

Для временной формы (2) имеем:

$$\frac{dT(0, t)}{dt} = \begin{cases} \frac{dT_1(0, t)}{dt} = \frac{2T_0}{\tau_0\sqrt{\tau}}\sqrt{t}, & \text{если } 0 \leq t \leq \tau_0, \\ \frac{dT_2(0, t)}{dt} = \frac{T_0}{(\tau-\tau_0)\sqrt{\tau}} \frac{\tau+\tau_0-2t}{\sqrt{t-\tau_0}}, & \text{если } \tau_0 \leq t \leq \tau. \end{cases} \quad (6)$$

Рис. 2. Временные формы лазерных импульсов, описываемые линейными функциями, с крутым (1) и пологим (2) передним фронтом: 1 — $\tau_0/\tau = 0,1$, $\tau_1/\tau = 0,2$, $n = 5$; 2 — $\tau_0/\tau = 0,8$, $\tau_1/\tau = 0,9$, $n = 5$

Нагрев поверхности здесь происходит до $t_n = \frac{\tau + \tau_0}{2}$, при $t > t_n$ поверхность охлаждается.

Для временных форм (3) и (4) скорости нагрева поверхности будут определяться соответственно выражениями:

$$\frac{dT(0, t)}{dt} = \begin{cases} \frac{dT_1(0, t)}{dt} = \frac{2n\sqrt{\tau}T_0}{\tau_0(\tau + n\tau_1 - \tau_0)}\sqrt{t}, & \text{если } 0 \leq t \leq \tau_0, \\ \frac{dT_2(0, t)}{dt} = \frac{\sqrt{\tau}T_0}{(\tau_1 - \tau_0)(\tau + n\tau_1 - \tau_0)} \times \\ \quad \times \frac{n(\tau_1 - \tau_0) - 2(n-1)(t - \tau_0)}{\sqrt{t - \tau_0}}, & \text{если } \tau_0 \leq t \leq \tau_1, \\ \frac{dT_3(0, t)}{dt} = \frac{\sqrt{\tau}T_0}{(\tau - \tau_1)(\tau + n\tau_1 - \tau_0)} \frac{\tau + \tau_1 - 2t}{\sqrt{t - \tau_1}}, & \text{если } \tau_1 \leq t \leq \tau, \end{cases} \quad (7)$$

где поверхность нагревается во временных интервалах $0 < t \leq \frac{n(\tau_1 + \tau_0) - 2\tau_0}{2(n-1)}$ и $\tau_1 < t \leq \frac{\tau + \tau_1}{2}$, и

$$\frac{dT(0, t)}{dt} = \begin{cases} \frac{dT_1(0, t)}{dt} = \frac{2\sqrt{\tau}T_0}{\tau_0[n(\tau - \tau_0) + \tau_1]}\sqrt{t}, & \text{если } 0 \leq t \leq \tau_0, \\ \frac{dT_2(0, t)}{dt} = \frac{\sqrt{\tau}T_0}{(\tau_1 - \tau_0)[n(\tau - \tau_0) + \tau_1]} \times \\ \quad \times \frac{\tau_1 - \tau_0 + 2(n-1)(t - \tau_0)}{\sqrt{t - \tau_0}}, & \text{если } \tau_0 \leq t \leq \tau_1, \\ \frac{dT_3(0, t)}{dt} = \frac{n\sqrt{\tau}T_0}{(\tau - \tau_1)[n(\tau - \tau_0) + \tau_1]} \frac{\tau + \tau_1 - 2t}{\sqrt{t - \tau_1}}, & \text{если } \tau_1 \leq t \leq \tau, \end{cases} \quad (8)$$

где нагрев поверхности происходит до $t_n = \frac{\tau + \tau_1}{2}$, при $t > t_n$ поверхность охлаждается.

Зависимости скоростей нагрева от времени лазерного воздействия для временных форм лазерных импульсов (1) и (2) приведены на рис. 3, для временных форм (3) и (4) — на рис. 4.

Наблюдаемые разрывы функций $\frac{dT(0, t)}{dt}$ являются следствием аппроксимации реальных временных форм лазерных импульсов кусочно-гладкими

функциями $\varphi(t)$. Подтверждением этого является сопоставление временных зависимостей скоростей нагрева поверхности лазерными импульсами треугольной временной формы (2) с $\tau_0 = 0,5\tau$, треугольной временной формы с параболическим сглаживанием вершины:

$$\varphi(t) = \begin{cases} \varphi_1(t) = \frac{6(2\tau - \tau_1 - \tau_0)}{3\tau(\tau_1 + \tau_0) - 2(\tau_1^2 + \tau_1\tau_0 + \tau_0^2)}t, & \text{если } 0 \leq t \leq \tau_0, \\ \varphi_2(t) = \frac{6[(\tau_1 + \tau_0)(\tau_1 - \tau_0)(\tau - t) - \tau(\tau_1 - t)^2]}{(\tau_1 - \tau_0)[3\tau(\tau_1 + \tau_0) - 2(\tau_1^2 + \tau_1\tau_0 + \tau_0^2)]}, & \text{если } \tau_0 \leq t \leq \tau_1, \\ \varphi_3(t) = \frac{6(\tau_1 + \tau_0)}{3\tau(\tau_1 + \tau_0) - 2(\tau_1^2 + \tau_1\tau_0 + \tau_0^2)}(\tau - t), & \text{если } \tau_1 \leq t \leq \tau, \end{cases} \quad (9)$$

где дополнительный временной параметр τ_1 определяет остроту сглаживания вершины импульса, $\varphi_1(\tau_0) = \varphi_2(\tau_0)$, $\dot{\varphi}_1(\tau_0) = \dot{\varphi}_2(\tau_0)$, $\varphi_2(\tau_1) = \varphi_3(\tau_1)$, $\dot{\varphi}_2(\tau_1) =$

Рис. 3. Временные зависимости скоростей нагрева поверхности лазерными импульсами прямоугольной (1) и треугольной (2-5) временной формы: 2 — $\tau_0/\tau = 0$, 3 — $\tau_0/\tau = 0,1$, 4 — $\tau_0/\tau = 0,9$, 5 — $\tau_0/\tau = 1$

Рис. 4. Временные зависимости скоростей нагрева поверхности лазерными импульсами временной формы, описываемой линейными функциями, с крутым (1) и пологим (2) передним фронтом: 1 — $\tau_0/\tau = 0,1$, $\tau_1/\tau = 0,2$, $n = 5$; 2 — $\tau_0/\tau = 0,8$, $\tau_1/\tau = 0,9$, $n = 5$

$= \dot{\varphi}_3(\tau_1)$ (с $\tau_0 = 0,1\tau$ и $\tau_1 = 0,9\tau$), и параболической временной формы:

$$\varphi(t) = \frac{6}{\tau^2} (\tau - t) t, \quad 0 \leq t \leq \tau. \quad (10)$$

Вышеперечисленные временные формы лазерных импульсов приведены на рис. 5. При этом для временных форм (9) и (10) соответственно имеем:

$$\frac{dT(0, t)}{dt} = \begin{cases} \frac{dT_1(0, t)}{dt} = \frac{6(2\tau - \tau_1 - \tau_0)T_0}{[3\tau(\tau_1 + \tau_0) - 2(\tau_1^2 + \tau_1\tau_0 + \tau_0^2)]\sqrt{\tau}}\sqrt{t}, & 0 \leq t \leq \tau_0, \\ \frac{dT_2(0, t)}{dt} = \frac{T_0}{(\tau_1 - \tau_0)[3\tau(\tau_1 + \tau_0) - 2(\tau_1^2 + \tau_1\tau_0 + \tau_0^2)]\sqrt{\tau}} \times \\ \times \frac{3(\tau_1 - \tau_0)(2\tau - \tau_1 - \tau_0)(2t - \tau_0) - 8\tau(t - \tau_0)^2}{\sqrt{t - \tau_0}}, & \tau_0 \leq t \leq \tau_1, \\ \frac{dT_3(0, t)}{dt} = \frac{3(\tau_1 + \tau_0)T_0}{[3\tau(\tau_1 + \tau_0) - 2(\tau_1^2 + \tau_1\tau_0 + \tau_0^2)]\sqrt{\tau}} \frac{\tau + \tau_1 - 2t}{\sqrt{t - \tau_1}}, & \tau_1 \leq t \leq \tau \end{cases} \quad (11)$$

и

$$T(0, t) = \frac{4}{5} \frac{T_0}{\tau^2 \sqrt{\tau}} (5\tau - 4t) t \sqrt{t}, \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (12)$$

$$\frac{dT(0, t)}{dt} = \frac{2T_0}{\tau^2 \sqrt{\tau}} (3\tau - 4t) \sqrt{t}, \quad 0 \leq t \leq \tau. \quad (13)$$

При использовании треугольной временной формы с параболическим сглаживанием вершины нагрев поверхности осуществляется во временных интервалах

$$0 < t \leq \tau_0 + \frac{3}{8} \frac{(\tau_1 - \tau_0)(2\tau - \tau_1 - \tau_0)}{\tau} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{8}{3} \frac{\tau\tau_0}{(\tau_1 - \tau_0)(2\tau - \tau_1 - \tau_0)}} \right] \text{ и } \tau_1 < t \leq \frac{\tau + \tau_1}{2};$$

Рис. 5. Треугольная (1), треугольная с параболическим сглаживанием вершины (2) и параболическая (3) временные формы лазерных импульсов: 1 — $\tau_0/\tau = 0,5$; 2 — $\tau_0/\tau = 0,1$, $\tau_1/\tau = 0,9$

Рис. 6. Временные зависимости скоростей нагрева поверхности лазерными импульсами треугольной (1), треугольной с параболическим сглаживанием вершины (2) и параболической (3) временной формы: 1 — $\tau_0/\tau = 0,5$; 2 — $\tau_0/\tau = 0,1$, $\tau_1/\tau = 0,9$

при использовании параболической временной формы — во временном интервале $0 < t \leq \frac{3}{4}\tau$. Графики временных зависимостей скоростей нагрева поверхности, задаваемых выражениями (6), (11) и (13), приведены на рис. 6. Видно, что только для гладкой функции $\varphi(t)$, задаваемой (10), функция $\frac{dT(0,t)}{dt}$, задаваемая (13), не имеет разрывов во всем временном интервале $0 \leq t \leq \tau$.

Сопоставительный анализ временных зависимостей скоростей нагрева (см. рис. 3 и 4), а также достигаемых при этом температур поверхности [1] показывает, что нагрев с большими скоростями, но до меньших температур обеспечивает использование лазерных импульсов с крутым передним фронтом. Симметричные им импульсы с пологим передним фронтом нагревают поверхность с меньшими скоростями, но до больших температур. Вследствие этого импульсы с крутым передним фронтом наиболее эффективно могут быть использованы при решении технологических задач лазерной закалки с формированием на поверхности структур, характеризующихся высокой степенью неравновесности, импульсы же с пологим передним фронтом — при разработке лазерных технологий легирования поверхности, глубокой сварки.

Таким образом, из анализа полученных результатов следует, что эффективное решение технологических задач, в основе которых лежит использование импульсного лазерного излучения, во многом определяется успешным решением задачи управления временной формой лазерного импульса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуреев Г.Д., Гуреев Д.М. Влияние временной формы лазерного импульса на характер изменения температуры поверхности на стадии нагрева // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2008. — № 1(16). — С. 130–135.

Поступила в редакцию 15/X/2008;
в окончательном варианте — 19/I/2009.

MSC: 82D35

COMPARATIVE ANALYSIS OF SPEEDS OF SURFACE HEATING BY LASER IMPULSES OF DIFFERENT TEMPORAL FORM

G. D. Gureev, D. M. Gureev

Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100.

E-mail: anton_gureev@samaradom.ru

Comparative analysis of heating speeds depending on a laser influence time was done on the basis of the one-measured linear model of a half-endless medium surface heated by the laser impulses of different temporal forms. Preferences of typical temporal forms of laser impulses for optimal realization of the laser technological processes of a surface modification were revealed.

Key words: surface laser modification, laser pulse temporal form, laser heating rate.

Original article submitted 15/X/2008;
revision submitted 19/I/2009.

Gureev Gleb Dmitrievich, Student, Dept. of General Physics.

Gureev Dmitriy Mikhailovich, Dr. Sci. (Phys. & Math.), Prof., Dept. of General Physics.