

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ-ПАЙКИ ВНАХЛЕСТ ПЛАСТИН ИЗ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ

О.А. Шмагунов¹

shmag@itam.nsc.ru

В.П. Шапеев²

shapeev.vasily@mail.ru

¹ ИТПМ СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

² НГУ, Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация

Разработанная математическая модель для численного исследования теплофизических процессов лазерной сварки применена к моделированию сварки внахлест пластин из титана и алюминия. Исследовано влияние мощности лазера и скорости сварки на распределение температуры в расчетной области и осуществлен поиск оптимальных режимов сварки. Для получения количественных характеристик процесса использован многократно опробованный численный метод коллокации и наименьших квадратов решения дифференциальных и интегральных уравнений, реализованный в программном комплексе *Laser Welding3D*. Задача решена в трехмерной постановке с учетом теплообмена с окружающей средой и образования парогазового канала в зоне сварки. Моделирование проведено для различного порядка расположения пластин в широком диапазоне значений мощности лазера и скорости перемещения пластин относительно лазерного луча. Показано, что выбор порядка расположения пластин влияет на характеристики полученного соединения. Определен диапазон режимов, при которых достигается оптимальный режим сварки-пайки титана и алюминия, когда температура в зоне контакта превышает температуру плавления алюминия, но меньше температуры плавления титана. Такой режим позволяет получить неразъемное соединение без хрупких интерметаллидных фаз, ухудшающих качество соединения. Выполнено сравнение с экспериментом. Результаты могут быть использованы для раз-

Ключевые слова

Численное моделирование, теплоперенос, разнородные металлы, лазерная сварка, лазерная пайка, интерметаллиды

работки эффективной технологии получения нахлесточного соединения пластин из титана и алюминия	Поступила 03.10.2025
с использованием лазерной сварки	Принята 12.12.2025
	© Автор(ы), 2026

*Работа выполнена в рамках государственного задания
ИТПМ СО РАН (№ 124021400039-8)*

Введение. Соединения титана с алюминием широко применяют для изготовления лопаток газовых турбин, пустотелых и ребристых сварных конструкций, топливных, масляных и терморегулирующих систем в авиационной, автомобильной и других отраслях промышленности. Они сочетают легкость алюминия и прочность титана. Используемая для получения соединений клепочная технология обеспечивала очень низкую скорость соединения (до 0,3 м/мин), поэтому возникла необходимость замены ее сваркой, скорость которой может достигать 4 м/мин. При достаточной толщине свариваемых деталей следует применять стыковую сварку, которая позволяет экономить материал, ранее расходовавшийся на напуск. Этому посвящено достаточное число экспериментальных [1–4] и численных [5] работ. Однако для тонких пластин (< 1...2 мм) сварка встык ненадежна, особенно учитывая усадку, поэтому предпочтительнее соединение внахлест.

Используемые технологии нахлесточного соединения (теплопрессовые, механические, термомеханические) [6, 7] обеспечивают прочное соединение, но громоздки и не универсальны. Необходима эффективная технология нахлесточного соединения титана и алюминия лазерной сваркой ввиду ее прецизионности и высокой скорости. По сравнению со сваркой встык такой метод сварки проще, позволяет получать достаточно прочное соединение, особенно когда соединение проваривается с двух сторон, и дает небольшую усадку. Кроме того, сварка внахлест обеспечивает более высокую прочность готового изделия на изгиб. Кроме соединения деталей, сварку внахлест можно использовать, например, для защиты тонким листом алюминия поверхности пористого титана или пористого алюминия, которые становятся все более востребованными в машиностроении.

Проблемам лазерной сварки титана и алюминия посвящены работы [8, 9], а также большое число экспериментальных работ, в том числе сварке внахлест [10–13]. В них показано, что основная проблема лазерной сварки титана и алюминия — появление в зоне затвердевшего расплава хрупких интерметаллидных фаз $TiAl$, $TiAl_3$ ¹, существенно снижающих

¹ Лякишев Н.П., ред. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3 т. М., Машиностроение, 1996–2000.

прочность шва. Прочность соединения можно увеличить с использованием промежуточных вставок [14] или последующей тепловой обработки [15]. Тем не менее одним из наиболее популярных подходов к решению проблемы является поиск режимов сварки, позволяющих минимизировать образование хрупких соединений.

Цель работы — найти такие температурные режимы, при которых в зоне контакта будет плавиться только алюминий, а продолжительность контакта его расплава с поверхностью твердого титана будет меньше времени ретардации (образования хрупких соединений), которое для пары титан–алюминий² при температуре 700...800 °С не превышает 15 с. При увеличении температуры до 900 °С время ретардации уменьшается до 1 с, после чего в зоне контакта начинают образовываться соединения $TiAl_3$. Таким образом, речь идет о режиме сварки-пайки, когда расплав алюминия смачивает поверхность титановой пластины и, застывая, создает неразъемное соединение. Поиск таких режимов проще осуществлять компьютерным моделированием. Здесь эта задача решается численным моделированием процесса теплопроводности, который имеет место при воздействии лазером на одну из пластин создаваемого композита. Для этого используется теплофизическая модель, которая многократно применялась для расчета параметров и температурного поля, возникающих в процессе сварки встык пластин из различных однородных и неоднородных металлов [16, 17], в том числе при наличии между пластинами тонкой многослойной композитной вставки. Для получения количественных характеристик модели процесса пайки использован численный метод коллокации и наименьших квадратов (КНК) решения дифференциальных и интегральных уравнений [18], реализованный в программном комплексе *Laser Welding3D*.

Схема лазерной сварки-пайки. Расчеты температурных полей для определения параметров режима пайки изделия выполнены для двухслойного композита из пластин титана и алюминия, уложенных одна на другую (рис. 1). Рассмотрены оба варианта очередности расположения пластин. Лазерный луч воздействует на ту пластину, которая находится сверху.

Введем декартову систему координат, в которой лазерный луч направлен перпендикулярно поверхности композита. Ось луча полагаем неподвижной, а пластины — перемещающимися относительно нее с постоянной скоростью сварки V_w . Начало координат поместим на верхней

² Волченко В.Н., ред. Сварка и свариваемые материалы: справочник. В 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов. М., Металлургия, 1991.

поверхности пластин, на оси луча. Ось z направим вниз вдоль оси луча, x — вдоль верхней поверхности в направлении перемещения пластин, y — перпендикулярно направлению перемещения пластин.

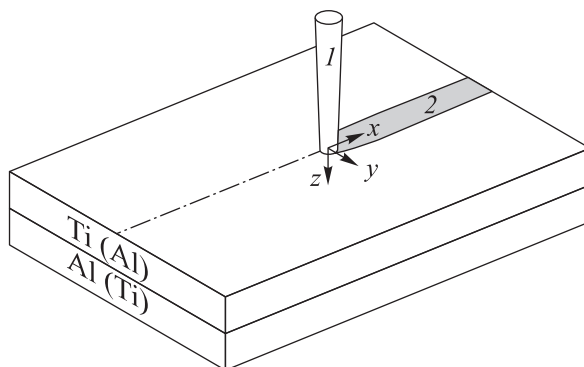


Рис. 1. Схема сварки-пайки пластин титана и алюминия:

1 — лазерный луч; 2 — зона проплавленного металла

Для исключения окисления металла пластины обдуваются инертным газом (гелием). Для упрощения задачи полагаем, что теплофизические параметры металлов постоянны и равны их средним значениям в рассматриваемом интервале температуры для каждой фазы^{3,4}.

Для моделирования теплопереноса в изделии, нагретом под воздействием лазера, используем теплофизическую модель лазерной сварки-пайки с учетом наличия парового канала в сварочной ванне в малой окрестности оси луча лазера, подробно описанную и верифицированную в [16–18] (см. соответствующую библиографию). В ней теплоперенос от луча, парового канала и сварочной ванны на периферию изделия моделируется трехмерным уравнением теплопроводности с краевыми условиями на границах расчетной области, соответствующими тепловому взаимодействию композита как с лазером, так и с окружающей средой. С учетом принятых допущений уравнение теплопереноса в подвижной системе координат примет вид

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

³ Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. ред. Физические величины: справочник. М., Энергоатомиздат, 1991.

⁴ Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник. М., Металлургия, 1989.

где c_i , ρ_i , λ_i — удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности твердой ($i = 1$) и жидкой ($i = 2$) фаз для каждого металла; V_w — скорость перемещения луча (сварки); T — температура в точке (x, y, z) . Процесс плавления рассмотрим в приближении задачи Стефана, поскольку при высоких градиентах температуры зона фазового перехода при плавлении представляет собой тонкий слой, толщина которого много меньше характерного размера сварочной ванны и всей зоны сварки. В рамках этого приближения граница фазового перехода полагается гладкой поверхностью, соответствующей изотерме плавления, на которой выполняется условие Стефана:

$$\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_2 - \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_1 = \kappa \rho_1 v_n.$$

Здесь κ — теплота плавления (кристаллизации); v_n — скорость перемещения границы плавления по нормали к ее поверхности в рассматриваемой точке. На границе между металлами в твердой фазе требуются непрерывность температуры и равенство тепловых потоков:

$$\lambda_1^{\text{Al}} \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_1^{\text{Ti}} \frac{\partial T}{\partial n},$$

где λ_1^{Al} , λ_1^{Ti} — коэффициенты теплопроводности алюминия и титана в твердой фазе; нормаль направлена перпендикулярно границе контакта. На поверхности парового канала теплопередача описывается формулой

$$\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial n} = q_a + q_r + q_v,$$

где производная от температуры берется по нормали к поверхности канала; q_a, q_r, q_v — тепловые потоки от поглощения лазерного излучения, его переотражения от стенок канала и испарения металла. На верхней и нижней поверхностях пластин ставятся условия конвективной и радиационной теплоотдачи, на краях пластин — равенство температуры металла и окружающей среды. Для расчета поля температуры в изделии и границ между твердой и жидкой фазами использована равновесная модель затвердевания металла. Для моделирования поведения расплава в сварочной ванне принято допущение, что все частицы в ней движутся по прямым траекториям, параллельным оси x . Более интенсивный по сравнению с твердым сплавом теплоперенос расплавом высокой температуры от парового канала к стенкам ванны моделируем относительно увеличенным коэффициентом теплопроводности материала. В качестве

начального значения температуры задаем температуру окружающей среды. Задача решается итерационно, пока изменение температуры в каждой ячейке расчетной сетки не станет меньше заданного малого параметра ε . Более подробное описание краевых условий для уравнения (1) в расчетной области можно найти в [16].

Результаты моделирования. Проведены расчеты сварки внахлест двух пластин из чистого титана и алюминия размером 55×20 мм и толщиной 1 мм каждая с использованием непрерывного CO_2 -лазера при различном порядке расположения пластин и варьируемых значениях мощности лазера W и скорости перемещения пластин V_w . Рассмотрен диапазон значений параметров, характерный для лазерной сварки, отдаленно предпочтение режимам, при которых на границе контакта пластин температура превышала температуру плавления алюминия, но была недостаточной для плавления титана, т. е. осуществлялся режим сварки-пайки. В случае расположения алюминиевой пластины сверху это реализовано за счет сквозного проплавления верхней пластины, а в случае титановой пластины сверху — за счет теплопроводности в титане, когда изотерма, соответствующая температуре плавления алюминия, заходила в алюминиевую пластину, но изотерма плавления титана до нее не доходила. В обоих случаях расплав алюминия смачивал твердую поверхность титана, что, согласно [19], достаточно для припайки друг к другу пластин с предварительно зачищенными поверхностями. Если время взаимодействия при такой температуре меньше времени ретардации (для $\text{Ti} + \text{Al}$ при температуре алюминиевого расплава $700 \dots 900$ °C превышает 1 с), то на границе контакта пластин хрупкие соединения не успевают образоваться. В результате расчетов получено распределение температуры при различных значениях W , V_w и положение изотерм в композите.

Первая задача: определение предпочтительного порядка расположения пластин в композите. Проведена серия расчетов при одинаковых значениях W и V_w , в одних расчетах луч направлен на пластину титана ($\text{Ti} + \text{Al}$), в других — на пластину алюминия ($\text{Al} + \text{Ti}$). Получившиеся распределения температуры в сечениях $y = 0$ (плоскость движения луча) и $x = 0,5$ мм (поперечное сечение, отстающее от луча на 0,5 мм) приведены на рис. 2 (показана только часть расчетной области). Для наглядности масштаб по оси x уменьшен в 4 раза, по y — в 2 раза. Приведенные изотермы соответствуют температуре кипения титана 3 560 К, температуре кипения алюминия 2 792 К, температуре плавления титана 1 943 К и плавления алюминия 933,5 К. Для полноты картины добавлены некоторые изотермы с меньшей температурой.

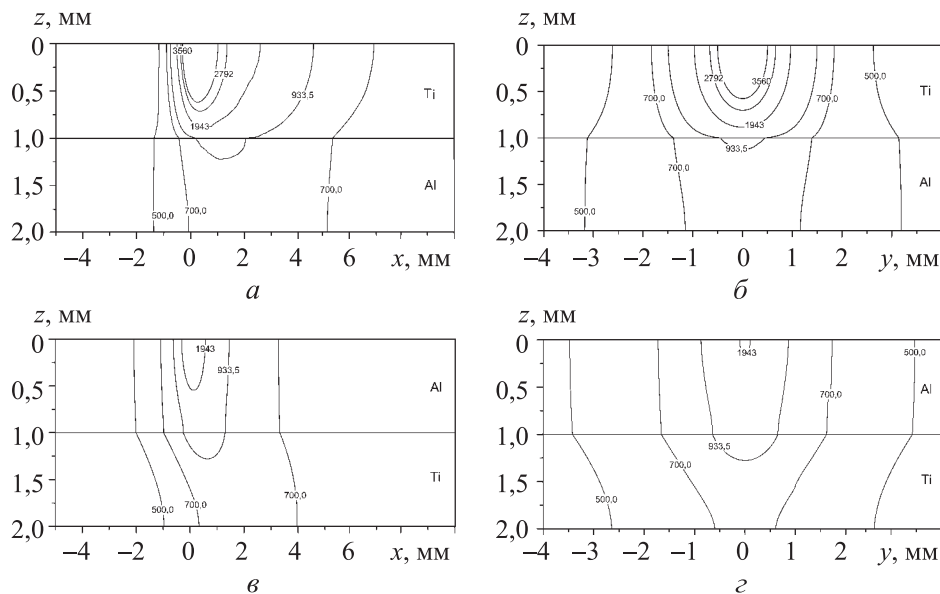


Рис. 2. Распределения температуры в конфигурациях Ti + Al (а, б) и Al + Ti (в, г) в сечениях $y = 0$ (а, в) и $x = 0,5$ мм (б, г) при мощности лазера $W = 1$ кВт и скорости $V_w = 0,02$ м/с

В обеих конфигурациях реализуется режим пайки, т. е. в зоне контакта пластин плавится только алюминий, но при тех же значениях параметров ширина ванны расплава в конфигурации Al + Ti больше, чем в конфигурации Ti + Al. Очевидно, это связано с тем, что титан хуже проводит теплоту, поэтому зона контакта нагревается сильнее. Оценим интервал времени, в котором алюминий находится в расплавленном состоянии в обоих случаях. В этой постановке задачи координата x пропорциональна времени ($\Delta x = V_w \Delta t$), поэтому ширину зоны расплава по x необходимо разделить на скорость движения пластин относительно луча V_w . В случае конфигурации Ti + Al (рис. 2, а) ширина указанной зоны 1,9 мм, поэтому время нахождения алюминия в жидкой фазе примерно 95 мс. В случае Al + Ti (рис. 2, в) значения этих величин равны 1,5 мм и ~ 75 мс соответственно. Для Al + Ti время существования расплава чуть меньше, но в обоих случаях оно намного меньше характерного времени ретардации при взаимодействии жидкого алюминия с твердым нагретым титаном при этой температуре (~ 1 с), т. е. процесс пайки происходит без существенного образования хрупких интерметаллидов в зоне контакта. На выбор порядка расположения пластин в композите также может повлиять комбинирование пайки с технологиями упрочнения поверхности, например, с помощью тугоплавких соединений [20]. Соответственно,

та пластина, поверхность которой будет дополнительно упрочняться, должна быть расположена сверху.

Вторая задача: определение диапазона параметров, при которых реализуется режим пайки. Проведена серия расчетов при мощности лазера $W = 1$ кВт и различных значениях скорости сварки V_w для обоих вариантов расположения пластин. Значение скорости сварки от расчета к расчету изменялось с шагом $0,005$ м/с. Крайние случаи, при которых реализуется режим пайки, т. е. когда изотерма температуры плавления алюминия ($933,5$ К) пересекает границу контакта пластин, а изотерма температуры плавления титана (1943 К) не доходит до нее, показаны на рис. 3. В конфигурации Ti + Al соответствующий диапазон скоростей V_w составляет $0 \dots 0,025$ м/с. В конфигурации Al + Ti мощности лазера 1 кВт оказалось недостаточно для приближения изотермы плавления титана к границе между пластинами даже для неподвижных пластин ($V_w = 0$). Дополнительные расчеты позволили определить, что при $V_w = 0$ значение мощности лазера W , при котором реализуется пайка, принадлежит интервалу $1,15 \dots 1,20$ кВт (рис. 3, в).

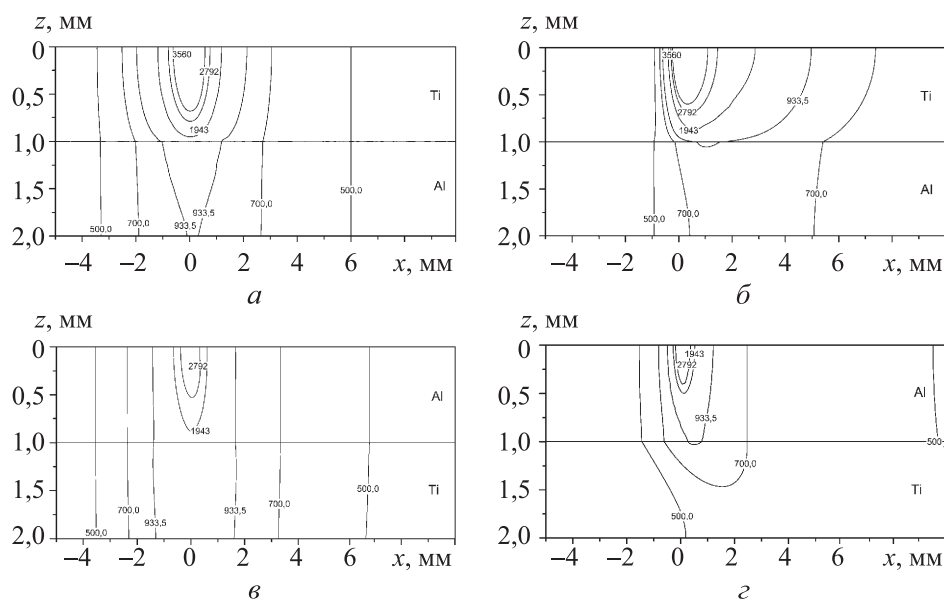


Рис. 3. Крайние случаи режима пайки в конфигурациях Ti + Al (а, б) и Al + Ti (в, г) при температуре на границе между пластинами, достаточной для плавления алюминия, но недостаточной для плавления титана:

а — $W = 1$ кВт, $V_w = 0$; б — $W = 1$ кВт, $V_w = 0,025$ м/с; в — $W = 1,15$ кВт, $V_w = 0$;
г — $W = 1$ кВт, $V_w = 0,035$ м/с

Согласно результатам расчетов, конфигурация Al + Ti обеспечивает больший диапазон допустимых режимов пайки, чем Ti + Al. В частности, при одинаковой мощности лазера первая конфигурация допускает более высокую скорость пайки. Такой вывод существенно зависит от оценки потоков теплоты через поверхности композита и будет уточняться в последующих расчетах и сравнениях с физическими экспериментами. Выполнены также расчеты при других значениях мощности лазера. Результаты для конфигурации Ti + Al в диапазоне значений мощности 0,7...2,5 кВт и скорости 0...0,12 м/с приведены на рис. 4.

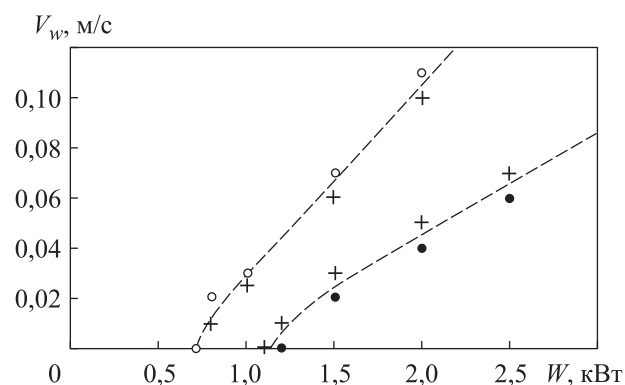


Рис. 4. Границы области значений параметров, при которых реализуется пайка: $\circ$ — режимы, при которых соединение не образуется; $+$ — режимы пайки; $\bullet$ — режимы сварки; штриховыми линиями обозначены границы области пайки

В расчетах скорость V_w изменялась с шагом 0,01 м/с, поэтому границы области пайки определены с некоторой погрешностью и обозначены штриховыми линиями. Режим пайки реализуется для пары параметров (W, V_w) , заключенных между этими штриховыми линиями. Для значений, находящихся левее этой области, соединения не происходит. Для значений, расположенных правее этой области, соединение происходит в режиме сварки с перемешиванием расплавленных металлов и образованием интерметаллидных фаз. Таким образом, диаграмма позволяет прогнозировать, при каких значениях мощности лазера и скорости сварки будет осуществляться режим пайки.

Результаты сравнения с экспериментом. Проведено сравнение с приведенными в [12] результатами эксперимента по сварке внахлест пластин из сплавов титана BT1-0 и алюминия Д16. В эксперименте размер пластин $150 \times 50 \times 1$ мм, пластины уложены со сдвигом с перекрытием около 20 мм, что отличается от принятой здесь конфигурации расчетной области.

Однако ввиду малости зоны сварки и толщины пластин по сравнению с их продольным и поперечным размерами это не может существенно повлиять на распределение температуры в зоне расплава. Сварка происходила при мощности лазера $W = 2,5$ кВт и скорости смещения луча $V_w = 0,12$ м/с. Распределение температуры в сечении $x = 2,5$ мм, полученное в расчете и соответствующее максимальной глубине проплавления нижней пластины, показано на рис. 5, а. Для сравнения на рис. 5, б представлена картина поперечного среза сварочного шва, полученная в эксперименте. На ней четко заметны характерные подобласти в композите, которые возникают в пластинах в окрестности оси луча лазера. Граница подобласти однородного светло-серого цвета соответствует границе сварочной ванны в пластинах, к ней в алюминии примыкает темная зона термического влияния. Изотермы 3560 и 1943 К соответствуют температуре кипения и плавления ВТ1-0, изотерма 916 К — температуре плавления Д16.

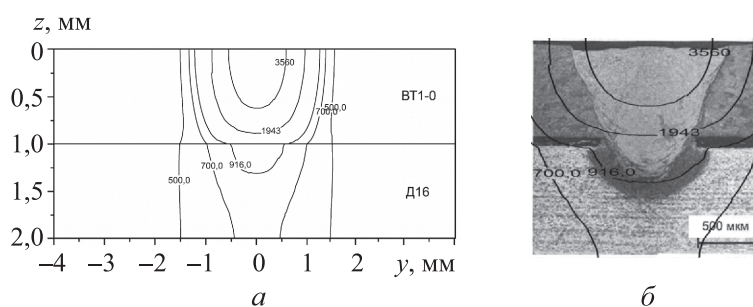


Рис. 5. Распределение температуры в сечении $x = 2,5$ мм (а) и сравнение с поперечным срезом шва, полученным в эксперименте (б), при $W = 2,5$ кВт, $V_w = 0,12$ м/с

Заметно хорошее совпадение обеих картин по глубине проплавления нижней пластины и ширине зоны соединения, определяемой положением изотермы 916 К на плоскости контакта пластин. Требуется некоторое пояснение отличия положения изотермы плавления ВТ1-0 в расчете и получившемся сквозном проплавлении пластины ВТ1-0 в эксперименте. Согласно сравнению толщины части верхней пластины, не подвергшейся расплавлению, с толщиной нижней пластины, а также масштабной линейке (см. рис. 5, б), толщина пластины ВТ1-0 немного меньше указанной в работе и фактически составляла чуть более 0,8 мм. В то же время из распределения температуры на рис. 5, а следует, что изотерма плавления ВТ1-0 не доходит до границы контакта пластин всего лишь около 0,1 мм и даже при небольшом уменьшении толщины верхней пластины вполне

могло получиться сквозное проплавление. Таким образом, можно констатировать, что математическая модель и численный метод адекватно описывают физические процессы лазерной сварки-пайки внахлест пластин из титана и алюминия.

Выводы. Показано, что численным моделированием процесса соединения внахлест двух пластин из разнородных металлов с использованием лазерной сварки можно определить диапазон режимов, позволяющих осуществить пайку деталей без образования хрупких интерметаллидов в зоне их контакта. Это может сократить число дорогостоящих физических экспериментов для решения задачи получения бездефектного неразъемного соединения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность разработчику программы *Laser Welding3D* В.И. Исаеву за консультации по ее адаптации к решению рассматриваемой задачи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zhou X., Duan J., Zhang F., et al. The study on mechanical strength of titanium–aluminum dissimilar butt joints by laser welding-brazing process. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 5, art. 712. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12050712>
- [2] Chen X., Lei Z.L., Chen Y.B., et al. Effect of laser beam oscillation on laser welding-brazing of Ti/Al dissimilar metals. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 24, art. 4165. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12244165>
- [3] Chen X., Jiang M., Chen Y., et al. Laser welding–brazing under temporal and spatial power modulation for dissimilar materials AA6061 to Ti6Al4V joints. *Manuf. Lett.*, 2021, vol. 29, pp. 70–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.07.004>
- [4] Zhao X., Yang Z., Huang Y., et al. Laser-MIG hybrid welding–brazing characteristics of Ti/Al butt joints with different groove shapes. *Metals*, 2025, vol. 15, no. 6, art. 625. DOI: <https://doi.org/10.3390/met15060625>
- [5] 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
- [6] Носков Ф.М., Квеглис Л.И., Мали В.И. и др. Исследование неравновесных фаз, образующихся при сварке взрывом титана и алюминия. *Вестник СибГАУ*, 2017, т. 18, № 1, с. 205–210. EDN: YKKDJN
- [7] Kalinenko A., Dolzhenko P., Borisova Y., et al. Tailoring of dissimilar friction stir lap welding of aluminum and titanium. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 23, art. 8418. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238418>

- [8] Курынцев С.В., Шиганов И.Н. Лазерная сварка разнородных металлов. Обзор. Часть 2. *Фотоника*, 2021, т. 15, № 1, с. 30–45.
DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.1.30.44>
- [9] Евлампьев А.В., Курынцев С.В. Методы лазерной сварки титановых сплавов с алюминиевыми сплавами, микроструктура и свойства. *Современные достижения в области создания перспективных легких сплавов и покрытий для авиационной и космической техники. III Всерос. науч.-техн. конф.* М., ВИАМ, 2022, с. 97–105. EDN: GOGYVJ
- [10] Xue X., Pereira A., Vincze G., et al. Interfacial characteristics of dissimilar Ti6Al4V/AA6060 lap joint by pulsed Nd:YAG laser welding. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 1, art. 71. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9010071>
- [11] Курынцев С.В., Шиганов И.Н., Морущкин А.Е. Сварка разнородных сплавов на основе титана и алюминия лазерным излучением. *Сварочное производство*, 2019, № 2, с. 16–21. EDN: HWRIJG
- [12] Kuryntsev S.V. Microstructure, mechanical and electrical properties of laser-welded overlap joint of CP Ti and AA2024. *Opt. Lasers Eng.*, 2019, vol. 112, pp. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.10.008>
- [13] Курынцев С.В. Исследование распределения химических элементов в соединении титана и алюминия, полученных лазерной сваркой. *Сварка и диагностика*, 2019, № 2, с. 28–31. EDN: EBYCGF
- [14] Zhou X., Cao X., Zhang F., et al. Effects of AlSi12 interlayer on microstructure and mechanical properties of laser welded 5A06/Ti6Al4V joints. *Weld. World*, 2021, vol. 65, no. 7, pp. 1389–1402. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01129-9>
- [15] Leo P., D'Ostuni S., Casalino G. Low temperature heat treatments of AA5754-Ti6Al4V dissimilar laser welds: microstructure evolution and mechanical properties. *Opt. Laser Technol.*, 2018, vol. 100, pp. 109–118.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.039>
- [16] 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.jheatmasstransfer.2016.04.019>
- [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., 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>
- [19] Курынцев С.В. Способ сварки-пайки разнородных металлических сплавов лазерным лучом. Патент РФ 2732303. Заявл. 27.04.2020, опубл. 15.09.2020.

[20] Shmagunov O.A. Dissolution of titanium carbide in nanomodified titanium melt during laser surfacing. In: *XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics*. Springer, 2024, pp. 309–314.

DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-1872-6_42

Шмагунов Олег Александрович — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник ИТПМ СО РАН (Российская Федерация, 630090, Новосибирск, Институтская ул., д. 4/1).

Шапеев Василий Павлович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры математического моделирования НГУ (Российская Федерация, 630090, Новосибирск, Пирогова ул., д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шмагунов О.А., Шапеев В.П. Численное моделирование лазерной сварки-пайки внахлест пластин из титана и алюминия. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2026, № 3 (126), с. 24–39. EDN: VHPNNG

NUMERICAL SIMULATION OF LASER LAP WELDING-BRAZING OF TITANIUM AND ALUMINUM PLATES

O.A. Shmagunov¹

V.P. Shapeev²

shmag@itam.nsc.ru

shapeev.vasily@mail.ru

¹ITAM SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²NSU, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The developed mathematical model for the numerical study of laser welding thermophysical processes is applied to simulate the overlap welding of titanium and aluminum plates. The article investigates the influence of laser power and welding speed on the temperature distribution in the calculation area, and searches for optimal welding modes. To obtain quantitative process characteristics, a repeatedly tested numerical method of collocation and least squares for solving differential and integral equations is used, which is implemented in the *Laser Welding3D* software package. The problem is solved in a three-dimensional formulation, taking into account both heat exchange with the environment and the formation of a vapor-gas channel in the weld zone. The

Keywords

Numerical simulation, heat transfer, dissimilar metals, laser welding, laser brazing, intermetallics

simulation is performed for various plate arrangements over a wide range of laser power values and plate speeds relative to the laser beam. It is shown that the choice of plate arrangement affects the characteristics of the resulting joint. A range of conditions has been determined that achieves the optimal welding-brazing mode for titanium and aluminum, when the temperature in the contact zone exceeds the melting point of aluminum, but is lower than the melting point of titanium. This mode produces a permanent joint that is free of brittle intermetallic phases that degrade joint quality. A comparison with the experimental results has been conducted. The results can be used to develop an effective technology for producing lap joints between titanium and aluminum plates using laser welding

Received 03.10.2025

Accepted 12.12.2025

© Author(s), 2026

The work was carried out as part of the State Assignment of the ITAM SB RAS (no. 124021400039-8)

REFERENCES

- [1] Zhou X., Duan J., Zhang F., et al. The study on mechanical strength of titanium–aluminum dissimilar butt joints by laser welding-brazing process. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 5, art. 712. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12050712>
- [2] Chen X., Lei Z.L., Chen Y.B., et al. Effect of laser beam oscillation on laser welding-brazing of Ti/Al dissimilar metals. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 24, art. 4165. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12244165>
- [3] Chen X., Jiang M., Chen Y., et al. Laser welding–brazing under temporal and spatial power modulation for dissimilar materials AA6061 to Ti6Al4V joints. *Manuf. Lett.*, 2021, vol. 29, pp. 70–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.07.004>
- [4] Zhao X., Yang Z., Huang Y., et al. Laser-MIG hybrid welding–brazing characteristics of Ti/Al butt joints with different groove shapes. *Metals*, 2025, vol. 15, no. 6, art. 625. DOI: <https://doi.org/10.3390/met15060625>
- [5] 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
- [6] Noskov F.M., Kveglis L.I., Mali V.I., et al. Studies of nonequilibrium phases formed at explosion welding of titanium and aluminum. *Vestnik SibGAU [Vestnik SibSAU. Aerospace Technologies and Control Systems]*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 205–210 (in Russ.). EDN: YKKDJN

- [7] Kalinenko A., Dolzhenko P., Borisova Y., et al. Tailoring of dissimilar friction stir lap welding of aluminum and titanium. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 23, art. 8418. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238418>
- [8] Kuryntsev S.V., Shiganov I.N. Dissimilar metal laser welding. Review. Part 2. *Fotonika* [Photonics Russia], 2021, vol. 15, no. 1, pp. 30–45 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.1.30.44>
- [9] Evlampyev A.V., Kuryntsev S.V. Methods for laser welding of titanium alloys with aluminum alloys, microstructure and properties. *Sovremennye dostizheniya v oblasti sozdaniya perspektivnykh legkikh splavov i pokrytiy dlya aviatsionnoy i kosmicheskoy tekhniki. III Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Modern achievements in the Field of Developing Promising Light Alloys and Coatings for Aviation and Space Technology. III Russ. Sci. Tech. Conf.]. Moscow, VIAM Publ., 2022, pp. 97–105 (in Russ.). EDN: GOGYVJ
- [10] Xue X., Pereira A., Vincze G., et al. Interfacial characteristics of dissimilar Ti6Al4V/AA6060 lap joint by pulsed Nd:YAG laser welding. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 1, art. 71. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9010071>
- [11] Kuryntsev S.V., Shiganov I.N., Morushkin A.E. Laser welding of dissimilar alloys based on titanium and aluminum. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2019, no. 2, pp. 16–21 (in Russ.). EDN: HWRIJG
- [12] Kuryntsev S.V. Microstructure, mechanical and electrical properties of laser-welded overlap joint of CP Ti and AA2024. *Opt. Lasers Eng.*, 2019, vol. 112, pp. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.10.008>
- [13] Kuryntsev S.V. Study of the distribution of chemical elements in a compound of titanium and aluminum received laser welding. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2019, no. 2, pp. 28–31 (in Russ.). EDN: EBYCGF
- [14] Zhou X., Cao X., Zhang F., et al. Effects of AlSi12 interlayer on microstructure and mechanical properties of laser welded 5A06/Ti6Al4V joints. *Weld. World*, 2021, vol. 65, no. 7, pp. 1389–1402. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01129-9>
- [15] Leo P., D'Ostuni S., Casalino G. Low temperature heat treatments of AA5754-Ti6Al4V dissimilar laser welds: microstructure evolution and mechanical properties. *Opt. Laser Technol.*, 2018, vol. 100, pp. 109–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.039>
- [16] 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.jheatmasstransfer.2016.04.019>
- [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., 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>

[19] Kuryntsev S.V. Sposob svarki-payki raznorodnykh metallicheskih splavov lazernym luchom [Method of welding and soldering of dissimilar metal alloys with a laser beam]. Patent RU 2732303. Appl. 27.04.2020, publ. 15.09.2020 (in Russ.).

[20] Shmagunov O.A. Dissolution of titanium carbide in nanomodified titanium melt during laser surfacing. In: *XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics*. Springer, 2024, pp. 309–314.

DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-1872-6_42

Shmagunov O.A. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Researcher, ITAM SB RAS (Institutskaya ul. 4/1, Novosibirsk, 630090 Russian Federation).

Shapeev V.P. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Mathematical Modeling, NSU (Pirogova ul. 1, Novosibirsk, 630090 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Shmagunov O.A., Shapeev V.P. Numerical simulation of laser lap welding-brazing of titanium and aluminum plates. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2026, no. 3 (126), pp. 24–39 (in Russ.).

EDN: VHPNNG