

ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В статье рассмотрена проблема моделирования теплофизических процессов при лазерном воздействии на поверхность различных материалов. При описании физических характеристик и геометрии модели используются принципы кластерного моделирования, реализованные в программном комплексе CLUSTER2D. Также затронуты вопросы стабильности параметров лазерного технологического комплекса и системы их стабилизации.

Ключевые слова: лазерное излучение, технологический процесс, обработка, температура.

Введение. Процесс взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) характеризуется температурой металла в зоне термического влияния (ЗТВ), а также скоростью нагрева и охлаждения [1].

Результаты лазерной обработки разнородных металлов показывают нестабильность показателей качества технологического процесса (ТП) [2]. К этим показателям качества относятся: заданная прочность, устойчивость к высоким нагрузкам, отсутствие наплавлений, подрезов, пор, прожигов и др. Внедрение технологии лазерной обработки позволяет повысить качество продукции и производительность труда, улучшить экологическую чистоту производства. Как правило, применение лазерной обработки обеспечивает получение технических и экономических результатов недостижимых другими методами. Эта технология одинаково успешно применима как для обработки крупногабаритных изделий, трехмерной резки, так и для изготовления миниатюрных деталей с микронной точностью.

Анализ исследований и публикаций. Особенности лазерной резки обусловлены уникальными свойствами ЛИ, обеспечивающего высокую концентрацию энергии, значительно превосходящую традиционные источники энергии, используемые для резки. Существенное значение в этом играет стабильность параметров лазерного технологического комплекса (ЛТК). Здесь необходимо рассматривать ЛТК как совокупность взаимодействующих между собой звеньев сложной системы. Это квантовый генератор, оптическая система, среда пропускания ЛИ, обрабатываемая деталь и механизм ее перемещения. Рассматривая зависимость параметров от многочисленных факторов, изменяющихся во времени, анализируя публикации и патенты, можно утверждать, что путь построения системы управления ЛТК по их стабилизации на сегодня не реализован [2].

Задание параметров ТП при обработке деталей ЛИ обычно производится либо по экспериментальным данным зависимостей показателей качества, либо используются справочные данные [1]. Это приводит к неоптимальному выбору параметров ЛТК при существенном увеличении как экономических, так и временных затрат.

Цель и постановка задания. Цель данной работы состоит в установлении функциональных связей, между показателями качества ТП и технологическими параметрами ЛТК, базирующихся на сложных физико-химических процессах взаимодействия ЛИ с металлами, с выделением основных возмущающих факторов, что позволяет выявить новые подходы к комплексному решению задач по разработке систем автоматического управления ЛТК. В общей постановке задачи распространения тепла требуется смоделировать не только геометрию сложной области, но и задать меняющиеся физические свойства модели, условия теплообмена на границе и описать характеристики внешнего воздействия (лазерный пучок).

Изложение основного материала. Этапы расчета параметров ТП.

Описание взаимосвязей между этапами расчета технологических параметров основано либо на накоплении экспериментальных данных и приведении их к единому стандарту требований при выборе параметров ЛТК, либо на получении математических моделей на основе физических законов процесса взаимодействия ЛИ с веществом обрабатываемого объекта.

В силу сложности математического описания функциональных зависимостей между параметрами ТП и механическими характеристиками деталей, предпочтительнее являются методы расчета этих параметров на основе экспериментальных данных. В этом случае повышение точности вычислений параметров ЛТК определяется чистотой эксперимента, методами статистической обработки результатов, методами аппроксимации функциональных зависимостей и т. п.

Процесс управления заданными параметрами ТП будет определяться структурной схемой автоматизированного лазерного технологического комплекса (АЛТК), которая представлена на рис. 1. При разработке моделей необходимо также учитывать введение обратных связей на основе информативных параметров, измеряемых в реальном времени. Одним из примеров является использование температуры зоны взаимодействия ЛИ с металлом. Поэтому использование расчета зависимостей технологических параметров АЛТК от параметров ТП на основе математических моделей является наиболее приемлемым. Это объясняется наибольшей изученностью данной проблемы и большим количеством опубликованных работ по данной тематике. Однако наряду с учетом таких параметров, как скорость, мощность и размер зоны нагрева, необходимо учитывать и температуру зоны взаимодействия ЛИ с поверхностью объекта обработки. На основании выделенных этапов взаимосвязи начальных характеристик детали с конечными параметрами АЛТК сформулированы требования к разработке методики их расчета.



Рис. 1. Структурная схема АЛТК

В этих условиях актуальной является разработка такой системы расчета технологических параметров, которая, с учетом особенностей габаритно-весовых характеристик детали, а также на основе экспериментально полученных зависимостей параметров ТП от показателей качества, обеспечивала бы повышение эффективности использования АЛТК.

Рассмотрим уравнение теплопроводности, которое в общем виде описывается следующим выражением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T + Q, \quad (1)$$

где Q – удельное количество теплоты, выделяемое тепловым источником (лазерным излучением).

С учетом начальных и краевых условий, а также нелинейного изменения теплофизических свойств материала, преобразуем выражение (1) в систему уравнений, состоящей из дифференциального уравнения теплопроводности

$$c(T)\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_T(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] - \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda_T(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right] - \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda_T(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right] = 0,$$

где $c(T)$ – зависимость теплоемкости от температуры; $\lambda_T(T)$ – зависимость теплопроводности от температуры.

Выражение описывающее тепловой обмен на границах тела с окружающей средой:

$$q_T = \begin{cases} \alpha_T(T)(T - T_0); x = l_x; y = l_y; z = l_z; \\ -\alpha_T(T)(T - T_0); \{z = 0; (x, y) \notin g\}; x = -l_x; y = -l_y; \\ 0; y = 0, \end{cases}$$

где $\alpha_T(T)$ – зависимость коэффициента полной поверхностной теплоотдачи от температуры; T_0 – температура окружающей среды; T – температура поверхности; q_T – удельный тепловой поток вблизи границы тела.

Проведенный анализ возможных путей управления параметрами термических циклов показал, что наиболее эффективным способом является изменение распределения плотности мощности в пятне нагрева.

Расчет температуры зоны взаимодействия ЛИ с металлами.

В работе [3] приведена математическая модель, по которой был проведен расчет зависимости температуры от параметров АЛТК для молибдена с различными коэффициентами поглощения с использованием пакета прикладных программ Mathcad:

$$T(P, r_0, V, t) = \frac{2\alpha P \sqrt{2\chi r_0}}{\pi k r_0^2 \sqrt{V}},$$

где α – коэффициент поглощения; χ – коэффициент температуропроводности; k – коэффициент теплопроводности; V – скорость перемещения луча; r_0 – радиус пятна; P – мощность излучения.

На рис. 2 - рис. 4 приведены графики зависимостей температуры металла в зоне воздействия ЛИ от параметров ЛТК.

Как следует из анализа зависимостей температуры зоны воздействия ЛИ, в интересующей области значения температур график зависимостей имеет линейный характер (рис. 2), и вследствие постоянства температуры при плавлении и кипении, коэффициент поглощения металла остается неизменным. Поэтому температурная зависимость зоны обработки в основном характеризуется удельным энерговыделением ЛИ.

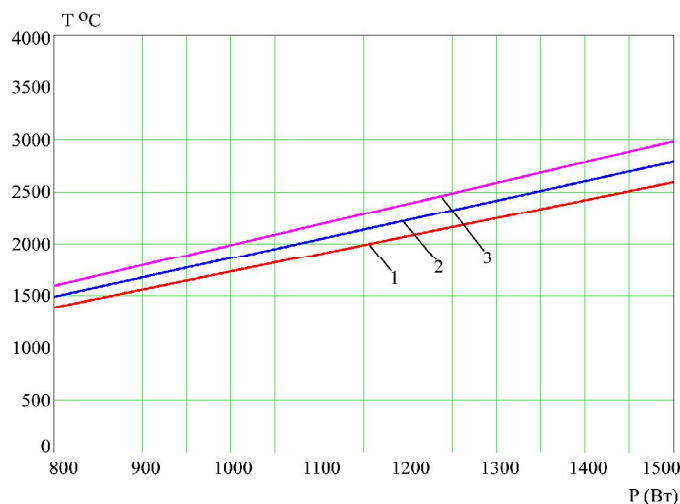


Рис. 2. График зависимости температуры металла в зоне воздействия ЛИ от мощности при различных коэффициентах поглощения:
 $\alpha = 0,8$ (кривая 1); $\alpha = 0,86$ (кривая 2); $\alpha = 0,92$ (кривая 3)

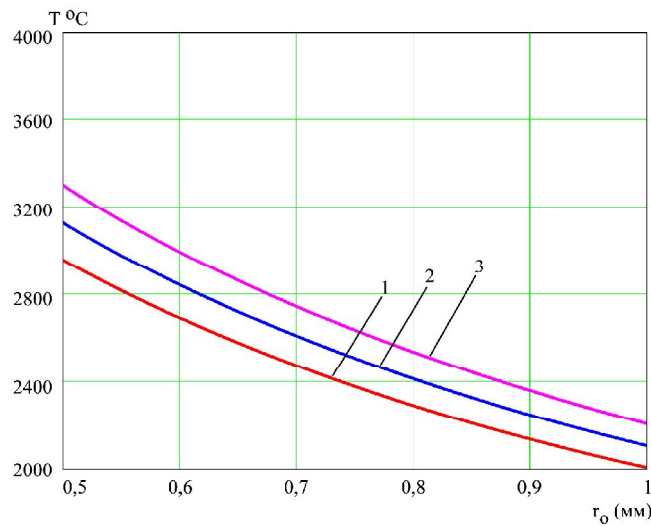


Рис. 3. График зависимости температуры металла в зоне воздействия ЛИ от диаметра пятна при различных коэффициентах поглощения: $\alpha = 0,8$ (кривая 1); $\alpha = 0,86$ (кривая 2); $\alpha = 0,92$ (кривая 3)

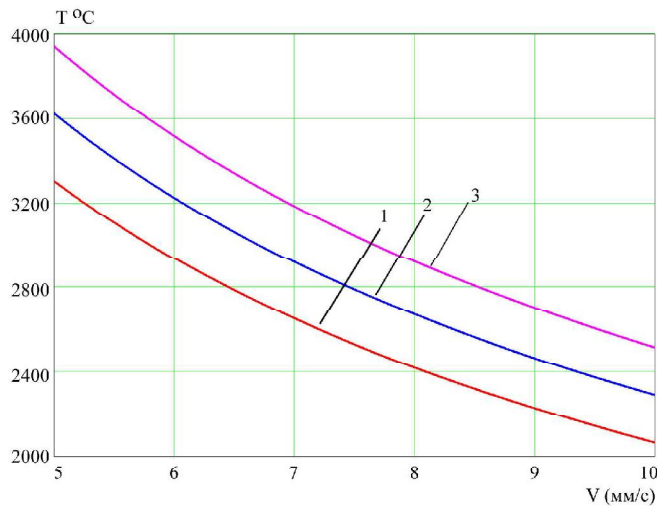


Рис. 4. График зависимости температуры металла в зоне воздействия ЛИ от скорости перемещения при различных коэффициентах поглощения: $\alpha = 0,8$ (кривая 1); $\alpha = 0,86$ (кривая 2); $\alpha = 0,92$ (кривая 3)

При лазерном облучении металлов можно выделить следующие процессы: нагрев материала за счет механизмов кондуктивного и радиационного переноса тепла, модификация свойств материала – фазовые переходы первого и второго рода, изменение физико-механических свойств поверхностей, возникновение волны температурных напряжений в области воздействия лазерного пучка на материал. Вблизи области воздействия лазерного пучка на материал – ЗТВ образуется каверна, где резко изменяются теплофизические и механические свойства материала.

На рис. 5 схематически показан процесс взаимодействия ЛИ с плоским слоем излучающей, поглощающей и нерассеивающей среды, у которой коэффициенты отражения на границах равны нулю. Граничные условия уравнения теплопроводности (1) определяются из условий конвективного теплообмена на границе $x = 0$ (подача охлаждающего вещества на обрабатываемую поверхность). На границе $x = L$ интенсивность внешнего излучения отсутствует ($J_e^- = 0$), конвективного теплообмена нет, а температура внешней среды

постоянна. В зоне лазерного пятна ($y = 0$) задаются граничные условия второго рода – тепловые потоки, определяемые внешним излучением и конвекцией.

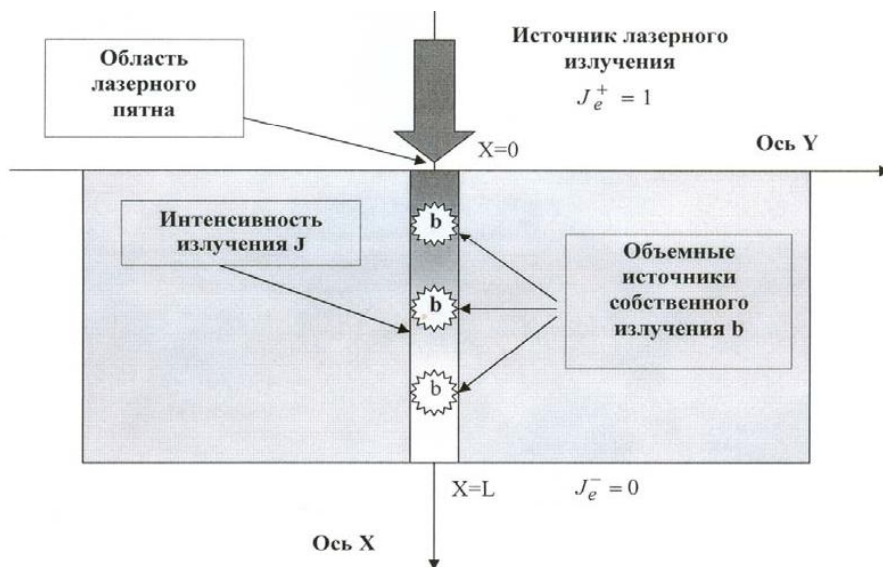


Рис. 5. Физическая модель лазерного воздействия на поверхность излучающего и поглощающего материалов

Для анализа теплофизической задачи необходимо провести численные расчеты с различными сеточными разбиениями. Для этого предусмотрен способ задания расчетной сетки, когда на область накладывается заданный пользователем набор точек и программными средствами определяется, к какой именно несущей кластерной точке исходной модели они относятся. После формирования объекта исследования программная среда генерирует область границы, на которой пользователь может задать различные граничные условия (температуру или тепловой поток). Тепловые потоки задаются в виде нормального вектора к границе.

В общей постановке линейные дифференциальные уравнения теплопроводности в двумерном случае имеют вид:

$$cq(x, y, t) \frac{\partial}{\partial t} u(x, y, t) = \frac{\partial}{\partial x} k_x(x, y, t) \frac{\partial}{\partial x} u(x, y, t) + \frac{\partial}{\partial y} k_y(x, y, t) \frac{\partial}{\partial y} u(x, y, t) + q(x, y, t) \quad (2)$$

с начальным условием:

$$u(x, y, t) = f(x, y); x \in \Omega. \quad (3)$$

Решение задачи (2) при условии (3) ищется на произвольной геометрической области Ω с границей $\Gamma = \partial\Omega$, на части которой может быть задана или температура или тепловые потоки. Функция $q(x, y, t)$ описывает мощность тепловых источников или стоков. В уравнении (2) предполагается, что теплофизические характеристики области модели являются функциями пространственных переменных и времени. Искомые функции в методе «интегральной декомпозиции» [4] являются тепловые потоки вдоль соответствующих осей, по которым в дальнейшем определяются температурные поля.

Интегральное описание обеспечивает устойчивое поведение искомого приближения при численном решении и дает возможность провести оценку точности получаемых результатов, используя невязку в системе интегральных уравнений [5].

Для рассмотрения поставленной задачи использовалась программная среда кластерного моделирования CLUSTER2D, которая позволяет моделировать процессы теплообмена при лазерном воздействии на большом наборе материалов с широким спектром теплофизических свойств в различных ТП: лазерное легирование, лазерная закалка, лазерная резка, лазерное управляемое термораскалывание и др. [6].

Для проведения предварительных тестовых расчетов была выбрана изотропная модель, когда на поверхности исследуемого изделия (металл) задавались смешанные граничные условия, оставляющие задачу теплопроводности линейной. На всей поверхности, кроме области лазерного воздействия, температура задавалась постоянной и равной начальной температуре 20 °С. В области лазерного воздействия задавались тепловые потоки с постоянной плотностью мощности. Время расчета ограничивалось временем до начала плавления, т.е. до превышения температуры плавления в ЗТВ [7].

Теплофизические характеристики стали и сплавов остаются приблизительно постоянными в диапазоне температур 20 °С – 1300 °С (изменение составляет ~ 10 %). Это предположение позволяет решать задачу в линейном приближении, с постоянными значениями теплопроводности и теплоемкости по всей глубине образца. Полученные в результате проведенных расчетов распределения тепловых потоков и температур показывают, что прогрев идет в основном по поверхности обрабатываемого материала, и линейные размеры прогреваемой зоны в 5-6 раз больше, чем глубина (рис. 3). Для отображения результатов, полученных в результате модельных расчетов, в программном комплексе предусмотрена возможность увеличения размеров изучаемой области прогрева и вывода на экран числовых значений (рис. 6). Это позволяет детально изучить распределение температур и тепловых потоков в тех областях, которые представляют больший интерес, и использовать их для проведения анализа возможных структурных изменений в материале.

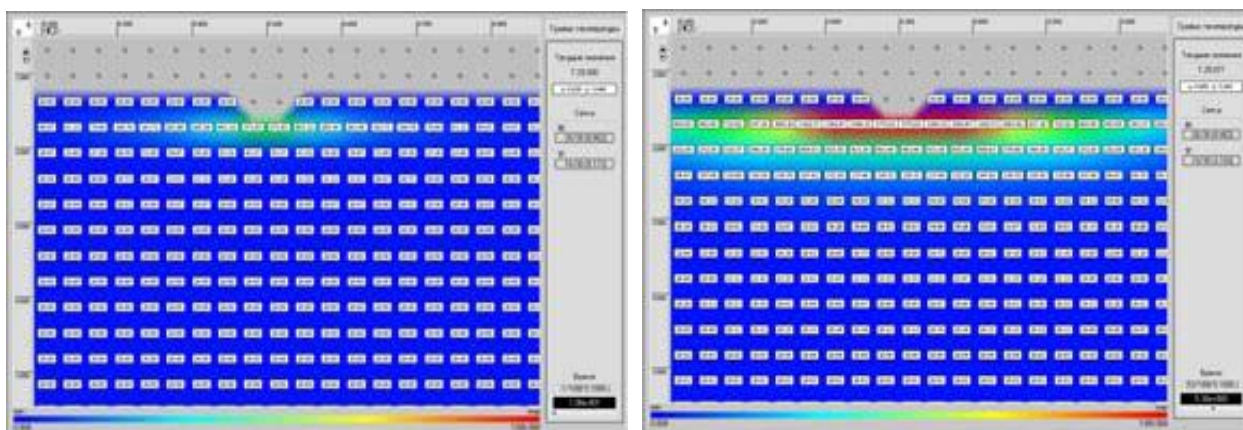


Рис. 6. Модельный расчет динамики изменения температуры при лазерном нагреве (карты температур)

На рис. 7 представлены значения тепловых потоков в окрестности источника излучения (лазерного пятна) – ЗТВ, которые в процессе прогрева меняются незначительно (~ 5 %).

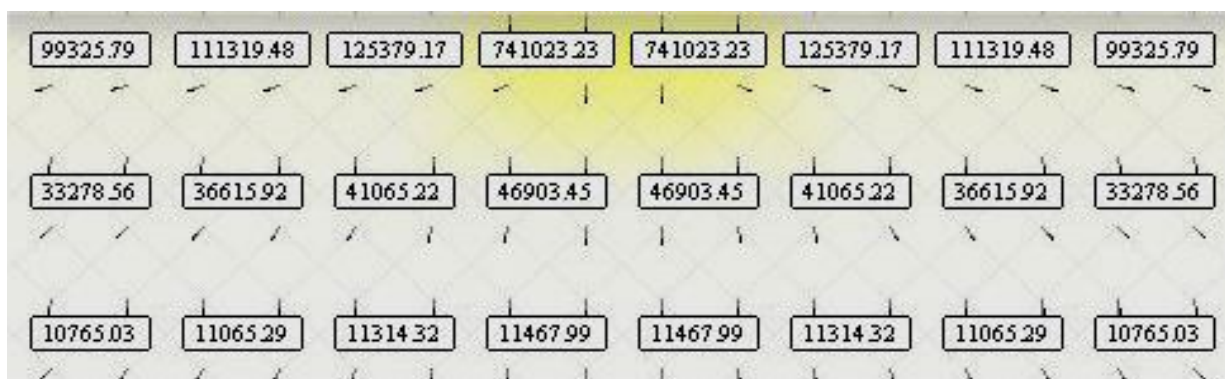


Рис. 7. Тепловые потоки в ЗТВ

Полученные в результате расчета карты температурных полей (рис. 6) в программной среде CLUSTER2D дают возможность вычислить скорость нагрева или охлаждения в каждой расчетной точке. Для этого вычисляется разность температур на двух соседних временных слоях и полученные значения делятся на временной шаг. Вследствие того, что скоростные характеристики являются определяющими при структурных превращениях, эти данные могут быть использованы для определения типа структурных изменений, происходящих в момент лазерного нагрева в поверхностном слое материала.

Для моделирования тепловых процессов при перемещении лазерного источника, в качестве исследуемого образца была выбрана узкая пластина. При выполнении численных расчетов, модель перемещения лазерного пучка предполагалась дискретной, т.е. в заданные временные моменты происходило мгновенное смещение источника в новую фиксированную точку поверхности. В безразмерном виде, на полученных температурных картах показано изменение температуры в областях лазерного воздействия при перемещении источника излучения.

В начальный момент времени, когда источник ЛИ находится близко к краю пластины (в относительных единицах измерения), в течении 10 шагов по времени (шаг по времени равен 0,1 в безразмерных величинах) происходит несимметричный прогрев поверхности в окрестности области воздействия. Из рис. 7 видно, что прогрев поверхности идет гораздо более интенсивно, чем проникновение тепла по глубине пластины. Глубина прогрева имеет в среднем в десять раз меньшие размеры, чем линейные размеры ЗТВ на поверхности. Несимметричное распределение температурных полей вызвано более высоким оттоком тепла на углу пластины (в этой граничной области заданы условия первого рода – температура на поверхности постоянна и равна температуре воздуха).

При перемещении лазерного источника дальнейший прогрев зависит от величины его смещения от первоначального положения. Если новое положение источника находится близко к зоне высокой температуры, то происходит дальнейшее увеличение температуры в окрестности области воздействия, что может привести к перегреву. Целью проведения модельных расчетов было определения таких условий воздействия, которые не приводили бы к перегреву поверхности выше 1600 °С.

Полученные результаты показывают, что схема устойчива, не возникает осциллирующих составляющих, а изменение временного шага не приводит к потере устойчивости схемы. Величина перемещения лазера на шаге составляла величину порядка двух размеров области лазерного воздействия (несколько нанометров). При такой скорости перемещения перегрева не происходило и температура в области воздействия составляла (1400 - 1500) °С.

Если при расчете использовать невысокие мощности и небольшие скорости перемещения лазерного источника, то расчеты показывают, что разогретая высокотемпературная область успевает охладиться, и в результате моделирования мы наблюдаем движение по поверхности отдельного пятна с небольшим уширением и заданным диапазоном рабочих температур.

При увеличении мощности лазера и увеличении скорости его перемещения, процессы кондуктивного теплообмена не позволяют поверхности значительно охладиться, и за лазером тянется температурный шлейф (время процесса термообработки уменьшено в 10 раз по сравнению со временем обработки в предыдущем численном эксперименте). В этом случае при таких же параметрах среды температура в области лазерного пятна достигала температуры (1800 - 1900) °С.

В проведенных расчетах использовалась непрозрачная среда, и поэтому учет условий прогрева оптически прозрачных сред могут значительно изменить полученные результаты. В первую очередь, следует ожидать, что это приведет к прогреву материала на большую глубину, и, соответственно, уменьшит температуры разогреваемого материала при той же длительности лазерного воздействия.

Выводы. Анализ взаимосвязи параметров АЛТК и показателей качества процесса лазерной обработки показал, что большое влияние на температуру зоны взаимодействия

оказывает их стабильность, а все показатели качества ТП обработки зависят от температуры и точности позиционирования фокуса ЛИ.

Оптимальный путь построения системы автоматического управления ЛТК, приводящий к стабилизации показателей качества ТП, является стабилизация энергетических параметров в зоне взаимодействия ЛИ с металлом и повышение точности позиционирования фокуса относительно обрабатываемой поверхности.

Проведенные исследования показали, что для снижения разброса показателей качества до 5-7 %, необходимая погрешность измерения параметров ТП достаточна в пределах 3 %. Однако необходимо учитывать и стабильность скорости охлаждения, так как в процессе обработки деталь будет нагреваться.

Программная среда кластерного моделирования CLUSTER2D, используемая для моделирования процессов высокоинтенсивного нагрева, позволяет проводить вычисления для широкого круга задач с граничными условиями первого и второго рода, а также со смешанными граничными условиями. Отсутствие осцилляций в получающихся численных решениях и возможности контроля погрешности в каждой расчетной точке, позволяют получать адекватные результаты, соответствующие реальному поведению физической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособ. для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
2. Звездин В.В. Повышение качества сварных соединений узлов и деталей автомобиля при лазерной сварке / В.В. Звездин, В.В. Заморский, В.С. Каримов, И.С. Сабиров // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2004. – Ч.1. – С.54-58.
3. А.с. 1600480 приоритет от 02.04.88. Способ измерения температуры металла / Звездин В.В. – № 3360585/25–08; заявл. 23.11.88; опубл. 30.03.89, Бюл. № 12.
4. Бокуть В.В. Термоупругие поля в твердых телах при его обработке лазерными пучками специальной формы / В.В. Бокуть, В.С. Кондратенко. – Мн.: ИФ АН БССР, 1987. – 59 с.
5. Светушков Н.Н. Кластерный подход для описания сложных физических объектов / Н.Н. Светушков // Тезисы докл. совещ. зав. каф. вузов России. – М.: АПР, 2009. – С.267-271.
6. Светушков Н.Н. Топологические принципы построения двумерных кластерных моделей / Н.Н. Светушков // Тезисы докл. совещ. зав. каф. вузов России. – М.: АПР, 2009. – С.272-273.
7. Светушков Н.Н. О моделировании процессов лазерного нагрева поверхностей материалов / Н.Н. Светушков, О.Н. Третьякова // Приборы. – № 8(110), 2009. – С.59-63.

Надійшла: 29.08.2012р.

Рецензент: д.т.н., проф. Розорінов Г.М..