

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

При сварке алюминиевых сплавов кристаллическая структура и механические свойства металла швов изменяются в зависимости от состава сплава, способов и режимов сварки. Эффект сочетания высокого коэффициента отражения, теплопроводности и теплоемкости алюминия приводит к необходимости тщательного выбора оптимальных режимов лазерной сварки алюминиевых сплавов.

Сплавы алюминия применяются в различных отраслях промышленности благодаря уникальному сочетанию свойств: низкой плотности при высоких значениях удельной прочности, коррозионной стойкости и теплопроводности. По показателям отношения прочности и текучести к плотности высокопрочные алюминиевые сплавы значительно превосходят низкоуглеродистые и низколегированные стали, чистый титан и уступают лишь высоколегированным сталям повышенной прочности и сплавам титана [1]. Наши исследования касались вопросов лазерной сварки следующих систем алюминиевых сплавов: Al-Mg(Амг6), Al-Mg-Si-Cu (АД37), Al-Mg-Li (01420,1424), Al-Mg-Sc (01570, 01545К), Al-Cu (1201), Al-Cu-Li-Sc (01421) и Al-Cu-Li-Sc (01460) и Al-Cu-Li (1461).

Известно, что лазерная сварка характеризуется наименьшим тепловложением в сравнении с другими методами сварки [2]. Поэтому ее применение должно быть целесообразно как с точки зрения остаточных напряжений и деформаций, так и с позиции уменьшения размеров зоны разупрочнения в термоупрочняемых сплавах. Преимущества лазерной сварки алюминиевых сплавов в следующем:

- снижение коробления деталей после сварки;
- повышение технологичности изготовления деталей;
- высокая степень автоматизации;
- отсутствие требования применения вакуумных камер (в отличие от электронно-лучевой сварки), что особенно важно для крупногабаритных конструкций.

Процесс сварки плавлением алюминиевых сплавов связан с рядом особенностей, которые сказываются на технологии, выборе метода, режимов и свойствах сварных соединений [3]. Металлургические особенности сварки алюминиевых сплавов определяются взаимодействием их с газами окружающей среды, интенсивностью испарения легирующих элементов, а также особенностями кристаллизации в условиях сварочного процесса. В частности, алюминиевые сплавы достаточно чувствительны к влиянию окружающей среды с образованием окисных включений и пор при взаимодействии с атмосферой воздуха [3]. В связи с этим при разработке технологии их сварки лазерным лучом требуется более тщательная защита шва от воздействия окружающей среды. Для защиты сварного шва от окисления и воздействия на плазму можно использовать различные защитные газы – He, Ar, CO₂, N₂, а также их смеси. С точки зрения газовой защиты в зоне лазерного излучения целесообразно применять газы с высоким потенциалом ионизации. Мы рекомендуем следующую схему газовой защиты сварного шва: защита поверхности шва He с расходом 8–10 л/мин, а корня – Ar (5–8 л/мин). Помимо этого возможна флюсовая защита поверхности и корня шва. Для этой цели мы разработали специальные составы флюсов, которые наносим на поверхность стыка и на его корневую часть путем окрашивания перед сваркой. Применение флюсовой защиты позволяет снизить требования к сборке за счет увеличения возможного зазора в 2–3 раза.

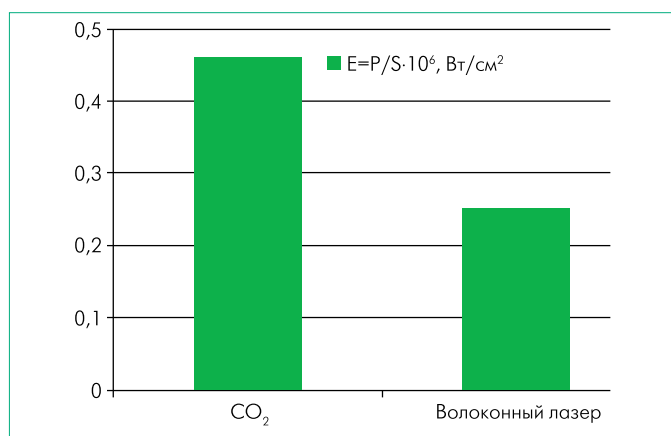


Рис. 1 Зависимость пороговой плотности мощности проплавления сплава 01570 от типа источника лазерного излучения

Для лазерной сварки алюминиевых сплавов толщиной более 1,0 мм требуется достаточно высокая мощность лазерного излучения, что влияет на выбор соответствующего оборудования, способного работать в непрерывном режиме с мощностью более 2,0 кВт. Отличительной особенностью лазерной сварки алюминиевых сплавов является пороговый характер проплавления. Он заключается в том, что расплавление металла начинается только при определенном уровне плотности мощности (около 10^6 Вт/см²). Этот эффект объясняется сочетанием высокого коэффициента отражения, теплопроводности и теплоемкости алюминия. После начала процесса плавления коэффициент отражения резко снижается и происходит интенсивное проплавление металла с образованием парогазового канала. Указанный порог плотности мощности зависит от длины волны излучения, параметров фокусировки, скорости сварки, толщины и состояния поверхности пластин, а также от состава материала.

В качестве промышленных источников для лазерной сварки и резки обычно используются два основных типа лазерных установок: это быстропоточные газовые CO₂-лазеры и мощные твердотельные лазеры на основе Nd:YAG-кристаллов [2]. Для сварки алюминия и его сплавов с точки зрения их поглощающей способности твердотельные лазеры с длиной волны $\lambda = 1,064$ мкм более предпочтительны, чем газовые ($\lambda = 10,6$ мкм). В настоящее время активное применение в промышленности находит новейший тип лазеров – волоконный [4]. Для проведения исследований по сварке волоконным лазером мы использовали комплекс на основе волоконного иттербиевого лазера фирмы "ИРЭ-Полус" ЛС-3,5 мощностью 3,5 кВт. Исследования показали, что уровень плотности мощности, необходимой для начала проплавления, при применении волоконного лазера примерно в 2 раза меньше, чем CO₂-лазера (рис.1). В табл.1 показаны режимы сварки сплава 01570 волоконным и CO₂-лазером. Из таблицы видно, что погонная энергия, необходимая для сварки листа толщиной 2,0 мм волоконным лазером, на 30% ниже, чем при сварке CO₂-лазером.

Сваренные соединения, полученные излучением CO₂-лазера и волоконного лазера, практически не отличаются по внешнему виду и по макроструктуре. На всех исследованных сплавах наблюдалась малая ширина шва и объем сварочной ванны. Как видно из рис. 2а, при сварке материала толщиной 2,0 мм достигается проплавление с практически параллельными кромками при ширине шва около 2,0 мм, занижение и провисание шва находятся в допустимых пределах. В сравнении с аргонно-дуговой сваркой (АрДС) объем расплавленного материала при лазерной сварке в 2–3 раза меньше (рис.2б).

Анализ внешнего вида сварных соединений показывает, что на всех режимах сварки наблюдается так называемая "чешуйчатость". Это связано с тем, что процесс лазерной сварки сопровождается кипением, испарением и резким волнообразным охлаждением материала в сварочной ванне.

Сравнение оптимальных режимов сварки встык пластин из сплава 01570 толщиной 2 мм различными типами лазеров

Скорость сварки, м/мин	2,0	3,0	4,0
Мощность лазерного излучения, кВт			
CO ₂ -лазер	1,6	2,6	4
Волоконный лазер	1,1	1,4	1,9

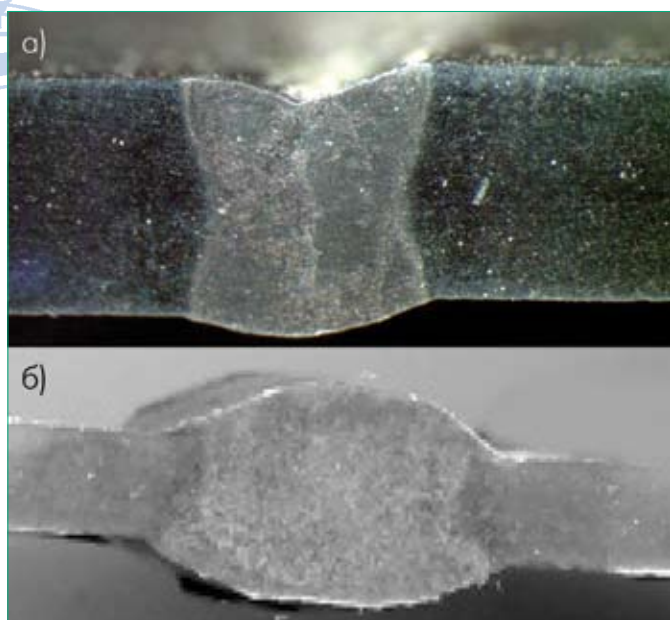


Рис.2 Макроструктура сварных соединений сплава АД37 толщиной 2,0 мм: а) лазер; б) АрДС

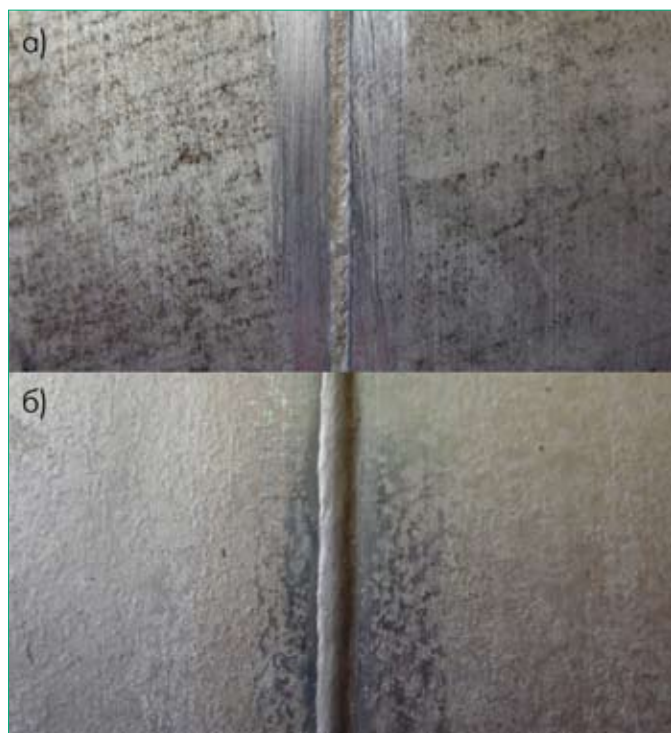


Рис.3 Лазерное сварное соединение сплава В-1424: а) без присадки, б) с присадочной проволокой

Результаты экспериментов показали, что на медленной скорости сварки (до 1,0 м/мин) чешуйчатость менее выражена, чем на высокой (2,0–8,0 м/мин) скорости. Варьирование режимами сварки не дает полного устранения чешуйчатости ни на одном из исследованных сплавов. Одним из эффективных технологических приемов является повторный проход по поверхности шва расфокусированным лучом, что позволяет заглянуть шероховатость поверхности.

Для устранения занижения шва и снижения шероховатости был применен метод сварки с присадочной проволокой.

Внешний вид типичного шва, полученного с присадочной проволокой, показан на рис.3а поперечный шлиф этого соединения на рис.4. Применение присадочной проволоки позволяет снизить требования по сборке стыков. Мы получили качественные сварные соединения с присадочной проволокой при зазорах в диапазоне от 0,1 до 1,0 мм.

Диаметр и скорость подачи проволоки подбирается исходя из толщины свариваемого материала и скорости сварки, диаметр проволоки при лазерной сварке составляет 0,6–1,2 мм. Оптимальный угол подачи лежит в пределах 25–35°. При сварке с присадкой принципиально возможны два способа подачи проволоки – перед излучением и за ним. Направление подачи проволоки может существенно повлиять на эффективность и стабильность процесса. На скоростях подачи свыше 4 м/мин сварочная ванна более стабильна, когда подача проволоки осуществляется в хвост ванны. На рис.5 показан процесс сварки с присадочной проволокой.

Кристаллическая структура металла шва определяет его механические свойства. При сварке алюминиевых сплавов кристаллическая структура и механические свойства металла швов изменяются в зависимости от состава сплава, способов и режимов сварки. Проведенное нами исследование микроструктуры полученных сварных соединений указывает на наличие в центре сварного шва дендритного строения литого металла, который к периферии становится несколько более грубым, затем следует зона рекристаллизованных зерен, переходящая в волокнистую структуру основного материала. Шов и зона сплавления имеют довольно мелкозерни-

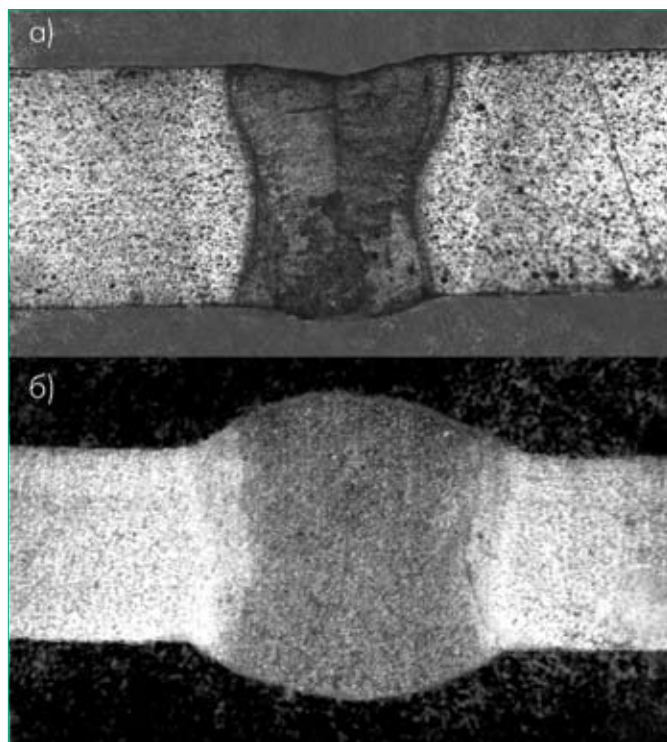


Рис.4 Макроструктура сварного соединения сплава В-1424, полученного лазерным лучом: а) без присадки, б) с присадочной проволокой

тое строение (величина зерна ~50 мкм). В литой зоне сварного шва не наблюдаются грубые интерметаллидные фазы, что объясняется высокими скоростями кристаллизации при лазерной сварке (рис.6). Подобная структура считается благоприятной для обеспечения достаточного уровня механических свойств и предотвращения образования кристаллизационных трещин. Структурные изменения в зоне термического влияния при лазерной сварке происходят на участке, в 3–5 раз меньшем, чем при аргоно-дуговой сварке. Увеличение размера зерен в этой области не наблюдалось.

Указанные структурные особенности обеспечиваются высокими скоростями сварки и высоким уровнем плотности мощности, что дает возможность получать жесткие термические циклы со скоростями охлаждения, существенно превышающими соответствующие значения для дуговых методов сварки.

Свойства сварных соединений зависят также от процессов, протекающих в околошовных зонах. При сварке чистого алюминия и сплавов, не упрочняемых термической обработкой, в зоне теплового воздействия наблюдается рост зерна и некоторое его разупрочнение, вызванное снятием нагартовки. Это зависит от способа сварки, режимов и степени предшествующей нагартовки. Свариваемость сплавов системы Al-Mg осложняется склонностью к образованию пористости и вспучиванию в участках основного металла, непосредственно примыкающих к шву при наличии в полуфабрикатах большого количества молекулярного водорода.

При сварке сплавов, упрочненных термической обработкой, в околошовной зоне происходят изменения, приводящие к разупрочнению участков соединения. Независимо от способа сварки и исходного состояния металла в непосредственной близости от шва наблюдается зона оплавления границ зерен. Ширина этой зоны меняется в зависимости от режимов сварки.

Значения микротвердости в шве и зоне термического влияния при лазерной сварке существенно, на 20–25%, выше, чем при АрДС. Зона разупрочнения при лазерной сварке практически отсутствует, в то время как при АрДС она распространяется на расстояние до 1,0–1,2 мм от зоны сплавления и сниже-

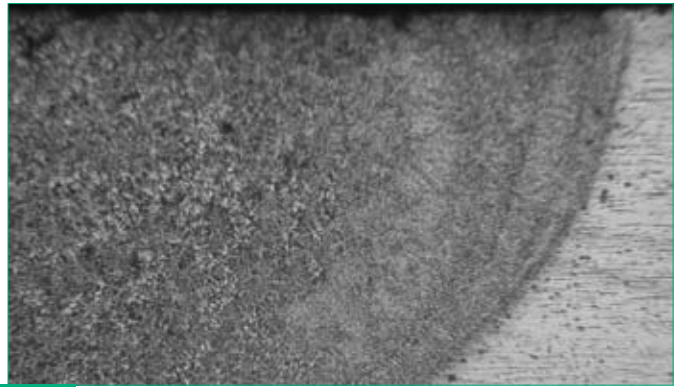


Рис.6 Микроструктура сварного соединения сплава 1424 (×50)

ние микротвердости в ней по отношению к основному металлу составляет 13–14%. Твердость участков околошовной зоны при сварке нагартованного материала снижается по отношению к основному металлу. Однако участок разупрочнения по протяженности при лазерной сварке в 3–4 раза меньше, чем при дуговой. Изменение микротвердости поперечного сечения сварного соединения показано на рис.7.

Предел прочности сварных соединений составляет не менее 0,8–0,9 от прочности основного металла. Разрушение соединений, сваренных без присадки, происходит преимущественно по шву, а сваренных с присадкой – по переходной зоне. На механические свойства сварных соединений в сравнении с

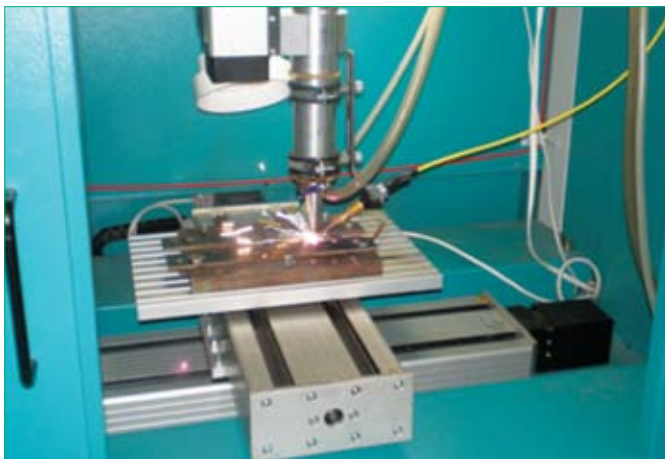


Рис.5 Процесс сварки с присадочной проволокой

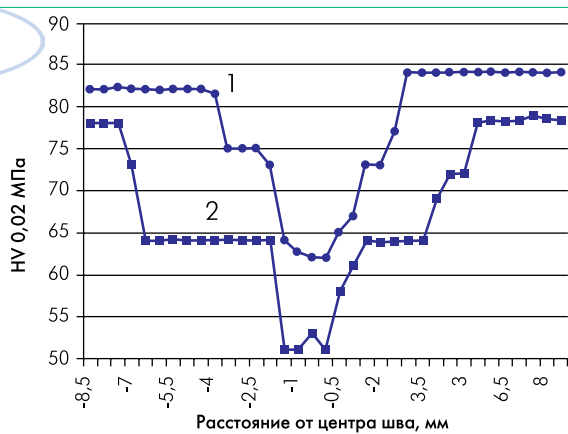


Рис. 7 Изменение микротвердости по сечению сварного соединения сплава АД37, сваренного лазерной (1) и аргонно-дуговой (2) сваркой

основным металлом влияет испарение легирующих элементов из сварочной ванны, особенно летучих, таких как магний, литий, цинк и др. Снижение процентного содержания этих элементов в шве после сварки достигает от 1,0 до 1,5%.

Использование оптимальных режимов лазерной сварки алюминиевых сплавов, особенно в диапазоне скоростей выше 1,5–2,5 м/мин, позволяет существенно снизить деформации деталей. Как показали исследования поперечной усадки сварных соединений, эта величина в 5–6 раз меньше, чем при автоматической аргонно-дуговой сварке.

Проведенные исследования позволяют сделать заключение о том, что лазерная сварка широкой номенклатуры алюми-

ниевых сплавов позволяет получить качественные сварные соединения. Соединения, полученные излучением CO₂- и волоконного лазера, практически не отличаются по внешнему виду и по макроструктуре, однако погонная энергия, необходимая для полного проплавления волоконным лазером, на 30% ниже, чем при сварке CO₂-лазером. Объем расплавленного металла при лазерной сварке меньше, чем при аргонно-дуговой. Для устранения занижений шва, увеличения допустимого сборочного зазора и повышения механических свойств необходимо использовать присадочную проволоку. Лазерная сварка обеспечивает минимальную зону разупрочнения при соединении термообработанных алюминиевых сплавов и меньшие деформации сварных соединений.

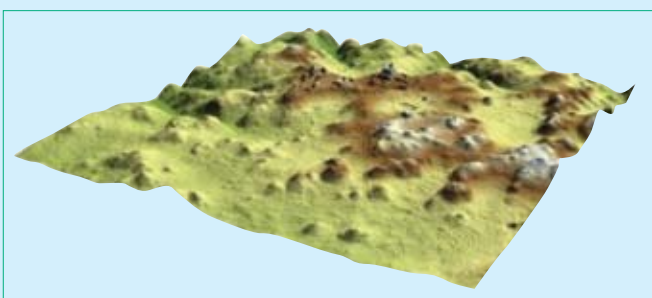
ЛИТЕРАТУРА

1. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы – перспективный материал в машиностроении. – Машиностроение и инженерное образование, 2004, №1.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2008.
3. Никифоров Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1972.
4. Курков А.С. и др. Высокоэффективный волоконный лазер с накачкой в оболочку на основе иттербиевого световода и волоконной брэгговской решетки. – Квантовая электроника, 1999, №3.

Аэрофотораскопки

Исчезнувшая культура майя издавна привлекала археологов, однако ее исследование технологически затруднено тяжелыми условиями влажных экваториальных джунглей в холмистой местности. Лидар легко преодолел эти трудности. Полет над дремучими джунглями Белиза (Центральная Америка) стал новым словом в археологии. С высоты птичьего полета ученым удалось наблюдать сложную инфраструктуру городских поселений, оставшихся от одной из самых интересных древних цивилизаций – майя. Исследование было проведено по инициативе ученых из

Университета Центральной Флориды на средства NASA. Оборудование лидар (LiDAR, Light Detection and Ranging) было установлено на борту самолета Cessna 337. Эта технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения света и его рассеивания в прозрачных и полупрозрачных средах, позволила получить очень четкие снимки древних поселений и окружающей инфраструктуры, а также оценить воздействие майя на окружающую среду. Объектом исследования стал древний город майя Каракол и его окрестности на площади около 200 км². Лазерные лучи лидара легко проникли через плотную завесу листвы джунглей. Были обнаружены тысячи новых построек, 11 мощных дорог, десятки тысяч сельскохозяйственных террас – результат, поражающий воображение любого археолога. Удалось точно определить размеры города – более 177 км², а также оценить численность его населения – по меньшей мере 115 тысяч человек (в 650 г. н.э.).



Сельскохозяйственные террасы в древнем Караколе

А.Борисов, www.gazeta.ru