

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

С.П. Мурзин¹, Г. Лидль²

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия,

² Венский технический университет, Вена, Австрия

Аннотация

Прогрессивным при сварке разнородных материалов является использование лазерных технологий. Осуществлена лазерная сварка импульсным излучением алюминиевого сплава АК4 и титанового сплава ВТ5-1. Определены режимы обработки, реализация которых при плавлении материалов в зоне термического влияния предоставляет возможность получить однородную структуру без пустот и раковин, что указывает на потенциально достаточно высокую работоспособность сварного соединения. Для создания требуемого распределения плотности мощности в поперечном сечении лазерного пучка целесообразно использовать дифракционные оптические элементы. Выполнена сварка алюминия и меди непрерывным лазерным излучением. Определено, что лазерное воздействие с его чётко определённым и точным локализованным вводом энергии предоставляет возможность в значительной степени снизить рост слоёв интерметаллидных соединений.

Ключевые слова: материал металлический, сварное соединение, алюминий, лазерное воздействие, дифракционный оптический элемент.

Цитирование: Мурзин, С.П. Лазерная сварка разнородных металлических материалов с использованием дифракционных оптических элементов / С.П. Мурзин, Г. Лидль // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 848-855. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-848-855.

Введение

Материалы на основе алюминия широко используются в конструкциях летательных аппаратов [1]. Получение их высокопрочных и надежных сварных соединений с другими металлами и сплавами относится к числу актуальных задач аэрокосмической промышленности. Формирование соединений разнородных материалов, предоставляющее потенциал для снижения массы конструкций и экономии материальных затрат, актуально для широкого спектра многочисленных промышленных применений, в том числе: для автомобилестроения [2], судостроения [3] и медицинской промышленности [4]. Сварка алюминия и его сплавов с другими материалами сопровождается рядом трудностей: большая разница в теплопроводности ведет к интенсивному теплоотводу в сторону алюминия, что препятствует образованию качественного сварного соединения. Применение для получения неразъемных сварных соединений таких материалов различных методов сопряжено со значительными трудностями и зачастую не обеспечивает требуемого качества соединения. Образующиеся при кристаллизации таких швов интерметаллиды приводят к охрупчиванию материала [5]. Для разнородных металлических материалов известны несколько методов сварки: аргонодуговая сварка неплавящимся электродом [6], сварка с использованием промежуточного металла [7], сварка давлением [8], диффузионная сварка [9]. Однако ни один из перечисленных методов, а также использование сочетания разных видов сварки не исключают появления прослоек интерметаллидов [10]. Сварка взрывом позволяет сваривать только листовые материалы.

Лазерная сварка является привлекательной техникой по сравнению с традиционными методами соединения разнородных металлов, поскольку скорость обработки и точность высоки, тогда как подвод тепла очень низок, данный метод не требует применения дополнительных материалов, специальной обработки кромок [11, 12]. Данный метод предоставляет возможность получить ультратонкую диффузионную зону и избежать появления дефектов. Перераспределение плотности мощности излучения со смещением его максимального значения в сторону одного из свариваемых металлов предоставляет возможность получить требуемую структуру сварного соединения [13, 14]. Обеспечивается локальность по глубине и площади протекающих в зоне термического влияния физических процессов при сохранении исходных свойств материала в остальном объёме и отсутствии значительных деформаций обрабатываемых деталей [15, 16]. При этом достигается высокая скорость плавления и кристаллизации материала, что обусловлено интенсивным теплоотводом из небольшой по объёму расплавленной ванны в окружающий материал изделия. Однако интеграция лазерной сварки разнородных материалов в промышленные производственные линии остается сложной задачей вследствие необходимости реализации точного локального подвода энергии. Для создания требуемого распределения плотности мощности в поперечном сечении лазерного пучка предложено использовать дифракционные оптические элементы (ДОЭ) [17–19]. Целью данного исследования является определение целесообразности и изучение особенностей формирования сварных соединений материалов на основе алюминия с другими металлами и сплавами лазерным воздействием с использованием ДОЭ.

Получение неразъёмного сварного титано-алюминиевого соединения лазерным воздействием с применением дифракционных оптических элементов

Основной причиной, осложняющей сварку титановых сплавов между собой и с другими материалами, является активное взаимодействие титана с атмосферными газами при повышенных температурах, особенно в жидком состоянии. Кроме того, при сварочном термическом цикле структурные превращения в шве и околошовной зоне приводят к формированию хрупких интерметаллидных и карбидных фаз. Применяя известные способы сварки плавлением, трудно получить высокопрочные и надежные соединения титановых сплавов между собой и с алюминием. Достаточной прочности и термостойкости неразъёмных соединений не позволяет достичь и пайка титановых сплавов. Физико-механические свойства и жаропрочность припоев значительно ниже, чем у титановых сплавов, что приводит к пониженной термомеханической надежности соединения. При пайке титановых и алюминиевых сплавов усложняется выбор припоя, одинаково хорошего смачивающего контактирующие поверхности. При сварке жаропрочных коррозионно-стойких титановых сплавов с изделиями из материалов на основе алюминия прогрессивным является использование лазерных технологий.

В качестве свариваемых материалов при проведении экспериментальных исследований выбраны листовые материалы: алюминиевый сплав АК4 и титановый сплав ВТ5-1 толщиной 2 мм. Химический состав материалов представлен в табл. 1, 2. Такое сочетание материалов используется при изготовлении рядов узлов летательных аппаратов.

Табл. 1. Химический состав сплава АК4, %

Al	Fe	Si	Mn	Ni
Основа	0,8...1,3	0,5...1,2	до 0,2	0,8...1,3
Ti	Cu	Mg	Zn	Примеси
до 0,1	1,9...2,5	1,4...1,8	до 0,3	Прочие, каждая 0,05; всего 0,1

Табл. 2. Химический состав сплава ВТ5-1, %

Ti	Fe	C	Si	V	N
Основа	до 0,3	до 0,1	до 0,12	до 1,0	до 0,05
Al	Zr	O	Sn	H	Примеси
4,3...6,0	до 0,3	до 0,15	2,0...3,0	До 0,015	Прочие 0,3

Деформируемый сплав АК4, относящийся к группе жаропрочных алюминиевых сплавов специального назначения, используется для изготовления деформируемых полуфабрикатов. Сплав ВТ5-1 относится к деформируемым титановым сплавам. Непосредственно перед сваркой с соединяемых поверхностей деталей удалялись загрязнения. Зачищенные поверхности обезжиривались методом протирки белой хлопчатобумажной салфеткой, смоченной в нефрасе С2-80/120. Для обезвоживания поверхностей применялся спирт этиловый. Лазерная сварка проводилась на установке ROFIN StarWeld Manual Performance, применяемая система "Sweet Spot Resonator" обеспечивала вывод

излучения постоянной мощности на обрабатываемый материал.

В системе транспортировки и формирования излучения перед фокусирующей линзой с фокусным расстоянием $f_l = 120$ мм устанавливался ДОО, имеющий параметры: фокусное расстояние $f = 250$ мм и длина фокального отрезка $L = 5$ мм. Возможности такой комбинированной системы, состоящей из элементов дифракционной оптики, а также обычных линз и зеркал описаны в работах [20, 21]. В них отмечается ее адаптивность, т.е. возможность изменять в процессе работы параметры излучения в фокальной плоскости.

Использование данной оптической системы позволяет изменять размеры области сфокусированного излучения с целью варьирования плотности энергии на поверхности обрабатываемого материала. Так, изменение расстояния от ДОО до линзы в диапазоне значений от 100 мм до 10 мм приводило к уменьшению длины фокального отрезка от 3,3 мм до 2,5 мм. При этом расстояние от линзы до фокальной плоскости увеличивалось от 67 мм до 80 мм. Определены режимы обработки, при которых достигаются минимальные термические нагрузки, улучшается термический цикл нагрева и охлаждения обрабатываемого материала, что обеспечивает высокое качество сварки. Энергия в импульсе составила $E = 8$ Дж, расстояние от ДОО до линзы – 50 мм. Длительность импульса устанавливалась с помощью штатного программного обеспечения установки ROFIN StarWeld Manual Performance и составила $\tau = 3$ мс.

Результаты расчета и экспериментального определения распределения средней плотности мощности в импульсе лазерного излучения вдоль длины светового пятна в фокусе оптического элемента представлены на рис. 1. Измерение распределения средней плотности мощности в световом пятне проводилось стандартным измерителем ИКТ-1М, перемещающимся в системе координат, перпендикулярной оси луча, и снабженным квадратной диафрагмой площадью $0,01$ мм².

Проведено исследование структуры шва стыкового соединения без скоса кромок алюминиевого сплава АК4 и титанового сплава ВТ5-1. Для проведения металлографических исследований использовался растворный электронный микроскоп Phenom-ProX с интегрированной системой энергодисперсионного анализа и источником электронов СеВ₆ (гексаборид церия). На рис. 2 приведена структура металла шва в поперечном сечении зоны лазерной сварки встык алюминиевого сплава АК4 и титанового сплава ВТ5-1.

Определено, что образующаяся после плавления литая зона шва имеет однородную структуру без пустот и раковин, что указывает на потенциально достаточно высокую работоспособность сварного соединения. Зона металла шва разнородных материалов, формирующаяся при сварке, характеризуется индивидуальной структурой, ориентацией кристаллов, распределением фаз.

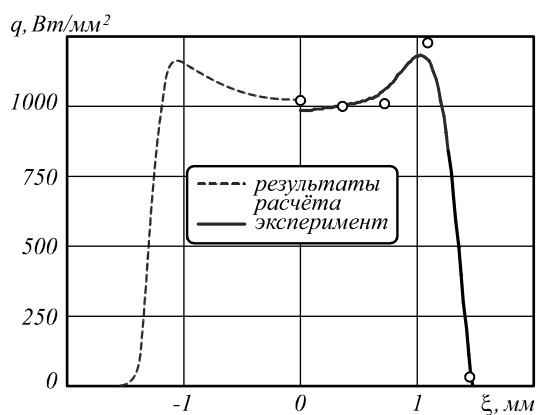


Рис. 1. Распределение средней плотности мощности в импульсе лазерного излучения вдоль координаты ξ фокальной плоскости оптического элемента

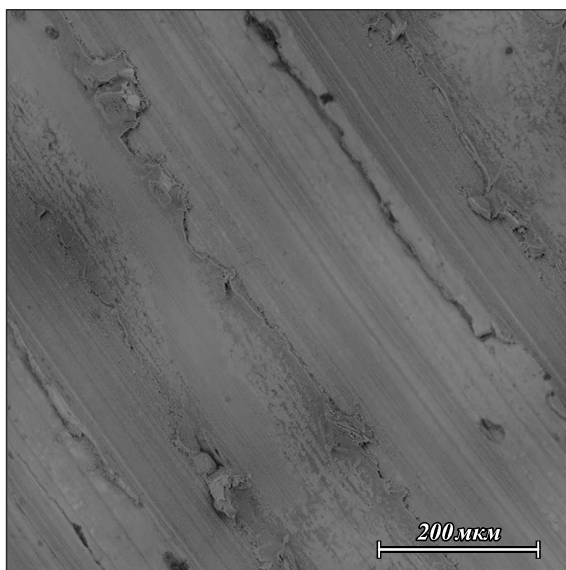


Рис. 2. Структура металла шва в поперечном сечении зоны лазерной сварки встык алюминиевого сплава АК4 и титанового сплава BT5-1

В результате исследования структуры излома установлено следующее. Сформировавшиеся в процессе разрушения волокна вытянуты вдоль главной трещины. Микроструктура зоны разрушения характеризуется наличием крупных и мелких ямок, причем на дне ямок наблюдается волокнистость.

Изображение поверхности излома сварного соединения представлено на рис. 3. При изучении поверхности разрушения в поле зрения оптического микроскопа при различных увеличениях установлено, что структура излома однородна. Площадь поверхности излома характеризуется волокнистостью. Поверхность излома не имеет металлического блеска, отсутствуют дефекты в виде пор, неметаллических включений. Мелкозернистый волокнистый излом без блеска характеризует потенциально достаточно хорошую пластичность и высокую ударную вязкость металлического материала. Металлографические исследования микрошлифов позволяют сделать вывод о формировании фактического контакта между свариваемыми поверхностями.

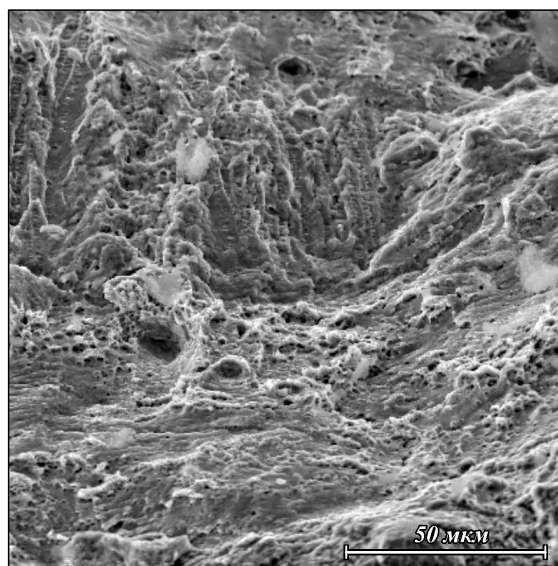


Рис. 3. Изображение излома сварного соединения, полученное с помощью аналитического растрового электронного микроскопа Phenom-ProX

На шлифах материала в поперечном сечении зоны лазерной сварки изучался элементный химический состав сварного шва. На рис. 4 приведены обозначения зон исследования элементного состава на шлифе материала в поперечном сечении области лазерной сварки. На рис. 5 представлены результаты анализа элементного состава материала в зоне, прилегающей к титановому сплаву. Наличие кислорода на диаграмме процентного содержания химических элементов объясняется окислением поверхности шлифов при достаточно длительном нахождении их на воздухе после сварки. Результаты анализа элементного состава в зонах на шлифе материала в поперечном сечении области лазерной сварки алюминиевого сплава АК4 и титанового сплава BT5-1 представлены в табл. 3.

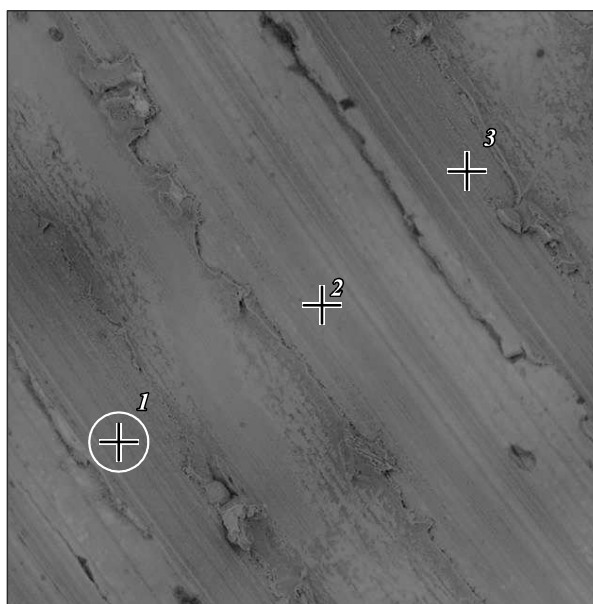


Рис. 4. Обозначения зон исследования элементного химического состава на шлифе материала в поперечном сечении области лазерной сварки; увеличение $\times 270$

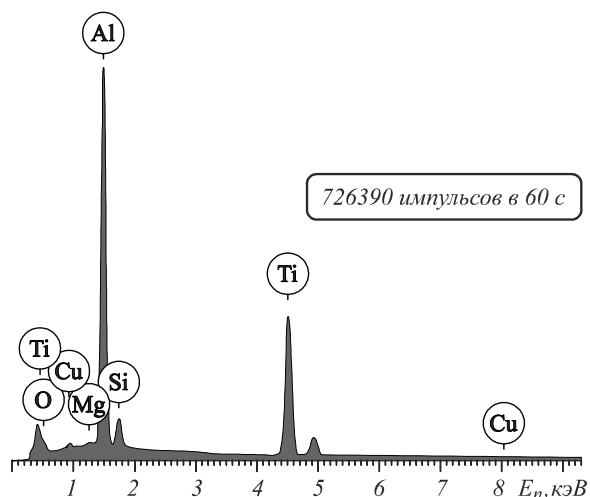


Рис. 5. Энергодисперсионный спектр, измеренный в зоне номер 1 области лазерной сварки алюминиевого сплава АК4 и титанового сплава BT5-1

Табл. 3. Результаты анализа элементного состава в зонах на шлифе материала в поперечном сечении области лазерной сварки алюминиевого сплава АК4 и титанового сплава BT5-1 (вес. %)

Номер зоны исследования	Al	Ti	Si	Mg	Cu
1	60,8	36,7	1,4	0,5	0,5
2	63,6	32,4	1,3	1,0	1,5
3	75,2	21,6	1,0	0,5	1,6

В результате проведенных исследований установлено, что при лазерной сварке происходит перемешивание металла шва. При этом в поперечном сечении зоны лазерной сварки сохраняется градиент концентраций химического состава. В процессе сварки образуется новый материал, в составе которого присутствуют химические элементы обоих свариваемых сплавов – алюминиевого сплава АК-4 и титанового сплава BT5-1.

Сварка алюминия и меди непрерывным лазерным излучением

В системе алюминий-медь существует ряд устойчивых при нормальных условиях химических соединений: Θ -фаза (Al_2Cu), η -фаза ($AlCu$), ϵ_2 -фаза, δ -фаза (Al_2Cu_3), γ_2 -фаза ($AlCu_2$), γ -фаза (Al_4Cu_9). Они характеризуются высокой твердостью и низкой пластичностью. При нормальных условиях медь обладает сравнительно малой растворимостью в алюминии, несмотря на сходство в кристаллическом строении этих металлов. В сравнении с сочетанием алюминия с другими металлами (например, никелем, железом) для взаимодействия алюминия с медью характерны большие скорости роста прослоек интерметаллидов и малая продолжительность начального периода.

В качестве источника непрерывного лазерного излучения использовался волоконный лазер YLR-1500 с длиной волны 1,08 мкм и максимальной выходной мощностью 1500 Вт. Для сварки материалов применялась технологическая оптическая головка Vimo. Фокусное расстояние плосковыпуклой линзы составляло

200 мм, минимальный диаметр фокусировки – около 100 мкм. При проведении экспериментальных исследований использовался ABB робот IRB4600 с поворотным столом. Моделирование условий лазерного воздействия с применением ДОЭ осуществлялось с использованием проекционного метода построения оптического изображения [22], который, однако, не находит применения при реализации процессов лазерной обработки материалов из-за значительных потерь энергии на отражение от трафарета и предъявляемых требований к характеру освещенности по всему полю изображения. Преимуществами формирования излучения с помощью ДОЭ являются: высокий коэффициент полезного действия, в то время как используемые маски и трафареты пропускают не более 20...30% падающего на них излучения; фокусировкой излучения на поверхности обрабатываемого объекта достигается увеличение плотности энергии, что позволяет уменьшить мощность применяемого лазера.

Для проведения металлографических исследований использовался растровый электронный микроскоп FEI Quanta 200 FEGSEM. Источником электронов в данной модели микроскопа является катод с полевой эмиссией FEG. Растровый электронный микроскоп FEI Quanta 200 оснащен аналитической приставкой для рентгеновского микроанализа – энергодисперсионным спектрометром. Проведено исследование структуры шва стыкового соединения алюминия и меди. На рис. 6 приведена структура металла шва в поперечном сечении зоны лазерной сварки встык разнородных материалов с обозначением зон исследования химического состава. На рис. 7 и в табл. 4 представлены результаты анализа элементного состава материала в зонах на шлифе материала в поперечном сечении области лазерной сварки алюминия и меди. Структура корня шва после лазерной сварки встык алюминия и меди приведена на рис. 8.

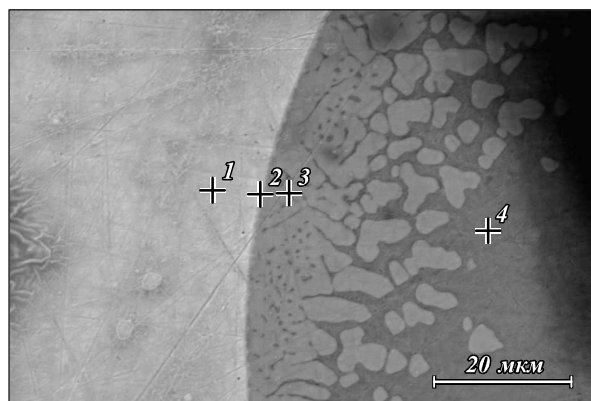


Рис. 6. Структура металла шва в поперечном сечении зоны лазерной сварки встык алюминия и меди с обозначением зон исследования химического состава

В результате металлографических исследований определено, что образующаяся при лазерном воздействии диффузионная зона имеет однородную структуру без пустот и раковин, что указывает на потенциально достаточно высокую работоспособность сварного соединения.

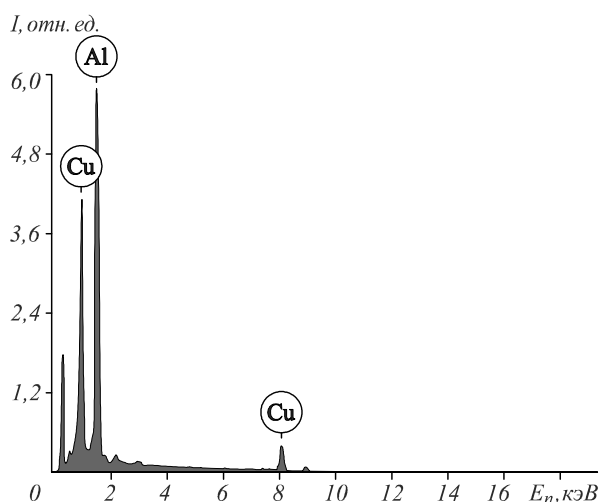


Рис. 7. Энергодисперсионный спектр, измеренный в зоне номер 2 на шлифе в поперечном сечении области лазерной сварки алюминия и меди

Табл. 4. Результаты анализа элементного состава материала в зонах на шлифе материала в поперечном сечении области лазерной сварки алюминия и меди (вес. %)

Номер зоны исследования	Al	Cu	Фаза
1	0	100	Cu
2	50,6	49,4	ζ_2 , Al_3Cu_4
3	70,2	29,8	θ , Al_2Cu
4	84,7	15,3	–

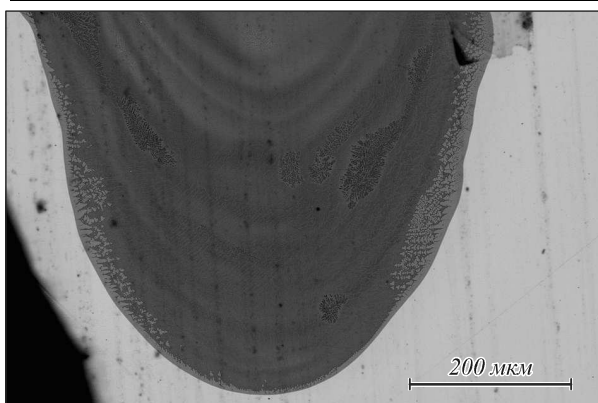


Рис. 8. Структура корня шва после лазерной сварки встык алюминия и меди

Зона металла шва разнородных материалов, формирующаяся при сварке, характеризуется индивидуальной структурой, ориентацией кристаллов, распределением фаз. Лазерное воздействие с его точным локализованным вводом энергии предоставляет возможность в значительной степени снизить рост слоёв интерметаллидных соединений. Для создания требуемого распределения плотности мощности в поперечном сечении лазерного пучка целесообразно использовать дифракционные оптические элементы.

Следует отметить, что одной из важнейших эксплуатационных характеристик деталей изделий аэрокосмической техники является сопротивление усталости [23]. Особенностью сварных соединений является наличие концентрации напряжений, что существенно снижает их прочность при действии

повторно-переменных нагрузок. Кроме того, сварные соединения алюминия с другими материалами склонны к коррозионному разрушению по зоне сплавления, обусловленному образованием короткозамкнутых гальванических пар [24]. Поэтому одним из основных направлений развития представленных исследований является повышение долговечности сварных соединений разнородных материалов в условиях воздействия переменных нагрузок и коррозионной среды [25].

Заключение

Определена целесообразность и изучены особенности формирования сварных соединений материалов на основе алюминия с другими металлами и сплавами лазерным воздействием с использованием ДОО, имеющего параметры: фокусное расстояние – 250 мм и длина фокального отрезка – 5 мм, – применяемого в оптической системе с фокусирующей линзой. Осуществлена лазерная сварка импульсным излучением алюминиевого сплава АК4 и титанового сплава ВТ5-1. Реализованы режимы обработки, предоставляющие возможность получить однородную структуру без пустот и раковин, что указывает на потенциально достаточно высокую работоспособность сварного соединения. Энергия в импульсе составила 8 Дж, длительность импульса – 3 мс. Выполнена сварка алюминия и меди непрерывным лазерным излучением. Определено, что лазерное воздействие с его чётко определённым и точным локализованным вводом энергии предоставляет возможность снизить рост слоёв интерметаллидных соединений. Для реализации таких технологических процессов должна использоваться специальная оптика. Требуется более точное дозирование подачи энергии лазерного луча локально в зону термического влияния с возможностью перераспределения плотности мощности. Такое перераспределение энергии лазерного пучка может быть получено с помощью ДОО, применение которых в технологических операциях открывает перспективы не только для решения задач лазерной сварки разнородных материалов, но и для других применений [26–32].

Благодарности

Микроструктурные исследования и металлография Al-Cu образцов проводились с использованием установок Сервисного центра трансмиссионной электронной микроскопии Венского технического университета, Австрия.

Литература

1. **Yoshida, H.** Recent trend of development in aluminum alloys for aircraft / H. Yoshida, M. Hayashi, K. Norikane // Journal of Japan Institute of Light Metals. – 2015. – Vol. 65, No 9. – P. 441-454. – DOI: 10.2464/jilm.65.441.
2. **Weberpals, J.-P.** Advantages and challenges of dissimilar materials in automotive lightweight construction / J.-P. Weberpals, P.A. Schmidt, D. Böhm, S. Müller // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9356. – 93560A. – DOI: 10.1117/12.2084589.

3. **Feistauer, E.E.** Mechanical behaviour of dissimilar friction stir welded tailor welded blanks in Al-Mg alloys for Marine applications / E.E. Feistauer, L.A. Bergmann, L.S. Barreto, J.F. dos Santos // *Materials and Design*. – 2014. – Vol. 59. – P. 323-332. – DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.042.
4. **Akca, E.** The effect of diffusion welding parameters on the mechanical properties of titanium alloy and aluminum couples / E. Akca, A. Gursel // *Metals*. – 2017. – Vol. 7, Issue 1. – 22. – DOI: 10.3390/met7010022.
5. **Kah, P.** Factors influencing Al-Cu weld properties by intermetallic compound formation // P. Kah, C. Vimalraj, J. Martikainen, R. Suoranta // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. – 2015. – Vol. 10(1). – 10 (13 p.) - DOI: 10.1186/s40712-015-0037-8.
6. **Borrisutthekul, R.** Feasibility of using TIG welding in dissimilar metals between steel/aluminum alloy / R. Borrisutthekul, P. Mitsomwang, S. Rattanachan, Y. Mutoh // *Energy Research Journal*. – 2010. – Vol. 1, Issue 2. – P. 82-86. – DOI: 10.3844/erjsp.2010.82.86.
7. **Saida, K.** Fluxless laser brazing of aluminium alloy to galvanized steel using a tandem beam - dissimilar laser brazing of aluminium alloy and steels / K. Saida, H. Ohnishi, K. Nishimoto // *Welding International*. – 2010. – Vol. 24(3). – P. 161-168. – DOI: 10.1080/09507110902843065.
8. **Shubhavardhan, R.N.** Friction welding to join dissimilar metals / R.N. Shubhavardhan, S. Surendran // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. – 2012. – Vol. 2(7). – P. 200-210.
9. **Wang, J.** Micro-image analysis in the diffusion-bonded zone of Fe₃Al/Q235 carbon steel dissimilar materials / J. Wang, Y. Li, H. Wu, J. Ren // *Bulletin of Materials Science*. – 2001. – Vol. 25, Issue 5. – P. 367-370.
10. **Pourali, M.** Influence of welding parameters on intermetallic compounds formation in dissimilar steel/aluminum friction stir welds / M. Pourali, A. Abdollah-zadeh, T. Saeid, F. Kargar // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 715. – P. 1-8. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.04.272.
11. **Meco, S.** Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminium joints for thick structural components / S. Meco, G. Parda, S. Ganguly, S. Williams, N. McPherson // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2015. – Vol. 67. – P. 22-30. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2014.10.006.
12. **Wang, P.** Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview / P. Wang, X. Chen, Q. Pan, B. Madigan, J. Long // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 87, Issues 9-12. – P. 3081-3090. – DOI: 10.1007/s00170-016-8725-y.
13. **Hong, K.-M.** Prospects of laser welding technology in the automotive industry: a review / K.-M. Hong, Y.C. Shin // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2017. – Vol. 245. – P. 46-69. – DOI: 10.1016/j.jmatproc.2017.02.008.
14. **Fan, J.** Effect of thermal cycle on the formation of intermetallic compounds in laser welding of aluminum-steel overlap joints / J. Fan, C. Thomy, F. Vollertsen // *Physics Procedia*. – 2011. – Vol. 12, Part 1. – P. 134-141. – DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.017.
15. **Казанский, Н.Л.** Оптическая система для проведения селективной лазерной сублимации компонентов металлических сплавов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, В.И. Трегуб // *Компьютерная оптика*. – 2010. – Т. 34, № 4. – С. 481-486.
16. **Мурзин, С.П.** Применение фокусаторов излучения для создания металлических нанопористых материалов с высокой удельной площадью поверхности лазерным воздействием / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.А. Мельников, Н.В. Трегуб // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 226-232.
17. **Doskolovich, L.L.** Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // *Optik*. – 1995. – Vol. 101(2). – P. 37-41.
18. **Kazanskiy, N.L.** Computer-aided design of diffractive optical elements / N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // *Optical Engineering*. – 1994. – Vol. 33, No 10. – P. 3156-3166. – DOI: 10.1117/12.178898.
19. **Pavelyev, V.S.** Formation of diffractive microrelief on diamond film surface / V.S. Pavelyev, S.A. Borodin, N.L. Kazanskiy, G.F. Kostyuk, A.V. Volkov // *Optics & Laser Technology*. – 2007. – Vol. 39, Issue 6. – P. 1234-1238. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.08.004.
20. **Гончарский, А.В.** Введение в компьютерную оптику / А.В. Гончарский, В.В. Попов, В.В. Степанов. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 312 с.
21. **Досколович, Л.Л.** Исследование оптических систем управления передачей высоких энергий / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.И. Мордасов, С.П. Мурзин, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика*. – 2002. – № 23. – С. 40-43.
22. **Metev, S.M.** Laser-assisted microtechnology / S.M. Metev, V.P. Veiko. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. – 270 p. – ISBN 978-3-642-87273-0.
23. **Cherolis, N.E.** Fatigue in the aerospace industry: striations / N.E. Cherolis // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. – 2008. – Vol. 8, Issue 3. – P. 255-258. – DOI: 10.1007/s11668-008-9146-5.
24. **Shen, C.** Microstructures and electrochemical behaviors of the friction stir welding dissimilar weld / C. Shen, J. Zhang, J. Ge // *Journal of Environmental Sciences*. – 2011. – Vol. 23, Supplement. – P. S32-S35. – DOI: 10.1016/S1001-0742(11)61072-3.
25. **Jaya, A.** Corrosion treatments and the fatigue of aerospace structural joints / A. Jaya, U.H. Tiong, R. Mohammed, C. Bil, G. Clark // *Procedia Engineering*. – 2010. – Vol. 2, Issue 1. – P. 1523-1529. – DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.164.
26. **Murzin, S.P.** Formation of nanoporous structures in metallic materials by pulse-periodic laser treatment / S.P. Murzin // *Optics & Laser Technology*. – 2015. – Vol. 72. – P. 48-52. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.03.022.
27. **Murzin, S.P.** Local laser annealing for aluminium alloy parts / S.P. Murzin // *Lasers in Engineering*. – 2016. – Vol. 33, Issues 1-3. – P. 67-76.
28. **Smelov, V.G.** Particularly selective sintering of metal powders by pulsed laser radiation / V.G. Smelov, A.V. Sotov, S.P. Murzin // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 685. – P. 403-407. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.403.
29. **Murzin, S.P.** Microstructuring the surface of silicon carbide ceramic by laser action for reducing friction losses in rolling bearings / S.P. Murzin, V.B. Balyakin // *Optics & Laser Technology*. – 2017. – Vol. 88. – P. 96-98. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.09.007.
30. **Murzin, S.P.** A study of vibration characteristics and determination of the conditions of nanopores formation in metallic materials during laser action / S.P. Murzin, E.V. Shakhmatov, A.A. Igolkin, L.F. Musaakhunova // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 106. – P. 266-271. – DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.034.
31. **Murzin, S.P.** Influence of conditions of the samples fixation on the intensity of the nanoporous structure formation in the metallic material by laser action with thermocycling / S.P. Murzin, A.N. Kryuchkov // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 106. – P. 272-276. – DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.035.

32. **Murzin, S.P.** Study of Cu-Zn alloy objects vibration characteristics during laser-induced nanopores formation / S.P. Murzin, A.B. Prokofiev, A.I. Safin // Procedia Engi-

neering. – 2017. – Vol. 176. – P. 552-556. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.297.

Сведения об авторах

Мурзин Сергей Петрович, 1963 года рождения. В 1986 году окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет, коротко – Самарский университет) по специальности «Авиационные двигатели». Доктор технических наук (2005 год), работает профессором кафедры автоматических систем энергетических установок Самарского университета. Руководитель научно-образовательного центра лазерных систем и технологий. С.П. Мурзин – специалист в области лазерных технологий и нанотехнологий, лазерной физики и оптики. В списке научных работ С.П. Мурзина более 100 статей, 2 монографии, 18 авторских свидетельств и патентов. E-mail: murzin@ssau.ru.

Лидль Герхард, 1960 года рождения. В 1991 г. окончил обучение в Институте прикладной физики Венского технического университета. В 2000 году защитил степень доктора техники в Венском техническом университете по направлению лазерной микрообработки. В настоящее время является профессором в Институте технологии производства и лазерной техники Венского технического университета, где возглавляет группу применения лазеров. В основном специализируется на применениях лазерной обработки материалов с акцентом на ультракороткие лазерные импульсы. E-mail: gerhard.liedl@tuwien.ac.at.

ГРПТИ: 29.33.47

Поступила в редакцию 26 апреля 2017 г. Окончательный вариант – 20 октября 2017 г.

LASER WELDING OF DISSIMILAR METALLIC MATERIALS WITH USE OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

S.P. Murzin¹, G. Liedl²

¹ Samara National Research University, Samara, Russia,

² Vienna University of Technology, Vienna, Austria

Abstract

A use of laser technology it is progressive in the welding of dissimilar materials. Pulsed laser welding of an aluminum alloy AK4 and a titanium alloy VT5-1 was performed. Processing conditions were determined, the realization of which during melting of materials in the heat-affected zone makes it possible to obtain a homogeneous structure without voids and shells, potentially producing sufficiently sound welded joints. To create the required power density distribution across the laser beam, it was found expedient to use diffractive optical elements. Aluminum and copper were welded by continuous laser beam. It is determined that laser action with its well-defined and precise localized heat input makes it possible to significantly reduce the growth of intermetallic compound layers.

Keywords: metallic material, welded joint, aluminium, laser action, diffractive optical element.

Citation: Murzin SP, Liedl G. Laser welding of dissimilar metallic materials with use of diffractive optical elements. Computer Optics 2017; 41(6): 848-855. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-848-855.

Acknowledgements: Microstructural research and metallography of Al-Cu samples was performed using facilities at the University Service Centre for Transmission Electron Microscopy, Vienna University of Technology, Austria.

References

- [1] Yoshida H, Hayashi M, Norikane K. Recent trend of development in aluminum alloys for aircraft. Journal of Japan Institute of Light Metals 2015; 65(9): 441-454. DOI: 10.2464/jilm.65.441.
- [2] Weberpals J-P, Schmidt PA, Böhm D, Müller S. Advantages and challenges of dissimilar materials in automotive lightweight construction. Proc SPIE 2015; 9356: 93560A. DOI: 10.1117/12.2084589.
- [3] Feistauer EE, Bergmann LA, Barreto LS, dos Santos JF. Mechanical behaviour of dissimilar friction stir welded tailor welded blanks in Al-Mg alloys for Marine applications. Materials and Design 2014; 59: 323-332. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.042.
- [4] Akca E, Gursel A. The effect of diffusion welding parameters on the mechanical properties of titanium alloy and aluminum couples. Metals 2017; 7(1): 22. DOI: 10.3390/met7010022.
- [5] Kah P, Vimalraj C, Martikainen J, Suoranta R. Factors influencing Al-Cu weld properties by intermetallic compound formation. International Journal of Mechanical and Materials Engineering 2015; 10(1): 10. DOI: 10.1186/s40712-015-0037-8.
- [6] Borrisutthekul R, Mitsomwang P, Rattanachan S, Mutoh Y. Feasibility of using TIG welding in dissimilar metals between steel/aluminum alloy. Energy Research Journal 2010; 1(2): 82-86. DOI: 10.3844/erjsp.2010.82.86.
- [7] Saida K, Ohnishi H, Nishimoto K. Fluxless laser brazing of aluminium alloy to galvanized steel using a tandem beam - dissimilar laser brazing of aluminium alloy and steels. Welding International 2010; 24(3): 161-168. DOI: 10.1080/09507110902843065.

- [8] Shubhvardhan RN, Surendran S. Friction welding to join dissimilar metals. *Int J Emerg Technol Adv Eng* 2012; 2(7): 200-210.
- [9] Wang J, Li Y, Wu H, Ren J. Micro-image analysis in the diffusion-bonded zone of Fe₃Al/Q235 carbon steel dissimilar materials. *Bulletin of materials science* 2001; 25(5): 367-370.
- [10] Pourali M, Abdollah-zadeh A, Saeid T, Kargar F. Influence of welding parameters on intermetallic compounds formation in dissimilar steel/aluminum friction stir welds. *J Alloys and Compounds* 2017; 715: 1-8. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.04.272.
- [11] Meco S, Pardal G, Ganguly S, Williams S, McPherson N. Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminum joints for thick structural components. *Opt Lasers Eng* 2015; 67: 22-30. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2014.10.006.
- [12] Wang P, Chen X, Pan Q, Madigan B, Long J. Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview. *Int J Adv Manuf Technol* 2016; 87(9-12): 3081-3090. DOI: 10.1007/s00170-016-8725-y.
- [13] Hong K-M, Shin YC. Prospects of laser welding technology in the automotive industry: a review. *J Mater Process Technol* 2017; 245: 46-69. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.02.008.
- [14] Fan J, Thomy C, Vollertsen F. Effect of thermal cycle on the formation of intermetallic compounds in laser welding of aluminum-steel overlap joints. *Physics Procedia* 2011; 12(A): 134-141. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.017.
- [15] Kazanskiy NL, Murzin SP, Tregub VI. Optical system for realization selective laser sublimation of metal alloys components. *Computer Optics* 2010; 34(4): 481-486.
- [16] Murzin SP, Tregub VI, Melnikov AA, Tregub NV. Application of radiation focusators for creation of nanoporous metal materials with high specific surface area by laser action. *Computer Optics* 2013; 37(2): 226-232.
- [17] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Soifer VA, Tzaregorodtzev AYe. Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment. *Optik* 1995; 101(2): 37-41.
- [18] Kazanskiy NL, Kotlyar VV, Soifer VA. Computer-aided design of diffractive optical elements. *Optical Engineering* 1994; 33(10): 3156-3166. DOI: 10.1117/12.178898.
- [19] Pavelyev VS, Borodin SA, Kazanskiy NL, Kostyuk GF, Volkov AV. Formation of diffractive microrelief on diamond film surface. *Opt Laser Technol* 2007; 39(6): 1234-1238. DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.08.004.
- [20] Goncharsky AV, Popov VV, Stepanov VV. Introduction to computer optics [In Russian]. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1991.
- [21] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Mordasov VI, Murzin SP, Kharitonov SI. Study of optical systems for transfer control of high energy [In Russian]. *Computer Optics* 2002; 23: 40-43.
- [22] Metev SM, Veiko VP. Laser-assisted microtechnology. Berlin, Heidelberg: Springer; 1998. ISBN 978-3-642-87273-0
- [23] Cherolis NE. Fatigue in the aerospace industry: striations. *J Fail Anal and Preven* 2008; 8(3): 255-258. DOI: 10.1007/s11668-008-9146-5.
- [24] Shen C, Zhang J, Ge J. Microstructures and electrochemical behaviors of the friction stir welding dissimilar weld. *Journal of Environmental Sciences* 2011; 23(Suppl.): S32-S35.
- [25] Jaya A, Tiong UH, Mohammed R, Bil C, Clark G. Corrosion treatments and the fatigue of aerospace structural joints. *Procedia Engineering* 2010; 2(1): 1523-1529. DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.164.
- [26] Murzin SP. Formation of nanoporous structures in metallic materials by pulse-periodic laser treatment. *Opt Laser Technol* 2015; 72: 48-52. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.03.022.
- [27] Murzin SP. Local laser annealing for aluminium alloy parts. *Lasers in Engineering* 2016; 33(1-3): 67-76.
- [28] Smelov VG, Sotov AV, Murzin SP. Particularly selective sintering of metal powders by pulsed laser radiation. *Key Engineering Materials* 2016; 685: 403-407. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.403.
- [29] Murzin SP, Balyakin VB. Microstructuring the surface of silicon carbide ceramic by laser action for reducing friction losses in rolling bearings. *Opt Laser Technol* 2017, 88, 96-98. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.09.007.
- [30] Murzin SP, Shakhmatov EV, Igolkin AA, Musaakhunova LF. A study of vibration characteristics and determination of the conditions of nanopores formation in metallic materials during laser action. *Procedia Engineering* 2015; 106: 266-271. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.034.
- [31] Murzin SP, Kryuchkov AN. Influence of conditions of the samples fixation on the intensity of the nanoporous structure formation in the metallic material by laser action with thermocycling. *Procedia Engineering* 2015; 106: 272-276. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.035.
- [32] Murzin SP, Prokofiev AB, Safin AI. Study of Cu-Zn alloy objects vibration characteristics during laser-induced nanopores formation. *Procedia Engineering* 2017; 176: 552-556. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.297.

Authors' information

Serguei Petrovich Murzin (b. 1963) graduated (1986) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, presently, Samara National Research University, short – Samara University) majoring in Aircraft Engines. He received his Doctor in Technics (2005) degree from Samara National Research University. He is holding the position of a professor in Samara University of Automatic Systems of Power Plants department. He is the head of the Research & Education Center of Laser Systems and Technologies. He is a specialist in laser technology and nanotechnology, laser physics and optics. He is a co-author of over 100 scientific papers, two monographs, and 18 inventions and patents. E-mail: murzin@ssau.ru.

Gerhard Liedl (b. 1960) graduated (1991) from the Institute of Applied Physics at the Vienna University of Technology. He received his Doctor of Technology (2000) degree from the Vienna University of Technology on laser micromachining. Actually, he is professor at the Vienna University of Technology at the Institute for Production Engineering and Laser Technology, where he heads the laser application group. He is mainly focused on applications of laser material processing with emphasis on ultra short laser pulses. E-mail: gerhard.liedl@tuwien.ac.at.

Received April 26, 2017. The final version – October 20, 2017.