

УДК 621.373.826

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ЭНЕРГОВКЛАДА И ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ТЕРМОУПРОЧНЕНИИ ШИРОКИМ ПЯТНОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Рыжикова Д.А., Умнов В.П.

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), Владимир, e-mail: mex-rob@yandex.ru

Лазерная обработка является современной наукоемкой технологией, во многом определяющей производственный уровень промышленных предприятий. Лазерная закалка поверхности деталей становится доминирующей операцией их термической обработки. С целью обеспечения высокой производительности процесса целесообразно реализовать широкую дорожку лазерного упрочнения в направлении относительного перемещения луча и объекта обработки. Необходимым условием получения высоких эксплуатационных характеристик деталей при лазерной закалке является обеспечение высокой равномерности теплового воздействия на упрочняемую зону при нагреве и охлаждении и, следовательно, равномерности толщины упрочнённого слоя и его свойств как по ширине дорожки лазерного упрочнения, так и в направлении относительного перемещения луча и детали при движении по произвольной траектории в процессе обработки. Исходя из экспоненциального характера изменения температурных процессов по периферии лазерного пятна на поверхности детали получены зависимости для требуемой плотности мощности излучения, обеспечивающей ее квазиравномерный нагрев. Из условия равномерности нагрева приведен практический пример распределения мощности излучения, которое реализовано в многолучевом лазере с неравномерным расположением излучателей. Для обеспечения формирования в поверхностном слое структуры мартенсита после нагрева предложено осуществлять дополнительное непрерывное охлаждение обрабатываемой поверхности жидкостью, подаваемой с помощью совокупности трубок непосредственно на участок поверхности, температура нагрева которого находится в интервале $A_{C1}^{init}-A_{C1}^{con}$. Расположение участков следует определять предварительно путем моделирования.

Ключевые слова: лазерная закалка, плотность мощности излучения, равномерность нагрева, многолучевой лазер, упрочняемая зона, дорожка лазерного излучения

ENSURING THE UNIVERSAL ENERGY OF THE ENERGY INJECTION AND THERMAL CYCLE UNDER LASER THERMAL-STRENGTHENING BY WIDE BLACK LIGHT

Ryzhikova D.A., Umnov V.P.

The Federal State budgetary educational institution of higher professional education «Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs» (VISU), Vladimir, e-mail: mex-rob@yandex.ru

Laser processing belongs to the high technologies defining level of production in industrialized countries. One Laser processing is a modern high-tech technology, which largely determines the production level of industrial enterprises. Laser hardening of the surface of parts becomes the dominant operation of their heat treatment. In order to ensure high productivity of the process, it is advisable to implement a wide laser hardening track in the direction of the relative movement of the beam and the processing object. A necessary condition for obtaining high performance characteristics of parts during laser hardening is to ensure a high uniformity of thermal effects on the hardened zone during heating and cooling and, consequently, uniform thickness of the hardened layer and its properties both across the width of the laser hardening path and in the direction of relative movement of the beam and part. when moving along an arbitrary path during processing. Based on the exponential nature of the change in temperature processes along the periphery of the laser spot on the surface of the part, dependences are obtained for the required radiation power density, which ensures its quasi uniform heating. From the condition of uniformity of heating, a practical example is given of the distribution of the radiation power, which is implemented in a multipath laser with an uneven arrangement of emitters. To ensure the formation of martensite in the surface layer after heating, it has been proposed to carry out additional continuous cooling of the surface to be treated with liquid supplied by means of a set of tubes directly to a surface area whose heating temperature is in the range $AC1_{init}-AC1_{con}$. The location of the plots should be determined by modeling.

Keywords: laser training, radiation power density, uniformity of heating, the multiband laser, the strengthened zone, a path of laser radiation

Сравнительная качественная оценка различных способов упрочнения с использованием нагрева (токами высокой частоты, электронным лучом, печной, лазерное) позволяет отметить следующие основные преимущества лазерной термообработки основными из которых являются [1, 2]:

– возможна локальная термообработка избранных участков поверхности детали

в том числе в местах, недоступных при других методах обработки;

– деталь практически не деформируется и не требуется выполнения операции восстановления геометрической формы и размеров;

– ввиду высокой скорости нагрева (до 10^4-10^5 град/с и выше) существенно изменяется (по сравнению с другими методами) начало изотермических процессов кинети-

ки фазовых переходов α -железа в γ -железо в сторону значительного (до 300 °С) повышения температур;

– высокая скорость охлаждения (до 10^5 град/с и выше) подавляет процесс выделения карбидов по границам зерен аустенита в перлитном интервале температур.

Высокопроизводительную лазерную закалку осуществляют непрерывными и импульсными однолучевыми или многолучевыми лазерами в расходящемся пучке диаметром до 10 мм и выше, либо с высокочастотным сканированием луча поперек направления относительного движения детали и пятна излучения на ее поверхности (при перемещении луча только по прямым линиям). Одним из качественных показателей процесса является равномерность толщины закаленного слоя. Обеспечение высокой равномерности толщины закаленного слоя при лазерной закалке широким пятном излучения является важной и актуальной задачей, имеющей практическое значение.

В общем случае распределение плотности мощности излучения по сечению луча на поверхности обрабатываемой детали является распределением Гаусса [3]. Поэтому форма прогреваемого объема материала и поперечное сечение закаленной зоны при воздействии широким лучом на дорожке упрочнения будут иметь вид сегмента. Стремление реализовать равномерную плотность мощности в супергауссовом луче или луче прямоугольной формы также не обеспечивает равномерную толщину закаленного слоя на дорожке упрочнения ввиду различных условий теплоотвода в центральной части и по краям дорожки упрочнения. Кроме этого различные условия теплоотвода не позволяют получить высокую равномерность термического цикла при естественном охлаждении. Поэтому целью статьи является разработка предложений по обеспечению высокой равномерности теплового воздействия на упрочняемую зону при нагреве и охлаждении и, следовательно, равномерности толщины упрочнённого слоя и его свойств как поперек дорожки лазерного упрочнения, так и в направлении относительного перемещения луча и детали при движении по произвольной траектории в процессе обработки с широким пятном излучения.

Материалы и методы исследования

Считая лазерный нагрев широким лучом плоским, температуру на поверхности дорожки упрочнения можно определить по выражению [4]:

$$T_s = 2Aq_s \pi^{-0.5} \lambda^{-1} \sqrt{\alpha \tau}. \quad (1)$$

Здесь A – эффективный коэффициент поглощения энергии лазерного излучения материалом детали; q_s – плотность потока мощности на поверхности детали; α – коэффициент теплопроводности

материала; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; τ – длительность лазерного воздействия. При использовании одного широкого луча Гауссова функция распределения плотности мощности $\varphi(r)$ на поверхности детали имеет вид

$$\varphi(r) = \exp(-2r^2 r_0^{-2}), \quad (2)$$

где r_0 – радиус луча на уровне e^{-2} , r – текущий радиус.

На основании зависимости (2) выражение (1) запишется в виде

$$T_s = 2Aq_{\max} \pi^{-0.5} \lambda^{-1} \sqrt{\alpha \tau} \exp[-2(x^2 + y^2)r_0^{-2}], \quad (3)$$

где q_{\max} – плотность мощности в центре луча.

Потребуем, чтобы в пределах поперечного сечения луча температура нагрева поверхности была равна требуемой температуре закалки:

$$T_s = T_{\text{hard}} = 2Aq_{\max} \pi^{-0.5} \lambda^{-1} \sqrt{\alpha \tau}. \quad (4)$$

Тогда для выполнения условия (4) потребуется дополнительная температура

$$\Delta T_s = T_{\text{hard}} \left\{ 1 - \exp[-2(x^2 + y^2)r_0^{-2}] \right\}. \quad (5)$$

Максимальную величину температуры дополнительного нагрева можно определить по выражению

$$\Delta T_{\max} = T_{\text{hard}} \left[1 - 2Aq_{\max} \sqrt{\alpha \tau} \lambda^{-1} \exp(0,5)^{-1} \right]. \quad (6)$$

Тогда, полагая, что термоупрочнение детали производится в режиме предоплава поверхности, дополнительную плотность мощности на рассматриваемом участке можно определить по выражению

$$\Delta q_s = \Delta T_s \lambda A^{-1} \left[0,25\pi(\alpha \tau)^{-1} \right]^{0.5}. \quad (7)$$

Исходя из того, что процесс лазерной закалки происходит в режиме предоплава, с учетом выражения (7) для стали 38ХНЗМФА с использованием пакета Mathcad выполнен расчёт распределения на поверхности обработки мощности 5 кВт по пятну диаметром 8 мм при расчетной температура нагрева поверхности равна 1640 К. Требуемое распределение мощности лазерного излучения в пятне по ширине дорожки определено по зависимости

$$P = (q_{\max} + \Delta q_s) s^*. \quad (8)$$

Здесь s^* – единица площади поверхности детали под пятном излучения. На рис. 1 представлены результаты расчета (кривая 1) на радиусе 4 мм пятна излучения. Прямая 3 соответствует $q_s = q_{\max}$.

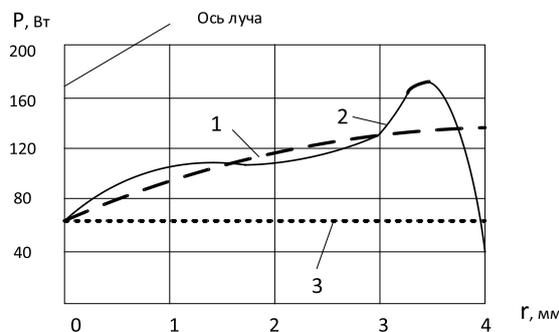


Рис. 1. Распределение мощности по сечению пятна излучения

Исходя из того, что участок кривой 1 вблизи границы луча практически не реализуем, для решения поставленной задачи методом планирования эксперимента подобран многолучевой (48 лучевой) лазер [5], обеспечивающий близкое к требуемому распределение мощности по пятну излучения в произвольном направлении. На рис. 2 приведено относительное расположение излучателей, размещенных внутри окружности 1 диаметром 100 мм.

Излучатели расположены на трех окружностях (24 на внешней окружности 2, 12 на средней окружности 3 и 12 на внутренней окружности 4). Предложенное расположение излучателей позволяет получить квазистационарное распределение мощности излучения на поверхности обрабатываемой детали при движении в произвольном направлении. Распределение мощности по сечению пятна излучения в предложенном лазере – кривая 2 на рис. 1.

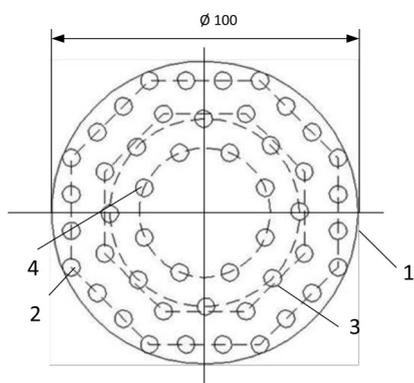


Рис. 2. Схема расположения излучателей в многолучевом лазере

На рис. 3 приведены изотермы модели нагрева стали 38ХНЗМФА лазерным лучом предложенного лазера с диаметром пятна 8 мм в сечении по диаметру луча, полученной с помощью пакета COMSOL. Из рассмотрения рис. 3 следует, что температура на поверхности детали и в приповерхностном слое, а также толщина упрочненного слоя (1,5 мм) имеют стационарный характер.

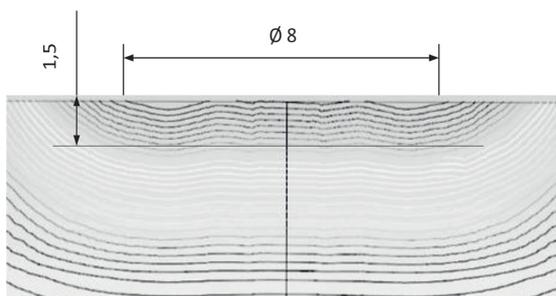


Рис. 3. Изотермы модели нагрева стали 38ХНЗМФА лучом многолучевого лазера

В таблице приведены результаты закалки стали различных марок многолучевым лазером с предложенной схемой расположения излучателей. Анализ микрошлифов показал, что неравномерность глубины упрочненного слоя не превышает 7%.

Результаты закалки стали различных марок многолучевым лазером с предложенной схемой расположения излучателей

Марка стали	Твердость поверхности, HRC	Глубина упрочненного слоя, мм
40Х	60–62	1,1
50ХН	55–58	1
38ХНЗМФА	54–56	1,5
ОХНЗМ	50–52	1,4
ШХ15	60–64	1,4
18ХГТ	40–44	1,3

Несмотря на стремление получить высокую равномерность теплового воздействия на упрочняемую зону условия естественного охлаждения как по ширине дорожки лазерного упрочнения, так и в направлении относительного движения луча и детали будут различными вследствие различных условий теплоотвода. Это не позволит получить высокую равномерность свойств упрочненного слоя и скорость охлаждения выше критической [6] по всей ширине дорожки упрочнения. На рис. 4 приведен вид температурного поля (изотермы) модели нагрева поверхности образца из малоуглеродистой стали лазерным лучом многолучевого лазера комплекса ЛК-5В (ООО «ТермоЛазер») мощностью 5 кВт, перемещающимся со скоростью $V = 10$ мм/с при ширине дорожки упрочнения 10 мм. Параметры режимов охлаждения существенно зависят от геометрии детали и содержания углерода в данной марке стали. Следовательно, необходимо непрерывно вслед за движущимся лазерным лучом осуществлять управляемое охлаждение со скоростью выше критического значения с температуры нагрева в интервале $A_{C1}^{нач}-A_{C1}^{кон}$ до точки начального мартенситного превращения и замедленное охлаждение в зоне этого превращения (300–200 °С) с учетом формы изделия и содержания углерода в данной марке стали.

Такое ступенчатое охлаждение возможно путем подачи в зону нагрева вслед за движущимся лазерным лучом управляемого потока охлаждающей среды. При широкой дорожке упрочнения расстояния от зоны температуры нагрева поверхности в интервале $A_{C1}^{нач}-A_{C1}^{кон}$ (нагрев под полную закалку) до центра лазерного пятна по краям дорожки и в ее центре вследствие различных условий теплоотвода могут значительно отличаться (до величины соизмеримой с размерами лазерного пятна). При этом величины указанных расстояний и их соотношение существенно зависят от геометрии обрабатываемого изделия и содержания углерода в данной марке стали. Для обеспечения формирования в поверхностном слое структуры мартенсита после нагрева необходимо осуществлять дополнительное непрерывное охлаждение обрабатываемой поверхности охлаждающей жидкостью, подаваемой непосредственно на участок поверхности, температура нагрева которого находится в интервале $A_{C1}^{нач}-A_{C1}^{кон}$. Это можно выполнить с помощью совокупности трубок подачи хладагента. На рис. 5 приведена примерная схема расположения трубок над участком нагретой поверхности под полную закалку, имеющем температуру нагрева в интервале $A_{C1}^{нач}-A_{C1}^{кон}$. Положение участка следует определять для каждого объекта перед его обработкой натурным экспериментом с использованием тепловизионной матрицы или машинным экспериментом с учетом марки стали и геометрии объекта, например, с помощью пакета моделирования физических процессов COMSOL.

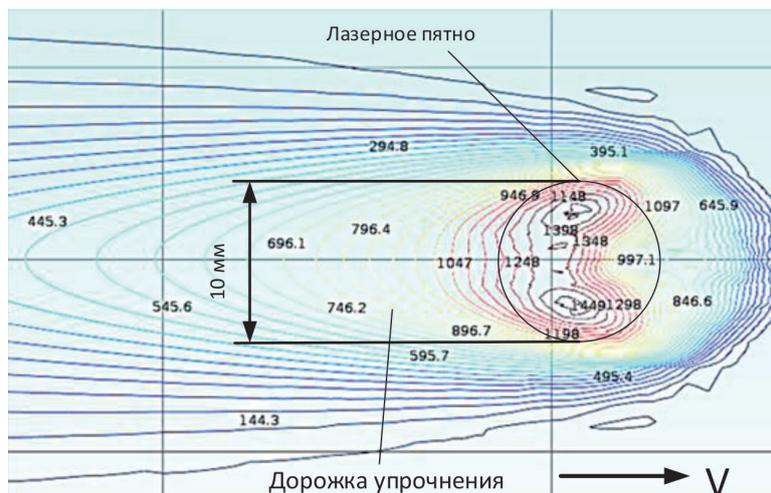


Рис. 4. Вид температурного поля модели нагрева поверхности образца из малоуглеродистой стали лазерным лучом многолучевого лазера

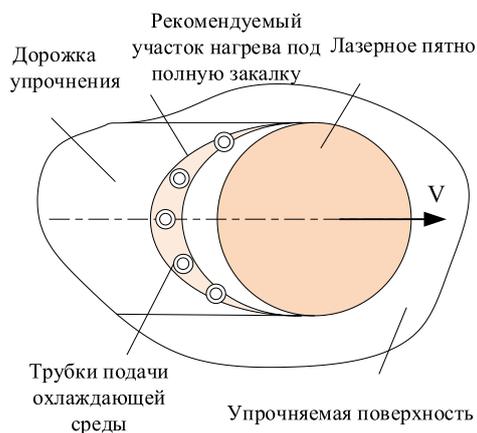


Рис. 5. Примерная схема расположения трубок над участком нагретой поверхности под полную закалку

Трубки следует выполнять с возможностью регулирования расхода охлаждающей жидкости через каждую из них и с возможностью изменения их взаимного положения по направлению относительного движения лазерного луча и объекта обработки.

Результаты исследования и их обсуждение

Из условия постоянства температуры нагрева поверхности детали широким пятном лазерного излучения получены зависимости квазистационарного распределения его плотности мощности. Методом планирования эксперимента найдена необходимая компоновка лазера, состоящего из 48 излучателей, позволяющая обеспечивать равномерность толщины упрочняемого слоя при движении в произвольном направлении.

Для обеспечения формирования в поверхностном слое структуры мартенсита после нагрева предложено осуществлять дополнительное управляемое охлаждение обрабатываемой поверхности. При таком способе охлаждения нагретой поверхности может осуществляться быстрое охлаждение в интервале температур 750–300 °С и медленное охлаждение выше и главным образом ниже этого интервала для получения скорости охлаждения выше критической для достижения мартенситной структуры нагреваемого слоя в сталях, повышения прокаливаемости металла и выравнивания температурного фронта охлаждения в направлении, ортогональном направлению движения луча при минимальных внутренних остаточных напряжениях.

Выводы

1. Получены зависимости для распределения требуемой плотности мощности излучения на поверхности обрабатываемой детали, обеспечивающей ее квази равномерный нагрев.
2. Предложено устройство многолучевого лазера, обеспечивающее необходимое квазиравномерное распределение плотности мощности излучения и равномерности упрочненного слоя взаимным расположением излучателей.
3. Для обеспечения формирования в поверхностном слое структуры мартенсита после нагрева предложено осуществлять дополнительное непрерывное охлаждение обрабатываемой поверхности жидкостью, подаваемой с помощью совокупности тру-

бок непосредственно на участок поверхности, температура нагрева которого находится в интервале $A_{C1}^{нач} - A_{C1}^{кон}$.

Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология: В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки. М.: Высшая школа, 1987. 191 с.

2. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. М., 2009. 664 с.

3. Каспаров В.М., Райцин А.М., Улановский М.В. Методы идентификации пространственных распределений интенсивности лазерных пучков // Измерительная техника. 2016. № 10. С. 39–42.

4. Лосев В.Ф., Морозова Е.Ю., Ципилев В.П. Физические основы лазерной обработки материалов. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 199 с.

5. Патент № 2580350, Россия, С21D 1/09, Способ упрочнения поверхности детали / Югов В.И., Мальцев В.В., Рыжикова Д.А., Шишкин Е.С., Старостин Д.А. 10.04.2016.

6. Кушнер В.С., Негров Д.А., Бургонова О.Ю., Схиртладзе В.А., Верещака А.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учеб. для студентов вузов / Под ред. В.С. Кушнера. Омск: Изд-во Ом ГТУ, 2012. 447 с.