



# УЛУЧШЕНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ВЗРЫВОМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ\*

Л. И. МАРКАШОВА, д-р техн. наук, Л. Д. ДОБРУШИН, В. В. АРСЕНЮК, кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

Рассматриваются особенности пластической деформации и процесс упрочнения в зоне соединений технически чистого алюминия АД1 и отожженного алюминиевого сплава 1201АМ с высокопрочным алюминиевым сплавом типа 1201АТ, выполненных сваркой взрывом. Для повышения ресурса пластичности деформируемых слоев и улучшения свариваемости при плакировании высокопрочного алюминия сваркой взрывом предложено выполнять пластификацию свариваемых поверхностей путем их предварительной химической очистки от упрочняющих фаз.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, алюминиевые сплавы, свариваемость, пластическая деформация, упрочняющие фазы, полосы сдвига, химическая очистка

Одним из определяющих условий получения равнопрочного соединения металлов и сплавов при их плакировании сваркой взрывом является возможность реализации в зоне соударения достаточно интенсивной пластической деформации контактных поверхностей [1–5]. Отличительной особенностью высокопрочных алюминиевых сплавов типа 1201 является их склонность к твердофазному деформационному упрочнению, в несколько раз превосходящему эффект других форм упрочнения (субструктурное, трения решетки и т. п.) [6–8]. Фазовые выделения в этих сплавах выступают в роли стопоров, препятствующих движению дефектов кристаллической решетки в системах скольжения в процессе деформирования, что обуславливает уменьшение объема металла, способного участвовать в пластической деформации [9]. Соответственно ухудшаются пластические свойства металла в зоне сварки, а значит и свариваемость.

Применительно к сварке взрывом под понятием улучшение свариваемости понимали возможность повышения и/или обеспечения заданных прочностных свойств соединений при использовании минимальных режимов соударения. Из опыта использования сварки взрывом известно, что высокопрочные алюминиевые сплавы типа 1201 относятся к трудносвариваемым. Сварка взрывом алюминия технической чистоты с такими сплавами особых трудностей не вызывает, что, очевидно, обусловлено повышенными пластическими свойствами алюминия, который в определенной степени компенсирует низкую пластичность высокопрочного алюминиевого сплава. Поэтому сплавы данного типа обычно плакируют через тонкие пластичные прослойки из технического алюминия.

Целью настоящей статьи явилось исследование физико-химических процессов в зоне контакта при

сварке взрывом и выяснение действительных причин, приводящих к ухудшению свариваемости при плакировании высокопрочных алюминиевых сплавов типа 1201 для последующей корректировки технологического процесса, обеспечивающей улучшение их свариваемости и получение качественных соединений.

**Материалы и методы исследования.** В проведенных экспериментах сваривали взрывом метаемые (плакирующие) пластины из технического чистого алюминия типа АД1 и отожженного алюминиевого сплава типа 1201АМ с основными пластинами из упрочненного алюминиевого сплава типа 1201АТ, в котором главной упрочняющей фазой является  $\text{CuAl}_2$  (содержание меди  $\approx 7\%$ ). Усредненные показатели пределов прочности указанных материалов соответственно составляли: 73, 200 и 420 МПа. До сварки по технологическим соображениям алюминиевую плакировку на пластинах из обоих сплавов удаляли механической обработкой и химическим травлением (обозначения сплавов в тексте статьи при этом сохранены в их оригинальном виде).

Сварку взрывом осуществляли по угловой схеме с использованием высокоскоростного тонколистового взрывчатого вещества, имеющего плотность  $1,56 \text{ г/см}^3$  и скорость детонации примерно  $7600 \text{ м/с}$ . Размеры свариваемых пластин в плане и начальный установочный угол между ними во всех экспериментах составляли соответственно  $100 \times 50 \text{ мм}$  и  $10^\circ$ . Контролируемые параметры режима сварки взрывом соединения АД1 + 1201АТ следующие: толщина метаемой и основной пластин —  $3,0 \text{ мм}$ ; скорость соударения при сварке —  $690 \text{ м/с}$ ; скорость процесса сварки —  $2740 \text{ м/с}$ . Минимальные параметры режима сварки взрывом и прочность полученных соединений 1201АМ + 1201АТ при различных способах предварительной обработки поверхностей под сварку следующие: толщина метаемой и основной пластин —  $3,72 \text{ мм}$ ; скорость соударения —  $560 \text{ м/с}$ ; скорость процесса сварки —  $2260 \text{ м/с}$ ; прочность соединения без обработки —  $20 \dots 50 \text{ МПа}$ ; прочность соединения после химической обработки —

\* Авторы благодарят канд. техн. наук М. И. Зотова за участие в проведении экспериментов и обсуждении результатов.

190...200 МПа; прочность соединения после электрохимической обработки — 50...60 МПа.

Для оценки глубины зоны интенсивной пластической деформации  $R$  (области максимального термомеханического воздействия сварки) использовали методику специального травления дуговым разрядом в вакуумной установке ионного травления (JEE-4C, Япония), что позволило оценить глубину пластической деформации по изменению плотности дислокаций, выявляемых ямками травления. Содержание упрочняющей фазы оценивали микроанализатором «Камека» по изменению концентрации меди в контактной зоне шириной  $2R$ .

Характер пластической деформации и влияние упрочняющих фазовых выделений на пластичность металла в области сварки исследовали методами оптической микроскопии, аналитической растровой электронной микроскопии (микроскоп SEM-515, фирма «Филипс», Голландия) и просвечивающей микродифракционной электронной микроскопии на установке JEM-200CX (фирма «Джеол», Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ.

#### Эксперименты и обсуждение результатов.

Для более детального изучения причин понижения пластичности и изыскания способов ее повышения вначале были проведены специальные исследования зоны контакта соединения АД1+1201АТ. Структура алюминиевого сплава 1201АТ, размеры и характер распределения упрочняющих фаз показаны на рис. 1, а. Средние размеры упрочняющих фаз в металле составляют  $\approx 6$  мкм. При прямых исследованиях на просвет эта структура в сварном соединении (в области, приближающейся к основному металлу) имеет вид, представленный на рис. 1, б. Можно видеть, что фазовые выделения различны по размерам. Исследование распределения ямок травления на поперечных шлифах сварного соединения показало, что область интенсивной пластической деформации, отличающейся повышенной плотностью структурных дефектов и прежде всего дислокаций и их направленным распределением, распространяется на глубину  $\approx 150...200$  мкм (рис. 2, а). Эта зона достаточно четко просматривается в оптическом микроскопе при небольших увеличениях. Более детальные исследования зоны контакта при исследовании на просвет показали следующие результаты. Установлено, что в приконтактной зоне со стороны сплава 1201АТ (глубина 200 мкм) происходит перераспределение фаз под действием сварочных деформаций. Во-первых, наблюдается «раскатывание» упрочняющих фаз (рис. 2, в), во-вторых, их дробление до размеров, составляющих сотые доли микрометра ( $\approx 0,07...0,01$  мкм, рис. 2 в, г). Особенно активно отмеченное перераспределение фаз наблюдается в весьма локальной зоне контакта глубиной в десятки микрометров (рис. 2 б, в). Процесс перераспределения фаз при этом сопровождается активным массопереносом меди в близлежащих к фазам областях, включая зону контакта соединения АД1+1201АТ. Исследования тонкой структуры в поперечных сечениях зоны контакта на просвет показали, что в приконтактных зонах в технически чистом и упрочненном алюминии

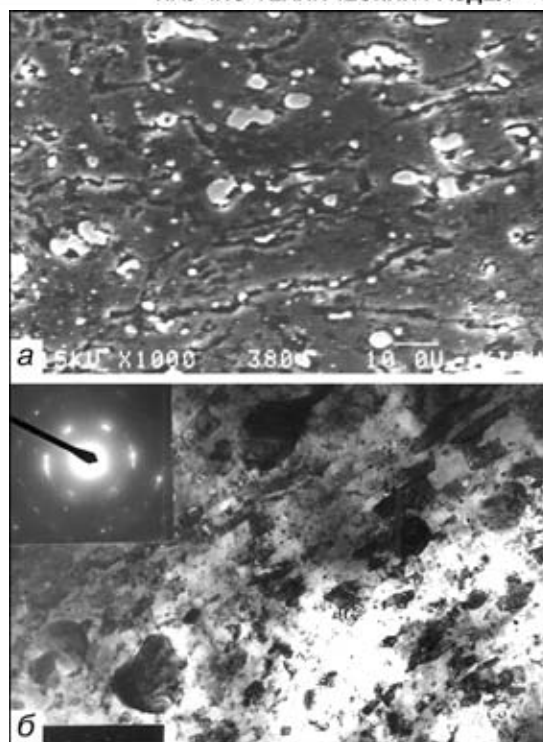


Рис. 1. Структура основного металла (сплав алюминия 1201АТ): а — поверхность с фазовыми выделениями  $\text{CuAl}_2$  (сканирующая электронная микроскопия,  $\times 1000$ ); б — тонкая структура и распределение фазовых выделений (просвечивающая электронная микроскопия,  $\times 15000$ )

пластическая деформация протекает по различным механизмам (рис. 2, б, г, е, ж). Так, в технически чистом алюминии пластическая деформация реализуется по сдвиговому механизму, о чем свидетельствует формирование развитой системы полос сдвига (рис. 2, б, е). В отличие от этого, в зоне сварки упрочненного сплава 1201АТ пластическая деформация реализуется путем дискретного сдвига с резкой переориентацией полос сдвига в зоне столкновения с упрочняющей фазой (рис. 2 б, г, ж). Кроме того, методами микродифракции зафиксированы структурные элементы, свидетельствующие о поворотах (ротациях) различных по размеру микрообластей упрочненного металла, что является крайней формой пластического сброса внутренних напряжений в деформируемом металле. Характер изменения типов структур, формирующихся со стороны каждого из свариваемых металлов по глубине зоны сварки, представлен на рис. 3.

Следовательно, если в зоне контакта в технически чистом алюминии пластическая деформация протекает достаточно интенсивно и практически отсутствуют препятствия для ее активной реализации, то в зоне контакта со стороны упрочненного алюминия картина иная. Дискретность полос сдвига, резкая смена их ориентации (рис. 2 г, ж) и значительное повышение плотности дислокаций в местах столкновения полос сдвига с упрочняющей фазой (рис. 2, з) свидетельствуют не только о заторможенности течения, но и о значительном локальном упрочнении алюминиевого сплава 1201АТ в зоне сварки (на глубине  $\approx 150...200$  мкм от поверхности контакта). По-видимому, значи-

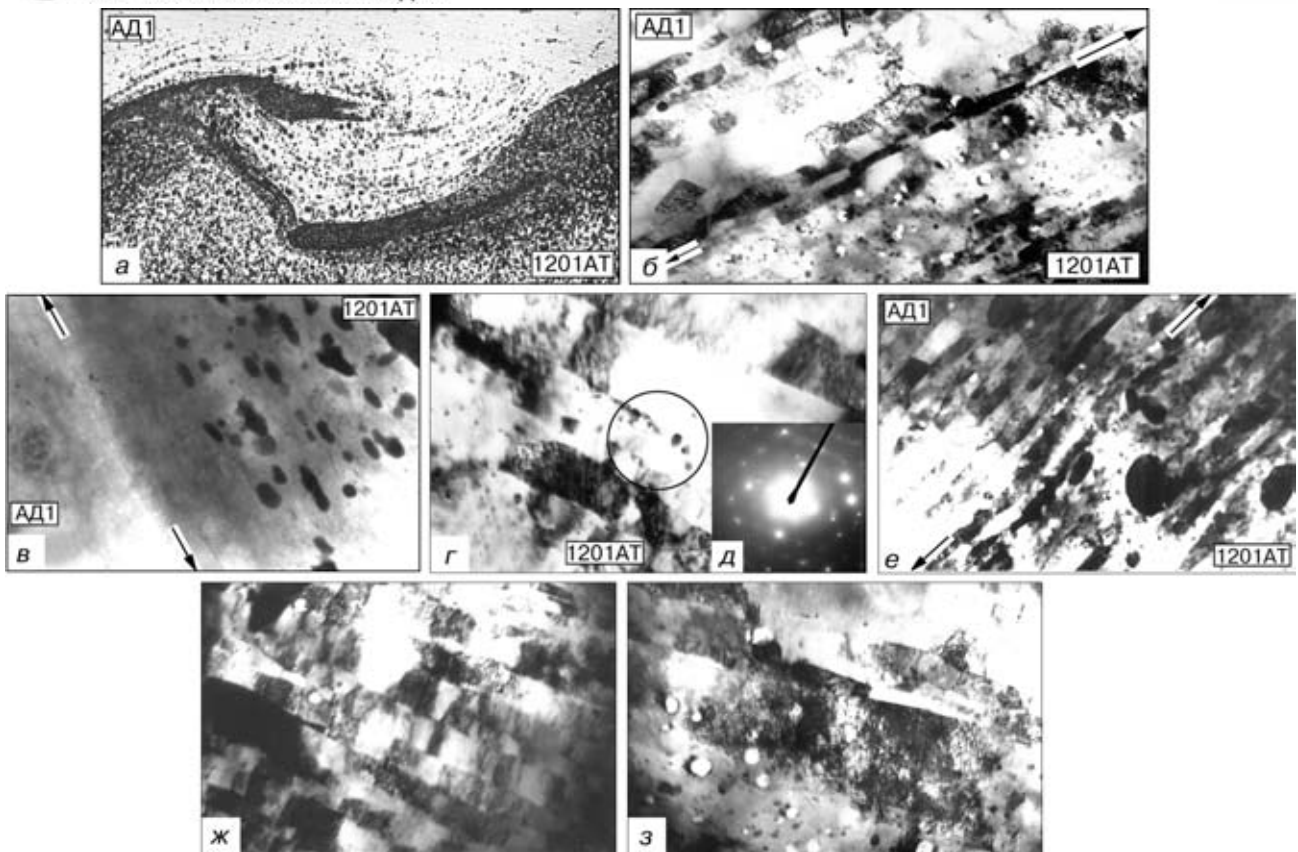


Рис. 2. Зона контакта соединения АД1+1201АТ и изменение морфологии упрочняющих фазовых выделений в сплаве 1201АТ в области сварки (стрелками показано направление контактной границы соединения): *a* — общий вид границы сварного соединения,  $\times 100$ ; *b* — тонкая структура зоны контакта АД1+1201АТ с изображением протяженных полос сдвига (АД1) и переориентации полос в местах расположения упрочняющих фаз (1201АТ),  $\times 10000$ ; *c* — вид упрочняющих фазовых выделений в зоне контакта со стороны сплава 1201АТ,  $\times 15000$ ; *d* — дифракция полос переориентации; *e*, *z* — переориентация полос в сплаве 1201АТ в зоне столкновения с различными по размеру фазами ( $\times 15000$ ) (на рис. 2, *z* кружком выделен участок с мелкодисперсными фазами); *ж*, *з* — локальное повышение плотности дислокаций в зоне переориентации полос сдвига со стороны сплава 1201АТ,  $\times 30000$

тельное упрочнение металла в зоне контакта связано не только с фазовыми выделениями и с резким повышением плотности дислокаций, но и с повышением концентрации меди, способствующей увеличению твердорастворной компоненты упрочнения металла. Кроме того, ухудшению свариваемости и часто наблюдаемому на практике расслоению таких соединений при сварке взрывом, по-видимому, может способствовать также наличие в зоне контакта весьма протяженных «раскатанных» фаз (рис. 2, *e*), которые локализируются на

глубине  $\approx 3 \dots 5$  мкм от поверхности контакта. Учитывая столь неблагоприятное влияние фазовых выделений (частично перераспределившихся, но остающихся достаточно существенными по размеру) на пластичность в области сварки, представлял интерес поиск способов очистки контактных поверхностей от фаз. Причем очистка должна быть на вполне определенную глубину, связанную с глубиной пластической деформации при сварке взрывом (в данном случае  $150 \dots 200$  мкм). С этой целью были использованы два способа предварительной обработки поверхностей для очистки: электрохимическое и химическое травление. Выбор данных способов был обоснован тем, что они позволяют селективно удалять фазовые выделения [10]. Кроме того, растворение избыточных фаз (и соответственно ослабление межзеренных и межфазных границ в результате селективной обработки) будет способствовать поворотам (ротации) микрообъемов деформируемого металла в процессе сварки. Последнее обстоятельство должно благоприятствовать улучшению свариваемости, поскольку к обычным механизмам пластической деформации (дислокационным, сдвиговым) становится возможным подключение дополнительного — ротационного. Расширение спектра механизмов, по которым может реализовываться пластическая деформация, особенно важно для таких жестких условий деформирования, какие возникают при сварке взрывом.

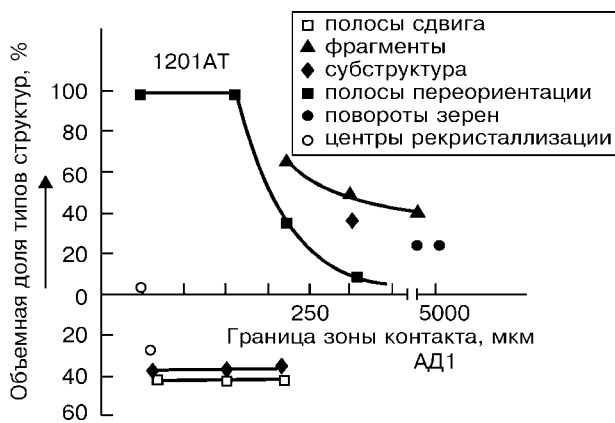


Рис. 3. Характер изменения структур и их объемной доли по глубине зоны контакта от границы соединения АД1+1201АТ, полученного сваркой взрывом

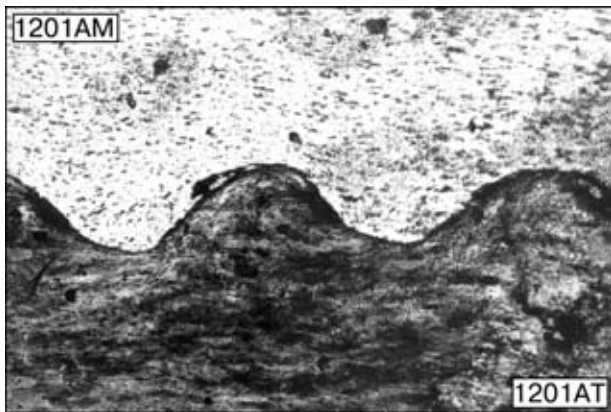


Рис. 4. Типичная микроструктура зоны соединения 1201AM+1201AT, полученного с предварительной химической обработкой поверхности

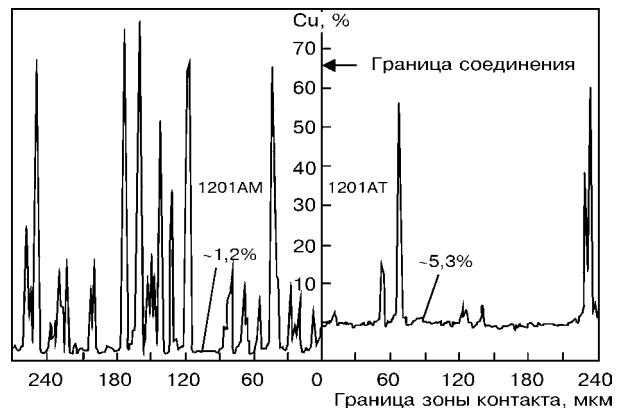


Рис. 5. Распределение концентрации меди в зоне контакта соединения 1201AM+1201AT, полученного с предварительной обработкой поверхности

Изложенные предпосылки были положены в основу поиска возможности минимизации режимов сварки взрывом сплава 1201AM (почти втрое более прочного, чем АД1) с упрочненным сплавом 1201AT за счет специальной предварительной обработки свариваемых поверхностей. Выполнение плакирования более прочным сплавом позволяет соответственно уменьшить необходимую толщину метаемой пластины и, как следствие, импульсное воздействие на конструкцию в месте плакирования, что крайне важно при решении ряда практических задач. По технологическим соображениям предварительной обработке подвергали свариваемую поверхность только метаемой пластины из сплава 1201AM. Электрохимическую обработку (ЭХО) проводили при анодной (0,1 мВ, С.В.Э.), катодной (0,8 мВ, С.В.Э.) поляризации и потенциале коррозии фазы  $\text{CuAl}_2$  (-0,5 мВ, С.В.Э.) в 5%-й соляной кислоте при температуре 20 °С. Время обработки составляло 1 ч. Химическую обработку (ХО) выполняли в 10%-м растворе щелочи при температуре  $80 \pm 5$  °С в течение 20 мин с последующей обработкой в 25%-м растворе азотной кислоты. Оценки глубины растравливания ( $\Delta_k$ ) и содержания упрочняющей фазы  $\text{CuAl}_2$  проводили параллельно с экспериментами по определению влияния способа предварительной обработки и кинематических параметров соударения на прочность получаемых соединений 1201AM+1201AT на отрыв плакирующего слоя. Полученные результаты сопоставляли с аналогичными данными без предварительной обработки.

Для обеспечения идентичности условий соударения утонение метаемых пластин, получаемое в результате предварительной обработки, компенсировали дополнительными накладными пластинами. При этом исследовали влияние суммарной толщины метаемой и накладной пластин на прочность получаемых соединений. Применение последних способствовало обеспечению необходимого времени формирования соединения за счет увеличения времени действия положительных давлений в зоне контакта в процессе соударения пластин. Установлено, что предварительная ХО обуславливает улучшение свариваемости: прочность соединения увеличивается в несколько раз и достигает прочности металла метаемой пластины из сплава

1201AM в отожженном состоянии. Типичная структура зоны соединения представлена на рис. 4. Без предварительной химической обработки метаемых пластин равнопрочную (по отношению к сплаву 1201AM) сварку получить не удалось.

Из анализа распределения меди в зоне соединения (рис. 4) установлено (рис. 5), что в результате ХО ее концентрация уменьшается как со стороны сплава 1201AM, так и со стороны сплава 1201AT (в последнем примерно на 2 %). Точное определение концентрации меди затруднено в связи с ее выравниванием в процессе массопереноса через контактную границу, происходящего при совместном пластическом деформировании свариваемых поверхностей, а также в связи с частичным удалением обработанного слоя в результате эффекта кумуляции при сварке взрывом. ЭХО не обеспечивает необходимую степень растворения фаз, что не способствует ослаблению межкристаллитных связей и не улучшает свариваемость.

Обобщив полученные результаты, можно рекомендовать следующие режимы плакирования взрывом сплава 1201AT и предварительной обработки сплава 1201AM применительно к решению задач, связанных с минимизацией параметров соударения в случае получения соединений 1201AM+1201AT. Так, при использовании тонколистового взрывчатого вещества с упомянутыми выше параметрами толщина метаемой пластины должна примерно вдвое превышать его толщину. При меньшей толщине необходимо использование компенсирующих накладных пластин. В противном случае может произойти расслоение образовавшегося соединения из-за недостаточности времени действия положительных давлений в зоне контакта в процессе соударения пластин. С целью повышения прочности получаемого соединения целесообразно выполнять пластификацию свариваемых поверхностей путем очистки от упрочняющих фаз, в данном случае, химическим травлением поверхности метаемой пластины из сплава 1201AM в 10%-м растворе щелочи с последующей обработкой в 25%-й азотной кислоте.

Представленные разработки были успешно использованы при создании технологий восстановительного ремонта плакированием сваркой взрывом различных повреждений в основном металле тон-



костенных оболочечных металлоконструкций летательных аппаратов, в том числе изготовленных из термоупрочняемых алюминиевых сплавов типа 1201АТ.

### Выводы

1. Пластическая деформация в условиях сварки взрывом локализуется на определенной глубине  $R$  от поверхности раздела свариваемых пластин. Эта глубина преимущественно зависит от толщины метаемой пластины и режимов ее соударения с плакируемым основанием и является контролируемым параметром процесса.

2. В зависимости от типа свариваемых металлов пластическая деформация в зоне сварки взрывом происходит по различным механизмам. В чистых по фазовому состоянию металлах (алюминий типа АД1) она преимущественно осуществляется по сдвиговому механизму за счет мощных полос сдвига. В металлах, содержащих упрочняющие фазы (алюминий типа 1201АТ), она затруднена и осуществляется с участием сдвига и переориентации, которая происходит в зонах столкновения полос сдвига с упрочняющими фазами.

3. Для повышения ресурса пластичности деформируемых слоев и улучшения свариваемости при плакировании алюминиевого сплава 1201АТ

сваркой взрывом рекомендуется выполнять пластификацию свариваемых поверхностей путем устранения хрупких или малопластичных фаз, в данном случае химическим травлением поверхности метаемой пластины из сплава 1201АМ в 10%-м растворе щелочи с последующей обработкой в 25%-й азотной кислоте.

1. *Дерибас А. А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1972. — 188 с.
2. *Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман, А. Д. Чудковский, Б. Д. Цемахович, И. Л. Харина* — М.: Машиностроение, 1978. — 190 с.
3. *Энттейн Г. Н.* Строение металлов, деформированных взрывом. — М.: Металлургия, 1988. — 280 с.
4. *Ольсон Г. Б., Мескол Дж. Ф., Азрин М.* Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов: Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1984. — С. 67–89.
5. *Мурр Л. Е.* Ударные волны и явления высокоскоростной деформации: Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1984. — С. 202–241.
6. *Гордиенко Л. К.* Субструктурное упрочнение металлов и сплавов. — М.: Наука, 1973. — 222 с.
7. *Роль дислокаций в упрочнении металлов / В. С. Иванова и др.* — М.: Наука, 1965. — 179 с.
8. *Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М.* Металлофизика высокопрочных сплавов. — М.: Металлургия, 1986. — 307 с.
9. *Orowan E.* Dislocation in metals. — New York: AIME, 1954. — 103 p.
10. *Акимов Г. В.* Теория и методы исследования коррозии металлов. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945. — 414 с.

Peculiarities of plastic deformation, hardening and plasticisation in the zone of joining commercially pure aluminium AD1 and annealed aluminium alloy 1201AM to high-strength aluminium alloy of the 1201AT type in explosion welding are considered. It is suggested that plasticisation of the mating surfaces should be done by their preliminary cleaning from hardening phases to increase safety factor for ductility of the deformed layers and improve weldability in explosion cladding of high-strength aluminium.

Поступила в редакцию 25.07.2002

## Внимание подписчиков журнала, директоров организаций и фирм, руководителей маркетинговых служб!

**В рекламном разделе журнала  
«Производители товаров и услуг в области сварочного производства»**

бесплатно публикуются сведения о производимых в организациях и фирмах СНГ видах продукции с указанием реквизитов организации (фирмы).

Приглашаем Всех заинтересованных заявить о себе.

Ваши предложения направляйте в адрес редакции.