

## СВАРКА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА EN AW-1050A ВЫСОКОМОЩНЫМ ДИОДНЫМ ЛАЗЕРОМ\*

А. КЛИМПЕЛЬ, А. ЛИСЕЦКИ, Д. ЯНИЦКИ, С. СТАНО

(Силез. ун-т при Ин-те технологии и сварки, г. Гливица, Польская Республика)

Представлены результаты исследования процесса сварки высокомоощным диодным лазером алюминиевого сплава AW-1050A. С использованием высокомоощного диодного лазера ROFIN SINAR DL 020 получены стыковые соединения тонких алюминиевых листов. Определены механические свойства и структура соединений. Подтверждена возможность получения высококачественных соединений при сварке в широком диапазоне режимов.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, алюминиевый сплав, мощный диодный лазер, черный поглотитель, проплавление, микроструктура

Благодаря своим механическим свойствам, низкой плотности, высокой коррозионной стойкости и хорошей пластичности алюминиевые сплавы широко используются в качестве конструкционных материалов в автомобильной, авиационной, химической и энергетической промышленности [1, 2]. За последние пять лет доля их применения в автомобильной промышленности превысила 80 %. Предполагается, что масса алюминиевых сплавов, используемых для изготовления одной панели кузовов автомобилей, возрастет с 110 (1996 г.) до 250...340 кг (к 2015 г.) (рис. 1).

Стремительное развитие высокомоощных молекулярных и твердотельных лазеров способствует тому, что автоматизированная и роботизированная лазерная сварка соединений алюминиевых сплавов по качеству соединений и экономическим показателям является конкурентоспособной таким процессам сварки, как ТИГ, плавящимся электродом в среде защитного газа и плазменной дугой прямого действия в широком диапазоне толщины [1, 3, 4].

В основе процесса лазерной сварки лежит интенсивное плавление контактной поверхности листов, свариваемых с помощью тепла, выделяемого сфокусированным, сконцентрированным и высокомоощным лазерным пучком [1, 4, 5]. Лазер как гибкий источник тепла с высокой (свыше  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) плотностью мощности (интенсивностью) позволяет выполнять сварку с парогозовыми каналами односторонних соединений листов алюминиевых сплавов в диапазоне толщины от нескольких сотен миллиметров до 20 мм. Механические свойства полученных соединений не

ниже, чем у основного металла, они недеформированы, шов очень узкий, а зону термического влияния (ЗТВ) определить практически невозможно [1, 3, 5, 6].

Основными трудностями, возникающими при лазерной сварке алюминиевых сплавов, являются их высокая химическая активность, склонность к интенсивному окислению, высокая теплопроводность, склонность к пористости, потеря в процессе сварки легирующих элементов таких, как магний и цинк, и слабое поглощение энергии лазерного пучка. При маломощном лазерном пучке только 1 % лазерной энергии поглощается полированной поверхностью алюминия [4, 5].

При сварке алюминиевых сплавов наиболее широко применяются твердотельные Nd:YAG- и молекулярные CO<sub>2</sub>-лазеры с длиной волны соответственно 1,06 и 10,60 мкм [3–5]. Лазерная сварка алюминиевых сплавов без поглотителей, которые используются для увеличения поглощения поверхностью соединения лазерной энергии, возможна только в случае применения технологии сварки с парогозовым каналом.

Небольшие отклонения в размере пятна лазерного пучка Nd:YAG- и CO<sub>2</sub>-лазеров приводят к значительным изменениям глубины проплавления и появлениях других дефектов формы швов, а также повышают пористость металла шва, даже если устранены потенциальные источники поступления водорода, являющегося основной причиной пористости швов в алюминиевых сплавах [3, 5].

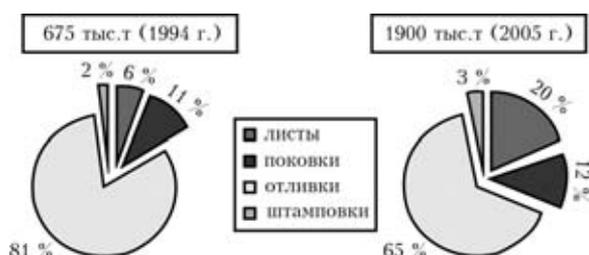


Рис. 1. Показатели использования алюминиевых сплавов в автомобильной промышленности [2]

\* По материалам Второй международной конференции «Laser technologies in welding and materials processing», 23–27 мая 2005 г., пос. Кацивели, Крым, Украина.



Высокомощные диодные лазеры (ВДЛ) с диапазоном излучения 800...900 нм используются при обработке материалов во многих областях промышленности. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с молекулярными CO<sub>2</sub>- и твердотельными Nd:YAG-лазерами, особенно в плане более низких капиталовложений и расходов при эксплуатации [4, 6, 7].

Стандартные ВДЛ с плотностью мощности (интенсивности) пятна лазерного пучка 10<sup>4</sup>...10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup> размером в несколько квадратных миллиметров могут использоваться только для сварки в режиме теплопроводности. С помощью специальной оптики для фокусировки и формирования лазерного пучка можно создать кольцевое пятно диаметром 1 мм, что успешно используют, например, при получении сварки с паргазовым каналом стыкового соединения сплава Al-3Mg толщиной 1,5 мм (мощность лазера P = 1400 Вт и скорость сварки v<sub>св</sub> = 0,32 м/мин), а также сплава Al-1Mg толщиной 2 мм (P = 2300 Вт и v<sub>св</sub> = 0,35 м/мин) [6]. Рациональным решением является применение специальных поглотителей для увеличения поглощения энергии лазерного пучка поверхностью свариваемых листов [8].

В настоящей работе рассматривается сварка ВДЛ стыковых соединений алюминиевого сплава EN AW-1050A толщиной 0,8, 1,0 и 1,5 мм, имеющего следующий химический состав, мас. %: 99,5 Al; 0,40 Fe; 0,25 Si; 0,05 Cu; 0,05 Mn; 0,05 Mg; 0,07 Zn; 0,05 Ti и 0,03 другие элементы. Определено влияние основных параметров лазерной сварки на механические свойства полученных соединений (табл. 1).

В исследованиях использовали ВДЛ типа ROFIN DL 020 (рис. 2) с максимальной выходной мощностью 2300 Вт. Пятно лазерного пучка размером 3,8×6,8 мм сфокусировано на наружной стороне соединений, полученных при фокусном расстоянии 82 мм. Для позиционирования и перемещения соединений и лазерной головки использовали систему автоматического позиционирования CNC ISEL. Она состоит из трех линейных координатных столов, перемещающихся по осям x, y, z, и одного вращающегося позиционера, который приводится в действие четырехосевым сервоконтроллером, подключенным к компьютеру через PC-плату. С целью обеспечения точного контроля положения лазерного пятна сварочную

Таблица 1. Механические свойства стыкового соединения алюминиевого сплава EN AW-1050A, полученного лазерной сваркой

s, мм	Уровень упрочнения	σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ, %
0,8	Рекристаллизованный	105	75	4
1,0		105	75	4
1,5	Полутвердый	108	85	4

головку устанавливают на вертикальном столе по оси z. Непосредственно под лазерной головкой расположен крестовой стол с двумя координатными столиками для линейного перемещения по двум направлениям — вдоль осей x и y. Алюминиевая установочная пластина прикреплена к крестовому столу с помощью специальной зажимной системы и графитовой подкладки, которая формирует и защищает корень шва.

**Технические характеристики ВДЛ**

Длина волны излучения, нм	808±5
Выходная мощность лазерного пучка (незатухающая гармоничная волна),	
максимальная, Вт	2300
Мощность, Вт	100...2300
Фокусное расстояние, мм	82/32
Размер лазерного пятна, мм	1,8×5,8/1,8×3,8
Интенсивность, кВт/см <sup>2</sup>	0,8...36,5

Испытания показали, что при сварке лазером с максимальной мощностью невозможно достичь полного проплавления стыкового соединения алюминиевого листа толщиной 0,8 мм с очищенной поверхностью. Для увеличения поглощения энергии лазерного пучка наружную сторону соединения обрабатывали спиртовым раствором поглотителя черного цвета (производство «Pentel»). Определено, что при использовании поглотителя поглощение энергии лазерного пучка поверхностью соединений алюминиевых сплавов значительно увеличилось, что способствовало получению высококачественного соединения в широком диапазоне параметров режимов лазерной сварки. Перед выполнением лазерной сварки кромки свариваемых образцов для устранения оксидов подвергали механической очистке, а также обезжириванию, а затем на поверхность стыка наносили черный поглотитель. Соединения алюминиевых листов длиной 200 мм сваривали лазером при разных значениях погонной энергии, скорости сварки и мощности лазера (табл. 2). Защиту сварочной ванны и всей зоны сварки обеспечивали струей аргона, которую подавали через цилиндрические сопла диаметром 12 мм (постоянный расход газа составил 10 л/мин). Результаты механических испытаний, металлографического ана-



Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки для лазерной сварки алюминиевых сплавов с использованием ВДЛ ROFIN DL 020

**Таблица 2. Механические свойства стыковых соединений алюминиевого сплава EN AW-1050A, полученных лазерной сваркой с использованием ВДЛ ROFIN DL 020**

<i>P</i> , кВт	<i>s</i> , мм	<i>v</i> <sub>св.</sub> , м/мин	$\sigma_b$ , МПа
1,5	0,8	1,10	73
1,7		1,65	78
2,5		1,85	74
2,5		2,63	73
1,5	1,0	0,80	80
1,8		1,35	83
2,5		1,30	72
2,5		1,90	75
2,0	1,5	0,70	85
2,3		1,00	82
2,5		0,85	84
2,5		1,25	85

Примечание. Результаты даны по среднему значению трех образцов, фокусное расстояние 82 мм, наружная сторона соединения покрыта черным поглотителем, угол изгиба от наружной стороны шва и от корня составлял 180°, образец разрушался по ЗТВ.

лиза и данные о микротвердости стыкового соединения представлены в табл. 2 и 3 и на рис. 3–6.

Таким образом, результаты исследований процесса лазерной сварки с ВДЛ стыковых соединений листов алюминиевого сплава EN AW-1050A толщиной 0,8, 1,0 и 1,5 мм показали, что нанесение черного поглотителя на наружную поверхность стыка значительно увеличивает поглощение энергии лазерного пучка, благодаря чему можно получить качественные соединения в широком диапазоне параметров лазера (см. табл. 2 и рис. 6). В результате рекристаллизации зерен упрочненного основного металла микротвердость металла ЗТВ существенно понизилась по сравнению с основным, а пластичность металла ЗТВ и металла шва повысилась (рис. 3–5 и табл. 3). Во время испытания на растяжение разрушение образцов происходило в ЗТВ, временное сопротивление на растяжение составило около 70 % прочности основного металла (табл. 3). Результаты испытаний на изгиб подтвердили высокую пластичность соединений, выполненных как с лицевой стороны шва, так и со стороны корня шва (см. табл. 2). Для обеспечения механических свойств соединений на уровне не ниже основного металла необ-

**Таблица 3. Микротвердость HV 0,2 стыковых соединений алюминиевого сплава EN AW-1050A**

<i>s</i> , мм	<i>P</i> , кВт	<i>v</i> <sub>св.</sub> , м/мин	Основной металл			ЗТВ		
			Точки (рис. 3)					
			1	2	3	4	5	6
0,8	1,5	1,10	33,6	36,4	37,1	27,1	25,8	26,6
	1,7	1,65	35,6	34,5	20,2	22,3	18,4	20,4
	2,5	1,85	37,1	36,4	33,6	23,0	24,9	24,5
	2,5	2,63	39,4	37,1	35,6	21,9	21,0	20,4
1,0	1,5	0,80	38,6	37,1	40,2	29,6	28,0	30,7
	1,8	1,35	42,0	39,4	38,6	27,1	26,6	24,9
	2,5	1,30	42,9	42,0	37,1	26,6	28,5	27,1
	2,5	1,90	43,8	42,0	38,6	30,7	28,5	28,0
1,5	2,0	0,70	39,4	36,4	23,0	24,9	22,6	25,3
	2,3	1,00	37,1	38,6	36,4	27,1	25,8	27,1
	2,5	0,85	40,2	40,2	27,1	29,6	29,0	28,0
	2,5	1,25	45,8	41,1	37,8	28,5	28,5	28,0

**Окончание табл. 3**

<i>s</i> , мм	Шов			ЗТВ			Основной металл		
	Точки (рис. 3)								
	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,8	25,3	28,5	28,5	25,8	26,6	26,2	22,6	24,5	35,6
	21,9	21,3	23,0	23,4	23,4	25,3	26,2	35,6	38,6
	28,5	28,0	25,8	26,2	22,3	22,6	28,5	37,1	37,1
	29,6	27,1	26,6	24,5	29,6	22,3	33,6	37,1	37,1
1,0	29,0	31,2	29,0	28,5	29,0	26,6	24,9	35,6	37,1
	26,6	23,7	24,1	27,1	25,3	24,5	22,3	38,6	42,0
	29,6	29,0	29,0	27,1	27,1	27,1	24,9	40,2	37,1
	33,0	30,7	30,1	31,2	29,6	28,0	42,9	43,8	38,2
1,5	25,3	26,6	26,6	27,1	25,8	25,3	39,4	42,0	42,9
	27,6	26,6	26,6	29,6	26,2	25,8	23,4	42,0	40,2
	28,0	24,9	27,6	27,6	27,6	27,6	26,2	37,1	42,0
	28,0	27,1	26,2	29,6	26,6	28,0	24,9	39,4	42,0

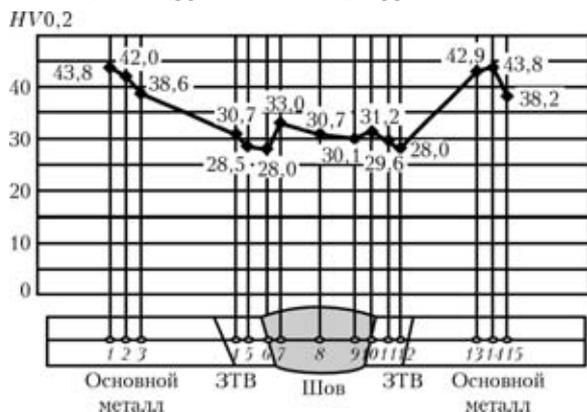


Рис. 3. Распределение микротвердости HV<sub>0,2</sub> в поперечном сечении стыковых соединений листов из сплава алюминия EN AW-1050A толщиной 1 мм при P = 2,5 кВт и v<sub>св</sub> = 1,9 м/мин

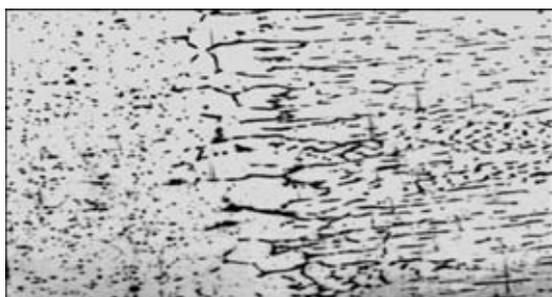


Рис. 4. Микроструктура (X200) ЗТВ стыкового соединения листов алюминиевого сплава EN AW-1050A толщиной 0,8 мм, полученного при P = 2,5 кВт и v<sub>св</sub> = 0,4 м/мин (основной металл слева; травление реактивом Келлера)

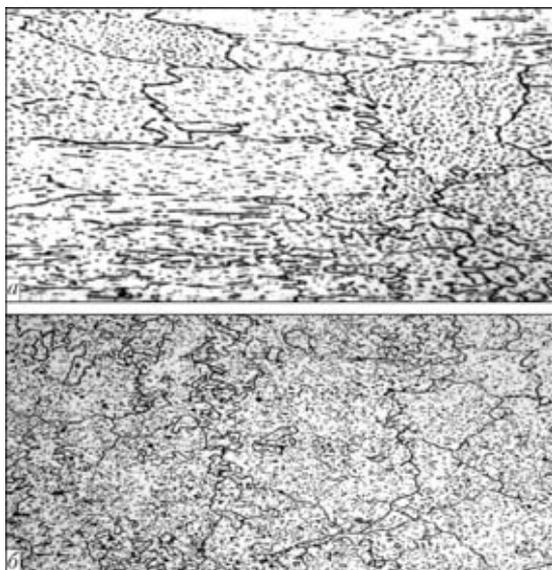


Рис. 5. Микроструктура (X200) стыкового соединения листов алюминиевого сплава EN AW-1050A толщиной 1,5 мм при P = 2,5 кВт и v<sub>св</sub> = 0,85 м/мин: а — ЗТВ; б — шов (травление реактивом Келлера)

ходимо после лазерной сварки выполнить их термообработку [1]. Чтобы получить высококачественные стыковые соединения листов алюми-

The paper presents the results of investigation of the process of welding AW-1050A aluminium alloy with a powerful diode laser. A powerful diode laser of ROFIN SINAR DL 020 was used to produce butt joints of thin aluminium sheets. Mechanical properties and structure of the joints have been determined. The possibility of producing high-quality joints has been confirmed in welding in a wide range of modes.

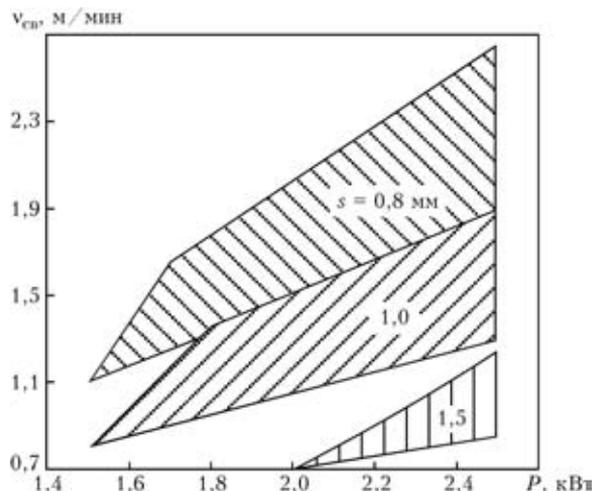


Рис. 6. Области оптимальных параметров режима для лазерной сварки стыковых соединений листов алюминия EN AW-1050A толщиной 0,8, 1,0 и 1,5 мм при использовании ВДЛ ROFIN DL 0 20 (фокусное расстояние 82 мм, расход защитного газа 10 л/мин)

ниевое сплава, перед лазерной сваркой с ВДЛ следует обеспечить прецизионную подготовку кромок соединения и нанести черный поглотитель на наружную сторону шва, что позволит увеличить поглощение энергии лазерного пучка. Испытания стыковых соединений алюминиевых листов, полученных лазерной сваркой с использованием и применением активирующего флюса ActivaTec 500, предназначенного для сварки ТИГ, показали, что скорость сварки можно повысить на 30 %, однако качество соединений будет неудовлетворительным из-за наличия в металле шва оксидных включений.

1. *Welding Handbook. Materials and applications. Pt. I.* — Ed. 8. — AWS. — 1996. — 3. — P. 257–306.
2. *Recent development in aluminum alloys for the automotive industry* / W. S. Miller et al. // *Mater. Sci. & Eng.* — 2000. — A280. — P. 37–49.
3. *Pastor M., Zhao H., Martukanitz R. P., Debroy T. Porosity, underfill and magnesium loss during continuous wave Nd: YAG laser welding of thin plates of aluminum alloys 5182 and 5754* // *Welding J.* — 1999. — 78, № 6. — P. 207–216.
4. *Klimpel A. Spawanie, zgrzewanie i ciecie metali.* — Warszawa: WNT, 1999.
5. *CO<sub>2</sub> laser beam welding of aluminum 574-0 and 6111-T4 alloys* / S. E. Venkat, C. Albiglit, S. Ramasamy, J. P. Hurley // *Welding J.* — 1997. — 76, № 7. — P. 275–282.
6. *Experiments relating to deep welding using a fibre-contact high-power diode laser* / J. Bleidner et al. // *Welding & Cutting. Schweissen und Schneiden.* — 2000. — 52, № 4. — P. 78–83.
7. *Klimpel A. Lasery diodowe duzej mocy w spawalnictwie* // *Przeglad Spawalnictwa.* — 1999. — № 8. — P. 1–8.
8. *Kuo M., Sun Z., Pan D. Laser welding with activating flux* // *Sci. and Technol. of Welding and Joining.* — 2001. — 6, № 1. — P. 17–22.

Поступила в редакцию 26.01.2006