



ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ С АЛЮМИНИЕМ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ

И. В. ЗЯХОР, инж., академик НАН Украины С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности сварки меди с алюминием при различных разновидностях сварки трением — конвенционной и инерционной. По экспериментальным данным выполнен анализ факторов, влияющих на формирование соединений. Рассмотрены условия, определяющие образование и рост интерметаллидной прослойки в зоне соединения. Разработаны принципы управления процессом сварки, обеспечивающие получение качественных соединений.

Ключевые слова: конвенционная сварка, инерционная сварка трением, технология, разнородные соединения, стадии нагрева и проковки, параметры процесса, давление, скорость вращения, осадка, время нагрева и торможения, оборудование, интерметаллидная прослойка, качество соединения

Необходимость сварки меди с алюминием возникает при изготовлении токоведущих деталей и узлов электрических машин, трансформаторов, шинопроводов энергоёмких агрегатов, сосудов химического машиностроения и других изделий [1].

Одним из эффективных методов получения разнородных соединений, в том числе меди с алюминием, является сварка трением. Такая сварка металлов, значительно отличающихся свойствами, имеет ряд особенностей, которые связаны с неодинаковыми температурой плавления и теплопроводностью, а также различным воздействием теплового режима сварки на характер деформирования соединяемых заготовок. Однако наибольшие трудности возникают вследствие химического взаимодействия соединяемых металлов, которое приводит к образованию хрупкой интерметаллидной прослойки в зоне соединения.

Известно [2–8], что для получения качественного сварного соединения необходимо свести к минимуму толщину интерметаллидной прослойки. Параметры режимов сварки, рекомендуемые различными авторами, существенно отличаются друг от друга. Характерным для обычной (конвенционной) сварки трением является приложение на заключительной стадии процесса значительного давления проковки ($p_{пр} = 120...210$ МПа), которое необходимо для удаления из стыка хрупкого интерметаллидного слоя.

Имеющиеся в литературе данные по сварке меди с алюминием получены при конвенционной сварке трением, для которой характерно быстрое принудительное прекращение вращения. В то же время использование инерционного завершения процесса сварки во многих случаях позволяет оптимизировать термомодеформа-

ционные условия образования соединений, в частности, разнородных сочетаний многих материалов [9–12].

Цель работы состояла в сравнении условий формирования соединений меди с алюминием при различных разновидностях сварки трением: конвенционной и инерционной, а также разработке технологии сварки трением, обеспечивающей высокие механические и эксплуатационные свойства медно-алюминиевых переходников.

В качестве свариваемых материалов использовали медь М1 (ГОСТ 859–78) и технический алюминий АД1 (ГОСТ 4784–74) в виде заготовок диаметром 22 мм. Исследования проводили на установках для конвенционной сварки трением МСТ-2001, СТ-120 и инерционной СТ-100. Привод вращения шпинделя установки СТ-120 осуществляется от двигателя постоянного тока с регулируемой частотой вращения, что позволяло изменять линейную скорость в широких пределах.

Линейная скорость v на периферии свариваемых образцов при выбранных частотах вращения составляла 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 м/с. Давление на стадии нагрева p_n изменялось в пределах 20... 100, а на стадии проковки $p_{пр}$ — 50... 210 МПа. Процесс нагрева заготовок регламентировался по осадке нагрева, которая изменялась в пределах 1,0... 15 мм. Длительность стадии торможения при конвенционной сварке составляла 0,2 с. Технологические параметры инерционной сварки (начальная скорость вращения, момент инерции вращающихся масс) устанавливали такими, чтобы удельная энергия, вводимая в стык, составляла 12,9... 54,0 МДж/м².

Таблица 1. Результаты измерений максимальной температуры зоны контакта медь–алюминий при различных значениях давления наплавки и скорости вращения (диаметр заготовок 22 мм, давление при нагреве 50 МПа, припуск на нагрев 8 мм)

p_n , МПа	$v = 0,75$ м/с			$v = 1,5$ м/с			$v = 2,0$ м/с		
	T_n , °C	$T_{ц}$, °C	T_p , °C	T_n , °C	$T_{ц}$, °C	T_p , °C	T_n , °C	$T_{ц}$, °C	T_p , °C
25	445	395	440	500	475	505	515	490	510
40	450	400	450	505	480	510	520	485	510
60	400	360	390	495	450	490	510	480	505
80	360	320	345	460	435	460	495	450	490
100	340	305	330	430	410	435	480	445	480

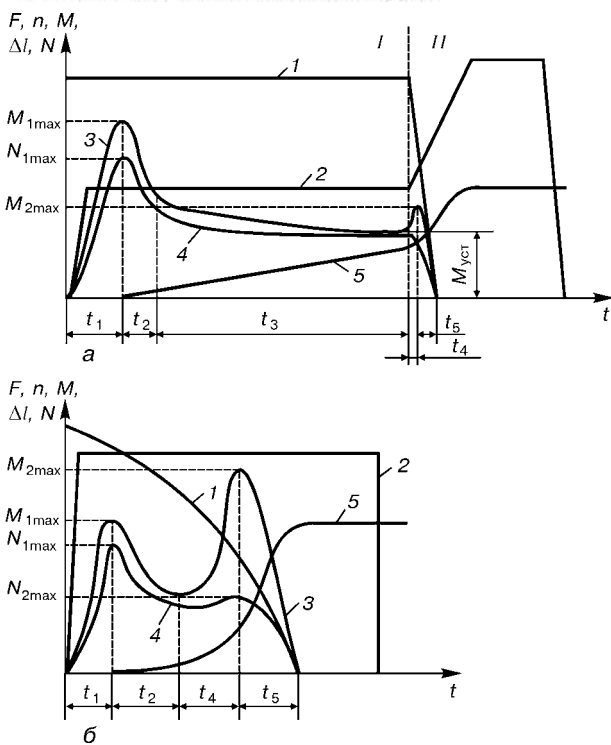


Рис. 1. Типовые осциллограммы процесса конвенционной (а) и инерционной (б) сварки трением: 1 — частота вращения n ; 2 — осевое усилие F ; 3 — момент M ; 4 — мощность тепловыделения в стыке N ; 5 — осадка Δl (укорочение); I — стадия нагрева, II — проковки

В ходе работы на осциллографе Н145 вели регистрацию следующих параметров сварки: температуры в трех точках стыка (на периферии T_n , в центре T_c , на расстоянии $0,5R$ от центра T_p); давлений нагрева p_n и проковки $p_{пр}$; осадки при нагреве и проковке Δl ; времени нагрева t_n и мощности тепловыделения N ; момента трения M , измеряемого с помощью устройства с тензометрическими датчиками [13]. Температуру зоны контакта измеряли хромель-алюмелевыми термопарами (диаметр проволоки 0,2 мм). В связи с тем, что при сварке алюминия с медью последняя практически не деформируется, спай термопары зачеканивали непосредственно в плоскость трения медного образца.

Прочность сварных соединений определяли механическими испытаниями на растяжение по ГОСТ 1497-73, ударную вязкость — по ГОСТ 9454-78. Следует заметить, что стандартные методы испытаний не в полной мере позволяют судить о качестве соединений разнородных металлов [14]. Испытания на растяжение недостаточно «чувствительны» к наличию переходного слоя интерметаллидов и так же, как и испытания на ударную вязкость и статический загиб, не позволяют оценить качество всего сечения сварного соединения. Поэтому дополнительно проводили натурные испытания всего сварного соединения (после удаления грата) на ударный загиб. Такая методика испытаний, широко используемая зарубежными исследователями [4, 14] для оценки качества разнородных соединений, по сравнению со стандартными методами значительно более чувствительна к наличию непроваров и переходного слоя интерметаллидов.

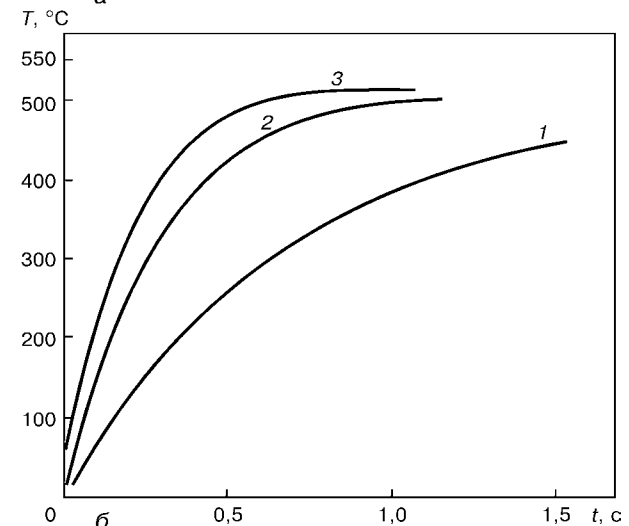
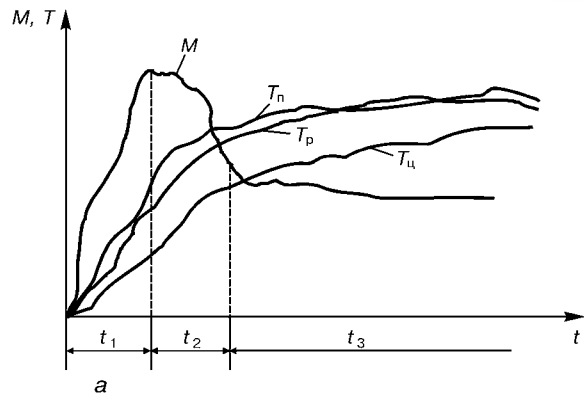


Рис. 2. Изменение во времени момента трения и температуры (а) в различных точках поверхности контакта и максимальной температуры в зоне контакта (б) при $p_n = 40$ МПа и $v = 0,75$ (1); 1,5 (2); 2,0 м/с (3)

Типовые осциллограммы изменения основных технологических параметров при конвенционной и инерционной сварке трением представлены на рис. 1.

В результате измерения температуры зоны контакта (табл. 1) установлено, что на исследуемых режимах температура достаточно быстро (за 0,4...1,2 с) достигает значения 350...500 °С, т. е. температуры, при которой может происходить химическое взаимодействие свариваемых металлов, сопровождающееся реактивной диффузией и образованием интерметаллидных соединений. Процесс нагрева стыка происходит неравномерно (рис. 2, а). Максимум тепловыделения в начальный период трения, соответствующий времени t_1 , зафиксирован в кольцевой зоне, расположенной в интервале от

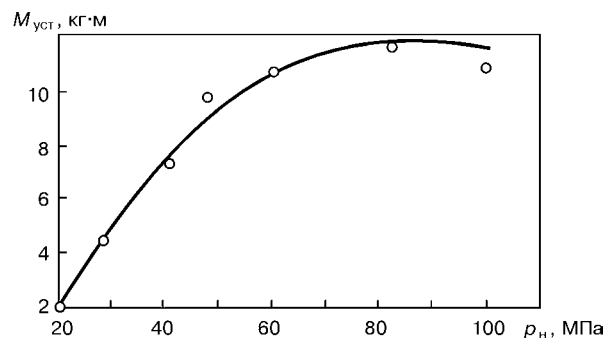


Рис. 3. Зависимость установившегося момента трения от давления при нагреве

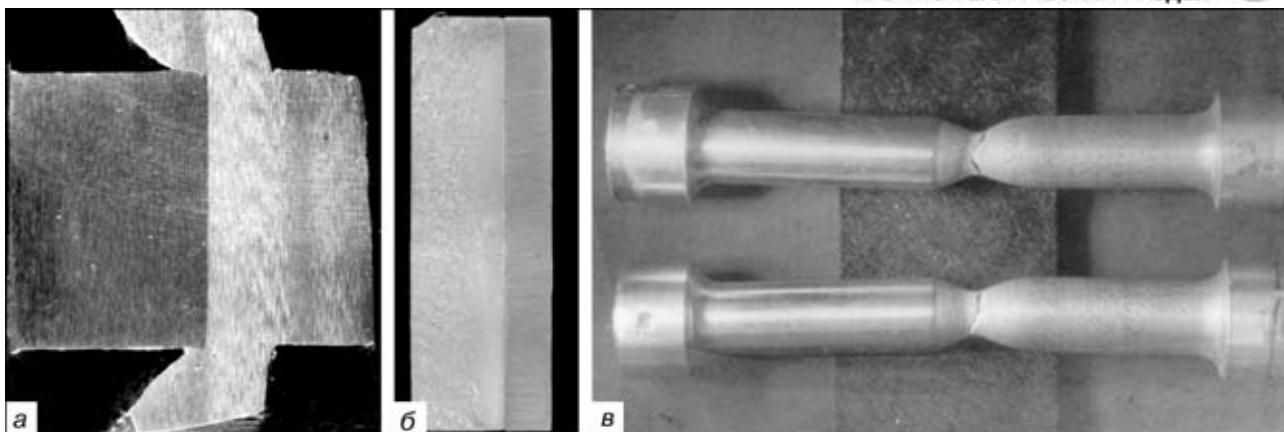


Рис. 4. Соединение, полученное конвенционной сваркой трением с использованием формирующих устройств: *а* — общий вид; *б* — макроструктура (X4, уменьш. 3/5); *в* — после испытания на разрыв

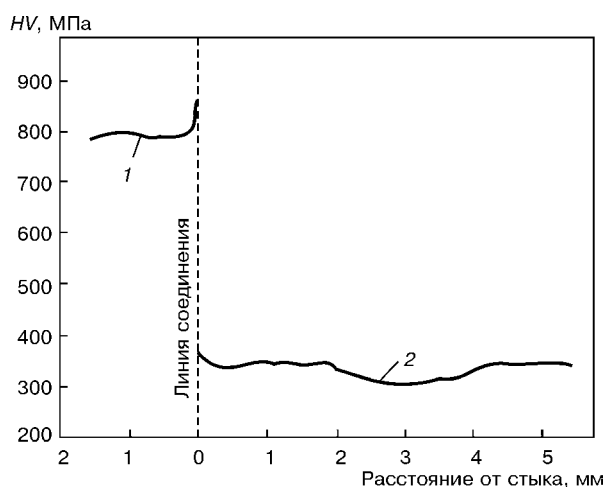


Рис. 5. Изменение микротвердости в зоне соединения меди (1) и алюминия (2)

периферии образцов до $0,5R$ от центра, а минимум — в центре. Разность между максимальной и минимальной температурой нагрева в этот период составляет до $150\text{ }^\circ\text{C}$. Последующий период трения длительностью t_2 характеризуется перераспределением тепловыделения на поверхности трения: наблюдается интенсивное повышение температуры в центре стыка, в то время как на периферии и на расстоянии $0,5R$ от центра ее рост замедляется. Третий период нагрева длительностью t_3 характеризуется выравниванием температуры во всех точках стыка — процесс стабилизируется, и дальнейший нагрев происходит практически равномерно (квазистационарный нагрев).

Анализ осциллограмм, полученных при различных параметрах процесса сварки, свидетельствует о том, что интенсивность выделения энергии в различных фазах процесса зависит от скорости вращения и осевого усилия при нагреве. С увеличением частоты вращения интенсивность роста температуры увеличивается (рис. 2, б), ускоряется и процесс ее выравнивания по всему сечению. С повышением осевого усилия увеличивается высота первого и второго пиков момента трения ($M_{1\max}$, $M_{2\max}$ на рис. 1, а), установившееся значение момента $M_{уст}$ (рис. 3) и скорость пластической деформации (осадки). Время стадии квазистационарного нагрева t_3 (см. рис. 1, а) при этом уменьшается.

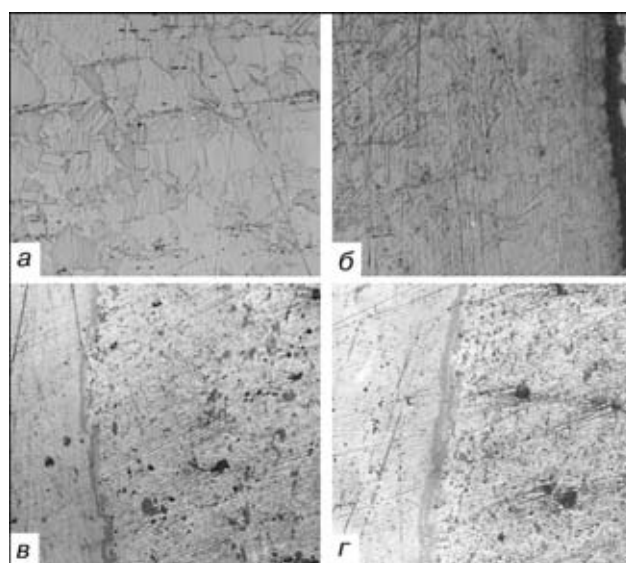


Рис. 6. Микроструктура соединения: *а* — основного металла (меди); *б* — меди вблизи зоны соединения, X100; *в* — в центре; *г* — на периферии, X625 (уменьш. 2/5)

В результате обработки данных механических испытаний установлено следующее. Соединения удовлетворительного качества могут быть получены в широком диапазоне изменения параметров режима сварки: линейной скорости — в диапазоне $0,75...2,50$ м/с, давления при нагреве — $25...100$ МПа, давления проковки — не менее 150 МПа, припуска на нагрев — $1,5...8,0$ мм. Однако существенным является не столько значение отдельных параметров, сколько их сочетание, обеспечивающее оптимальное значение скорости осевой деформации на стадии нагрева при условии строгой регламентации времени или осадки на этой стадии. Соединения, имеющие наилучшие показатели прочности и пластичности, получены при $v = 1,5...2,0$ м/с и $p_n = 40...70$ МПа, при которых обеспечивается скорость осевой деформации $5,5...8,0$ мм/с.

При исследовании макроструктуры соединений поры, раковины и несплавления по границе раздела не обнаружены (рис. 4, а, б). Результаты измерения микротвердости на приборе «Лесо-400» при минимальной нагрузке $0,1$ Н и времени нагружения 10 с показаны на рис. 5. Толщина уплотненных прикон-

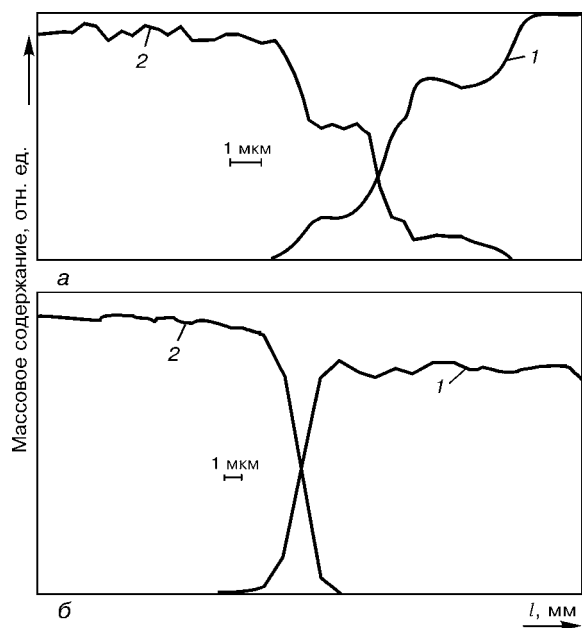


Рис. 7. Распределение меди (1) и алюминия (2) поперек зоны соединения при конвенционной (а) и инерционной (б) сварке трением

тактных слоев алюминия с микротвердостью HV 340... 360 МПа составляет 1,5... 2,0 мм. К этим слоям примыкает область рекристаллизованного основного металла с микротвердостью HV 320... 330 МПа. При испытании на разрыв разрушение, как правило, происходит по этой зоне (рис. 4, в). Структура зоны соединения со стороны меди (рис. 6, а, б) более мелкозернистая, чем у основного металла, обнаруживаются сплюснутые в результате наклепа зерна, а ширина зоны с повышенной твердостью составляет 40 мкм.

При металлографических исследованиях качественных соединений, полученных конвенционной сваркой, обнаруживается неравномерный по сечению переходный слой (рис. 6, в, г). Результаты микрорентгеноспектрального анализа (рис. 7, а) на приборе SX-50 фирмы «Самеса» (диаметр зонда 1 мкм) позволили установить, что в составе переходного слоя преобладает фаза, соответствующая интерметаллидному соединению $CuAl_2$, а со стороны алюминия формируется зона объемного взаимодействия на основе твердого раствора $\alpha + CuAl_2$.

Таблица 2. Результаты механических испытаний на ударный изгиб соединений медь-алюминий, полученных инерционной сваркой (диаметр заготовок 22 мм, давление 65 МПа)

Момент инерции вращающихся масс I , кг·м ²	Частота вращения n , об/мин	Удельная энергия $e_{уд}$, МДж/м ²	Угол загиба до разрушения, град
0,4	1500	12,9	5
0,4	1700	16,7	15
0,4	2000	23,1	90 (без разрушения)
0,4	2200	27,9	90 (без разрушения)
0,4	2500	36,0	65
0,6	2500	54,0	20

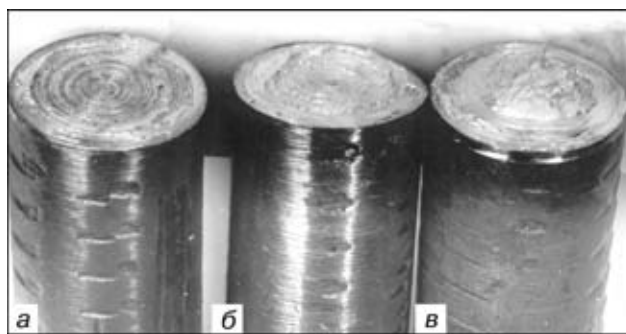


Рис. 8. Поверхности изломов сварных соединений, полученных при давлении нагрева 25 (а), 40 (б), 50 МПа (в)

Известно, что механические свойства биметаллических соединений зависят от толщины переходного слоя интерметаллидов [1, 2]. В результате совместного анализа результатов металлографических исследований и механических испытаний медно-алюминиевых переходников установлено, что высокие пластические свойства при испытаниях на ударный изгиб имеют соединения с толщиной переходного слоя не более 2 мкм. При испытаниях на растяжение положительные результаты механических испытаний (разрушение по основному металлу алюминия) получены при значительно большей толщине переходного слоя (приблизительно до 10 мкм).

Установлено, что толщина переходного слоя интерметаллидов в соединении зависит от сочетания технологических параметров режима сварки. Увеличению толщины интерметаллидной прослойки способствует повышение линейной скорости и припуска на нагрев, а также снижение давления при нагреве и проковке. Таким образом, для минимизации толщины интерметаллидного слоя следует стремиться к снижению времени нагрева при заданном сочетании других технологических параметров.

Однако, как показывают многочисленные эксперименты, получить соединения с высокими показателями механических свойств и полностью избежать образования интерметаллидного слоя при конвенционном процессе не удастся. Это связано с особенностями заключительной стадии процесса сварки — быстрым торможением вращения. Расшифровка осциллограмм этого процесса показала, что остановка вращения на заключительной стадии опережает приложение заданного усилия проковки, следствием чего является быстрое снижение температуры свариваемых поверхностей и температурного градиента в зоне пластической деформации. При ограничении по времени квазистационарной стадии нагрева температурно-временными условиями образования интерметаллидов не удастся обеспечить необходимую степень пластической деформации на заключительной стадии процесса даже при значительном давлении проковки. Поэтому время стадии нагрева при конвенционной сварке должно быть достаточным для создания в зоне соединения определенного температурного градиента. При этом избежать образования интерметаллидной прослойки не удастся.

Кроме того, диапазон изменения основных технологических параметров, при которых могут быть получены качественные соединения, во многом оп-

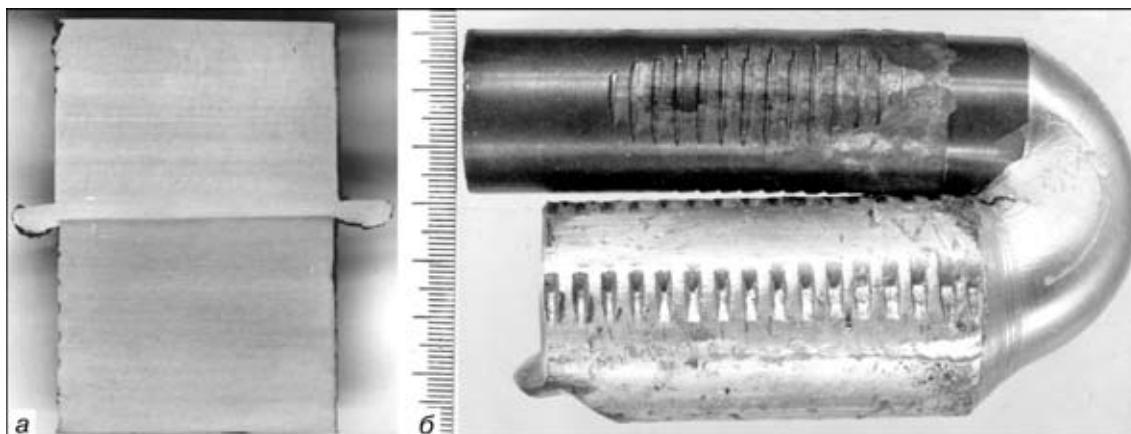


Рис. 9. Соединения, полученные инерционной сваркой трением: *a* — после сварки; *б* — после механических испытаний

ределяется динамическими характеристиками приводов осевого усилия и вращения сварочного оборудования. Так, соединения, имеющие угол загиба 90° , получены на серийной сварочной установке МСТ-2001 при давлении проковки $p_{пр}$ не менее 200 МПа, а на установке СТ-120 — при 150 МПа. Благодаря более высокому быстродействию привода осевого усилия установки СТ-120 удается форсировать приложение проковочного усилия и обеспечить большую степень локализации пластической деформации в зоне соединения при меньшем значении давления проковки. Для получения качественных соединений на установке МСТ-2001 необходимо увеличивать время нагрева и усилие проковки в сочетании с использованием формирующих устройств (см. рис. 4, *a*). По-видимому, особенностями используемого оборудования можно объяснить существенные различия в приводимых различными исследователями режимах сварки медно-алюминиевых переходников [2–8].

При анализе осциллограмм процесса инерционной сварки меди с алюминием обнаружили следующие особенности. Практически не наблюдается третьей фазы (квазистационарного нагрева), а значение второго пика момента трения значительно превосходит таковое при конвенционной сварке. Появление второго пика на кривой момента (см. рис. 1, *б*) можно объяснить тем, что при уменьшении скорости вращения снижается градиент температурного поля и увеличивается глубина зоны, в которой происходит выделение тепла в результате деформационного течения металла и разрушения металлических связей.

Установлено, что на заключительной стадии торможения процесс трения сопровождается глубинными вырываниями и смещением поверхности трения в сторону алюминиевой заготовки. На изломах соединений, полученных при малых давлениях (менее 60 МПа), обнаруживается слой алюминия (рис. 8), перенесенный на поверхность медной заготовки, толщиной 0,1... 0,5 мм. Это свидетельствует о том, что прочность возникающих связей на этапе инерционного завершения процесса нагрева выше прочности основного металла алюминия, причем эти связи охватывают всю номинальную поверхность свариваемых деталей.

Таким образом, окончательное формирование соединений происходит между алюминиевой заготовкой и слоем алюминия, перенесенным на поверхность медной заготовки. Поскольку при инерционной сварке в отличие от конвенционной осевое усилие на заключительной стадии процесса прикладывается к вращающимся заготовкам, то обеспечивается и высокая интенсивность, и степень локализации деформации в зоне контакта. Благодаря совместному воздействию на пластифицированный слой металла осевого усилия и момента трения качественные соединения могут быть получены при осевом усилии, значительно меньшем, чем при конвенционном процессе. При режимах инерционной сварки с удельной энергией 23... 28 МДж/м² минимальное давление, при котором обеспечиваются высокие показатели прочности и пластичности сварных соединений, удалось снизить до 65 МПа (табл. 2, рис. 9). Следует заметить, что при одноступенчатом приложении осевого усилия, характерном для инерционной сварки, процесс формирования соединений в меньшей степени зависит от динамических характеристик силового привода сварочного оборудования.

В процессе металлографических исследований качественных сварных соединений не удалось обнаружить переходный слой, содержащий интерметаллидную фазу. Для более глубокого изучения зоны соединения использовали методику изготовления микрошлифов, при которой стык вырезался под углом α к плоскости соединения — таким образом, толщина линии соединения визуально увеличивалась в $1/\sin\alpha$ раз.

Микрорентгеноспектральный анализ подтвердил отсутствие интерметаллидной фазы в зоне соединений, полученных при инерционной сварке. На кривых распределения меди и алюминия (см. рис. 7, *б*) не наблюдаются перегибы, характерные для соединений с постоянным или переменным составом; в этой зоне имеет место взаимная диффузия меди и алюминия на глубину до 3 мкм. Образующаяся в этом случае переходная зона является наиболее благоприятной.

Данные металлографических и микрорентгеноспектральных исследований свидетельствуют о том, что при инерционной сварке на оптимальных режимах удалось ограничить рост интерметаллид-



ной фазы и, благодаря локализации деформации в зоне контакта, получить соединения с дисперсной структурой без слоя интерметаллидов.

На основании полученных результатов были разработаны следующие основные принципы управления процессом формирования соединений при сварке трением медно-алюминиевых переходников:

1) строгое дозирование вкладываемой в стык энергии на стадии нагрева. Это достигается управлением основными технологическими параметрами, обеспечивающим условия, при которых термический цикл сварки не превышает температурно-временных условий образования в зоне соединения интерметаллидной прослойки;

2) регулирование динамики изменения скорости вращения сварки: высокие значения на начальном этапе и постепенно уменьшающиеся до нуля на завершающем. При этом создаются условия для интенсификации и локализации пластической деформации в зоне контакта;

3) циклограмма приложения осевого усилия и конкретные значения давления проковки должны определяться с учетом динамических характеристик силового привода сварочной установки.

Выводы

1. Для получения качественных соединений при конвенциональной сварке трением необходимо оптимальное сочетание технологических параметров, обеспечивающее определенную скорость осевой деформации при нагреве, и задание давления проковки с учетом динамических характеристик привода осевого усилия сварочной установки.

2. В качественных соединениях, полученных конвенциональной сваркой трением, обнаружен переходный слой интерметаллидов. Высокие механические свойства соединений обеспечиваются при толщине переходного слоя до 2 мкм.

3. За счет соответствующего задания параметров инерционной сварки трением удастся ограничить рост интерметаллидной фазы его начальными этапами. При этом, благодаря интенсификации деформации и локализации ее вдоль поверхности контакта, в зоне соединения формируется дисперсная структура без слоя интерметаллидов.

Current trends in development of equipment for friction welding and peculiarities of designing of machines for its modifications, such as conventional, inertia and combined friction welding, are analysed. The work performed at the E. O. Paton Electric Welding Institute in the area of development and manufacture of the friction welding equipment is described. Peculiarities of design of the ST-120 machine, which can be the basic model for a new generation of the friction welding machines, are presented.

4. При инерционной сварке на заключительной стадии нагрева наблюдается смещение поверхности трения в сторону алюминиевой заготовки. Это свидетельствует о том, что на завершающем этапе сварки прочность возникающих в зоне соединения связей выше прочности основного металла алюминия.

5. Установлена возможность значительного снижения давления на заключительной стадии процесса при инерционной сварке по сравнению с конвенциональной.

1. *Рябов В. П.* Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами. — Киев: Наук. думка, 1983. — 264 с.
2. *Сварка трением.* Справочник / В. К. Лебедев, И. А. Черненко, В. И. Виль и др. — Л.: Машиностроение, 1987. — 236 с.
3. *Штерин Л. А., Прокофьев С. Н.* Сварка трением алюминия со сталью и медью // Свароч. пр-во. — 1961. — № 11. — С. 30–32.
4. *Ellis C. R., Nicholas E. D.* Determination of a procedure for making friction welds between electrical grade aluminium and tough pitch copper // Weld. Res. Int. — 1975. — 5, № 1. — P. 1–32.
5. *Kreye H., Reiners G.* Metallurgical aspects and application of friction welding // Advances in Welding Science and Technology: Proc. of Intern. conf. of trends in welding research. (Gatlinburg, USA, 18–22 May, 1986). — P. 838.
6. *Braun E., Braun I. J.* The joining of copper to aluminium by friction welding // UKAEA Res. Group Rep. — 1969.
7. *Friction welding of St-Al and Al-Cu materials* / B. S. Yilbas, A. Z. Safin, N. Kahraman, A. Z. Al-Garni // J. Mater. Proc. Tech. — 1995. — 49. — P. 431–443.
8. *Friction welding of copper-tungsten sintered alloy to pure aluminium* / M. Aritoshi, K. Okita, T. Enjo, K. Ikeuchi // Trans. Jap. Weld. Soc. — 1993. — 24, № 1. — P. 50–56.
9. *Lebedev V. K., Chernenko I. A.* Friction welding // Welding and Surfacing Reviews. — 2, pt. 4. — Harwood: A. P., 1992. — P. 59–168.
10. *Кучук-Яценко С. И.* Состояние и перспективы развития сварки давлением // Сварка и родственные технологии — в XXI век: Сб. тр. междунар. конф. (Киев, ноябрь 1998). — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона. — 1998. — С. 110–119.
11. *Черненко И. А., Зяхор И. В.* Сварка трением разнородных металлов и сплавов // Сварщик. — 1999. — № 1. — С. 10–12.
12. *Kuchuk-Yatsenko S. I., Zyakhor I. V.* Friction welding of dissimilar metals // Proc. of symp. on exploiting solid state joining, 13–14 Sept., 1999. — Cambridge, Great Abington: TWI, EWI, 1999.
13. *Определение момента трения при инерционной сварке по величине углового ускорения* / В. К. Лебедев, Л. В. Литвин, А. Т. Дышленко, И. А. Черненко // Автомат. сварка. — 1986. — № 8. — С. 31–33.
14. *Ellis C. R., Nicholas E. D.* Mechanical testing of dissimilar metal friction welds // Weld. Res. Int. — 1976. — 6, № 2. — P. 1–22.

Поступила в редакцию 19.12.2000