

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ И РЕМОНТА КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ЛЕГИРОВАНИЯ Al-Zn-Mg

Г.В. Студенов, А.Д. Мельник



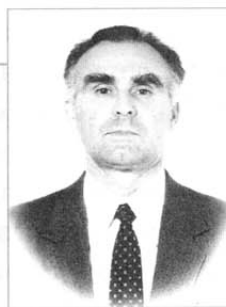
**СТУДЕНОВ
Герман
Владимирович**

Кандидат технических наук, начальник сектора отдела сварки защитных конструкций вооружения и военной техники ОАО «НИИ Стали». Специалист в области сварки высокопрочных сталей и сплавов. Автор более 20 научных трудов.

Алюминиевые сплавы системы легирования Al-Zn-Mg находят широкое применение в отечественной и зарубежной промышленности для изготовления спецтехники благодаря высокой удельной прочности. Одним из самых распространенных и эффективных видов соединения алюминиевых сплавов, позволяющих изготавливать сложные конструкции различного назначения, является сварка. Свариваемость этих сплавов определяется склонностью к образованию кристаллизационных трещин, возможностью замедленного разруше-

ния, степенью разупрочнения в зоне термического влияния (ЗТВ) и механическими (прочностными) свойствами, необходимыми для работоспособности сварных конструкций при эксплуатации изделий [1].

В настоящей работе рассматриваются особенности сварки высокопрочных алюминиевых сплавов (марки АБТ-101, АБТ-102) с суммарным легированием цинком и магнием 6-9 % при соотношении Zn/Mg 1,8-2,5. Технология сварки отработывалась на установке механизированной сварки плавящимся электродом в среде инертного газа.



**МЕЛЬНИК
Анатолий
Дмитриевич**

Кандидат технических наук, начальник отдела сварки защитных конструкций вооружения и военной техники ОАО «НИИ Стали». Специалист в области сварки высокопрочных сталей и сплавов. Автор более 45 научных трудов и изобретений.

Композиции состава алюминиевых сплавов выбирались исходя из оценки склонности сплава к кристаллизационным трещинам. Поэтому одной из задач при исследовании свариваемости являлся выбор состава электродной проволоки. Для этого была опробована стандартная сварочная проволока различных марок (ГОСТ 787): Св АМг6, Св АМг61 и Св 1557.

В целях проверки склонности алюминиевых сплавов к кристаллизационным трещинам при сварке металла большой толщины многопроходными тавровыми швами использовали специальную пробу (рис. 1) [1].

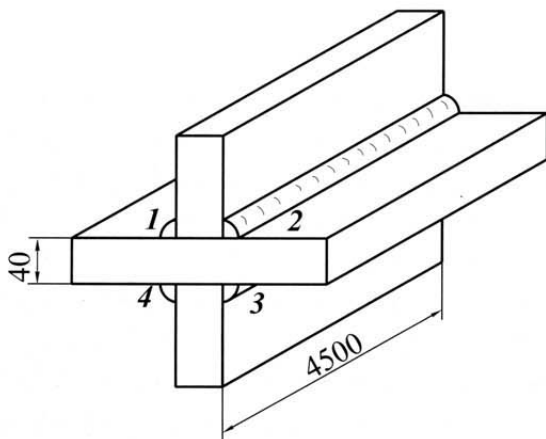


Рис. 1. Проба для проверки склонности сплавов к образованию кристаллизационных трещин:

1, 2, 3, 4 – сварные швы

Каждый из четырех швов пробы выполнялся поочередно, в три прохода, до появления трещины. После выполнения каждого прохода температура образца доводилась до температуры помещения, где проводились испытания (20 °С). Склонность сплавов к образованию кристаллизационных трещин количественно оценивалась с помощью **коэффициента трещинообразования**, равного отношению длины трещины к общей длине выполненных швов без трещин (в процентах). Результаты экспериментов показали, что наименьшая склонность к кристаллизационным трещинам с коэффициентом трещинообразования 1,25 % получена при использовании сварочной проволоки марки Св АМг6. При сварке проволо-

кой Св АМг61 коэффициент трещинообразования составлял 2,0 %, а для проволоки Св 1557 – 12,3 %. Таким образом, применение сварочной проволоки марки Св АМг6 или Св АМг61 с большим содержанием Mg показывает более высокую стойкость к образованию кристаллизационных трещин, чем применение проволоки с малым содержанием Mg.

В процессе эксплуатации и даже при длительном вылеживании сварных конструкций наблюдается появление трещин в отдельных швах. Этот вид дефекта носит название **«замедленное разрушение»** [1, 2]. Многие исследователи объясняют замедленное разрушение возникновением структурных напряжений, которые накапливаются в процессе длительного естественного старения после сварки и накладываются на поле остаточных сварочных напряжений.

Опыт эксплуатации толстостенных сварных конструкций из алюминиевых сплавов АБТ-101 (суммарное содержание Zn, Mg равно 8-9 %) и АБТ-102 (суммарное содержание Zn, Mg равно 6-8 %) показал, что они могут быть предрасположены к замедленному разрушению. Проверку склонности к замедленному разрушению проводили на специальных жестких «торцевых» пробах (рис. 2), воспроизводящих реальные соединения.

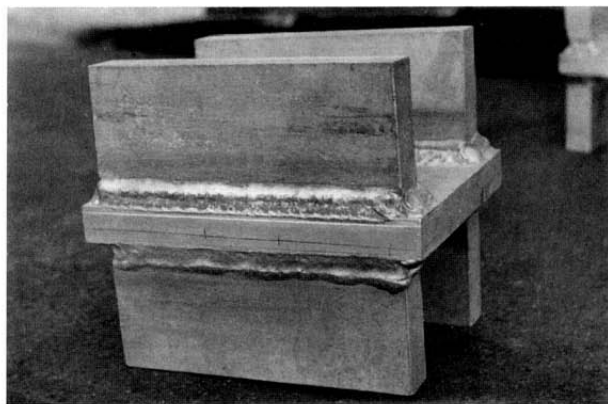


Рис. 2. Жесткая «торцевая» проба

Сварные жесткие пробы вылеживали длительное время на открытом воздухе. Трещины выявлялись внешним осмотром. Критерием

склонности к замедленному разрушению считалась суммарная длина трещин на пробе.

Полученные данные (рис. 3) подтвердили склонность сварных швов к образованию трещин по ряду причин: из-за высокой степени легирования сплава, значительных остаточных напряжений, наличия концентраторов напряжений в виде конструктивных непроваров, металлургических или сварочных дефектов. А также позволили установить, что длина трещины возрастает по мере увеличения легирования сплава от 6 к 9 % суммарного содержания Zn и Mg.

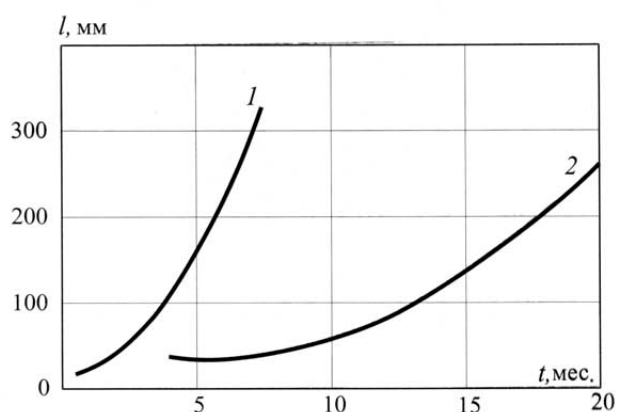


Рис. 3. Кинетика растрескивания сварных швов торцевых проб: 1 – сплав АБТ-101; 2 – сплав АБТ-102; l – суммарная длина трещины; t – срок наблюдения

Замечено, что «искусственное старение» конструкций после сварки в течение 3-4 ч при температуре 150-170 °С устраняет склонность сварных соединений к замедленному разрушению. Эффект старения можно объяснить структурной стабилизацией сплава и снижением уровня структурных и остаточных сварочных напряжений.

Реакция сплава на нагрев различной интенсивности зависит от устойчивости зафиксированной закалкой и отпуском структуры, состоящей из пересыщенного твердого раствора и фаз распада различной дисперсности. При нагреве свыше 180 °С механическая прочность сплавов снижается и приближается к соответствующим показателям отожженного сплава при температурах 350-400 °С. Это можно объяс-

нить процессами укрупнения частиц твердого распада, снижением напряженности кристаллической решетки и приближением структуры к равновесной. В условиях сварочного термического цикла проходит одновременно и обратный процесс – растворение выделившихся фаз и блоков и фиксация пересыщенного твердого раствора. Результаты прохождения этих двух процессов зависят от максимальной температуры нагрева, скорости нагрева и охлаждения. Как следствие, в околошовной зоне сплава могут присутствовать слои металла с различным уровнем изменения механических свойств.

Поскольку алюминиевые сплавы АБТ-101 и АБТ-102 относятся к термически упрочненным сплавам, можно было предположить, что локальный нагрев концентрированным источником тепла при сварке приведет к структурным изменениям материала в околошовной зоне. Влияние температуры нагрева при сварке на механические свойства металла в зоне термического влияния определяли посредством имитационного нагрева призматических образцов, пропуская через них электрический ток. Параметры нагрева и охлаждения выбирали исходя из температурно-временной зависимости, полученной с помощью осциллографа в точках околошовной зоны при сварке (рис. 4). Из призматических образцов изготавливали образцы диаметром 6 мм для последующего испытания на разрыв. После нагрева образцы подвергали старению в течение 3 ч при температуре 150-170 °С.

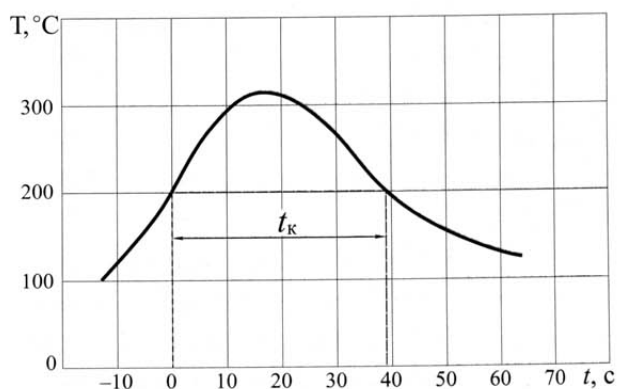


Рис. 4. Температурный цикл нагрева в точке околошовной зоны: t_k – время пребывания в диапазоне температур 200-300 °С

Результаты испытаний образцов показали, что наибольшее разупрочнение материала происходит при температурах нагрева 250–300 °С. При этом предел прочности сплава составлял примерно 80 %, а предел текучести – 70 % от соответствующих исходных значений.

Некоторые результаты измерения твердости металла в ЗТВ при различных параметрах режима сварки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Твердость металла в зоне термического влияния сплава АБТ-102

Толщина свариваемого металла, мм	Величина погонной энергии, кДж/см	Расстояние от края шва до участка с температурой $T_{\max} = 250\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$, мм	Время пребывания в интервале температур от $T_{\max}$ до 200 °С, с	Твердость после старения, HV, МПа
20	2543	20	20	1220
	2175	12	23	1250
	1097	4,8	10	1420

Анализ данных табл. 1 показывает, что наиболее благоприятный режим сварки – с погонной энергией менее 1140 кДж/см, которому соответствуют такие параметры: сварочный ток – 300 А; скорость сварки – более 25 м/ч; диаметр сварочной проволоки – 1,5–2 мм.

Для анализа изменения свойств сплава АБТ-102 в зоне термического влияния проводилось определение твердости HV на поперечных макрошлифах.

Результаты изменения твердости металла в зоне шва и околошовной зоне, приведенные на рис. 5, подтвердили предыдущий вывод. Из рисунка видно, что сварка при погонной энергии в пределах 1700–2300 кДж/см приводит к уменьшению твердости металла в ЗТВ до 1150 МПа.

В процессе эксплуатации сварных корпусных изделий спецтехники возможно появление дефектов в виде проломов, пробитий и отколов. При выполнении ремонта возникает необходимость удаления дефектного места с последующей установкой новой детали, так называемой «вставки».

На основе анализа различных способов удаления дефектных мест в металле толщиной до 60 мм было установлено, что ручная плазменная резка вследствие своей мобильности, точности вырезаемого контура и производительности имеет преимущества по сравнению с ручной или механизированной вырезкой металлическим электродом и кислородно-ацетиленовой резкой через титановую пластину [3, 4].

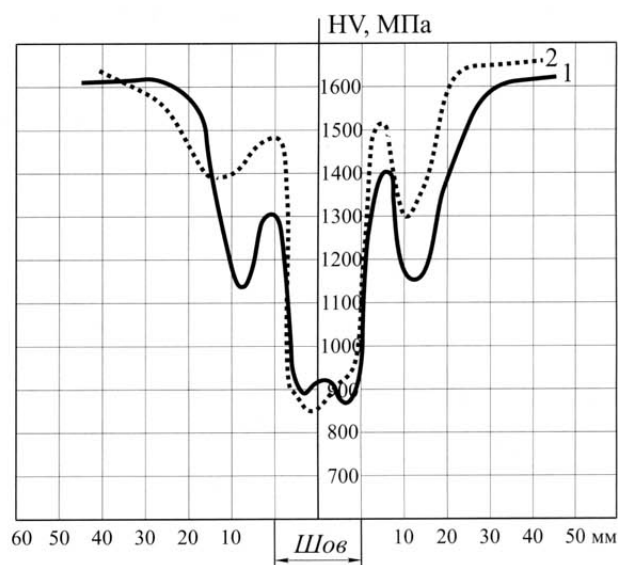


Рис. 5. Распределение твердости на поперечном макрошлифе: 1 – сварка при погонной энергии 1700 – 2300 кДж/см; 2 – сварка при погонной энергии менее 1140 кДж/см

Поскольку при плазменной резке используется высокоэнергетический источник, нельзя исключить возможности возникновения в зоне реза необратимых процессов разупрочнения. Поэтому оценка величины этой зоны для назначения припуска на окончательную механическую обработку сварного шва представляет практический интерес.

При экспериментальном исследовании резку опытных образцов из алюминиевого сплава АБТ-102 в виде пластин толщиной 43 и 60 мм проводили в соответствующих режимах (табл. 2) с помощью аппарата типа Плр-50/250 (ГОСТ 1222, марка УПОМ-4), резака РПР-6, в рабочей среде аргона или азота.

Таблица 2

Параметры режимов плазменной резки

Толщина пластины, мм	Ток дуги, А	Напряжение дуги, В	Расстояние от горелки до листа, мм	Скорость резки, м/мин
43	290	180	6-8	0,5
60	300	180	7-10	0,2

Из разрезанной пластины изготавливали поперечные шлифы для определения величины твердости металла в зоне реза. Схема замера твердости представлена на рис. 6, а результаты замеров – на рис. 7.

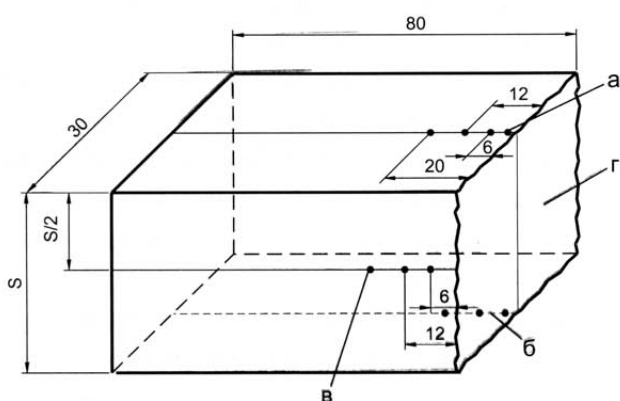
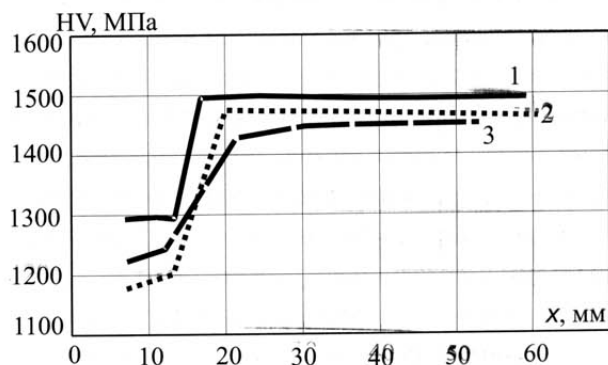


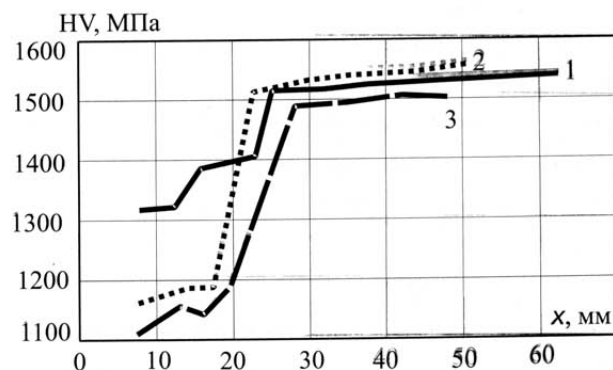
Рис. 6. Схема замера твердости металла в зоне реза: а – лицевая сторона образца; б – тыльная сторона; в – средняя часть; г – поверхность плоскости реза; S – толщина образца (пластины)

Анализ результатов измерений твердости для образца толщиной 43 мм показал следующее:

- на лицевой поверхности образца в зоне реза на участке шириной примерно 15 мм твердость основного металла уменьшается на 15 %;
- в средней части образца на расстоянии 21,5 мм от лицевой поверхности наблюдается резкое уменьшение твердости (примерно на 20 %) в зоне шириной 10-15 мм вдоль реза;
- с тыльной стороны в зоне до 10 мм вдоль реза твердость составляет 80-85 % от твердости основного металла.



а



б

Рис. 7. Распределение твердости металла в зоне реза: а – пластина толщиной 43 мм; б – пластина толщиной 60 мм; 1 – лицевая сторона; 2 – средняя часть; 3 – тыльная сторона; х – расстояние от реза

Для образца толщиной 60 мм по результатам измерения твердости металла можно отметить следующее:

- на лицевой поверхности в зоне шириной примерно 20 мм твердость снижается примерно на 10 %;
- в средней части на расстоянии 30 мм от лицевой поверхности в зоне 15-20 мм вдоль реза происходит снижение твердости примерно на 18 %;
- на тыльной стороне в зоне шириной 10-15 мм твердость снижается на 25-30 %.

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что для сплава АБТ-102

при ручной плазменной резке пластинчатых образцов толщиной 43 мм ширина зоны разупрочнения составляет 10-15 мм, а для образцов толщиной 60 мм – 15-20 мм. С учетом того, что припуск на механическую обработку сварной детали после заварки дефекта складывается из ширины зоны разупрочнения и погрешностей реза (за счет отклонения плоскости реза от перпендикулярности, шероховатости реза, случайных выхватов), величина припуска для пластины толщиной 43 мм должна быть не менее 20 мм, а для пластины толщиной 60 мм – не менее 25 мм.

Для восполнения удаленной (дефектной) части детали корпуса использовалась вставка таких размеров и конфигурации, чтобы она обеспечивала разнесение сварных швов с наружной и тыльной сторон (рис. 8).

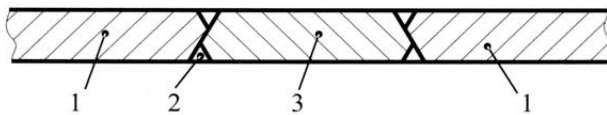


Рис. 8. Вид стыкового соединения вставки с деталью корпуса: 1 – деталь корпуса; 2 – разделка под сварку; 3 – вставка

Сварку выполняли со скоростью не менее 25-30 м/ч, обеспечивающей значение твердости металла (HV) в зоне термического влияния не ниже 1300-1400 МПа. Параметры режима сварки, позволяющие обеспечить наименьшее разупрочнение металла в зоне сварки, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры режима сварки

Толщина металла, мм	Диаметр сварочной проволоки, мм	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Расход аргона, л/мин
10-12	1,5-2,0	260-300	24-28	20-25
15-35	1,5-2,0	280-320	26-28	20-25
40-60	1,5-2,0	300-340	28-30	20-25

По результатам изучения особенностей сварки высокопрочных алюминиевых сплавов

системы легирования Al-Zn-Mg и изменения механических свойств в зоне сварки можно сделать такие выводы.

1. Оценка свариваемости алюминиевых сплавов АБТ-101 и АБТ-102 показала высокую стойкость против образования трещин в сварных швах и околошовной зоне при механизированной сварке проволоками Св АМг6 и Св АМг61.
2. Проведение искусственного старения сварных конструкций при температуре 150-170 °С в течение 3-4 ч обеспечивает достаточно высокую стойкость сварных соединений к образованию трещин при длительной эксплуатации.
3. Выполнение сварки механизированным способом плавящейся сварочной проволокой диаметром 1,5-2 мм с погонной энергией менее 1140 кДж/см вызывает наименьшее разупрочнение металла в зоне термического влияния.
4. Для удаления дефектов (проломов, пробитий и отколов) при ремонте корпусных специзделий из алюминиевого сплава АБТ-102 эффективно применение ручной плазменной резки.
5. Припуск на окончательную механическую обработку свариваемых кромок должен составлять 0,5-0,6 толщины листа металла.

Литература

1. Рабкин Д.М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. – Киев: Наукова думка, 1986. – 237 с.
2. Фридляндер И.Н. и др. Замедленное разрушение сварных соединений из сплавов системы Al-Zn-Mg // Алюминиевые сплавы. Жаропрочные и высокопрочные сплавы. 1966. Вып. 4. С. 120-134.
3. Хренов К.К. Сварка, резка и пайка металлов. – М: Машгиз, 1973. – 404 с.
4. Соколов И.И. Газовая сварка и резка металлов. – М: Высшая школа, 1978. – 315 с.