

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ-ПАЙКИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ

В.И. Исаев

issaev.vadim@gmail.com

В.П. Шапеев

shapeev.vasily@mail.ru

А.Н. Черепанов

ancher@itam.nsc.ru

ИТПМ СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация

Проведено численное исследование режимов лазерной сварки-пайки тонких прямоугольных пластин из сплавов титана и алюминия без применения припоя. В процессе пайки пластины находились в плотном контакте узкими гранями, а лазерный луч, направленный перпендикулярно поверхности титановой пластины, перемещался с постоянной скоростью параллельно плоскости поверхностей контакта пластин на некотором от нее расстоянии. В зависимости от этого расстояния значения мощности лазера и скорости перемещения луча подбирают так, чтобы титановая пластина проплавлялась по всей толщине, а паровой канал, образующийся в сварочной ванне, не достигал нижней поверхности титановой пластины. Более низкоплавкий металл (сплав алюминия) за счет теплопроводности титана нагревается выше температуры плавления алюминия, взаимодействует с его твердой поверхностью, образуя при дальнейшем охлаждении неразъемное паяное соединение с титаном. На основе предложенной теплофизической модели проведены расчеты параметров процесса для двух вариантов, обеспечивающих пайку пластин. В первом — при заданной мощности и скорости перемещения лазерного луча найдено расстояние от оси луча до поверхности контакта. Во втором — при фиксированном расстоянии рассчитана мощность и скорость лазерного луча, необходимые для пайки разнородных пластин

Ключевые слова

Численное моделирование, разнородные металлы, лазерная пайка, паяемый шов, интерметаллиды

Поступила 02.02.2024

Принята 02.05.2024

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации 121030500137-5 и АААА-А19-119051590004-5)

Введение. Современное машиностроение предъявляет возрастающие требования к конструкционным материалам, которые сочетают в себе различные свойства, такие как малый вес, высокую прочность и стойкость к внешним термическим и механическим воздействиям. Как правило, один материал не может соответствовать всем требованиям, поэтому необходима комбинация двух или более материалов. Для этого используют различные способы соединения изделий в единую конструкцию. В последние годы все большее внимание уделяется сварке с использованием лазера [1–5]. Она характеризуется высоким коэффициентом полезного действия, узкой зоной теплового воздействия на свариваемые материалы, малыми значениями остаточных напряжений и деформаций, что имеет важное значение при сварке термоупрочненных, композиционных и разнородных материалов [6–13]. При работе лазера в «кинжальном» режиме (с образованием парогазового канала) значения удельной энергии достигают более 108 кВт/м^2 . Под воздействием лазера металлы плавятся, образуя ванну с расплавом. При смешивании разнородных металлов в сварочной ванне в области шва возможно образование хрупких интерметаллидных фаз, что значительно снижает прочностные характеристики соединения. Для устранения этого дефекта применяют различные технологические приемы, например промежуточные вставки [7, 8]. Экспериментально в [11] показано, что сочетание высокой скорости и высокой плотности энергии может подавить рост интерметаллидной фазы. Для этого в [12, 13] при лазерной сварке пластин из разнородных металлов луч лазера направлялся на более тугоплавкую пластину на некотором расстоянии от поверхности их контакта. Для изучения особенностей сварки разнородных металлов и сплавов с использованием лазера широко применяют математические методы [14–16]. Тем не менее теплофизические аспекты процессов лазерного соединения материалов различного химического состава, склонных к образованию хрупких интерметаллидных фаз, остаются слабо изученными.

Цель работы — привести результаты исследования процесса лазерной сварки-пайки, применяемой для получения неразъемного соединения пластин из разнородных сплавов на основе титана и алюминия, с использованием численного моделирования. Показан расчет параметров процесса, при которых осуществляется пайка пластины из титанового сплава с легкоплавким материалом пластины из алюминиевого сплава без образования хрупких интерметаллидов в шве.

Схема пайки пластин. Рассмотрим соединение двух прямоугольных металлических пластин толщиной 3 мм из титана ВТ1-0 и алюминиевого сплава АМг3 с применением сварки-пайки и непрерывного CO_2 -лазера.

Для осуществления пайки лазерный луч направлен на титановую пластину, фокус луча находится на ее нижней поверхности и перемещается по ней параллельно поверхности контакта между пластинами на небольшом расстоянии l_c относительно него. Мощность лазера W и скорость перемещения луча V_w подбирают так, чтобы титановая пластина проплавлялась на всю толщину, но паровой канал не достигал ее нижней поверхности, а сварочная ванна находилась на некотором расстоянии от поверхности контакта. За счет теплопроводности титановой пластины нагревается поверхность контакта. В результате численного моделирования процесса и/или нескольких пробных физических экспериментов можно подобрать такие значения указанных параметров процесса, что на поверхности контакта достигается температура плавления алюминия. Если время взаимодействия расплава алюминия с поверхностью титановой пластины будет меньше периода ретардации, то на контакте не успеют образоваться интерметаллиды. Отметим, что для системы Ti + Al период ретардации при температуре алюминиевого расплава в диапазоне значений 700...900 °C составляет не менее 1 с.

Систему декартовых координат выберем с началом отсчета на пересечении оси лазерного луча с верхней поверхностью пластин (рис. 1). Ось x направим параллельно поверхности контакта пластин в направлении, обратном к направлению перемещения луча, ось y — перпендикулярно поверхности контакта, ось z — вдоль оси луча. Для вычислительных экспериментов применим 3D теплофизическую модель сварки-пайки металлических пластин с учетом фазовых переходов в области плавления и затвердевания в приближении задачи Стефана при соответствующих кра-

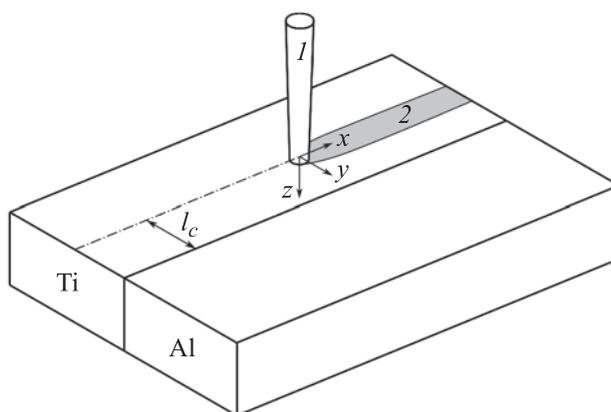


Рис. 1. Схема процесса сварки-пайки разнородных металлов:

1 — лазерный луч; 2 — зона (трек) проплавления металла лазерным лучом;

l_c — расстояние от лазерного луча до поверхности контакта

вых условиях лазерного нагрева и охлаждения пластин в результате их теплового взаимодействия с окружающей средой. Эта модель подробно описана в [17, 18], поэтому далее приведем только сокращенный вариант ее описания. Численный метод коллокации и наименьших квадратов, использованный для расчета теплопереноса при лазерной пайке, рассмотрен, например, в [19].

Модель лазерной сварки металлических пластин. Лазерная сварка представляет собой сложное сочетание физических процессов, которое трехмерно по пространству. Качество сварных швов при лазерной сварке-пайке металлических пластин определяется многими факторами и прежде всего мощностью лазера, положением оси и фокуса луча лазера относительно пластин, скоростью сварки — скоростью перемещения луча лазера по поверхности пластин, их материалом и размерами, типом соединения и т. п. Для разработки технологии лазерной сварки используют не только физический эксперимент, но и численное моделирование, основанное на математических моделях процесса, анализе количественных результатов, полученных расчетом по уравнениям модели. Здесь для решения задачи определения режимов лазерной сварки-пайки в целях осуществления пайки контакта между пластинами из сплавов алюминия и титана применена теплофизическая модель лазерной сварки «кинжальным» проплавлением тонких металлических пластин в квазистационарном режиме. Ранее эта модель использована авторами и верифицирована сравнением результатов, полученных при ее применении, с результатами физических экспериментов. Использовано несколько модификаций модели в зависимости от рассматриваемой задачи. Она применена для анализа процесса сварки пластин из однородных и неоднородных металлов, в том числе, когда между ними имелись композитные вставки из разнородных металлов [17, 18]. По одной из ее модификаций рассчитаны процессы неравновесной кристаллизации сварочного шва, когда в сварочную ванну вводились наноразмерные частицы тугоплавких материалов.

Для упрощения модели и алгоритма расчета в таком ее варианте во всей подобласти, занятой конкретной фазой, взяты значения ее теплофизических параметров, осредненные в рассматриваемых диапазонах значений температуры индивидуально для каждой фазы. Квазистационарный процесс теплопереноса в сварочной ванне и твердом металле в подвижной системе координат, перемещающейся вместе с лазером, описывается уравнением

$$c_i^j \rho_i^j V_w \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_i^j \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где c_i^j , λ_i^j , ρ_i^j — удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность i -й фазы (твердая фаза $i = 1$, жидкая фаза $i = 2$) j -го металла (для титана $j = 1$, для алюминия $j = 2$); $T(x, y, z)$ — температура частиц металла в расчетной области. Полагая, что двухфазная зона тонкая, заменяем ее поверхностью фазового перехода. Граница между твердой и жидкой фазами в j -м металле определяется по изотерме плавления (затвердевания) $T = T_m^j$. На поверхности фазового перехода требуется выполнение условия Стефана

$$\left(\lambda_2^j \frac{\partial T}{\partial n} \right)_2 - \left(\lambda_1^j \frac{\partial T}{\partial n} \right)_1 = \rho_1^j \kappa^j \mathbf{n} \cdot \mathbf{v},$$

где $-\lambda_1^j \partial T / \partial n$, $-\lambda_2^j \partial T / \partial n$ — потоки теплоты, вычисленные со стороны твердой и жидкой фаз; κ^j — теплота плавления (кристаллизации) j -го металла; \mathbf{n} — единичная нормаль к границе раздела фаз. На поверхности контакта между различными металлами j_1 и j_2 , находящимися в твердой фазе, требуются непрерывность температуры и условие равенства тепловых потоков с обеих сторон контакта:

$$\lambda_1^{j_1} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \lambda_1^{j_2} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}},$$

где \mathbf{n} — орт оси y . Краевая задача для уравнения теплопроводности (1) решается итерационно методом коллокации и наименьших квадратов [17, 18] на адаптивной сетке с переменным размером ячеек, которая сгущается в области больших градиентов температуры и становится разреженной на значительном удалении от сварочной ванны. Краевые условия для (1) на различных участках поверхности пластин моделируют тепловое взаимодействие зоны сварки с лазерным лучом и окружающей средой. Интенсивность излучения лазера имеет гауссово распределение. При превышении мощности лазера некоторого порогового значения в сварочной ванне в окрестности оси лазерного луча образуется парогазовый канал из паров металла. Теплопередача от лазера в область сварки-пайки через поверхность парового канала описывается краевым условием

$$-\lambda_2^1 \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = q_a + q_r + q_v,$$

где $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ — единичная нормаль к поверхности канала, направленная внутрь области жидкой фазы; q_a — поглощенный поток лазерного излучения без учета переотражения; q_r — поток теплоты, возникающий

в результате переотражения излучения от стенок канала; q_v — потери теплоты за счет испарения металла. Здесь использована самосогласованная модель парового канала [17, 18], размеры и форма которого корректируются в итерационном процессе его построения и расчета теплопереноса до момента установления распределения температуры во всей расчетной области.

В таком варианте модели в целях ее упрощения не рассматривается течение расплава в сварочной ванне, которое осуществляет конвективный перенос теплоты с передней стенки ванны на заднюю. В этой модели полагаем, как это делают некоторые исследователи в моделях лазерной сварки, что в ванне частицы сплава титана движутся плоскопараллельно. Эффект от конвективного переноса теплоты приближенно учитывается искусственным завышением в ванне коэффициента теплопроводности расплава титана.

Расчетная область расположена между плоскостями $z = 0$ и $z = d$. В качестве начального значения температуры во всей расчетной области задается температура окружающей среды. В процессе итераций зона сварки нагревается и теплота от нее переносится на периферийную часть расчетной области. Итерации прекращаются, когда модуль разности значения температуры в каждой ячейке расчетной сетки на двух последовательных итерациях станет меньше заданного малого значения ε .

Кроме описанных составляющих теплового взаимодействия изделия с окружающей средой, учитывается радиационный теплообмен нагретых пластин с окружающей средой, его контактный теплообмен с монтажным столом и потоком защитного инертного газа, которым обдувается зона сварки для предотвращения окисления металла в сварном шве. На боковых гранях пластин, удаленных от зоны сварки, ставится следующее условие: температура на них равна температуре окружающей среды.

Задачу, сформулированную как цель работы, можно решить путем нескольких расчетов температурного поля в пластинах, которое возникает под воздействием на них лазерного луча по приведенной на рис. 1 схеме. Для этого каждый раз необходимо решать трехмерное уравнение теплопроводности с указанными краевыми условиями. Изменяя от расчета к расчету величины W , V_w и l_c , следует наблюдать, при каких значениях этих параметров в процессе пайки на поверхности контакта будет температура плавления алюминия. Кроме того, следует определить, сколько времени сохраняется эта температура на поверхности контакта.

Результаты расчетов. Проведена серия расчетов по определению расстояния l_c от луча до контакта при заданных значениях мощности ла-

зера (1,9 кВт) и скорости перемещения луча (1,8 м/мин), при которых на поверхности контакта будет установлена температура плавления алюминия. Значения мощности и скорости перемещения луча заданы из условия «кинжального» проплавления титановой пластины [20]. Рассмотрен вариант определения мощности лазера при заданных значениях скорости и расстояния от луча до поверхности контакта, при которых на поверхности также будет устанавливаться температура плавления алюминия. Отметим, что в целях достижения высокой точности аппроксимации краевых условий задачи на боковых гранях изделия и достаточной точности выполнения баланса теплоты в расчетах взята большая периферийная по отношению к сварочной ванне часть расчетной области (ввиду некоторого влияния теплоотвода периферией на значения температуры в зоне пайки). Предусмотренный в численной реализации модели контроль закона сохранения энергии (баланса теплоты) в расчетной области показывает, что он выполняется в решении задачи с точностью не ниже 1 % мощности лазера. Результаты численных расчетов приведены на рис. 2–4, на которых показаны небольшая часть расчетной области с зоной пайки, положения характерных для моделируемого процесса изотерм на верхней поверхности пластин и в различных сечениях, дающие необходимую информацию для решения задачи. Штриховой линией обозначено положение поверхности контакта.

Согласно результатам первого пробного расчета при $l_c = 2$ мм (рис. 2, а) изотермы 648...800 °С расположены только на титановой пластине, а через поверхность контакта проходят изотермы с более низкой температурой. Другими словами, температурный режим при $l_c = 2$ мм не обеспечивает пайку.

В соответствии с результатами второго расчета $l_c = 1$ мм на рис. 2, б, в представлены полученные расчетом положения изотерм:

- 1) в плоскости $z = 0$ — на верхней поверхности пластин;
- 2) в поперечном сечении $x = 1$ мм, которое выбрано по оси x в том месте, где изотерма 3 имеет максимум по координате y .

Изотермы 650...850 °С расположены значительно ближе к поверхности контакта, чем в первом случае, но они также находятся только на титановой пластине, что прогнозирует отсутствие проплавления алюминия и образования неразъемного соединения. Следует отметить причину некоторого различия расположений изотерм на рис. 2, а и б: протяженность овалов, границами которых являются изотермы, в направлении оси x на рис. 2, б меньше, чем на рис. 2, а. Изотермы вблизи поверхности

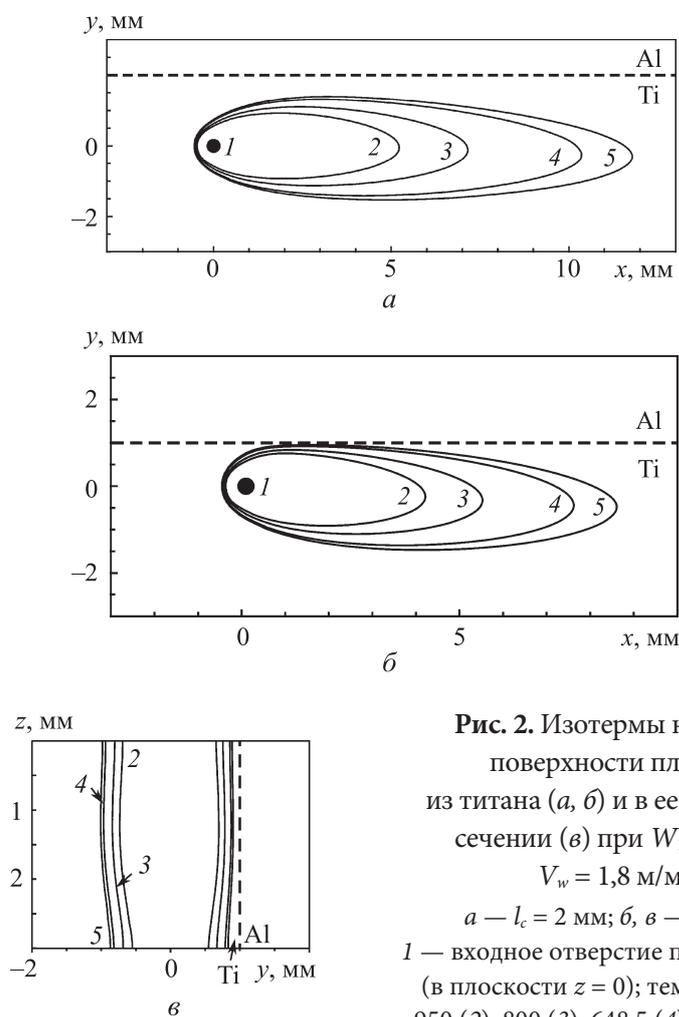


Рис. 2. Изотермы на верхней поверхности пластины из титана (*a*, *б*) и в ее поперечном сечении (*в*) при $W_1 = 1,9$ кВт, $V_w = 1,8$ м/мин: $a - l_c = 2$ мм; $б, в - l_c = 1$ мм; 1 — входное отверстие парового канала (в плоскости $z = 0$); температура, °С: 950 (2), 800 (3), 648,5 (4) (температура ликвидуса), 600 (5)

контакта на рис. 2, *б* расположены гуще; овалы соответствующих изотерм менее симметричны в поперечном направлении, чем на рис. 2, *а*. Градиент температуры в титановой пластине около поверхности контакта увеличился в результате того, что алюминий эффективнее отводит теплоту от высокотемпературной зоны, чем титан. В обоих случаях правые края овалов отстоят от поверхности контакта на большем расстоянии, чем ось лазерного луча. Этот эффект объясняется тем, что более холодная алюминиевая пластина охлаждает более нагретую титановую пластину. По мере продвижения луча в область за ним изотермы с более высокой температурой постепенно отодвигаются от поверхности контакта. Их место постепенно занимают изотермы с более низкой температурой, которые через поверхность контакта переходят на титановую пластину. Зона

около поверхности контакта в титановой пластине постепенно охлаждается, градиенты температуры в ней уменьшаются и она расширяется по мере увеличения координаты x . Охлаждение этой зоны более эффективно во втором случае, поскольку высокотемпературная зона ближе к алюминиевой пластине, чем в первом случае. Это также вызывает необходимость учета значительной области детали, периферийной по отношению к сварочной ванне и зоне пайки. В результате нескольких пробных расчетов нетрудно определить приближенно расстояние l_c , при котором через поверхность контакта пройдут изотермы из диапазона значений температуры 650...800 °С. Можно несколько сократить число таких попыток, применив операции численной интерполяции или экстраполяции результатов промежуточных расчетов. Параметры рассматриваемого реального процесса и его модели связаны между собой нелинейными зависимостями. При изменении какого-либо из параметров в небольших интервалах зависимость от него других параметров приближенно можно полагать линейной в пределах соответствующих небольших интервалов.

Согласно результатам анализа расположения изотерм, в следующих расчетах, приближая ось луча к поверхности контакта последовательно уменьшаемыми значениями l_c , можно добиться того, что через поверхность контакта пройдут изотермы из интервала 650...850 °С. Это связано с тем, что решение линейного уравнения теплопроводности вне окрестности линий разрыва коэффициента теплопроводности достаточно гладкое и там допустимы операции его интерполяции и экстраполяции. Следует отметить, что в таком случае, имея несколько рассчитанных значений температуры при малых значениях l_c в зависимости от координаты y , можно экстраполяцией вычислить положение оси луча. Применение таких приемов не редкость в вычислительной математике, в частности, к ним относится экстраполяция Ричардсона при решении линейных дифференциальных уравнений. Применяя экстраполяцию при решении этой задачи, можно сократить число необходимых как численных, так и физических экспериментов. В результате дополнительных расчетов определено новое значение $l_c = 0,5$ мм. Изотермы (рис. 3) получены в расчете для двух плоскостей:

- 1) в плоскости $z = 0$ — на верхней поверхности пластин;
- 2) в поперечном сечении $x = 0,5$ мм, которое выбрано в том месте по оси x , где у изотермы 3 максимальное значение координаты y .

Изотерма 4 пересекает поверхность контакта, а изотерма 3 практически касается ее. Это означает, что искомым (целевой) режим, обеспечивающий

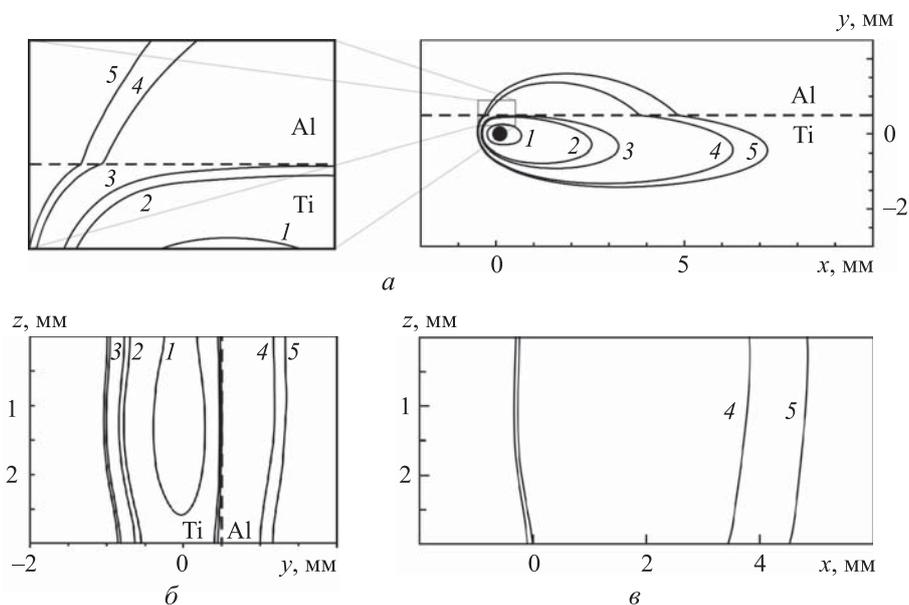


Рис. 3. Изотермы на верхней поверхности пластин и увеличенный фрагмент окрестности максимума координаты y на изотерме 3 (*a*), изотермы в сечениях $x = 0,5$ мм (*б*) и $y = 0,5$ мм (*в*) при $W_1 = 1,9$ кВт, $V_w = 1,8$ м/мин, $l_c = 0,5$ мм: температура, °C: 1668 (1), 950 (2), 800 (3), 648,5 (4) и 600 (5)

соединение пластин пайкой при заданных значениях мощности и скорости пайки, определяется значением $l_c = 0,5$ мм. Положение изотермы 1668 °C, при которой плавится сплав титана, показано на рис. 3, *a*, *б*. В таком случае между поверхностью контакта и указанной изотермой по всей толщине пластин есть тонкий слой нерасплавившегося титана, толщина значительной части которого составляет примерно 0,25 мм. Область (рис. 3, *в*) на поверхности контакта между передним и задним положениями изотермы 648,5 °C занимает расплавившийся алюминий. Зная значения координаты x на поверхности контакте и скорость сварки, оценим время t пребывания частиц алюминия в расплавленном состоянии. В результате $t_1 \approx 0,13$ с, что много меньше характерных периодов ретардации при взаимодействии жидкого алюминия с твердым нагретым титаном при рассматриваемой температуре. В этом случае процесс пайки происходит без образования хрупких интерметаллидных фаз в паяемом шве.

В этом варианте задачи при $V_w = 1,8$ м/мин и $l_c = 1$ мм поиск целевого режима пайки осуществляется определением мощности лазера W . В качестве первого приближения к целевому значению мощности взято значение $W_1 = 1,9$ кВт. Расположения изотерм в двух плоскостях в области

решения задачи с этим значением мощности показаны на рис. 2, б, в. Далее проведен вспомогательный расчет с мощностью $W_2 = 2,5$ кВт, результаты которого здесь не приведены.

Температура на поверхности контакта представляет собой непрерывную функцию мощности при ее непрерывном изменении и фиксированных параметрах процесса. С учетом этого и с применением линейной экстраполяции приближенно найдено обеспечивающее пайку пластин целевое значение мощности $W_3 = 2,28$ кВт. Точность результата зависит от степени близости используемых для этого значений W_1 и W_2 к значению W_3 . Это значение можно повысить, совершая необходимое число попыток — численных экспериментов, чтобы добиться большей близости указанных значений. Наличие более двух значений мощности позволяет формально применить и другой вид экстраполяции, теоретически более точный. Однако практически его точность, как и точность линейной экстраполяции, значительно зависит от точности измерений параметров физического процесса и задания входных данных решаемой задачи.

Полученные расположения изотерм в плоскости $z = 0$ (на верхней поверхности пластин) показаны на рис. 4. При пересечении поверхности контакта изотермы имеют излом вследствие скачка коэффициента теплопроводности. На увеличенном фрагменте картины распределения температуры около контакта (рис. 4, а) заметно, что через поверхность контакта проходят изотермы 650 и 800 °С. Изотермы 800...850 °С практически только касаются поверхности контакта, и имеет место искомый температурный режим пайки разнородных металлов (сплавов титана и алюминия). Важно, что на поверхности контакта температура меньше температуры плавления титана. В обоих случаях целевого температурного режима около поверхности контакта есть узкая зона с нерасплавившимся титаном.

В соответствии с результатами расчетов получаем $x = 0,5$ мм (координата точки первого по времени пересечения поверхности контакта изотермой 648,5 °С, когда она переходит из титановой пластины в алюминиевую), и $x = 4,5$ мм (координата точки, в которой она пересекает поверхность контакта в обратном направлении). Зная скорость V_w , оценим приблизительное время $t_2 \approx 0,13$ с, при котором алюминий на поверхности контакта находится в жидком состоянии. Этого времени достаточно для того, чтобы на поверхности контакта произошла пайка изделия алюминием, но не достаточно для образования интерметаллидов титана и алюминия.

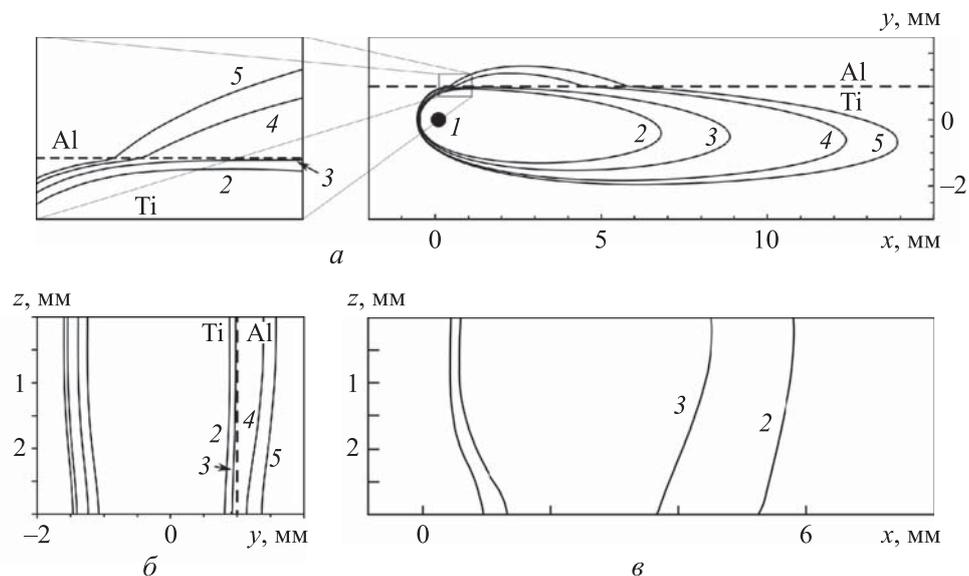


Рис. 4. Изотермы на верхней поверхности пластин и их увеличенный фрагмент (а), изотермы в сечениях $x = 2$ мм (б) и $y = 1$ мм (в) при $W = 2,28$ кВт, $V_w = 1,8$ м/мин, $l_c = 1$ мм:

1 — входное отверстие парового канала (в плоскости $z = 0$);
 температура, °С: 950 (2), 800 (3), 648,5 (4) и 600 (5)

Результаты экспериментов лазерного соединения титановой пластины с алюминиевой ($l_c = 0,5$ мм) со стороны титана, где также наблюдалось наличие тонкой узкой зоны с нерасплавившимся титаном около поверхности контакта, приведены в [10]. Установлено, что в верхней части поверхности контакта произошло смешивание расплавов титана с алюминием и образование интерметаллидов. В многочисленных экспериментальных и теоретических работах по сварке металлов лазером, мощность которого выше критического значения, отмечено следующее. В окрестности оси лазерного луча жидкий металл в ванне с расплавом закипает и в нем формируется паровой канал, из которого с большой скоростью истекают пары металла. Стенка канала гидродинамически неустойчива, она колеблется в результате воздействия на нее возмущений различной природы: колебаний мощности лазера, скорости движения расплава и др. При малых расстояниях от оси луча до поверхности контакта в верхней части ванны, где поперечный размер ванны наибольший, а расстояние от нее до поверхности контакта наименьшее, граница ванны в процессе колебаний местами может пересечь поверхность контакта. При этом произойдет смешивание расплава титана с алюминием. Это и наблюдалось в упомянутом эксперименте [10].

Возможно, рациональный режим для пайки тонких пластин из разнородных металлов будет более устойчив, если его определять вариацией мощности лазера при фиксированном расстоянии не менее 1,0 мм от оси луча до поверхности контакта.

Заключение. Численным моделированием с применением метода коллокаций и наименьших квадратов решения уравнений с частными производными решена задача определения параметров процесса лазерной пайки пластины из сплава алюминия с пластиной из сплава титана, обеспечивающей бездефектное соединение разнородных металлов. Показано, что вариацией мощности лазера или расстояния от его луча до поверхности контакта пластин при фиксированных параметрах задачи можно определить рациональный режим пайки пластин из сплавов титана и алюминия без образования интерметаллидов в паяемом шве. Адекватность проведенного численного моделирования решения поставленной задачи подтверждена сравнением полученных результатов с опубликованными результатами физических экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Martukanitz R.P. A critical review of laser beam welding. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5706, pp. 11–24. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.601655>
- [2] Auwal S.T., Ramesh S., Yusof F., et al. A review on laser beam welding of titanium alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 97, no. 1-4, pp. 1071–1098. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2030-x>
- [3] Fang Y., Jiang X., Mo D., et al. A review on dissimilar metals' welding methods and mechanisms with interlayer. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, vol. 102, no. 9-12, pp. 2845–2863. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03353-6>
- [4] Vaidya W.V., Horstmann M., Ventzke V., et al. Improving interfacial properties of a laser beam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications. *J. Mater. Sci.*, 2010, vol. 45, no. 22, pp. 6242–6254. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4719-6>
- [5] Chen S., Li L., Chen Y., et al. Improving interfacial reaction nonhomogeneity during laser welding-brazing aluminum to titanium. *Mater. Des.*, 2011, vol. 32, iss. 8-9, pp. 4408–4416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.074>
- [6] Li H., Cao H., Zhu Q., et al. Influence of welding process on microstructure and properties of laser welding of SiCp/6061 Al matrix composite. *Front. Mater.*, 2021, vol. 8. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.779324>
- [7] Cherepanov A.N., Mali V.I., Maliutina Iu.N., et al. Laser welding of stainless steel to titanium using explosively welded composite inserts. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 90, no. 9-12, pp. 3037–3043. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9657-2>

- [8] Baqer Y.M., Ramesh S., Yusof F. Challenges and advances in laser welding of dissimilar light alloys: Al/Mg, Al/Ti, and Mg/Ti alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 95, no. 5, pp. 4353–4369. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1565-6>
- [9] Martinsen K., Hu S.J., Carlson B.E. Joining of dissimilar materials. *CIRP Annals*, 2015, vol. 64, iss. 2, pp. 679–699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.006>
- [10] Malikov A., Vitoshkin I., Orishich A., et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded joints of Al–Cu–Li and Ti–Al–V alloys. *J. Manuf. Proc.*, 2020, vol. 53, pp. 201–212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.010>
- [11] Lee S.J., Nakamura H., Kawahito Y., et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of single-mode fiber laser lap-welded joint in Ti and Al dissimilar metals. *Trans. JWRI*, 2013, vol. 42, pp. 17–21.
- [12] Casalino G., D'Ostuni S., Guglielmi P., et al. Off-set and focus effects on grade 5 titanium to 6061 aluminum alloy fiber laser weld. *Materials*, 2018, vol. 11, iss. 11, art. 2337. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11112337>
- [13] Маликов А.Г., Оришич А.М., Витошкин И.Е. и др. Лазерная сварка разнородных материалов на основе титанового сплава ВТ20 и алюминиевого сплава В-1461. *Прикладная механика и техническая физика*, 2020, т. 61, № 2, с. 175–186. DOI: <https://doi.org/10.15372/PMTF20200218>
- [14] Petković D. Prediction of laser welding quality by computational intelligence approaches. *Optik*, 2017, vol. 140, pp. 597–600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.04.088>
- [15] Olabi A.G., Casalino G., Benyounis K.Y., et al. An ANN and Taguchi algorithms integrated approach to the optimization of CO₂ laser welding. *Adv. Eng. Softw.*, 2006, vol. 37, iss. 10, pp. 643–648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.02.002>
- [16] Olabi A.G., Alsinani F.O., Alabdulkarim A.A., et al. Optimizing the CO₂ laser welding process for dissimilar materials. *Opt. Lasers Eng.*, 2013, vol. 51, iss. 7, pp. 832–839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.01.024>
- [17] Черепанов А.Н., Шапеев В.П., Исаев В.И. Моделирование процессов теплопереноса при лазерной сварке разнородных металлов с использованием промежуточной вставки. *ТВТ*, 2015, т. 53, № 6, с. 885–890. EDN: UVERDT. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364415050087>
- [18] Isaev V.I., Cherepanov A.N., Shapeev V.P. Numerical study of Heat Modes of laser welding of dissimilar metals with an intermediate insert. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2016, vol. 99, pp. 711–720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.019>
- [19] Isaev V.I., Shapeev V.P. High accuracy versions of the collocations and least squares method for the numerical solution of the Navier — Stokes equations. *Comput. Math. and Math. Phys.*, 2010, vol. 50, no. 10, pp. 1670–1681. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542510100040>
- [20] Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М., Машиностроение, 1989.

Исаев Вадим Исмаилович — канд. физ.-мат. наук, лаборант ИТПМ СО РАН (Российская Федерация, 630090, Новосибирск, Институтская ул., д. 4/1).

Шапеев Василий Павлович — д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник ИТПМ СО РАН (Российская Федерация, 630090, Новосибирск, Институтская ул., д. 4/1).

Черепанов Анатолий Николаевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник ИТПМ СО РАН (Российская Федерация, 630090, Новосибирск, Институтская ул., д. 4/1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Исаев В.И., Шапеев В.П., Черепанов А.Н. Численное моделирование лазерной сварки-пайки сплавов на основе титана и алюминия. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 5 (116), с. 15–32. EDN: OAHCDR

NUMERICAL SIMULATION IN LASER WELDING-SOLDERING OF THE TITANIUM AND ALUMINUM ALLOYS

V.I. Isaev

issaev.vadim@gmail.com

V.P. Shapeev

shapeev.vasily@mail.ru

A.N. Cherepanov

ancher@itam.nsc.ru

**Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation**

Abstract

The paper presents results of studying the modes in laser welding-soldering of the thin rectangular plates made of titanium and aluminum alloys without using a solder. The plates in soldering were in tight contact with the narrow edges. The laser beam was directed perpendicular to the titanium plate surface. It was moved at a constant speed parallel to the plates contact plane at a certain distance from it. Depending on this distance, the laser power and the beam displacement rate values were selected in such a way that the titanium plate should melt through its entire thickness, and the vapor channel formed in the weld pool was not reaching the titanium plate lower surface. The lower-melting metal (aluminum alloy), due to the titanium thermal conductivity, was heating above the aluminum melting point, was interacting with its solid surface and forming a permanent

Keywords

Numerical simulation, dissimilar metals, laser soldering, soldered seam, intermetallics

brazed joint with titanium upon further cooling. Based on the proposed thermophysical model, the process parameters were computed for two options ensuring the plates soldering. The first showed that at a given power and speed of the laser beam displacement, the distance from the beam axis to the contact surface was found. The second demonstrated that the laser beam power and speed required in soldering the dissimilar plates were computed for a fixed distance

Received 02.02.2024

Accepted 02.05.2024

© Author(s), 2024

The work was carried out within the framework of a State Assignment (registration number 121030500137-5 and AAAAA-A19-119051590004-5)

REFERENCES

- [1] Martukanitz R.P. A critical review of laser beam welding. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5706, pp. 11–24. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.601655>
- [2] Auwal S.T., Ramesh S., Yusof F., et al. A review on laser beam welding of titanium alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 97, no. 1-4, pp. 1071–1098. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2030-x>
- [3] Fang Y., Jiang X., Mo D., et al. A review on dissimilar metals' welding methods and mechanisms with interlayer. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, vol. 102, no. 9-12, pp. 2845–2863. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03353-6>
- [4] Vaidya W.V., Horstmann M., Ventzke V., et al. Improving interfacial properties of a laser beam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications. *J. Mater. Sci.*, 2010, vol. 45, no. 22, pp. 6242–6254. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4719-6>
- [5] Chen S., Li L., Chen Y., et al. Improving interfacial reaction nonhomogeneity during laser welding-brazing aluminum to titanium. *Mater. Des.*, 2011, vol. 32, iss. 8-9, pp. 4408–4416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.074>
- [6] Li H., Cao H., Zhu Q., et al. Influence of welding process on microstructure and properties of laser welding of SiCp/6061 Al matrix composite. *Front. Mater.*, 2021, vol. 8. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.779324>
- [7] Cherepanov A.N., Mali V.I., Maliutina Iu.N., et al. Laser welding of stainless steel to titanium using explosively welded composite inserts. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 90, no. 9-12, pp. 3037–3043. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9657-2>
- [8] Baqer Y.M., Ramesh S., Yusof F. Challenges and advances in laser welding of dissimilar light alloys: Al/Mg, Al/Ti, and Mg/Ti alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 95, no. 5, pp. 4353–4369. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1565-6>
- [9] Martinsen K., Hu S.J., Carlson B.E. Joining of dissimilar materials. *CIRP Annals*, 2015, vol. 64, iss. 2, pp. 679–699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.006>

- [10] Malikov A., Vitoshkin I., Orishich A., et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded joints of Al–Cu–Li and Ti–Al–V alloys. *J. Manuf. Proc.*, 2020, vol. 53, pp. 201–212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.010>
- [11] Lee S.J., Nakamura H., Kawahito Y., et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of single-mode fiber laser lap-welded joint in Ti and Al dissimilar metals. *Trans. JWRI*, 2013, vol. 42, pp. 17–21.
- [12] Casalino G., D’Ostuni S., Guglielmi P., et al. Off-set and focus effects on grade 5 titanium to 6061 aluminum alloy fiber laser weld. *Materials*, 2018, vol. 11, iss. 11, art. 2337. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11112337>
- [13] Malikov A.G., Orishich A.M., Vitoshkin I.E., et al. Laser welding of dissimilar materials based on VT20 titanium and V-1461 aluminum alloys. *J. Appl. Mech. Tech. Phy.*, vol. 61, no. 2, pp. 307–317. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894420020182>
- [14] Petković D. Prediction of laser welding quality by computational intelligence approaches. *Optik*, 2017, vol. 140, pp. 597–600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.04.088>
- [15] Olabi A.G., Casalino G., Benyounis K.Y., et al. An ANN and Taguchi algorithms integrated approach to the optimization of CO₂ laser welding. *Adv. Eng. Softw.*, 2006, vol. 37, iss. 10, pp. 643–648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.02.002>
- [16] Olabi A.G., Alsinani F.O., Alabdulkarim A.A., et al. Optimizing the CO₂ laser welding process for dissimilar materials. *Opt. Lasers Eng.*, 2013, vol. 51, iss. 7, pp. 832–839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.01.024>
- [17] Cherepanov A.N., Shapeev V.P., Isaev V.I. Simulation of heat transfer processes in laser welding of dissimilar metals with an insert. *High Temp.*, 2015, vol. 53, no. 6, pp. 841–846. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X15050089>
- [18] Isaev V.I., Cherepanov A.N., Shapeev V.P. Numerical study of Heat Modes of laser welding of dissimilar metals with an intermediate insert. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2016, vol. 99, pp. 711–720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.019>
- [19] Isaev V.I., Shapeev V.P. High accuracy versions of the collocations and least squares method for the numerical solution of the Navier — Stokes equations. *Comput. Math. and Math. Phys.*, 2010, vol. 50, no. 10, pp. 1670–1681. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542510100040>
- [20] Grigoryants A.G. Osnovy lazernoy obrabotki materialov [Basics of laser materials processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989.

Isaev V.I. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Laboratory Assistant, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Institutskaya ul. 4/1, Novosibirsk, 630090 Russian Federation).

Shapeev V.P. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Institutskaya ul. 4/1, Novosibirsk, 630090 Russian Federation).

Cherepanov A.N. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Institutskaya ul. 4/1, Novosibirsk, 630090 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Isaev V.I., Shapeev V.P., Cherepanov A.N. Numerical simulation in laser welding-soldering of the titanium and aluminum alloys. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 5 (116), pp. 15–32 (in Russ.). EDN: OAHCDR