Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Г. Д. Гуреев, Д. М. Гуреев, К вопросу о зависимости глубины зоны импульсной лазерной закалки от временной формы импульса, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2009, выпуск 2(), 284–287

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu681>

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: 3.85.183.62

26 апреля 2023 г., 04:32:17

УДК 621.373.826

К ВОПРОСУ О ЗАВИСИМОСТИ ГЛУБИНЫ ЗОНЫ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ ОТ ВРЕМЕННОЙ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА

Г. Д. Гуреев, Д. М. Гуреев

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

E-mail: anton_gureev@samaradom.ru

В одномерном линейном приближении для случая равномерного распределения плотности мощности лазерного излучения по пятну фокусировки и треугольной временной формы лазерного импульса выявлена закономерность изменения глубины зоны лазерной закалки с изменением крутизны переднего фронта импульса.

Ключевые слова: импульсная лазерная закалка, треугольная временная форма лазерного импульса, глубина закаленной зоны.

Для формирования в материале с определенными оптическими и теплофизическими характеристиками закаленного слоя заданной толщины с помощью импульсного лазерного воздействия выбор параметров излучения в основном основан на использовании решения одномерного линейного уравнения теплопроводности в приближении полубесконечной среды, постоянства плотности мощности лазерного излучения в пределах пятна фокусировки и прямоугольной временной формы лазерного импульса [1]:

$$T(z, t) = \frac{2q(1-R)\sqrt{at}}{\lambda} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right), \quad (1)$$

где 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; z и t — текущие координата и время в пределах длительности лазерного импульса τ ;

$$\operatorname{ierfc}(x) = \frac{\exp(-x^2)}{\sqrt{\pi}} - x + x \operatorname{erf}(x), \quad \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy$$

— функция интеграла вероятности.

Одномерность задачи для полубесконечной среды и постоянство плотности мощности лазерного излучения в пределах пятна фокусировки реализуются экспериментально. Приближение же прямоугольной временной формы лазерного импульса является весьма условным, однако в совокупности с приближением линейности задачи и использованием соответствующих аппроксимаций позволяет с хорошей достоверностью предсказывать экспериментальные результаты [1, 2]. Тем не менее реальная временная форма лазерного импульса далека от прямоугольной, и в ряде случаев её можно аппроксимировать треугольной временной формой:

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

Глеб Дмитриевич Гуреев, студент. Дмитрий Михайлович Гуреев (д.ф.-м.н., проф.), профессор, каф. общей физики и физики нефтегазового производства.

где временной параметр τ_0 характеризует крутизну переднего фронта импульса, $\varphi_1(\tau_0) = \varphi_2(\tau_0)$. Прямоугольной форме в пределах $0 \leq t \leq \tau$ соответствует функция $\varphi(t) = 1$. С целью корректного сопоставительного анализа выражение (2) получено исходя из того, что вне зависимости от функционального вида временной формы лазерного импульса энергия излучения в импульсе остается величиной постоянной. Последнее соответствует условию:

$$\int_0^\tau \varphi(t) dt = \tau$$

при прочих равных параметрах лазерного воздействия и оптических и теплофизических характеристиках материала.

Для треугольной временной формы лазерного импульса (2) решение одномерного линейного уравнения теплопроводности в приближении полубесконечной среды и постоянства плотности мощности лазерного излучения в пределах пятна фокусировки имеет вид [3]:

$$T(z, t) = \begin{cases} T_1(z, t) = \frac{2}{3} \frac{t\sqrt{t}}{\tau_0\sqrt{\tau}} \left[3\sqrt{\pi} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{z^2}{4at} \right) \operatorname{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right) - \exp \left(-\frac{z^2}{4at} \right) \right] T_0, & 0 \leq t \leq \tau_0, \\ T_2(z, t) = T_1(z, \tau_0) + \frac{2}{3} \frac{(t-\tau_0)\sqrt{t-\tau_0}}{(\tau-\tau_0)\sqrt{\tau}} \left[\exp \left(-\frac{z^2}{4a(t-\tau_0)} \right) + 3\sqrt{\pi} \left(\frac{\tau-t}{t-\tau_0} - \frac{2}{3} \frac{z^2}{4a(t-\tau_0)} \right) \operatorname{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau_0)}} \right) \right] T_0, & \tau_0 \leq t \leq \tau, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$T_0 = T_0(0, \tau) = \frac{2q(1-R)\sqrt{a\tau}}{\lambda\sqrt{\pi}}.$$

Определение глубины зоны лазерной закалки из выражения (3) связано с решением обратной задачи при $T(z_h, t) = T_2(z_h, t) = A_{c1}$, где z_h — глубина зоны лазерной закалки, $A_{c1} = 727^\circ\text{C}$ — температура фазового α - γ -превращения в стали, $T_0 = 1240^\circ\text{C}$ (задаётся произвольно для численного сопоставительного анализа). Решение обратной задачи представляет собой достаточно трудоёмкий процесс. Намного предпочтительней иметь дело с выражением, связывающим простой аналитической зависимостью непосредственно глубину зоны лазерной закалки с характерными параметрами временной формы лазерного импульса.

Предварительный анализ выражения (3) показывает, что на начальной (линейно возрастающей) стадии действия лазерного импульса закалка не может быть реализована вплоть до $\tau_{0m} = \left(\frac{3}{4} \frac{A_{c1}}{T_0} \right)^2 \tau$, т. к. при этом даже на поверхности не достигается температура A_{c1} . В данном случае достижение на поверхности температуры A_{c1} происходит на последующей (линейно убывающей) стадии действия лазерного импульса. Минимальное время t_m от начала действия лазерного импульса, в течение которого на поверхности достигается температура A_{c1} , определяется из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \left[3(\tau - \tau_0) - 2(t_m - \tau_0) \right] \sqrt{t_m - \tau_0} &= \left(\frac{3}{2} \frac{A_{c1}}{T_0} \sqrt{\tau} - 2\sqrt{\tau_0} \right) (\tau - \tau_0) \quad \text{при } \tau_0 < \tau_{0m}, \\ t_m &= \left(\frac{3}{4} \frac{A_{c1}}{T_0} \tau_0 \sqrt{\tau} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{при } \tau_0 \geq \tau_{0m}. \end{aligned}$$

На рис. 1 показаны характерные зависимости приведенной глубины $z_* = \frac{z_h}{2\sqrt{a\tau}}$ зоны импульсной лазерной закалки от времени в течение действия лазерного импульса для прямоугольной (1) и треугольной с $\tau_0 = 0$ (2) и $\tau_0 = \tau$ (3) его временных форм. В этих зависимостях обращает на себя внимание то, что максимально достигаемые значения глубин зон импульсной лазерной закалки z_{hm} и соответственно z_{*m}

коррелируют с максимально достигаемыми значениями температур нагрева поверхности [3]:

$$T_m = \frac{4}{3} \left(\sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}} + \sqrt{\frac{\tau - \tau_0}{2\tau}} \right) T_0.$$

Вместе с тем для $\tau_0 = 0$ значение z_{hm} достигается позже, чем соответствующее значение T_m , приходящееся на время [3]:

$$t_{Tm} = \frac{\tau + \tau_0}{2} = \frac{\tau}{2}.$$

Следует отметить, что при $\tau_0 \geq \frac{\tau}{2}$ значения z_{hm} приходятся на времена, превышающие длительность лазерного импульса τ , и поэтому ограничиваются последней.

На рис. 2 и 3 приведены зависимости z_* и $t_* = \frac{t_m}{\tau}$ — приведённого минимального времени нагрева поверхности до температуры A_{c1} от T_m и τ_0 . Сопоставление показывает, что на характер зависимостей $z_*(T_m)$ и $z_*(\tau_0)$ существенное влияние оказывают соответственно зависимости $t_*(T_m)$ и $t_*(\tau_0)$. Сплошным линиям на рис. 2 и 3 представлены результаты расчёта на основании полученных нами эмпирических соотношений между z_* и T_m и между z_* и τ_0 , которые

Рис. 1. Зависимости приведённой глубины зоны импульсной лазерной заделки от времени в течение действия лазерного импульса для его прямоугольной (1) и треугольной (2 — $\tau_0/\tau = 0$, 3 — $\tau_0/\tau = 1$) временных форм

Рис. 2. Зависимость приведённой глубины зоны лазерной заделки (1, 2) и приведённого минимального времени нагрева поверхности до температуры A_{c1} (3, 4) от максимальной температуры нагрева поверхности в течении действия лазерного импульса треугольной формы; 2 и 4 соответствуют кривым 1–3 рис. 1

Рис. 3. Зависимости приведённой глубины зоны лазерной заделки (1) и приведённого минимального времени нагрева поверхности до температуры A_{c1} (3) от временного параметра, характеризующего крутизну переднего фронта лазерного импульса треугольной временной формы; 2 и 4 — приведённая глубина зоны лазерной заделки и приведённое минимальное время нагрева поверхности до температуры A_{c1} импульсами прямоугольной временной формы

выглядят следующим образом:

$$z_* = k \left(\frac{T_m}{T_0} - l \right)^2 + m, \quad (4)$$

$$z_* = k \left[\frac{4}{3} \left(\sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}} + \sqrt{\frac{\tau - \tau_0}{2\tau}} \right) - l \right]^2 + m. \quad (5)$$

Для расчётов в соотношениях (4) и (5) использовались значения $k = 0,386$, $l = 1,241$, $m = 0,254$.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены простые эмпирические соотношения для прогнозирования глубины зоны лазерной закалки импульсами треугольной временной формы, которые позволяют существенно упростить инженерные расчёты и из которых следует, что наибольшее предпочтение в лазерных технологических процессах с использованием импульсных лазеров следует отдавать лазерам, генерирующим импульсы с пологим передним фронтом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуреев Д. М., Ямищиков С. В. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов. — Самара: СамГУ, 2001. — 393 с.
2. Гуреев Г. Д., Гуреев Д. М. К вопросу о прогнозировании глубины зоны лазерной закалки // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2008. — № 2(17). — С. 271–274.
3. 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 19/II/2009;
в окончательном варианте — 26/VII/2009.

MSC: 82D35

TO THE QUESTION OF DEPENDENCE OF PULSE LASER HARDENING ZONE DEPTH ON PULSE TEMPORAL FORM

G. D. Gureev, D. M. Gureev

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

E-mail: anton_gureev@samaradom.ru

The regularity of a change of a laser hardening zone depth with a change of a pulse front steepness was exposed in the one-measured linear approximation for the even distribution of a laser radiation power density on a focal spot and for the triangular temporal form of a laser pulse.

Key words: pulse laser hardening, triangular temporal form of laser pulse, hardened zone depth.

Original article submitted 19/II/2009;
revision submitted 26/VII/2009.

Gleb D. Gureev, Student. *Dmitriy M. Gureev* (Dr. Sci. (Phys. & Math.)), Professor, Dept. of General Physics.