



ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ДИНАМИКИ ТОРМОЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ С АЛЮМИНИЕМ

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, **И. В. ЗЯХОР**, инж., **Г. Н. ГОРДАНЬ**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана технология сварки трением с регулируемым торможением, обеспечивающая получение соединений без интерметаллидного слоя с высокими показателями прочности и пластичности. Использование новой технологии позволяет расширить технологические возможности стандартного оборудования для сварки трением.

Ключевые слова: сварка трением, технология, разнородные соединения, параметры процесса, конвенциональная сварка трением, инерционное завершение процесса, давление нагрева и проковки, частота вращения, осадка, время нагрева, проковки, торможения, интерметаллидная прослойка, качество соединения, оборудование

Основная трудность оптимизации режима сварки трением связана с большим количеством изменяемых параметров. Так, параметрами, задаваемыми при конвенциональной сварке трением, являются скорость вращения, давление нагрева, время (или припуск) нагрева, давление проковки. Для выбора оптимального сочетания технологических параметров необходимо проведение значительного количества экспериментов, каждый из которых включает выполнение механических испытаний, металлографических, дюраметрических и других исследований.

Задача оптимизации режима сварки разнородных металлов, особенно вступающих при совместном нагреве в химическое взаимодействие, осложняется также необходимостью учета ряда других факторов, влияющих на получение доброкачественных соединений. К ним относятся: химический состав и состояние поставки и предшествующей термической обработки материалов [1, 2]; качество подготовки свариваемых поверхностей [2–6]; динамические характеристики привода вращения сварочного оборудования, определяющие время прекращения относительного вращения на заключительной стадии процесса [2, 4, 7]. Например, по данным [2], качественные соединения при сварке трением меди с алюминием получены при времени торможения не менее 0,07 с, а в [4] проковку осуществляли с задержкой выключения привода вращения.

Анализ данных по сварке трением меди с алюминием [1–5] обнаруживает значительные различия в конкретных значениях рекомендуемых параметров режима, приводимых различными исследователями. Кроме того, имеющиеся в литературе данные относятся к конвенциональной сварке трением, при которой осуществляется быстрое принудитель-

ное прекращение вращения при приложении проковочного усилия. Влияние динамики торможения на условия образования соединений изучено недостаточно, хотя известно, что во многих случаях инерционное завершение процесса сварки трением позволяет оптимизировать термодинамические условия образования соединений разнородных материалов [6–11].

Задачей настоящей работы является определение влияния технологических параметров — времени нагрева, давлений нагрева и проковки, времени торможения и их сочетания на качество соединений меди с алюминием и на этой основе оптимизации режима сварки трением медно-алюминиевых переходников.

Исследовали свариваемые материалы: медь М1 (99,9 % Cu) и технический алюминий (99,5 % Al), диаметр заготовок 25 мм. Медные заготовки отжигали (650 °С, 0,5 ч), свариваемые поверхности перед сваркой протачивали на токарном станке и обезжиривали ацетоном. Эксперименты проводили на модернизированной установке для сварки трением СТ-120, позволяющей изменять динамику торможения и программировать время торможения вращения на заключительной стадии сварки. Программирование цикла сварки осуществлялось по времени нагрева t_n , момент приложения давления проковки совпадал с началом торможения. На осциллографе Н145 регистрировали следующие параметры сварки: частоту вращения n , давление нагрева и проковки P_n , P_{np} , осадку (укорочение) заготовок при сварке L , время нагрева, проковки и торможения t_n , t_{np} , t_T . Для существенного уменьшения количества опытов исследования проводили с использованием методов математического планирования экспериментов [12–14]. В качестве математической модели выбран полином второго порядка оптимизируемого параметра, характеризующего качество соединения: $Y = b_0 + b_1X_1 + \dots + b_nX_n + b_{(n-1)}X_{(n-1)}X_n$, где Y — ответственная функция; b_0, \dots, b_n — коэффициенты регрессии; $X_1 + \dots + X_n$ — исследуемые факторы (параметры режима сварки).

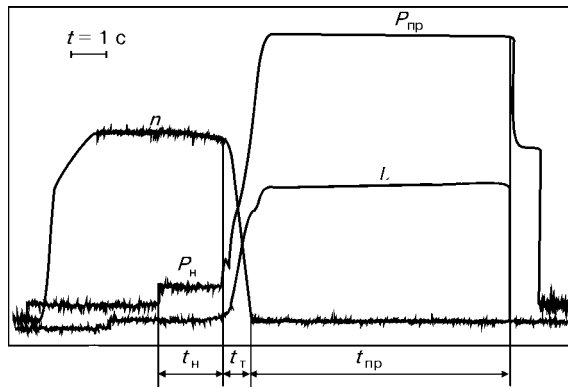


Рис. 1. Типовая осциллограмма процесса сварки трением: P_n , $P_{пр}$ — давление соответственно нагрева и проковки; n — частота вращения; L — осадка заготовок; t_n , $t_т$, $t_{пр}$ — время соответственно нагрева, торможения и проковки

В качестве параметров оптимизации выбраны давление нагрева $P_n(X_1)$, время нагрева $t_n(X_2)$, давление проковки $P_{пр}(X_3)$ и время торможения $t_т(X_4)$. Определение исследуемого диапазона изменяемых параметров, т. е. выбор базового (нулевого) уровня и интервала изменения факторов, проводилось таким образом, чтобы преимущественно охватить область рекомендуемых параметров режима сварки [1–5]. Значения кодированных переменных $-1, 0, +1$, определяющих соответственно нижний, базовый и верхний уровни исследуемых факторов, представлены в табл. 1. Частота вращения n , выбранная на основании предварительных исследований и с учетом выводов работ [2, 7], составляла $n = 1460$ об/мин, что соответствовало линейной скорости на периферии образцов $v_n = 1,9$ м/с. Время проковки составляло во всех опытах $t_{пр} = 6$ с. Типовая осциллограмма процесса сварки представлена на рис. 1.

Поскольку стандартные испытания на разрыв и статический загиб не обеспечивают удовлетворительного контроля качества разнородных соединений, то в качестве ответственной функции Y принят угол загиба α при испытаниях на ударный изгиб натурального сварного соединения (после удаления грата). Этот метод широко используется многими исследователями для оценки качества сварки трением [2, 15, 16], хотя и не позволяет в полной мере произвести количественную оценку показателей механических свойств, поскольку основная часть деформации происходит в основном металле менее прочной заготовки [15]. С целью ужесточения условий испытаний и локализации деформации в зоне соединения зажим испытуемых заготовок производился в зоне алюминиевой части

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов

Параметр оптимизации	Фактор	Уровень			Интервал варьирования J
		-1	0	+1	
Давление нагрева P_n , МПа	X_1	20	40	60	20
Время нагрева t_n , с	X_2	0,4	1,7	3,0	1,3
Давление проковки $P_{пр}$, МПа	X_3	100	150	200	50
Время торможения $t_т$, с	X_4	0,1	0,4	0,7	0,3

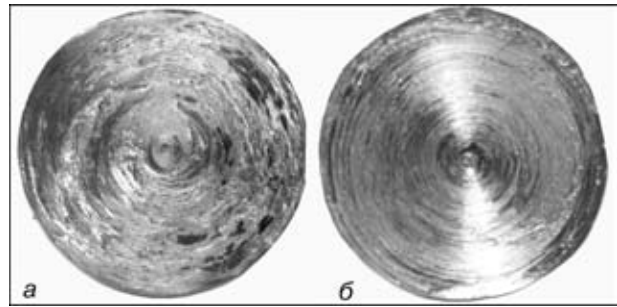


Рис. 2. Поверхности изломов сварных соединений, полученных при различных значениях времени нагрева t_n и торможения $t_т$, с: а — $t_n = 0,4$, $t_т = 0,1$; б — $t_n = 3,0$, $t_т = 0,1$

на расстоянии от линии соединения, равном диаметру заготовок. Для определения взаимосвязи механических свойств со структурой соединений проводили металлографические (оптический микроскоп «Neophot-32»), электронно-микроскопические (растровый электронный микроскоп JSM-T 200), микрорентгеноспектральные (микроанализатор SX-50 фирмы «Самеса» с диаметром зонда около 1 мкм) и рентгеноструктурные (установка «Дрон-УМ-1») исследования. Для визуального расширения зоны соединения изготавливали косые микрошлифы [7], которые изучали в нетравленном состоянии.

Матрица плана и результаты экспериментов представлены в табл. 2. Дисперсию критерия всего эксперимента в каждой точке плана определяли на основе двух параллельных опытов. Проверку однородности дисперсий производили с помощью критерия Кохрена. Значения коэффициентов регрессии полученной модели (адекватной при 5%-м уровне значимости), определенные по методу наименьших квадратов, следующие: $b_0 = 31,69$; $b_1 = 3,31$; $b_2 = -19,43$; $b_3 = 8,56$; $b_4 = 18,81$; $b_{12} = -7,44$; $b_{13} = 3,18$; $b_{14} = -7,06$; $b_{23} = -3,19$; $b_{24} = -14,44$; $b_{34} = -4,3$.

Таблица 2. Матрица плана и результаты экспериментов

№ стыка	X_1	X_2	X_3	X_4	Угол загиба α , град
1	—	—	—	—	0
2	—	—	—	+	90
3	—	—	+	—	4
4	—	—	+	+	90
5	—	+	—	—	0
6	—	+	—	+	2
7	—	+	+	—	6
8	—	+	+	+	35
9	+	—	—	—	0
10	+	—	—	+	90
11	+	—	+	—	90
12	+	—	+	+	90
13	+	+	—	—	0
14	+	+	—	+	3
15	+	+	+	—	3
16	+	+	+	+	4



Таким образом, уравнение регрессии с учетом взаимодействия факторов, включающих X_4 — время торможения (X_1X_4, X_2X_4, X_3X_4), имеет вид

$$Y = 31,68 + 3,31X_1 - 19,43X_2 + 8,56X_3 + 18,81X_4 - 7,06X_1X_4 - 14,44X_2X_4 - 4,3X_3X_4.$$

Согласно [12] $X_i = (x_i - x_0)/J$, где X_i — кодированное значение фактора; x_i, x_0 — натуральные значения фактора и основного уровня; J — интервал варьирования. После подстановки X_i в уравнение регрессии модели, адекватно описывающей величину угла загиба α при испытании на ударный загиб соединений меди с алюминием, полученных сваркой трением в указанном диапазоне изменения технологических параметров, имеем

$$\alpha = 31,68 + 3,31(P_{\text{н}} - 40)/20 - 19,43(t_{\text{н}} - 1,7)/1,3 + 8,56(P_{\text{пр}} - 150)/50 + 18,81(t_{\text{т}} - 0,4)/0,3 - 7,06(P_{\text{н}} - 40)(t_{\text{т}} - 0,4)/6 - 14,44(t_{\text{н}} - 1,7)(t_{\text{т}} - 0,4)/0,39 - 4,3(P_{\text{пр}} - 150)(t_{\text{т}} - 0,4)/15.$$

Положительные значения коэффициентов регрессии получены для давлений нагрева и проковки, а также времени торможения, отрицательные — для времени нагрева. Значения коэффициентов по

мере убывания их численных величин: время нагрева (−19,43), время торможения (18,81), давление проковки (8,56), давление нагрева (3,31). Поскольку увеличению ответственной функции Y соответствует уменьшение факторов, имеющих отрицательный коэффициент регрессии, и возрастание факторов с положительным коэффициентом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

При оптимизации параметров стадии нагрева следует стремиться к повышению давления и снижению времени. Большое влияние на качество соединений оказывает время нагрева, которое определяет термический цикл сварки, а следовательно, зарождение и рост интерметаллидной фазы. Положительная роль давления нагрева $P_{\text{н}}$ на качество соединений, очевидно, сказывается в следующем: при повышении $P_{\text{н}}$ обеспечивается более быстрый рост температуры и ее выравнивание по сечению заготовок; в некоторой степени уменьшается максимальная температура контакта [7]; сокращается длительность притирки — начальной фазы нагрева, не сопровождающейся заметным вытеснением нагретого металла из стыка. Это свидетельствует о том, что повышение давления $P_{\text{н}}$ в исследуемом диапазоне оказывает положительное влияние на термометаллические процессы в стыке на стадии нагрева.

Параметры стадии проковки — давление $P_{\text{пр}}$ (коэффициент 8,56) и время торможения $t_{\text{т}}$ (18,81) — оказывают существенное влияние на процесс формирования соединений. Важная роль давления проковки отмечается большинством исследователей [1–4], поскольку увеличение $P_{\text{пр}}$ способствует уменьшению толщины хрупкого слоя, содержащего интерметаллидные соединения.

Анализ влияния времени торможения $t_{\text{т}}$ на качество сварных соединений показывает, что при нижнем уровне его значения они разрушаются хрупко по поверхности контакта при значениях угла загиба, близких нулю, даже при условии максимальных значений давлений нагрева и проковки. Характер изломов и микроструктура соединений, полученных при различных значениях времени нагрева $t_{\text{н}}$, существенно отличаются. При нижнем уровне значений $t_{\text{т}}$ и $t_{\text{н}}$ в изломах обнаруживаются отдельные участки схватывания (см.

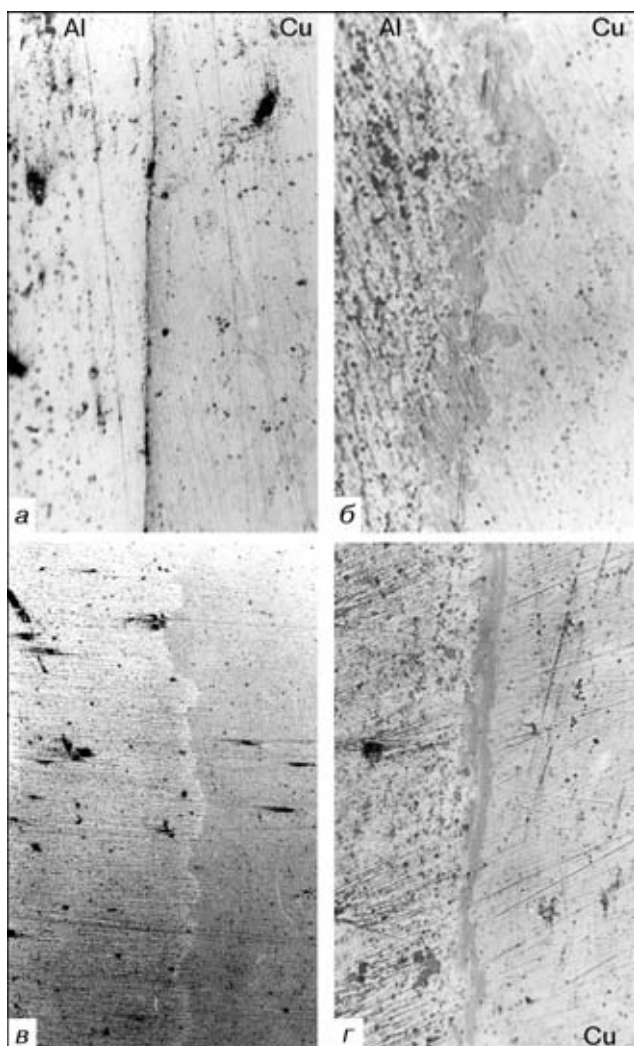


Рис. 3. Микроструктура зоны соединения меди с алюминием: а — $\times 200$; б, в — $\times 400$; г — $\times 625$

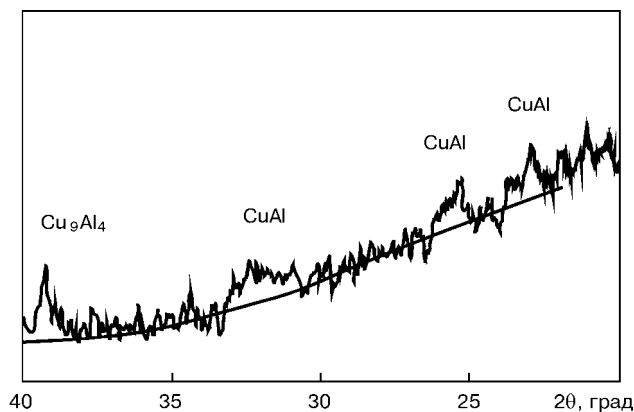


Рис. 4. Результаты рентгенструктурного анализа излома со стороны медной заготовки

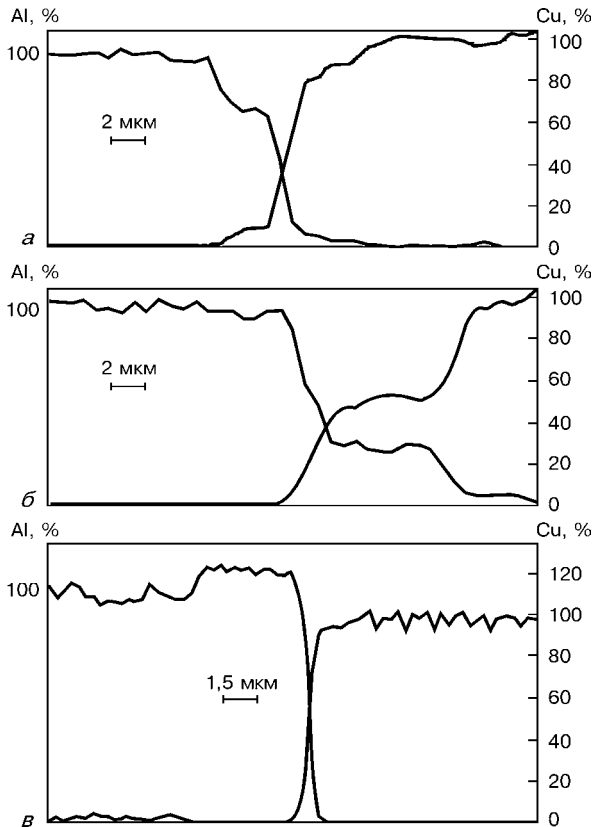


Рис. 5. Распределение меди и алюминия поперек зоны соединения при различных значениях времени нагрева t_n и торможения t_T , с: *a, б* — $t_n = 3,0$, $t_T = 0,1$ в центре сечения (*б*) и на периферии (*а*); *в* — $t_n = 0,4$, $t_T = 0,7$ на периферии сечения

рис. 2, *а*), поверхность излома со стороны медной заготовки имеет характерный для меди оттенок. При металлографических исследованиях выявляются отдельные участки соединения в периферийной части сечения и отсутствие соединения в центральной (рис. 3, *а*), что является следствием недостаточного разогрева зоны контакта.

При верхнем уровне t_n и нижнем t_T характер изломов изменяется — практически вся поверхность медной заготовки покрыта тонким слоем металла бледно-серого цвета (см. рис. 2, *б*). По данным рентгеноструктурного анализа (рис. 4), на поверхности излома со стороны медной заготовки обнаруживается фаза, соответствующая соединению $CuAl$.

Металлографическими исследованиями установлено, что форма границы раздела сварного соединения изменяется в зависимости от давления и времени нагрева от практически прямолинейной до сложной по рельефу с участками волнообразования (рис. 3, *б*). В зоне соединения обнаруживается прослойка, толщина которой увеличивается при переходе от центра к периферии сечения заготовок. Максимальная толщина прослойки уменьшается при увеличении давления нагрева.

При идентификации фаз зоны соединения методом микрорентгеноспектрального (рис. 5, *а, б*) анализа выявлены интерметаллидные соединения, близкие по составу к фазам $CuAl_2$, $CuAl$ и Cu_9Al_4 . Массовая доля меди в различных участках переходной зоны изменяется от 40 до 90 %, что связано с образованием фаз различного состава. Поскольку



Рис. 6. Соединения ($P_n = 40...60$ МПа, $P_{np} = 200$ МПа, $t_n = 0,4$ с, $t_T = 0,7$ с) после механических испытаний на ударный загиб

при сварке давлением зона соединения формируется при наличии высокого градиента концентраций поперек поверхности контакта и в условиях интенсивного перемешивания мельчайших частиц без изменения концентрации химических элементов, фазовый состав образующихся интерметаллидных фаз может не в полной мере соответствовать диаграмме состояния $Cu-Al$, полученной для равновесного состояния [17].

Таким образом, переходный слой имеет слоистое строение, причем со стороны алюминия преобладает фаза $CuAl_2$, а со стороны меди — фазы $CuAl$ и Cu_9Al_4 . Известно, что свойства сварных соединений разнородных металлов с ограниченной взаимной растворимостью определяются свойствами образующихся в зоне контакта диффузионных зон [18]. Рентгеноструктурные исследования изломов стыков свидетельствуют о том, что разрушение соединений при механических испытаниях преимущественно происходит по границе фаз $CuAl_2$ и $CuAl$.

Более высокие механические свойства имеют соединения, полученные при верхнем уровне времени торможения t_T . Однако загиб до 90° без разрушения (рис. 6) выдержали соединения, полученные при минимальном значении t_n . Интерметаллидная фаза в прослойках в стыках № 2, 4, 10, 12 по данным металлографических (см. рис. 3, *в*) и микрорентгеноспектральных (рис. 5, *в*) исследований не обнаруживается. В контактной зоне отмечается диффузия меди в алюминий на глубину 3...5 мкм, о чем свидетельствует изменение концентрации меди при подходе (со стороны алюминия) к границе контакта. Минимальные значения из указанного интервала соответствуют центральной части сечения, максимальные — периферийной. Характерным для структуры переходной зоны является образование метастабильных твердых растворов меди в алюминии переменного состава. Формирование интерметаллидной фазы удастся зафиксировать его начальными этапами до образования сплошного слоя.

При верхнем уровне t_T и t_n все соединения разрушились хрупко. Металлографические исследования (см. рис. 3, *з*) и анализ изломов разру-

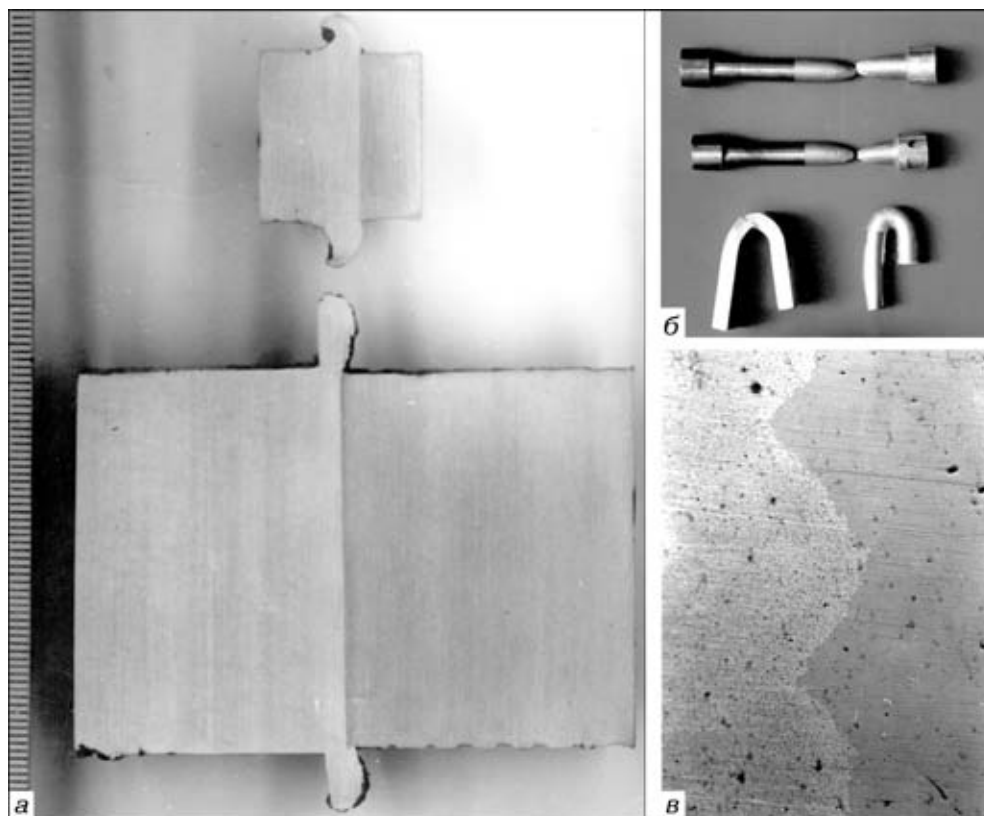


Рис. 7. Соединения меди с алюминием, полученные сваркой трением с регулируемой динамикой торможения: *а* — макрошлифы зоны соединений; *б* — образцы после механических испытаний; *в* — микроструктура зоны соединений, $\times 2000$

шенных образцов свидетельствует о наличии прослойки с интерметаллидами толщиной 3,5...5,0 мкм (что существенно меньше по сравнению с соединениями, полученными при быстром торможении вращения). Значительное уменьшение толщины интерметаллидного слоя отмечается при увеличении давления проковки. Однако уменьшить толщину этого слоя до значений, при которых обеспечиваются высокие показатели пластичности соединений, не удается даже при верхних значениях $P_{пр}$ и t_T в исследуемом диапазоне их изменения. Следовательно, при оптимизации режима сварки следует стремиться к уменьшению времени нагрева и увеличению остальных программируемых технологических параметров.

На основе полученных данных определен оптимальный режим сварки: $P_H = 60$ МПа, $t_H = 0,4$ с, $P_{пр} = 200$ МПа, $t_T = 0,7$ с, $t_{пр} = 6$ с, $v = 1,9$ м/с. На этом режиме была сварена партия стыков. При испытаниях образцов на статический и ударный загиб все соединения имели угол загиба 90° без разрушения, при обратном загибе происходит разрушение образцов по алюминию.

Анализ взаимодействий факторов X_1X_4 , X_2X_4 , X_3X_4 позволяет сделать вывод, что за счет увеличения времени торможения можно снизить время нагрева, давления нагрева и проковки в исследуемом диапазоне без ухудшения показателей качества сварных соединений. Наибольшее практическое значение имеет взаимодействие X_3X_4 , поскольку снижение давления проковки позволяет существенно расширить диапазон сечений, свариваемых на одной установке.

Для изучения возможности снижения давления проковки и влияния масштабного фактора на условия получения качественных соединений выполнена сварка опытных партий заготовок диаметром 15, 20, 30, 40, 55 мм на модернизированных установках МСТ-2001 и СТ-120 с максимальным осевым усилием 20 и 12 т соответственно. Интервал варьирования времени торможения составлял 0,5...1,5 с. Сварные медно-алюминиевые переходники испытывали на разрыв, статический и ударный загиб. Результаты механических испытаний показали, что разрушения по зоне сварки не зафиксированы при снижении давления проковки до 70...90 МПа для различных диаметров заготовок. При этом во всем исследуемом диапазоне диаметров оказались справедливыми выводы, сделанные при анализе полученного уравнения регрессии. Поскольку с увеличением диаметра заготовок резко увеличивается момент трения в стыке (особенно на начальной стадии процесса), то задание значения давления нагрева при сварке заготовок больших диаметров следует производить с учетом надежности механизмов зажатия и жесткости силового пояса сварочного оборудования.

Макрошлифы соединений образцов диаметром 25 и 55 мм представлены на рис. 7, *а*. Незначительная ширина зоны термомеханического влияния свидетельствует о локализации деформации в зоне контакта. Механические испытания образцов, вырезанных из различных частей сечения (рис. 7, *б*), показали высокие прочностные и пластические свойства соединения. Микроструктуру стыков изучали на косых нетравленных шлифах



[7], вырезанных под углом $11,5^\circ$. Толщина зоны соединения при этом визуально увеличивалась в 5 раз. Металлографический анализ соединений при максимальном увеличении микроскопа «Neophot-32» не выявил наличие переходного слоя, содержащего интерметаллидную фазу (рис. 7, в).

Таким образом, приложение проковочного усилия при плавно уменьшающейся частоте вращения, т. е. совместное воздействие осевой и тангенциальной составляющих деформации на пластифицированный металл на стадии проковки, обеспечивает формирование качественных соединений при меньшем давлении. Однако указанный эффект может быть достигнут только при условии задания значения времени нагрева, при котором термический цикл сварки не превышает температурно-временных условий формирования интерметаллидной прослойки. В этом случае термодинамические условия формирования соединений аналогичны таковым при инерционной сварке трением.

На основе полученных результатов разработана технология сварки с регулируемым торможением, отличающаяся минимальной длительностью стадии нагрева и программируемым уменьшением частоты вращения на стадии проковки. Для реализации разработанной технологии на серийном оборудовании для сварки трением проведена его модернизация, направленная на создание возможности программирования динамики торможения вращения на заключительной стадии процесса сварки. Модернизированные сварочные установки имеют большие технологические возможности по сравнению со стандартным оборудованием для сварки трением. Например, на серийной машине МСТ-2001 удается получать качественные соединения меди с алюминием для заготовок диаметром до 35 мм (давление проковки не менее 200 МПа). После соответствующей модернизации на этой установке обеспечивается получение качественных медно-алюминиевых переходников в диапазоне диаметров 16...55 мм.

Выводы

1. Время торможения вращения на заключительной стадии процесса играет существенную роль в формировании структуры, фазового состава и механических свойств соединений при сварке трением меди с алюминием.

2. В исследуемом диапазоне изменения технологических параметров наилучшие механические свойства имеют соединения, полученные при минимальном значении времени нагрева и максимальных значениях времени торможения, давлений нагрева и проковки.

3. За счет оптимизации времени торможения создается возможность существенного снижения

Technology of friction welding with an adjustable braking has been developed that ensures making joints without an intermetallic layer with high indices of strength and ductility. Use of advanced technology allows expansion of the technological capabilities of standard equipment for friction welding.

давления проковки по сравнению с обычным процессом сварки трением.

4. Разработана новая технология сварки трением с регулируемым торможением, обеспечивающая получение соединений без интерметаллидного слоя с высокими показателями прочности и пластичности.

5. Использование новой технологии позволяет расширить технологические возможности стандартного оборудования для сварки трением.

1. *Сварка трением* / В. К. Лебедев, И. А. Черненко, В. И. Виль и др. Справочник. — Л.: Машиностроение, 1987. — 236 с.
2. *Ellis C. R., Nicholas E. D.* Determination of a procedure for making friction welds between electrical grade aluminium and tough pitch copper // *Welding Research Intern.* — 1975. — 5, № 1. — P. 1–32.
3. *Штернин Л. А., Прокофьев С. Н.* Сварка трением алюминия со сталью и медью // *Свароч. пр-во.* — 1961. — № 11. — С. 30–32.
4. *Kreye H., Reiners G.* Metallurgical aspects and application of friction welding // *Advances in welding science and technology: Proc. of Intern. conf. on trends in welding research, Gatlinburg, USA, 18–22 May, 1986.* — 838 p.
5. *Friction welding of copper-tungsten sintered alloy to pure aluminium* / М. Aritoshi, К. Okita, Т. Enjo, К. Ikeuchi // *Trans Jap. Weld. Soc.* — 1993. — 24, № 1. — P. 50–56.
6. *Зячор И. В.* Особенности сварки трением разнородных металлов и сплавов // *Автомат. сварка.* — 2000. — № 5. — С. 37–46.
7. *Зячор И. В., Кучук-Яценко С. И.* Особенности формирования соединений меди с алюминием при сварке трением // *Там же.* — 2001. — № 9. — С. 27–32.
8. *Pat. 1281607 British.* Friction welding of copper to aluminium. Caterpillar tractor company. — Filed 16.04.70; Publ. 12.07.72.
9. *Lebedev V. K., Chernenko I. A.* Friction welding. — *Harwood Acad. publ.*, 1992. — Vol. 4. — P. 59–168 (Welding and surfacing reviews).
10. *Кучук-Яценко С. И.* Состояние и перспективы развития сварки давлением // *Сварка и родственные технологии в XXI век: Сб. науч. тр. междунар. конф.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 110–119.
11. *Foister P. V.* Heat under power (HUP) friction welding // *Proc. Third intern. conf. on advances in welding processes, Harrogate, 7–9 May, 1974.* — P. 243–248.
12. *Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В.* Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 280 с.
13. *Налимов В. В.* Теория эксперимента. — М.: Наука, 1971. — 208 с.
14. *Murti K. G. K., Sundaresan S.* Parameter optimization in friction welding dissimilar materials // *Metal Construction.* — 1983. — № 6. — P. 331–335.
15. *Ellis C. R., Nicholas E. D.* Mechanical testing of dissimilar metal friction welds // *Welding Research Intern.* — 1976. — 6, № 2. — P. 1–22.
16. *Jessop T. J., Nicholas E. D., Dinsdale W. O.* Friction welding dissimilar metals // *Advances in welding processes: Fourth intern. conf., Harrogate, England, 9–11 May, 1978.* — P. 23–36.
17. *Wallach E. R., Davies G. J.* Mechanical properties of aluminium-copper solid-phase welds // *Metals Technol.* — 1977. — № 4. — P. 183–190.
18. *Каракозов Э. С.* Сварка металлов давлением. — М.: Машиностроение, 1986. — 280 с.

Поступила в редакцию 27.09.2001