



ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВА АМц НА ИХ ПАЯЕМОСТЬ

А. А. БОНДАРЕВ, д-р техн. наук, А. В. ЛОЗОВСКАЯ, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Г. М. ШЕЛЕНКОВ, канд. техн. наук (ОАО «СМПО им. М. В. Фрунзе», г. Сумы)

Исследованы химический состав и структура материалов, применяемых для изготовления паяных теплообменников из сплава АМц. Показано, что причиной дефектов в изделиях может быть использование некачественных прессованных заготовок, содержащих оксидные пленки и раковины литого металла. Последние располагаются в приповерхностных слоях слитка и при технологическом его переделе трансформируются в протяженные оксидные несплошности.

Ключевые слова: пайка, алюминиевый сплав АМц, плакированная припойная лента, прессованная полоса, химический состав, структура, оксидная пленка, несплошность, смачиваемость и растекаемость припоя

Сварка и пайка остаются основными способами получения неразъемных соединений конструкций из алюминиевых сплавов. Главной проблемой при этом является наличие на поверхности полуфабрикатов прессованной полосы оксида Al_2O_3 или гидроксида металла переменного состава ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$) [1].

В настоящее время разработаны мероприятия и созданы соответствующие технологические инструкции подготовки материалов под сварку и пайку, которые включают механическую обработку, травление, пассивацию поверхности. Эти этапы обработки направлены на удаление оксидных пленок с поверхности полуфабриката прессованной полосы и торможение их роста.

К важным факторам, определяющим состояние сварного или паяного соединения, следует также отнести качество основного соединяемого материала, припоя, сварочной проволоки, а также условия и способы пайки, сварки. Созданы государственные стандарты на алюминий и алюминиевые сплавы, предназначенные для изготовления полуфабрикатов различного назначения.

Разработаны процессы и оборудование для пайки алюминиевых сплавов с использованием флюсов [2, 3].

Применение более дорогого способа бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов в вакууме значительно повысило качество изделий и улучшило условия работы операторов в плане экологии [4].

Разработаны специальные плакированные силумином ленты, которые используют при изготовлении паяных соединений из сплава АМц.

Для изготовления алюминиевых теплообменников используют заготовки из прессованной полосы толщиной 4...6 мм и плакированную с двух сторон силуминовым припоем ленту толщиной 1 мм из сплава АМц. Брак паяных изделий может быть вызван различными факторами, в том числе несоответствием применяемых материалов требованиям государственных стандартов, нарушением технологического процесса подготовки материалов под пайку или технологии пайки.

Целью настоящей работы являлось исследование качества используемых материалов и установление возможной причины брака при изготовлении паяных теплообменников из сплава АМц.

Материалом для исследования служили полуфабрикаты прессованных полос сплава АМц различных партий изготовления на ОАО «Сумское машиностроительное научно-производственное объединение им. М. В. Фрунзе», отдельные образцы прессованных полос, изготовленных на ОАО «Бело-Калитвинское металлургическое объединение», а также образцы литого гомогенизированного металла, паяные соединения, плакированные ленты. В работе использовали металлографический,

Таблица 1. Химический состав (мас. %) металла полуфабрикатов различных партий из сплава АМц

Полу-фабрикат*	Mn**	Mg	Cu	Fe	Si	Zn	Ni	Ti	Ga	Na	K	Li***
1	1,30...1,45	0,100...0,014	0,010...0,017	0,11...0,45	0,14...0,43	0,012...0,030	0,005...0,008	0,01...0,04	<0,010	<0,020	<0,020	<0,030
2	1,35	0,013	0,010	0,42	0,15	0,020	0,008	0,05	—	—	—	—

*Здесь и в табл. 2 1 — полуфабрикат прессованной полосы, изготовленный на ОАО «Сумское машиностроительное научно-производственное объединение им. М. В. Фрунзе»; 2 — то же производства ОАО «Бело-Калитвинское металлургическое объединение».
**Предельное содержание основного легирующего элемента в восьми партиях полуфабрикатов.
***Содержание щелочных элементов в трех партиях заготовок различного изготовления.



Таблица 2. Химический состав (мас. %) металла плакирующего покрытия на лентах из сплава АМц двух партий изготовления

Полуфабрикат	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Ni	Na	Ca
1	5,07...8,90	0,183...0,208	—	0,342...0,388	0,028...0,037	0,041	0,207...0,264	—
2	13,70...23,70	0,119...0,138	0...0,055	0,160...0,531	—	0,315...0,484	0,228...0,258	0...0,264

химический, микрорентгеноспектральный и спектральный методы анализа.

Результаты исследований. Исследования химического состава методом спектрального анализа образцов различных партий из сплава АМц, который служил шихтовым материалом для изготовления слитков, показали, что они имеют состав металла, отвечающий требованиям ГОСТ 4784–97 по основным легирующим элементам и примесям (табл. 1). Методом химического атомно-адсорб-

ционного анализа в эмиссионном режиме установлено наличие примесей щелочных элементов. Различия между отдельными партиями прессованных полос выявлено не было.

В связи с малой толщиной плакировки состав припой определяли методом микрорентгеноструктурного анализа с диаметром облучения зондом 1,5...2,0 мкм. При этом проводили несколько измерений и фиксировали максимальную, минимальную, а также среднюю массовые доли легирующих элементов. Согласно полученным данным, химический состав плакирующего покрытия соответствует техническим нормативам (табл. 2).

Исследования содержания водорода в основном металле сплава АМц и плакированных лентах раз-

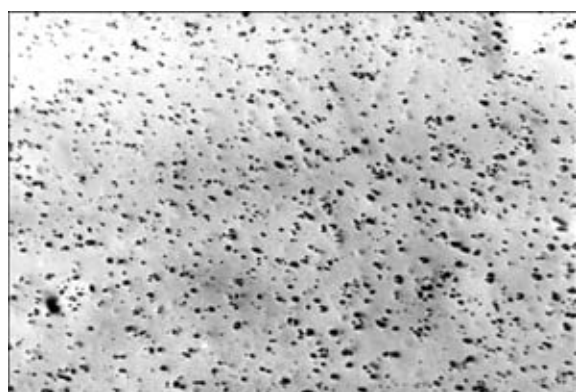


Рис. 1. Типичная микроструктура (X400) металла прессованной полосы сплава АМц

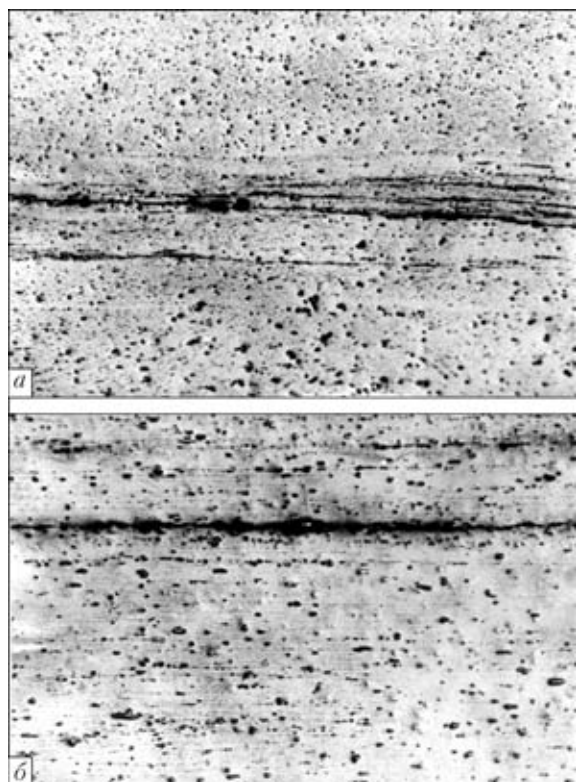
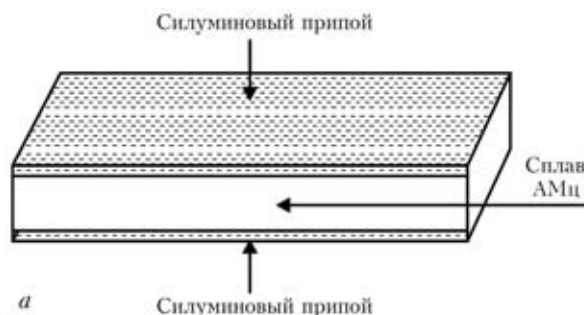


Рис. 2. Микроструктура (X400) металла прессованной полосы из сплава АМц с протяженными неметаллическими включениями оксидных пленок различного вида (а) и микронесплошностями (б)

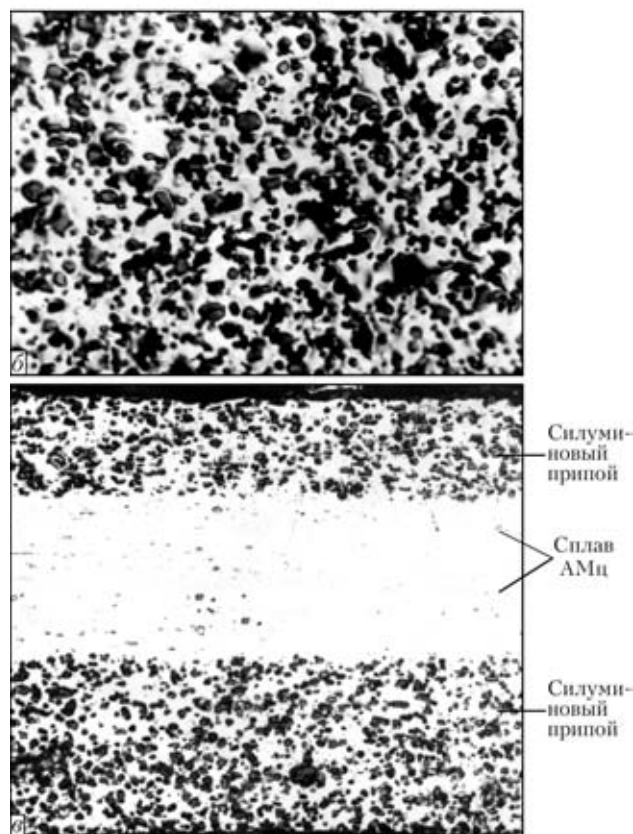


Рис. 3. Схема внешнего вида плакированной ленты (а) и микроструктура (X500) в плоскости (б) и сечении (а)

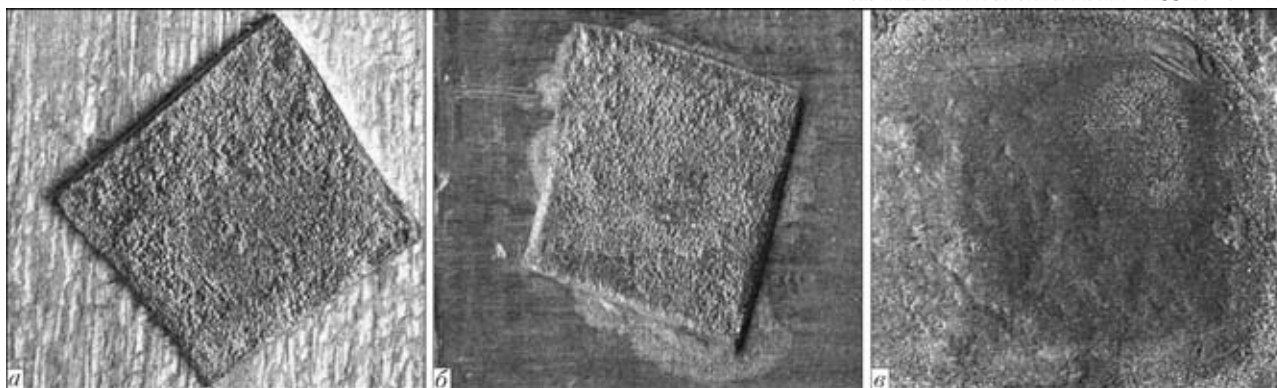


Рис. 4. Внешний вид соединений из сплава АМц с различной степенью смачивания после нагрева электронным лучом прессованной полосы с плакированной лентой: *а* — смачивание отсутствует; *б* — частичное смачивание; *в* — полное растекание

личных партий изготовления с использованием газоанализатора фирмы «LECO» существенной разницы не выявили.

Структура паяемых полуфабрикатов. При исследовании микроструктуры металла большого количества образцов прессованных полос различных партий установлены некоторые отклонения от нормы. Типичная микроструктура металла заготовки из сплава АМц (рис. 1) представляет собой твердый раствор легирующих элементов в алюминии и выделения дисперсных алюминиево-марганцевых фаз. В некоторых образцах формировались участки металла с различной дисперсностью включений, имело место также наличие ленточных выделений неметаллических включений, оксидных пленок и несплошностей (рис. 2).

Поверхность металла плакирующего слоя имеет типичную структуру эвтектического силумина. На рис. 3 представлен внешний вид плакированной силумином ленты и микроструктура силуминового припоя в плоскости и поперечном сечении ленты из сплава АМц различного производства. Представленные микроснимки свидетельствуют о возможном изменении толщины плакирующего слоя на различных участках ленты.

Согласно полученным данным, толщина плакирующего слоя ленты более ранних годов производства изменяется от 50 до 150 мкм, на отдельных участках она составляет 170 мкм. В образцах современного производства толщина плакирующего слоя колеблется от 80 до 150 мкм. При сравнительном исследовании микроструктуры металла плакирующего слоя лент различного времени изготовления при больших (до 500 мкм и более) увеличениях видно, что они практически не отличаются по характеру распределения кремниевых включений и их дисперсности.

Паяемость и структура полученных соединений. Образцы плакированной ленты размером 5×5 мм располагали на поверхности заготовок основного металла размером 20×20 мм различных партий изготовления, исследованных ранее. Для удаления оксидных пленок поверхность основного металла предварительно обрабатывали механическим способом. Пайку осуществляли при радиационном нагреве, для чего образцы помещали в трубчатый контейнер, который нагревался электронным лучом. Глубина вакуума в камере сос-

тавляла не менее $2 \cdot 10^{-2}$ Па, температура нагрева — не менее 600 °С. Качество пайки оценивали по внешнему виду соединений (рис. 4) и с помощью известных методик, где за критерий качества принимается соотношение площади растекания припоя после пайки к площади, которую он занимал перед нагревом, а также по результатам металлографических исследований микрошлифов поперечного сечения образцов.

Получены соединения сплава АМц, у которых площадь растекания припоя составляла 100 %. На других образцах смачивание основного металла произошло, но растекаемость припоя не наблюдалась (см. рис. 4). Имелись образцы, где пайка вообще не произошла, несмотря даже на завышение температуры до частичного оплавления основного металла. В этом случае плакированная лента легко

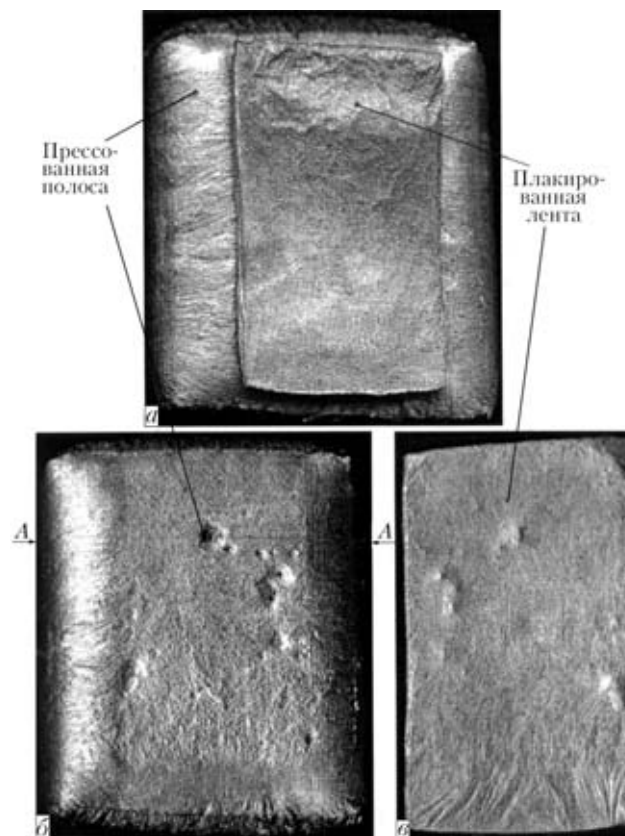


Рис. 5. Внешний вид соединения сплава АМц (*а*) и дефектов на внутренних поверхностях прессованной полосы (*б*) и плакированной ленты (*в*) при нагреве электронным лучом в вакууме

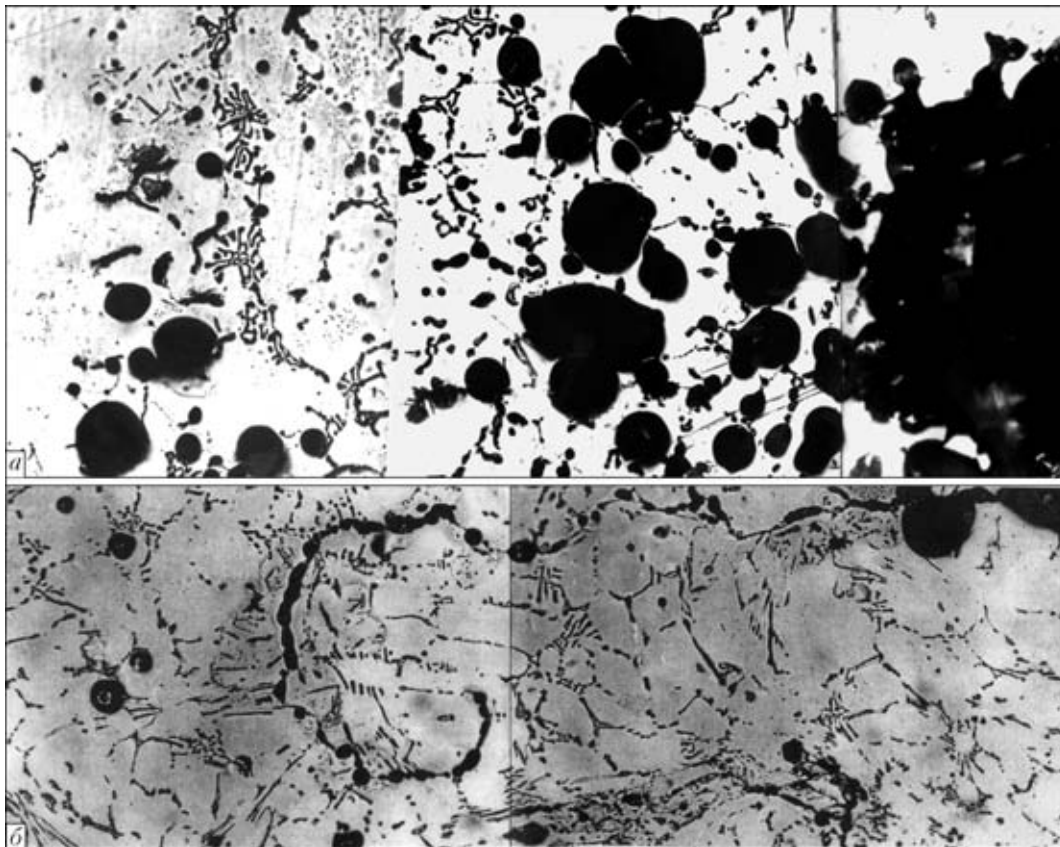


Рис. 6. Микропоры (а) и оксидные пленки (б) в металле прессованной полосы при некачественной пайке (см. рис. 5, сечение по А-А) (X125)

отделяется от основного металла, а на внутренней его поверхности выявлено значительное количество дефектов в виде раковин и микропор (рис. 5).

Анализ микроструктуры металла (поперечного сечения А-А, см. рис. 5) прессованной полосы свидетельствует, что в подплавленном основном металле с образованием кремниво-марганцовистых эвтектик наблюдаются несплошности, поры и раковины (рис. 6, а). Возможно наличие оксидных пленок (рис. 6, б). В отличие от оксидных пленок, ориентированных в направлении течения металла при прессовании, в подплавленном ме-

талле они имеют произвольную форму (рис. 6, б). В обоих случаях на поверхности пленок скапливается большое количество пор, которые образуют непрерывные цепочки, переходящие в несплошности.

На основании полученных результатов можно заключить, что качественная пайка образцов не осуществилась из-за значительного количества дефектов типа оксидных пленок в основном металле.

На рис. 7 представлена структура металла качественного паяного соединения, в котором имеют место хорошее смачивание основного металла, фор-

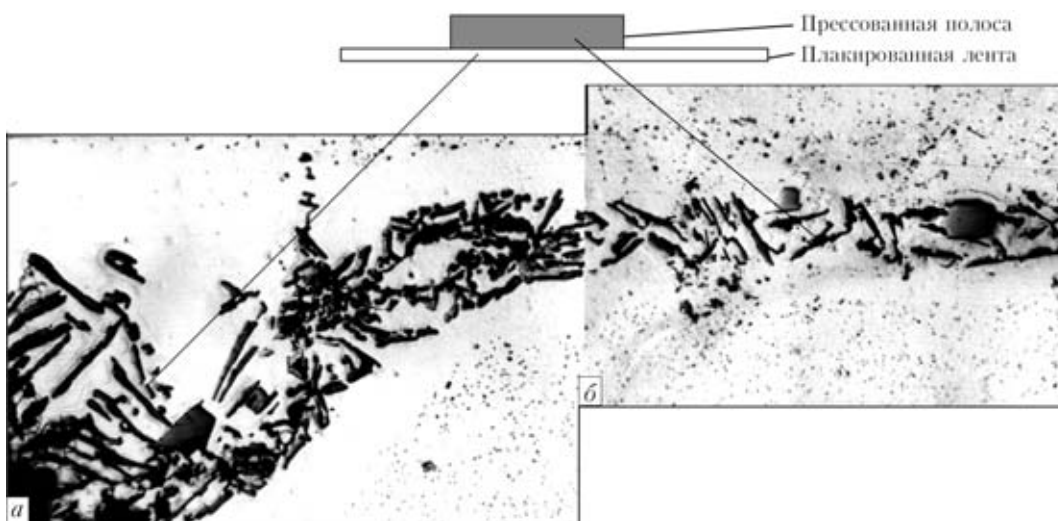


Рис. 7. Микроструктура (X250) металла качественного соединения плакированной ленты с прессованной полосой из сплава АМц, полученного при вакуумной пайке: а — галтель; б — середина соединения

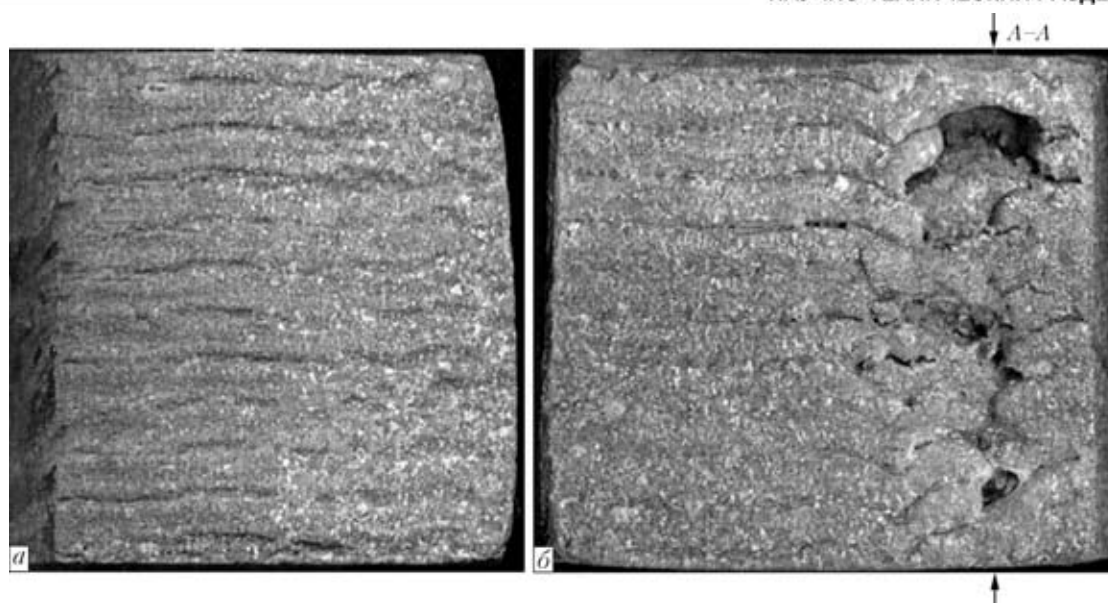


Рис. 8. Внешний вид качественной (а) и дефектной (б) поверхности слитка сплава АМц диаметром 200 мм

мирование галтели и отсутствие дефектов. Если основной металл высокого качества, то проблем с формированием соединения не бывает.

Причины попадания оксидных пленок в зону пайки могут быть разные: загрязнение металла оксидными пленками на этапе получения литой заготовки; образование их в процессе технологического передела слитка на полуфабрикат.

Различная дисперсность и структурная неоднородность металла заготовок под пайку также могут быть обусловлены как первичной структурой основного металла, так и результатом термомеханической обработки полуфабриката.

В связи с этим проведен металлографический анализ, включающий исследования макро- и микроструктуры, фазового состава, литого и гомогенизированного слитка сплава АМц. Исследования проводили на образцах, взятых из отдельных участков слитка диаметром 200 мм в литом состоянии и после гомогенизации в двух пространственных по отношению к слитку положениях — поперечном и вертикальном.

Визуально установлено, что поверхность слитка слоистая, что обусловлено особенностями его изготовления. В отдельных ее участках наблюдаются дефекты в виде грубых раковин и отдельных нитевидных расслоений (рис. 8). Определена глубина расположения дефектов. С этой целью в зонах их нахождения сделан соответствующий разрез по сечению А-А (см. рис. 8). После механической обработки и травления в растворе едкой щелочи выявлены характер и глубина их расположения (рис. 9). Чтобы исключить возможность увеличения размеров дефектов в процессе химического травления, поверхность шлифа электрополировали. Установлено, что дефекты представляют собой различной формы несплошности. От раковин в глубь металла ответвляются волосовидные расслоения, образуя в приповерхностном слое слитка сетку. При более глубоком микроструктурном анализе в этих участках наблюдается формирование зерен различных размеров и ориентации, скопле-

ние избыточных фаз и пор. Все это дает основания считать, что они образуются в процессе кристаллизации слитка и сосредотачиваются на оксидных пленках. Их форма изменяется в широких пределах — от волосовидной, соизмеримой с границей зерна, до раковин значительных размеров (рис. 10). Это связано с расположением пленки в плоскости сечения шлифа и с тем, что на ее поверхности уже в жидком металле скапливается большое количество газов, неметаллических включений и основных фаз. Глубина залегания оксидных пленок от поверхности слитка не превышает 10 мм (см. рис. 9). В процессе прессования приповерхностные слои металла слитка могут попадать в среднюю часть полос, тогда дефекты рассредоточиваются, ориентируясь вдоль течения металла в направлении его деформации. Дефекты приобретают вид протяженных более тонких несплошностей, которые имеют место в полуфабрикатах, предназначенных для пайки.

На периферии слитка формируется небольшая по размеру зона мелких кристаллов, а в основном объеме слитка образуются крупные кристаллы разной формы и ориентации. Следует отметить наличие зон со столбчатыми направленными кристаллами. Микроструктура в состоянии после гомогенизации более однородная и характеризуется

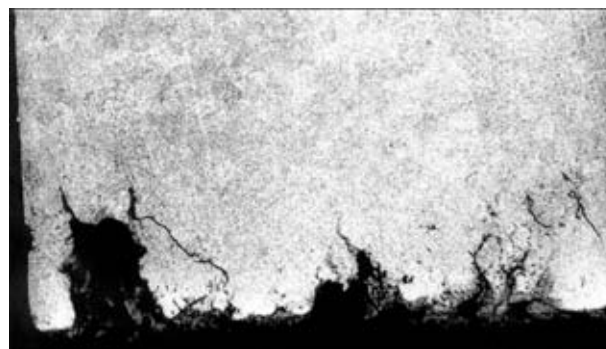


Рис. 9. Формирование дефектов в слитке сплава АМц, сечение по А-А (см. рис. 8) (X3)



Рис. 10. Микроструктура ($\times 200$) слитка сплава АМц с оксидными пленками и несплошностями (расстояние от поверхности слитка составляет приблизительно 10 мм)

равноосными кристаллами, а также отдельными зонами со столбчатым строением.

Литой металл представляет собой твердый раствор марганца в алюминии и выделения эвтектики, которая имеет вырожденную форму с формированием фазы $MnAl_{16}$ в виде пластинок, иголок и каркасов. При гомогенизации слитков каркасы разрушаются и образуются отдельные выделения алюминиево-марганцевой фазы. В основном они располагаются на границах зерен (рис. 11).

В результате исследований химической неоднородности сплава АМц установлено, что твердый раствор на основе алюминия содержит до 0,9 мас. % марганца, небольшую долю кремния (до 0,33 мас. %) и железа (около 0,1 мас. %). Выделения эвтектики обогащены марганцем (до 6,7 мас. %), кремнием (до 2,3 мас. %) и железом (до 4,1 мас. %). В процессе гомогенизации массовая доля марганца в твердом растворе составляет 1,1 %, кремния 0,4 %, железа 0,06 %. Фазовые выделения обогащены марганцем и железом, и в меньшей степени кремнием.

Composition and structure of materials applied in manufacture of heat exchangers of AMTs alloy was studied. It is shown that the defects in welds can be caused by use of low quality extruded billets. The defects initiate from oxide films and blowholes of cast metal, which are located in the sub-surface layers of the ingot and transform into extended oxide films and discontinuities during the ingot processing.

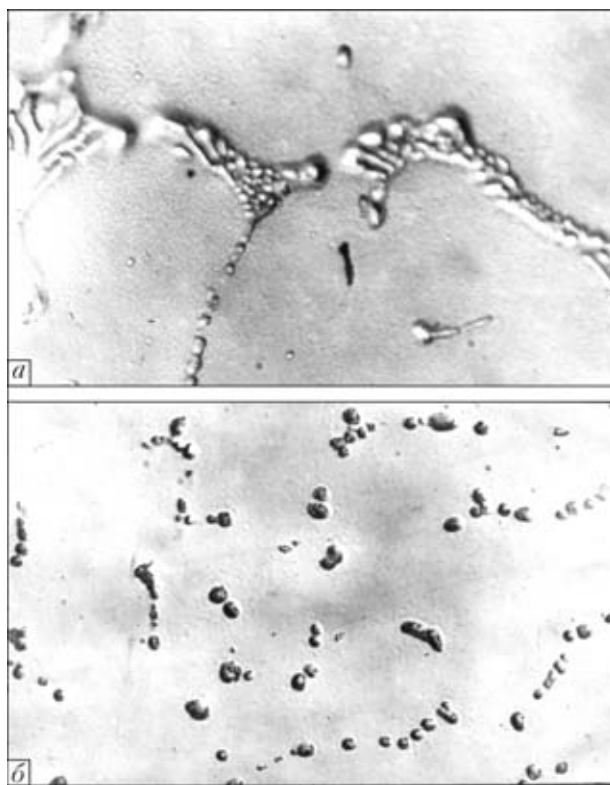


Рис. 11. Микроструктура ($\times 1000$) металла литого (а) и гомогенизированного (б) слитков сплава АМц диаметром 200 мм

Сравнительный анализ структуры и химической неоднородности металла в литом и гомогенизированном состояниях исключает влияние термообработки на паяемость заготовок из сплава АМц.

Таким образом, на смачиваемость и растекаемость припоя по сплаву АМц влияют дефекты внутреннего характера, которые могут иметь место в полуфабрикатах. Источником дефектов в полуфабрикатах из сплава АМц являются оксидные пленки и раковины литой заготовки, трансформирующиеся в процессе технологического передела слитка в протяженные тонкие несплошности и скопления неметаллических включений.

1. Рабкин Д. М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов*. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
2. Манко Г. Г. *Пайка и припой*. — М.: Машиностроение, 1968. — 322 с.
3. Никиткин А. М. *Пайка алюминия и его сплавов*. — М.: Машиностроение, 1983. — 192 с.
4. Смирнов Г. Н. *Прогрессивные способы пайки алюминия*. — М.: Metallurgy, 1981. — 240 с.

Поступила в редакцию 27.04.2004