

Проблемы математического моделирования процессов лазерной очистки в промышленности

И. И. Головин¹⁾, Е. В. Цегельник²⁾, С. И. Планковский³⁾

^{1), 2), 3)} *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», ул. Чкалова, 17, Харьков, Украина, 61070*

Article info:

Paper received:

The final version of the paper received:

Paper accepted online:

13 May 2015

01 October 2015

30 November 2015

Correspondent Author's Address:

²⁾ y.tsegelnyk@gmail.com

Целью данной статьи является анализ существующих подходов к математическому моделированию процессов, сопровождающих лазерную очистку поверхности детали для определения рациональных методов при их моделировании. Широкое применение лазера для целей промышленной очистки и дороговизна экспериментального оборудования вынуждают искать альтернативные способы исследования данной проблемы.

В статье рассмотрены проблемы, возникающие при попытках моделирования процессов взаимодействия лазерного излучения с удаляемым веществом, и осуществлена попытка обобщения описания математических процессов лазерного нагрева и разрушения. В результате анализа при использовании аналитических методов исследования были выявлены недостатки существующих подходов при моделировании процессов лазерной очистки и определены наиболее приемлемые направления их дальнейшего исследования.

Ключевые слова: абляция, лакокрасочное покрытие, фазовый переход, метод молекулярной динамики.

ВВЕДЕНИЕ

В мировой аэрокосмической промышленности лазеры активно используются для широкого круга задач по обработке широкой номенклатуры деталей. Одной из областей, в которой перспективно применять лазерные технологии, является очистка поверхностей от различных загрязнений в процессе ремонта или в результате регламентных и восстановительных работ авиационной техники [1].

Лазерный нагрев может сопровождаться изменением оптических и теплофизических свойств материала, его тепловым расширением, а также фазовыми переходами в твердом состоянии и плавлением. Высокие скорости нагрева и охлаждения и большие пространственные градиенты температуры обуславливают особенности лазерного нагрева. Они могут привести и приводят к значительным отличиям в протекании тепловых процессов, стимулированных лазерным воздействием.

Очистка поверхности детали от загрязнения или от покрывающего лакокрасочного покрытия (ЛКП) при помощи лазерного воздействия подразумевает частичное разрушение облучаемого объекта.

Следует отметить, что термин «разрушение» при воздействии лазерного излучения на материалы достаточно условен. Это связано с тем, что процесс разрушения является многостадийным.

Можно выделить несколько механизмов разрушения поглощающих материалов: термомеханические, химические, плавление, испарение и ударная

волна.

Не стоит забывать, что при попытках лазерного удаления загрязнений или снятия ЛКП возможен частичный или полный переход последних из твердой фазы в жидкую, а затем в парообразную или обратно в твердую. При этом в зоне действия лазерного луча при расплавлении поверхности возникают явления, связанные с различными видами гидродинамических неустойчивостей, возникающих частично по причине вышеупомянутых фазовых переходов. Наиболее часто встречающимися на практике являются неустойчивости: Кельвина-Гельмгольца (или «ветровая»), термокапиллярная, концентрационная, концентрационно-термокапиллярная. Эти явления ответственны за формирование рельефа на поверхности обрабатываемой детали [2].

Наличие всех вышеперечисленных процессов создаёт определённые сложности при моделировании процесса лазерной очистки. Целью настоящей работы является анализ существующих подходов к математическому моделированию процессов, сопровождающих лазерную очистку поверхности детали для определения рациональных методов при их моделировании.

ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Лазерный нагрев по своей физической сущности не отличается от других видов нагрева. Как и при

любом другом нагревании, однозначной характеристикой теплового действия является температура, а сам нагрев состоит в увеличении амплитуды тепловых колебаний решетки.

Воздействие лазерного излучения на вещество может осуществляться в широком диапазоне энергий (от 10^3 Вт·см⁻² и более). Различным диапазонам энергий соответствуют различные эффекты и соответственно разрабатываемые модели физических процессов, происходящих при взаимодействии когерентного излучения с твердым телом. При воздействии на твердые тела интенсивность лазерного излучения можно разделить на несколько диапазонов (рис. 1) [2].

К умеренным интенсивностям относят способность материалов не разрушаться при воздействии лазерного излучения. При этом происходит воздействие лазерного излучения на подсистему структурных дефектов в материале, также возможны фазовые переходы.

К средним диапазонам относят способность лазерного излучения формировать ванну расплава на поверхности облучаемого материала, а также частично испарять облучаемый материал. К высоким интенсивностям относят способность лазерного излучения образовывать высокоионизированную плазму над поверхностью облучаемого объекта.

При лазерном воздействии на материалы наблюдаются многообразные процессы и явления, которые приводят к изменению оптических и электрических характеристик материала, его структуры и фазового состава.

Отметим основные физико-химические явления: плавление, испарение, кристаллизацию, термохимические реакции.

При облучении кристаллического или поликристаллического твердого тела лазерным излучением достаточной плотности мощности его температура может возрасти до температуры плавления. Температуры плавления различных материалов сильно различаются. Соответственно меняется как количество теплоты, которое необходимо для нагревания металла от комнатной температуры до температуры плавления, так и скрытая теплота фазового перехода твердое тело – расплав. При этом роль скрытой теплоты плавления, т. е. теплоты, необходимой для разрушения кристаллической решетки тела, тем больше, чем ниже температура плавления.

Жидкая фаза, образовавшаяся при плавлении твердого тела, может быть нагрета до температуры испарения.

Фазовый переход жидкость – пар происходит при подводе в зону воздействия количества теплоты, равного или большего теплоты испарения.

Лазерный нагрев веществ может стимулировать протекание необратимых химических реакций, которые вызывают ускорение процесса разрушения материала. Большой тепловой вклад экзотермических реакций, инициируемых в зоне нагрева, приводит к воспламенению материала, которое может перейти в автономный режим. При этом материал воспламеняется в области, размеры которой многократно превосходят зону облучения.

Взаимосвязь физических процессов, сопровождающих процесс воздействия лазерного излучения на материалы, изображена на рис. 2 [3].

Совокупность физических процессов в зоне воздействия определяется температурой, скоростью и временем нагрева, скоростью охлаждения материала, которые, в свою очередь, зависят от геометрических и энергетических характеристик лазерного излучения, свойств обрабатываемого материала, массы облучаемого изделия, технологических схем обработки и т. д.

Как известно, в рамках теории действия лазерного излучения на объемные материалы существует достаточно попыток количественно описать процессы поглощения лазерного излучения разного рода покрытиями, их нагревания и разрушения [4 – 7]. Попытаемся провести анализ существующих моделей, их систематизацию и определить степень применимости на практике.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ И СЛОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

При описании процесса воздействия лазерного излучения на твердые непрозрачные тела (металлы, полупроводники, диэлектрики) можно выделить три стадии: нагревание без фазовых переходов; плавление, испарение; ионизация испаряемого вещества и образование плазмы. Простейший способ описания воздействия лазерного излучения – описание отдельных стадий. Полученные результаты могут быть использованы для описания более сложного случая, когда эти стадии нельзя четко разделить.

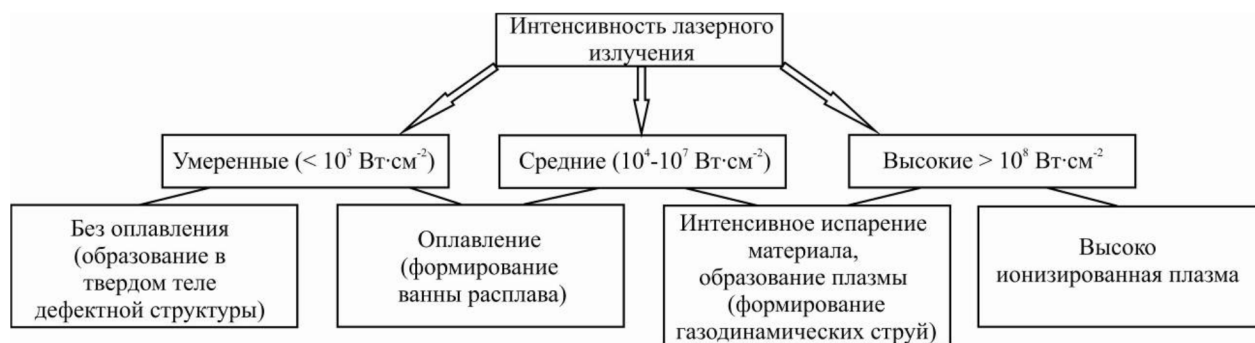


Рисунок 1 - Характерные диапазоны лазерного излучения

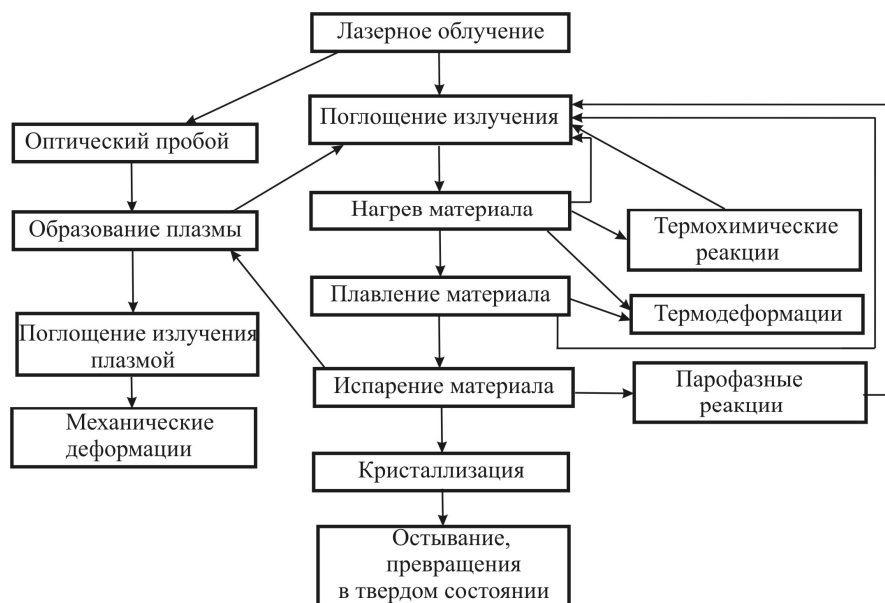


Рисунок 2 - Взаимосвязь физических процессов при воздействии лазерного излучения на материалы

Из всего множества существующих моделей, пытающихся по возможности описать как можно большее количество процессов, сопровождающих процесс лазерной абляции, можно выделить следующие три: тепловую модель, двухтемпературную и гидродинамическую модели. Данные модели были разработаны такими видными учеными как А. М. Бонч-Бруевич, М. А. Ельяшевич, С. И. Анисимов, Джон Реди (J. F. Ready), Я. А. Имас, и позволяют в определенной мере провести исследование большинства процессов, протекающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом.

Существует также достаточно моделей, пытающихся описать отдельные стадии процесса лазерной абляции, но комплексно данную задачу из широко известных моделей способны решить лишь три ранее вышеперечисленные.

Вследствие того, что излучение поглощается тонким приповерхностным слоем материала, для описания взаимодействия лазерного излучения с металлами можно использовать так называемую «тепловую модель». Согласно этой модели можно рассматривать независимо друг от друга четыре стадии воздействия: поглощение света и переход поглощенной энергии в тепло; нагрев материалов без разрушения; разрушение и разлёт продуктов разрушения; остывание. Тепловая модель позволила успешно описать распространение тепла, плавление, модификацию структуры вещества.

На основе первых исследований лазерной абляции [6, 8] в 60-е годы XX в. была сформулирована так называемая тепловая модель лазерного испарения [4], не претерпевшая в последующем существенных изменений.

Поскольку температуру лазерной абляции трудно измерить с хорошей точностью, особую актуальность приобретает задача ее точного вычисления. Эта задача достаточно сложна. Вычисления, основанные на решении линейного уравнения теплопроводности,

применяемого в тепловой модели, чересчур упрощены и иногда не годятся даже для качественных оценок. Численные расчеты с применением разностных методов для уравнений в частных производных, напротив, чересчур громоздки и непригодны для быстрого анализа экспериментальных данных. Данная ситуация вызывает ряд проблем, связанных с широким применением тепловой модели на практике.

При использовании более коротких (субпикосекундных) лазерных импульсов в кинетике абляции возникают особенности, которые уже нельзя описать в рамках обычной тепловой модели.

Двухтемпературная модель для описания переходных явлений в неравновесном электронном газе и решетке при субпикосекундном лазерном воздействии была предложена более 40 лет назад и описывает транспорт энергии внутри металла с помощью связанных уравнений теплопроводности для температуры электронов T_e и решетки (фононов) T_i [5, 9]:

$$c_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = c_e \nu \frac{\partial T_e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + Q - \mu (T_e - T_i),$$

$$c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = c_i \nu \frac{\partial T_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + Q - \mu (T_i - T_e).$$

Здесь c_e и c_i – удельные теплоемкости [Дж см⁻³ К⁻¹] электронов и решетки; χ_e и χ_i – соответствующие коэффициенты теплопроводности, параметр $\mu = c_e / \tau$ характеризует скорость обмена энергией [Вт см⁻³ К⁻¹] между электронной и решеточной подсистемами (τ – характерное время обмена для электронной подсистемы).

Поглощение электронами лазерной энергии описывается с помощью источника:

$$Q = -\frac{\partial I}{\partial z} = \alpha I, \quad I(0, t) = I_S(t),$$

где α – коэффициент поглощения; I_S – интенсивность излучения на поверхности металла ($z = 0$). Величина $I_S(t) = \alpha I(t)$ зависит от формы лазерного импульса $I(t)$ и поглощательной способности вещества $A = 1 - R$ (R – коэффициент отражения излучения). Для ультракороткого лазерного импульса пароплазменное облако образуется после окончания импульса и не оказывает влияния на процесс абляции.

Для детального сопоставления этой модели с экспериментом требуется измерять различные характеристики с субпикосекундным временным разрешением, что само по себе является достаточно сложной задачей. Некоторые характеристики вообще сложно измерить непосредственно; поэтому анализ физиче-

ских механизмов, вовлеченных в абляцию под действием ультракоротких лазерных импульсов, приходится делать на основе теоретического анализа «косвенных» экспериментальных данных.

Следует отметить еще одно обстоятельство. Двухтемпературная модель применима в случае, когда можно использовать классические законы Фурье для описания переноса тепловой энергии электронов и фононов. Это означает, что модель применима для времен, намного больших, чем характерное время установления равновесного распределения в электронном газе.

Описанная выше простая двухтемпературная модель испарения пригодна при температурах, значительно меньших критической, когда существует резкая граница (масштаба межатомных расстояний) между паром и конденсированной фазой, а плотность пара намного меньше плотности конденсированного вещества. С ростом температуры резкая межфазная граница размывается в макроскопический переходный слой, структуру и динамику которого можно описать полной системой уравнений гидродинамики.

Эта система уравнений должна быть дополнена уравнением состояния и данными о теплоемкости, теплопроводности и электропроводности вещества в широкой области фазовой диаграммы, включающей критическую точку и двухфазную область. Модель, описывающая данные процессы, получила название «гидродинамическая модель».

Пример одномерной гидродинамической модели для «сквозного» численного расчета лазерной абляции представлен в работе [9]. Для газодинамических расчетов обычно применяют построенные на основе экспериментальных данных полуэмпирические уравнения состояния, что в значительной степени затрудняет применение описанной модели на практике.

Однако следует помнить, что основным механизмом поверхностного разрушения материалов в процессе лазерной абляции является испарение.

Обобщив вышеописанные тепловые модели, можно сказать, что процесс испарения математически описывают в рамках краевой задачи теплопроводности. Данная задача рассматривается для конденсированной среды в системе координат, связанной с подвижной межфазной границей твердое тело – пар или расплав – пар, на которой происходит испарение.

Задача о движении границы испарения может быть рассмотрена в рамках одномерной модели [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} - v_{ev}(t) \frac{\partial T}{\partial z} - a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} &= \frac{q\alpha}{\rho c} \exp(-\alpha z), \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial z} &= q - v_{ev} \rho \Delta H, \\ T(z, 0) = T(\infty, t) &= 0, \end{aligned}$$

где $\Delta H = L_{ev} - RT/2$ разность удельных энтальпий твердой и газообразных фаз; $v_{ev}(t)$ – скорость движения межфазной границы.

Первым недостатком модели является необходимость опускать боковой отвод энергии лазерного излучения за счет теплопроводности. Вторым недо-

статком является тот факт, что краевая задача теплопроводности существенно нелинейна, поэтому ее общего аналитического решения не существует.

Стационарно рассматривать процесс испарения возможно лишь в рамках следующих допущений:

а) концентрация плазмы вблизи поверхности невелика, поэтому эффектами экранирования лазерного излучения можно пренебречь;

б) все подводимое тепло идет на испарение;

в) фазовая граница движется с постоянной скоростью $v_{ev}(T_{cm}) = v_0$.

Как мы видим, данные допущения значительно уводят математическое моделирование эксперимента от его реального протекания.

Не стоит забывать также, что при плотностях потоков $q \geq 10^8$ Вт/см² происходит разрушение за счет ударной волны, выноса расплава под действием давления отдачи пара или его вскипания и т. д. Моделирование температурного поля и скорости вытеснения расплава является очень сложной задачей.

Рассмотрим двухфазную модель удаления поверхностного материала из зоны воздействия излучения, в которой учтено вытеснение расплава под действием давления отдачи паров [3]. Изменение толщины слоя расплава можно описать уравнением

$$-\frac{dh}{dt} = \bar{v}_{ev} + \frac{\bar{w}\Pi(h_0 - h)}{S},$$

где Π , S – периметр и площадь области разрушения; h_0 – исходная толщина пленки.

Необходимым условием является наличие информации о средней по времени скорости истечения расплава из зоны облучения \bar{w} и скорости испарения \bar{v}_{ev} . Очень часто такая информация доступна из предварительно проведенного эксперимента, что затрудняет само по себе процесс математического моделирования.

Поскольку сейчас еще нет общепринятых моделей нетепловых процессов, происходящих при воздействии сверхкоротких лазерных импульсов на вещество, авторы статьи посчитали возможным не обсуждать возможность их применения при лазерной очистке поверхности.

Во введении было упомянуто, что возможное появление расплава обрабатываемого вещества может послужить появлению различного вида гидродинамических неустойчивостей.

Под неустойчивостью в гидродинамике обычно понимают самопроизвольное нарастание отклонений от невозмущенного состояния среды, приводящее к качественному изменению поведения системы [10].

Одним из примеров таких явлений является неустойчивость Рэлея. Причиной неустойчивостей также является градиент температуры на поверхности жидкости. Другими механизмами неустойчивостей могут быть действие электрических и гравитационных сил и их комбинированное действие.

В общем случае появление гидродинамических неустойчивостей при локальном нагреве жидкостей сводится:

– к капиллярным силам (гравитационно-капиллярные волны);

– к конвективным течениям (ячейки Бенара, валиковая конвекция) [11];

– к образованию пограничных слоев жидкости (стратифицированные жидкости, движение жидкости на твердой поверхности, течения Пуазейля, Куэтта и др.) [12];

– к электрическим силам (неустойчивость Тонкса-Френкеля) [13];

– к флуктуационным силам (расклинивающее давление) [14].

Как уже было сказано выше, данное проявление гидродинамических неустойчивостей имеет место при наблюдении процесса обработки металла лазерным излучением [15, 16].

Однако следует отметить, что несмотря на тот факт, что исследованию гидродинамических устойчивостей при воздействии различных внешних факторов на конденсированные среды (при плавлении, испарении, остывании, и т. д.) посвящено немало статей и обзоров [17 – 19], на данный момент не существует четкой теории и единого подхода к моделированию данных процессов.

Также в стороне оставлен тот факт, что поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ) или поляритоны играют большую роль в воздействии мощного лазерного излучения на материалы (металлы, полупроводники), приводящего к их нагреву и разрушению [3]. Одним из главных признаков и следствий генерации ПЭВ в процессе такого силового воздействия излучения на вещество является образование поверхностных периодических структур (ППС), представляющих собой систему упорядоченных линейных выступов и впадин рельефа поверхности. На данный момент нет точного представления об этом процессе и четкой математической модели, позволяющей его спрогнозировать.

Лишь некоторые из механизмов образования частиц в процессе лазерной абляции могут быть проанализированы с помощью теоретических термодинамических и кинетических моделей. Макроскопические модели процессов лазерной абляции в настоящее время либо весьма грубы, либо отсутствуют вовсе. Более того, в реальных условиях процессы, сопровождающие лазерную абляцию, могут проявляться совместно, внося вклад в формирование частиц на разных стадиях процесса эжекции и эволюции облака продуктов абляции. Таким образом, теоретическое описание лазерной абляции на макроскопическом уровне затруднено сложностью и многообразием происходящих при этом явлении физических процессов.

Альтернативой макроскопическому описанию является описание поведения материала мишени при лазерной абляции на уровне отдельных атомов или молекул при помощи численного подхода, основанного на компьютерном моделировании методом молекулярной динамики [20].

Метод молекулярной динамики (МД) – это метод компьютерного моделирования, позволяющий предсказывать эволюцию во времени системы взаимодействующих частиц (атомов, молекул, гранул и т. д.).

В простейшем случае частиц – материальных точек, не имеющих собственного строения, эти уравнения могут быть записаны в виде

$$m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} = F_i, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где m_i и r_i – масса и радиус-вектор i -й частицы;

F_i – сила, действующая на эту частицу со стороны остальных частиц системы.

Сила F_i может быть вычислена при помощи потенциала взаимодействия между частицами $U(r_1, r_2, r_3, \dots, r_N)$, который является функцией радиус-векторов всех частиц системы:

$$F_i = -\frac{\partial}{\partial r_i} U(r_1, r_2, r_3, \dots, r_N).$$

Если начальные условия (начальные положения и скорости всех частиц системы) и потенциал взаимодействия заданы, то уравнения движения могут быть решены численно. Траектории (координаты и скорости) всех частиц в зависимости от времени являются основным результатом расчетов методом МД. На основании известных данных о траекториях всех частиц системы можно рассчитать пространственную и временную эволюцию любых других структурных и термодинамических параметров системы, например, выполнить детальный анализ дефектов кристаллической структуры или фазовых превращений в материале и соотнести их с изменениями температуры и давления в системе.

Вполне вероятно применение метода МД как составной части многоуровневых численных моделей, предназначенных для описания разнообразных физических и химических процессов, протекающих при лазерной абляции, в широких диапазонах временных и пространственных масштабов.

Основное достоинство метода МД состоит в том, что для его использования необходимо определить лишь детали взаимодействий между отдельными атомами или молекулами в изучаемой системе (т. е. задать функцию потенциала взаимодействия между частицами) и не требуется каких-либо предположений о характере изучаемых процессов или макроскопических феноменологических законов, имеющих, как правило, сравнительно узкую область применимости. Это важное преимущество дает возможность с помощью метода МД проводить расчеты в таких условиях, где макроскопические феноменологические законы еще не установлены, а также выявлять в «компьютерном эксперименте» новые физические явления и процессы. Более того, в отличие от реального эксперимента МД-расчеты позволяют проводить анализ быстротекущих и неравновесных процессов и получать полную информацию об интересующем нас явлении, включая координаты и скорости отдельных атомов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение лазерного излучения для целей промышленной очистки и удаления ЛКП имеет большие перспективы в будущем. Но сложность процесса и вероятность разрушения обрабатываемого

образца требуют наличия предварительного математического моделирования данного процесса.

В данной работе совершена попытка последовательно и полноценно описать существующую картину физики процесса лазерного взаимодействия с твёрдым веществом, используя наиболее подходящие, на наш взгляд, подходы. Проведен системный анализ данной проблемы и выявлены сложности в реализации решения описанной задачи с указанием конкретных осложняющих факторов.

Показано, что большинство предлагаемых моделей нуждается в целом ряде поправочных коэффициентов экспериментального характера и не представляется возможным решить поставленную задачу аналитически. Таким образом, проблема взаимодействия лазерного излучения с твёрдым веществом в виде загрязнений поверхности или элементов лакокрасочных покрытий требует глубокого анализа внутренних физико-химических явлений, связанных с тепло- и массопереносом, а также разработки достаточно сложных математических моделей, позво-

ляющих рассчитать интенсивность протекания этих явлений.

В качестве альтернативных способов решения поставленной задачи моделирования процесса лазерной очистки можно рассмотреть получение на основе экспериментальных данных приближенных формул определения уносимой толщины поверхностного слоя при тепловом разрушении или применение методов молекулярной динамики.

Problems of mathematical modeling of laser cleaning in industry

I. I. Golovin¹⁾, I. V. Tsegelnik²⁾, S. I. Plankovskii³⁾

^{1), 2), 3)} National Aerospace University of N.E. Zhukovsky "HAI", 17, Chkalov Str, Kharkov, Ukraine 61070

The purpose of this article is to analyze existing approaches to mathematical modeling of processes accompanying laser cleaning of the workpiece surface to determine the best practices in their modeling. The widespread use of lasers for industrial cleaning and expensive experimental equipment are forced to search for alternative ways to study this problem. The problems arising from attempts to model the interaction of laser radiation with a removable material were considered and made an attempt to generalize mathematical description of the processes of laser heating and destruction. The analysis, using analytical methods of investigation identified the shortcomings of existing approaches for modeling of laser cleaning and determined the most appropriate direction for their further studies.

Keywords: ablation, the lacquer coating, the phase transition, the method of molecular dynamics.

Проблеми математичного моделювання процесів лазерного очищення в промисловості

І. І. Головін¹⁾, Є. В. Цегельник²⁾, С. І. Планковський³⁾

^{1), 2), 3)} Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», вул. Чкалова 17, м. Харків, Україна, 61070

Метою цієї статті є аналіз існуючих підходів до математичного моделювання процесів, що супроводжують лазерне очищення поверхні деталі для визначення раціональних методів при їх моделюванні. Широке застосування лазера для цілей промислового очищення й дорожняча експериментального обладнання змушують шукати альтернативних способів дослідження цієї проблеми.

У статті розглянуті проблеми, що виникають при спробах моделювання процесів взаємодії лазерного випромінювання з речовиною, що потребує видалення, й здійснена спроба узагальнення опису математичних процесів лазерного нагрівання й руйнування. У результаті аналізу при використанні аналітичних методів дослідження, були виявлені недоліки існуючих підходів при моделюванні процесів лазерного очищення й визначені найбільш прийнятні напрямки їх подальшого дослідження.

Ключові слова: абляція, лакофарбове покриття, фазовий перехід, метод молекулярної динаміки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вибір джерела лазерного випромінювання для цілей промислового очищення деталей авіаційної техніки [Текст] / С. І. Планковський, Є. В. Цегельник,

І. І. Головін, П. І. Мельничук // Наукоємні технології. – 2014. – № 4 (24). – С. 503 – 507.

2. Кузнецов П. М. Механизмы и закономерности форми-

рования эрозионного факела и волнового рельефа на поверхности металлов в зоне воздействия лазерного излучения [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 : защищена 26.06.2014 : утв. 18.09.2014 / Кузнецов Петр Михайлович. – Тамбов, 2014. – 132 с.

3. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика) [Текст] / В. П. Вейко, М. Н. Либенсон, Г. Г. Червяков, Е. Б. Яковлев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 312 с.

4. Действие мощных световых потоков на металлы [Текст] / С. И. Анисимов, А. М. Бонч-Бруевич, М. Я. Ельашевич [и др.] // Журнал технической физики. – 1966. – Т. 36, В. 7. – С. 1273 – 1284.

5. Действие излучения большой мощности на металлы [Текст] / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко. – М. : Наука, 1970. – 272 с.

6. Рэди Дж. Действие лазерного излучения [Текст] ; пер. с англ. / Дж. Рэди. – М. : Мир, 1974. – 468 с.

7. Вейко В. П. Лазерная обработка [Текст] / В. П. Вейко, М. Н. Либенсон. – Л. : Лениздат, 1973. – 191 с.

8. Разрушение металлов под действием излучения оптического квантового генератора [Текст] : отчет о НИР / Ин-т физики АН БССР ; рук. М. А. Ельашевич – Минск, 1963. – № КЭ – 14. – 260 с.

9. Анисимов С. И. Избранные задачи теории лазерной абляции [Текст] / С. И. Анисимов, Б. С. Лукьянчук // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 3. – С. 301 – 333.

10. Физическая энциклопедия [Текст] / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Советская энциклопедия, 1988. – Т. 3. – С. 347 – 349.

11. Nepomnyashchy A. A. Convective flows in a two-layer system with a temperature gradient along the interface [Текст] / A. A. Nepomnyashchy, I. B. Simanovskii // Physics of Fluids. – 2006. – Vol. 18, Iss. 6. – P. 032105-1-7.

12. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] ; учеб. пособие / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.

REFERENCES

1. Plankovskyy, S. I., Tsegelnyk, Ye.V., Golovin, I.I., & Melnychuk, P. I. (2014). Vybir dzherela lazernoho viprominiuvannia dlia tsylei promyslovoho ochyshchennia detalei aviatsiinoyi tehniky [The choice of laser sources for the purposes of industrial cleaning equipment aviation equipment]. Naukoymni tehnologii – Knowledge based technology, 4 (24), 503 – 507 [in Ukrainian].

2. Kuznetsov, P. M. (2014). Mekhanizmy I zakonmernosti formirovaniia erozionnoho fakela i volnovoho reliefa na poverkhnosti metallov v zone vozdeistviia lazernoho izlucheniia [The mechanisms and regularities of erosion torch and wave pattern on the surface of the metal in the area of laser irradiation]. Candidate's thesis. Tambov [in Russian].

3. Veyko, V. P., Libenson, M. N., Cherviakov, H. H., & Yakovlev, Ye. B. (2008). Vzaimodeistviie lazernoho izlucheniia s veshchestvom (silovaia optika) [Interaction of laser radiation with matter (power optics)]. Moscow: FIZMATLIT [in Russian].

4. Anisimov, S. I., Bonch-Bruевич, A. M., Yeliashevich, M. Ya. et al. (1966). Deistviie moshchnikh svetovikh potokov na metalli [The action of powerful light streams in metals]. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Journal of Technical Physics, 36, 7, 1273 – 1284 [in Russian].

5. Anisimov, S. I., Imas, Ya. A., Romanov, G. S., & Khodyko, Yu. V. (1970). Deistviie izlucheniia bolshoi moshchnosti na metalli [The effect of radiation of high power metal]. Moscow: Nauka [in Russian].

6. Redy, J. (1974). Deistviie lazernoho izlucheniia [Effects of laser radiation]. Moscow: Mir [in Russian].

13. Zahn, J.D. Two phase micromixing and analysis using electrohydrodynamic instabilities [Текст] / J. D. Zahn, V. Reddy // Microfluidics and Nanofluidics. – 2006. – Vol. 2, Iss. 5. – P. 399 – 415.

14. Bostanjoglo O. Hydrodynamic instabilities in laser pulse-produced melts of metal films [Текст] / O. Bostanjoglo, T. Nink // Journal of Applied Physics. – 1996. – Vol. 79, Iss. 11. – P. 8725 – 8729.

15. Григорьянц А. Г. Лазерная сварка металлов [Текст] / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов. – М. : Высшая школа, 1988. – 207 с.

16. Мисюров А. И. Технология лазерной наплавки [Текст] / А. И. Мисюров, Б. М. Федоров, И. Н. Шиганов. – М. : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 40 с.

17. Бойко В. И. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц [Текст] / В. И. Бойко, А. Н. Валяев, А. Д. Погребняк // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169, № 11. – С. 1243 – 1271.

18. Маненков А. А. Лазерное разрушение прозрачных твердых тел [Текст] / А. А. Маненков, А. Ж. Прохоров // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 148, № 1. – С. 179 – 208.

19. Мирзоев Ф. Х. Лазерное управление процессами в твердом теле [Текст] / Ф. Х. Мирзоев, В. Я. Панченко, Л. А. Шелешин // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 1. – С. 3 – 32.

20. Моделирование короткоимпульсной лазерной абляции методом молекулярной динамики: механизмы эжекции материала и формирования наночастиц [Текст] / Л. В. Жигилей [и др.] // Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество : монография / А. В. Булгаков [и др.]. – Новосибирск : ИТ СО РАН, 2009. – Гл. 7. – С. 147 – 220.

7. Veyko, V. P., & Libenson, M. N. (1973). Lazernaia obrabotka [Laser treatment]. Leningrad: Lenizdat [in Russian].

8. Yeliashevich, M. A. (1963). Razrushenie metallov pod deistviem izlucheniia opticheskoho kvantovoho heneratora [The destruction of the metal under the action of radiation in the optical maser]. Research Report. Minsk [in Russian].

9. Anisimov, S. I., & Lukiianchuk, B. S. (2002). Izbrannie zadachi teorii lazernoi abliatsii [Selected problems of laser ablation theory]. Uspekhi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences, 172, 3, 301 – 333 [in Russian].

10. Prokhorov, A. M. (Eds.). (1988). Fizicheskaiia entsiklopediia [Physical encyclopedia]. Vol. 3. Moscow: Sovetskaia entsiklopediia [in Russian].

11. Nepomnyashchy, A. A., & Simanovskii, I. B. (2006). Convective flows in a two-layer system with a temperature gradient along the interface. Physics of Fluids, 18, 6, 032105-1-7.

12. Loitsianskii, L. H. (2003). Mekhanika zhidkosti i haza [Fluid Mechanics]. Moscow: Drofa [in Russian].

13. Zahn, J. D., & Reddy, V. (2006). Two phase micromixing and analysis using electrohydrodynamic instabilities. Microfluidics and Nanofluidics, 2, 5, 399 – 415.

14. Bostanjoglo, O., & Nink, T. (1996). Hydrodynamic instabilities in laser pulse-produced melts of metal films. Journal of Applied Physics, 79, 11, 8725 – 8729.

15. Hrihoriantz, A. H., & Shihanov, I.N. (1988). Lazernaia svarka metallov [Laser welding of metals]. Moscow: Visshaia shkola [in Russian].

16. Misiurov, A. I., Fedorov, B. M., & Shihanov, I. N. (2004). Tekhnologiya lazernoi naplavki [The technology of laser cladding]. Moscow: Izd. MGTU im. N. E. Baumana [in Russian].
17. Boiko, V.I., Valiaev, A.N., & Pohrebniak, A.D. (1999). Modifikatsiia metallicheskih materialov impulsnymi moshchnymi puchkami enerhii [Metal modification by high-power pulsed particle beams]. Uspekhi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences, 169, 11, 1243 – 1271 [in Russian].
18. Manenkov, A. A., & Prokhorov, A. Zh. (1986). Lazernoe razrushenie prozrachnykh tverdikh tel [Laser damage in transparent solids]. Uspekhi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences, 148, 1, 179 – 208 [in Russian].
19. Mirzoev, F. Kh., Panchenko, V. Ya., & Shelepin, L. A. (1996). Lazernoe upravlenie protsessami v tverdom tele

[Laser control processes in solids]. Uspekhi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences, 166, 1, 3 – 32 [in Russian].

20. Zhihilei, L. V. et al. (2009). Modelirovanie korotkoimpulsnoi lazernoi abliatsii metodom molekuliarnoi dinamiki: mekhanizmi ezheksii materiala i formirovaniia nanochastits [Simulation of short-pulse laser ablation method of molecular dynamics: the material ejection mechanisms and the formation of nanoparticles]. Sintez nanorazmerikh materialov pri vozdeistvii moshchnikh potokov enerhii na veshchestvo – The synthesis of nanoscale materials under the influence of powerful energy flows on the substance. Bulhakov, A. V. et al. (Vol. 7). Novosibirsk: IT SO RAN [in Russian].