

химические реакции – аналоги искусственного фотосинтеза. Пока эффективность процесса на уровне 1 %. Экономический интерес он будет представлять при КПД 10 %.

Трудно предвидеть, но возможно в будущем представит интерес процесс радиолиза воды. Уже используется гидролиз воды для получения водорода в богатой электроэнергией Исландии. Избыток электроэнергии получается за счет использования геотермальной и гидроэнергии

Как видим, стремление получить водород экологически чистыми методами приводит к его удорожанию. При этом четко прослеживаются определенные тенденции. Во-первых, пытаются совместить функции технологий – наряду с получением водорода получить другие ценные продукты, например, сажу. Во-вторых, пытаются решить еще другие экологические проблемы, например, избавиться от мусора. Налицо также тенденция освоить процессы типа фотосинтеза. Сырья для получения водорода достаточно. Особое внимание следует обратить на переработку отходов. Например, из алюминиевой пищевой фольги легко получить водород  $2NaOH + 2H_2O + 2Al = 2NaAlO_2 + 3H_2$ . В этой реакции выделяется много тепла и образующийся алюминат натрия является ценным сырьем. Дело за сортировкой мусора.

### Литература

1. Materials for Hydrogen Production, Conversion, and Storage / F. Petermann [et al.]. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2023. – 746 p.

2. Солодова, Н. Л. Водород как перспективный энергоноситель. Современные методы получения водорода / Н. Л. Солодова, Р. Р. Минигулов, Е. А. Емельяничева // Вестн. Каз. технол. ун-та. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 137–140.

3. Романов, А. С. Водородная энергетика: сравнительный анализ способов получения водорода / А. С. Романов // Науч. зап. молодых исследователей. – 2023. – Т. 11, № 3. – С. 73–80.

УДК 004.942

### Компьютерное моделирование лазерной сварки

Афанасьев С. А., Кондратьева Н. А., Кухновец Д. В.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Компьютерное моделирование лазерной сварки является актуальной и перспективной задачей в современной промышленности. Был исследован*

*процесс лазерной сварки с использованием методов моделирования, доступных в языке программирования Delphi. Создано программное обеспечение для визуализации процесса сварки и проведения анализа различных параметров, влияющих на качество сварного шва. Результаты исследования полезны для оптимизации производственных процессов и повышения эффективности лазерной сварки в промышленности.*

С развитием современных технологий стала популярна лазерная сварка. Она характеризуется высокой плотностью мощности воздействия, кратковременностью, локальностью, бесконтактностью и возможностью сварки в разной среде. Поэтому проблематикой данной темы является возможностью облегчить процесс лазерной сварки, так как она требует большой точности в расчетах.

Физический процесс лазерной сварки ничем не отличается от простого нагрева. Лазерная сварка, как и любая другая характеризуется температурой, а само воздействие должно приводить к увеличению амплитуды тепловых колебаний решетки.

Особенностью лазерного нагрева является наличие нескольких температур. Когда же лазерное воздействие становится сильнее и менее продолжительнее, то понятие о температурах можно опустить.

Характеристиками лазерной сварки являются большая скорость нагрева и большие пространственные градиенты температуры, что становится причиной заметных отличий в течении процессов, которые происходят из-за лазерного нагрева. Главными физико-химическими характеристиками, которые позволяют решить инженерные задачи, связанные с лазерным излучением и взаимодействия его с веществами, являются: плавление, испарение, кристаллизация, термохимические реакции.

Рассмотрим основные особенности температурной кинетики при лазерном воздействии. Часть излучения лазера, которое падает на поверхность материала, впитывается, а еще часть отражается. Коэффициент отражения  $R$  показывает долю энергии падающего излучения, которая поглотится и будет использована для нагрева, а также он является безразмерным параметром, значение которого лежит от 0–1. В ИК-области коэффициент отражения зависит от электропроводности материала. Световая энергия, которая поглотилась, становится тепловой и приводит к нагреву материала. Нагревание может проходить с большой скоростью. Когда вещество нагрелось до температуры плавления, начинается плавление, для которого необходимо дополнительные энергетические затраты. Граница жидкой фазы идет в глубь материала. При необходимой плотности мощности лазерного излучения расплав нагревается выше температуры плавления и тогда происходит испарение поверхности до того, как вещество

успеет проплавиться на весомую величину. Испарение также требует дополнительных затрат энергии. Перенос тепла в веществе характеризуется процессами теплопроводности. Теплопроводность появляется при прямом соприкосновении отдельных частиц тела или самих тел, которые имеют разные температуры. В газах этот процесс происходит через диффузию молекул, а также атомов. В жидкостях или твердых телах – взаимодействие упругих волн. В проводниках перемещение энергии происходит через диффузию свободных электронов. Перенос через теплопроводность может иметь место тогда, когда в разных точках тела различная температура. Из этого следует, что через теплопроводность температура изменяется в пространстве и времени. Плавление при лазерной сварке рассматривают в рамках изотермического нагревания. В линейных режимах лазерного нагрева для определения температурного поля, надо иметь представление о распределении температуры в самом теле в начальный момент времени, его форму и размеры, закон теплового взаимодействия между поверхностью тела и внешней средой [1].

В реальных условиях зачастую характеристики процесса нагрева вещества лазером зависят от температуры, а также от ее пространственного распределения. Однако, аналитически решить такие задачи не получается. Составить аналитическое уравнение о распределении температурного поля можно, когда облучаемое вещество изотропно и гомогенно, а температурные зависимости оптических и теплофизических коэффициентов слабые, и еще источник тепла не меняется под действием температуры. Все это называется линейными режимами лазерного воздействия.

Рассмотрим решение задачи в аналитическом и компьютерном варианте, где требуется определить диапазон допустимых значений плотности мощности излучения для сварки «встык» двух пластин из фольги, из золота и хрома толщиной 0.1 мм излучением YAG: Nd лазера ( $\tau = 10^{-4}$  с). Будем считать, что до начала расплавления одной из пластин они теплоизолированы друг от друга, после чего температуры пластин в облученной области равны. Облученная область симметрична относительно сварного шва [2].

Для образования сварного соединения необходимо, чтобы оба металла достигли температуры плавления, но не начали испаряться. Плотность мощности лазерного излучения - это мощность, отнесенная к площади, на которой излучение сконцентрировано. Высокая плотность мощности достигается фокусировкой лазерного луча в маленькое пятно. Плотность мощности излучения, необходимую для нагревания каждого из металлов до температуры  $T$  в течение импульса излучения в условиях отсутствия между ними теплового контакта, определим из уравнения баланса энергий в расчете на единицу площади облученной области:

$$q_0 A \tau = \rho c h (T - T_H).$$

Отсюда

$$q_0 = \frac{\rho c h (T - T_H)}{A \tau}.$$

Вычисления показывают, что для Сг достижение температуры плавления требует плотности мощности излучения до  $q_0 = 1,47 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, для золота, по причине высокого коэффициента отражения, много больше –  $q_0 = 12,9 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Таким образом, при  $q_0 > 1,47 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> происходит плавление фольги Сг в облученной области. После этого будем считать температуру обоих металлов в облученной области одинаковой. Уравнение баланса энергий при этом имеет вид

$$q_0 (A_{Cr} + A_{Au}) \tau = (\rho_{Cr} c_{Cr} + q_{Au} c_{Au}) h (T - T_H).$$

Отсюда

$$q_0 = \frac{(\rho_{Cr} c_{Cr} + q_{Au} c_{Au}) h (T - T_H)}{(A_{Cr} + A_{Au}) \tau}. \quad (1)$$

Диапазон допустимых значений плотности мощности излучения определим следующим образом

$$\min\{q_0(T_{плCr}), q_0(T_{плAu})\} < q_0 < \max\{q_0(T_{кипCr}), q_0(T_{кипAu})\}.$$

Компьютерное моделирование в Delphi позволяет создать программу, которая будет выводить значения диапазона плотностей мощностей при лазерной сварке разных материалов разными лазерами. В формуле (1) используются:  $\rho$  – плотность материала;  $c$  – удельная теплоемкость;  $h$  – толщина сложенных вместе деталей;  $T$  – конечная температура;  $T_H$  – начальная температура;  $A$  – поглощательная способность материала;  $\tau$  – излучение лазера.

Если записать  $A = R - 1$ , то

$$q_0 = \frac{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2) h (T_{\text{кип(пл)}} - T_H)}{((R_1 - 1) + (R_2 - 1)) \tau}. \quad (2)$$

При написании программы учтены одиннадцать значений различных величин, входящих в формулу (2):  $\rho_1$  – плотность одного материала;  $\rho_2$  – плотность другого материала;  $c_1$  – удельная теплоемкость одного материала;  $c_2$  – удельная теплоемкость второго материала;  $h$  – толщина сложенных вместе деталей;  $T_{\text{кип}}$  – наименьшая температура кипения одного из материалов;  $T_{\text{пл}}$  – большая температура плавления одного из материалов;  $T_H$  – начальная температура веществ;  $R_1$  – коэффициент отражения одного материала;  $R_2$  – коэффициент отражения второго материала;  $\tau$  – излучение лазера.

Delphi относится к системам визуального программирования, где используется язык программирования Object Pascal. При создании пользовательского интерфейса поставленной задачи была разработана форма «Определение диапазона плотностей при лазерной сварке» с размещенными на ней компонентами. Выполнена пропись кодов для кнопок открытия документов. Далее, было сделано так, чтобы та информация, которая является постоянной, выводилась в компоненты автоматически через компоненты Edit. На рис. 1 показано, как для этого написаны документы формата \*.txt в стандартном приложении Блокнот для алюминия, железа, золота, кадмия, натрия, магния по следующему шаблону. Добавлены еще две переменные, предусмотрев вывод двух температур плавления и двух температур кипения.

После размещения на форму двух компонентов Memo было выполнено добавление еще двух компонента Edit и дописан код, который выводит в компоненты Edit соответствующие строки из Memo. Так как по условию задачи в расчетах необходимы величины «большая температура плавления» и «меньшая температура кипения», то пропишем в Button3 код, который выполняет сравнение и присваивание значений и расположим его непосредственно перед основным вычислением.

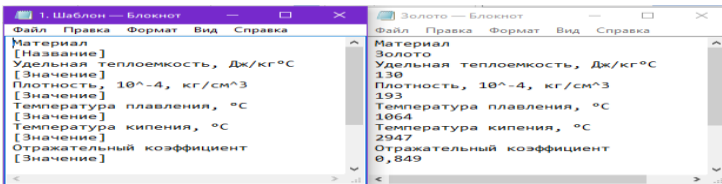


Рис.1. Шаблон документа для автоматического ввода данных

Обозначив за  $d$  и  $e$  – температуры плавления и кипения одного материала соответственно;  $l$  и  $n$  – температуры плавления и кипения другого материала соответственно, в данной части кода таким образом было налажено присвоение двум переменным:  $s$  – большая температура плавления,  $t$  – меньшая температура кипения. Для выполнения сварки требуется проверка условия: когда большая температура плавления превысит меньшую температуру кипения, то сварка станет невозможной. В программе было добавлено сравнение переменных  $s$  и  $t$ , с помощью описания еще одного элемента Мемо. На этом этапе с помощью программы в Delphi выполняются вычисления параметров сварки и делается вывод о ее возможности.

Для улучшения пользовательского интерфейса программы были добавлены: обработка события, когда какие-либо необходимые компоненты не заполнены; вывод результата не только в компоненты Edit, но и в Memo3; очистка всех полей для проведения новых расчетов; создан компонент Button4 для сохранения полученного результата, в программе размещен компонент SaveDialog и кнопка для сохранения выведенной информации в Memo3 и в документ с расширением \*.doc [3]. На рис. 2 показано, как после добавления переменных  $x$  и  $y$  для описания результатов измерений организован их вывод с фиксированным количеством знаков после запятой.

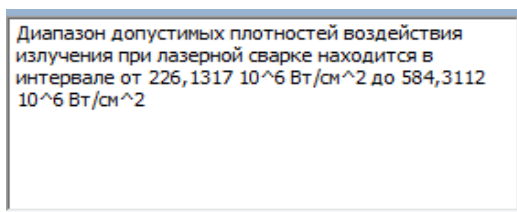


Рис. 2. Сообщение в поле Memo3, отражающее диапазон допустимых плотностей воздействия излучения при лазерной сварке

На рис. 3 показан итоговый результат работающей программы, с учетом перечисленных выше улучшений пользовательского интерфейса.

Были проделаны вычисления параметров лазерной сварки для различных материалов, построены зависимости мощности от изменения толщины элементов. В частности, для золота и меди, магния и натрия, золота и натрия. При лазерной сварке золота и меди, когда  $\tau = 10^{-4}$  с и начальная температура  $T_n = 30$  °C получены результаты минимальных и максимальных значений мощности воздействия в зависимости от толщины матери-

ла. На рис. 4 представлена зависимость мощности от изменения толщины пластины.

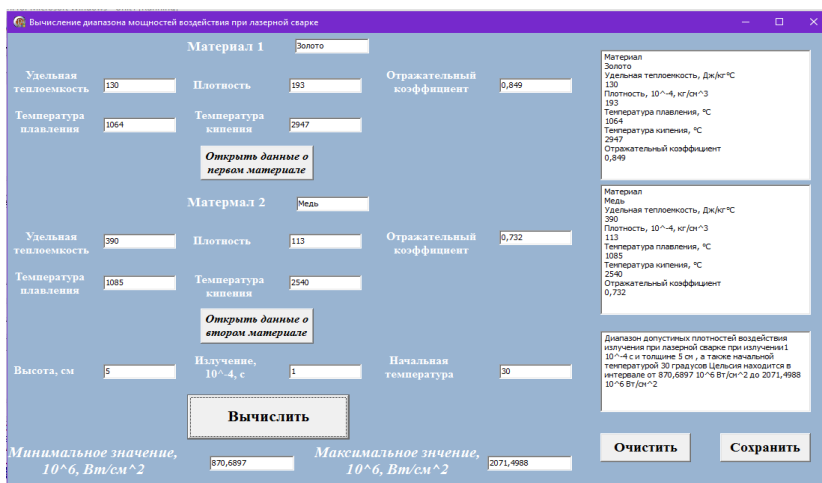


Рис. 3. Готовый интерфейс программы для расчета лазерной сварки

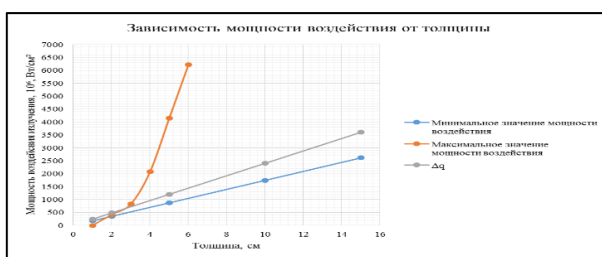


Рис. 4. Зависимость мощности воздействия лазерной сварки от толщины

Компьютерное моделирование взаимодействия элементов золота и натрия показывает, что сварка таких материалов невозможна. На рис. 5 представлен фрагмент вывода результата работы программы, где в расчетах получены значения, указывающие, что большая температура плавления превышает минимальную температуру кипения.

Материал
Золото
Удельная теплоемкость, Дж/кг°С
130
Плотность, 10 <sup>-4</sup> , кг/см <sup>3</sup>
193
Температура плавления, °С
1064
Температура кипения, °С
2947
Отражательный коэффициент
0,849
Материал
Натрий
Удельная теплоемкость, Дж/кг°С
1220
Плотность, 10 <sup>-4</sup> , кг/см <sup>3</sup>
9,68
Температура плавления, °С
98
Температура кипения, °С
886
Отражательный коэффициент
0,975
Сварка не возможна!

Рис. 5. Сообщение в результате работы программы о невозможности сварки

Таким образом выполнено компьютерное моделирование в программе Delphi для определения диапазона допустимых плотностей при лазерной сварке.

### Литература

1. Либенсон, М. Н. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: Конспект лекций / М. Н. Либенсон, Е. Б. Яковлев, Г. Д. Шандыбина. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 84 с.
2. Вейко, В.П. Сборник задач по лазерным технологиям / В. П. Вейко, Е. А. Шахно. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2007. – 67 с.
3. Архангельский, А. Я. Программирование в Delphi: Учебник по классическим версиям Delphi / А. Я. Архангельский. – М.: Бином-Пресс, 2013. – 816 с.

УДК 33.338.24, 001.895

### **Innovative technologies in the development of modern education**

Gulicheva E. G., Osipova M. S., Sysoeva E. A., Nikitina E. A., Masiagina V. N.  
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
Moscow, Russia

*The article explores innovative approaches to education for foreign students in technical universities, including the creation of a Digital educational plat-*