



ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МАССОПЕРЕНОСА ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

С помощью модели процесса сварки трением с перемешиванием изучено влияние конструктивных размеров рабочих поверхностей бурта и наконечника инструмента на особенности перемещения материала в зоне термодинамического воздействия. Показано, что образование неразъемного соединения происходит благодаря перемещению наконечником инструмента определенного объема пластичного материала и его перемешивания по всей толщине кромок. Форма рабочей поверхности торца бурта инструмента предопределяет траекторию перемещения, скорость движения, равномерность смешивания и степень уплотнения соединяемых материалов при затвердевании.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, моделирование процесса, массоперенос, конструкция наконечника инструмента, рабочая поверхность бурта

Получение неразъемных соединений в твердой фазе сваркой трением с перемешиванием (СТП) для изготовления сварных конструкций начали применять еще в 1990-х годах. Широкое распространение этот способ сварки получил при соединении сплавов на основе алюминия и магния, которые отличаются высокой пластичностью в условиях низкотемпературного нагрева [1–4].

Формирование шва при СТП происходит при нагреве металла в зоне сварки за счет трения до пластического состояния и перемещения под высоким давлением в объеме, ограниченном рабочими поверхностями инструмента и подкладкой. Основными параметрами СТП являются конструктивные особенности и размеры рабочих поверхностей инструмента, его расположение относительно вертикальной оси и поверхностей свариваемых заготовок, прижатие инструмента и глубина проникновения его наконечника встык, а также скорость вращения ω и линейного перемещения инструмента с определенной скоростью, равной скорости сварки $v_{св}$ [5, 6]. Эти параметры определяют условия фрикционного нагрева металла в зоне сварки и существенно влияют на значение и ориентацию сил, действующих на пластифицированный металл, а также на скорость и траекторию его перемещения. Понимание закономерностей массопереноса в зоне образования неразъемного соединения очень важно для определения оптимальных конструктивных размеров инструмента и параметров процесса сварки, которые обеспечивают выполнение плотных качественных швов.

Первые представления о характере перемещения пластифицированного металла при СТП по-

лучены с помощью экспериментов, которые базируются на мгновенной остановке движущегося потока материала [7]. Траекторию его движения в характерных зонах соединений оценивали по изменению положения специальных маркеров (очень мелких стальных шариков, медных шпилек, медной или титановой фольги, тонкой вольфрамовой проволоки, прослойки композиционных материалов и др.), которые располагали в стыке между свариваемыми кромками или на прилегающих к нему участках [7–10]. Данные об особенностях перемещения металла можно также получить при сварке между собой алюминиевых сплавов различных систем легирования, имеющих разное травление [11], или значительно отличающихся по цвету разнородных материалов [12]. Однако все перечисленные выше способы оценки массопереноса, происходящего при СТП, довольно трудоемки, поскольку при их использовании требуется просвечивание полученных сварных соединений рентгеновским излучением или подготовка вырезанных из них шлифов полированием и травлением. С этой целью предложено смоделировать процесс СТП, используя в качестве соединяемых материалов разноцветные бруски пластилина. Сечения в различных плоскостях таких соединений, полученные с помощью натянутой стальной проволоки диаметром 0,15 мм, без какой-либо дополнительной подготовки позволяют проследить за перемещением соединяемых материалов в зоне воздействия на них рабочей поверхности инструмента.

Такая модель, в частности, позволяет оценить влияние конструктивных размеров рабочих поверхностей инструмента на особенности массопереноса в процессе СТП.

Бруски из пластилина различных цветов соединяли между собой встык линейными швами на разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона установке для сварки тонколистовых алюминиевых сплавов,

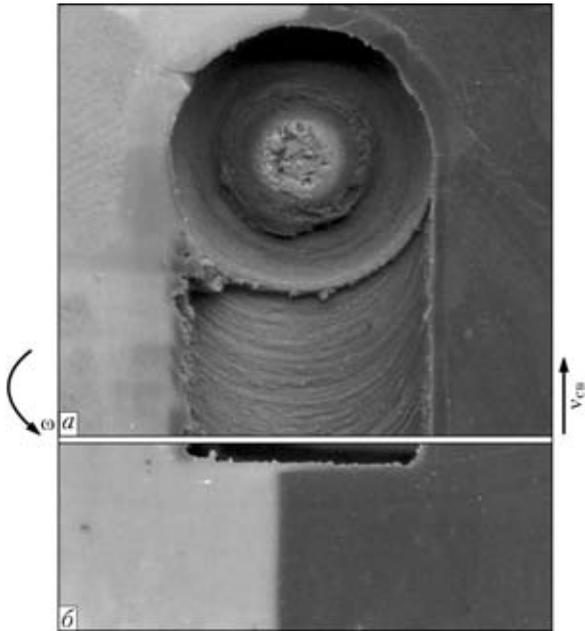


Рис. 1. Внешний вид лицевой поверхности (а) и поперечного сечения (б) соединения, полученного СТП с использованием инструмента без наконечника

а затем исследовали внешний вид и сечения полученных соединений. Результаты показали, что при использовании инструмента без проникающего наконечника образование шва по всей толщине свариваемых кромок не происходит (рис. 1). Шов формируется только непосредственно под торцевой поверхностью бурта при перемещении очень тонкого слоя металла вследствие вращения и перемещения инструмента вдоль стыка.

Форма рабочей поверхности торца бурта инструмента практически не влияет на глубину шва,

но оказывает существенное влияние на условия смешивания материалов, поступающих со стороны набегания инструмента, где направления его вращения и перемещения совпадают (рис. 2, з-е, слева), и отхода, где направления его вращения противоположные (рис. 2, з-е, справа). Кроме того, она предопределяет скорость перемещения и траекторию движения перемешиваемых порций соединяемых материалов в определенном ограниченном пространстве, а также их степень уплотнения при затвердевании, что влияет на качество формирования лицевой поверхности шва. Так, использование инструментов различной конфигурации с торцевой рабочей поверхностью бурта может привести к изменению на поверхности шва формы чешуек, частоты их чередования и распределения по глубине залегания, плавности перехода от углублений к выпуклостям и др.

Результаты исследований показали, что при сварке инструментом с плоской торцевой поверхностью бурта происходит периодическое нарушение сплошности потока материала, вследствие чего на лицевой поверхности шва образуется грубая чешуйчатость, а местами — отдельные надрывы, которые ухудшают качество соединений. Наличие на поверхности шва конической или полусферической канавки способствует равномерному непрерывному перемещению материала и формированию шва с практически гладкой поверхностью, состоящей из мелких чешуек, несущественно отличающихся по толщине. При этом степень перемешивания свариваемых материалов на лицевой поверхности шва существенно зависит от диаметра бурта инструмента. Так, его увели-

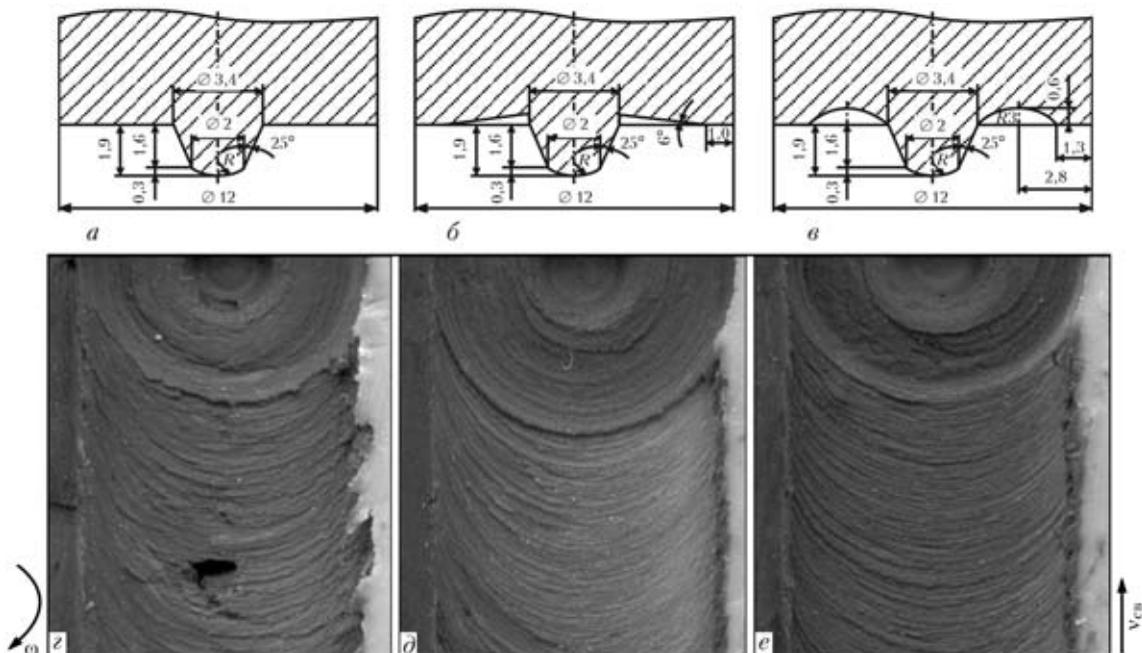


Рис. 2. Схемы рабочей части инструментов для СТП с плоской торцевой поверхностью бурта (а), конической (б) и полусферической (в) канавкой на ней и внешний вид лицевой поверхности швов, полученных с использованием соответствующих инструментов (з-е)

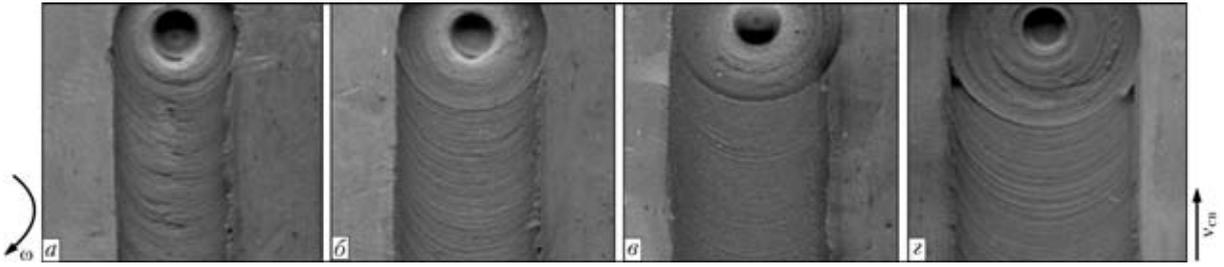


Рис. 3. Поверхности швов, выполненных СТП с использованием инструментов с диаметром бурта 10 (а), 12 (б), 14 (в) и (з) 16 мм и конической канавкой на их торцевой поверхности

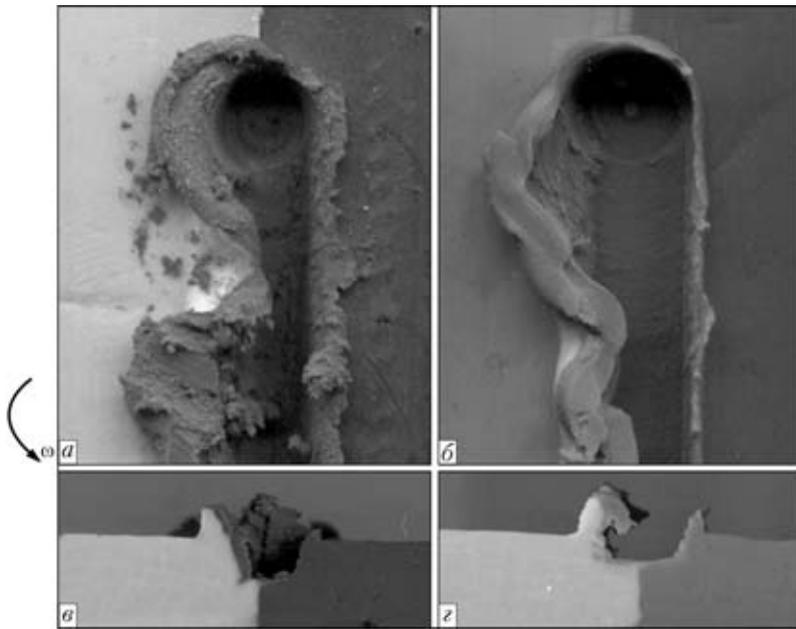


Рис. 4. Внешний вид лицевых поверхностей (а, б) и поперечных сечений швов (в, з), полученных СТП без прижатия бурта инструмента к соединяемым материалам при использовании наконечников конической формы с гладкой боковой поверхностью (а, в) и цилиндрической формы с резьбовой нарезкой на боковой поверхности (б, з)

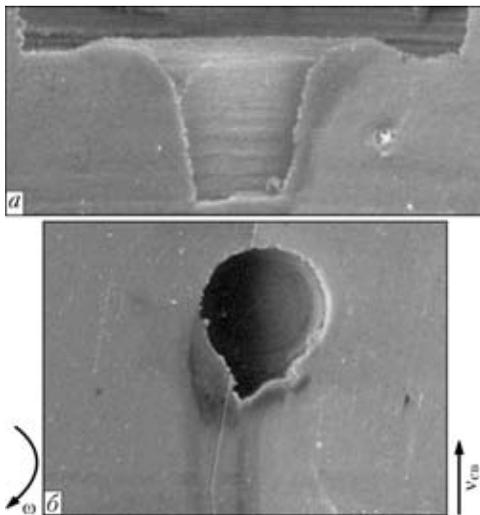


Рис. 5. Внешний вид сечения вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскости стыковых соединений, полученных СТП с использованием инструмента с наконечником конической формы и гладкой боковой поверхностью

чение с 10 до 16 мм приводит к значительному повышению степени измельчения, при этом лицевая поверхность шва получается более однородной (рис. 3).

Наконечник инструмента, кроме нагрева материала в зоне сварки, главным образом должен обеспечить его перемещение и перемешивание по

всей толщине стыка. Чтобы проследить за траекторией движения материала в процессе сварки непосредственно при перемещении вдоль стыка вращающегося наконечника инструмента, рабочую поверхность бурта не прижимали к свариваемому материалу. На рис. 4 хорошо видно, как материал переносился наконечником со стороны набегания инструмента (правая сторона шва) к стороне его отхода (левая сторона шва). На ней образовался тонкий слой, который располагался по всей толщине проникновения наконечника. При этом конфигурация боковой поверхности наконечника инструмента практически не влияла на характер перемещения материала. Под торцом наконечника также видна тонкая прослойка, нанесенная из материала, расположенного со стороны набегания инструмента.

Однако такое перемещение материала имеет место только в случае, если оно происходит в открытом пространстве, а не в ограниченном объеме. Поскольку в процессе СТП торцевая поверхность бурта ограничивает перемещение материала в вертикальном направлении, последний переносится наконечником со стороны набегания инструмента к стороне его отхода, а затем в освобождающееся позади наконечника пространство и располагается вдоль оси шва (рис. 5).



Рис. 6. Внешний вид поперечных сечений (а, б) и лицевых поверхностей (в, г) швов, полученных СТП с использованием инструмента с наконечником, имеющим гладкую боковую поверхность (а, в) и резьбовую нарезку (б, г)

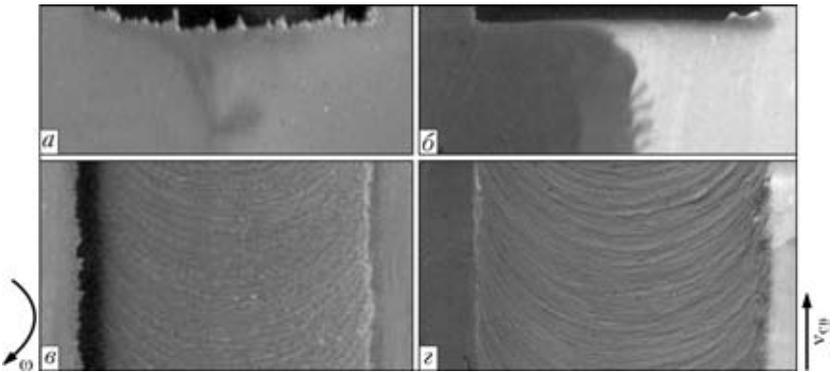
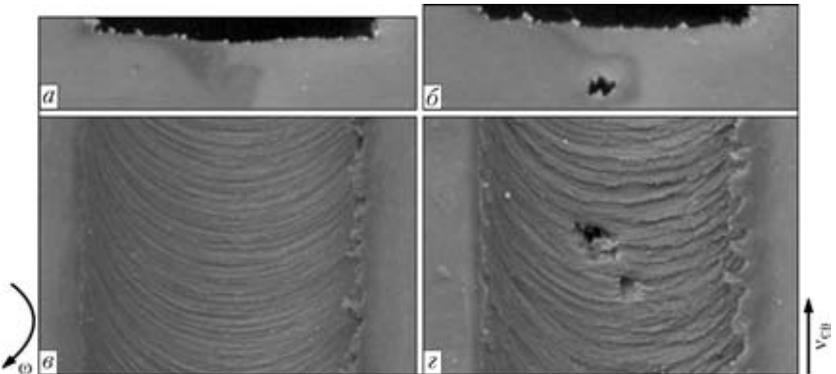


Рис. 7. Внешний вид поперечных сечений (а, б) и лицевых поверхностей (в, г) швов, полученных СТП с использованием инструментов с гладкой боковой поверхностью наконечника в виде усеченного конуса длиной 2,9 (а, в) и 3,2 (б, г) мм



При перемещении наконечником порций одного материала, находящегося со стороны набегающего инструмента, к другому материалу, который располагается со стороны отхода инструмента, в замкнутом пространстве при избыточном давлении происходит их частичное перемешивание. Этот процесс можно интенсифицировать при использовании наконечников с разветвленной, а не гладкой боковой поверхностью. Так, с помощью наконечника, имеющего на боковой поверхности обычную резьбовую нарезку, обеспечивается формирование слоистой структуры шва со стороны отхода инструмента в зоне сплавления его с основным материалом (рис. 6). Однако характер формирования и внешний вид лицевой поверхности шва существенно не зависят от геометрии боковой поверхности наконечника инструмента.

Влияние геометрических размеров и формы, а особенно нарезок и разветвлений на боковой поверхности наконечника инструмента усиливается при увеличении толщины свариваемого материала. Проведенные исследования показали, что использование инструмента с гладкой боковой поверхностью наконечника в виде усеченного конуса позволяет получить качественные швы при СТП материалов толщиной около 3 мм (рис. 7). Так, при СТП даже очень пластичных материалов в центральной части стыка ближе к корню шва нередко образуется дефект в виде полости. Ста-

бильность формирования лицевой поверхности шва при этом также ухудшается, на ней возникают надрывы, и, как следствие, имеет место недостаточное уплотнение материала под рабочей поверхностью бурта. Между образующимися на поверхности стыка слоями, существенно отличающимися как по толщине, так и по высоте, отсутствует плавный переход, что свидетельствует о периодическом нарушении непрерывности перемещения потока соединяемых материалов.

Наличие нарезок и разветвлений на боковой поверхности наконечника инструмента может оказать существенное влияние на процесс формирования шва вследствие изменения направле-

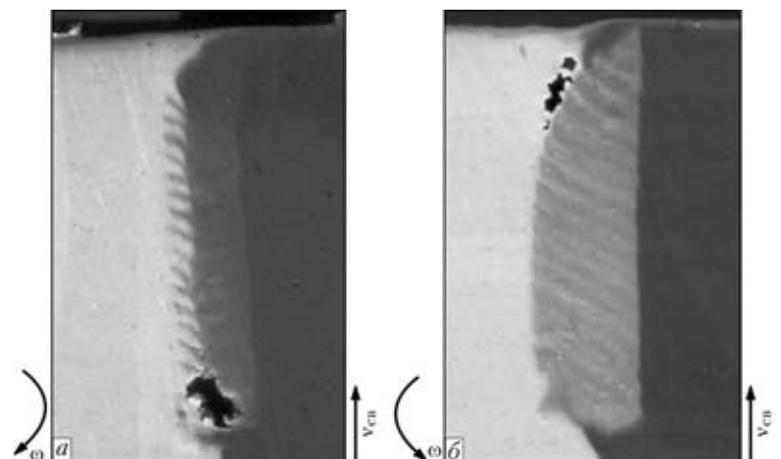


Рис. 8. Внешний вид поперечных сечений швов с характерными дефектами, образуемыми вследствие недостаточного прижатия бурта к свариваемым поверхностям при вращении инструмента с наконечниками цилиндрической формы, имеющими нарезку в виде метрической резьбы по часовой стрелке (а) и в противоположном направлении (б)



ния и траектории перемещения материала в зоне соединения. При этом, безусловно, ориентация нарезки на наконечнике инструмента взаимосвязана с направлением вращения инструмента. Так, использование одного и того же инструмента с наконечником цилиндрической формы, имеющим нарезку в виде метрической резьбы, в случае недостаточного прижатия бурта к свариваемым поверхностям может привести к образованию дефектов на различных участках шва (рис. 8). При вращении инструмента материал, находящийся в зоне стыка, перемещается резьбовой нарезкой из нижней его части в верхнюю, что приводит к образованию несплошностей в корне шва. При изменении направления вращения инструмента происходит движение материала вдоль нарезки на боковой поверхности наконечника инструмента в глубь стыка, вследствие чего в его корневой части формируется плотный шов, а вблизи торцевой поверхности бурта появляется полость.

Выводы

1. Изучение особенностей массопереноса в зоне термодинамического воздействия при моделировании процесса СТП позволило установить, что формирование неразъемного соединения происходит вследствие переноса наконечником инструмента определенного объема пластичного материала со свариваемой кромки со стороны набегания инструмента к пластифицированному материалу, расположенному на противоположной кромке, их смешивания и перемещения под давлением в пространстве, которое освобождается позади наконечника при его движении вдоль стыка.

2. Конструктивные особенности наконечников инструментов обуславливают траекторию движения пластичного материала в зоне образования неразъемного соединения. Для обеспечения качественного формирования швов при увеличении толщины соединяемых кромок свыше 3 мм целесообразно применять инструменты с наконечниками, имеющими разветвленную боковую поверхность, что обеспечивает интенсивное перемешивание материалов по всей толщине стыка.

3. Конфигурация рабочей поверхности бурта инструмента оказывает влияние на характер перемешивания соединяемых материалов только на лицевой поверхности шва и определяет степень уплотнения пластичного материала позади наконечника инструмента. Так, наличие на рабочей поверхности бурта конической или полусферической канавки способствует равномерному непрерывному перемещению пластичного материала и формированию практически гладкой поверхности шва с едва различимыми по толщине чешуйками, наличие которых свидетельствует о чередовании слоев соединяемых материалов.

1. Dawes C. J., Thomas W. M. Friction stir process welds aluminum alloys // *Welding J.* — 1996. — № 3. — P. 41–45.
2. Arbegast W. J. Friction stir welding after a decade of development // *Ibid.* — 2006. — № 3. — P. 28–35.
3. Kallee S., Nicholas D. Causing a stir in the future // *Welding and Joining.* — 1998. — № 2. — P. 18–21.
4. Johnsen M. R. Friction stir welding takes off at boeing // *Welding J.* — 1999. — № 2. — P. 35–39.
5. Okamura H., Aota K., Ezumi M. Friction stir welding of aluminum alloy and application to structure // *J. of Japan Institute of Light Metals.* — 2000. — № 4. — P. 166–172.
6. Pietras A., Zadroga L., Lomozik M. Characteristics of welds formed by pressure welding incorporating stirring of the weld material (FSW) // *Welding Intern.* — 2004. — № 1. — P. 5–10.
7. Colligan K. Material flow behavior during friction stir welding of aluminum // *Welding J.* — 1999. — № 7. — P. 229–237.
8. *Experimental methods for determining material flow in friction stir welds* / B. London, M. Mahoney, W. Bingel et al. // 3rd Intern. symp. on friction stir welding, Kobe, Japan, Sept. 27–28, 2001. — Kobe, 2001. — P. 1–7.
9. Dickerson T., Shercliff H., Schmidt H. A weld marker technique for flow visualization in friction stir welding // 4th Intern. symp. on friction stir welding, Utah, USA, May, 2003. — P. 1–12.
10. Colegrove P. A., Shercliff H. R. Development of trivex friction stir welding tool. Pt 1: Two-dimensional flow modeling and experimental validation // *Sci. and Techn. of Welding and Joining.* — 2004. — № 4. — P. 345–351.
11. Shibayanagi T. Microstructural aspects in friction stir welding // *J. of Japan Institute of Light Metals.* — 2007. — № 9. — P. 416–423.
12. Solid state welding between CPTi and AZ31B magnesium alloy using a rotating probe with thread / H. Tanabe, T. Watanabe, R. Yoshida, A. Yanagisawa // *Quarterly J. of the Japan Welding Society.* — 2007. — № 2. — P. 386–393.

Model of the process of friction stir welding was used to study the influence of structural dimensions of working surfaces of tool shoulder and tip on the features of materials mixing in the thermodynamic impact zone. It is shown that a permanent joint forms due to displacement of a certain amount of ductile material by the tool tip and its mixing across the entire thickness of edges. Shape of working surface of tool shoulder edge predetermines the displacement trajectory, movement speed, uniformity of mixing and degree of compaction of the materials being joined at solidification.

Поступила в редакцию 01.02.2011