

СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СПЛАВА В-1963, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

В.В. Овчинников, В.В. Алексеев, В.И. Лукин,
В.С. Магнитов, Р.Н. Растопчин

В статье приведены особенности электронно-лучевой сварки прессованных полос из высокопрочного алюминиевого сплава В-1963 системы Al–Zn–Mg–Cu. Представлены результаты испытаний сварных соединений при статическом растяжении, на угол загиба и ударную вязкость металла шва. Обобщенные результаты исследований макро- и микроструктуры показывают, что для сварных швов характерна равноосная мелкозернистая структура с размером зерен 5–10 мкм.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, система легирования Al–Zn–Mg–Cu, электронно-лучевая сварка, сплав В-1963, механические свойства, свариваемость, структура материала сварных соединений.

Введение

Высокопрочный сплав В-1963 системы Al–Zn–Mg–Cu с небольшими добавками Ag, Sc, Zr по комплексу эксплуатационных характеристик превосходит отечественные и зарубежные сплавы данной системы (В95пчТ2, 7050Т76). Преимуществами сплава в виде поковок и прессованных полос перед полуфабрикатами из аналогичных серийных сплавов являются увеличение статической прочности (для предела прочности на 14–20 %), увеличение малоциклового усталости в 1,35–2 раза, снижение скорости роста трещины усталости в 1,2–1,5 раза. В отличие от других высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu сплав В-1963 удовлетворительно сваривается автоматической аргодуговой сваркой [1–3].

Целью исследования являлась оценка свариваемости сплава В-1963 системы Al–Zn–Mg–Cu при электронно-лучевой сварке (ЭЛС).

Материалы и методика эксперимента

Исследования проводили на прессованных полосах из сплава В-1963 (табл. 1) толщиной

40 мм с пределом прочности $\sigma_B = 590 \div 595$ МПа и углом загиба $\alpha = 9^\circ \div 15^\circ$.

Электронно-лучевая сварка выполнялась в доленом направлении (по отношению к направлению прессования полос) на установке ЭЛУ20МК, оснащенной энергетическим блоком ЭЛА60/60.

Перед сваркой торцевая поверхность стыка обрабатывалась на строгальном станке с чистотой $R_a = 6,3$ мкм, протиралась бензином и спиртом. Заготовки фиксировались на прихватках, выполненных ручной аргодуговой сваркой по боковым поверхностям.

Сварка образцов осуществлялась горизонтальным лучом при расположении стыка в горизонтальной плоскости. Режим сварки выбирали из условия сквозного проплавления образца, формирования шва с параллельными стенками с шириной со стороны проплава не менее 2–3 мм.

В процессе подбора режима сварки осуществлялось варьирование скорости сварки, влияние которой оценивалось по внешнему виду швов. При сварке на скорости менее 20 м/ч наблюда-

Таблица 1

Химический состав сплава В-1963

Содержание легирующих элементов, мас. %							
Al	Cu	Mg	Zn	Ag	Sc	Ti	Zr
основа	1,8	2,0	7,8	0,15	0,15	0,22	0,12

ется стекание расплавленного металла сварочной ванны как с лицевой стороны, так и со стороны проплава. Увеличение скорости сварки до 35–40 м/ч требует соответствующего повышения силы тока луча. При этом наблюдается интенсивное разбрызгивание металла со стороны проплава [4]. В связи с этим, на основании исследования влияния скорости сварки на формирование шва, был выбран диапазон скорости сварки 24–26 м/ч.

Сварку образцов выполняли в следующем режиме: сила тока луча 180–195 мА; сила тока фокусирующей магнитной линзы 470 мА; скорость сварки 24–26 м/ч; рабочее расстояние (от пушки до детали) 200 мм.

Прочность сварных соединений определяли на плоских образцах с шириной в рабочей части 10 мм и толщиной 3 мм по ГОСТ 6996–66. Испытания образцов проводили на стенде «ИНСТРОН ТТ-ДМ» в следующем режиме: нагрузка до 50 кН, скорость траверсы 0,1 см/с, скорость ленты на самописце 10 см/м. Результаты были представлены в виде записанных в процессе испытаний диаграмм растяжения.

Испытания на изгиб осуществлялись на плоских образцах сварных соединений толщиной 3 мм размером 10×90 мм с помощью маятникового копра МК-15. Ударную вязкость сварных соединений определяли на образцах сечением 10×10 мм длиной 60 мм с U-образной канавкой по металлу шва и по зоне сплавления.

Макроструктуру сварных соединений исследовали на темплетях, вырезанных из сварных соединений, которые после обработки исследуемой поверхности подвергали твердому цветному анодированию.

Микроструктуру сварных соединений сплава

В-1963 изучали на шлифах, подвергнутых травлению в реактиве Келлера. Металлографический анализ структуры сварных соединений и основного металла проводили с помощью оптического микроскопа *Carl Zeiss*. Съемку микроструктуры осуществляли специальной видеокамерой, встроенной в микроскоп. Такая видеокамера преобразовывает подаваемое на нее изображение от микроскопа в цифровой сигнал, который затем обрабатывается с помощью специального программного обеспечения на компьютере и выводится на экран монитора с возможностью сохранения снимков.

Для исследования поверхности излома образцов и тонкой структуры различных зон сварного соединения использовали электронный сканирующий микроскоп с приставкой для фазового анализа компании *Carl Zeiss*.

Микротвердость в сварных соединениях исследовали на поперечных шлифах плоских образцов. Измерение микротвердости проводили на приборе *ZHV1-A* компании *Zbun* по стандартной методике при нагрузке на индентор 0,1 Н.

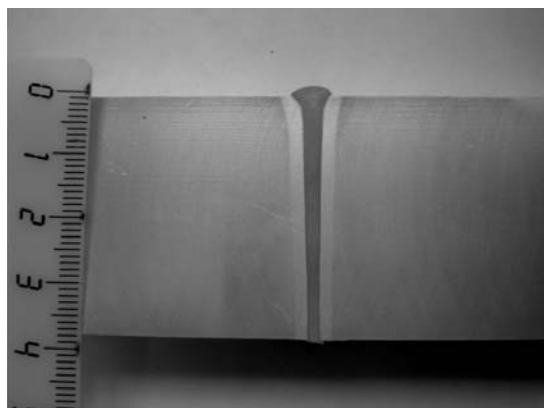
Результаты эксперимента

При исследовании макроструктуры сварных соединений установлено, что при электронно-лучевой сварке прессованных полос сплава В-1963 формируется сварное соединение без внутренних дефектов в виде пор, трещин и паровых мешков (рис. 1). Замеры швов показали, что с лицевой стороны соединения наблюдается углубление шва на 0,5–0,8 мм, а со стороны проплава – выпуклость до 2 мм.

Механическими испытаниями установлено, что сварные соединения имеют высокие проч-



а



б

Рис. 1. Внешний вид (а) и макроструктура (б) сварного соединения из сплава В-1963, выполненного электронно-лучевой сваркой

ностные характеристики (табл. 2). Низкие значения пластичности (характеризуется углом загиба $\alpha = 9^\circ\text{--}13^\circ$), полученные для сварных соединений, характерны и для самого сплава. Отмечено снижение прочности и ударной вязкости в средней части соединения, вероятно связанное с качеством основного металла.

Были проведены фрактографические исследования сварных соединений, которые разрушились по зоне сплавления. Материал в зоне

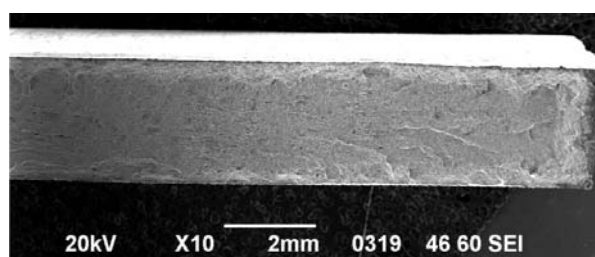
излома образца, вырезанного из верхней части сварного соединения, имеет выраженное волокнистое строение (рис. 2, а). На поверхности излома присутствуют зоны с полосчатостью и плоские участки с межзерненным изломом. В участках с полосчатостью наблюдаются места с оплавлением по границам зерен (рис. 2, б) и рыхлотой (рис. 2, в). В основном структура на этих участках имеет вид гребней, вытянутых зерен и в небольшом количестве присутствует

Таблица 2

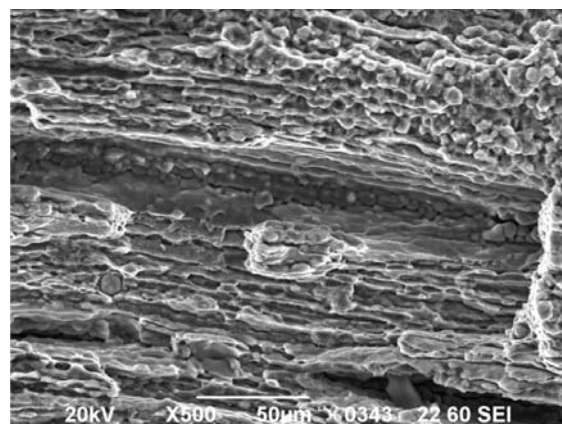
Механические свойства сварных соединений сплава В-1963

Место вырезки образцов	Предел прочности σ_b , МПа	Коэффициент разупрочнения K^*	Угол загиба α , °	Ударная вязкость КСЧ, кДж/м ²
Верх шва	$\frac{464\text{--}485}{471}$	0,8	$\frac{22\text{--}28}{26}$	$\frac{79\text{--}83}{80}$
Середина шва	$\frac{358\text{--}416}{388}$	0,66	$\frac{10\text{--}12}{11}$	$\frac{57\text{--}61}{59}$
Корень шва	$\frac{462\text{--}487}{472}$	0,8	$\frac{12\text{--}13}{12}$	$\frac{80\text{--}82}{81}$

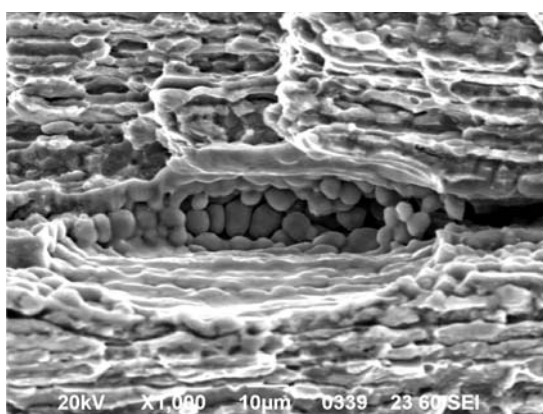
Примечание: над чертой – минимальные и максимальные значения параметров, под чертой – наиболее вероятное значение параметра.
 $* K = \sigma_{b\text{ в св.с.}} / \sigma_{b\text{ в осн. мет.}}$, $\sigma_{b\text{ в св.с.}}$ и $\sigma_{b\text{ в осн. мет.}}$ – пределы прочности металла сварочного соединения и основного металла соответственно.



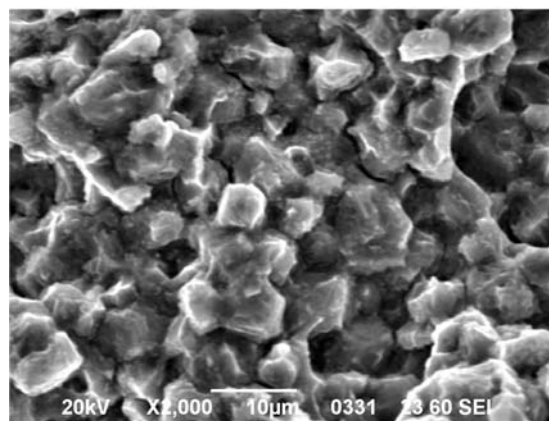
а



б



в



г

Рис. 2. Строение излома сварного соединения прессованной полосы из сплава В-1963 толщиной 40 мм, верх шва:

а – макростроение ($\times 10$); б – дефект в виде оплавления ($\times 500$); в – дефект в виде рыхлоты ($\times 1000$); г – зона межзеренного излома ($\times 2000$)

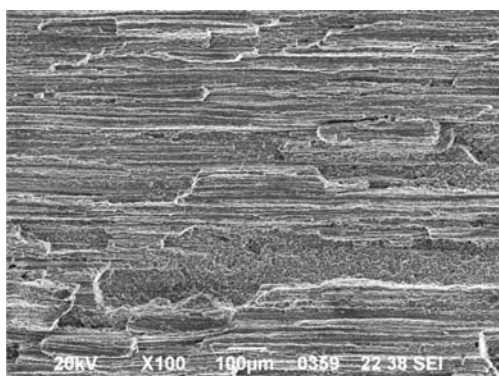
ямочный рельеф. На границах зерен в области межзеренного излома наблюдаются выделения упрочняющих фаз (рис. 2, з).

Зона излома образца, вырезанного из средней части сварного соединения, имеет слоистое строение (рис. 3, а). На поверхности излома наблюдаются протяженные волокна, структура которых характеризуется гребнями и рыхлотой, и участки разрушения по границам зерен. Разрушение проходит по волокнам, где присутствует большое количество мелких частиц (рис. 3, б).

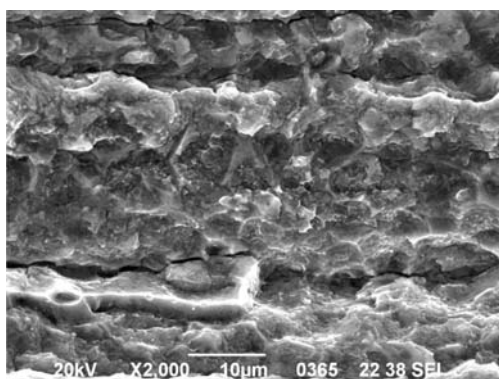
В изломе образца, вырезанного из корневого участка шва, слоистость выражена менее четко, чем наблюдалась при исследовании образца, взятого из середины шва, есть участки без волокнистости (рис. 4). Таким образом, снижение механических свойств в средней части сварного шва может быть связано с особенностями строения основного металла.

Проведенные металлографические исследования соединений показали, что для металла сварных швов характерна мелкозерни-

стая равноосная структура с размером зерна 5–10 мкм. Из-за высокой скорости кристаллизации на периферии шва практически отсутствует зона вытянутых зерен, а зона мелкого рекристаллизованного зерна составляет приблизительно 20–30 мкм (рис. 5, а, б). В переходной зоне отсутствует сплошная сетка избыточных фаз, что характерно для высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu (рис. 5, в, г). Результаты металлографических исследований позволяют утверждать, что легирование сплава В-1963 скандием и серебром уменьшает размер зерен в переходной зоне сварного соединения,

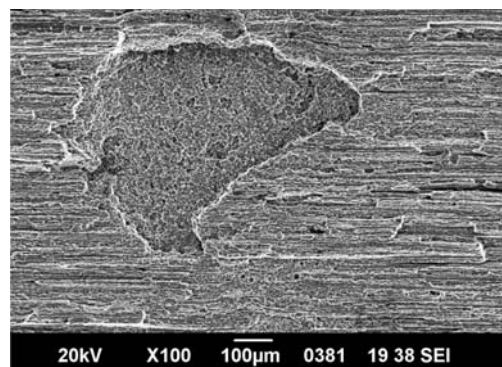


а

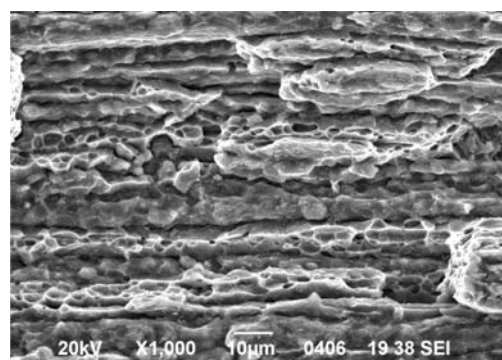


б

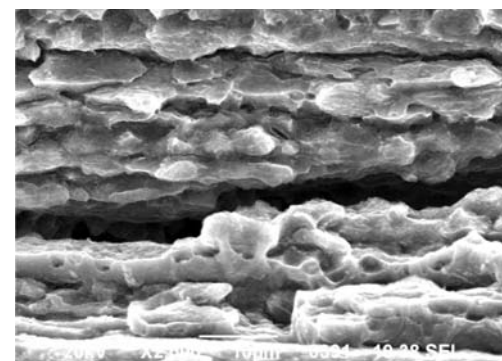
Рис. 3. Излом сварного соединения прессованной полосы из сплава В-1963 толщиной 40 мм, середина шва: а – внешний вид ($\times 100$); б – поверхность волокон ($\times 2000$)



а



б



в

Рис. 4. Излом сварного соединения прессованной полосы из сплава В-1963 толщиной 40 мм, корень шва: а – внешний вид ($\times 100$); б – строение ($\times 1000$); в – вторичная трещина ($\times 2500$)

протяженность этой зоны, сетчатость строения и обогащение границ выделениями вторичных хрупких фаз. Такая структура является более благоприятной с точки зрения повышения стойкости к образованию горячих трещин при сварке. Замеры микротвердости (рис. 6) и анализ микроструктуры металла сварных соединений показали, что зона термического влияния невелика и составляет 1,5–2,0 мм.

В рамках данной работы были выполнены исследования микроструктуры металла сварных соединений из сплава В-1963 на растровом электронном микроскопе. Микроструктура основного металла (рис. 7, а) имеет ярко выраженную слоистость с вытянутыми зернами в направлении прокатки полосы. Химический состав сплава В-1963 по основным легирующим элементам в зоне анализа микроструктуры

следующий: магний – 1,59 %; титан – 0,47 %; медь – 1,66 %; цинк – 7,82 %.

Микроструктура литого металла шва (рис. 7, б) состоит из равноосных зерен с более светлым телом зерна, отороченным более темной граничной областью зерна. Строчечные межзеренные выделения имеют более темный оттенок по сравнению с границами зерен на травленном шлифе. Результаты исследования химического состава различных зон металла сварного шва представлены в табл. 3. Обращает на себя внимание повышенное содержание меди, магния и цинка в областях, примыкающих к границам зерен. Содержание цинка в межзеренных прослойках наблюдается ниже его среднего содержания в сплаве.

В зоне сплавления сварного соединения из сплава В-1963 (рис. 7, в) замеряли содержание

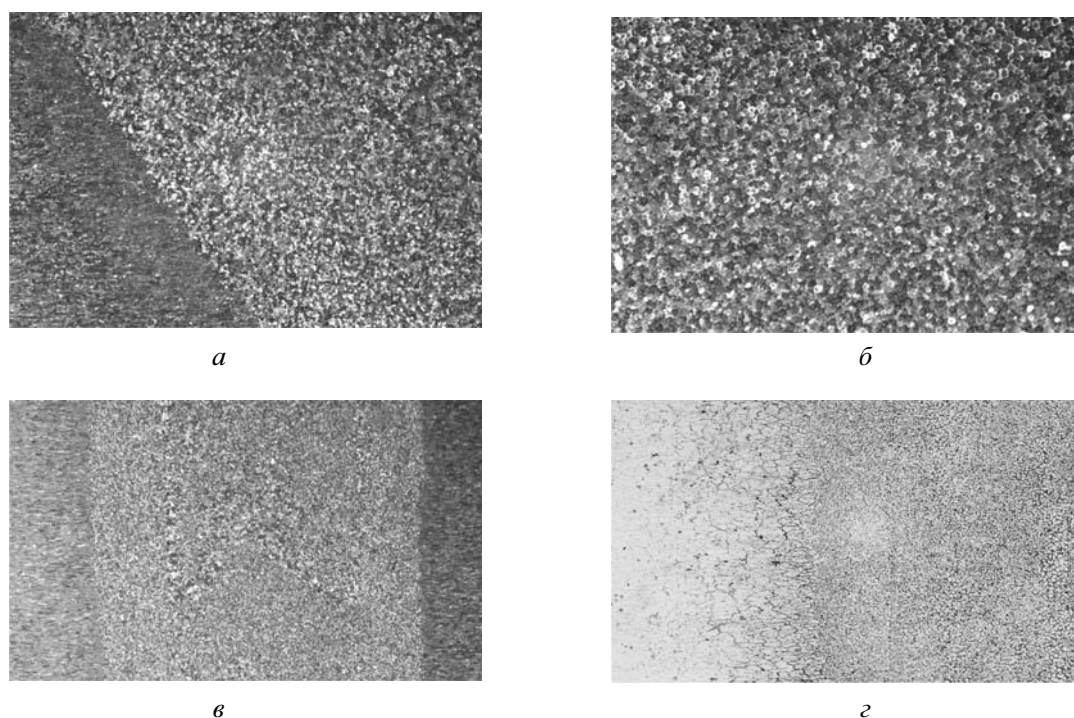


Рис. 5. Микроструктура металла сварных соединений из сплава В-1963:
а – верх шва, переходная зона ($\times 200$); б – центр шва ($\times 400$); в – корневая часть шва ($\times 100$);
г – корень шва, переходная зона ($\times 200$)

Таблица 3

Содержание элементов (мас. %) в различных зонах структуры
металла шва сплава В-1963

Точка анализа	Структурная зона	Mg	Sc	Ti	Cu	Zn
Спектр 1	Тело зерна	0,68	–	0,18	0,48	4,12
Спектр 2	Приграничная область зерна	1,10	–	–	1,83	9,49
Спектр 3	Межзеренные выделения	1,04	0,18	–	1,73	6,46

легирующих элементов (табл. 4): спектр 1 – в теле зерен зоны сплавления; спектр 2 – приграничная область зерна в металле зоны сплавления; спектр 3 – межзеренные прослойки в зоне сплавления.

Из полученных замеров следует, что тело зерна в зоне сплавления содержит магния, меди и цинка существенно меньше, чем в сплаве. Ближе к границе зерен (спектр 2) отмечается некоторое увеличение содержания легирующих элементов. Однако и в этой зоне содержание легирующих элементов существенно меньше, чем в самом сплаве.

В то же время в межзеренных прослойках (спектр 3) магния и цинка содержится столько же, сколько в сплаве В-1963. Содержание меди превышает ее содержание в сплаве в 2–2,3 раза, а серебра – в 4 раза. Таким образом, в зоне сплавления по границам зерен формируются прослойки с повышенным содержанием меди, серебра и дополнительно магния и цинка. Такие прослойки могут обладать повышенной хрупкостью, что выражается в снижении ударной вязкости по зоне сплавления сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов при электронно-лучевой сварке.

При изготовлении сварных конструкций электронно-лучевой сваркой возможно применение многопроходной сварки для устранения

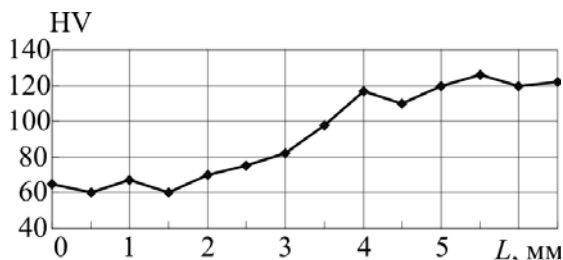
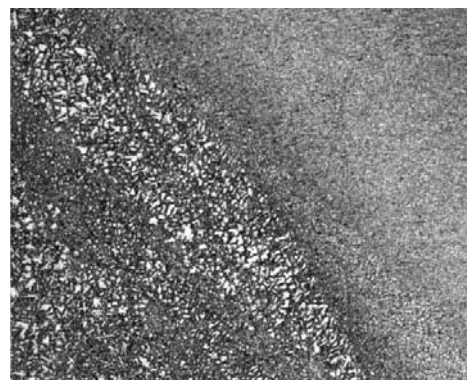


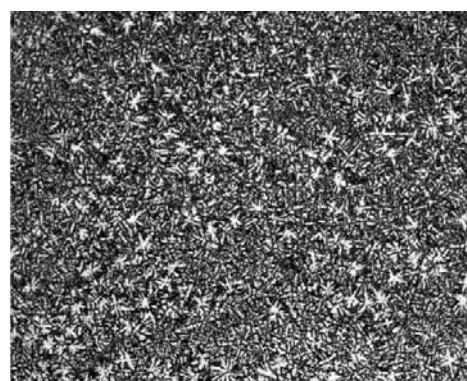
Рис. 6. Распределение микротвердости в металле сварного соединения из сплава В-1963 системы Al–Zn–Mg–Cu, выполненного электронно-лучевой сваркой, в зависимости от расстояния L от середины шва



а



б



в

Рис. 7. Микроструктура основного металла сплава В-1963 (а), металла зоны сплавления (б) и шва (в) ($\times 150$)

Таблица 4

Содержание элементов (мас. %) в структуре металла зоны сплавления сварного соединения сплава В-1963

Точка анализа	Структурная зона	Mg	Sc	Ag	Cu	Zn
Спектр 1	Тело зерна	0,72	0,10	–	0,49	4,18
Спектр 2	Приграничная область зерна	0,91	0,15	–	0,74	5,13
Спектр 3	Межзеренные выделения	2,00	0,18	0,63	4,18	7,81

непроваров и внутренних дефектов типа паровых мешков и пор в металле шва. В связи с этим представляет практический интерес оценка изменения химического состава металла шва при увеличении количества проходов. Для исследуемого сплава в качестве определяемых были выбраны концентрации основных легирующих элементов – цинка, магния и меди.

Проведенные замеры концентрации основных легирующих элементов в металле шва после различного количества проходов показали, что концентрация меди практически не изменяется с увеличением количества проходов от одного до трех, а концентрации магния и цинка сокращаются не более чем на 5–8 % (табл. 5). Это позволяет предположить, что применение повторных проходов для устранения внутренних дефектов швов не повлечет за собой существенного изменения химического состава и свойств металла сварных соединений из сплава В-1963 системы Al–Zn–Mg–Cu.

Заключение

В результате исследований выявлено, что сплав В-1963 имеет удовлетворительные характеристики свариваемости, а его сварные соединения имеют высокие прочностные характеристики.

Результаты металлографических исследований позволяют констатировать, что легирование сплава В-1963 скандием и серебром позволяет получить структуру, повышающую стойкость материала к образованию горячих трещин при сварке.

Также результаты исследований свидетельствуют о том, что содержание легирующих элементов в металле шва практически не зависит

от количества проходов при электронно-лучевой сварке. Следовательно, повторные проходы, которые бывают необходимы для устранения внутренних дефектов швов, вероятнее всего, не приведут к существенным изменениям химического состава и свойств металла сварных соединений из сплава В-1963 системы Al–Zn–Mg–Cu. В то же время для подтверждения данного предположения требуется проведение дополнительного исследования.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают возможность применения сплава В-1963 системы Al–Zn–Mg–Cu с микродобавками элементов переходной группы для изготовления сварных конструкций.

Список литературы

1. Ищенко А.Я. Особенности применения алюминиевых высокопрочных сплавов для сварных конструкций // Автоматическая сварка. 2004. № 4. С. 16–26.
2. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // Технология легких сплавов. 2002. № 4. С. 12–17.
3. Влияние способа сварки на сопротивление разрушению соединений алюминиево-литиевых сплавов 1420 и 1460 / Т.М. Лабур, Андр. А. Бондарев, А.В. Лозовская и др. // Автоматическая сварка. 2001. № 7. С. 12–16.
4. Овчинников В.В., Егоров Р.В. Пористость швов при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов, легированных литием // Вестник ИГОУ. 2006. Вып. 4. С. 92–96.

Материал поступил в редакцию 17.02.2011

Таблица 5

Концентрация элементов переходной группы (масс. %) в металле шва сплава В-1963 при электронно-лучевой сварке в зависимости от количества проходов

Число проходов	Cu	Zn	Mg
0	1,8	7,8	2,0
1	1,75	7,66	1,82
2	1,72	7,53	1,75
3	1,70	7,21	1,72

ОВЧИННИКОВ Виктор Васильевич E-mail: vikov1956@mail.ru Тел.: +7 (495) 795-83-95	Доктор технических наук, профессор, академик Международной академии информатизации, главный специалист по материаловедению и сварке ОАО «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ». Сфера научных интересов – создание новых материалов на металлической основе и исследование их поведения в условиях эксплуатации в ответственных конструкциях. Автор 320 научных работ, из которых 3 монографии, 102 патента и авторских свидетельства.
АЛЕКСЕЕВ Вячеслав Владимирович E-mail: alekseevvv@mail.ru Тел.: +7 (499) 795-82-78	Доктор технических наук. Начальник отдела испытаний материалов и элементов конструкций ОАО «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ». Сфера научных интересов – исследование структуры и свойств конструкционных материалов, а также анализ разрушений конструкций при эксплуатации. Автор 85 научных работ.
ЛУКИН Владимир Иванович E-mail: wiam_weld@bk.ru Тел.: +7 (495) 366-71-22	Доктор технических наук, профессор. Заместитель генерального директора ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов». Сфера научных интересов – разработка высокопрочных алюминиевых сплавов, исследование свариваемости и разработка состава присадочных материалов. Автор 97 научных работ.
МАГНИТОВ Валерий Сергеевич E-mail: valereM@mail.ru Тел.: +7 (499) 795-80-06	Кандидат технических наук. Начальник участка электронно-лучевой сварки ОАО «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ». Сфера научных интересов – электронно-лучевая сварка конструкций из алюминиевых и титановых сплавов. Автор 67 научных работ, и в том числе монографии.
РАСТОПЧИН Руслан Николаевич E-mail: ruslanrast@mail.ru Тел.: +7 (985) 365-62-48	Аспирант ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов». Область научных интересов – металловедение лучевых методов сварки высокопрочных алюминиевых сплавов. Автор (соавтор) шести научных трудов.

УДК 51.7, 519.6, 53.091, 534.1, 534-8, 52.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕГО ВИБРАЦИОННОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА*

А.М. Гуськов, Е.А. Коровайцева, Г.Я. Пановко, А.Е. Шохин

Статья посвящена исследованию динамики кварцевого генератора, находящегося в условиях внешнего вибрационного воздействия. Предложена электромеханическая модель кварцевого генератора, учитывающая его основные динамические свойства. Проанализированы автоколебательные процессы в структурно-неоднородной системе, подверженной внешнему низкочастотному вибрационному воздействию. Показано, что на спектральные характеристики системы основное влияние оказывает амплитуда внешнего воздействия, что проявляется в виде дрейфа несущей частоты, повышения неустойчивости, увеличения фазовых шумов.

Ключевые слова: кварцевый генератор, пьезоэлектрическая сплошная среда, кратковременная неустойчивость частоты, вибрационное воздействие, автоколебания, спектр выходного сигнала.

Введение

Практика применения кварцевого генератора (КГ) показала выраженную зависимость генерируемого сигнала от внешней вибрации, когда относительная неустойчивость частоты КГ увеличивается. Однако до настоящего времени исследования кварцевого генератора в основном ограничивались рассмотрением его электрической схемы [1–3]. При таких подходах динамика механической части генератора – кварцевого резонатора – не учитывается, что не позволяет выявить реальное напряженно-деформированное состояние кварцевой пластинки как пьезоэлектрической сплошной среды, частотные характеристики резонатора, связь между механическими и электрическими параметрами КГ, влияние внешних механических воздействий.

Основной целью настоящей работы является разработка и анализ расчетной модели КГ, учитывающей влияние внешней низкочастотной вибрации (порядка десятков или сотен герц) на показатели неустойчивости частоты КГ.

Принцип работы кварцевого генератора

Кварцевый генератор (рис. 1) представляет собой генератор электрических колебаний вы-

сокой частоты, в котором роль резонансного контура играет кварцевый резонатор. Основным элементом резонатора является кварцевая пластинка, вырезанная определенным образом из кристалла кварца. В одном случае на боковые поверхности кварцевой пластинки наносится слой серебра или золота, и они играют роль электродов. В другом случае пластинку помещают в специальный держатель, представляющий собой обкладки конденсатора. Кварцевая пластинка помещается в герметичный корпус и с помощью электродов или держателя соединяется с электрической цепью, питание которой осуществляется от источника постоянного напряжения. Транзисторы $Q1$ и $Q2$, поддерживают автоколебательный механизм генерации сигнала, который определяется электрическим потенциалом в узле A .

При подаче напряжения кварцевая пластинка за счет пьезоэлектрического эффекта деформируется, что, в свою очередь, вызывает появление электрических зарядов [1–8].

Частота колебаний КГ зависит от размеров кварцевой пластинки, механических свойств и пьезоэлектрических постоянных кварца, а также от ориентации плоскостей (среза) пластинки относительно кристаллографических осей кварца.

* Работа выполнена при поддержке целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы на период 2009–2011 годы» (проекты 2.1.2/ 10077 и 2.1.1/9655) и гранта РФФИ 10-08-00640-а.