



ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В96 НА ПАРАМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ

Т. М. ЛАБУР, д-р техн. наук, Т. Г. ТАРАНОВА, В. А. КОСТИН, кандидаты техн. наук,
чл.-коры А. Я. ИЩЕНКО, Г. М. ГРИГОРЕНКО, В. Е. ФЕДОРЧУК, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Методом растровой микроскопии изучен характер структурных превращений, которые протекают в алюминиевом сплаве В96 при сварочном нагреве. Проведена количественная и качественная оценка состава фаз и их морфологических особенностей в зависимости от теплофизических условий сварки неплавящимся электродом и электронным лучом. Определено влияние объемной доли фаз на процессы зарождения и распространения трещины в сварных соединениях в условиях внецентренного разрушения.

Ключевые слова: высокопрочный алюминиевый сплав, термический цикл сварки плавлением, зона термического влияния, скорость охлаждения, сопротивление разрушению, микроструктура, включения, исследования

Структурные превращения, происходящие в алюминиевых сплавах при термическом цикле сварки, вызывают разупрочнение металла в околошовной зоне, а также охрупчивание отдельных структурных составляющих [1–5]. Судя по публикациям, однозначного мнения о влиянии фазовых включений и частиц на прочность и вязкость разрушения сварных соединений нет. При этом отмечается, что частицы снижают сопротивление разрыву, способствуют разрушению металла перед вершиной трещины, отслоению их поверхности от границы контакта с матрицей и т. д. Для более полного понимания явлений, происходящих при термическом цикле сварки, исследовали сплав В96, который характеризуется высокими значениями механических свойств, но трудно сваривается [6].

С целью установления объемной доли фаз, выделяющихся во время термического цикла сварки, выявления особенностей их морфологии и химического состава, влияния на процессы зарождения и распространения трещин в структуре околошовной зоны использовали метод моделирования термического цикла сварки дугой неплавящимся электродом и электронным лучом. Для этого вырезали из листа толщиной 3 мм плоские образцы размером 36×57 мм с острым надрезом глубиной 11 мм и радиусом 0,1 мм в вершине. Режимы нагрева образцов выбирали, исходя из термокинетической диаграммы превращений исследуемых сплавов [7]. В результате нагрева получили образцы с различными структурными составляющими, идентичные тем, которые возникают в локаль-

ных участках металла ЗТВ при сварке алюминиевых сплавов. Последующее испытание обработанных образцов выполняли в условиях внецентренного растяжения, что позволило, помимо изучения структуры, определить характеристики сопротивления разрушению отдельных участков. Структурный анализ частиц, выделяющихся в сплаве при нагреве и охлаждении, выполняли с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840. Изучив изменение рельефа поверхности разрушения, отмечали особенности структурных фрагментов излома на пути распространения трещины. Определение объемной доли частиц, расположенных вдоль границ зерен, размера, формы и топологии распределения позволило установить влияние зависимости их на основные физико-механические свойства сварных соединений в металле ЗТВ.

Количественную оценку объемной доли частиц в структурах исследуемых образцов проводили с использованием компьютерной программы Image Pro 30, которая помогает выделить характерные элементы структуры на основании цветового контраста с последующей математической обработкой. В сочетании с программой Statistica 5.0 она позволяет обработать полученные результаты по одному из статистических подходов и на их основе построить графические зависимости.

Как показали результаты исследования объемной доли включений характер их распределения неоднородный на разном расстоянии от надреза по высоте образца (рис. 1). Во время термического цикла сварки дугой неплавящимся электродом он составляет 2...7,2, электронным лучом — 0,8...4 %. Максимальное количество выделений при дуговой сварке отмечается в состоянии после отжига, в условиях сварки электронным лучом

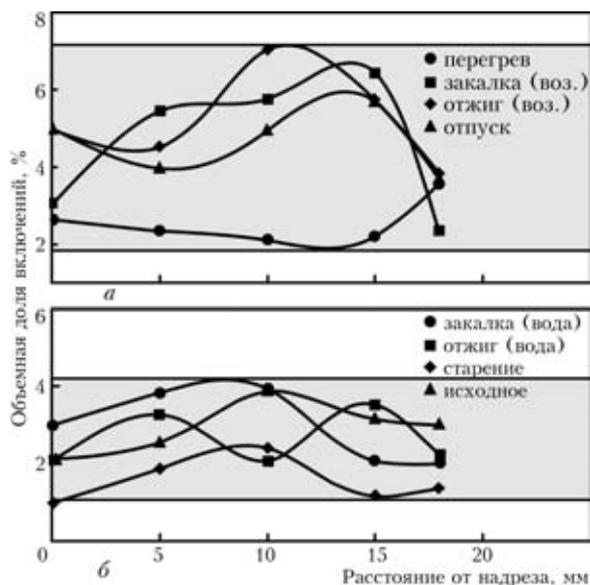


Рис. 1. Характер изменения объемной доли включений по высоте образца в зависимости от состояния металла при нагреве, имитирующим условия дуговой сварки неплавящимся электродом (а) и электронным лучом (б)

— на участке закалки. В состоянии перегрева (550 °С), который имитирует металл границы сплавления сварных соединений, объемная доля их изменяется в пределах 2,11...3,58 % (минимальная по сравнению с другими условиями нагрева и охлаждения при сварочном цикле), что соответствует расстоянию от надреза 10 и 18 мм. Нагрев сплава В96 до температуры закалки (460 °С) при обоих способах сварки приводит к увеличению объемной доли включений.

В условиях быстрого охлаждения металла в воде наибольшее количество включений (3,9 %) отмечается на участке, расположенном на расстоянии 10 мм, а наименьшее (2,1 %) — 18 мм от надреза. При охлаждении на воздухе эта величина составляет 6,44 и 2,34 % соответственно. Подобная закономерность фазовых выделений в исследуемом сплаве отмечается при охлаждении с температуры отжига (360 °С). Количество выделений при охлаждении в воде сохраняется, а на воздухе увеличивается в 2...2,5 раза по сравнению с состоянием металла после закалки. В состоянии металла после отпуска значение объемной доли включений близко к их значениям в состоянии отжига при охлаждении на воздухе, в состоянии старения наблюдается резкое снижение объемной доли фаз при их укрупнении. В участке металла у надреза количество объемной доли включений составляет 0,77, а на расстоянии 10 мм — 2,42 %, что в 2...3 раза меньше по сравнению с другими участками нагрева в металле ЗТВ. Таким образом, установленные закономерности изменения объемной доли включений в сплаве В96 от температуры нагрева показывают, что по сравнению с исходным состоянием наибольшее количество фаз выделяется в условиях нагрева до состояния отжига

Т а б л и ц а 1. Влияние термообработки и среды охлаждения на количество включений в металле

Вид термообработки	Среда охлаждения	Объемная доля включений (max/min), %
Закалка (460 °С)	Вода	3,97/2,00
	Воздух	6,48/2,35
Отжиг (360 °С)	Вода	3,54/2,08
	Воздух	7,15/3,92

при охлаждении на воздухе. Этот факт может быть связан с интенсивностью процессов коагуляции неметаллических включений в данном сплаве. Рассмотрим влияние термообработки и среды охлаждения на количество включений в металле (табл. 1). При сравнении видно, что нижний предел значений при закалке постоянный и равен примерно 2 %. Верхний изменяется от 3,97 до 6,48 %, что указывает на высокую чувствительность сплава В96 к скорости охлаждения. В состоянии отжига скорость охлаждения оказывает влияние как на нижний, так и на верхний предел. При охлаждении в воде объем включений такой же, как и в состоянии закалки, и составляет 2,08, а при охлаждении на воздухе — 3,92 %. Верхний предел изменения объемной доли включений при этом равен 7,05 %, что практически близко к состоянию закалки.

Такая же закономерность выделений фаз отмечается и для значений верхнего предела в образцах, охлажденных на воздухе. Однако диапазон значений объемной доли фазовых выделений в состоянии закалки шире, чем при отжиге, что можно объяснить различной скоростью образования фаз при исследуемых условиях охлаждения.

На рис. 2 и 3 приведена зависимость объемной доли фазовых выделений и микроструктура исследуемого сплава от условий нагрева при электронно-лучевой сварке и сварке неплавящимся электродом сплава В96 в различных участках металла ЗТВ. Как видно из данных на рисунках, характер распределения фаз в структурах неодинаков, что связано с температурно-временными отличиями процессов, протекающих при нагреве и охлаждении исследуемого сплава. Так, в условиях нагрева при электронно-лучевой сварке максимальные значения выделения фаз наблюдаются для состояний закалки и отпуска, а минимальные — в состоянии старения. Это может вызвать ухудшение свойств сварных соединений на соответствующем участке металла ЗТВ. Объемная доля включений при перегреве и отжиге такая же, как и в основном металле (рис. 2). В условиях нагрева, моделирующих сварку неплавящимся электродом (рис. 3), максимальное количество выделений фаз (5,21 %) наблюдается в состоянии отжига, что в 2 раза выше, чем после сварки электронным лучом. Обратная закономерность наблюдается в ме-

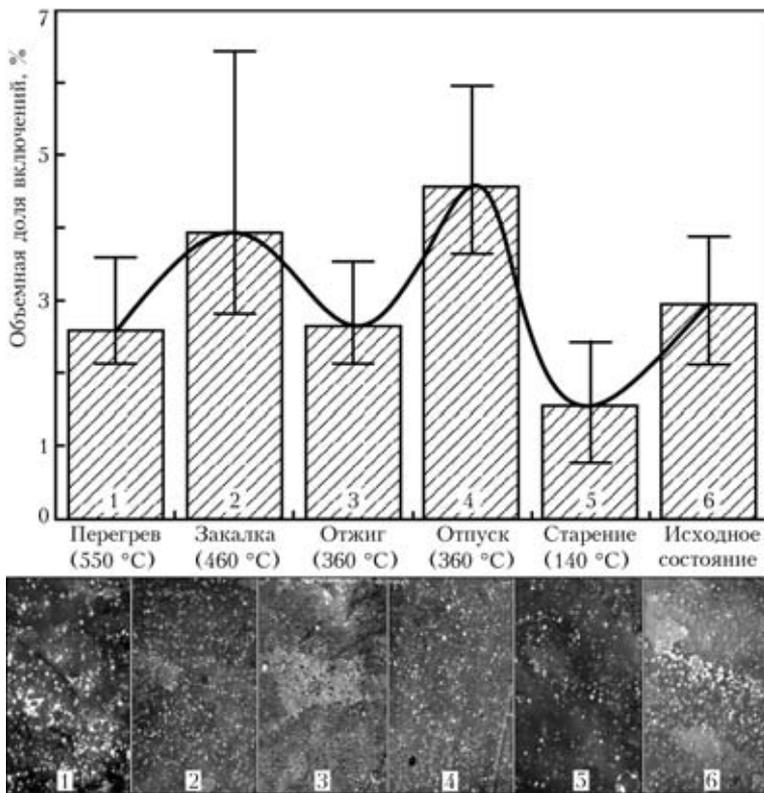


Рис. 2. Характер изменения объемной доли включений и микроструктуры (X200) сплава В96 в зависимости от теплофизических условий нагрева, моделирующих процесс сварки электронным лучом

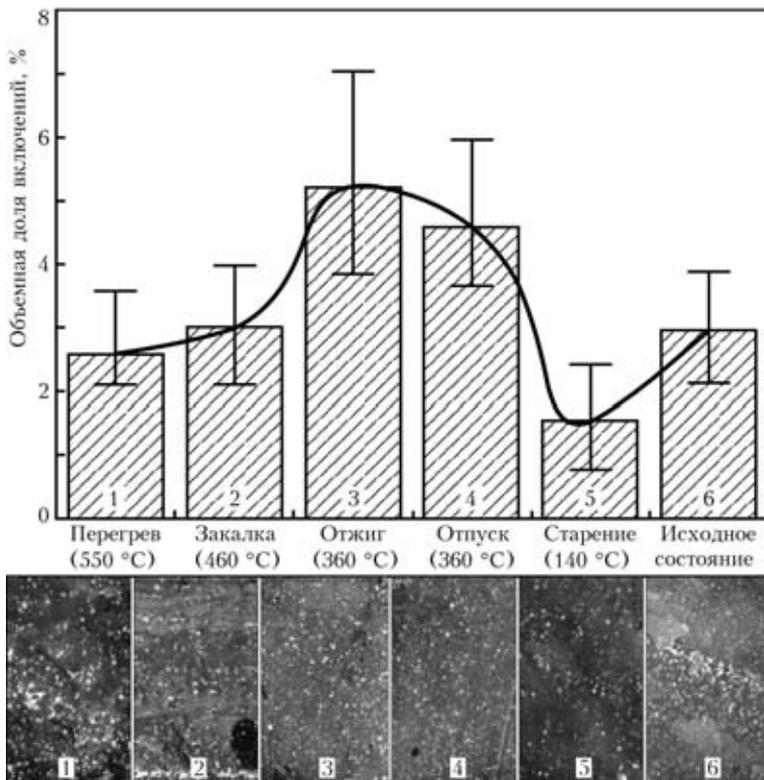


Рис. 3. Характер изменения объемной доли включений и микроструктуры (X200) сплава В96 от теплофизических условий нагрева, моделирующих процесс сварки дугой неплавящимся электродом

талле в состоянии закалки. Отмечаемые особенности микроструктуры обусловлены разницей скорости охлаждения металла после соответствующего сварочного нагрева. При сварке образцов электронным лучом изменение объемной доли включений носит синусоидальный характер, в условиях неплавящегося электрода отмеченная зависимость нарушается вследствие увеличения продолжительности термического цикла, действующего во время сварки.

В ходе исследований морфологии расположения выделяющихся при сварочном нагреве частиц установлено, что воздействие термического цикла приводит к образованию в сплаве от трех до пяти различных видов выделений, помимо нерастворяющихся включений интерметаллидных фаз.

Используемая в работе компьютерная методика определения объемной доли включений, содержащихся в исследуемых образцах, не позволила их идентифицировать в отдельности, что связано с недостаточным разрешением программы Image Pro по цветовому контрасту. В связи с этим в ходе изучения особенностей морфологии структуры в зоне распространения трещины были вырезаны шлифы в поперечном сечении относительно проката, поскольку именно это направление полуфабрикатов алюминиевых сплавов характеризуется наименьшим уровнем свойств. Согласно [8] сплав В96 содержит включения фаз, химический состав которых состоит из соединений основных легирующих элементов, %: 26...28 Cu, 38...40 Zn, 11...14 Mg. Их форма и размеры в структуре определяются температурой нагрева и условиями охлаждения металла в ЗТВ. Так, при теплофизических условиях, моделирующих сварку электронным лучом, размеры фаз колеблются в пределах 1,77...4,94, а при сварке неплавящимся электродом 2,5...7,82 мкм. Располагаются они в виде скоплений преимущественно вдоль границ зерен, ориентированных в направлении проката.

Микроструктура сплава В96 в состоянии перегрева, характерного для основного металла у границы сплавления, характеризуется наличием трех видов фазовых выделений (табл. 2). Стехиометрическая формула фазы белого цвета может быть идентифицирована как $MgZn_2$. Она имеет преимуще-



Т а б л и ц а 2. Влияние условий нагрева и среды охлаждения на вид включений

Цветовая окраска фаз	Перегрев (550 °С, 3 с)	Закалка (460 °С, 1 ч, вода)	Закалка (460 °С, 1 ч, воздух)	Отжиг (360 °С, 20 мин, вода)	Отжиг (360 °С, 20 мин, воздух)	Отпуск (360 °С, 3 мин)	Старение (140 °С)	Основной металл (20 °С)
Белая	MgZn ₂	MgZn ₂	MgZn ₂	MgZn ₂	MgZn ₂	MgZn ₂	MgZn ₂	MgZn ₂
Серая	Fe ₂ SiAl ₈	Fe ₂ SiAl ₈	Fe ₂ SiAl ₈	Fe ₂ SiAl ₈	Fe ₂ SiAl ₈	Fe ₂ SiAl ₈	Fe ₂ SiAl ₈	Fe ₂ SiAl ₈
Темная	Mg ₂ Si	Mg ₂ Si	Mg ₂ Si	Mg ₂ Si	Mg ₂ Si	Mg ₂ Si	Mg ₂ Si	Mg ₂ Si
Темная с белой оторочкой	—	Mg ₃ Zn ₃ Al ₂	Mg ₃ Zn ₃ Al ₂	Mg ₃ Zn ₃ Al ₂	Mg ₃ Zn ₃ Al ₂	Mg ₃ Zn ₃ Al ₂	Mg ₃ Zn ₃ Al ₂	Mg ₃ Zn ₃ Al ₂
Серая с черной оторочкой	—	—	Al–Mg ₃ Zn ₃ Al ₂ –MgZn ₂	—	Al–Mg ₃ Zn ₃ Al ₂ –MgZn ₂	—	Al–Mg ₃ Zn ₃ Al ₂ –MgZn ₂	Al–Mg ₃ Zn ₃ Al ₂ –MgZn ₂
Общее количество фаз	3	4	5	4	5	4	5	5

твенно округлую форму размером 0,5...2 мкм и располагается в объеме твердого раствора (рис. 2, 3, позиция 1). Частицы серого цвета, имеющие игольчатую форму, могут принадлежать соединению Fe₂SiAl₈. Темные частицы, которые значительно меньше по размерам, можно отнести к фазе Mg₂Si. Все перечисленные типы фаз находятся в твердом растворе. По границам зерен отчетливо видны эвтектические образования длиной 2...15 мкм и шириной 0,3...0,7 мкм предположительно состава Mg₃Zn₃Al₂ [8]. После закалки и охлаждения на воздухе в микроструктуре сплава обнаруживается пять разновидностей фаз округлой формы (рис. 2, позиция 2), которые неравномерно располагаются в теле и по границам зерен. В отличие от предыдущего состояния в объеме металла содержатся комплексные фазы (серые с белой окантовкой), которые крупнее по сравнению с другими типами включений.

Увеличение скорости охлаждения металла, нагретого до температуры закалки, уменьшает количество фазовых выделений до четырех видов. При этом они меньше по размеру (1,77...4,94 мкм), характер их расположения неоднороден. Темных частиц с белой оторочкой, которые являются эвтектикой, не обнаружено, что свидетельствует о влиянии скорости охлаждения металла при термическом цикле сварки алюминиевых сплавов не только на объем выделений, но и на разнообразие видов фазовых выделений. В структуре металла в состоянии отжига и охлаждения в воде (рис. 2, позиция 3) можно выделить также четыре вида фаз, как и в состоянии закалки. Три из них относятся к основному составу исследуемого сплава, указанному выше. В структуре отсутствует фаза серого цвета с темной оторочкой, что, по-видимому, обусловлено температурой нагрева и средой охлаждения. Действие такой температуры сравнительно длительное время при охлаждении металла на воздухе достаточно для выделения пяти видов фаз

(рис. 3, позиция 2). Крупные коагулированные частицы хаотически расположены в объеме зерен, вдоль границ расположены мелкие частицы в виде цепочек. Особенностью данной структуры является наличие комплексных частиц серого цвета с черной оторочкой. В состоянии старения в металле наблюдается все пять типов более крупных фаз, количество которых больше, чем при других условиях нагрева (рис. 2, 3, позиция 5). В основном металле также отмечено пять типов фаз (рис. 2, 3, позиция 6), при этом в микроструктуре четко просматривается их строчечное расположение относительно направления проката, неоднородность распределения фаз, а также большое количество комплексных выделений.

Таким образом, в результате проведенных исследований можно с уверенностью утверждать, что в алюминиевом сплаве В96 в процессе нагрева, присущего сварочному циклу, содержится различное количество фаз, зависящее от температуры и среды охлаждения. При перегреве имеется только три типа фаз, состоящих из основных легирующих элементов. Поскольку для данного состояния характерна высокая температура, процесс оплавления зерен по сравнению с процессом выделения фаз доминирует.

Т а б л и ц а 3. Влияние условий нагрева на характеристики вязкости разрушения сплава В96 в различных температурных участках металла ЗТВ сварных соединений

Условия нагрева	σ _p , МПа	K _с , МПа√м	J _c , Дж/см ²	УРРТ ₂ , Дж/см ²
Перегрев (ЗС) (550 °С, 3 с)	415	22,1	6,3	4,3/2,0
Закалка (460 °С, 1 ч)	499/427	12,9/12,9	8,6/8,0	2,2/2,7
Отжиг (360 °С, 20 мин)	343/401	15,1/5,5	8,0/6,3	2,7/0,5
Отпуск (360 °С, 3 мин)	373	26,8	10,6	5,4
Старение (140 °С, 7 ч)	251	8,1	3,5	1,1
Исходное состояние	453	5,5	3,6	0,5

Примечание. В числителе приведены результаты испытания после нагрева и охлаждения в воде, моделирующие условия сварки электронным лучом, в знаменателе — после нагрева и охлаждения на воздухе, режимы которых моделируют условия нагрева при дуговой сварке.



Четыре типа фаз связаны с условиями температуры (отпуска) и скоростью охлаждения при закалке и отжиге. В данном случае появляется сложная комплексная темная с белой оторочкой фаза, которая образуется при охлаждении металла с высокой скоростью или в условиях кратковременного (3 мин) нагрева (см. табл. 2). Пять типов фаз связаны с появлением дополнительной комплексной фазы серого цвета с черной оторочкой. Возможно, они имеют эвтектический состав, поскольку в условиях внецентренного растяжения образца проявили себя как очаги хрупкого разрушения.

Результаты механических испытаний на внецентренное растяжение образцов сплава В96 в различных термических состояниях показали (табл. 3), что увеличение объемной доли фаз при нагреве и неблагоприятная форма их выделений вдоль границ зерен приводит к облегчению зарождения и распространению трещины, что снижает способность сплава к локальной пластической деформации.

Наибольшее влияние на уровень энергии распространения трещины (УРРТ) оказывает скорость охлаждения металла, значение которой в состоянии перегрева соответствует $4,3 \text{ Дж/см}^2$. При быстром охлаждении (в воде) после закалки этот показатель составляет $2,2 \dots 2,7 \text{ Дж/см}^2$. Наименьшие его значения ($0,5 \text{ Дж/см}^2$) соответствуют основному металлу в исходном состоянии и образцу после охлаждения на воздухе, моделирующему условия сварки неплавящимся электродом. Максимальные значения УРРТ ($5,4 \text{ Дж/см}^2$) отмечают в структуре сплава после нагрева до температуры отпуска ($360 \text{ }^\circ\text{C}$). На участке металла ЗТВ, где при сварочном нагреве происходит старение, показатель составляет $1,1 \text{ Дж/см}^2$. Значение критического коэффициента интенсивности напряжения K_c также определяется скоростью охлаждения металла, особенно после нагрева до температуры отжига. В этом случае величина K_c уменьшается в 3 раза.

Изменения структуры, происходящие при искусственном старении сплава В96, приводят к снижению не только значений номинального разрушающего напряжения в 1,5 раза, но и других показателей вязкости разрушения ($K_c = 8,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $J_c = 3,5 \text{ Дж/см}^2$, УРРТ = $1,1 \text{ Дж/см}^2$).

Таким образом, полученные результаты исследований дают представление о структурных изменениях, протекающих в сплаве В96, в процессе технологического нагрева и их влиянии на способ-

ность сварных соединений сплава сопротивляться зарождению и распространению трещин при разрушении. Тот факт, что наблюдаемые явления протекают в пределах определенных теплофизических условий, показывает необходимость их учета при разработке технологии соединения.

Выводы

1. Установлены закономерности образования структурной неоднородности в металле ЗТВ сплава В96 при различных теплофизических условиях сварки плавлением. Показано, что при сварочном нагреве сформировавшаяся структура сварных соединений определяет физико-механические свойства в зависимости от способа и режима сварки. Степень изменения свойств зависит от объемной доли фаз и включений, связанных с исходным состоянием сплава и способом сварки.

2. Проведена количественная и качественная оценка фаз, выделяющихся в околошовной зоне сплава В96 под воздействием термического цикла сварки. Определено влияние объемной доли фаз на процессы зарождения и распространения трещины при разрушении.

3. Исследованы условия нагрева и охлаждения, при которых формируется однородная структура с минимальным объемом хрупких выделений межзеренных прослоек, обеспечивающих высокие значения характеристик сопротивления металла зарождению и распространению трещин при разрушении сварного соединения сплава В96.

1. Давыдов В. Г. Металловедческие и технологические исследования алюминиево-литиевых сплавов на современном этапе // Технология легких сплавов. — 1997. — № 5. — С. 15–25.
2. Фудзивара Т. Технологии соединения легких металлов в авиационной и космической технике // Кэйкиндзоку эсэцу. — 2001. — 39, № 3. — С. 1–11.
3. Kiyoto S. Materials and joining technologies for rocket structures // J. the Japan Welding Soc. — 1993. — 62, № 8. — Р. 46–52.
4. Ищенко А. Я., Склабинская И. Е. Особенности превращений в зоне термического влияния при сварке некоторых высокопрочных алюминиевых сплавов // Автомат. сварка. — 1979. — № 5. — С. 26–29.
5. Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
6. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: Справочник / Под ред. В. А. Ливанова. — М.: Металлургия, 1974. — 432 с.
7. Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение): Справочник / Под ред. Х. Нильсена, В. Хуфнагеля, Г. Ганулиса: Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1979. — 680 с.
8. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1979. — 639 с.

The character of structural transformations occurring in aluminium alloy В96 during welding heating was studied by scanning electron microscopy. The composition of phases and their morphological peculiarities were estimated quantitatively and qualitatively, depending upon the thermal-physical conditions of tungsten electrode and electron beam welding. Effect of the volume content of phases on the processes of initiation and propagation of cracks under conditions of off-centre fracture of samples of welded joints was evaluated.

Поступила в редакцию 06.07.2005