



МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7025-T6

М. ОЛАБОДЕ, П. КАХ, Дж. МАРТИКАЙНЕН (Техн. ун-т г. Лаппеенранта, Финляндия)

Приведены обозначения, характеристики, области применения, свойства и особенности свариваемости высокопрочных алюминиевых сплавов. Исследовано влияние тепловложения на микроструктуру и твердость сварных соединений алюминиевого сплава 7025-T6. Показано, что ограничение тепловложения при сварке высокопрочных алюминиевых сплавов имеет важное значение для обеспечения высоких физико-механических свойств металла соединений.

Ключевые слова: высокопрочные алюминиевые сплавы, сплав 7025-T6, импульсная сварка МИГ, тепловложение, твердость по Виккерсу, металлургические особенности

Легкие сварные металлические конструкции пользуются большим спросом и их рынок постоянно растет, увеличиваются объемы потребления, появляются новые виды алюминиевых конструкций. Сварка является важным процессом в изготовлении этих конструкций. Способ сварки плавлением высокопрочных алюминиевых сплавов с использованием импульсной МИГ характеризуется регулируемым тепловложением и является перспективным, но только при условии понимания поведения этих материалов под влиянием термодеформационного цикла сварки.

Многочисленные исследования [1–3] показали, что ранее применяемые технологии сварки высокопрочных сплавов не обеспечивают хорошую свариваемость из-за наличия в их составе меди. Вместе с тем внедрение новых технологий, например, импульсной сварки МИГ, импульсной сварки ТИГ и сварки трением с перемешиванием обеспечивает хорошую свариваемость сплавов по сравнению с традиционной сваркой плавлением. В настоящее время сварка трением с перемешиванием зарекомендовала себя наиболее приемлемым процессом, поскольку имеет металлургические преимущества над сваркой плавлением, выраженные, в частности, в обеспечении высокой стойкости швов против образования кристаллизационных и ликвационных трещин [4].

В данной статье обобщены сведения, касающиеся классификации высокопрочных алюминиевых сплавов, их обозначений, свойств, применения, свариваемости и характерных дефектов сварки. Экспериментальная часть статьи включает описание экспериментальной установки и результатов оценки влияния тепловложения на твердость сварных соединений указанных сплавов. В ней также исследована свариваемость высокопрочных алюминиевых сплавов. Особое внимание уделено изучению влияния тепловложения при роботизи-

рованной импульсной сварке МИГ на металлургические процессы.

Классификация сплавов. Алюминиевые сплавы разделяют на литые и деформированные и идентифицируют с помощью четырехзначной системы. Обозначение литых сплавов такое же, как деформированных сплавов, но с десятичным значением между третьим и четвертым числом (123,0). Вторая часть обозначения (через дефис) учитывает процесс изготовления сплава. Если вторая часть начинается с «Т» (например, Т6), то это значит, что сплав был термически обработан. Числа указывают на тип обработки и другие последующие механические обработки: например, Т6 — сплав термообработан в растворе и подвергнут искусственному старению [5]. В идентификации сплава «F» обозначает готовое изделие, а «O» — состояние после отжига. Дополнительный суффикс показывает специальную термообработку, «Н» — деформационное упрочнение (нагартовку). За обозначением «Н» всегда следуют хотя бы две цифры, которые свидетельствуют об уровне нагартовки и других термообработок, выполняемых для получения требуемых механических свойств. Обозначение «W» указывает на термообработку в растворе. Далее следует время, показывающее период естественного старения, например, «W» — 1 ч.

Полное обозначение сплава включает две части, которые уточняют химический состав и историю изготовления, например, в 7025-T6, 7025 — химический состав, в то время как Т6 — особенности изготовления. Алюминий классифицируется на основе химического состава главным образом в двух категориях с учетом типа производства: деформированные и литые алюминиевые сплавы. Другие сплавы могут подразделяться по типу деформационного упрочнения или термообработки [6]. Категория деформированного алюминия большая, так как алюминий может формироваться в фасонные профили с применением любого процесса, включая экструзию, протяжку, ковку, прокатку и т. д. Деформированные сплавы должны быть пластичными в изготов-



Таблица 1. Классификация литых алюминиевых сплавов [6–9]

Серия	Элемент сплава	Содержание, %	Временное сопротивление, МПа	Среднее значение серии, МПа
1xx.x	Алюминий	99,0	—	—
2xx.x	Медь	4,0...4,6	145...476	302
3xx.x	Кремний	5...17	159...359	249
	С добавлением меди и/или магния	5...17	159...359	249
4xx.x	Кремний	5...12	131...296	187
5xx.x	Магний	4...10	138...331	232
7xx.x	Цинк	6,2...7,5	241	241
8xx.x	Олово	—	138...221	163
9xx.x	Другие	—	—	—

лении, а литые алюминиевые — текучими по природе, чтобы заполнять литейную форму [7].

Литые алюминиевые сплавы в своей классификации идентифицируют четырьмя цифрами. Десятичная точка отделяет третью и четвертую цифры. Первая цифра обозначает группу сплава, включающего основной легирующий элемент (табл. 1) [8]. Следующие две цифры отображают сам алюминиевый сплав или его чистоту. В сплавах серии 1xx.x эти две цифры указывают на чистоту в процентах. Например, 150,0 — минимальная чистота 99,5 % алюминиевого сплава. В группах от 2x.x до 9xx.x серий две цифры указывают на различные сплавы, присутствующие в группе. Последняя цифра иллюстрирует формирование изделия. Например, «0» — это отливка, а «1» или «2» — слиток, основанный на его химическом составе.

Следующая модификация оригинальных групп литых алюминиевых сплавов идентифицируется путем добавления серийной буквы впереди цифровых обозначений. Серийные буквы добавляются в алфавитном порядке, начиная с А, но без I, O,

Q и X [8], X остается в экспериментальных сплавах. Четыре цифры в обозначении используют для деформированных сплавов, первая — для группы сплавов на базе основного легирующего элемента (табл. 2), вторая — это модифицирование сплава или количество примесей. «O» во второй цифре обозначает основной сплав. Цифры 1–9 указывают на различные модификации сплава с небольшим изменением в их химических составах. В серии 1xxx вторая цифра — модификация в пределах примесей «O» — сплав с естественным пределом примесей, 1–9 — специальный контроль, выполненный по одному или более примесям или по легирующему элементу. Последние две цифры указывают на чистоту сплава [6].

В серии 1xxx две последние цифры обозначают уровень чистоты сплава. Например, в 1070 или 1170 подразумевается, что хотя бы 99,7 % алюминия содержится в сплаве, 1050 или 1250 — не менее 99,5, а 1100 или 1200 — 99 % алюминия. Для всех других серий алюминиевых сплавов (2xxx–8xxx) два последних числа не имеют особого значения, но используются для идентификации сплавов в группе [6, 8].

Высокопрочные сплавы и сверхпрочные алюминиевые сплавы. Алюминиевые сплавы с пределом текучести от 300 МПа и выше рассматриваются как высокопрочные, в то время как сверхпрочными алюминиевыми сплавами являются сплавы с пределом текучести 400 МПа и более. Они обычно включены в серии 2xxx, 7xxx и 8xxx. Нет строгих указаний о том, к какой серии эти сплавы принадлежат. Например, в двух сплавах одной и той же серии предел текучести может значительно отличаться, точнее, эти два сплава могут классифицироваться только по определенным свойствам сплавов в серии. Однако в общем среднем диапазоне предела текучести серии используется для идентификации высоко- и сверхпрочных алюминиевых сплавов (табл. 2).

Свойства и применения высоко- и сверхпрочных алюминиевых сплавов. Серия 2xxx включает сплавы типа Al–Cu. Основными характеристиками серии 2xxx являются термообработываемость, высокая прочность при комнатных и повышенных температурах, а также большой диапазон временного сопротивления (68,9...520 МПа) [9, 10]. Сплавы могут соединяться механически, некоторые из них — свариваться [10]. В их химическом составе обычно имеет место наличие меди и некоторых других

Таблица 2. Классификация деформированных алюминиевых сплавов [6, 8, 9]

Серия	Элемент сплава	Содержание, %	Временное сопротивление, МПа	Среднее значение серии, МПа
1xx.x	Алюминий	99,0	10,0...165	94,4
2xx.x	Медь	1,9...6,8	68,9...520	303
3xx.x	Марганец	0,3...1,5	41,4...285	163
4xx.x	Кремний	3,6...13,5	70,0...393	275
5xx.x	Магний	0,5...5,5	40,0...435	194
6xx.x	Магний и кремний	0,4...1,5	40,0...435	241
	Кремний	0,2...1,7	40,0...435	241
7xx.x	Цинк	1,0...8,2	80,0...725	399
8xx.x	Другие	—	110...515	365

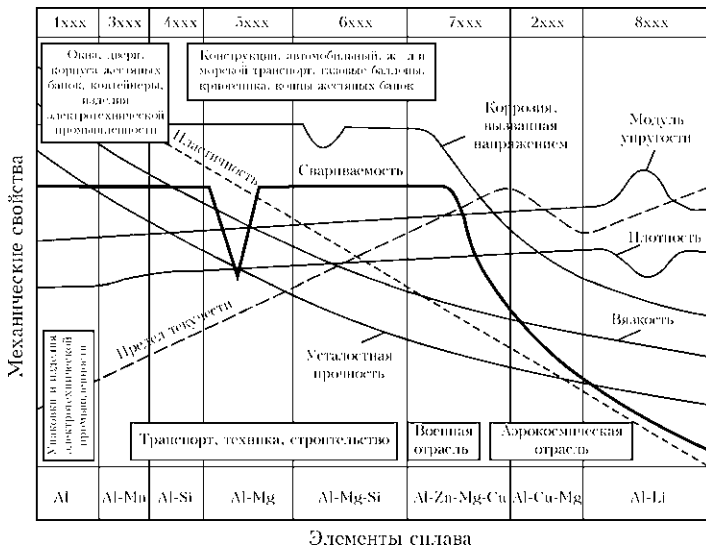


Рис. 1. Механические свойства алюминиевых сплавов

химических элементов (магний, марганец и кремний). Из них изготавливают высоко-прочные изделия, используемые обычно в авиационной промышленности (например, сплав 2024), и они должны строго соответствовать техническим стандартам из-за высоких требований к безопасности. Это делает сплавы серии 2xxx дорогостоящими.

Однако эти сплавы используют и при изготовлении корпусов грузовиков (сплав 2014); сплавы 2011, 2017 и 2117 — для крепежных устройств и прутковых токарных автоматов. При условиях естественного старения T4 сплавы серии 2xxx имеют те же механические свойства, что и низкоуглеродистая сталь с улучшенной прочностью (около 250 МПа) и временным сопротивлением на растяжение около 400 МПа, а также хорошую пластичность. При условии T6 улучшенная прочность достигает уровня 375 МПа, а временное сопротивление на растяжение — 450 МПа, что, однако, уменьшает пластичность [11]. Кроме того, их обычно красят или плакируют для повышения коррозионной стойкости. И наконец, сплавы серии 2xxx используют при строительстве внутренних и внешних конструкций самолета, внутренних элементов конструкций железнодорожных вагонов, изготовлении конструкционных балок самосвалов, автоцистерн и трейлеров, топливных баков и ракет-носителей космических шаттлов [10].

Серия 7xxx включает алюминиево-цинковые сплавы с магнием, что позволяет управлять процессом старения. Группа данных сплавов характеризуется очень высокими значениями прочности и твердости. Они также поддаются термической обработке в диапазоне временного сопротивления 220...610 МПа. Сплавы могут соединяться механически и свариваться с помощью такого способа, как, например, импульсная сварка МИГ. Некоторые сплавы 7xxx содержат медь для получения наивысшей прочности в серии. Однако

их не сваривают в производственном масштабе (рис. 1), поскольку их свариваемость уменьшается по мере увеличения содержания меди [1–3]. В связи с этим в производстве их соединяют механически, например с помощью клепки.

Сплавы серии 7xxx главным образом применяют для создания ответственных конструкций с высоким сопротивлением разрушению, например, мост Форезмо на севере Норвегии. Сплавы типа Al–Mg используют при строительстве балочных систем, в авиаиндустрии [10]. У них ниже сопротивляемость коррозии по сравнению, например, с серией 5xxx, вследствие чего во многих случаях их необходимо плакировать. Данные сплавы применяют в ответственных конструкциях крыла самолета из алюминиевых профилей с элементами жесткости, бурильных трубах больших размеров и кованых самолетных деталях высокого качества, изготовленных из сплава 7175-T736(T74) [10].

Серия 8xxx включает сплавы из алюминия и других элементов, например, железа, никеля, лития, обеспечивающих специфические свойства. Никель и железо придают прочность сплаву практически без потерь в электропроводности [10]. Высокопрочные элементы этой серии главным образом состоят из лития и меди. При этом пропорция лития выше. Сравнительно недавно разработанные алюминиево-литиевые сплавы 8090, 8091 и 8093 также включены в данную серию. Литий имеет меньшую плотность, чем алюминий, и относительно высокую растворимость, поэтому может легировать алюминий в достаточном количестве. При этом достигается значительное уменьшение плотности сплава (обычно примерно на 10 % меньше, чем в других алюминиевых сплавах). Полученные в результате сплавы имеют повышенную жесткость и склонны к закалке при старении. Некоторые из них могут подвергаться термообработке [10]. Поэтому сплавы этой группы относятся к специальным сплавам, имеют высокие значения проводимости, прочности (диапазон временного сопротивления 110...515 МПа [9]) и твердости. Эти сплавы используют в авиационной промышленности (8090, 8091). Сплав типа 8001 системы Al–Ni–Fe применяют на атомных электростанциях, когда требуется обеспечить сопротивление коррозии в воде при повышенных значениях температуры и давления. Сплав 8017 используют при необходимости достижения высокого уровня электропроводности [10].

Свариваемость высокопрочного алюминия. В связи с возрастающими требованиями промышленности к алюминиевым сплавам возникла необходимость в обширных исследованиях. На ос-



нове изучения различных сварочных процессов можно утверждать следующее:

в объеме промышленных технологий 94 % сплавов могут быть сварены и свыше 50 % имеют оптимальную свариваемость;

диапазон толщин свариваемых сплавов в условиях промышленности составляет 0,1...450,0 мм (верхний предел достигается при одном проходе с использованием ЭЛС);

высоких скоростей сварки (5...3 м/мин) можно достичь при меньших толщинах (0,8...3,0 мм), например, при лазерной сварке стыковых соединений;

металлургические проблемы, вызванные влиянием тепловложения при сварке, характерны для всех способов сварки плавлением и уменьшаются при использовании процессов с концентрированной энергией, где тепловложение носит локальный характер, и ЗТВ намного меньше. Сварка трением с перемешиванием сопровождается меньшими металлургическими проблемами;

в процессах, где используется концентрированная энергия, наличие пленки Al_2O_3 на поверхностях заготовок, подвергающихся сварке, не влияет на качество металла шва, хотя желательна их предварительная очистка;

и ЭЛС, и сварку трением с перемешиванием можно выполнять без использования газа для защиты сварочной ванны от окисления;

традиционные способы сварки дают более низкие значения механических свойств металла, чем у основного материала в пределах 20...35 %. Значительное влияние на уровень свойств оказывает металлургическое состояние основного материала. В частности, незначительное или даже нулевое уменьшение обнаружено только в процессе сварки трением с перемешиванием, при котором усталостные характеристики стыковых соединений полностью соответствуют показателям основного металла;

все способы сварки плавлением, за исключением сварки трением с перемешиванием, сопровождаются появлением пор в металле швов;

для сварочного оборудования одного назначения, лазерной технологии и технологии сварки трением с перемешиванием требуются в 10 раз большие капиталовложения, чем для традиционных, но производительность сварки при этом намного выше. В настоящее время большинство конструктивных элементов из алюминиевых сплавов, полученных способом сварки трением с перемешиванием, имеют на 10 % большую стоимость, чем с использованием процесса сварки МИГ [13].

Подготовка под сварку. Сварка высокопрочных алюминиевых сплавов в отличие от стальных изделий во многом зависит от комплекса подготовительных операций изделия. Он включает вы-

бор рационального сварочного процесса, способа хранения сплава, транспортировки и подготовки деталей, применяемых в сварной конструкции [1].

В зависимости от толщины изделия соединения следует подвергать скосу кромки и в некоторых случаях применять подкладку для качественного формирования корня шва. Требуется зачищать поверхность соединения для удаления тонкого слоя оксида алюминия Al_2O_3 механическими абразивными материалами, подобно зачистке щетками из нержавеющей стали или химическим травлением. Слой Al_2O_3 сам восстанавливается при обработке щетками. Он является ответственным за коррозионную стойкость алюминиевых сплавов [14], а также отрицательно влияет на нестабильность горения дуги, поскольку электрически непроводим. Al_2O_3 гигроскопичен и обычно содержит влагу. Кроме того, температура его плавления составляет 2060 °С [4, 14], что значительно выше, чем температура плавления (476...657 °С) сплавов серии 7xxx [9]. Рекомендации по подготовке изделий представлены в табл. 3.

Защитный газ. Основная функция защитного газа — защита металла шва от атмосферы, потому что нагретый металл (примерно до точки плавления) может вступать в реакцию с атмосферным воздухом и образовывать соединения оксидов и нитридов. Что касается алюминия, то он легко вступает в реакцию с кислородом при комнатной температуре. Таким образом, при выборе защитного газа должны учитываться следующие критерии [4, 16–18]:

способность генерировать плазму и обеспечивать механизмы и характеристики горения стабильной дуги;

обеспечение хорошего отделения расплавленного металла от проволоки и выполнение требуемого режима переноса металла;

защита сварочной головки (в непосредственной близости от дуги), жидкой ванны и конца проволоки от окисления;

помощь в получении хороших провара и профиля валика шва;

отсутствие помех в процессе корректировки скорости сварки;

предотвращение подрезов;

ограничение операций по зачистке стыков после сварки;

способность не ухудшать механические свойства металла шва.

Рекомендуемым защитным газом при импульсной сварке МИГ алюминиевых сплавов серии 7xxx является аргон [1, 17]. Скорость подачи при этом составляет около 20 л/мин. Смесь аргона и гелия может также применяться вместе, а гелий отдельно. Гелий увеличивает провар шва, обеспечивает более высокую энергию дуги и в ре-



Таблица 3. Рекомендации по подготовке изделия к сварке [4, 9, 14, 15]

Решаемая задача	Рекомендации
Снижение напряженного состояния	Избегать внезапных изменений толщины, поскольку они действуют как концентраторы напряжений в шве. Лучше сделать плавный переход в сечении шва при необходимости соединения с более тонким сечением Обеспечивать хорошую подгонку до сварки. Алюминий чувствителен к плохой подгонке, соединения должны иметь минимальный зазор для проникновения присадки. Большие зазоры могут легко заполняться сталью, а это провоцирует чрезмерные напряжения в алюминии из-за теплового сжатия, способствует сокращению долговечности шва Обеспечивать надежную центровку соединения перед сваркой. Шов с плохой стыковой провоцирует изгибающие напряжения, что также сокращает долговечность шва Убедиться, что разделка соединения соответствует толщине материала и чертежу
Создание условий для получения хорошего качества швов	Убедиться, что условия окружающей среды подходят для выполнения сварки. Алюминий очень чувствителен к загрязнению водородом, поэтому любая влага создает пористость и влечет за собой появление дефектных швов. Сварка в полевых условиях является особенно опасной, поскольку продукты конденсации могут появляться на соединении при холодной погоде либо под дождем. Если сварку выполняют в условиях атмосферной влажности, во избежание водородной пористости следует применять умеренный предварительный нагрев Необходимо учитывать также риск сквозняка, нарушающего газовую защиту, даже при сухом соединении. Сварку алюминия лучше всего выполнять в специально предназначенном теплом, сухом помещении, свободном от сквозняков
Очистка соединения перед сваркой	Алюминий очень чувствителен к загрязнению соединения. Его очистку следует начинать с протирания чистой тканью, смоченной растворителем типа ацетон, для удаления масла в области соединения и по 25 мм с обеих сторон соединения. Все изделия из алюминия имеют очень тонкий слой оксида на поверхности. Он плавится при температуре около 2060 °С [4, 14] в отличие от чистого алюминия при 660 °С [9]. Этот оксид следует удалять после обезжиривания перед сваркой с помощью механической очистки щеткой из нержавеющей стали, предназначенной только для алюминия. Нельзя применять точильный диск, поскольку он изготовлен из корунда (оксида алюминия) и будет оставлять частицы на поверхности. Шов желательно выполнять сразу после очистки. Сварка после трехчасовой очистки неприемлема
Пригодность сварочных материалов	Обычно сварку выполняют с помощью аргона или смеси аргона и гелия, при этом важна их чистота (минимальная чистота составляет 99,995%). При сварке МИГ проволока обычно подается довольно чистой, достаточно снять катушку со сварочной машины и поместить ее в чистый пластиковый мешок на ночь или хотя бы накрыть для сохранения чистоты

зультате повышенную скорость наплавки [1, 19]. При сечении менее 50 мм² следует использовать гелий [4]. Более подробная информация приведена в табл. 4.

Дефекты при сварке высокопрочных и сверхпрочных алюминиевых сплавов. Сварка алюминия является весьма ответственным процессом несмотря на более низкую температуру плавления, чем у стали, по следующим причинам [6, 18]:

постоянно присутствующую на поверхности металла оксидную пленку требуется удалять непосредственно перед сваркой;

наличие остаточных напряжений вызывает трещинообразование в металле шва из-за высокого значения теплового коэффициента расширения алюминия;

при высоком уровне теплопроводности алюминия подразумевается, что повышенное тепловложение увеличивает возможность деформации и образования трещин;

высокие значения скорости усадки вызывают образование кристаллизационных трещин;

большая растворимость водорода в жидком алюминии способствует образованию пористости и высокой склонностью чувствительности сплавов серий 2xxx, 7xxx и 8xxx к возникновению трещин в металле шва.

Основными дефектами при сварке высокопрочных алюминиевых сплавов являются образование горячих трещин, пористости, разупрочнение соединения, не восстанавливаемого при старении после сварки, низкая пластичность металла шва (ухудшение металла ЗТВ) и чувствительность соединения к образованию коррозионных трещин под напряжением. Характерные дефекты шва и способы их удаления приведены в табл. 5 [15].

Экспериментальная установка. Эксперимент выполняли с использованием установки для роботизированной импульсной сварки МИГ. Схематическая компоновка оборудования для проведения сварочного процесса МИГ представлена на рис. 2.

Движение робота программировали и выполнили несколько швов на опытных образцах, после



Таблица 4. Защитные газы для сварки МИГ алюминия [16]

Вид переноса металла	Защитный газ	Характеристика
Струйный	100 % аргона	Лучший перенос металла и стабильность дуги; минимальное разбрызгивание; хорошее действие очистки
	35 % аргона + 65 % гелия	Большее тепловложение, чем у 100%-го аргона; улучшенные характеристики плавления на более толстом материале; уменьшение пористости
	25 % аргона + 75 % гелия	Большее тепловложение, уменьшение пористости, минимальная очистка
Короткими замыканиями	Аргон и аргон + гелий	Достаточное количество аргона на листовом металле; аргон–гелий предпочтителен для более толстых основных материалов

чего сваривали сплав 7025-Т6. Произведено значительное количество наплавов, их параметры сравнивали при изучении влияния тепловложения на свойства металла шва. Далее исследовали влияние скорости сварки.

Применяли горелку Fronius Robacta 5000 360 (максимальный ток 500 А) для сварки МИГ. Горелку соединяли с роботом Motorman (EA1900N), который имеет шесть осей и может поддерживать точность выполнения сварочного процесса до ±0,06 мм. Для обеспечения очистки зоны шва впереди дуги горелку устанавливали под углом 10° в направлении шва. Вылет присадочной проволоки составлял 2 мм, а расстояние от сопла до изделия (длина вылета) — 18 мм. В качестве защитного газа использовали аргон 99,995 %, а присадочной проволоки — алюминий 4043. Изделие представляло собой пластину толщиной 5 мм и площадью 100×250 мм, на которую наплавляли валики. Соединения очищали механически с помощью щетки из нержавеющей стали, предназначенной только для алюминиевых заготовок. Проводили множество испытаний, для которых выбрали шесть разных образцов алюминиевого сплава 7025-Т6. Первые три образца (А–С) имели одинаковую скорость подачи с целью оценки влияния скорости сварки (10, 20, 30 мм/с), другие три (D–F) — приблизительно одинаковое тепловложение для исследования эффекта постоянного тепловложения в шов. Частота тока импульса составляла примерно 250 Гц в каждом шве.

Скорость подачи проволоки для образцов А–С была постоянной на уровне 10 м/мин, а тепловложение Q (кДж/мм) для каждого образца рассчитывали с помощью следующего уравнения [21]:

$$Q = \frac{UI \times 60}{1000S} 0,8,$$

где U — напряжение на дуге, В; I — ток, А; S — скорость сварки, мм/мин; 0,8 — эффективность сварки импульсным процессом МИГ. Для образцов D–F тепловложение было примерно постоянным, а скорость подачи проволоки выбирали соответственно 10, 12 и 14 м/мин.

В качестве основного материала использовали пластину из сплава 7025-Т6 толщиной 5 мм, сварочную проволоку — из алюминия ER 4043 (табл. 6). Типичные механические свойства проволоки следующие: предел текучести — 55 МПа, временное сопротивление — 165 МПа, удлинение 18 %, защитный газ — 99,995 % аргона, который подавали через горелку для предохранения сварочной ванны от влияния атмосферы, поскольку нагретый металл (примерно до температуры плавления) обычно способен вступать в реакцию с атмосферой с образованием оксидов и нитридов. Алюминий легко взаимодействует с кислородом при комнатной температуре. Рекомендуемый защитный газ для сварки сплава серии 7xxx с помощью импульсной сварки МИГ — аргон [17].

Твердость металла швов определяли по Виккерсу. Испытания выполняли с помощью нагрузки в 3 кг кончиком алмазного инструмента на поперечном сечении подготовленного образца со швом. Вмятины сделаны примерно на расстоянии 1 мм от поверхности шва в ряд (рис. 3). Расстояния между вмятинами составляли 0,7 мм, их форма напоминала ромб, глубина зависела от твердости материала. Размеры диагоналей вмятины измеряли, а среднее значение диагоналей сверяли в таблице твердости $HV 3$ для определения уровня твердости. Затем их проставляли в

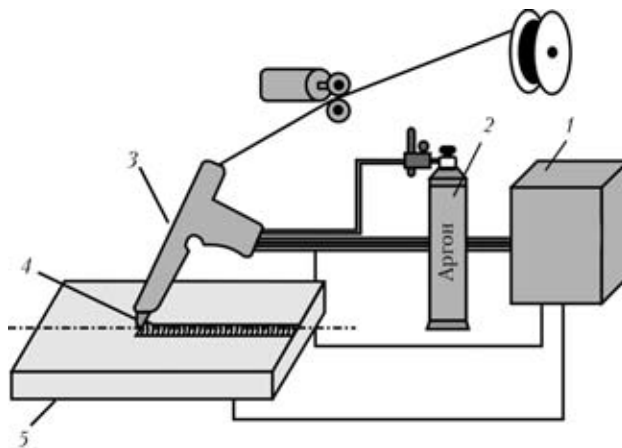


Рис. 2. Схема процесса сварки МИГ: 1 — источник питания; 2 — защитный газ (аргон); 3 — горелка; 4 — присадочная проволока; 5 — алюминиевый образец



Таблица 5. Дефекты в алюминиевых швах и их устранение [11, 15, 18, 20]

Вид дефекта	Причина	Предотвращение
Оксидные включения	Недостаточная очистка соединения Наличие оксидного слоя на сварочной проволоке или присадочных прутках Острые кромки в канавке соединения	Тщательная очистка проволочной щеткой до сварки и после каждого прохода, затем чистая протирка Очистить проволоку и прутки, потирая их прессованной стружкой из нержавеющей стали или «Scotchbrite» Использование свежей проволочной катушки. Удалить острые кромки в разделке шва
Пористость в шве	Недостаточная степень защиты Цветные пенетранты, смазка Слишком высокое значение тока сварки Загрязненный защитный газ Неправильный угол наклона горелки Слишком высокая скорость перемещения Загрязненные проволока или прутки Наличие влаги	Увеличить поток газа; устранить сквозняки; уменьшить вылет электрода Полностью устранить всевозможные дефекты Очистить поверхности растворителем Держать смазки подальше от области шва Уменьшить ток и вернуться к сварочному процессу Проверить газовые шланги на свободные соединения или повреждения Установить правильный угол и вернуться к сварочному процессу Установить правильную скорость и вернуться к сварочному процессу Очистить проволоку или прутки растворителем То же Предварительно нагреть и очистить поверхность
Пористость в зоне плавления	Высокая насыщенность водородом основного металла	Улучшить дегазацию Сократить добавки натрия Применить 100%-ю гелиевую защиту
Холодное растрескивание	Сильное зажатие металлических заготовок соединения	Ослабить зажимные клещи. Подогрев
Горячее растрескивание	Избыточное расплавление основным металлом Высокая переходная температура	Уменьшить ток сварки. Добавить больше присадочной проволоки Уменьшить ток сварки, увеличить интервал охлаждения между проходами и соблюдать последовательность швов
Подрезы	Высокий ток сварки Скорость перемещения слишком высокая и недостаточное количество присадочного металла Большая длина дуги	Уменьшить ток Уменьшить скорость и вернуться к сварочному процессу. Добавить большее количество присадочного металла Уменьшить длину дуги
Непровары	Низкий ток сварки Высокая скорость перемещения дуги Плохая разделка соединения Неправильный угол наклона горелки Ненадежное прерывание дуги	Увеличить ток и вернуться к сварочному процессу Уменьшить скорость перемещения и вернуться к процессу сварки Улучшить разделку свариваемых кромок Установить правильный угол горелки и вернуться к процессу сварки Постепенно уменьшить ток дуги Если возможно, применить контроль «Заполнение кратера», «Контрольный шов» на последних 25 мм валика
Нахлестка	Недостаточная скорость перемещения Очень низкий ток сварки Избыток присадочного металла Неправильный угол наклона горелки	Увеличить скорость и вернуться к процессу сварки Увеличить ток Уменьшить добавление присадочного металла Поменять угол наклона горелки
Прожог	Недостаточная скорость перемещения Ток сварки слишком высокий Зазор соединения слишком широкий Подогрев детали	Увеличить скорость перемещения Уменьшить ток сварки Уменьшить зазор и улучшить подгонку кромок Снизить температуру металла между проходами

Таблица 6. Химический состав алюминиевых сплавов 7025 (пластина) и 4043 (присадочная проволока), мас. %

Объект исследования	Al	Be	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Прочие
7025	91,5	—	0,30	0,10	0,40	1,50	0,60	0,30	0,10	5,0	0,5
ER 4043	—	0,0001	—	0,01	0,20	0,01	0,01	4,80	0,02	0,01	—



Рис. 3. Испытание твердости на сварном образце. Вмятины расположены на расстоянии 1 мм от поверхности и 0,7 мм друг от друга

диаграмму относительно расстояния каждого вдавливания от центральной линии шва.

Влияние тепловложения на высокопрочные сплавы при сварке. Микро- и макроструктуры, а также внешний вид шва образцов А–С представлены на рис. 4–6. Микроструктура каждого образца показана с помощью увеличительного объектива $\times 8$ для анализа несмешанной зоны, частично расплавленной зоны, ЗТВ и основного металла. Переход вокруг границы раздела шва имеет важное значение. На снимках изображены зерна, прошедшие трансформацию, из чего можно сделать вывод о механических свойствах металла швов. При сравнении образцов А–С (рис. 4–6) видно, что размеры зерен вокруг границы раздела шва небольшие при низком тепловложении, и наоборот. К тому же переходной поток ячеек вокруг границы раздела шва по мере передвижения от несмешанной зоны к ЗТВ плавный с более высоким уровнем тепловложения, зерна крупнее. При низком тепловложении, как на образце С (рис. 6), переход не настолько ровный, как на границе раздела шва. Тепловложение обратно пропорционально скорости сварки: при увеличении скорости сварки уменьшается тепловложение, а с его увеличением повышается скорость остывания. Это обеспечивает эпитаксиальный рост, а также увеличение ячеек, как видно при сравнении микроструктуры образцов А–С. На образце А (рис. 4) ЗТВ составляет приблизительно 17 мм от линии центра шва, что является наиболь-

шим расстоянием среди трех образцов. Таким образом, можно утверждать, что чем больше тепловложение, тем шире ЗТВ.

Зерна несмешанной зоны на образце С по сравнению с образцами В и А очень мелкие, что указывает на то, что малое тепловложение в образцы А и В недостаточно для образования расплавления ванны и проплавления металла шва. Большое тепловложение и высокая скорость сварки вызвали необходимость применения значительной энергии для нагрева образца С, в результате чего валик шва становится широким и с более широким корнем.

У образца С более мелкие зерна, чем у образцов В и А, что свидетельствует о том, что при большом тепловложении и высокой скорости сварки образование ядра происходит лучше. В образце С зерна растут хуже, чем у образцов А и В, поскольку алюминий распространяет тепло относительно быстро через тепловые раковины; небольшое тепловложение свидетельствует о большом влиянии теплопроводности алюминия на микроструктуру шва (образец С остывает быстро).

При сравнении образцов D–F (рис. 7–9) можно отметить, что при поддержании относительно постоянного тепловложения и варьирования скорости сварки в микроструктуре происходят изменения. По мере роста скорости сварки и скорости подачи электрода размер зерен также увеличивается. К тому же, повышенная скорость сварки приводит к более грубой структуре металла шва и околошовной зоны аналогично влиянию тепловложения в швах при сварке сплава 7025-T6.

Изучение образцов сплавов D–F показало, что, чем выше скорость подачи, тем глубже проплавление. У образца С постоянная скорость подачи как у А и В, но переход зерен на границе раздела шва между несмешанной зоной и ЗТВ очень резкий. Возможно, это является слабым местом, пос-

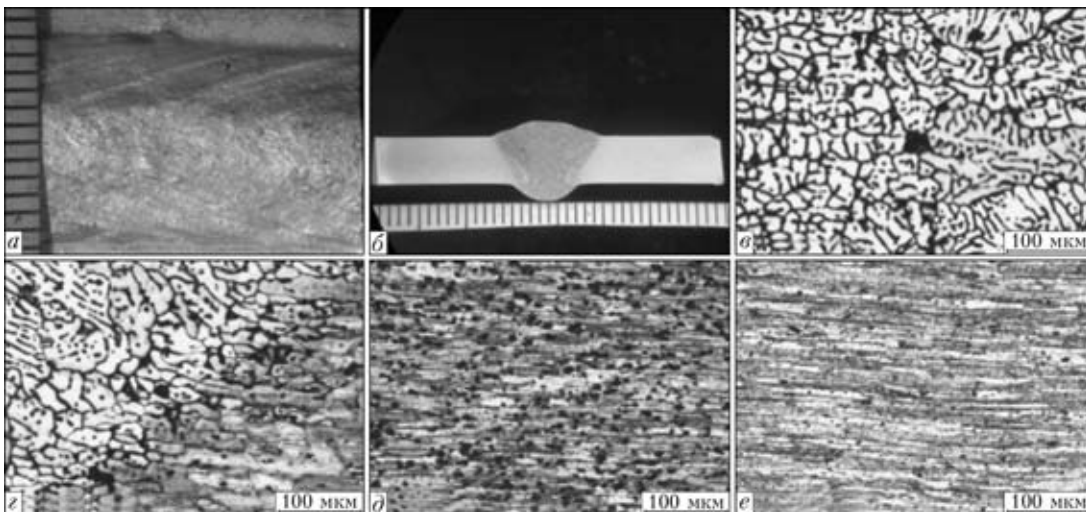


Рис. 4. Результаты экспериментов образца А со скоростью подачи проволоки 10 м/мин при скорости сварки 10 мм/с, тепловложении 0,318 Дж/мм, напряжении на дуге 20,1 В, токе 198 А: а–е — здесь и на рис. 5–9 следующие: а — внешний вид шва; б — макроструктура; в — микроструктура шва; г — частично расплавленная зона; д — ЗТВ; е — основной металл

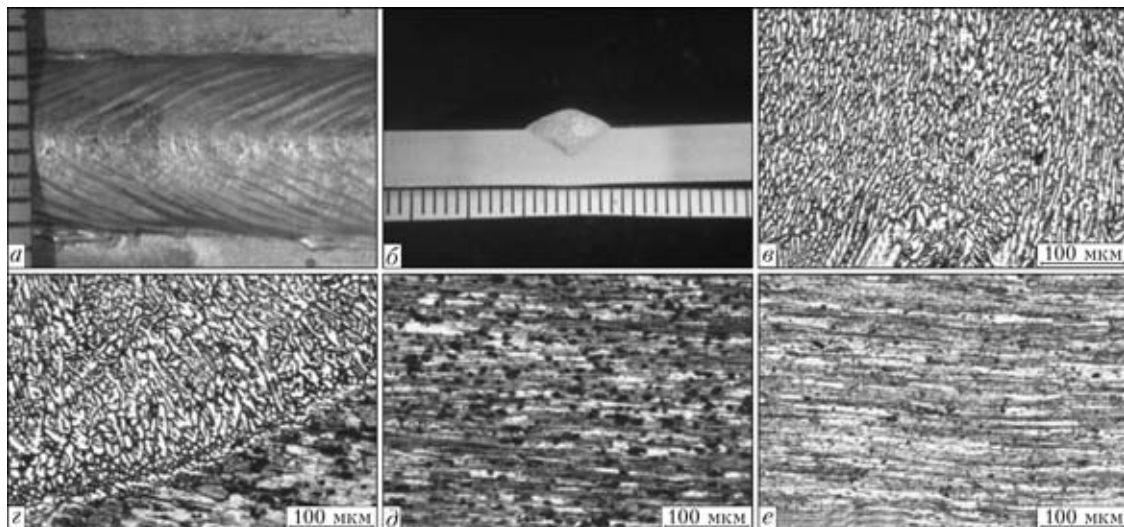


Рис. 5. Результаты экспериментов по сварке образца В со скоростью подачи проволоки 10 м/мин при скорости сварки 25 мм/с, тепловложении 0,127 Дж/мм, напряжении на дуге 19,4 В, токе 205 А

кольку ячейки не настолько заблокированы, как на образце В. На примере образца видно, что чем длиннее период кристаллизации, тем больше размер дендрита [23].

Зерна являются равноосными с дендритами в пределах зерен. Мелкие зерна образуются при малом тепловложении, а крупные — при большом. Например, несмешанная зона на рис. 8 имеет мелкие зерна благодаря небольшому тепловложению (0,106 кДж/мм), в то время как несмешанная зона на рис. 4 — крупные зерна из-за тепловложения в 0,318 кДж/мм. Вариации размера зерен в несмешанной зоне на рис. 4–9 в основном обусловлены количеством тепловложения, поскольку при большом тепловложении скорость охлаждения повышается.

Увеличенная скорость сварки позволяет уменьшить ширину швов даже при меньшем тепловложении (по сравнению с образцами А–F). Образец F имеет качественную структуру шва с уз-

кими сварным швом, ЗТВ и полным проплавлением. Окисление происходило на поверхности. При постоянной скорости сварки большое тепловложение способствует увеличению валика шва и размера ЗТВ. Частично расплавленная зона показывает эпитаксиальный рост, свидетельствующий о зарождении в различных местах на границе раздела шва новых зерен. Между зернами основного металла и зернами металла шва существует произвольная ориентация.

На образцах А–F видно, что при уменьшении отношения температурного градиента G 7025-T6 и скорости роста R от границ раздела шва к линии его центра характер кристаллизации изменяется от плоскостного до ячеистого, столбчатого и равноосного дендрита поперек границы раздела шва. Соотношение G/R определяет режимы кристаллизации, обнаруженные в микроструктуре. Образец С имеет минимальный размер зерен в несмешанной зоне. Таким образом, у него наи-

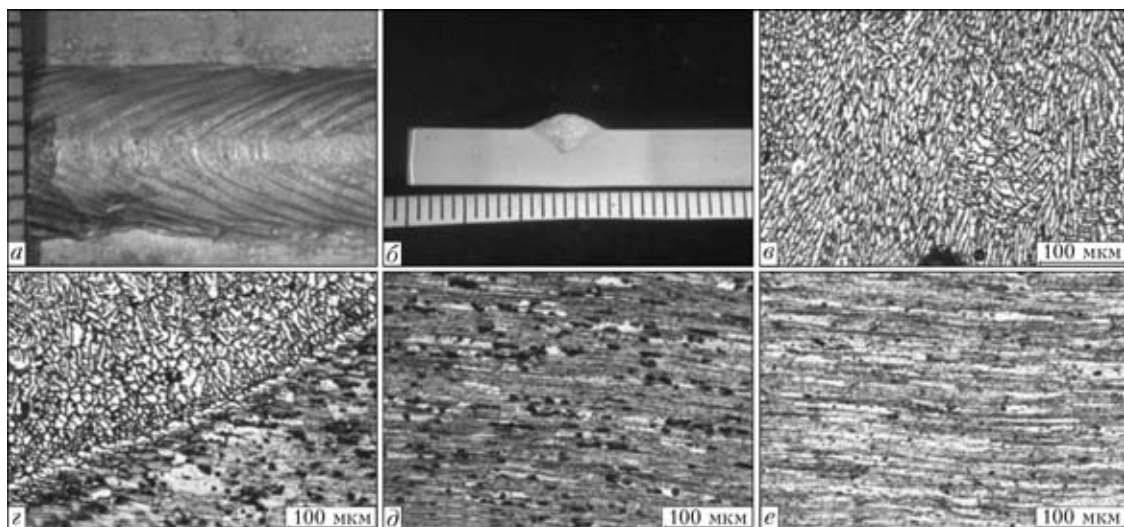


Рис. 6. Результаты исследования образцов С со скоростью подачи проволоки 10 м/мин при скорости сварки 30 мм/с, тепловложении 0,106 Дж/мм, напряжении на дуге 19,4 В, токе 205 А

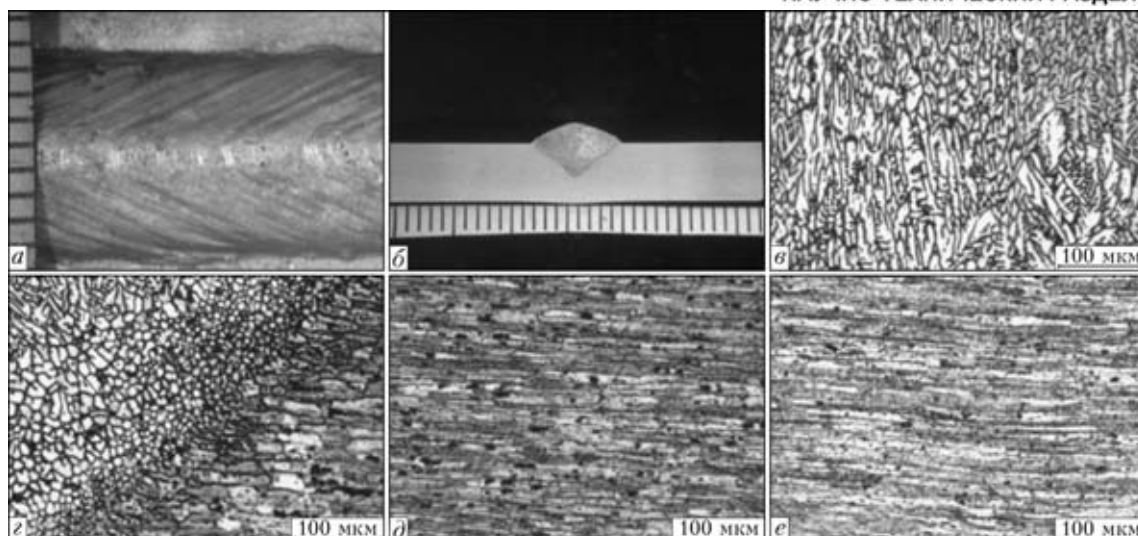


Рис. 7. Результаты исследования образца D со скоростью подачи проволоки 10 м/мин при скорости сварки 20 мм/с, тепловложении 0,16 Дж/мм, напряжении на дуге 19,8, токе 202 А

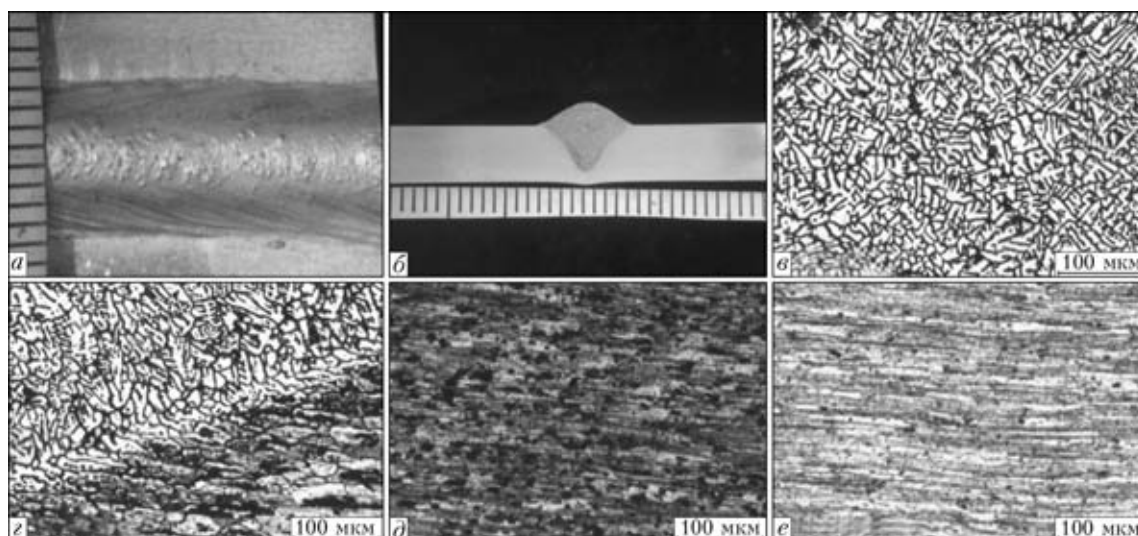


Рис. 8. Результаты исследования образца E со скоростью подачи проволоки 12 м/мин при скорости сварки 24 мм/с, тепловложении 0,163 Дж/мм, напряжении на дуге 20,3 В, токе 241 А

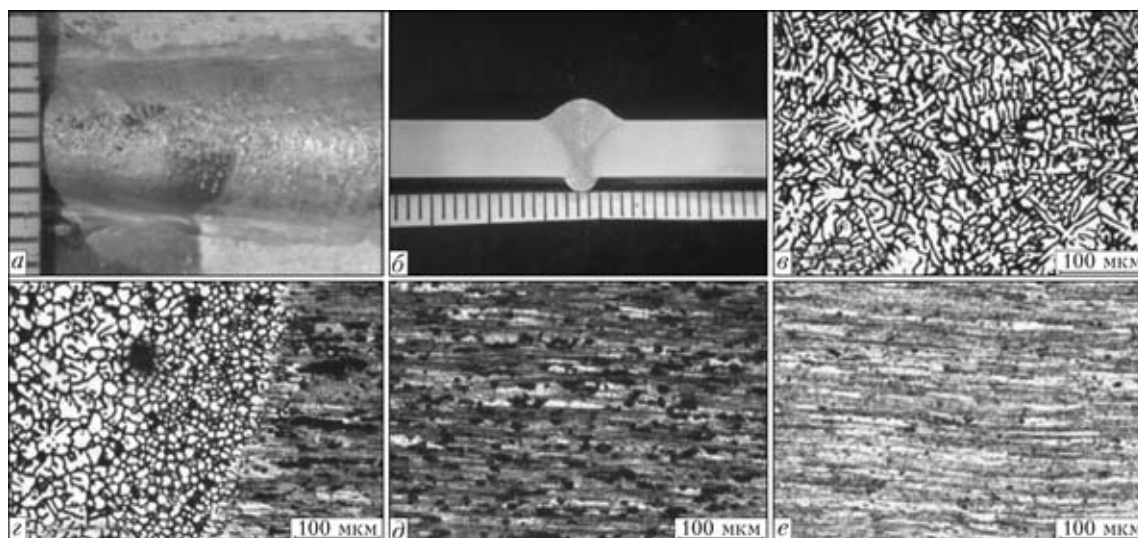


Рис. 9. Результаты исследования образца F со скоростью подачи проволоки 14 м/мин при скорости сварки 28 мм/с, тепловложении 0,158 Дж/мм, напряжении на дуге 20,50 В, токе 278 А

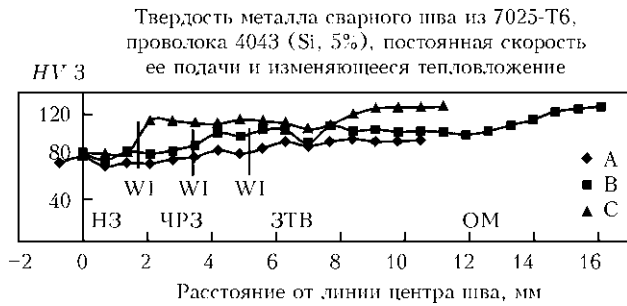


Рис. 10. Распределение твердости в сварных соединениях при различных тепловложениях: для образца А $Q = 0,318$ кДж/мм; для образца В — $0,127$; для образца С — $0,106$

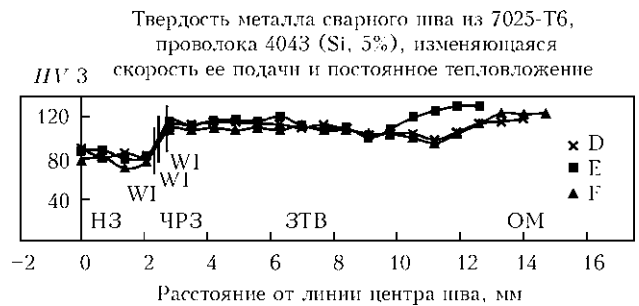


Рис. 11. Распределение твердости в сварных соединениях при различных скоростях подачи проволоки и постоянном тепловложении (около $0,16$ кДж/мм)

высшие прочность и твердость, поскольку эффект Холла–Петча прогнозирует рост и прочности, и твердости по мере уменьшения размера зерен [25]. Образец F показывает, что полное проплавление шва можно достичь при минимальном тепловложении, если другие параметры шва установлены правильно.

В металле шва обнаружены такие дефекты, как пористость и оксидные включения. Пористость объясняется попаданием газа в процессе сварки, а наличие оксидных включений — плохой газовой защитой (ванна шва контактирует с воздухом).

Твердость сварных соединений высокопрочных сплавов (7025-Т6). Испытания на твердость образцов представлены на рис. 10. Вертикальная линия границы раздела шва обозначена WI. Точки на кривой показывают расстояние каждой вмятины от оси шва на оси абсцисс, а уровень твердости — на оси ординат. На рис. 10 указаны характерные участки структуры сварных соединений и основного металла. Образец С имеет минимальное тепловложение $0,106$ кДж/мм, что дает в результате более высокое значение твердости, образец В — относительно большее тепловложение ($0,127$ кДж/мм), а в результате — более низкий уровень твердости, чем образец С. У образца А максимальное тепловложение составляет $0,318$ кДж/мм, твердость является минимальной.

На границе раздела шва с основным металлом у образца С имеет место максимальная твердость, что служит подтверждением высокой твердости границы раздела при большом тепловложении благодаря упрочнению твердого раствора в процессе сварки. Такое тепловложение вызывает растворимость и более значительное упрочнение вследствие процесса кристаллизации. Можно также утверждать, что чем выше тепловложение, тем шире валик шва, и граница раздела шва с основным металлом располагается дальше от оси шва. Испытания на твердость образцов показали эту закономерность при относительно постоянном значении тепловложения. Твердость образцов D и F примерно одинакова, кроме образца E, где есть незначительные изменения, твердость на расстоянии 3 мм от оси шва показывает увеличение

ее значения при удалении от предыдущей точки (около 2 мм от линии центра шва), что объясняется близостью к границе раздела шва с основным металлом. Изучение твердости образцов D–F показало, что для металла шва 7025-Т6 ее значение уменьшается в зоне шва и возрастает по направлению к основному материалу. График твердости представляет собой половину симметричных швов. Можно утверждать, что значения показателя твердости образцов сварных соединений образцов D–F на границе раздела шва близки. Это свидетельствует о том, что постоянное тепловложение, профиль твердости алюминиевого сплава 7025-Т6 являются идентичными. Испытания на твердость образцов D–F (рис. 11) показали, что профили твердости для трех образцов примерно одинаковые. Диапазон границы раздела шва находится в пределах 0,5 мм при относительно постоянном значении тепловложения.

Выводы

1. Исследования показали, что в алюминиевых сплавах 7025-Т6 размер зерен уменьшается по мере снижения тепловложения, а переход ячеек от несмешанной зоны к ЗТВ является более плавным при большом тепловложении. При постоянном тепловложении размер зерен увеличивается, но твердость остается относительно постоянной. В случае большого тепловложения отмечены более широкая ЗТВ, крупнокристаллитная структура шва и более крупные размеры зерна вокруг границы сплавления шва.

2. В сплаве 7025-Т6 большое тепловложение способствует более низким значениям твердости, но в зоне сплавления ее значение одинаково во всех исследуемых образцах. Чем выше уровень тепловложения, тем шире валик шва, тем дальше расположена зона сплавления и глубже проплавление шва. В зависимости от длительности кристаллизации увеличивается количество дендритов, а высокая скорость охлаждения способствует эпитаксиальному формированию ячейки. Сплав 7025-Т6, как и другие высокопрочные алюминиевые сплавы, разупрочняется в ЗТВ, но может быть восстановлен при послесварочной термообработке.



1. *Yeomans S. R.* Successful welding of aluminium and its alloys // Australian Welding J. — 1990. — **35**, № 4. — P. 20–24.
2. *Graeve I. D., Hirsch J.* 7 Series alloys // aluminium-matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=214&pageid=2144417086.
3. *Dickerson P. B., Irving B.* Welding aluminium: It's not as difficult as it sounds // Welding J. — 1992. — **71**, № 4. — P. 45–50.
4. *Mathers G.* Knovel (Firm). The welding of aluminium and its alloys. — Boca Raton, Fla., Cambridge: CRC press; Woodhead publ., 2002.
5. *Maurice S.* Aluminum structures. Handbook of structural engineering. — Second ed. — CRC press, 1997.
6. *Campbell F. C.* Manufacturing technology for aerospace structural materials. — Amsterdam; San Diego: Elsevier, 2006. — 11 p.
7. *Handbook committee and Knovel (Firm).* ASM handbook, Casting. — ASM International, Materials Park, 2008. — Vol. 15. — 937 p.
8. *Kopeliovich D.* Classification of aluminum alloys. — Substances and Technology, 2009.
9. *MatWeb* — the online materials information resource // Matweb, 2010.
10. *Kaufman G. J.* Applications for aluminum alloys and tempers. — ASM International, 2000.
11. *John D.* Heat-treatable alloys // Aluminium design and construction. — New York, 1999. — 301 p.
12. *Aluminum alloys and temper designations 101.* — D. Industries, ed., Dayco Industries, Cal., 1987. — P. 1–5.
13. *Volpone L. M., Mueller S.* Joints in light alloys today: the boundaries of possibility // Welding Intern. — 2008. — **22**, № 9. — P. 597–609.
14. *George E. T., MacKenzie D. S.* Handbook of aluminum. — New York: Marcel Dekker Inc., 2003.
15. *Renshaw M.* The welding of aluminium castings // Aluminium — light strong and beautiful. — A. F. o. S. Africa, 2004. — P. 11–13.
16. *Choosing shielding gases for gas metal arc welding* // Welding J. — 2008. — **87**, № 4. — P. 32–34.
17. *Boughton P., Matani T. M.* Two years of pulsed arc welding // Welding and Metal Fabr. — 1967. — Oct. — P. 410–420.
18. *Olson D. L.* Handbook Committee and American Society for metals. Joining Division 1993 // Welding, Brazing and Soldering. — 1993. — 1299 p.
19. *Blewett R. V.* Welding aluminium and its alloys. — 1991. — № 59 (Oct.). — P. 5.
20. *Ba Ruizhang G. S.* Welding of aluminum-lithium alloy with a high power continuous wave Nd:YAG-laser. — IIW Doc. IV-866–04.
21. *Hirata Y.* Pulsed arc welding // Welding Intern. — 2003. — **17**, № 2. — P. 98–115.
22. *Chandler H.* Hardness testing. — Ohio: ASM International, Materials Park, 1999.
23. *Kou S.* Welding metallurgy. — New York: Wiley-Interscience, Hoboken, 2003.
24. *Hall-petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys / Y. S. Sato, M. Urata, H. Kokawa, K. Ikeda* // Materials Sci. and Eng. A. — 2003. — 354(1/2). — P. 298–305.
25. *Vander Voort G. F.* Metallography and microstructures. — Ohio: ASM International, Materials Park, 2004.

Designations, characteristics, application fields and properties of aluminium alloys are given. Peculiarities of weldability of high-strength aluminium alloys are considered. The effect of heat input on microstructure and hardness of the welded joints on aluminium alloy 7025-T6 has been studied. It is shown that the limitation of heat input in welding of high-strength aluminium alloys is important for ensuring the high properties of metal.

Поступила в редакцию 31.10.2011

НОВАЯ КНИГА

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕНОВАЦИИ:

Тематическая подборка статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» в 2009–2011 гг. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. — 172 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.

Сборник включает 38 статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за период 2009–2011 гг., по проблемам ремонта, восстановления и реновации изделий ответственного назначения. Авторами статей являются известные в Украине ученые и специалисты в области сварки, наплавки, упрочнения, металлизации и других технологий ревитализации.

Предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки и других родственных технологий обработки материалов.

Стоимость сборника 160 грн./800 руб. (стоимость указана с учетом стоимости доставки заказной бандеролью соответственно для Украины и России).

Заказы на сборник просьба направлять:

Международная ассоциация «Сварка»

03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, Украина

тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84, 200-81-45

E-mail: journal@paton.kiev.ua

