

УДК 621.791

Майстренко А. Л., Лукаш В. А., Заболотный С. Д.

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины. Украина, г. Киев

ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ СТЫКОВЫХ, НАХЛЕСТОЧНЫХ, ТАВРОВЫХ СВАРОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, НАПЛАВКИ И КЛЕПКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Разработаны конструкции и технологические процессы изготовления инструментов для обработки деталей из магниевых и алюминиевых сплавов, меди и ее сплавов, сталей и иных материалов трением с перемешиванием с целью образования стыковых, нахлесточных, тавровых сварных соединений. В зоне сварных соединений установлено формирование мелкозернистой структуры сплава (размер зерна 1,2...4,5 мкм), что в 16...63 раза меньше размеров зерен основного металла сплава.

Ключевые слова: инструменты; сварка трением с перемешиванием; мелкозернистая структура; размер зерна микроструктуры; прочность соединений.

Вступление

Принимая во внимание то, что многочисленные технологические способы соединения металлических деталей конструкций с использованием электрической дуги, плазмы, луча лазера или электронного луча и их комбинаций, имеют много технологических и экономических преимуществ, но их всех объединяет одно общее явление, то, что в зоне соединения деталей, образуется жидкая фаза металла. Эта принципиальная и важная особенность процесса обуславливает изменение структуры металла после его рекристаллизации, в частности, увеличение размера зерна, образование других фаз и окислов, а также формирование остаточных температурных напряжений, которые отрицательно отражаются на прочностных свойствах соединений. Поэтому, на протяжении всей истории существования традиционных способов жидкофазной сварки металлов, ученые всего мира разрабатывали альтернативные способы соединения, а именно твердофазные, которые позволили, хотя бы частично, уменьшить влияние перечисленных явлений, характерных для жидкофазного соединения металлических деталей плавлением.

Одним из первых твердофазную сварку труб и стержней трением выполнил Бевингтон Дж. (США, 1891 г.) [1], затем Хренов К. К. и Сахацкий Г. П. (ИЭС АН УССР, 1953) [2] предложили и исследовали способ «холодной» сварки трением. Однако, использовать этот метод для сваривания плоских листовых конструкций встык и нахлест, а также осуществлять наплавку других металлов и сплавов, не представляется возможным.

Использование принципа твердофазной сварки трением плоских или криволинейных листовых деталей встык и нахлест было предложено в 1991 году в патенте Томаса У. М. и др. [3], 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 [3], 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 зримый успех СТП есть еще много проблем, которые должны быть решены для расширения 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 цик-

лических изгибающих сил, а также влиянию высоких температур. Отсутствие достоверной информации, в мировых научных источниках, и ответов на эти вопросы, делает невозможным успешное применение в отечественной промышленности новой прогрессивной технологии – сварки материалов методом трения с перемешиванием (СТП).

Принципиальная схема процесса сварки различных металлов методом трения с перемешиванием приведена на рис. 1, а. Основные части инструмента, первая, которая выступает над корпусом инструмента и предназначена для перемешивания разогретого металла, а вторая это бурт, которые при вращении с большой скоростью за счет трения разогревают металл (см. рис. 1, б), доводя его до пластического состояния и перемешивают металл (или металлы) в объеме вязко-пластического ядра, благодаря чему образуется неразъемное соединение металлических деталей.

Результаты исследований

Необходимо отметить, что экспериментальные работы в направлении «холодной сварки» давно проводятся в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и уже в течении 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 [4–6]. Анализ имеющихся источников по поводу изготовления инструментов такого типа дает представление о материалах, которые необходимо при этом использовать. 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 этого, 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 инструменты для СТП выполняются в виде цилиндров с закругленным 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 направлению вращательному движению инструмента. Для лучшего формирования шва и уменьшения усилий на инструмент, последний устанавливается не вертикально относительно плоскости поверхности, а наклоненным под небольшим углом 2–5° в сторону, противоположную направлению подачи.

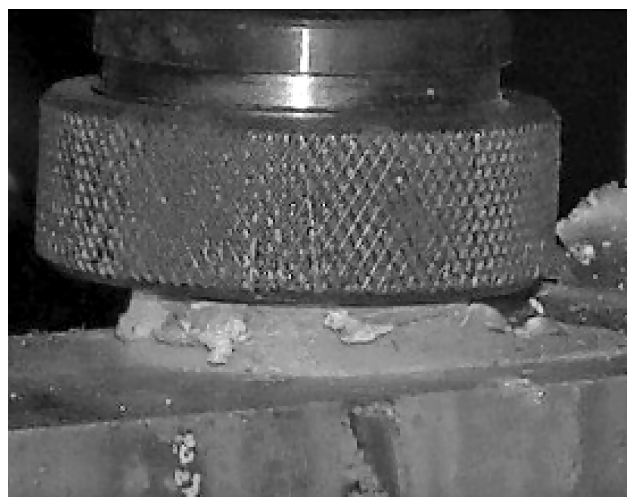
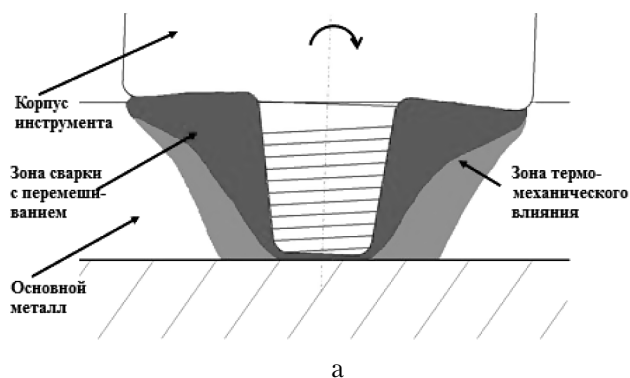


Рис. 1. Схема тепло-физической картины формирования сварного шва трением с перемешиванием (СТП) – (а); общий вид взаимодействия инструмента со свариваемыми деталями – (б)

Сложная форма наконечников инструмента вызвана необходимостью обеспечивать как можно лучшее перемешивание металла с целью повышения производительности процесса сварки различных видов (стыковой, нахлесточной, тавровых соединений, наплавки и точечной клепки). Результаты многочисленных исследований показали взаимосвязь между теплом, которое генерируется в зависимости от кинематических параметров процесса и статической прочностью шва [4–6]. Инструменты для наплавки и сварки трением с перемешиванием алюминиевых и магниевых сплавов были изготовлены из инструментальной стали Р18 (таблица 1), закаленной при температуре 1270°С (рис. 2, а) и стоимость инструмента будет в данном случае значительно меньше, что делает его применение в ряде случаев экономически эффективным.

В тоже 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 изготавливались из твердого спла-

Физико-механические свойства материалов, используемые для изготовления инструментов

| Материал | HRC, ГПа | HV, ГПа | $\sigma_{изг}$, ГПа | $\sigma_{ск}$, ГПа | Термостойкость, К | КТР, $\alpha \cdot 10^{-6}$ К ⁻¹ |
|-------------------------|----------|---------|----------------------|---------------------|-------------------|---|
| Быстрорежущая сталь P18 | 62...67 | – | 2...6 | 2,5...4,0 | 900...1000 | 9...12 |
| Твердый сплав ВК8 | 88...89 | 13...14 | 0,75...2,6 | 3,5...5,9 | 1100...1300 | 3,0...7 |
| ПСТМ – КНБ Киборит | | 30...40 | 0,4...1,5 | 2,0...6,5 | 1200 | 4,9...7,9 |

ва ВК8 (рис. 2, б), а для СТП сталей, никеля, кобальта и иных тугоплавких металлов и сплавов были созданы инструменты из поликристаллического сверхтвердого материала на основе кубического нитрида бора «Кубонит» (рис. 2, в) – таблица 1 [5].

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 сверхтвердых материалов (ПСТМ) [4–6]. Соответственно, такие высокие физико-механические свойства обуславливают и сложную, и трудоемкую механическую обработку инструментов из КНБ. Исследования показали, что СТП образует в зоне прохода инструмента очень тонкую и однородную зернистую структуру. Также заметим, что твердость обрабатываемого материала в значительной мере зависит от враща-

тельных и поступательных скоростей инструмента и широко варьируется в области обработки, которые определяют распределения скоростей деформации материала в обрабатываемой зоне. Мы предложили условно разделить поперечное сечение СТП соединения на условные зоны: мелкозернистую «сердцевину» перемешанного металла (ПМ) шва, который состоит из рекристаллизованной зоны с измененной микроструктурой, зоны термомеханического влияния (ЗТМВ), зоны термического влияния (ЗТМ) и основного металла (ОМ) [6].

Именно особенностям структуры зон перемешанного металла (ПМ) шва и термо-механического влияния (ЗТМВ), образованным при трении с перемешиванием, уделялось основное внимание в настоящей работе. 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

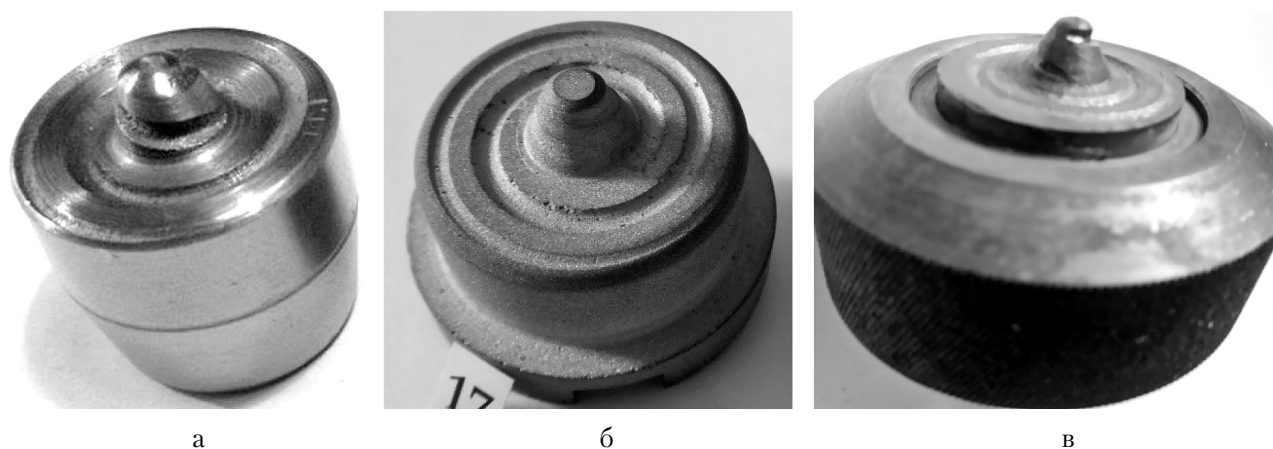


Рис. 2. Общий вид инструментов для сварки, наплавки и модификации металлов трением с перемешиванием [4–6]: а – из стали P18, для СТП алюминиевых и магниевых сплавов; б – из твердого сплава ВК8 для наплавки и точечной клепки; в – из кубического нитрида бора (Кубонит) для наплавки никеля и кобальта

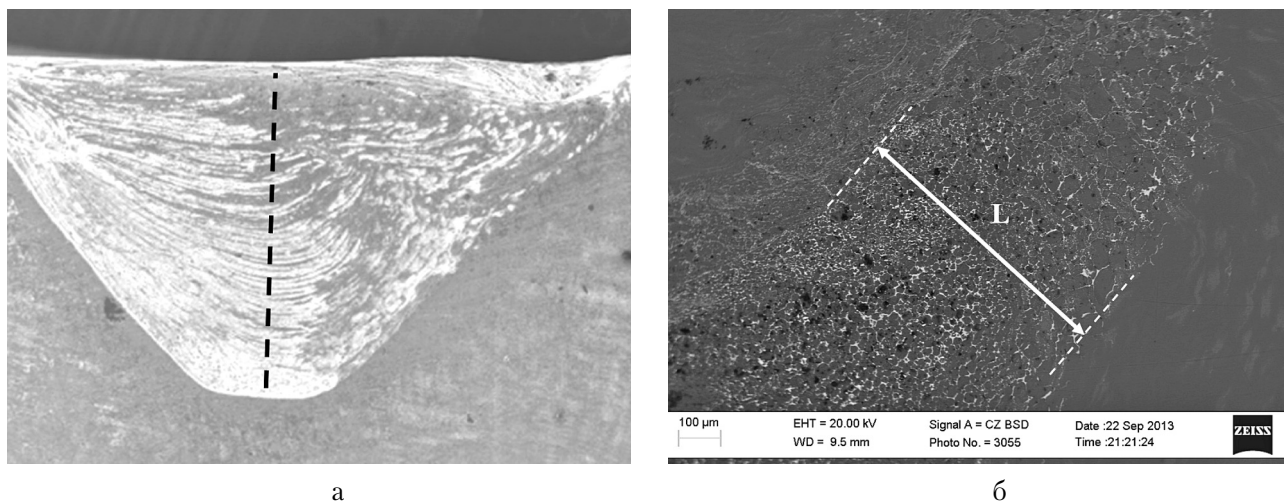


Рис. 3. Общий вид зоны СТП в магниевом сплаве МЛ10 – (а). Структура зоны ЗТМВ в образце МЛ10 при режиме обработки: $v = 31,5$ мм/мин; $\omega = 630$ мин⁻¹ – (б)

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. 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. 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. Механические свойства сплава при комнатной температуре довольно высокие, но главной особенностью свойств этого сплава есть то, что они сохраняются и при повышенных (до 250°С) температурах. СТП образцов магниевого сплава МЛ10 выполнялась стальным инструментом на глубину 6–10 мм при 6 режимах вращения инстру-

мента: скорости сварки v от 20 до 40 мм/мин и скорости вращения инструмента ω от 600 до 800 мин⁻¹ [5, 6]. Измерение температуры и определение распределения поля температуры в зоне модификации сплава МЛ10 фиксировались с помощью инфракрасного тепловизора Flukeir25 в различные моменты времени движения инструмента по образцу. Средние значения температуры в зоне обработки ТП на поверхности образцов сплава МЛ10 при разных кинематических параметрах движения инструмента в поверхностном слое образцов приведены в таблице 2. При этом следует отметить, что температура в зоне действия инструмента для реализации процесса СТП (ТП) должна достигать уровня $T = (0,4-0,6)T_{пл}$. Так, максимальная температура нагрева сплава МЛ10 в зоне контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемым слоем образца достигала 380°С.

В результате выполненных измерений определены не только средние значения температуры на поверхности контактной зоны, а и время, которое тратится от начала погружения инструмента в металл до достижения теплового равновесия потоков

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 $\omega = 630$ мин ⁻¹ | $\omega = 800$ мин ⁻¹ |
| 20,0 | 360 | 350 |
| 31,5 | 350 | 360 |
| 40,0 | 340 | 380 |

Распределение среднего размера зерна $d_{\text{ср}}$ сплава
в составных зонах процесса обработки СТП сплава МЛ10

| Средний размер зерен в основном металле МЛ10, мкм | в зоне ЗТМВ, мкм | в зоне ПМ, мкм |
|---|------------------|----------------|
| 75,8 | 7,8 | 1,2–4,5 |

тепла, которые образуются непосредственно в зоне обработки и потока тепла, который излучается с поверхности образца и инструмента.

Обработку СТП образцов магниевого сплава МЛ10 выполняли стальным инструментом на глубину 6–10 мм. Как уже отмечалось выше, в процессе СТП инструмент формирует зону перемешанного металла (ПМ), зону термо-механического влияния (ЗТМВ), которая в последствии и определяет прочность соединения перемешанного металла с основным металлом изделия и зону термического влияния (рис. 3). Используя стандартные методы стереологии, были проанализированы структуры основного металла сплава МЛ10 и разных зон ПМ и ЗТМВ (см. рис. 3), на основании чего были определены значения среднего размера зерна сплава в этих зонах по сравнению с величиной зерна сплава в исходном состоянии ($d_{\text{ср}} = 75,8$ мкм). Таким образом, в результате проведенного исследования, определено распределение средних значений размеров зерен в зонах технологического процесса обработки сплава МЛ10 (табл. 3).

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 СТП магниевого сплава МЛ10 –

рис. 3, б. 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 структуры металла в зонах СТП сплава МЛ10 при разных кинематических режимах модификации поверхностного слоя образцов можем сделать вывод, что режим СТП 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 (L) достигает максимального размера (см. рис. 3, б). Именно при соблюдении этого условия на границе между ЗТМВ и основным металлом не образуются расслоения и трещины, что обеспечивает максимальную прочность соединения [5, 6].

Разработанные инструменты были использованы в процессах наплавки плиты никеля (4 мм) на поверхность медной плиты восстанавливаемого кристаллизатора МНЛЗ (рис. 4), заваривании дефектов типа раковин в пластинах алюминиевого сплава Д16Т (рис. 5), сварке встык плит магниевого сплава МЛ10 (10 мм) или заваривании трещин – (рис. 6) и изготовлении стрингерной панели из сплава Д16Т (рис. 7).

На основании изложенного можно сделать следующие **выводы**:



Рис. 4. Процесс СТП наплавки пластины никеля (4 мм) на медную основу



Рис. 5. Процесс заваривания СТП раковин и трещин в пластине алюминиевого сплава Д16Т

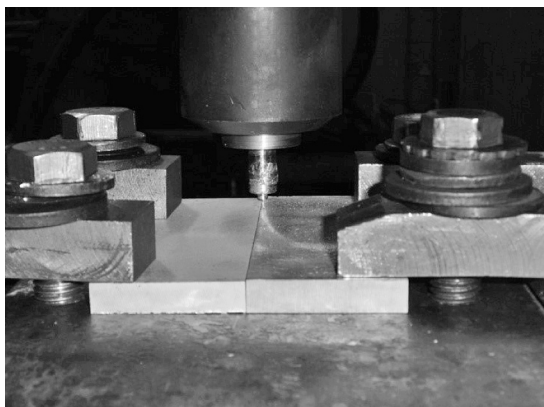


Рис. 6. Процесс СТП плит сплава МЛ10 (10 мм) встык



Рис. 7. Фрагмент стрингерной панели с приваренным СТП стрингером из сплава Д16Т

1. Разработаны конструкции и изготовлен типоразмерный ряд инструментов из инструментальной стали, твердого сплава и поликристаллического сверхтвердого материала «Кубонит» для сварки металлов и сплавов встык, внахлест, тавровых соединений, наплавки и клепки трением с перемешиванием;

2. В результате проведенных исследований при СТП магниевого сплава МЛ10 показано, что в металле зоны трения с перемешиванием (ТП) и зоне термомеханического влияния (ЗТМВ) в отличие от основного металла, наблюдается образование мелкозернистой структуры, которая является следствием измельчения зерен исходного металла (до размеров зерна 1,2–4,5 мкм), т.е. в 16–63 раз меньших размеров зерен в основном металле (75,8 мкм), что является решающим фактором в обеспечении прочности сварных соединений;

3. Применение разработанных инструментов в различных технологических процессах изготовления неразъемных соединений (наплавка плиты никеля на поверхность медной плиты, заваривание дефектов типа раковин в пластинах алюминиевого сплава Д16Т, сварка встык и нахлест плит алюминиевого и магниевого сплавов, изготовление стрингерной панели из сплава Д16Т), показало их надежность и перспективность.

Литература

- [1] US000444721. Bevington J. H. Spinning Tubes. Peoria, Ill. 13 Jan 1891.
- [2] АС 97024 СССР, Хренов К. К., Сахацкий Г. П. Способ холодной стыковой сварки металлических деталей. /Заяв. 20 июля 1953 г. Оpubл. в «Бюлл. изобр.» № 2 за 1954 г.
- [3] Thomas W. M., Nicholas E. D., Needham J. C. et al. Patents on friction stir butt welding. 1991. – International: PCT/GB92/02203; British: 9125978.8; USA: 5460317. Welding Institute.

- [4] Нестеренков В. М., Дутка В. А., Майстренко А. Л., Лукаш В. А., Заболотный С. Д., Ткач В. Н. Моделирование тепловыделения при сварке и модификации структуры металлов и сплавов трением с перемешиванием // Автоматическая сварка.– № 1.– 2015.– С. 5–14.
- [5] Применение метода трения с перемешиванием для сварки магниевых сплавов и модификации их структуры / А. Л. Майстренко, В. А. Лукаш, С. Д. Заболотный, Р. В. Страшко // Автоматическая сварка.– 2016.– № 5.– С. 74–81.
- [6] Гибридная технология, совмещающая электронно-лучевую сварку и сварку трением с перемешиванием в процессах восстановления элементов конструкций авиационной техники из магниевых сплавов / В. М. Нестеренков, Р. В. Страшко, А. Л. Майстренко, С. Д. Заболотный, В. Н. Ткач // Автоматическая сварка.– 2016.– № 5.– С. 99–106.

Maystrenko A. L., Lukash V. A., Zabolotny S. D.

V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine. Ukraine, Kiev

TOOLS FOR BUTT, LAPPED, T-SHAPED WELDING CONNECTION, THE BUILDING-UP WELDING AND RIVETING BY THE FRICTION STIR WELDING

The desing and manufacture process of tools are developed for handling by friction stir welding of details from magnesium and aluminium alloys, copper and its alloys, steels and other materials in ordet to formation butt, lapped and t-shaped welded connections. In a zone of welded connections the shaping of a sappy structure of alloy (a graine size 1,2...4,5 microns) is fixed, that in 16...63 times are less, than sizes of pellets of a base metal of alloy.

Keywords: tools; friction stir welding; a sappy structure; a microstructure graine size; strength of welded connections.

References

- [1] US000444721. Bevington J. H. Spinning Tubes. Peoria, Il. 13 Jan 1891.
- [2] Khrenov K. K., Sakhatsky G. P. Method of cold butt welding of metal products. USSR author's cert. 97024. Fill. 20.07.53.
- [3] Thomas W. M., Nicholas E. D., Needham J. C. et al. Patents on friction stir butt welding. 1991. – International: PCT/GB92/02203; British: 9125978.8; USA: 5460317. Welding Institute.
- [4] A. L. Majstrenko, V. M. Nesterenkov, V. A. Dutka, V. A. Lukash, S. V. Zabolotny and V. N. Tkach. Modeling of heat processes for improvement of structure of metals and alloys by friction stir method // Avtomaticheskaya svarka.– 2015.– № 1.– P. 5–14.
- [5] A. L. Majstrenko, V. A. Lukash, S. D. Zabolotny and R. V. Strashko. Application of friction stir method for welding of magnesium alloys and of their structure modifying/ A. L. Majstrenko, V. A. Lukash, S. D. Zabolotny and R. V. Strashko // Avtomaticheskaya svarka.– 2016.– № 5.– P. 74–81.
- [6] Hybrid technology combining electron beam welding and friction stir welding in the processes of repair of aircraft structure elements of magnesium alloys /A. L. Majstrenko, V. M. Nesterenkov, R. V. Strashko, S. D. Zabolotny and V. N. Tkach // Avtomaticheskaya svarka.– 2016.– № 5.– P. 99–106.