

УДК: 536.2, 536.3

Проблемы моделирования взаимодействия лазерного излучения с анизотропными средами и композиционными материалами

Н.Н. Светушков, О.Н. Третьякова.

Аннотация.

Статья посвящена проблеме моделирования теплофизических процессов при лазерном воздействии на поверхность различных материалов, в котором используется новый подход, основанный на решении интегральных уравнений, описывающих процесс теплопередачи. При описании физических характеристик и геометрии модели используются принципы кластерного моделирования, реализованные в программном комплексе CLUSTER2D. Содержится описание возможностей программного комплекса по созданию теплофизической модели и проведению численных расчетов. Применяемые методы позволяют избежать осцилляций в получаемых численных решениях, которые возникают при применении конечно-разностных и конечно-элементных подходах.

Ключевые слова:

уравнения в частных производных; численные методы; теплофизические процессы; геометрия объекта; неустойчивость алгоритмов; программная среда; компьютерное моделирование.

Введение

Математическое моделирование задач теплообмена в условиях интенсивного радиационного воздействия представляет собой сложную вычислительную задачу, т.к. происходящие теплофизические процессы имеют небольшой временной интервал, в течение которого происходит значительное изменение температуры в области лазерного воздействия.

Существующие методы моделирования тепловых процессов, основанные на методах конечных разностей (МКР) и различных модификаций методов конечных элементов (МКЭ) обладают рядом существенных недостатков. Использование МКР требует достаточной гладкости решения, что не выполнимо при моделировании воздействия высокоинтенсивных источников лазерного излучения на поверхность различных материалов. Методы другой группы МКЭ позволяют находить решения подобного рода задач, однако оценить точность получаемых результатов довольно сложно, т.к. конечно-элементный подход основан на выполнении ряда интегральных соотношений и дополнительных предположений, которые значительно огрубляют физическую модель. Кроме того, оба метода часто приводят к осциллирующему поведению решения в областях с большими градиентами температур или в местах значительной неоднородности среды (если теплофизические свойства среды меняются скачкообразно), что не соответствует реальному физическому процессу.

В силу того, что текущие температуры являются определяющим фактором происходящих теплофизических процессов (например, при лазерном термораскалывании), то при моделировании задач лазерного воздействия большую роль играет точность получаемых результатов и, следовательно, требуется адекватность используемых моделей и возможность оценки погрешности приближенного решения. Методы аналитического решения задач такого типа ограничены средами с постоянными теплофизическими характеристиками и простой геометрией [1].

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).

Практическим значением проводимых исследований являются возможности оптимизации технологических процессов лазерной обработки (напр. лазерной резки), при которых необходимо найти соотношения скоростей перемещения лазера и мощности его воздействия для выполнения требуемых температурных режимов.

Постановка задачи и методы моделирования

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 - зоне термического влияния (ЗТВ) образуется каверна, где резко изменяются теплофизические и механические свойства материала.

На рис. 1 схематически показан процесс взаимодействия лазерного излучения с плоским слоем излучающей, поглощающей и нерассеивающей среды, у которой коэффициенты отражения на границах равны нулю. Граничные условия уравнения теплопроводности (6) определяются из условий конвективного теплообмена на границе $x = 0$ (подача охлаждающего вещества на обрабатываемую поверхность). На границе $x = L$ интенсивность внешнего излучения отсутствует ($J^- = 0$), 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.

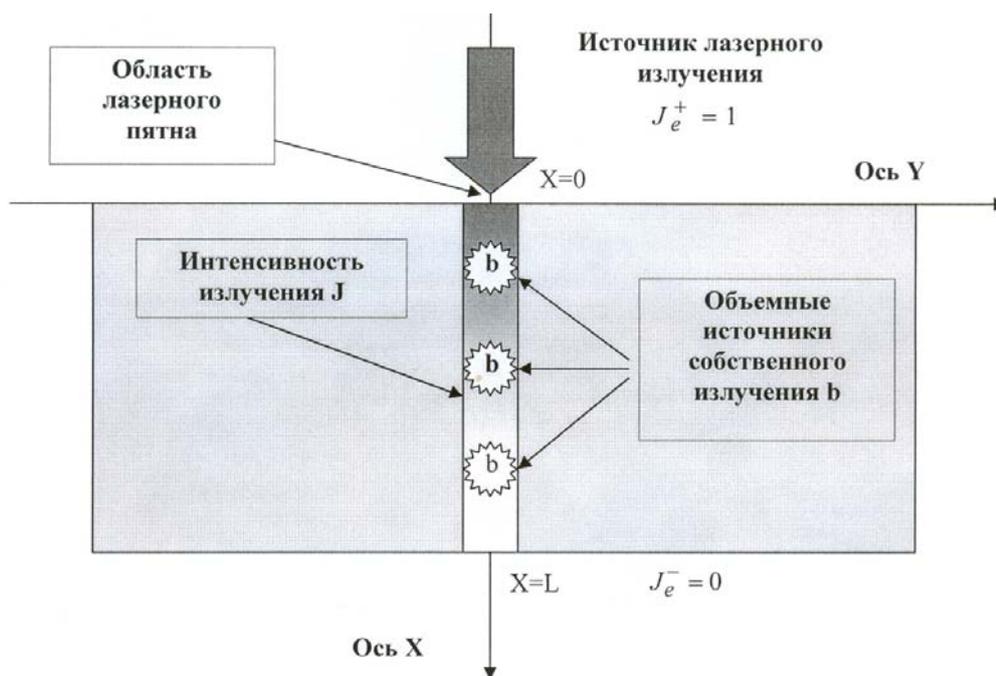


Рис. 1. Физическая модель лазерного воздействия на поверхность излучающего и поглощающего материала

Для описания объекта лазерного воздействия может быть использован разработанный ранее метод кластерного моделирования [2,3], позволяющий создавать геометрически сложные объекты с требуемой внутренней структурой и заданными свойствами.

Существующие методы описания геометрических объектов, основанные на различных способах задания вида границы или параметризации элементарных фигур, принципиальным

образом отличаются от подхода, описываемого в настоящей диссертации, при котором задаются не граничные точки, а внутренние точки объекта – элементы кластера, а положение граничных точек вычисляется в программной среде.

Кластерный подход использует положение кластерных элементов для параметризации произвольной геометрической области так, что вид континуальной пространственной области будет определяться положением дискретного набора элементов. При таком подходе, граничная область формируется по определенным правилам, описание которых содержится в кластерных элементах (несущих точках), и, в результате объединения, вычисляется единый взаимосвязанный объект (кластерная модель), задающий геометрическую область изделия.

Моделирование с помощью кластерного подхода естественным образом предоставляет возможность задавать в области различные физические параметры модели (плотность, теплоемкость, теплопроводность и др.), которые ставятся в соответствие с несущими точками и распространяются на всю элементарную область.

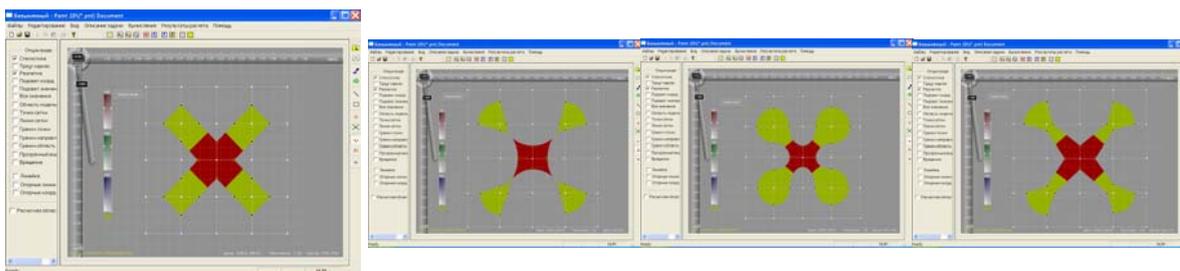


Рис. 2. Пятиэлементный кластер.

На рис. 2 показан исходный объект и его модификации, выполненные в разработанной программой среде кластерного моделирования CLUSTER2D. Характерно, что несмотря на различный вид получающихся моделей, сохраняется связь между несущими элементами в кластере, определяющими его тип - центральная точка непосредственно соединена с четырьмя точками, а остальные точки – только с ней одной.

Кроме того, разработанный подход позволяет быстро и рационально создавать модели реальных технических объектов. Представленные ниже на рис.3. фигуры - профиль крыла, модель обода колеса, а также сложные фрактальные объекты:

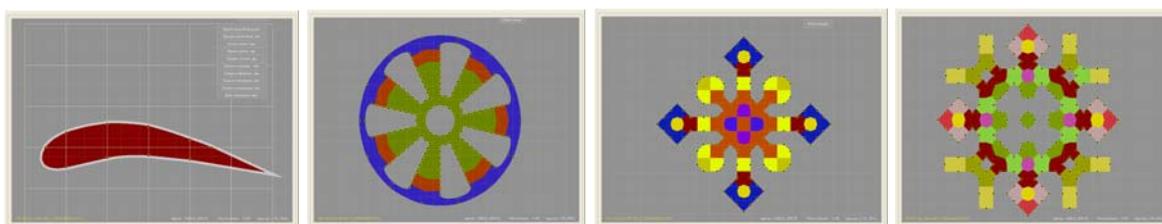


Рис. 3. Сложные двумерные объекты, созданные в разработанной

программной среде кластерного моделирования.

могут быть созданы в среде CLUSTER2D даже неподготовленными пользователями, используя интуитивно понятный интерфейс программы.

При инициализации кластера формируется пустая сеточная область, состоящая из набора пустых элементов, и неявным способом включающая в себя информацию обо всех возможных кластерных моделях для данной сетки. Пользователь должен лишь указать и активировать нужные ему несущие элементы. Панель инструментов модели позволяет задать геометрию области и теплофизические характеристики: теплопроводность по осям, теплоемкость, а также задать расположение и форму источников и стоков тепла. При выборе определенной области вида модели, пользователю предоставляются необходимые для работы инструменты – линейка для температур и тепловых потоков (а также линейки для мощности тепловых источников и для теплофизических характеристик), и также панель модификации кластера.

Для анализа теплофизической задачи удобно иметь возможность 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. Цветовая индикация, предусмотренная программным комплексом, позволяет визуально отобразить текущие значения величин потоков и температур.

Алгоритмические процедуры, реализованные в разработанном программном продукте, основаны на методе «интегральной декомпозиции», предложенном Светушковым Н.Н., и используют для численного решения интегральные уравнения, эквивалентные исходным уравнениям в частных производных. В общей постановке линейные дифференциальные уравнения теплопроводности в двумерном случае имеют вид:

$$c\rho(x,y,t)\frac{\partial}{\partial t}u(x,y,t) = \frac{\partial}{\partial x}k_x(x,y,t)\frac{\partial}{\partial x}u(x,y,t) + \frac{\partial}{\partial y}k_y(x,y,t)\frac{\partial}{\partial y}u(x,y,t) + q(x,y,t); \quad (1)$$

с начальным условием:

$$u(x,y,0) = f(x,y), x \in \Omega; \quad (2)$$

Решение задачи (1)-(2) 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 (1) предполагается, что теплофизические характеристики области модели являются функциями пространственных переменных и времени. Искомые функции в методе «интегральной декомпозиции» 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.

Результаты

Разработанная на основе предложенных алгоритмов программная среда позволяет моделировать процессы теплообмена при лазерном воздействии на большой набор материалов с широким спектром теплофизических свойств в различных технологических процессах: лазерное легирование, лазерная закалка, лазерная сварка, лазерное управляемое термораскалывание и др.

Для проведения предварительных тестовых расчетов была выбрана изотропная модель, когда на поверхности исследуемого изделия (из металла) задавались смешанные граничные условия, оставляющие задачу теплопроводности линейной. На всей поверхности, кроме области лазерного воздействия, температура задавалась постоянной и равной начальной температуре 20°C . 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.

Теплофизические характеристики стали и сплавов остаются приближенно постоянными в диапазоне температур $20^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$ (изменение составляет $\sim 10\%$). 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.4). 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.5). 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.

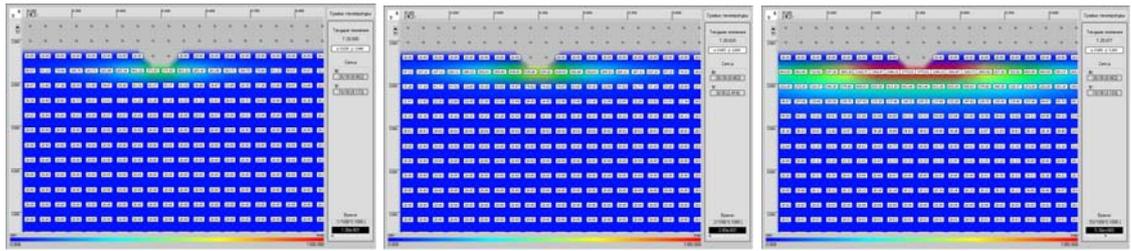


Рис. 4. Модельный расчет динамики изменения температуры при лазерном нагреве.

Разработанное программное обеспечение позволяет задавать меняющиеся со временем внешние тепловые воздействия, т.е. имеется возможность проводить расчет не только прогрева изделия, но и его охлаждения после прекращения лазерного облучения. На рис. 5. показан рассчитанный процесс охлаждения поверхности материала (стали), который идет достаточно быстро вследствие больших значений коэффициентов теплопроводности.

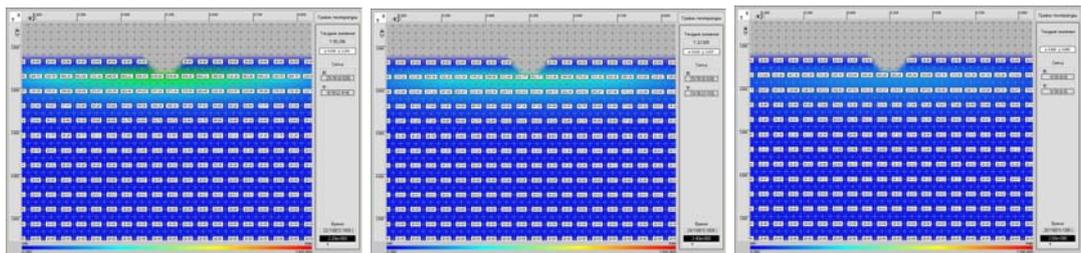


Рис. 5. Расчет охлаждения поверхности материала после лазерного воздействия.

Полученные в результате расчета карты температурных полей (рис. 4 и 5) 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. На рис. 6 представлены значения тепловых потоков в окрестности источника излучения (лазерного пятна) – зоны термического влияния, которые в процессе прогрева меняются незначительно (~5%).

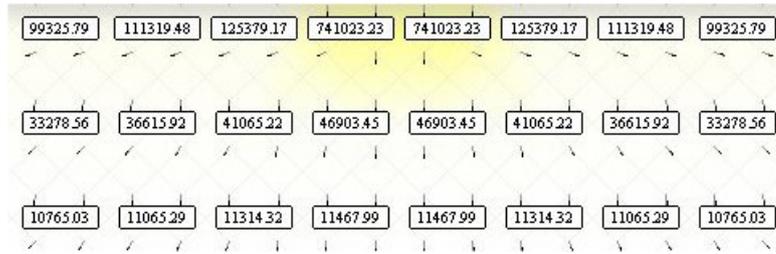


Рис. 6. Тепловые потоки в зоне термического влияния (ЗТВ).

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.

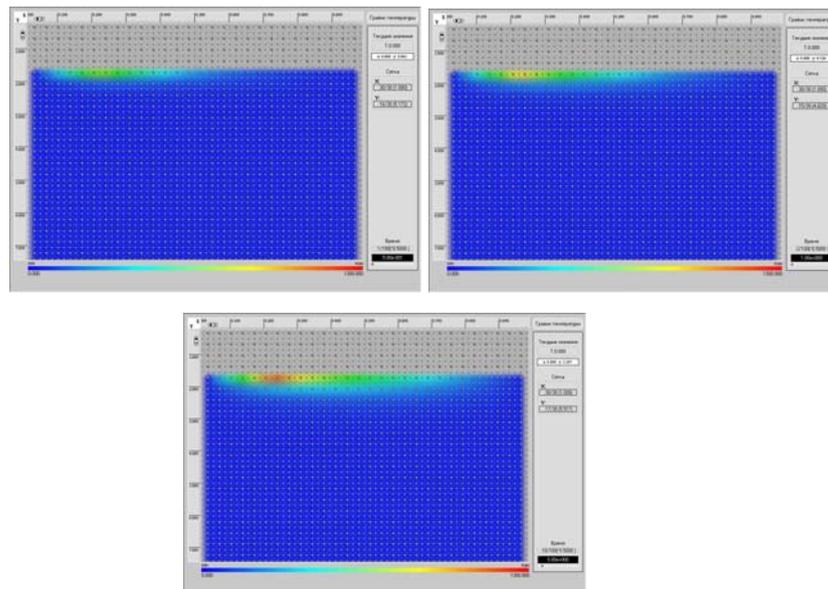


Рис. 7. Модельные расчеты отражают процесс начального прогрева края пластины

В начальный момент времени, когда источник лазерного излучения 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. 1 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 зоны термического влияния 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°C градусов.

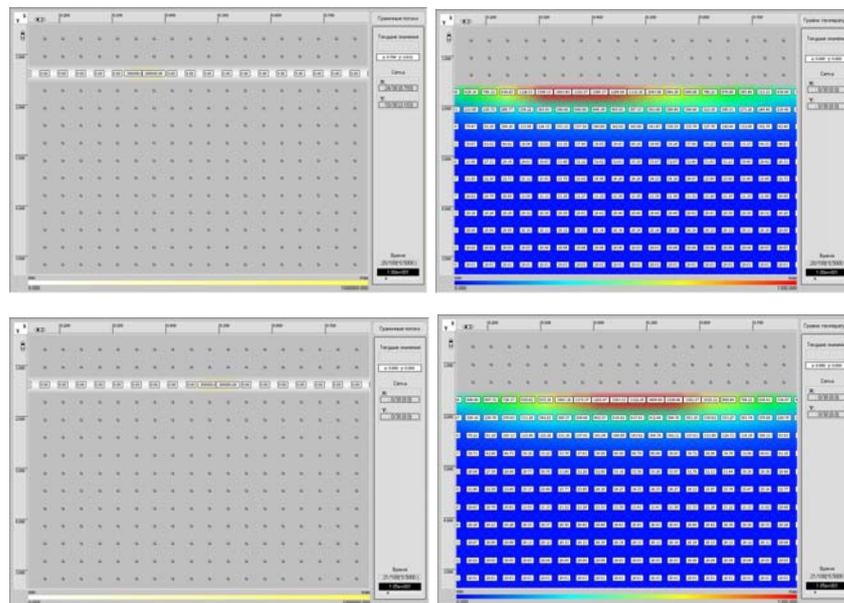


Рис. 8. Температурные поля на соседних временных слоях.

На рис. 8 показано положение источника излучения и распределение температурных полей, полученные при расчетах, на двух соседних временных слоях. В белых квадратиках указаны средние расчетные температуры в окрестности расчетной точки и величины мощности теплового источника. 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 происходила и температура в области воздействия составляла $1400\text{--}1500^{\circ}\text{C}$.

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, рис.9.

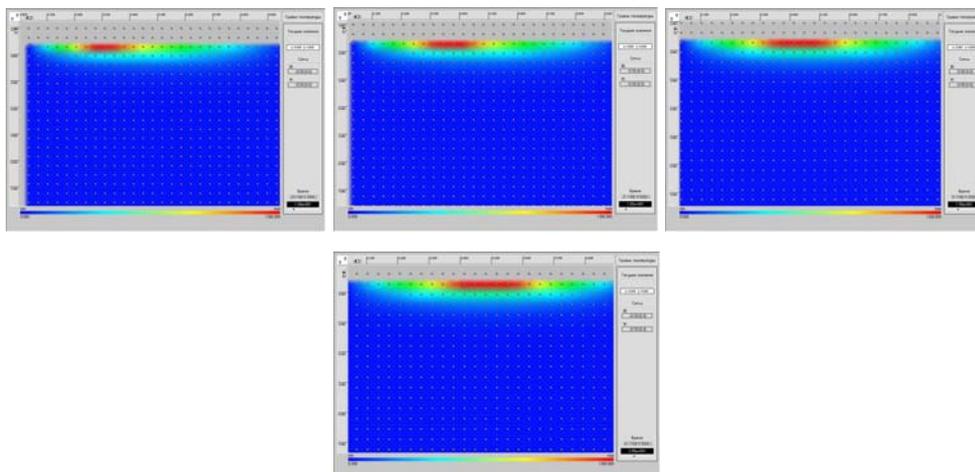


Рис. 9. Температурные поля при медленном перемещении лазерного источника небольшой мощности

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):

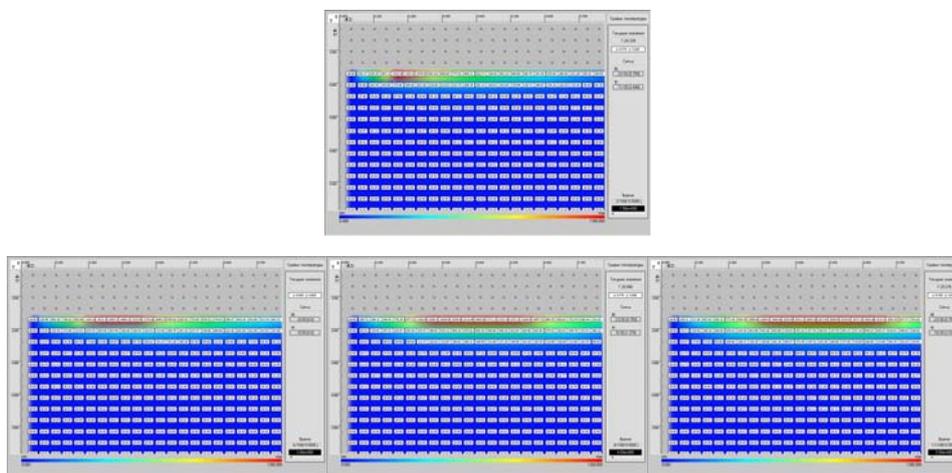


Рис. 10. Температурные поля при быстром перемещении лазерного источника большой мощности

В этом случае при таких же параметрах среды температура в области лазерного пятна достигала температуры 1800-1900⁰С градусов.

В проведенных расчетах использовалась непрозрачная среда, и поэтому учет условия прогрева оптически прозрачных сред могут значительно изменить полученные картины. 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.

Разработанный программный комплекс, используемый 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.

Использование разработанной программной среды для моделирования воздействия лазерного источника на поверхность различных материалов и проведение серии численных экспериментов позволит выявить необходимые технологические параметры при поверхностной термической обработке сложных композиционных и анизотропных изделий.

Библиографический список.

1. Бокуть В.В., Кондратенко В.С. и др. Термоупругие поля в твердых телах при его обработке лазерными пучками специальной формы. - Минск., Изд-во ИФ АН БССР, 1987,- 59 с.
2. Светушков Н.Н., Кластерный подход для описания сложных физических объектов // Тез. докл. совещ. зав. каф. Вузов России. под.ред. Г.Г.Спирина - М.: АПР, 2009. - С.267-271.
3. Светушков Н.Н., Топологические принципы построения двумерных кластерных моделей. // Тез. докл. совещ. зав. каф. Вузов России. под.ред. Г.Г.Спирина - М.: АПР, 2009. - С.272-273.
4. Светушков Н.Н., Третьякова О.Н., О моделировании процессов лазерного нагрева поверхностей материалов. // Журнал «Приборы», М: 2009, № 8(110), - С. 59-63.

Сведения об авторах:

Светушков Николай Николаевич, старший научный сотрудник Московского авиационного института (государственного технического университета). 8-916-3063780, (499) 153-2084, e-mail: svt.n.n@mail.ru

Третьякова Ольга Николаевна, профессор, Московского авиационного института (государственного технического университета), к.ф.-м.н,
тел:8-9055420318,email:tretiyakova_olga@mail.ru