ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ, 2024, том 15, № 1, с. 65–72

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 621.785.616.1

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ЛУЧОМ С МОДУЛЯЦИЕЙ МОЩНОСТИ

© 2024 г. В. Д. Воронов[a], *, Э. Д. Ишкиняев[a], В. Н. Петровский[a]

[a] *Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409 Россия*

**E-mail: voronovvaleriid@gmail.com*

Поступила в редакцию 28.06.2023 г.
После доработки 07.07.2023 г.
Принята к публикации 17.07.2023 г.

В данной работе разработан метод термической обработки деталей со сложным профилем поверхности быстро осциллирующим лазерным лучом с модулированной мощностью излучения. Данный способ является альтернативным методом динамического формирования распределения интенсивности лазерного пятна. Построена математическая модель расчета распределения интенсивности осциллирующего луча и температурных полей, индуцированных лазерным воздействием. Разработан алгоритм оптимизации параметров высокочастотных колебаний луча на основе решения обратной задачи теплопроводности для получения равномерного нагрева приповерхностного слоя материала.

Ключевые слова: лазерная закалка, теплопроводность, компьютерное моделирование, обратная задача теплопроводности, сканатор

DOI: 10.56304/S2079562923010311

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время лазерные источники излучения находят применение в различных областях металлообработки: термическая обработка, сварка, резка, наплавка и др. Одним из распространенных видов термообработки является лазерная закалка, которая применяется для повышения прочностных характеристик объектов. Контактные области деталей машин могут подвергаться значительным физическим нагрузкам, и для увеличения срока их эксплуатации применяют закалку [1]. Основными преимуществами процесса лазерной закалки по сравнению с традиционными методами объемной закалки являются скорость и точность процесса, возможность локальной закалки и отсутствие необходимости использования охлаждающей среды [2].

В большинстве современных стандартных лазерных системах излучение имеет гауссову форму распределения плотности мощности, что приводит к неравномерному нагреву зоны теплового воздействия и к ограниченности площади обработки за один проход из-за размеров лазерного пятна (порядок миллиметров). Для решения подобных проблем используется методика многопроходной обработки, где термоупрочнение поверхности происходит в несколько дорожек с перекрытием. Несмотря на возможность таким образом увеличить площадь обрабатываемой поверхности, данная процедура имеет существенные недостатки, а именно неравномерность глубины закалки и возникающие зоны разупрочнения вследствие повторного нагрева зон перекрытия, что приводит к потере однородности прочностных свойств в области обработки [3].

Одним из способов решения подобных проблем является преобразование гауссова распределения интенсивности при помощи различных оптических схем [4, 5]. При этом гауссово распределение преобразуется в требуемое для конкретной задачи путем изменения геометрического хода лучей. При помощи подобных оптических систем возможно произвести термическую обработку сложных геометрических поверхностей [6]. Одним из недостатков подобного метода является их привязанность к определенному применению и необходимость изменения конфигурации оптической системы в зависимости от задачи.

Перспективным методом является использование оптических систем, позволяющих проводить сканирование поверхности осциллирующим лазерным лучом. При частотах колебаний, при которых не происходит существенных изменений температуры в каждой точке области воздействия вследствие теплоотвода, подобная обработка аналогична воздействию статичным источником с соответствующим распределением интенсивно-

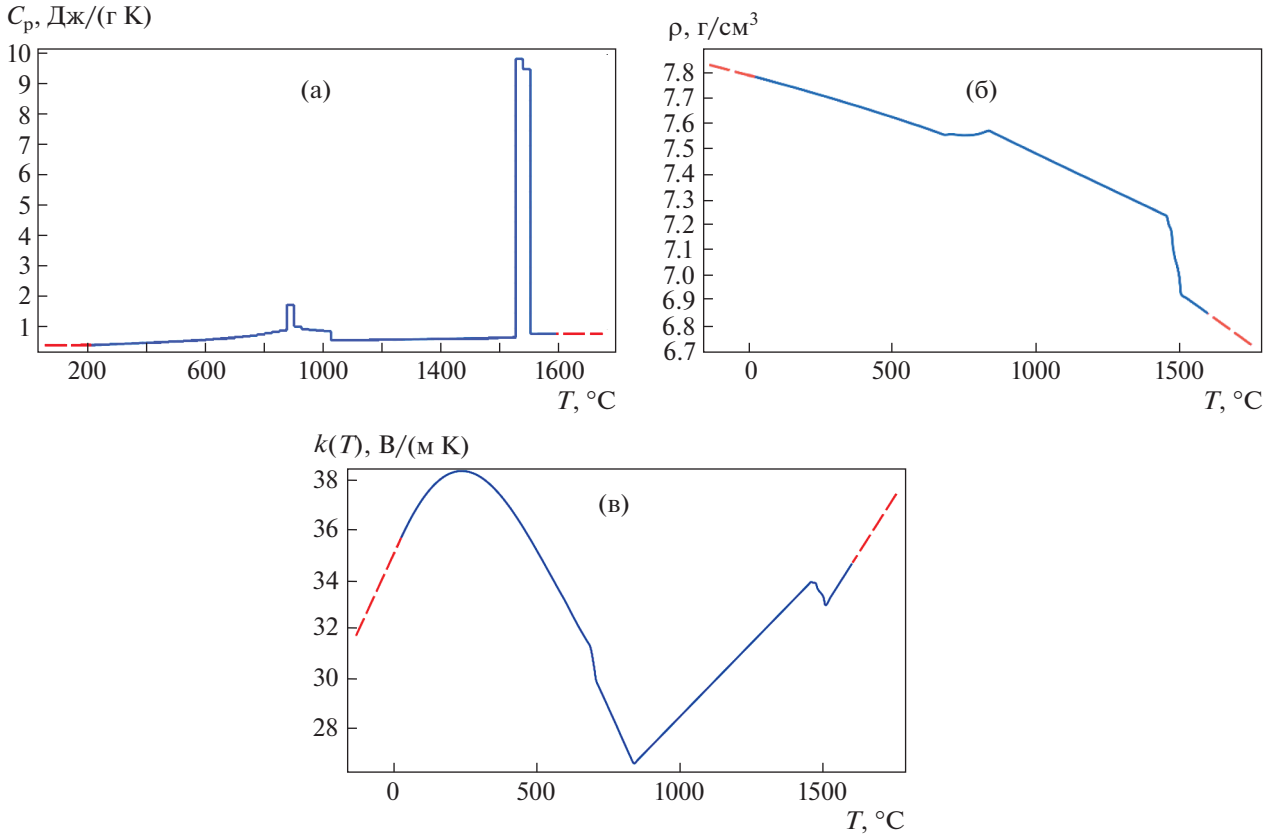

Рис. 1. Теплофизические свойства стали 09Г2С: (а) удельная теплоемкость, (б) плотность, (в) теплопроводность.

сти [7]. Изменение траектории, скорости движения луча, а также возможность модуляции мощности излучения за период колебаний луча позволяют создать интегральное распределение интенсивности практически любой формы, что делает подобную методику обработки крайне гибкой и легко подстраиваемой под любую задачу, в отличие от использования статических оптических систем.

В работе [8] были исследованы влияния различных траекторий осцилляции лазерного луча на формирование закалочной структуры. Было показано, что для достижения наиболее равномерной глубины зоны закалки плоских поверхностей необходимо задавать колебания луча с увеличенной подачей энергией на краях. Путем изменения траектории сканирования можно контроллировать подачу энергии в различных зонах обработки. Однако в случае неплоских поверхностей со сложным профилем не всегда получится создать равномерный нагрев только за счет изменения траектории колебаний. В таких случаях целесообразно производить сканирование с модуляцией мощности за период осцилляций. Это представляется возможным при использовании сканирующих систем, позволяющих изменять мощность излучения с высокой скоростью отклика (порядка миллисекунды). Так, в работе [9] представлен пример обработки поверхности со сквозным отверстием лучом, осциллирующим с высокой частотой. При этом была обеспечена равномерная глубина и твердость зоны закалки без образования признаков разрушения на краях отверстия.

Основной проблемой при обработке неровных поверхностей с изменением параметров (мощность, скорость движения) являются измерение температуры с временным разрешением, сопоставимым с частотой осцилляций луча и осуществление обратной связи с лазерной системой.

В качестве такого датчика может служить пирометр, установленный рядом с оптической головой, который позволяет определить температуру в заданной точке зоны обработки, и по полученным измерениям модулировать параметры лазерного луча непосредственно в процессе обработки [10]. Недостатком использования пирометра является то, что он осуществляет измерения только в небольшой области вокруг заданной точки.

Для контроля нагрева всей области обработки необходимо производить измерения температурных полей по всей зоне теплового воздействия. Одним из вариантов решения этой задачи является использование тепловизоров. В работе [11] было показано применение подобной системы для

Таблица 1. Химический состав материала

Марка	C, %	Si, %	Mn, %	S, %	P, %	Cr, %	Cu, %	As, %	Ni, %
09Г2С	0.12	0.5 – 0.8	1.3 – 1.7	до 0.04	до 0.035	до 0.3	до 0.3	до 0.08	до 0.3

нагрева плоской поверхности с переменной шириной зоны обработки. Подаваемая мощность излучения контролировалась согласно показаниям тепловизора.

Недостатками подобных систем обратной связи являются их высокая стоимость и сложность реализации. К тому же существует погрешность измерений, связанная с физическими принципами работы бесконтактных приборов измерения температуры на основе регистрации ИК-излучения, исходящего от поверхности.

В рамках данной работы предлагается альтернативный метод контроля параметров обработки, при котором используется предварительное моделирование процесса сканирования и по заданному конечному температурному распределению находится требуемая функция модуляции мощности. Реализация данной методики основана на решении обратной задачи теплопроводности, где по известному распределению температуры находится граничное условие поверхностного источника тепла при лазерном воздействии [12]. Решение подобной задачи производилось итерационным методом, где многократно решается прямая задача теплопроводности с изменением граничного условия на каждой итерации, пока не будет достигнут необходимый результат [13].

1. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Моделирование процесса поверхностной обработки колеблющимся лучом производилось в среде Comsol Multiphysics с использованием метода конечных элементов. В модели решалось нестационарное уравнение теплопроводности, результатом решения которого являются температурные поля во всей обрабатываемой детали в каждый момент времени.

1.1. Моделирование температурных полей

Распределение температурных полей в материале находилось путем решения уравнения Фурье:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k\nabla T) = Q, \qquad (1)$$

где C_p – удельная теплоемкость (Дж/кг К), ρ – плотность (кг/м^3), k – теплопроводность (Вт/м К), Q – энергия лазерного излучения.

Для однозначного решения задачи на нее должны быть наложены граничные и начальные условия. В рассматриваемой задаче лазерного нагрева условия были заданы следующим образом:

Начальная температура поверхности считается равной T_0:

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \qquad (2)$$

Граничные условия содержат в себе конвективный поток воздуха комнатной температуры и тепловое излучение, исходящее от обрабатываемой поверхности, а также источник лазерного излучения:

$$-\mathbf{n}\cdot\mathbf{q} = Q_L + h(T_{\text{ext}} - T) + \varepsilon\sigma\left(T_{\text{ext}}^4 - T^4\right), \qquad (3)$$

где h – коэффициент теплопередачи, T_{ext} – внешняя температура, ε – излучательная способность поверхности, σ – постоянная Стефано–Больцмана.

Лазерное излучение Q_L моделировалось как поверхностный источник тепла, движущийся по законам $x(t)$ и $y(t)$ с гауссовым распределением интенсивности:

$$Q_L = A(\lambda, T)\frac{2P}{\pi D(z)^2} \cdot \exp\left(-8\frac{(x - x_0 - x(t))^2 + (y - y_0 - y(t))^2}{D(z)^2}\right), \qquad (4)$$

где P – мощность излучения, $A(\lambda, T)$ – поглощающая способность материала, x_0, y_0 – начальные координаты обработки, $D(z)$ – диаметр пятна лазерного излучения. Чтобы учесть криволинейность поверхности, необходимо учитывать зависимость диаметра пятна лазерного излучения от расфокусировки. В данной работе диаметр пятна рассчитывался по следующей формуле:

$$D = D_f\left(1 + \left(\frac{\Delta H}{Z_r}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (5)$$

где D_f – диаметр пятна в фокусной плоскости, Z_r – рэлеевская длина, ΔH – величина расфокусировки.

1.2. Свойства материала

В работе использовалась низколегированная сталь марки 09Г2С. Выбор стали обоснован широкой распространенностью стали при изготовлении труб, элементов сварных металлоконструкций и др.

Свойства стали были заданы при помощи моделирования в программе JMat Pro, которая позволяет рассчитать теплофизические свойства материала на основе заданного химического состава.

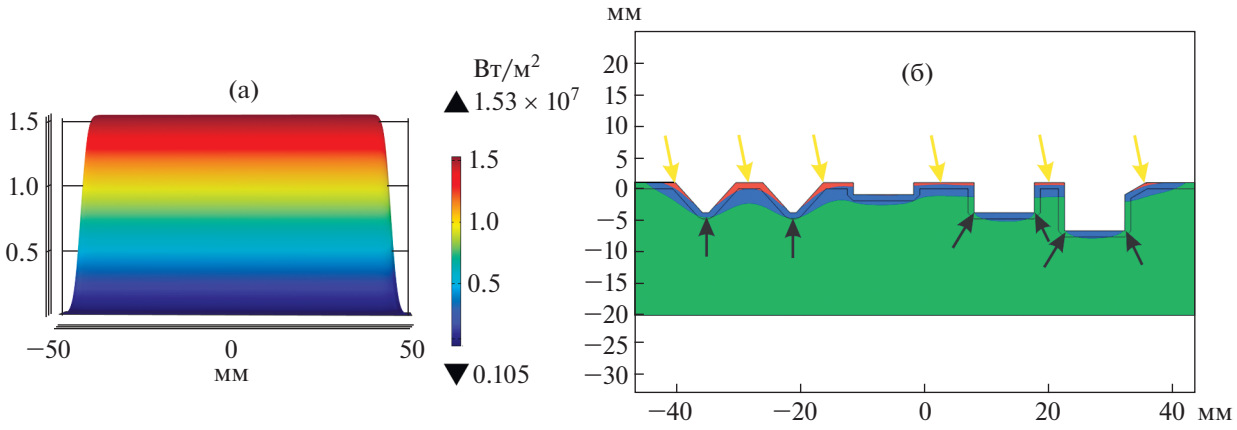

Рис. 2. Результат моделирования обработки с постоянной мощностью: (а) интегральная интенсивность, (б) поперечное сечение образца во время обработки (зеленый цвет – температура ниже 860°C, синий – выше 860°C, красный – выше 1500°C).

1.3. Аппроксимация интегральной интенсивности

Для ускорения расчетов использовалась методика аппроксимации быстро осциллирующего луча статическим с соответствующей интегральной интенсивностью, которая рассчитывается по формуле (6). Такая апроксимация возможна, если частота осцилляций составляет порядка десятков–сотен герц и при обработке создается равномерный тепловой фронт:

$$I(t_n,x,y,z)=\frac{1}{t_n}\int_0^{t_n}\frac{2P(t,x,y)}{\pi D(z)^2}\times \\ \times\exp\left(-8\frac{(x-x_0-x(t))^2+(y-y_0-y(t))^2}{D(z)^2}\right)dt, \quad (6)$$

где t_n – период осцилляции луча.

Данное распределение устанавливается как граничное условие нагрева вместо (4) с учетом поглощающей способности материала. Скорость движения источника устанавливается равной линейному движению оптической головы.

Обработка с постоянной мощностью, позволяет получить равномерно упрочненный слой на плоской поверхности. Однако при обработке криволинейных участках вследствие различного локального теплоотвода будет возникать перегрев (рис. 2).

По результатам моделирования выступы испытывают перегревы выше температуры плавления стали 09Г2С (рис. 2б, участки, показанные желтыми стрелками). Данные перегревы вызваны уменьшенным теплоотводом в подверженных областях из-за изменения объема материала. Недогрев по сравнению с остальной поверхностью в клиновидных вырезах, а также по краям впадин (рис. 2б, участки, показанные черными стрелками), вызваны уменьшенной плотностью мощности в данных участках, а также недостаточным нагревом прилежащих областей в случае резких перепадов поверхности. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о необходимости модифицирования профиля интенсивности при обработке подобных криволинейных поверхности для достижения равномерного температурного распределения в приповерхностной области.

1.4. Решение обратной задачи теплопроводности

Для получения равномерного нагрева поверхности целесообразно модулировать мощность излучения за период осцилляции. Подобрать функцию модуляции можно путем решения обратной задачи теплопроводности. При такой постановке входным параметром является распределение температуры на поверхности детали обработки, по которому необходимо восстановить граничное условие источника тепла. Задача решается итерационно, путем последовательного решения прямой задачи теплопроводности и корректирования модуляции мощности на каждой иттерации. Алгоритм представлен на рис. 3.

Изменение мощности излучения осуществляется путем разбиения исходной линии колебаний на несколько сегментов с заданными параметрами ее обработки, как показано на рис. 4. То есть определение функции модуляции сводится к нахождению мощности излучения на каждом элементе, что приведет к заданному температурному распределению.

Корректировка функции модуляции мощности производится по следующей формуле:

$$P(i+1)=P(i)\left(1+(T_{\text{req}}-T(i))/T_{\text{req}}\right), \quad (7)$$

где $P(i)$ – мощность на i-ой итерации, T_{req} – желаемая температура на обрабатываемой поверхно-

Рис. 3. Алгоритм решения обратной задачи теплопроводности.

сти, T – температура, полученная в результате расчета на i-ой итерации.

После выполнения данного алгоритма через 15 итераций была найдена оптимальная функция модуляции мощности. На рис. 5 представлена полученная интегральная интенсивность и результат рассчета температурных поле при подобной обработке. Требуемая темепература на поверхности была задана 1400°C, что составляет на 100°C меньше температуры плавления стали 09Г2С (1500°C).

На рис. 5б видно, что на всей поверхности обработки получен равномерный нагрев большей части поверхности до температуры ~1400°C. При этом зоны с различным теплоотводом вследствие изменения геометрии поверхности (рис. 5б, зоны, отмеченные желтыми стрелками), при решении обратной задачи перестали испытывать перегрев. Зоны с резким изменением геометрии, отмеченные черными стрелками, не удается нагреть до заданной температуры, так как для компенсации эффекта большого теплоотвода требуется варьировать мощность: увеличивать ее с одной стороны от указанных точек и уменьшать с другой стороны, чтобы избежать перегрева. Однако из-за больших размеров пятна (7 мм) невозможно одновременно реализовать оба этих подхода. Уменьшение размера лазерного пятна нецелесообразно, поскольку это приведет к значительному снижению глубины закалки.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

Экспериментальная обработка проводилась на установке, оборудованной высокомощным волоконным лазером до 10 кВт на длине волны 1070 нм производства IPG НТО “ИРЭ-Полюс” и сканирующей оптической системой IPG 2D High-power Scanner с рабочей областью 200 × 200 мм.

Закалка сканатором выполнялась при осцилляциях лазерного луча в направлении, поперечном направлению движения со скоростью 2300 мм/с и одновременном медленном перемещении оптической системы в продольном направлении со скоростью 2 мм/с. Мощность излучения при этом изменялась согласно закону, рассчитанному в построенной модели и варьировалась в диапазоне от 0 до 8.7 кВт. Диаметр пятна лазерного излучения составлял 7 мм, линии колебаний длиной 90 мм была разделена на участки длиной 1 мм для изменения мощности на каждом из них.

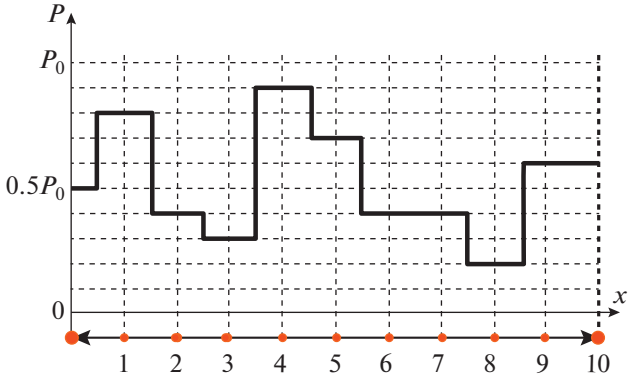

Рис. 4. Пример изменения мощности вдоль линии колебаний луча.

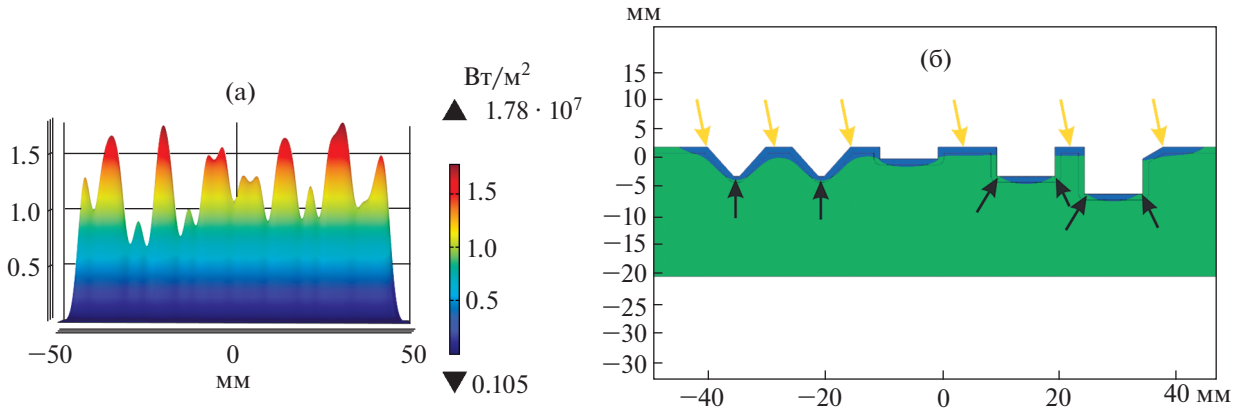

Рис. 5. Результат решения обратной задачи теплопроводности: (а) подобранная интегральная интенсивность, (б) поперечное сечение образца во время обработки (зеленый цвет – температура ниже 860°C, синий – выше 860°C и ниже 1500°C).

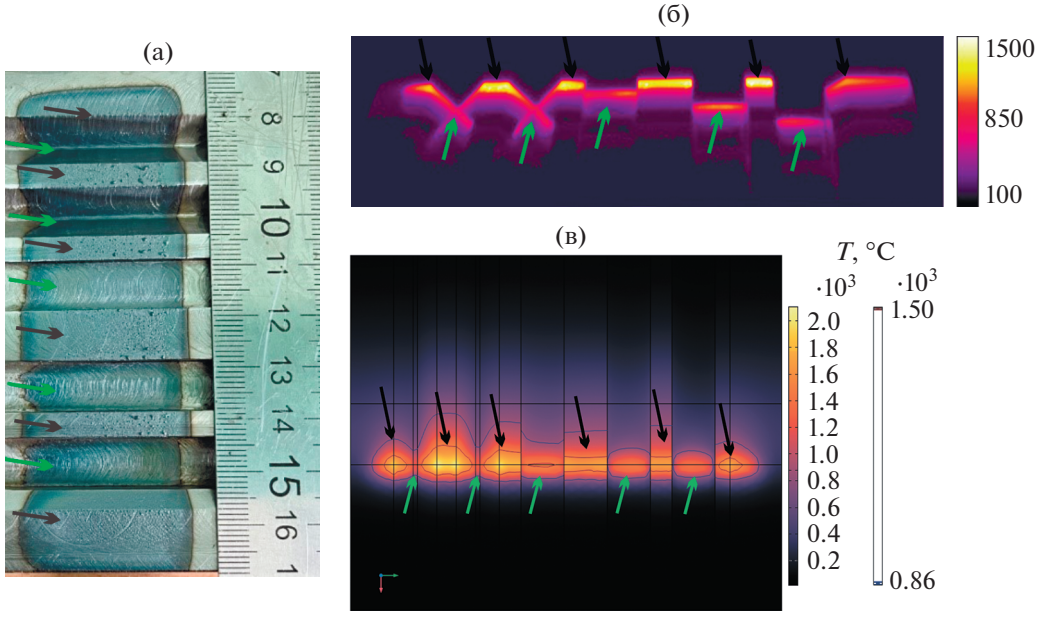

Рис. 6. Результат обработки неровной поверхности с постоянной мощностью излучения: (а) внешний вид, (б) показания тепловизора, (в) рассчитанное температурное поле на поверхности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

Сопоставление экспериментальных данных результатам моделирования производилось по температурным распределениям, измеренным в процессе обработки с использованием тепловизора FLIR 650SC с заданным коэффициентом излучения поверхности 0.35. Тепловизор позволяет измерить температуру поверхности по излучаемому ею тепловому излучению в ИК-спектре.

На рис. 6 показаны результаты обработки при постоянной мощности излучения.

При обработке с постоянной мощностью поверхности, обладающие уменьшенным теплоотводом, перегреваются, в результате чего на них появляется оплавление (рис. 6а и 6б, зоны, указанные черными стрелками). При этом участки, обладающие увеличенным теплоотводом (рис. 6а и 6б, зоны, указанные зелеными стрелками), нагреваются до меньших температур. Полученные данные согласуются с результатами моделирования (рис. 6в) и свидетельствуют о целесообразности модуляции функции мощности в процессе обработки. На рис. 7 показаны результаты обработки изделия с модуляцией мощности.

При обработке с модуляцией мощности излучения наблюдается установление более равномерного режима нагрева поверхности изделия.

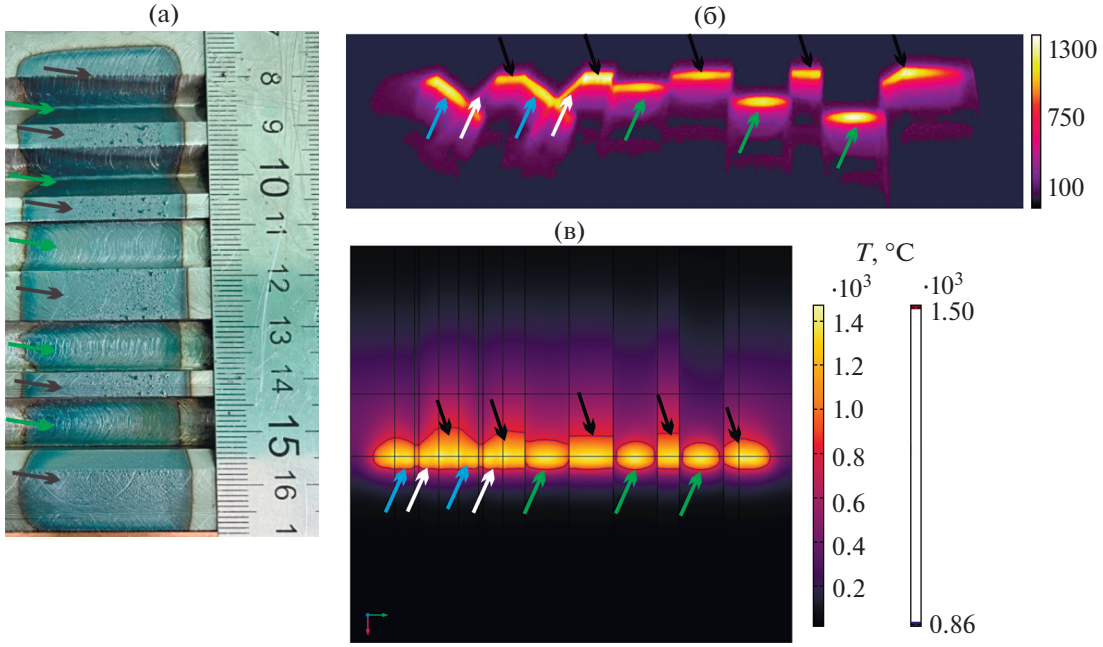

Рис. 7. Результат обработки неровной поверхности с переменной мощностью излучения: (а) внешний вид, (б) показания тепловизора, (в) рассчитанное температурное поле на поверхности.

Следует отметить, что в модели не учитывалось обратное отражение, а также ход луча (принималось, что луч падает на все участки поверхности обработки по нормали). Из-за этого наблюдается небольшие отклонения измеренных и рассчитанных значений температуры в наклонных участках поверхности (зоны, отмеченные голубыми и белыми стрелками). Тем не менее благодаря применению представленной в данной работе методики оптимизации параметров лазерной обработки удалось избежать значительного перегрева и недогрева различных областей неплоской поверхности посредством подбора функции модуляции мощности излучения за период осцилляции сканирующего луча.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведена разработанная методика лазерной термической обработки поверхностей с криволинейной формой колеблющимся лучом с модуляцией мощности излучения. Приведен алгоритм оптимизации параметров обработки на основе решения обратной задачи теплопроводности по нахождению неизвестного граничного условия воздействия по заданному температурному распределению на поверхности. По результатам построенной модели была произведена экспериментальная обработка поверхности с криволинейным профилем. При использовании модуляции мощности излучения за период осцилляций луча в соответствии с результатами моделирования, удалось произвести обработку изделия с равномерным температурным распределением на поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Pantelis D. I. et al.* // Surf. Coat. Technol. 2002. V. 161. (2–3). P. 125.
2. *A. Nath and S. Sarkar.* Laser Transformation Hardening of Steel. 2018. Oxford: Woodhead Publishing Ltd.
3. *Cordovilla F. et al.* // Mater Des. 2016. V. 102. P. 225.
4. *Klocke F., Schulz M., Grafe S.* // Coatings. 2017. V. 7 (6). P. 77.
5. *Vogt S. et al.* // J. Laser Appl. 2019. V. 31 (1). P. 012007.
6. *Bonss S. et al.* // Proc. SPIE. 2003. V. 4973. P. 86.
7. *Qiu F., Kujanpaa V.* // Surf. Eng. 2012. V. 28 (8). P. 569.
8. *Dewi H.S., Volpp J.* // J. Laser Appl. 2020. V. 32 (4). P. 042006.
9. *Sancho P. et al.* // J. Mater. Process. Technol. 2019. V. 263. P. 223.
10. *Martínez S. et al.* // Appl. Therm. Eng. 2016. V. 98. P. 49.
11. *Seifert M. et al.* // Proc. 2nd Pacific Intl. Conf. on Applications of Laser and Optics. 2006. P. 256.
12. *Voll A., Stollenwerk J., Loosen P.* // Proc. SPIE. 2016. V. 9741. P. 27.
13. *Тихонов А.Н. и др.* Численные методы решения некорректных задач. 1990. Москва: Наука.

Optimization of Parameters for Laser Heat Treatment with Oscillating Beam for Treating Surfaces with Random Profile by Power Modulation

V. D. Voronov[1, *], E. D. Ishkinyaev[1], and V. N. Petrovskiy[1]

[1]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: voronovvaleriid@gmail.com*

Received June 28, 2023; revised July 07, 2023; accepted July 17, 2023

Abstract—In this paper, a method has been developed for heat treatment of objects with a complex surface profile with a rapidly oscillating laser beam with modulated radiation power. This method is an alternative method for the dynamic formation of the distribution of the intensity of the laser spot. A mathematical model for calculating the distribution of the intensity of the oscillating beam and temperature fields induced by laser treatment is created. An algorithm for optimizing the parameters of high-frequency oscillations of the beam based on the solution of the inverse problem of thermal conductivity to obtain uniform heating of the near-surface layer of the material is developed.

Keywords: laser hardening, heat transfer, computer modeling, inverse heat transfer problem, scanner