
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 539.3

**ОСОБЕННОСТИ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЯ С НЕРЖАВЕЮЩЕЙ
СТАЛЬЮ**

© 2024 г. Г. Ж. Сахвадзе

*Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия**e-mail: sakhvadze@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.02.2024 г.

После доработки 24.03.2024 г.

Принята к публикации 19.04.2024 г.

Работа посвящена изучению технологии лазерной ударной сварки при сваривании тонкой алюминиевой пластины с пластиной из нержавеющей стали. Было проведено конечноэлементное моделирование технологии лазерной ударной сварки с помощью конечноэлементного пакета ABAQUS. Полученные результаты показали, что качество сварного шва в основном определяется двумя параметрами – энергией лазерного импульса и начальным расстоянием между пластинами. Установлены условия, при каких параметрах лазерной ударной сварки получаются сваривать алюминиевую пластину с пластиной из нержавеющей стали. Получены распределения пластических деформаций и температур вдоль сварного шва.

Ключевые слова: конечноэлементное моделирование, лазерная ударная сварка, алюминий, нержавеющая сталь, пластические деформаций

DOI: 10.31857/S0235711924040098, **EDN:** OYVYJX

Помимо низкой плотности и высокой удельной прочности алюминий (АЛ) также обладает хорошей электропроводностью, теплопроводностью и коррозионной стойкостью, поэтому он завоевал популярность в аэрокосмической, автомобильной и судостроительной промышленности. С другой стороны, нержавеющая сталь (НС) обладает превосходной статической и динамической прочностью, а также высокой ударной вязкостью и является широко используемым конструкционным материалом в автомобильной и аэрокосмической промышленности. Поэтому соединение АЛ с НС может дать синергетический эффект, демонстрируя преимущества обоих сплавов, получив сплав с малым весом и высокой прочностью. Такой гибридный сплав имеет широкий спектр потенциальных применений в различных отраслях промышленности. Например, быстрое развитие микроэлектромеханической промышленности, а также разработка новых медицинских инструментов требует изделий, получаемых путем сваривания АЛ с НС, что, безусловно, будет иметь большой потенциал применения, в частности, при производстве микроинструментов.

Однако существуют очевидные различия между физическими свойствами АЛ и НС, особенно по температуре плавления (напомним, температура плавления АЛ составляет 916 К, а температура плавления НС – 1673 К). Такие различия приводят к очевидным трудностям при сварке. Традиционную сварку плавлением трудно применять,

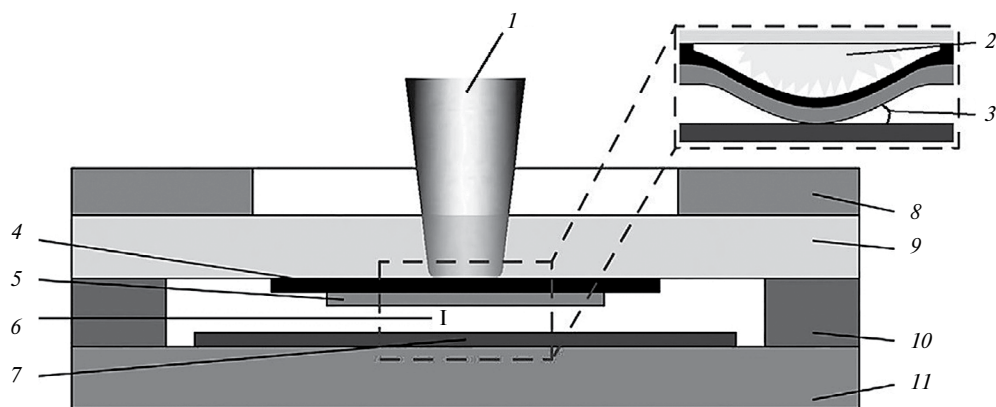


Рис. 1. Принципиальная схема ЛУС для сваривания тонкой метаемой алюминиевой пластины с неподвижной пластиной из нержавеющей стали: 1 – импульсный лазер; 2 – плазма; 3 – угол контакта θ ; 4 – поглощающий слой; 5 – метаемая пластина; 6 – расстояние между пластинами d ; 7 – неподвижная пластина; 8 – держатель; 9 – прозрачный слой; 10 – филлер; 11 – основание.

поскольку при этом на границе раздела фаз образуются хрупкие интерметаллические соединения, такие как Fe_2Al_5 [1], которые снижают пластическую вязкость соединений, что приводит к охрупчиванию участков сварного соединения, которые могут легко растрескаться. В [2] для реализации сварки АЛ и НС оптимизировали процесс магнитно-импульсной сварки. Они изучили влияние геометрии катушки, расстояния полета и энергии на прочность сварного шва. Однако сварные швы при магнитно-импульсной сварке обычно являются линейными и кольцевыми, и они не могут быть применены для точечной сварки, например, в микроинструментах.

В последние годы все большее внимание привлекает новая технология – лазерная ударная сварка (ЛУС) – метод микросварки сплошных материалов. При этом методе сварки тонкая метаемая пластина под воздействием лазерных ударных волн ударяется с тонкой неподвижной пластиной, в результате чего обеспечивается их прочное металлургическое соединение. В отличие от традиционных методов сварки, ЛУС основана на струйном эффекте, который очищает поверхности контакта от оксидной пленки и примесей, образуя чистые поверхности [3, 4].

Очевидно, что технология ЛУС позволяет свести к минимуму образование интерметаллических соединений, а также зон термического воздействия в зоне сварки, и обеспечивает превосходное качество сварки между разнородными металлическими материалами с различными температурами плавления. Технология ЛУС основана на твердотельной микросварке, которая зарекомендовала себя как надежный метод сварки между АЛ и НС [5].

В настоящем исследовании мы использовали технологию ЛУС для реализации сварки между АЛ и НС. Было проведено конечноэлементное моделирование технологии лазерной ударной сварки (ЛУС) между тонкой алюминиевой пластиной (АЛ) и пластиной из нержавеющей стали (НС) с помощью конечно-элементного пакета ABAQUS.

Механизм ЛУС. Принципиальная схема для реализации технологии ЛУС показана на рис. 1 [6], основными элементами которой являются импульсный лазер 1, тонкая алюминиевая метаемая пластина 5, неподвижная пластина из нержавеющей стали 7, держатель 8, поглощающий слой 4 и прозрачный слой 9.

Когда импульсный лазерный луч 1 проходит через прозрачный слой 9 и фокусируется на поглощающий слой 4, он нагревается, а затем мгновенно испаряется

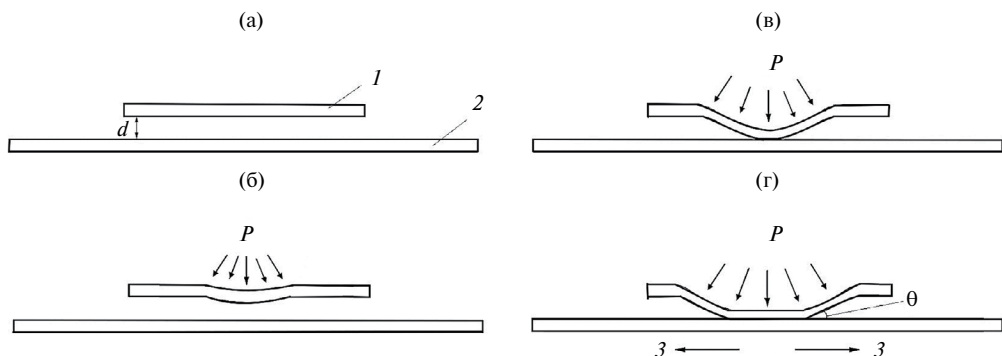


Рис. 2. Различные стадии технологии ЛУС: (а) – исходное состояние; (б) – на метаемую пластину падает ударная волна с давлением P , и она ускоряется вниз; (в) – передняя часть метаемой пластины достигает неподвижную пластину, преодолевая начальное расстояние между ними d . Угол столкновения θ между ними в этот момент равен 0° ; (г) – фаза сваривания: 1 – метаемая пластина; 2 – неподвижная пластина; 3 – направления сваривания.

и превращается в плазму 2 с высокими температурой и давлением. Образующаяся плазма, удерживаемая поглощающим слоем, быстро расширяется и превращается в ударную волну. Давление ударной волны начинает воздействовать на тонкую алюминиевую пластину и разгоняет ее к неподвижной пластине.

На рис. 2а показано начальное расположение пластин. Метаемая пластина изготовлена из алюминиевого сплава А0 (зарубежный аналог – aluminum alloy 1100), неподвижная пластина – из нержавеющей стали 08Х18Н10 (зарубежный аналог – AISI 304). Толщина пластин – 0,05 мм. Расстояние между пластинами d варьируется в диапазоне 0,05–0,45 мм. Принимается, что имеет место гауссово распределение энергии лазерного луча, когда давление на гребне ударной волны превышает динамический предел текучести материала [7]. Тогда в области воздействия лазерного излучения с алюминиевой пластиной образуется локальная пластическая деформация, которая направляется вниз (рис. 2б), и ударяется с неподвижной пластиной. Угол столкновения θ при этом равен 0° , и в этот момент сваривания еще не происходит (рис. 2в). По мере того, как точка контакта перемещается в радиальном направлении от центра сварного соединения, угол столкновения начинает постепенно увеличиваться. При достижении угла столкновения и определенных значений скорости соударения, начинается образование струи, которая удаляет с поверхности оксидный слой. После этого происходит твердотельное соединение между АЛ и НС (рис. 2г). Далее пятно сварки от центра перемещается к краю области воздействия лазерного излучения и процесс сварки завершается (когда угол столкновения превысит так называемый эффективный угол столкновения [8]). В итоге, образуется соединение лазерной ударной сваркой, которое принимает форму кольца.

Численное моделирование. Моделирование технологии ЛУС проводится в конечно-элементном пакете ABAQUS. Получены распределения пластических деформаций и температур вдоль границ раздела сварного шва. Расчеты выполнены по методике, приведенной в [9].

Уравнение состояния материала. В статье используется уравнение состояния материала Ми–Грюнайзена, основанное на представлении давления ударной волны в форме Гюгоньо, которое широко используется в механике твердого тела при высоких давлениях, которое имеет вид [10]

$$P = P_H + \Gamma \rho (e - e_H), \quad (1)$$

где P – текущее давление; ρ – мгновенная плотность материала; e – внутренняя энергия; P_H – давление ударной волны Гюгонио; e_H – внутренняя энергия ударной волны Гюгонио; Γ – коэффициент Грюнайзена.

Если предположить, что $\Gamma\rho = \Gamma_0\rho_0 = \text{const}$ (где индексом 0 обозначены их начальные значения), то в этом случае P_H и e_H будут определяться формулами [10]

$$P_H = \frac{\rho_0 c_0 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2}, \quad (2)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{P_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right), \quad (3)$$

где ρ_0 – начальная плотность; Γ_0 – коэффициент Грюнайзена в начальном состоянии; c_0 – объемная скорость звука; s – наклон линии Гюгонио; μ – скорость частиц, $\mu = (\rho/\rho_0) - 1$. Заметим, что главным ограничением модели Ми–Грюнайзена является то, что она применима только для ограниченного диапазона скоростей соударения и не учитывает каких-либо фазовых изменений в материале, таких как плавление или испарение.

Параметры уравнения ударного состояния Ми–Грюнайзена для исследуемых материалов приведены в табл. 1.

Заметим, что в [10] исследуется технология сварки взрывом, которая имеет много общего с лазерной ударной сваркой, но у ЛУС имеются ряд особенностей, установление которых и посвящена настоящая статья.

Определяющее соотношение. При конечно-элементном моделировании технологии ЛУС требуется определение динамических пределов текучести материалов, для чего используется модель Джонсона–Кука, представлявшая собой эмпирическую зависимость динамического предела текучести от пластических деформаций, скоростей пластических деформаций (по Мизесу) и температуры. Области с экстремальными пластическими деформациями при ЛУС образуются очень быстро, поэтому будем использовать определяющее соотношение в виде температурно-зависимой модели Джонсона–Кука, которая определяется выражением [11]

$$\sigma_0 = \left[A + B(\epsilon_p)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - (T^*)^m \right], \quad (4)$$

где σ_0 – динамическое напряжение; ϵ_p – пластическая деформация; $\dot{\epsilon}_p$ – скорость пластической деформации; $\dot{\epsilon}_0$ – эталонная скорость деформации, $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ с}^{-1}$; A – статический предел текучести материала; B – коэффициент деформационного упрочнения; C – коэффициент скорости деформации; m – показатель степени в законе температурного разупрочнения; n – показатель степени в законе деформационного упрочнения.

Безразмерная температура T^* связана с абсолютной температурой T следующим образом [12]:

$$T^* = \begin{cases} 0, & T < T_0, \\ \frac{T - T_0}{T_m - T_0}, & T_0 \leq T \leq T_m, \\ 1, & T > T_m, \end{cases} \quad (5)$$

где T_0 – комнатная температура, T_m – температура плавления материала.

Таблица 1. Параметры Ми–Грюнайзена для уравнения состояния [10]

Параметр	Алюминиевый сплав А0	Нержавеющая сталь 08Х18Н10
ρ_0 , г/см ³	2712	7905
c_0 , м/с	5451.8	4570
s	1.2592	1.490
Γ_0	2.14	2.0

Таблица 2. Параметры Джонсона–Кука [13]

Параметр	Алюминиевый сплав А0	Нержавеющая сталь 08Х18Н10
A , МПа	148.4	110
B , МПа	345.5	1500
C	0.001	0.014
$\dot{\epsilon}_0$, с ⁻¹	1	1
n	0.183	0.36
m	0.895	1
T_0 , К	293	293
T_m , К	916	1673

Таблица 3. Параметры лазера, используемые при моделировании [13]

Параметр	Значение
Длина волны лазерного луча, нм	1064
Длительность импульса t_p , нс	17
Диаметр пятна лазерного луча, мм	9.0 ± 0.1
Энергия в импульсе лазерного излучения E , мДж	80–1800
Коэффициент энергетической эффективности α	0.25
Адиабатическая постоянная γ	1.4

Параметры Джонсона–Кука для исследуемых материалов приведены в табл. 2.

В табл. 3 приведены параметры лазерного излучения, которые используются при моделировании технологии ЛУС.

Полученные результаты и их анализ. Как известно, на скорость распространения ударной волны основное влияние оказывает акустический импеданс (произведение плотности материала ρ_0 и скорости звука c) материалов метаемой и неподвижной пластин [14]. При распространении ударной волны в различных средах на границе раздела происходит как отражение, так и прохождение ударной волны. При исследовании ЛУС для пары АЛ/НС, поскольку плотность НС больше плотности АЛ, то при достижении ударной волны границы раздела АЛ/НС возникает т.н. эффект рас-согласования импедансов [15].

Проследим за хронологией процесса ЛУС. Лазерное излучение сначала воздействует на алюминиевую пластину, создавая в ней ударную волну давлением P_1 , которая распространяется в среде со скоростью D_1 . Поскольку, акустический импеданс АЛ меньше, чем у НС, при достижении ударной волны границы раздела, ударная

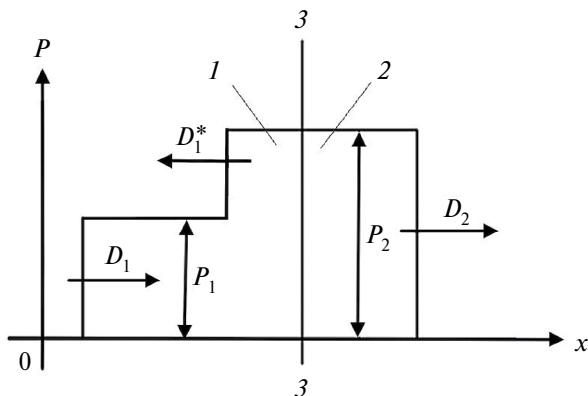


Рис. 3. Схема процессов отражения и прохождения ударной волны на границе раздела АЛ/НС:
1 – алюминий; 2 – нержавеющая сталь; 3–3 – граница раздела.

волна в НС будет распространяться с другой скоростью D_2 . Одновременно ударная волна также будет отражаться и будет распространяться в АЛ со скоростью D_1^* . При этом давление ударной волны в АЛ и НС будет иметь одинаковое значение P_2 (причем $P_2 > P_1$), а их скорости распространения будут разными (D_1^* и D_2 соответственно) [16]. На рис. 3 схематично показаны процессы отражения и распространения ударной волны на границе раздела АЛ/НС.

Окно свариваемости. Как известно, скорость метаемой пластины и угол столкновения являются двумя основными технологическими параметрами, влияющими на эффективность технологии ЛУС [17]. Однако эти параметры при ЛУС в основном контролируются энергией лазерного импульса и дальностью полета метаемой пластины. Следовательно, влияние скорости и угла столкновения на эффективность процесса сварки можно косвенно оценить путем изучения зависимости между энергией лазерного импульса и дальностью полета метаемой пластины.

Технологическое окно свариваемости при различных значениях энергии лазерного импульса E и дальности полета метаемой пластины d показано на рис. 4.

Видно, что при расстоянии $d = 0.25$ мм эффект сваривания достигается при всех пяти различных исследуемых уровнях энергии лазера. При этом диаметр сварочного пятна приблизительно равен диаметру лазерного пятна. Сварочное пятно от прямого воздействия лазерного импульса защищено поглощающим слоем. Поэтому поверхность метаемой пластины относительно плоская и признаков абляции нет. Более того, пятно сварки распространяется от центра в виде концентрических окружностей.

Скорость соударения метаемой пластины должна быть больше некой минимальной эффективной критической скорости V_{pmin} , которая обычно определяется эмпирической формулой [18]

$$V_{pmin} = P \left(\frac{1}{c_1 \rho_1} + \frac{1}{c_2 \rho_2} \right), \quad (6)$$

где P – давление ударной волны в точке столкновения ρ_1 и ρ_2 – плотности материалов метаемой и неподвижных пластин, соответственно; c_1 и c_2 – объемные скорости распространения звука в материалах метаемой и неподвижных пластин соответственно.

При малом расстоянии между пластинами и малой энергии лазерного импульса сваривание в комбинации АЛ/НС не происходит (в частности, как видно из рис. 4, в случае когда это расстояние составляет 0.05 мм, а энергия лазера находится

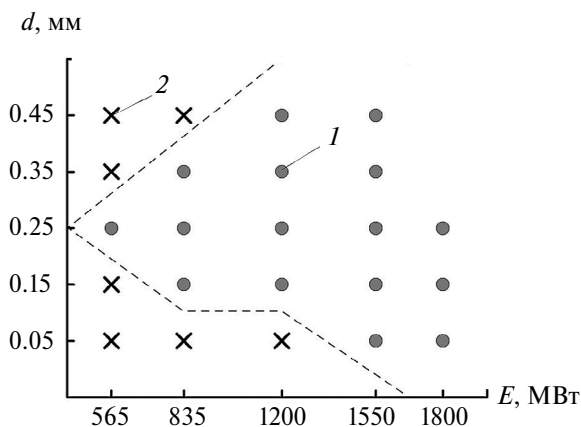


Рис. 4. Окно свариваемости (технологическое окно) для пары АЛ/НС в координатах энергия лазерного импульса E – расстояние между пластинами d : 1 – есть сваривание; 2 – нет сваривания.

в диапазоне 565–1200 МДж, а также при $d = 0,15$ мм и $E = 565$ МДж). Отсутствие сваривания объясняется малым расстоянием полета, что мешает полноценному развитию локальной пластической деформации в метаемой пластине, что, в свою очередь, не позволяет сформировать эффективный угол соударения, необходимый для сваривания. При небольшой дальности полета недостаточна дистанция разгона, и скорость соударения метаемой пластины не достигает критического значения. С другой стороны, малая энергия лазера также приводит к тому, что скорость соударения становится меньше критического значения.

Распределение пластической деформации. На рис. 5 показано распределение пластической деформации по границе раздела двух соударяемых пластин. Как видим, пластическая деформация меняется в диапазоне 1,5–3,0, а этот диапазон значительно больше, чем требование для обычных условий, при которых для формирования твердотельного металлургического соединения пластическая деформация должна быть больше 0,4 [18]. Такая большая разница в пластических деформациях указывает на тот факт, что возникновение при ЛУС сильной пластической деформации происходит на волнистой границе раздела, что доказано экспериментально [8]. Кроме того, видим, что пластическая деформация в метаемой алюминиевой пластине более выражена, чем в неподвижной пластине из нержавеющей стали, и диапазон изменений больше. Значительные пластические деформации происходят на расстоянии примерно в 9 мкм от границы раздела в сторону метаемой пластины. А в сторону неподвижной пластины заметные пластические деформации ограничены лишь областью до 4 мкм от границы раздела. Пластические свойства АЛ лучше, чем НС, и, соответственно, при ЛУС пластические деформации интенсивнее происходят именно в АЛ.

Распределение температур. На рис. 6 показано распределение температур по границе сварного шва. Обычно диаграмма распределения температур приблизительно соответствует распределению эффективной пластической деформации, поскольку нагрев поверхности раздела в основном происходит за счет пластической деформации поверхности раздела. Механическая энергия в процессе ударного столкновения вызывает сильную пластическую деформацию, при этом возникает трение и образуется сдвиг между двумя поверхностями, и все это, в конечном итоге, преобразуется в тепловую энергию [19]. Учитывая, что процесс ЛУС происходит в течение нескольких сотен наносекунд, а отвод тепла от поверхности сварного шва происходит гораздо медленнее, на поверхности шва образуется высокотемпературный слой,

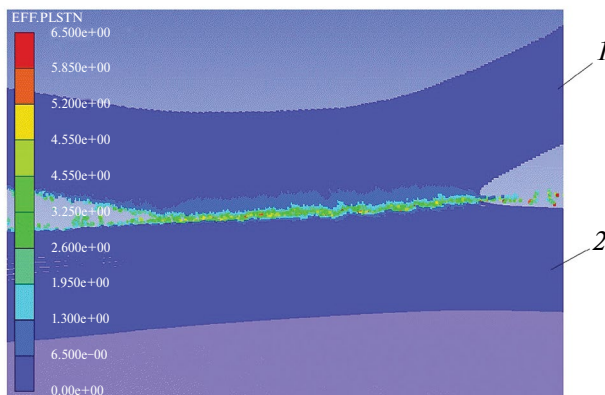


Рис. 5. Распределение пластической деформации по границе соударения пластин: 1 — метаемая алюминиевая пластина; 2 — неподвижная пластина из нержавеющей стали.

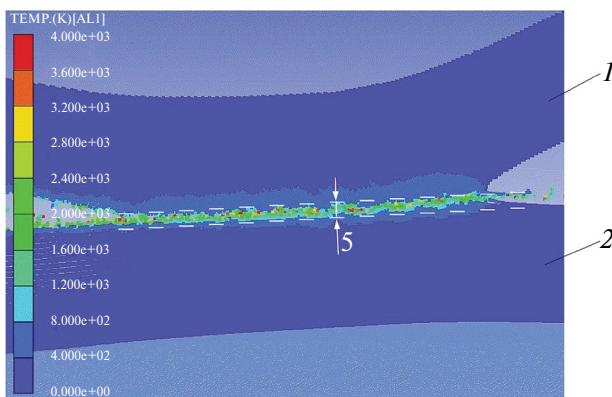


Рис. 6. Распределение температур по границе соударения пластин, размер показан в мкм: 1 — метаемая алюминиевая пластина; 2 — неподвижная пластина из нержавеющей стали.

способствующий диффузии металлов. Как показано на рис. 6, температура на границе раздела может достигать приблизительно 1500 К.

Толщина высокотемпературного слоя при ЛУС составляет приблизительно 5 мкм, что соответствует толщине диффузионного слоя на границе раздела при сварке взрывом, составляющей приблизительно 4.5 мкм [10].

Выводы. Было проведено конечноэлементное моделирование технологии лазерной ударной сварки (ЛУС) между тонкой алюминиевой пластиной (АЛ) и пластиной из нержавеющей стали (НС) с помощью конечно-элементного пакета ABAQUS.

Установлено, что качество сварного шва в основном определяется энергией лазерного импульса и начальным расстоянием между пластинами. Показано, что при малой энергии лазера не удастся осуществить сваривание как при очень маленьких, так и больших расстояниях (например, когда расстояние между пластинами составляет 0.05 мм, и энергия лазера находится в диапазоне 565–1200 МДж, или при расстоянии 0.15 мм, а энергия лазера 565 МДж).

Показано, что для пары металлов АЛ/НС можно достичь хорошего сваривания в случаях, когда расстояние между пластинами находится в диапазоне 0.35–0.45 мм,

а энергия лазера составляет 1800 МДж. Установлено, что при расстоянии 0.25 мм, сварку можно осуществлять при пяти уровнях лазерной энергии.

Установлено, что поверхность раздела при ЛУС подвергается сильной пластической деформации, в результате чего образуется высокотемпературный слой, способствующий диффузии металлов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания, шифр научной темы FFGU-2024-0019.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Xiong L., Cheng J., Chuang A. et al.* Synchrotron experiment and simulation studies of magnesium-steel interface manufactured by impact welding // *Mater. Sci. Eng. A.* 2021. № 813. P. 141023.
2. *Wang X., Li F., Huang T. et al.* Experimental and numerical study on the laser shock welding of aluminum to stainless steel // *Opt. Lasers Eng.* 2019. № 115. P. 74.
3. *Groche P., Becker M., Pabst C.* Process window acquisition for impact welding processes // *Mater Des.* 2017. № 118. P. 286.
4. *Sadeh S., Malik A.* Investigation into the effects of laser shock peening as a post treatment to laser impact welding // *Mater Des.* 2021. № 205. P. 109701.
5. *Sunny S., Gleason G., Mathews R. et al.* Simulation of laser impact welding for dissimilar additively manufactured foils considering influence of inhomogeneous microstructure // *Mater Des.* 2021. № 198. P. 109372.
6. *Wang X., Tang H., Shao M. et al.* Laser impact welding: investigation on microstructure and mechanical properties of molybdenum-copper welding join // *Int. J. Refract Met. Hard Mater.* 2019. № 80. P. 1.
7. *Gleason G., Sunny S., Sadeh S. et al.* Eulerian modeling of plasma-pressure driven laser impact weld processes // *Procedia Manuf.* 2020. № 48. P. 204.
8. *Sadeh S., Gleason G., Hatamleh M. et al.* Simulation and experimental comparison of laser impact welding with a plasma pressure model // *Metals.* 2019. № 9 (11). P. 1196.
9. *Nassiri A., Zhang S., Lee T. et al.* Numerical investigation of CP-Ti & Cu110 impact welding using smoothed particle hydrodynamics and arbitrary Lagrangian-Eulerian methods // *J. Manuf. Process.* 2017. № 28. P. 558.
10. *Zhang Z., Feng D., Liu M.* Investigation of explosive welding through whole process modeling using a density adaptive SPH method // *J. Manuf. Process.* 2018. № 35. P. 169.
11. *Sakhvadze G. Zh.* Finite element simulation of hybrid additive technology using laser shock processing // *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2023. № 52 (2). P. 170.
12. *Sakhvadze G. Zh.* Finite element modeling of laser shock forming technology // *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2023. № 52 (5). P. 500.
13. *Li Z., Wang X., Yang H. et al.* Numerical studies on laser impact welding: smooth particle hydrodynamics (SPH), Eulerian, and SPH-Lagrange // *J. Manuf. Process.* 2021. № 68. P. 43.
14. *Gupta V., Lee T., Vivek A. et al.* A robust process-structure model for predicting the joint interface structure in impact welding // *J. Mater. Process Technol.* 2019. № 264. P. 107.
15. *Lee T., Nassiri A., Dittrich T. et al.* Microstructure development in impact welding of a model system // *Scr. Mater.* 2020. № 178. P. 203.
16. *Li J., Sapanathan T., Raoelison R. et al.* On the complete interface development of Al/Cu magnetic pulse welding via experimental characterizations and multiphysics numerical simulations // *J. Mater. Process Technol.* 2021. № 296. P. 17185.
17. *Lu J., Liu H., Wang K. et al.* Experimental and numerical investigations on the interface characteristics of laser impact-welded Ti/brass joints // *J. Mater. Eng. Perform.* 2021. № 30 (2). P. 1245.
18. *Gleason G., Sunny S., Mathews R. et al.* Numerical investigation of the transient interfacial material behavior during laser impact welding // *Scr. Mater.* 2022. № 208. P. 114325.
19. *Sunny S., Gleason G., Bailey K. et al.* Importance of microstructure modeling for additively manufactured metal post-process simulations // *Int. J. Eng. Sci.* 2021. № 166. P. 103515.