

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.9

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>

Поступила в редакцию 20.10.2017

Received 20.10.2017

О. Г. Девойно¹, В. В. Жарский², А. П. Пилипчук³¹*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*²*ООО «Рухсервомотор», Минск, Беларусь*³*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНИРУЮЩЕГО ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Аннотация. Показана возможность управления температурными полями в процессе сканирующей лазерной обработки оптоволоконным лазером. Разработана математическая модель процесса закалки сканирующим лазерным излучением при возвратно-поступательном движении лазерного луча и поступательном движении детали. Выполнен расчет температурного поля, возникающего при лазерной закалке с постоянной мощностью и с изменением мощности лазерного излучения в зависимости от положения лазерного луча при его относительном перемещении. В результате математического моделирования процесса лазерной закалки при изменении мощности лазерного излучения в зависимости от положения лазерного луча установлено, что применение сканирующей системы с программно-изменяемой мощностью излучения позволяет снизить на 25 % энергетические затраты с сохранением заданной геометрии зоны упрочнения. Представлены результаты лазерной закалки поверхности стали 45 на газовом лазере 1,2 кВт и технологической установке на базе оптоволоконного лазера мощностью до 2 кВт, оснащенной сканирующей системой. За показатель производительности был принят объем закаленного материала в единицу времени. Анализ полученных результатов показывает, что использование излучения оптоволоконного лазера обеспечивает повышение производительности закалки в 3–5 раз по сравнению с применением излучения CO₂-лазера той же мощности. Полученный эффект объясняется изменением условий взаимодействия излучения с поверхностью металла при изменении длины волны излучения, а также изменением баланса распределения тепла в зоне воздействия лазерного луча. С учетом более высокого КПД энергоэффективность использования оптоволоконных лазеров для поверхностного упрочнения в 9–15 раз выше, чем при использовании CO₂-лазеров.

Ключевые слова: лазер, мощность лазерного излучения, лазерная закалка, сканирующая система, математическая модель, температурное поле

Для цитирования. Девойно, О. Г. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>

O. G. Devoino¹, V. V. Zarski², A. P. Pilipchuk³¹*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*²*LTD “Ruchservomotor”, Minsk, Republic of Belarus*³*Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

SIMULATION OF SURFACE HARDENING USING A FIBER-OPTIC LASER SCANNING

Abstract. An analysis of process of scanning laser processing is made. The possibility of use of program and changeable power of a laser radiation in the course of scanning is shown. A mathematical model of process of training is developed by the scanning laser radiation. The model considers parameters of reciprocation of a laser beam and headway of a detail. Calculation of the temperature profile arising at laser training with a constant power and with change of power of a laser radiation depending on the provision of a laser beam at its relative movement is executed. Implementation of laser training with a program and changeable power of radiation in the course of scanning allows lowering a metabolic cost by 25 % with preservation of the given geometry of a zone of hardening. Results of laser training of a surface of steel 45 with the gas laser and the process unit on the basis of the fiber-optic laser with power up to 2 kW are presented. The volume, hardened in unit of time, was taken for an indicator of efficiency. Use of radiation of the fiber-optic laser provides increase in efficiency of training by 3–5 times in comparison with use of radiation of CO₂ laser of the same power. The gained effect is explained by change of conditions of interaction of radiation with the surface of metal at change by an order of a radiation wavelength and also by change of balance distribution of heat in a zone of influence of a laser beam. Taking into account higher efficiency of fiber-optic lasers in comparison with gas, the energy efficiency of use of fiber-optic lasers for the surface strengthening is 9–15 times higher than when using CO₂ lasers.

Keywords: laser, laser power, laser hardening, scanning system, mathematical model, temperature

For citation. Devoino O. G., Zarski V. V., Pilipchuk A. P. Simulation of surface hardening using a fiber-optic laser scanning. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 435–443 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>

Введение. В настоящее время перспективным методом поверхностной обработки деталей является лазерная закалка, позволяющая реализовывать процесс сверхскоростной термической обработки поверхностного слоя без объемного разогрева. Стимулирующим фактором развития лазерной технологии стало появление на рынке лазерной техники мощных твердотельных лазеров с более высоким суммарным уровнем технико-экономических показателей по сравнению с CO_2 -лазерами, в частности оптоволоконных лазеров. Важной особенностью твердотельных лазеров является то, что излучение с длиной волны порядка 1 мкм лучше взаимодействует с поверхностью металлов по сравнению с излучением CO_2 -лазеров.

Актуальной проблемой, сдерживающей использование лазерных технологий, является обеспечение поверхностной термообработки с гарантированным отсутствием подплавления поверхностного слоя. Высокое качество поверхности может быть достигнуто использованием сканирующей системы, которая обеспечивает многократное перемещение лазерного луча по зоне нагрева с высокой частотой и создает за время термического цикла закалки так называемое псевдо-пятно – в среднем равномерный тепловой источник на поверхности образца. Перемещение луча по произвольному контуру можно обеспечить применением системы двух зеркал, согласованно совершающих колебания во взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 1, *a*). На рис. 1, *b* представлена реализованная схема управления распределением энергии по сечению области лазерного воздействия (псевдо-пятно), формируемого при сканирующей обработке с использованием двух дефлекторов. Программно заложена возможность симметричного изменения мощности в боковых зонах области лазерного воздействия, а также произвольного изменения в передней и задней его частях.

В настоящее время получены результаты [1–4], подтверждающие перспективность применения сканирующей лазерной обработки для повышения качества поверхности. Также отмечена важность решения задачи обеспечения равномерной глубины упрочненного слоя и распределения свойств упрочненной зоны по глубине. Одним из способов решения поставленной задачи является управление температурными полями в процессе сканирующей лазерной обработки

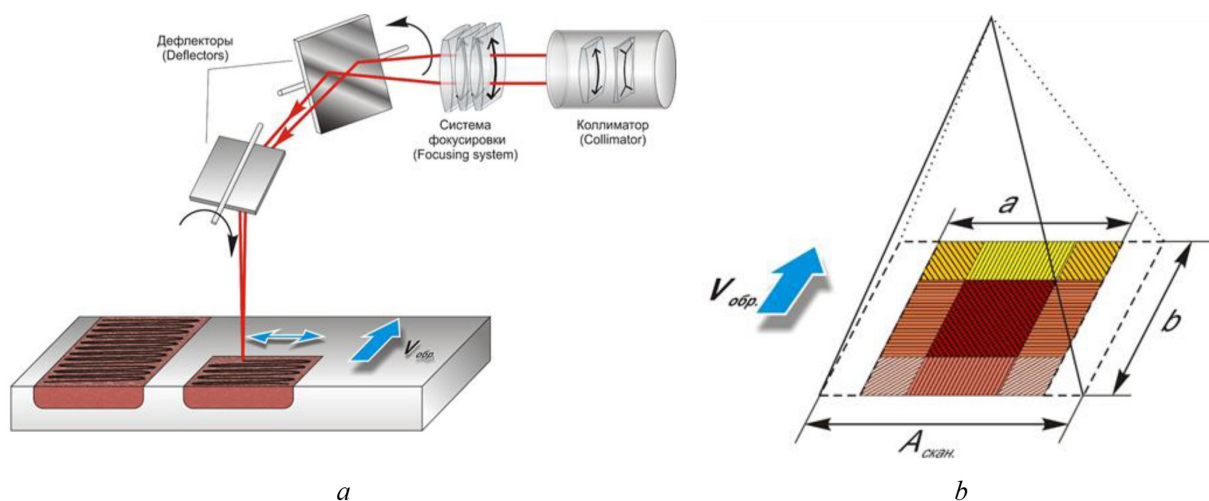


Рис. 1. Оптическая система для реализации лазерной поверхностной закалки сканирующим излучением (*a*) и схема управления распределением энергии по сечению области лазерного воздействия (*b*)

Fig. 1. Optical system for the implementation of laser surface quenching by scanning radiation (*a*) and a control scheme for the distribution of energy over the cross section of area of laser effect (*b*)

оптоволоконным лазером. Оценке возможности реализации данного способа посвящена настоящая работа.

Анализ процесса лазерной закалки. Исследование представленной схемы сканирования показывает, что основной зоной нестабильности тепловых полей являются периферийные участки зоны, где протекают два энергетических процесса: увеличение теплоотвода за счет краевого эффекта и увеличение количества подводимой энергии за счет уменьшения скоростей перемещения лазерного луча при изменении направления. На рис. 2 представлен внешний вид упрочненной дорожки первичного вала, полученной при проведении лазерной закалки с использованием сканирующей обработки. Границы участка с проплавлением поверхности соответствуют области максимальной плотности энергии, то есть геометрическому месту точек, где скорость луча минимальна. В граничных зонах происходит проплавление металла, что подтверждает определяющее значение эффекта увеличения количества подводимой энергии за счет уменьшения скоростей перемещения лазерного луча. Увеличение частоты сканирования приводит к уменьшению размеров зон проплава на периферии зоны, что свидетельствует об изменении баланса энергии между первым и вторым процессами теплового баланса в периферийной зоне. Таким образом, обеспечение стабильного качества упрочненного слоя при лазерной обработке со сканированием возможно в результате изменения мощности излучения по определенной программе в процессе сканирования, что и было реализовано в оптической системе, показанной на рис. 1, а.

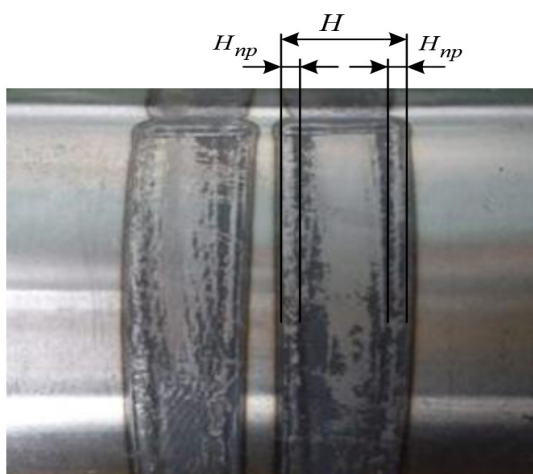


Рис. 2. Внешний вид поверхности закалки сканирующим лазерным излучением

Fig. 2. Appearance of the hardening surface by scanning laser radiation

На рис. 3 представлен пример программы, реализующей последовательность импульсов технологического лазерного комплекса производства ООО «Рухсервомотор», что подтверждает возможность практического осуществления лазерной закалки оптоволоконным лазером с программно-изменяемой мощностью излучения. Возможным положительным эффектом использования данного подхода может быть снижение общих энергетических затрат за счет уменьшения мощности излучения в периферийных зонах.

Для реализации закалки оптоволоконным лазером с программно-изменяемой мощностью излучения был осуществлен выбор параметров сканирования на основе компьютерного моделирования процесса лазерной обработки. В качестве базовых тепловых моделей использовали известные решения тепловых задач [5, 6], где методами компьютерного моделирования рассчитаны температурные поля на полубесконечной металлической поверхности при воздействии движущегося лазерного луча, а также приведено решение задачи теплопроводности методом источников при дуговой сварке пластин. При разработке модели процесса закалки сканирующим лазерным излучением принято следующее упрощение: лазерный луч совершает возвратно-поступательное движение перпендикулярно оси дорожки со скоростью $\vec{V}_{отн.}$, деталь переме-

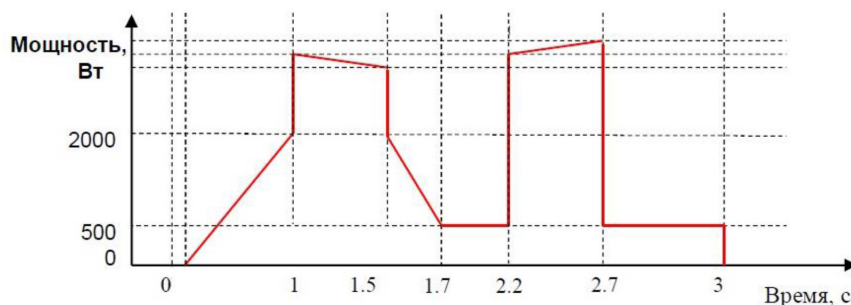


Рис. 3. Пример лазерной программы технологического лазера
 Fig. 3. Example of laser program of technology laser

щается поступательно с постоянной скоростью $\bar{V}_{пер.} = a$. С учетом принятых допущений расчетная схема заковки сканирующим лазерным излучением представлена на рис. 4.

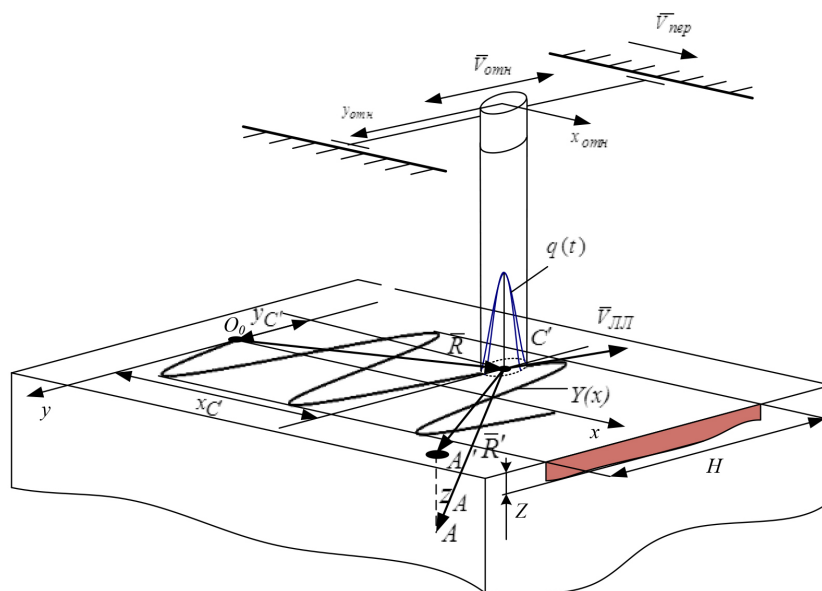


Рис. 4. Расчетная схема заковки сканирующим лазерным лучом
 Fig. 4. Calculation scheme for quenching by a scanning laser beam

Учитывая, что в крайних точках $\pm H/2$ при изменении направления движения лазерного луча скорость $V_{отн.} = 0$, для описания движения лазерного луча примем $V_{отн.} = V_{max} \cos \omega t$ (ω – частота сканирования).

$$Y_{отн.}(t) = \frac{V_{max}}{\omega} \sin \omega t, \quad X_{отн.}(t) = 0; \tag{1}$$

$$Y_{пер.}(t) = 0, \quad X_{пер.}(t) = at. \tag{2}$$

Тогда закон движения лазерного луча в параметрической форме может быть записан в виде [7]

$$Y(t) = Y_{отн.}(t) + Y_{пер.}(t); \tag{3}$$

$$X(t) = X_{отн.}(t) + X_{пер.}(t). \tag{4}$$

Уравнение траектории имеет вид

$$Y(x) = \frac{V_{\max}}{\omega} \sin\left(\frac{\omega x}{a}\right). \quad (5)$$

При разработке математической модели использовано аналитическое решение задачи теплопроводности в линейной постановке при линейных граничных условиях в случае воздействия высококонцентрированного источника энергии, имеющего немонотонный характер распределения интенсивности [7]. Это решение описывает распространение тепла при нагреве полубесконечного тела нормально-круговым источником, движущимся прямолинейно. Для данного источника поверхностная плотность поглощенной мощности представлена выражением

$$q(x, y) = q_0 \exp\left(-k(x^2 + y^2)\right), \quad (6)$$

где q_0 – максимальное значение интенсивности в центре источника; k – параметр, определяющий ширину пучка (коэффициент сосредоточенности). Значения данных параметров рассчитываются в соответствии с методикой [7].

Для определения температурного поля при произвольном законе движения лазерного луча в параметрической форме (3), (4) получено выражение

$$T(x, y, z, t) = \frac{Aq_0\sqrt{a}}{\lambda\sqrt{\pi}} \times \int_0^t \frac{1}{\sqrt{(t-\tau) \cdot (1+4ka(t-\tau))}} \cdot \exp\left\{\left(\frac{z^2}{4a(t-\tau)} + \frac{k \cdot ((x-X(\tau))^2 + (y-Y(\tau))^2)}{1+4ka(t-\tau)}\right)\right\} d\tau. \quad (7)$$

Формула (7) описывает процесс нагрева полубесконечного тела при воздействии поверхностного нормально-кругового источника и является хорошим теоретическим приближением реального температурного поля, формируемого движущимся по произвольной траектории лазерным лучом. Данная формула справедлива при любых значениях входящих в нее параметров и, в соответствии с (6), учитывает неравномерность плотности мощности излучения по сечению лазерного луча [8].

Разработанная модель была использована для расчета температурного поля, возникающего при лазерной закалке с изменением мощности лазерного излучения, в зависимости от положения лазерного луча при его относительном перемещении. В данной постановке минимальное значение выходной мощности P_{\min} обеспечивается в периферийной зоне (рис. 5). На траектории луча маркерами отмечены точки, в которых определялась глубина проникновения изотермы, соответствующей температуре закалки.

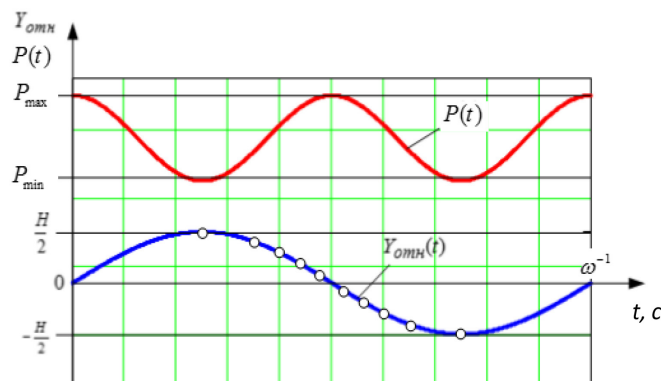


Рис. 5. Изменение мощности лазерного излучения в зависимости от положения лазерного луча при его относительном перемещении

Fig. 5. Change in the power of laser radiation as a function of the position of the laser beam with its relative displacement

Результаты исследования. С использованием разработанной модели нами проанализировано влияние параметров лазерного излучения на температурное поле при поверхностной лазерной закалке на установке ВЛ-1.0 со сканированием луча по ширине H упрочняемой зоны. Параметры обработки были следующие: диаметр лазерного луча $d = 1$ мм, амплитуда колебаний $H = 10$ мм. Определено температурное поле для трех случаев: источник постоянной мощности $P(t) = P_{\max} = 1$ кВт, два источника переменной мощности (рис. 5), для которых $\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 2$ и $\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 10$.

В результате расчета определено температурное поле $T(x, y, z, t)$ в изготовленной из стали 45 детали, которое возникает при движении лазерного луча, имеющего гауссово распределение интенсивности. На рис. 6 показаны температурные поля, соответствующие положению лазерного луча в различные моменты времени. На рис. 6, *a* представлены результаты расчета температурного поля в периферийной зоне при лазерной закалке источником постоянной мощности; на рис. 6, *b* и *c* – температурные поля в периферийной зоне при реализации программно-изменяемой мощности. Сравнение результатов рис. 6, *a–c* с результатом расчета температурного поля в центре дорожки на рис. 6, *d* показывает, что уменьшение мощности излучения в периферийной зоне в 2 раза способствует формированию более равномерного температурного поля.

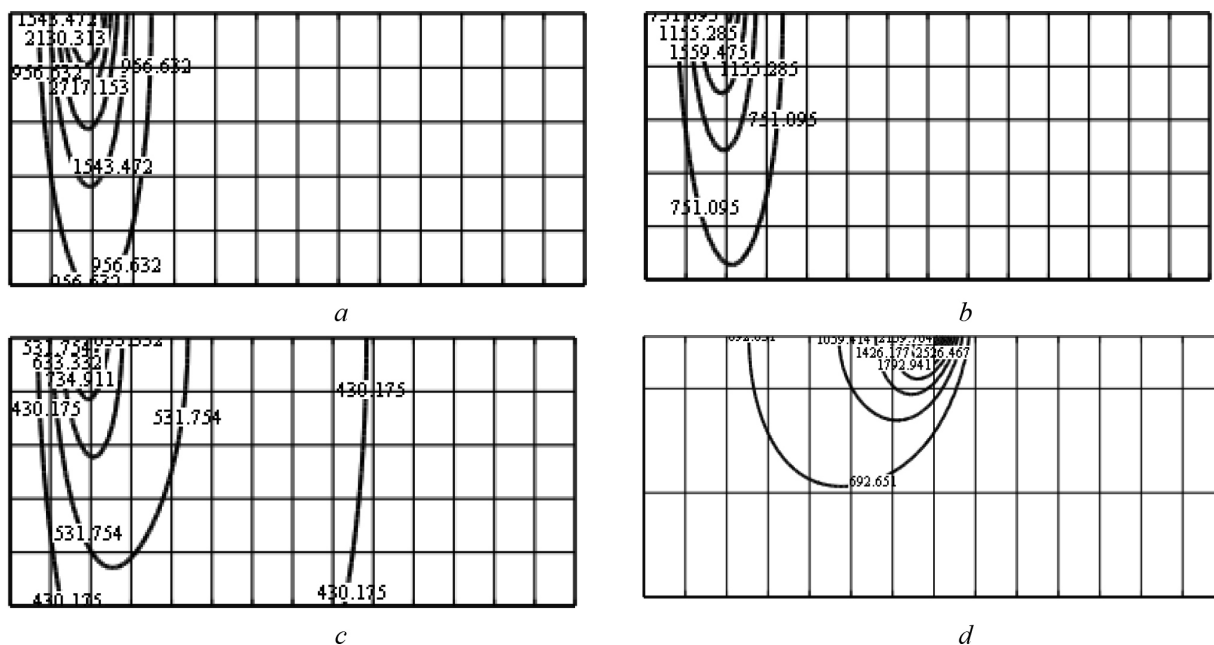


Рис. 6. Температурное поле в плоскости yOz при положении лазерного луча в точке y и мощности P : $a - y = -H/2$,

$$P = P_{\max}; b - y = -H/2, \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 2; c - y = -H/2, \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 10; d - y = 0, P = P_{\max}$$

Fig. 6. Temperature field in the yOz plane with the position of the laser beam at the point y and the power P : $a - y = -H/2$,

$$P = P_{\max}; b - y = -H/2, \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 2; c - y = -H/2, \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 10; d - y = 0, P = P_{\max}$$

На рис. 7 представлены результаты расчета границы зоны закалки, за которую было принято положение изотермы, соответствующее температуре закалки для данного материала при лазерной сканирующей обработке для источника постоянной мощности $P(t) = P_{\max}$ (кривая 1), источников переменной мощности, для которых $\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 2$ (кривая 2) и $\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 10$ (кривая 3).

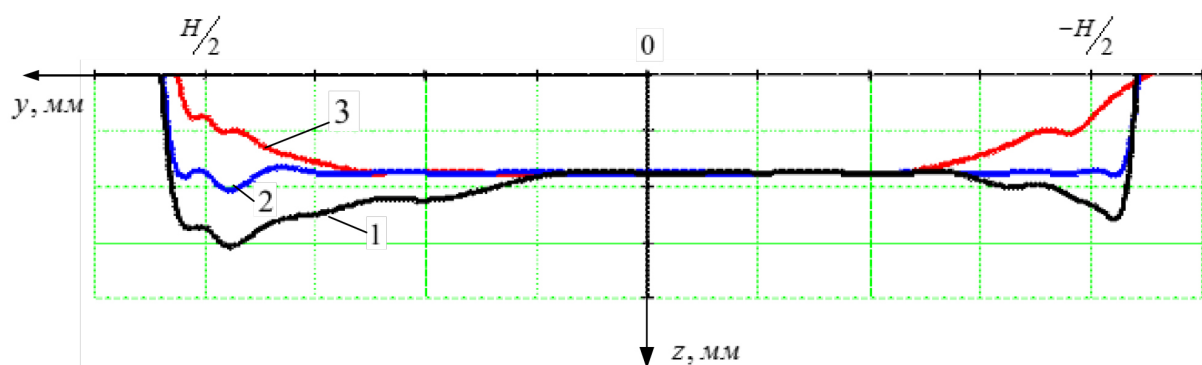


Рис. 7. Границы зон закалки в плоскости yOz : 1 – $P = P_{\max}$, 2 – $\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 2$, 3 – $\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 10$

Fig. 7. Borders of hardening zones in the yOz plane: 1 – $P = P_{\max}$, 2 – $\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 2$, 3 – $\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 10$

Представленные результаты показывают, что изменение мощности лазерного луча в процессе сканирования позволяет достаточно эффективно влиять на температурные поля. Сравнение форм представленных изотерм позволяет сделать вывод, что при сканирующей лазерной закалке излучением постоянной мощности (кривая 1) в периферийных зонах возможно подплавление поверхности, что подтверждают результаты рис. 2. Реализация лазерной закалки оптоволоконным лазером с программно-изменяемой мощностью излучения позволяет обеспечить более равномерную глубину упрочненного слоя (кривая 2). Для оценки эффективности реализации лазерной закалки оптоволоконным лазером с программно-изменяемой мощностью излучения выполнено сравнение энергетических затрат при сканирующей лазерной закалке излучением постоянной и переменной мощности с соотношением $\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 2$. При оценке поглощенной энергии W за время T действия источника использовалось определение мощности излучения как потока энергии или скорости изменения энергии во времени [9]:

$$W = \int_0^T P(t) dt.$$

В качестве показателя эффективности выбрано отношение поглощенной энергии при сканирующей лазерной закалке излучением постоянной мощности $W_{\text{пост.}}$ к поглощенной энергии при сканирующей лазерной закалке излучением переменной мощности $W_{\text{пер.}}$:

$$\eta = \frac{|W_{\text{пост.}} - W_{\text{пер.}}|}{W_{\text{пер.}}} \cdot 100 \%$$

Для анализируемого случая сканирующей лазерной закалки излучением постоянной мощности $P = 1$ кВт и переменной мощности с соотношением $\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 2$ при условии, что начальная и конечная точки находятся в одной фазе, получено значение $\eta = 25 \%$. Таким образом, применение сканирующей системы с программно-изменяемой мощностью излучения позволяет снизить энергетические затраты с сохранением заданной геометрии зоны упрочнения.

Использование для процессов лазерной обработки металлов волоконных лазеров имеет очевидное преимущество вследствие более коротких длин волн излучения по сравнению с CO_2 -лазерами, что улучшает взаимодействие лазерного излучения с поверхностью. Для оценки

эффективности применения излучения оптоволоконного лазера нами проведены эксперименты по определению производительности лазерной обработки. На разных режимах проводили лазерную закалку поверхности стали 45 на технологической установке на базе оптоволоконного лазера мощностью до 2 кВт, оснащенной описанной выше сканирующей системой. Обработку выполняли прямоугольным псевдо-пятном шириной 8 мм и глубиной 1 мм. Для сравнения поверхностную закалку осуществляли на газовом лазере с мощностью излучения 1,2 кВт, диаметр круглого пятна составлял 3,2 мм. В качестве поглощающего покрытия использовали черную гуашь. На поперечном шлифе определяли размеры зоны закалки. За показатель производительности был принят объем закаленного материала в единицу времени. Как видно из полученных результатов (рис. 8), использование излучения оптоволоконного лазера обеспечивает повышение производительности закалки в 3–5 раз по сравнению с применением излучения CO_2 -лазера той же мощности.

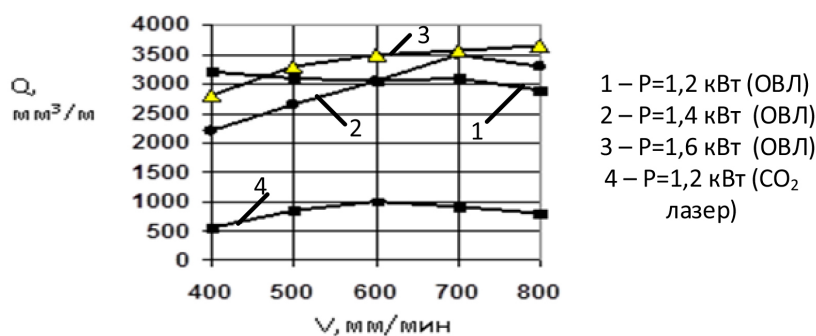


Рис. 8. Влияние скорости перемещения лазерного луча на производительность лазерной закалки

Fig. 8. Effect of the speed of the laser beam on laser hardening performance

Полученный эффект объясняется изменением условий взаимодействия излучения с поверхностью металла при изменении на порядок длины волны излучения оптоволоконного лазера, а также изменением баланса распределения тепла в зоне воздействия лазерного луча. Несомненно, полученный результат требует отдельных исследований. Из анализа полученных данных также видно, что при мощности излучения 1,2 кВт производительность обработки выше, чем при более высоких значениях мощности. Причиной данного эффекта могут быть затраты тепла на фазовые переходы при подплавлении поверхностного слоя, а также увеличение поглощения излучения за счет появления паров металла в плазменном облаке. Учитывая, что КПД оптоволоконных лазеров практически в 3 раза выше газовых лазеров, получаем, что энергоэффективность использования оптоволоконных лазеров для поверхностного упрочнения в 9–15 раз выше, чем при использовании CO_2 -лазеров.

Выводы. В результате математического моделирования процесса лазерной закалки при изменении мощности лазерного излучения в зависимости от положения лазерного луча установлено, что применение сканирующей системы с программно-изменяемой мощностью излучения позволяет снизить на 25 % энергетические затраты с сохранением заданной геометрии зоны упрочнения.

При исследовании производительности лазерной закалки получено, что энергоэффективность использования оптоволоконных лазеров в 9–15 раз выше, чем при использовании CO_2 -лазеров.

Список использованных источников

1. Югов, В. И. Высокоэффективная технология ресурсосбережения: лазерная поверхностная обработка / В. Югов // Фотоника. – 2012. – № 4. – С. 13–20.
2. Бирюков, В. П. Модификация поверхности с помощью лазерного излучения / В. П. Бирюков // Фотоника. – 2010. – № 3. – С. 18–21.
3. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В. Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.

4. Бирюков, В. П. Изменение структуры и свойств сталей при лазерном упрочнении / В. П. Бирюков // Фотоника. – 2012. – № 3. – С. 22–26.
5. Манако, В. В. Методика оценки размеров зоны закалки при обработке движущимся лучом лазера / В. В. Манако, В. А. Путилин // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 5. – С. 23–28.
6. Иванов, С. Ю. Моделирование тепловых процессов при сварке соединений с криволинейными швами / С. Ю. Иванов, В. А. Кархин, В. Г. Михайлов // Изв. ТулГУ. Техн. науки. – 2015. – Вып. 6, ч. 2. – С. 62–66.
7. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
8. Манако, В. В. Аналитическое решение задачи нагрева образца движущимся лучом лазера / В. В. Манако, В. А. Путилин // Вестн. СамГТУ. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2009. – № 1 (18). – С. 206–213.
9. Хирд, Г. Измерение лазерных параметров / Г. Хирд. – М.: Мир, 1970. – 540 с.

References

1. Yugov V. I. High cost-effective use of resources technology: laser surface treatment. *Fotonika = Photonics*, 2012, no. 4, pp. 13–20 (in Russian).
2. Biryukov V. P. Modification of a surface by means of laser radiation. *Fotonika = Photonics*, 2010, no. 3, pp. 18–21 (in Russian).
3. Panchenko V. Ya., Golubev V. S., Vasil'tsov V. V., Galushkin M. G., Grezev A. N. *Laser Techniques of Handling of Materials: Modern Problems of Basic Researches and Application Workings out*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 664 p. (in Russian).
4. Biryukov V. P. Change of structure and properties of steels at laser hardening. *Fotonika = Photonics*, 2012, no. 3, pp. 22–26 (in Russian).
5. Manako V. V., Putilin V. A. Technique of an estimation of the sizes of a zone of quenching at handling by a moving ray of the laser. *Fizika i himiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2010, vol. 1, no. 5, pp. 23–28 (in Russian).
6. Ivanov S. Yu., Karkhin V. A., Mikhailov V. G. Simulation of thermal processes at welding of connections with curvilinear welds. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 62–66 (in Russian).
7. Rykalin N. N., Uglov A. A., Zuev I. V., Kokora A. N. *Laser and Electron Beam Handling of Materials*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 496 p. (in Russian).
8. Manako V. V., Putilin V. A. The analytical decision of a problem of heat of the sample a moving ray of the laser. *Vestnik Samarского gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki = Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2009, no. 1, pp. 206–213 (in Russian).
9. Heard H. G. *Laser Parameter Measurements*. N. Y., Wiley, 1968. 489 p.

Информация об авторах

Девойно Олег Георгиевич – доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией плазменных и лазерных технологий, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: scvdmmed@bntu.by

Жарский Владимир Владимирович – доктор технических наук, директор, ООО «Рухсервомотор» (ул. Монтажников, 5, 220019, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.jarski@ruchservomotor.com

Пилипчук Андрей Петрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vikmech@mail.ru

Information about the authors

Oleg G. Devoino – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Plasma and Laser Technologies Research Laboratory, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: scvdmmed@bntu.by

Vladimir V. Jarski – D. Sc. (Engineering), Director, LTD “Ruchservomotor” (5, Montazhnikov Str., 220019, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.jarski@ruchservomotor.com

Andrei P. Pilipchuk – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Mechanics, Academy of Military of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vikmech@mail.ru