

ПОРИСТОСТЬ ШВОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЛИТИЕМ

ОВЧИННИКОВ В.В., д-р техн. наук, ЕГОРОВ Р.В., асп.

Рассмотрены особенности электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов типа 1420 и 1460. Определены уровень механических свойств соединений и причины образования пористости при сварке.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, пористость швов, механические свойства сварных соединений.

JOINT POROSITY UNDER ELECTRON-BEAM WELDING OF ALUMINUM ALLOYS, ALLOYED WITH LITHIUM

V.V. OVCHINNIKOV, Ph.D., R.V. EGOROV, postgraduate

This paper is devoted to the peculiarities of electron-beam welding of 1420 and 1460 type aluminum alloys. The level of joint mechanical properties and the causes of porosity occurrence under welding are also determined.

Key words: electron-beam welding, joint porosity, welded joint mechanical properties.

Специфические особенности электронно-лучевой сварки (вакуум, высокая удельная плотность энергии и испарение металла, большие скорости кристаллизации сварочной ванны) создают благоприятные условия для образования пор в сварном соединении. Это значительно облегчает условия зарождения и развития газового пузырька, по сравнению с дуговой сваркой.

Кроме того, высокие температурные градиенты, обусловленные большой удельной концентрацией энергии луча, обеспечивают значительную термодиффузию водорода из зоны термического влияния к зоне сплавления [1–3]. Данный процесс также способствует увеличению объема пузырьков газа в сварочной ванне и влечет за собой образование пор в зоне термического влияния [4]. Высокая плотность энергии в луче, обуславливающая перегрев расплавленного металла и, как следствие, интенсивное испарение летучих компонентов при сварке некоторых металлов [5], и большие скорости кристаллизации также содействуют образованию пор при электронно-лучевой сварке (ЭЛС). Это усугубляется еще и тем, что при ЭЛС сама форма шва, как правило, глубокого и узкого, затрудняет перемещение в сварочной ванне газовых пузырьков. В результате возникают трудности при снижении и предупреждении пористости в металле шва при ЭЛС. Пористость является одним из основных дефектов швов алюминиевых сплавов [5–7].

При наличии пор в металле сварного соединения, выполненного электронно-лучевой сваркой, могут существенно ухудшиться его эксплуатационные свойства, особенно механические. Установлено, что при ЭЛС алюминиевого сплава 01420 поры в швах существенно влияют на прочность соединения. Так, при наличии в сварных швах пор диаметром <1,5 мм прочность соединения равна 0,75 предела прочности основного металла в термически упроченном состоянии, а при диаметре пор более 1,5 мм – снижается до 0,5...0,6. Пористость в швах, выполненных электронно-лучевой сваркой, способствует снижению ударной вязкости и весьма отрицательно сказывается на результатах испытаний на циклические нагрузки (табл. 1, 2).

Таким образом, получение беспористых швов или швов с минимальным количеством пор очень важно с точки зрения эксплуатационной надежности

сварного соединения и обеспечения его механических свойств на уровне основного металла.

Для алюминиевых сплавов, легированных литием, в качестве основных причин образования пор указываются [5, 6]: наличие растворенных газов в основном металле и испарение летучих компонентов. Степень пораженности шва алюминиевого сплава порами, вызванными наличием газов в основном металле, существенно зависит от технологических факторов и от параметров режима сварки. При этом основное влияние на пористость швов оказывает скорость сварки.

Таблица 1. Влияние пор на механические свойства сварных соединений сплава 1420, выполненных электронно-лучевой сваркой

Тип образца	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость по зоне сплавления КСУ, Дж/м ² × 10 ⁴	Дефекты в изломе образца
Основной металл				
Сварное соединение	385	4,3	12,7	Без дефектов
	359	3,3	12,2	Одна пора диаметром 0,3 мм
	350	2,8	6,2	5 пор диаметром 0,2-0,5 мм
	335	2,6	5,1	3 поры диаметром 0,5-0,6 мм

Таблица 2. Влияние пористости на малоцикловую усталость сварных соединений сплавов 1420 и 1460

Сплав	МЦУ, тыс. циклов при напряжении 180 Мпа, $\gamma = 3$ Гц		
	Количество и диаметр пор в сечении образца		
	Без пор	Одна пор диаметром 0,3 мм	3 поры диаметром 0,5–0,6 мм
1420	95,0	77,3	42,4
1460	102,1	80,5	34,5

Примечание. Приведены средние результаты испытаний 5 образцов

Пористость в значительной степени усиливается при наличии в свариваемом алюминиевом сплаве летучих компонентов. При перегреве сварочной ванны они легко испаряются в полость газового пузырька, способствуя увеличению его объема.

Основными параметрами, влияющими на испарение металла при ЭЛС, следует считать [8] мощность электронного луча и скорость сварки, которые определяют температуру металла сварочной ванны и длительность ее пребывания в жидком состоянии. К таким параметрам можно отнести также размер фокального пятна электронного луча и его положение относительно поверхности свариваемого металла. С уменьшением скорости сварки летучие примеси испаряются быстрее не только вследствие увеличения длительности пребывания металла в жидком состоянии, но и вследствие повышения коэффициента массопереноса испаряющегося элемента из объема жидкого металла к поверхности испарения (поверхности раздела жидкого металла и газового пузыря).

Пористость при сварке алюминиевых сплавов может быть обусловлена также процессами, происходящими на торцевых поверхностях стыкуемых элементов [9, 10, 3]. Перед сварочной ванной существует зона [11–14], на которую действуют сжимающие усилия, обеспечивающие сварку торцов в твердом состоянии с образованием замкнутых макро- и микропустот. В них образуются так называемые «первичные поры». Пористость металла шва может определяться количеством первичных пор, поступающих в сварочную ванну. В то же время считается, что первичные поры не являются главной причиной пористости швов при ЭЛС алюминиевых сплавов.

Целью исследования являлось уточнение причин возникновения пористости при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов, легированных литием. При этом, в соответствии с методологическим подходом [15–16], процесс образования пор рассматривается как многостадийный процесс, включающий следующие стадии: возникновение зародышей газовых пузырьков; развитие газовых пузырьков в объеме [11–14]; отрыв пузырька от подложки и всплывание к поверхности ванны; переход пузырька через межфазную границу на поверхности ванны.

Исследования проводили на плитах сплавов 1420 (система Al-Mg-Li) и 1460 (система Al-Cu-Li) толщиной 50 мм (табл. 3).

Таблица 3. Химический состав исследуемых сплавов

Марка сплава	Содержание легирующих элементов, %						
	Cu	Mg	Li	Mn	Ti	Zr	Sc
1420	0,03	5,67	1,93	0,22	0,08	0,12	-
1460	2,90	0,04	1,95	0,08	0,07	0,09	0,08

Примечание. Алюминий – основа сплавов.

Сварку образцов осуществляли на установке ЭЛУ-20МК с энергетическим блоком ЭЛА60/60. Сварку выполняли вертикальным лучом в нижнем положении. Для выявления стимулирующего действия торцевой поверхности кромок на образование зародышей газовых пузырьков ЭЛС выполняли как по целому материалу (рис. 1,а), так и по составному образцу (рис. 1,б). Сварку осуществляли на скорости 20 м/ч.

Исследование влияния газонасыщенности основного металла на образование газовых пузырьков осуществляли при изменении содержания водорода в рассматриваемых сплавах в пределах 0,14–0,98 см³/100 г. Сварку выполняли по целому материалу для исключения влияния состояния поверхности стыка на процесс образования зародышей газовых пузырьков. На оптическом микроскопе при

увеличении 50–100 определяли количество пор на участке шлифа размером 1×1 мм. Для сплавов 1420 и 1460 наблюдается устойчивая тенденция к росту относительной пористости при увеличении газосодержания основного металла (рис. 2).

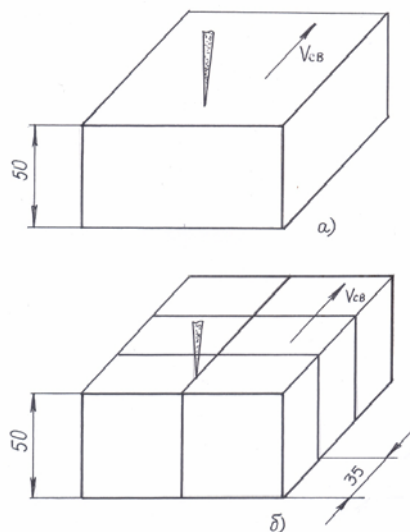


Рис. 1. Схема сборки образцов под сварку: а – по целому материалу; б – по составному образцу

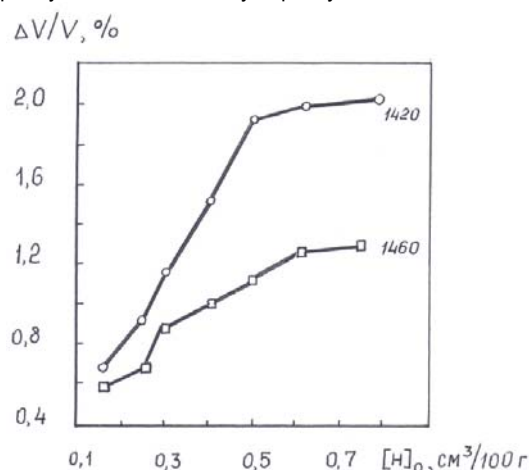


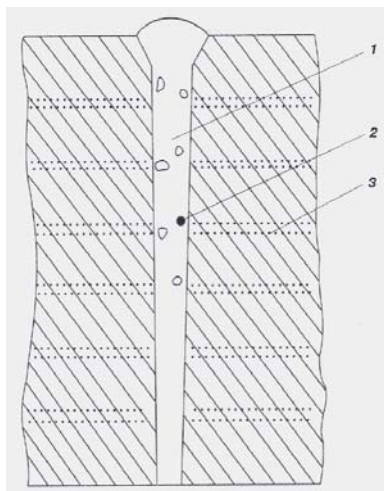
Рис. 2. Изменение относительной пористости при электронно-лучевой сварке алюминиево-литиевых сплавов с фиксированным содержанием растворенного водорода (сварка по целому металлу)

Результаты экспериментов показали также, что при сварке по целому материалу, имеющему слоистую структуру (такая структура характерна для штамповок), топография расположения пор имеет связь с расположением интерметаллидных фаз в зоне сплавления (рис. 3,а). Выделение газов из межслойных включений приводит к формированию микропористости в зоне сплавления. Размеры микропор в зоне сплавления варьируются в пределах 10–75 мкм. Микропоры формируются внутри интерметаллидных фаз на границе раздела между ними и основой сплава.

Исследования также выявили, что при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов, легированных литием, существенное влияние на конечную пористость швов оказывают процессы, протекающие между кромками свариваемого стыка. Об этом свидетельствует большее количество пор в металле шва при проплавлении состыкованных кромок, чем при проплавлении сплошного металла.

Поэтому на образование пор в шве при ЭЛС алюминиевых сплавов решающее влияние может оказывать способ обработки кромок.

Для оценки влияния способа обработки кромок на образование зародышей газовых пузырьков были сварены образцы с различной обработкой торцевых поверхностей, а также образцы со вставленными между кромками пластинами толщиной 0,5 мм, вырезанными из основного металла. Для сравнения были изготовлены образцы со швами по целому материалу без стыка. Установлено, что пористость стыковых швов значительно превышает пористость швов по целой пластине, что свидетельствует о существенном влиянии наличия стыка на образование зародышей газовых пузырьков. Приблизительно в 2,5 раза повышается пористость швов на образцах со вставками (где удваивается площадь оплавляемых поверхностей) по сравнению с образцами, торцевые поверхности которых строгали и шабрили непосредственно перед сваркой. Шероховатость поверхностей свариваемых кромок и их загрязнение играют важную роль в образовании зародышей газовых пузырьков при плотной стыковке свариваемых элементов.



а)



б)

Рис. 3. Топография пористости (а) в шве сплава 1420, выполненном электронно-лучевой сваркой, при выраженной слоистости материала и межзеренное выделение (б) в зоне сплавления (х800): 1 – шов; 2 – поры; 3 – межслойные выделения

Для изучения механизма образования зародышей газовых пузырьков при ЭЛС алюминиевых

сплавов на базе дефектов обработки торцевой поверхности кромок были сварены составные образцы (рис. 1,б). Металлографический анализ показал, что поры выстраивались цепочками вдоль обеих линий сплавления (рис. 4). На фотографиях хорошо видно место зарождения пор. Поры, достигшие большого размера, имеют характерную вытянутую форму, причем прослеживается четкая тенденция их роста в одном направлении с ростом кристаллитов (рис. 4). Своеобразная форма пор, по-видимому, объясняется тем обстоятельством, что вещество, являющееся причиной возникновения поры, продолжает поступать в ее полость и после того, как основание поры уже закристаллизовалось.



Рис. 4. Пористость в изломах между пластинами (х 6)

Вершина поры при этом находится еще в жидком металле и имеет возможность увеличиваться в диаметре. Происходит как бы «выращивание» поры со скоростью роста кристаллитов. Аналогичный механизм роста поры, вероятно, действует и при ее зарождении на других участках сварного шва, а не только в местах пересечения дополнительной плоскостью. Это предположение подтверждается тем, что некоторые поры, обнаруженные в продольных изломах швов, имеют на внутренней поверхности основания характерный ребристый рельеф (рис. 5), образующийся, вероятно, свободными поверхностями растущих дендритов.

Металлографические исследования участков поверхности, расположенных вблизи сварочной ванны, показали, что на свариваемых кромках перед границей плавления отсутствуют следы схватывания металла в твердом состоянии, предшествующем образованию замкнутых полостей. Участки металла, непосредственно примыкающие к границе плавления, ничем не отличаются от удаленных участков и имеют характерные следы механической обработки. Однако вдоль границы плавления видна

цепочка пор различных размеров. По-видимому, при ЭЛС алюминиевых сплавов, несмотря на отсутствие сварки в твердом состоянии перед сварочной ванной, плотное соприкосновения поверхностей стыка перед ней способствует образованию зародышей газовых пузырьков. Полученные результаты дают основание утверждать, что для возникновения зародышей газовых пузырьков при сварке АЛС по экзогенному механизму не обязательно, чтобы в плоскости перед ванной образовывались замкнутые микрополости (рис. 6).



а)



б)

Рис. 5. Внутренний вид пор в продольном изломе образца: а – вершина поры; б – основание поры (x12).

Расчетным путем установлено, что при ЭЛС сплава 1420 кромки на расстоянии 10 мм от фронта плавления нагреваются до температур 450–530⁰С. Такой нагрев приводит к плотному соприкосновению продольных выступов и образованию капилляров за счет имеющихся впадин. В результате нагрева происходит интенсивная десорбция газов; они выделяются в результате пиролиза и разложения влаги. Отвод выделяющихся газов из капилляров может происходить как в направлении, совпадающем с направлением сварки, так и в сторону ванны. Газовые пузырьки, попадающие в сварочную ванну, увеличиваются в размерах в результате диффузии газов из окружающих объемов жидкого металла.

Для подтверждения полученных выводов была выполнена сварка образцов, кромки которых перед сваркой обрабатывали сканирующим электронным лучом. Обработку выполняли пучком мощностью 1,6 кВт, сканирующим с частотой 50–70 Гц, при скорости перемещения пластин 12 м/ч. При рентгеновском просвечивании швов было установлено,

что их пористость соизмерима с пористостью образцов, сваренных по целому материалу. Изучение изломов на растровом электронном микроскопе показало, что поры вдоль границы плавления практически отсутствуют.

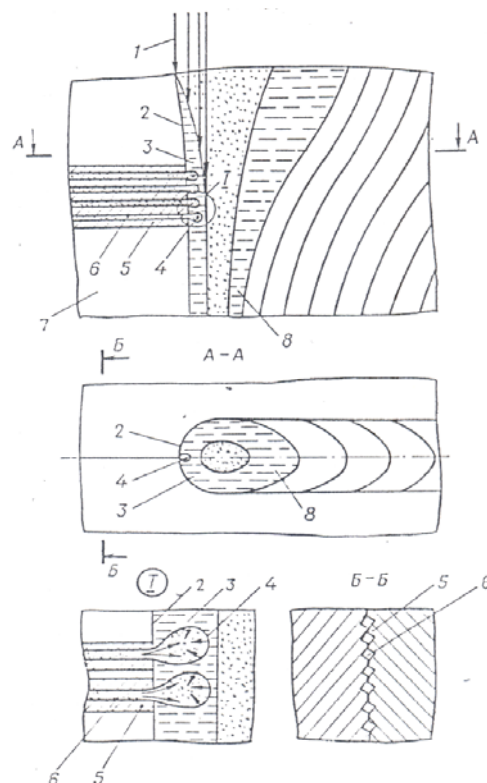


Рис. 6. Механизм образования газовых пузырьков в передней части сварочной ванны: 1 – электронный луч; 2 – фронт плавления; 3 – передняя часть сварочной ванны; 4 – газовый пузырек; 5,6 – выступ и впадина на торцевой поверхности стыка; 7 – торцевая поверхность стыка; 8 – хвостовая часть сварочной ванны

Анализ механических свойств сварных соединений сплавов 1420 и 1460, выполненных электронно-лучевой сваркой (табл. 4), показал, что для алюминиево-литиевых сплавов характерны высокие значения прочности и низкие значения ударной вязкости по линии сплавления. Низкие значения ударной вязкости связаны, скорее всего, с наличием скоплений интерметаллических фаз в зоне сплавления. Газовыделение из межслойных включений приводит к формированию микропористости в зоне сплавления, что уменьшает энергию распространения трещины.

Таблица 4. Механические свойства сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой

Марка сплава	Прочность сварного соединения, Мпа	Ударная вязкость, Дж/см ²		Место разрушения сварного соединения
		по шву	по зоне сплавления	
1420	370	11,2	6,2	Разрушение образцов при испытаниях на статическую прочность по зоне сплавления
1460	315	10,4	6,1	

Таким образом, на основании результатов выполненных исследований можно утверждать, что

при ЭЛС заготовок большой толщины алюминиевых сплавов, легированных литием, реализуется механизм образования зародышей газовых пузырьков на базе дефектов обработки торцевых поверхностей свариваемых кромок. При определенных условиях он становится преобладающим механизмом образования пор в швах алюминиево-литиевых сплавов. В условиях ЭЛС зарождение газовых пузырьков происходит путем «вдувания» в переднюю часть сварочной ванны десорбированных газов и продуктов разложения влаги через капиллярные каналы, образующиеся в стыке в результате плотного соприкосновения свариваемых деталей.

Для предупреждения образования зародышей газовых пузырьков на базе дефектов обработки торцевой поверхности кромок требуются тщательная очистка поверхности свариваемых кромок от всевозможных загрязнений, а в ряде случаев применение специальных видов обработки (травление, шабрение). Для алюминиево-литиевых сплавов можно рекомендовать поперечное рифление поверхности свариваемых кромок.

Список литературы

1. Оценка эффективности мер предупреждения пор в швах активных металлов при сварке плавлением различными способами / В.В. Редчиц, Г.Т. Лебедев, И.А. Вакс и др. // Сварочное производство. – 1979. – № 10. – С. 12–15.
2. Горшков А.И. Некоторые вопросы образования пор при сварке // Сварочное производство. – 1968. – № 7. – С. 21–23.
3. Куликов Ф.Р., Редчиц В.В., Хохлов В.В. Особенности возникновения и меры предупреждения пористости при сварке плавлением сплавов титана большой толщины // Сварочное производство. – 1975. – № 11. – С. 26–31.
4. Фролов В.В., Ермолаева В.И., Флоринская Т.Н. Распределение водорода в зоне термического влияния сварных соединений из меди, алюминия и титана / Актуальные проблемы сварки цветных металлов. – Киев, 1980. – С. 229–235.
5. Влияние технологических факторов на пористость швов на алюминии, выполненных электронно-лучевой сваркой / А.А. Бондарев, Н.М. Воропай, А.Я. Ищенко и др. // Автоматическая сварка. – 1972. – № 8. – С. 24–26.
6. Механические свойства соединений сплава 01420, выполненных электронно-лучевой и аргоно-дуговой сваркой / Д.М. Рабкин, А.А. Бондарев, В.В. Баранов и др. // Автоматическая сварка. – 1976. – № 7. – С. 39–43.
7. Пастух М.Н., Корнвейц Е.Н., Зорин П.Я. Электронно-лучевая сварка высокопрочных алюминиевых сплавов / Сварка электронным лучом: Мат-лы IV Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке. – М., 1974. – С. 185–188.
8. Рафинирующие переплавы стали и сплавов в вакууме / В.А. Бояршинов, А.Г. Шалимов, А.И. Щербаков и др. – М.: Металлургия, 1979.
9. Замков В.Н., Шевелев А.Д. Образование пор в сварных соединениях титанового сплава ВТ6, выполненных электронно-лучевой сваркой // Автоматическая сварка. – 1979. – № 12. – С. 50–54.
10. Пористость в металле шва при сварке плавлением ниобиевых сплавов / В.В. Дьяченко, В.К. Иванов, Б.П. Морозов и др. // Сварочное производство. – 1967. – № 7. – С. 10–13.
11. Лозеев Г.Е. Способ уменьшения пористости в сварных швах // Сварочное производство. – 1975. – № 8. – С. 31–33.
12. Лозеев Г.Е., Черницын А.И., Фролов В.В. Процессы, протекающие в стыке сварного соединения, и их влияние на пористость металла шва // Автоматическая сварка. – 1977. – № 2. – С. 25–30.
13. Никифоров Г.Д., Редчиц В.В. Механизм зарождения в сварочной ванне пузырьков газа при сварке активных металлов // Сварочное производство. – 1977. – № 8. – С. 53–57.
14. Муравьев И.И., Холошин А.Л. Влияние режима сварки на пористость металла шва некоторых титановых сплавов // Сварочное производство. – 1979. – № 6. – С. 18–19.
15. Овчинников В.В., Дриц А.М. Сравнительные исследования свойств сварных соединений российских и американских алюминиево-литиевых сплавов // Цветные металлы. – 2003. – №12. – С. 71–77.
16. Дриц А.М., Овчинников В.В. Технологические аспекты сварки плавлением алюминиевого сплава 1460 // Перспективные технологии легких и специальных сплавов / к 100-летию со дня рождения академика А.Ф. Белова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – С. 339–347.