

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССА ТРЕНИЯ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ И МОДИФИКАЦИИ ИХ СТРУКТУРЫ

А. Л. МАЙСТРЕНКО¹, В. А. ЛУКАШ¹, С. Д. ЗАБОЛОТНЫЙ¹, Р. В. СТРАШКО²

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины. 04074, Киев-74, ул. Автозаводская, 2.
E-mail: zab@ukr.net

²ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Разработан технологический процесс обработки поверхностных слоев деталей из магниевых и алюминиевых сплавов трением с перемешиванием с целью модификации структуры, направленной на формирование слоя мелкозернистой структуры сплава (размер зерна 1,2...4,5 мкм), что в 16...63 раза меньше размеров зерен исходного металла (75,8 мкм). Определено, что максимальная температура нагрева сплава в зоне контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемыми трением с перемешиванием слоями образцов исследуемых сплавов достигала 340...380 °С. Выполнен анализ влияния кинетических параметров инструмента на изменение микроструктуры модифицированных поверхностных слоев изделий и сварных соединений. Библиогр. 18, рис. 11, табл. 3.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, тепловыделение при трении с перемешиванием, пластические деформации, ширина зоны термомеханического влияния, размеры зерен микроструктуры

Несмотря на то, что все процессы соединения металлических деталей конструкций с использованием электрической дуги, плазмы, луча лазера или электронного луча и их комбинаций отличаются отдельными технологическими и экономическими преимуществами, но при этом их всех объединяет то, что в зоне соединения образуется жидкая фаза, с помощью которой они соединяются. Эта принципиальная и важная особенность процесса обуславливает изменение структуры металла после его рекристаллизации, в частности, увеличение размера зерна, фазовые превращения, а также формирование остаточных сварочных напряжений, которые отрицательно сказываются на прочностных свойствах соединений. Поэтому, на протяжении всей истории существования традиционных способов сварки плавлением металлов, ученые всего мира разрабатывали альтернативные способы соединения, а именно, твердофазные, которые позволяют, хотя бы частично, уменьшить влияние перечисленных явлений.

Одним из первых твердофазную сварку труб и стержней трением предложил Дж. Ш. Бевингтон (США, 1891 г.) [1], затем К. К. Хренов и Г. П. Сахацкий (ИЭС АН УССР, 1953 г.) осуществили способ «холодной» сварки трением [2]. К первым разработчикам сварки и наплавки трением можно отнести также и А. И. Чудикова (1957 г.) [3]. Из твердофазных способов сварки трением, получивших широкое распространение, стал разработанный и развитый М. Н. Кабановым и И. В. Авериним (1960 г.) способ ротационной сварки

металлов трением [4]. Однако использовать этот подход для сваривания плоских листовых конструкций встык и нахлест, а также осуществлять наплавки других металлов и сплавов, не представляется возможным.

Использование принципа твердофазной сварки трением плоских или криволинейных листовых деталей встык и нахлест было предложено в 1991 г. в патенте У. М. Томаса и др. [5], которые предложили способ сварки деталей изделий трением с перемешиванием с использованием активного нерасходуемого инструмента (рис. 1). Этот способ, который авторы назвали «сварка трением с перемешиванием» (СТП), обеспечивает очень простой способ взаимодействия инструмента и заготовки.

Конструкции и материалы инструментов для СТП. Способ соединения деталей из разнородных металлов трением с перемешиванием, предложенный У. М. Томасом и его коллегами [5], можно отнести к наиболее значительным технологическим достижениям за последние три десятилетия. Появилась возможность соединять детали из материалов, которые ранее традиционной дуговой сваркой не сваривались совсем или сваривались сложно: различные алюминиевые, магниевые и титановые сплавы. С использованием новой технологии расширились возможности восстановления и ремонта сложной техники путем наплавки на поверхности деталей нового слоя металла.

Несмотря на успех метода СТП, есть много проблем, которые должны быть решены для рас-

ширения промышленного использования этой технологии. Среди них главной является проблема обеспечения процесса надежным, прочным и износостойким рабочим инструментом. В процессе сварки инструмент одновременно подвергается воздействию крутящего момента, знакопеременных циклических изгибающих сил, а также влиянию высоких температур. Отсутствие достоверной информации в мировых научных источниках ответов на эти вопросы затрудняет успешное решение задач масштабного применения в отечественной промышленности новой прогрессивной технологии — сварки материалов методом трения с перемешиванием. Принципиальная схема работы инструмента, который применяется при сварке разных металлов методом трения с перемешиванием, приведена на рис. 1.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона давно проводятся экспериментальные работы в направлении «холодной сварки» [6] и уже в течение ряда лет в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины ведутся работы, направленные на разработку и применение инструментов для СТП различных металлов и сплавов [7–10]. Анализ имеющихся источников по поводу изготовления инструментов такого типа дает представление о материалах, которые необходимо при этом использовать [11–14]. Прежде всего эти материалы должны сохранять высокую твердость и прочность при высоких температурах. При этом характеристики этих свойств должны значительно превышать механические характеристики материалов, которые свариваются или наплавляются. Кроме того, инструмент, особенно его рабочая часть, должна иметь высокую износостойкость и термостойкость. Эти свойства обусловлены, прежде всего, значительными температурами и усилиями на инструмент, которые возникают в процессе сварки или наплавки. Рабочие наконечники инструментов для СТП выполняются в виде цилиндров с закругленными торцами, конусов или цилиндров, на поверхности которых нарезается канавка сложной формы со сменным

шагом, которая должна содействовать лучшему перемещению металла в пределах сварного шва. Как правило, канавка имеет противоположное направление вращательному движению инструмента. Вероятно, для лучшего формирования шва и уменьшения усилий на инструмент последний устанавливается не вертикально относительно плоскости поверхности, а наклоненным под небольшим углом $2...5^\circ$ в сторону, противоположную направлению подачи.

Сложная форма наконечников вызвана необходимостью обеспечивать как можно лучше перемешивание металла с целью повышения производительности процесса сварки. Результаты многочисленных исследований показали взаимосвязь между теплом, которое генерируется в зависимости от кинематических параметров процесса, и статической прочностью шва [10]. Также было обнаружено изменение микроструктуры как в зоне термического влияния, так и в зоне перемешивания, по сравнению с материалом основы.

После анализа данных, полученных об инструментах для наплавки и сварки трением с перемешиванием, было принято решение на первом этапе работы образцы инструмента изготавливать из высококачественных инструментальных сталей. Эти образцы были изготовлены из быстрорежущей стали Р18, закаленной при температуре 1270°C . После закалки инструмент подвергли отпуску продолжительностью 1 ч при температуре $550...570^\circ\text{C}$ с целью преобразования остаточного аустенита в мартенсит и протекания дисперсионной закалки (вторичная твердость). В результате проведенной термообработки твердость стали изделия достигала *HRC* 65. Инструменты с большой твердостью можно получать путем применения порошковых сталей, разработанных для замены сталей Р18 и Р9 — РОМ2Ф 3-МП, М6Ф 1-МП и М6Ф 3-МП.

При применении сталей для изготовления инструмента рабочему наконечнику можно предоставить сложную форму, которая не всегда возможна при использовании сверхтвердых материалов. Кроме того, стоимость инструмента будет значительно меньше, что делает его применение в ряде случаев экономически эффективным.

Известны марки сталей, физико-механические свойства которых могут служить для изготовления инструмента, используемого при СТП. При этом самую большую прочность имеют инструментальные стали, легированные вольфрамом, т. е. Р18 и Р9М4 К8, так называемые быстрорежущие стали [7, 8]. Но их жаропрочность находится в пределах $600...650^\circ\text{C}$, что делает обоснованным использование этих сталей лишь для сварки деталей, изготовленных из легкоплавких

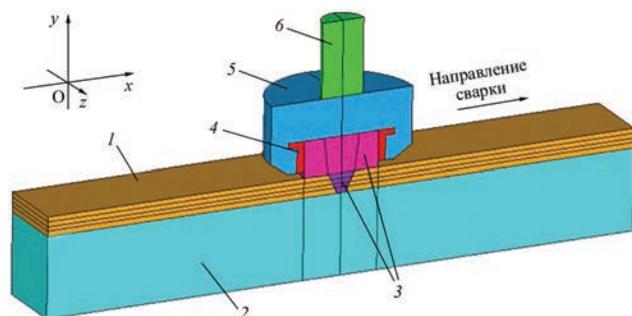


Рис. 1. Схематическое изображение процесса СТП: 1, 2 — свариваемые детали; 3 — инструмент с буртиком; 4 — твердосплавная обойма; 5 — стальная державка; 6 — стальной вал привода



Рис. 2. Общий вид инструментов для сварки, наплавки и модификации металлов трением с перемешиванием [7, 8]: *а* — из стали P18, для СТП и модификации структуры алюминиевых и магниевых сплавов; *б* — из твердого сплава ВК8 для наплавки меди; *в* — из кубического нитрида бора для наплавки никеля и кобальта

сплавов. Немного меньшие показатели прочности имеют стали аустенитного класса 20Х23Н18 и 12Х25Н16Г7АР, но зато жаростойкость их значительно больше и достигает 1000 °С. Анализ известных свойств сплавов на основе хрома, никеля и кобальта свидетельствует в том, что для сварки этих сплавов по технологии СТП необходимы инструменты из жаростойких и износостойких материалов, конструкции которых были разработаны в рамках программы «Ресурс» (рис. 2) [7, 8]. Так, для СТП относительно легкоплавких алюминиевых и магниевых сплавов, были разработаны и изготовлены инструменты, общий вид которых приведен на рис. 2, *а*. В то же время попытки использовать стальной инструмент для наплавки никеля или кобальта на медную основу, ввиду относительно высокой температуры в зоне СТП, не дали положительного результата. Поэтому для СТП и наплавки меди и ее сплавов, инструменты производились из твердого сплава ВК8 (рис. 2, *б*), а для СТП сталей, никеля, кобальта и иных тугоплавких металлов и сплавов используются инструменты из поликристаллического сверхтвёрдого материала на основе кубического нитрида бора (рис. 2, *в*) (табл. 1) [7].

Но даже применение технологии порошковой металлургии не всегда дает радикальное повышение стойкости стального инструмента для СТП, резко увеличивая его стоимость и сроки изготовления. Поэтому для сварки материалов более прочных и с большей температурой плавления, таких как медь и никель, было принято решение использовать инструменты из твердого сплава или поликристаллических сверхтвёрдых материалов (ПСТМ), табл. 1 [7, 8]. Соответственно, такие вы-

сокие физико-механические свойства обуславливают сложную и трудоемкую механическую обработку инструментов из кубического нитрида бора (КНБ).

Исследования показали, что в процессе СТП образуется в зоне прохода инструмента очень тонкая и однородная зернистая структура [9, 10]. Также можно отметить, что твердость обрабатываемого материала в значительной мере зависит от вращательных и поступательных скоростей инструмента и широко варьируется в области обработки, которые определяют распределение скоростей деформации материала в обрабатываемой зоне, коррелирующие с распределением скоростей деформации и средним размером зерен микроструктуры, связанных параметром Зенера–Холломона.

Г. Грант, С. Вейл [15] исследовали процесс твердофазной сварки трением с перемешиванием. Они показали, что при погружении инструмента в поверхностный слой металла, в результате совершаемой работы трения и пластического деформирования, металл нагревается до температуры, достаточной для снижения предела текучести и твердости до вязкопластического состояния. При этом авторы предложили разделить поперечное сечение соединения, выполненное СТП, на условные зоны: мелкозернистую «сердцевину» перемешанного металла (ПМ) шва, которая состоит из рекристаллизованной зоны с измененной микроструктурой, зоны термомеханического влияния (ЗТМВ), зоны термического влияния (ЗТМ) и основного металла [15].

Именно особенностям структуры зон ПМ шва и ЗТМВ, образованным при трении с перемешива-

Т а б л и ц а 1. Физико-механические свойства некоторых материалов, используемых для изготовления инструментов [7, 8]

Материал	HRC	HV, ГПа	$\sigma_{изг}$, ГПа	$\sigma_{сж}$, ГПа	Термостойкость, К	KTP, $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Быстрорежущая сталь	62...67	-	2...6	2,5...4,0	900...1000	9...12
Твердый сплав	88...89	13...14	0,75...2,6	3,5...5,9	1100...1300	3,0...7,5
ПСТМ — КНБ	-	30...40	0,4...1,5	2,0...6,5	1200	4,9...7,9

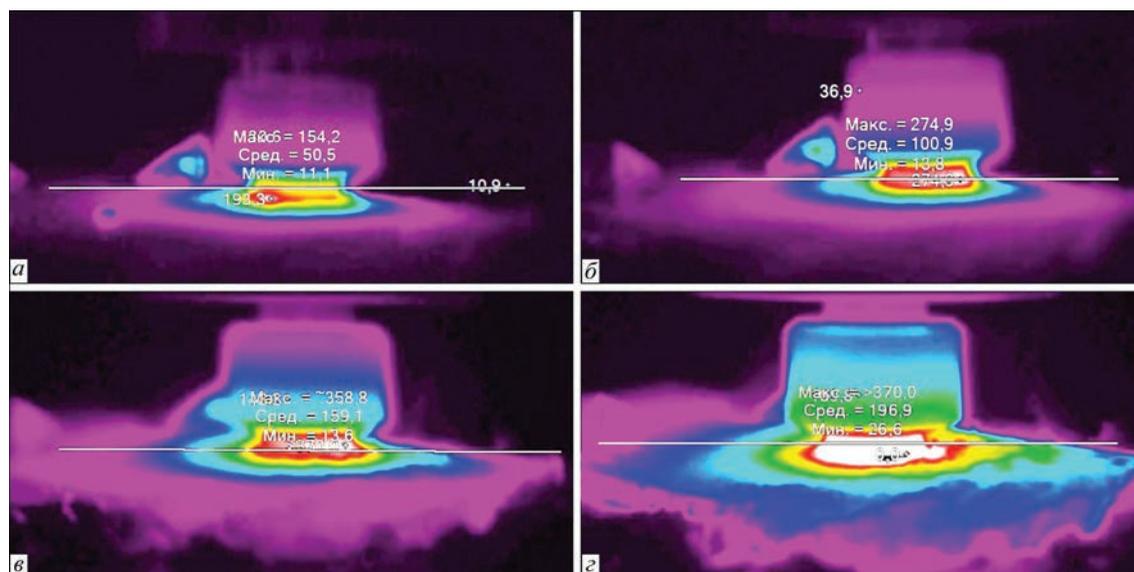


Рис. 3. Изменение распределения температуры на поверхности образца магниевого сплава МЛ10, измеряемой инфракрасным тепловизором Fluke-ir25 в различные моменты времени движения инструмента по образцу: а — 5; б — 10; в — 15; г — 20 с

нием, уделяется основное внимание в настоящей работе.

Исследование тепловыделения в зоне обработки СТП магниевых сплавов. Исследование процесса тепловыделения при взаимодействии инструмента с обрабатываемым поверхностным слоем металла осуществлялось с фиксированием составных параметров нагрузки инструмента и измерением распределения температуры нагрева инструмента. Однако структура металла и параметры этой зоны будут зависеть от формы и размеров инструмента, физико-механических характеристик обрабатываемого материала и кинематических параметров движения инструмента. Поэтому одной из первоочередных задач при создании инструмента для СТП является задача определения распределения температуры в разных точках зоны его взаимодействия и, тем самым, изучения теплофизических условий работы и, на этой основе, формулирования более обоснованных граничных условий для решения задачи о термонапряженном состоянии инструмента для СТП, в зависимости от кинематических параметров его движения [10].

Как известно, в процессе трения с перемешиванием за счет трения между вращающейся поверхностью инструмента и металлом изделия, а также работы деформирования этого металла, образуется

источник тепла большой интенсивности. Поэтому для определения основных факторов влияния процесса перемешивания или сварки на изменение структуры металла в зоне перемешивания, исследовался процесс тепловыделения в этой зоне при СТП или модификации структуры поверхностных слоев металлов и сплавов в зависимости от кинематических и силовых параметров взаимодействия инструмента с металлом изделия [16].

В качестве объекта исследования влияния процесса ТП на изменение состояния структуры металла был выбран магниевый сплав МЛ10, который широко используется в авиационной и космической технике. Рассмотрим некоторые справочные свойства этого сплава, относящегося к жаропрочным литейным магниевым сплавам [17,18]. Сплав МЛ10 относится к системе Mg–Nd–Zr. Структура этого сплава представляет собой твердый раствор неодима, циркония и цинка в магнии и их эвтектики по границам зерен, в состав которой входит соединение Mg9Nd. Средние размеры зерна исходного сплава МЛ10 достигают 75...100 мкм (см. рис. 5). Механические свойства сплава при комнатной температуре довольно высокие, но главной особенностью свойств этого сплава является то, что они сохраняются и при повышенных (до 250 °С) температурах.

Обработка поверхностных слоев образцов магниевого сплава МЛ10 выполнялась стальным инструментом на глубину 6 мм при шести режимах вращения инструмента: скорости сварки v от 20 до 40 мм/мин и скорости вращения инструмента ω от 600 до 800 мин⁻¹ [9]. Измерение температуры и определение распределения поля температуры в зоне модификации сплава МЛ10 фиксировали с помощью инфракрасного тепловизора Fluke-ir25 в различные моменты времени движения инстру-

Таблица 2. Изменение максимальной температуры в зоне обработки образцов сплава МЛ10 при разных кинематических параметрах движения инструмента в поверхностном слое образцов

Скорость сварки v , мм/мин	Максимальная температура, °С	
	Скорость вращения инструмента ω , мин ⁻¹	
	630	800
20,0	360	350
31,5	350	360
40,0	340	380

Сварка трением с перемешиванием

мента по образцу (с дискретностью 5 с) (рис. 3). Средние значения температуры в зоне обработки СТП на поверхности образцов сплава МЛ10 при разных кинематических параметрах движения инструмента в поверхностном слое образцов приведены в табл. 2. Отметим, что максимальная температура нагрева сплава МЛ10 в зоне контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемым слоем образца достигала 380 °С.

Изменение распределения температуры в сечении поперек ширины зоны взаимодействия инструмента во времени приведено на рис. 4. При этом следует отметить, что температура в зоне действия инструмента для реализации процесса СТП (ТП) должна достигать уровня $T = (0,4...0,6)T_{пл}$. В результате выполненных измерений определены не только средние значения температуры на поверхности контактной зоны, но и время, которое тратится от начала погружения инструмента в металл до достижения теплового равновесия потоков тепла, которые образуются непосредственно в зоне обработки и потока тепла, который излучается с поверхности образца и инструмента. Следовательно, проходит 15...20 с, после чего тепловое равновесие в зоне обработки стабилизируется (рис. 4) [9, 16].

Полученный результат имеет также и технологическую сторону, которая состоит в необходимости получения одинаковых условий работы инструмента с металлом изделия, поэтому надо иметь в виду, что до входа инструмента в зону обработки металла изделия металл в зоне контакта с инструментом достигает необходимой температуры только на 15 секунде, т. е. начинать процесс обработки изделия следует только с искусственного кронштейна.

Модификация структуры поверхностных слоев магниевых сплавов. Под модификацией структуры сплава мы понимаем процессы изменения его структуры аналогичные тем, которые имеют место при структуризации металла в процессе горячей прокатки иликовки, т. е. известные процессы структурирования и измельчения зерен структуры под действием интенсивных пластических деформаций. Исследование по обработке поверхностных слоев изделий из магниевых сплавов трением с перемешиванием направлены на определение влияния кинематических и силовых параметров этого процесса на изменение структуры и свойств магниевых сплавов.

Модификацию структуры поверхностных слоев магниевого сплава МЛ10 выполняли стальным инструментом на глубину 6 мм. Как уже отмечалось выше, в процессе СТП инструмент формирует зону ПМ, зону ЗТМВ, которая впоследствии и определяет прочность соединения перемешан-

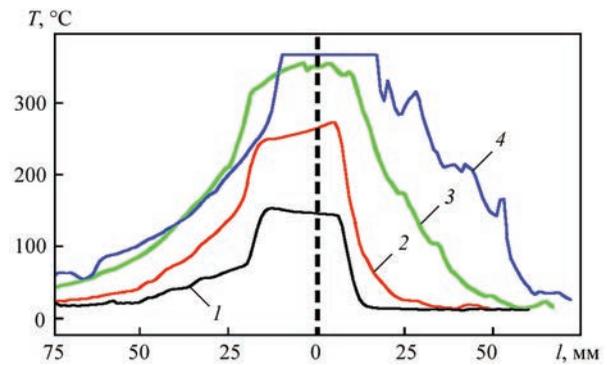


Рис. 4. Изменение распределения температуры в контактной зоне инструмента с поверхностным слоем образца магниевого сплава МЛ10 с начала его горизонтального движения во времени: 1 — 5; 2 — 10; 3 — 15; 4 — 20 с

ного металла с основным металлом изделия и ЗТВ (рис. 5). Используя стандартные методы стереологии, были проанализированы структуры основного металла сплава МЛ10 и разных зон ПМ и ЗТМВ (см. рис. 5–11), на основании чего были определены зна-

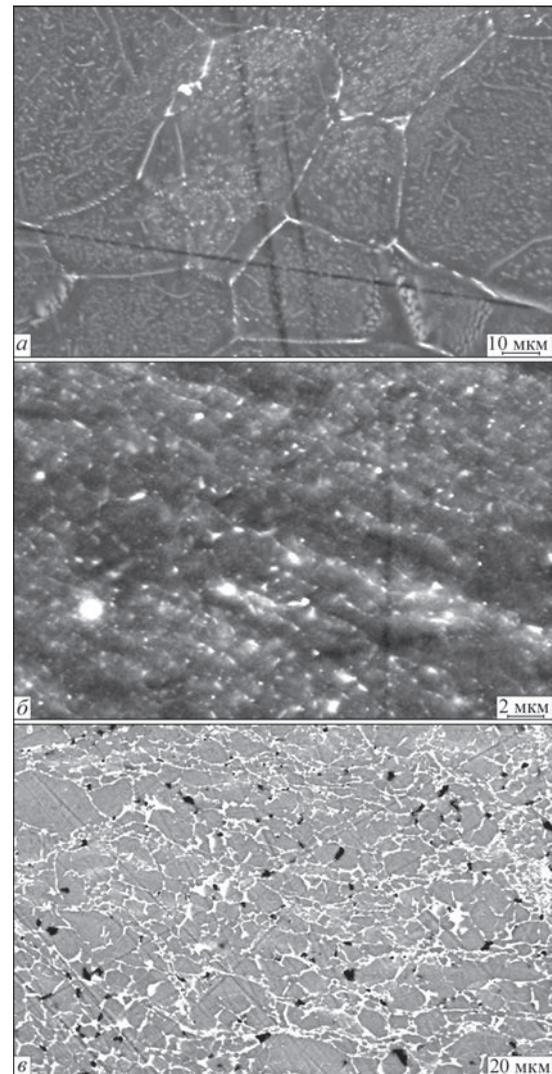


Рис. 5. Размер зерен сплава МЛ10 в зонах обработки СТП: а — основной металл (75,8 мкм); б — зона ПМ ($d_{ср} = 1,2...4,5$ мкм); в — промежуточная зона ЗТМВ между зоной обработки ПМ и основным металлом ($d_{ср} = 7,8$ мкм)

чения среднего размера зерна сплава в этих зонах по сравнению с величиной зерна сплава в исходном состоянии ($d_{cp} = 75,8$ мкм).

Таким образом, в результате проведенного исследования определено распределение средних значений размеров зерен в зонах технологического процесса обработки сплава МЛ10: средний размер зерен в основном металле МЛ10 — 75,8; в ЗТМВ — 7,8; в зоне ПМ — 1,2...4,5 мкм

Влияние кинематических параметров движения инструмента на формирование промежуточной зоны ЗТМВ при СПТ сплава МЛ10. Рассмотрим влияние кинематических параметров движения инструмента в диапазоне скоростей сварки 20...40 мм/мин и при скоростях вращения инструмента 630 и 800 мин⁻¹ на формирование их структуры и толщину L промежуточных зон ЗТМВ при СПТ магниевого сплава МЛ10 (рис. 6–11). Как уже отмечалось выше, структура зоны ПМ и ЗТМВ формировалась при фиксированных кинематических параметрах и глубине погружения инструмента в поверхностный слой образца на 6 мм.

Таким образом, на основании анализа изображений структуры металла в зонах СПТ литейного магниевого сплава МЛ10 при разных кинематических режимах модификации поверхностного слоя образцов можем сделать вывод, что режим СПТ сплава МЛ10 близкий к оптимальному при скоростях сварки 40 мм/мин и при скорости вращения инструмента 630 мин⁻¹, потому что в этом случае толщина зоны ЗТМВ достигает максимального размера $L = 1200$ мкм (табл. 3). Именно при соблюдении этого условия на границе между ЗТМВ и основным металлом не образуются расслоения и трещины, что обеспечивает максимальную прочность соединения.

На основании выполненного анализа состояния структуры ТП в магневом сплаве МЛ10 можно сделать следующие выводы.

В металле ТП и ЗТВ в отличие от основного металла наблюдаются принципиальные измене-

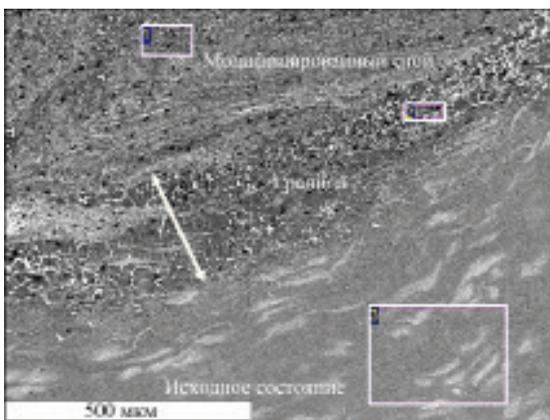


Рис. 6. Микроструктура модифицированного поверхностного слоя образца сплава МЛ10 при режиме обработки № 1 ($v = 20$, мм/мин; $\omega = 630$ мин⁻¹; $L = 250$ мкм)

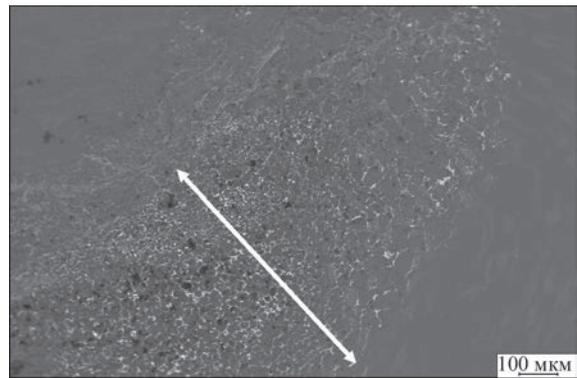


Рис. 7. Микроструктура модифицированного слоя образца МЛ10 при режиме обработки № 2 ($v = 31$, 5 мм/мин; $\omega = 630$ мин⁻¹; $L = 800$ мкм)

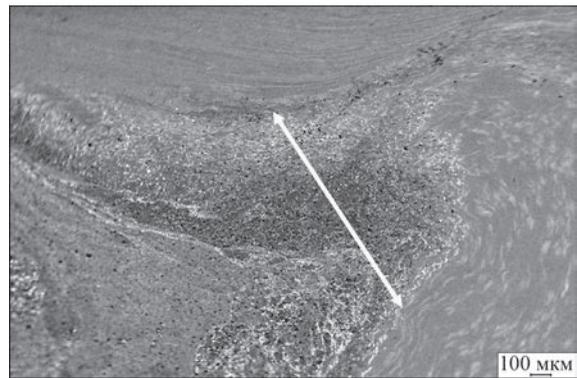


Рис. 8. Структура модифицированного слоя образца МЛ10 при режиме обработки № 3 ($v = 40$ мм/мин; $\omega = 630$ мин⁻¹; $L = 1200$ мкм)

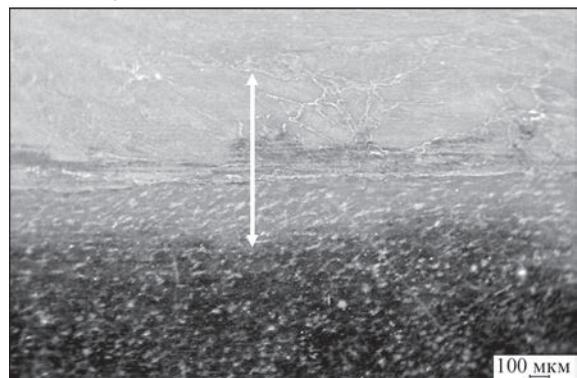


Рис. 9. Структура модифицированного слоя образца МЛ10 при режиме обработки № 4 ($v = 20$ мм/мин; $\omega = 800$ мин⁻¹; $L = 1100$ мкм)

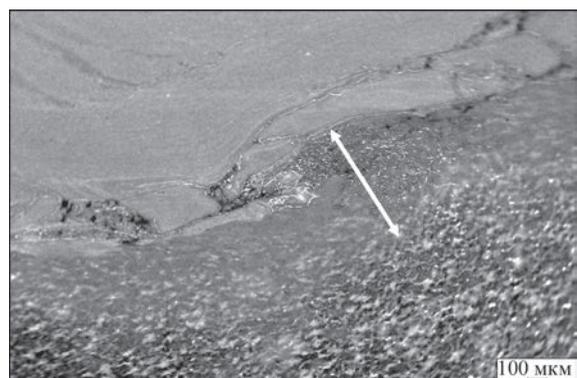


Рис. 10. Структура модифицированного слоя образца МЛ10 при режиме обработки № 5 ($v = 31,5$ мм/мин; $\omega = 800$ мин⁻¹; $L = 800$ мкм)



Рис. 11. Структура модифицированного слоя образца МЛ10 при режиме обработки № 6 ($v = 40$ мм/мин; $\omega = 800$ мин⁻¹; $L = 300$ мкм)

ния структуры основного металла, что является следствием измельчения зерен исходного металла (до размеров зерна 1,2...4,5 мкм), что в 16...63 раз меньше размера зерна в основном металле (75,8 мкм), в процессе СТП. Это явление типично для всех соединений, выполненных СТП, независимо от его технологических параметров.

Структура металла шва в поперечном сечении практически однородная, за исключением зоны ее сопряжения с основным металлом и приповерхностной области внешней стороны шва, который образовывался при контакте с вращающимся инструментом. Благодаря измельчению зерен основного металла в результате пластической деформации в процессе СТП происходит формирование принципиально другой структуры — мелкодисперсной, близкой к равновесной, что позволяет получить более высокие свойства прочности и пластичности металла шва. Структура металла ЗТМВ околошовной зоны в соединении СТП может быть сопоставимой с исходной, но в отличие от текстуры основного металла она отличается размерами зерна практически в 10 раз ($d_{cp} = 7,8$ мкм), а также ориентацией и формой зерен. Зона сопряжения металла шва с основным металлом — это область, которая представляет собой ЗТМВ шириной от 250 до 1200 мкм с прилегающими к ней объемами металла со стороны шва и основного металла. Металл ЗТМВ, как и металл шва, является зоной максимально нагретого металла, подвергающегося интенсивному механическому воздействию вращающегося сварочного инструмента. Ширина ЗТМВ в сварном соединении сплава МЛ10 находится в прямой зависимости от теплового воздействия при сварке. Структура металла ЗТМВ является переходной зоной от мелкозернистой (в металле ПМ шва) до рекристаллизованной, которая частично сохраняет текстуру основного металла. Со стороны основного металла вдоль границ больших зерен наблюдаются мелкие равноосные разориентированные зерна. Подобное изменение структуры является следствием влияния на металл околошовной зоны

Таблица 3. Влияние параметров ТП на толщину переходной зоны (сопряжение ЗТМВ с основным металлом сплава МЛ10)

Скорость сварки v , мм/мин	Номер режима/скорость вращения инструмента ω , мин ⁻¹ /толщина промежуточной зоны ЗТМВ – L , мкм	
	20,0	№ 1/630/250
31,5	№ 2/630/800	№ 5/800/800
40,0	№ 3/630/1200	№ 6/800/300

значительных пластических деформаций, которые имеют место в процессе формирования сварного соединения, а также процессов рекристаллизации в условиях нагрева в процессе СТП.

Средний размер зерен в зоне ЗТМВ составляет 7,85 мкм, что меньше в 10 раз размера зерен в основном металле. Максимальная толщина области ЗТМВ с рекристаллизованной структурой металла достигает 1200 мкм, при этом максимальные значения температуры нагрева металла на поверхности шва для исследованных режимов СТП (скорость сварки 40 мм/мин и скорость вращения инструмента 630 мин⁻¹) не превышают 340...350 °С. Как показали результаты металлографического анализа, металл околошовной зоны ЗТМВ может быть наиболее слабым звеном между основным металлом и металлом шва. С целью уменьшения разупрочняющего термического влияния СТП, сварку целесообразно выполнять на режимах с ограниченным тепловыделением.

С помощью метода дифракции отраженных электронов на растровом электронном микроскопе с энергодисперсионным анализатором определено, что в зоне ТП магниевых и алюминиевых сплавов имеет место разрушение и разориентация кристаллитов исходного металла, проявляющиеся в формировании мелкозернистой структуры (размер зерна 1,2...4,5 мкм), что в 16...63 раз меньше исходных размеров зерен (75,8 мкм).

1. Pat. 000444721 US. Spinning Tubes. Peoria, Ill. 13 / J. H. Bevington. – Jan 1891.
2. А. с. 97024 СССР. Способ холодной стыковой сварки металлических деталей / К. К. Хренов, Г. П. Сахацкий. – Заяв. 20.07.1953, Бюл. № 2.
3. А. с. 106270 СССР, МКИ В23к 20/12. Способ сварки встык / А. И. Чудиков. – 1957, Бюл. № 5.
4. А. с. 126732. Способ сварки трением встык разнородных металлов / Н. Н. Кабанов, И. В. Аверин. – Заявл. 03.06.1959; опубл. 01.01.1960, Бюл. № 5.
5. Pat. on friction stir butt welding. 1991. – International: PCT/GB92/02203; British: 9125978.8; USA: 5460317. – Welding Institute / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham [et al.].
6. Покляцкий А. Г. Прочность соединений тонколистовых алюминиевых сплавов, полученных сваркой трением с перемешиванием / А. Г. Покляцкий, А. Я. Ищенко, М. Р. Яворская // Автоматическая сварка. – 2007. – № 9. – С. 50–53.
7. Зеленин В. И. Восстановление плит медных кристаллизаторов непрерывной разливки стали методом наплавки трением с перемешиванием / В. И. Зеленин, М. А. Полещук, Е. В. Зеленин и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и техноло-

- гия его изготовления и применения. – 2010. – Вып. 13. – С. 476–479.
8. Розробка конструкції та технології виготовлення інструменту для зварювання методом тертя з перемішуванням сплавів на основі Cr, Ni, Co. Виготовлення дослідних зразків інструменту та проведення лабораторних досліджень характеру їх зношування і руйнування в процесі роботи: Звіт робіт по договору Р7.5.2-2013. – ІНМ НАН України, 2013.
 9. Розробка інструментів із надтвердих матеріалів для зварювання тертям з перемішуванням, призначених для виробництва та відновлення ресурсу конструкцій авіаційної та космічної техніки з алюмінієвих та магнієвих сплавів: Звіт робіт по договору № Р8.6.1. – ІНМ НАН України, 2014.
 10. Моделирование тепловыделения при сварке и модификации структуры металлов и сплавов трением с перемешиванием / В. М. Нестеренков, В. А. Дутка, А. Л. Майстренко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 5. – С. 5–14.
 11. Review: friction stir welding tools / R. Rai, A. De, H. K. D. N. Bhadeshia [et al.]. // Science and Technology of Welding and Joining. – 2011. – Vol. 16. – P. 325–342.
 12. Миронов С. Ю. Формирование зеренной структуры при сварке трением с перемешиванием / С. Ю. Миронов // Физическая мезомеханика. – 2014. – Вып. 17. – С. 103–113.
 13. Lee J. A. Friction Stir Welding for Aluminum Metal Matrix Composites (MMC's) (MSFC Center Director's Discretionary Fund Final Report, Project № 98-09) NASA / TM-1999-209876 / J. A. Lee, R. W. Carter, J. Ding.
 14. Штрикман М. М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (Озор) / М. М. Штрикман // Сварочное производство. – 2007. – № 10. – С. 25–32.
 15. Joining Technologies for Coal Power Applications Pacific Northwest National Laboratory DOE-FE Annual Review Meeting / G. Grant, S. Weil // Advanced Research Materials Program Portland, Oregon April 26–28, 2011.
 16. Возможности модифицирования структуры легких сплавов трением с перемешиванием / В. М. Нестеренков, А. Л. Майстренко, В. А. Лукаш [и др.] // Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении», 22–24 мая 2013 г., г. Одесса. – С. 117–120.
 17. Колобнев И. Ф. Справочник литейщика. Цветное литье из легких сплавов / И. Ф. Колобнев, В. В. Крымов, А. В. Мельников; изд-е 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1974. – 416 с.
 18. Портной К. И. Магниево-алюминиевые сплавы. Справочник / К. И. Портной, А. А. Лебедев. – М.: Металлургия, 1952. – 736 с.

Поступила в редакцию 28.03.2016

Сварочное оборудование марки «ПАТОН» в Европе и в мире

Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона уже более 55 лет успешно внедряет новые сварочные технологии и оборудование, разрабатываемые Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и «Опытным конструкторско-технологическим бюро» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Сегодня Заводом выпускается более 40 тысяч ед. оборудования в год. Серийно выпускается следующее сварочное оборудование:

- инверторная сварочная техника (9 моделей) для ручной дуговой и аргодуговой сварки на токах от 160 до 250 А;
- сварочные трансформаторы (7 моделей) для электродуговой сварки и переплава на токах от 250 до 10000 А;
- сварочные полуавтоматы (5 моделей) для полуавтоматической сварки на токах от 150 до 650 А;
- сварочные выпрямители (4 модели) для электродуговой сварки на токах от 300 до 5000 А;
- сварочные тракторы (3 модели) для автоматической сварки под флюсом на токах до 1200 А;
- выпрямители для многопостовой ручной дуговой сварки (2 модели) на токи от 650 до 5000 А;
- универсальные сварочные выпрямители для автоматической сварки под слоем флюса и полуавтоматической сварки в среде защитных газов (2 модели), а также балластные реостаты для регулировки сварочного тока на каждом посту от многопостовых выпрямителей.

Собственная линия по производству сварочных электродов: Elite, АНО-4, АНО-21, АНО-36, МР-3, УОНИ-13/55, УОНИ-13/45, Т-590, ОЗЛ-8, ЦЛ-11, ЦЧ-4.

Продукция Завода сертифицирована согласно украинским и европейским стандартам (ЕС), налажена работа сервисного центра по гарантийному обслуживанию и технической поддержке.

Триста дилеров и десяток крупных торговых сетей представляют продукцию марки «ПАТОН» по всей Украине.

География экспорта: Россия, Беларусь, Грузия, Молдова, Казахстан, Азербайджан, Польша, Чехия, Объединенные Арабские Эмираты, Мьянма, Экваториальная Гвинея и др.

В октябре 2015 г. Завод выполнил контракт на поставку сварочного оборудования для переоснащения одного из самых известных сталелитейных заводов группы компаний «CKD Kutna Hora a.s.» (Чешская Республика), который является крупнейшим производителем качественной литой продукции.

В апреле 2016 г. Завод поставил крупную партию сварочных инверторов ВДИ-160Е в Польшу для дистрибьюторской компании, которая планирует вывести сварочное оборудование марки «ПАТОН» на рынки Европы, включая Чехию, Литву, Латвию, Молдову и др. страны. За последние несколько лет оборудование и электроды марки «ПАТОН» хорошо зарекомендовали себя на рынке Грузии, где продается более 500 аппаратов в месяц, налажена работа сервисного центра, ведутся переговоры о поставках продукции марки «ПАТОН» в Армению и Азербайджан.

По материалам пресс-релиза