

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Д. ДЕХЕЛЕАН, Р. КОЙОКАРУ, Б. РАДУ, В. САФТА
(Ин-т сварки и испытания материалов, г. Тимишоара, Румыния)

Представлена трехмерная модель потока материала в процессе сварки трением с перемешиванием, которая рассматривает как выделяемое тепло при трении между материалом и инструментом, так и тепло, образуемое в результате его пластической деформации. Проанализирована зависимость между реальным тепловым полем в процессе сварки, оцениваемым с помощью инфракрасного термографического контроля, и качеством сварных соединений. Описана оригинальная система контроля в реальном масштабе времени в процессе сварки трением с перемешиванием.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиевые и магниевые сплавы, моделирование процесса, параметры сварки, контроль процесса, инфракрасная термография

Недавно разработанный процесс сварки трением с перемешиванием [1] привлек внимание важнейших исследовательских центров всего мира, а также таких ведущих промышленных компаний, как авиационно-космические и автомобильные. Он рассматривается как отправная точка при разработке технологий соединения, а также в проектировании и выполнении сварных соединений.

Начиная с 2008 г. исследования в области сварки с использованием процесса сварки трением с перемешиванием были включены в научную программу Института сварки и испытания материалов (ИСИМ). В настоящее время институт разрабатывает программу исследований, включая комплексный процесс моделирования, характеристики сварных соединений, разработку специальных методов неразрушающих исследований контроля, систему контроля и автоматического управления сварочным процессом, изучение работоспособности новых сварных конструкций, выполненных сваркой трением с перемешиванием, для ответственных областей применения.

Интерес к этому процессу сварки подтверждается большим количеством научных докладов (около 800), опубликованных в научных журналах, и патентов (более чем 1800), защищенных в развитых странах.

В большинстве научных докладов (приблизительно 26 %) отражены такие аспекты, как свойства, работоспособность, испытания и качество сварных соединений. Особое внимание уделено развитию процесса сварки трением с перемешиванием, сварочному оборудованию, инструмен-

там (~23 %), а также применению процесса и для других материалов. Сварка трением с перемешиванием рассматривается Комиссией III МИСа и на важных международных конференциях во всем мире.

Сварка алюминиевых и магниевых сплавов. Для сварки трением с перемешиванием разработана установка на основе универсального фрезерного станка [2]. Стыковые сварные швы были выполнены на листах толщиной 4...10 мм из алюминиевого сплава Al 99,0 (EN-AW1200), магниевое сплава AZ31B и соответственно с их сочетанием с использованием разных сварочных параметров (скорость вращения и скорость сварки), а также разных форм и размеров сварочных инструментов. Сварочные параметры изменялись в следующем диапазоне: скорость вращения $n = 600...1500$ об/мин, скорость сварки $v_c = 75...750$ мм/мин, геометрия инструментов — цилиндрический резьбовой штифт (диаметром 4...8 мм для толщины $s = 4...8$ мм), конический резьбовой штифт (диаметром 9/7 мм для толщины $s = 8...10$ мм).

Для комплексного определения качества соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, разработана программа оценки (рис. 1) [3]. Критерий оценки качества сварных соединений включает соотношение прочности на статическое растяжение основного металла $\sigma_{B\ O.M}$ к прочности сварных соединений $\sigma_{B\ CB.C}$. В соответствии со сварочными параметрами, используемыми при испытаниях, были получены следующие значения соотношений: для Al99,0 $\sigma_{B\ CB.C} / \sigma_{B\ O.M} = 0,7...0,91$, а для AZ31B — 0,5...0,86. При сварке разнородных материалов Al99,0 и AZ31B соотношение между прочностью на статическое растяжение сварного соединения и прочностью Al99,0 составляет 0,45...0,70. Оптимальные сварочные параметры, которые определяют максимальные значения

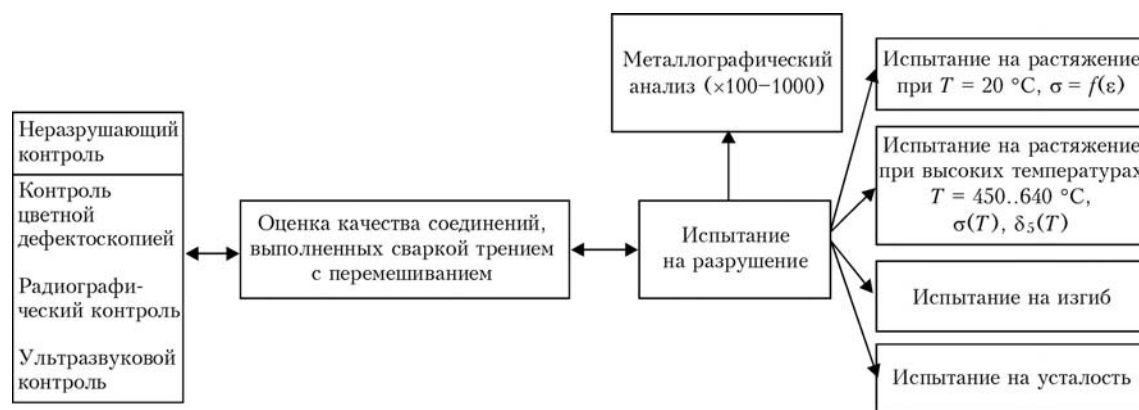


Рис. 1. Программа оценки качества соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием

Оптимальные сварочные параметры

Материал	Толщина, мм	Скорость вращения, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	$\sigma_{в.св.} / \sigma_{в.о.м}$
A199,0	5,0	1500	235	0,91
AZ31B	4,0	1180	375	0,86
A199,9+AZ31B	4,0	1180	190	0,70 (Al)

Примечание. Для магниевого сплав AZ31D и разнородных сплавов использован цилиндрический резьбовой штифт диаметром 6 мм.

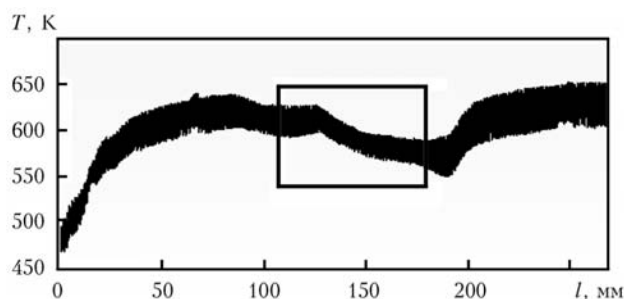


Рис. 2. Выявление дефектов с помощью температурного графика

прочности на статическое растяжение, приведены в таблице.

С помощью термографической камеры температура записывалась в процессе экспериментальной программы. Экспериментальная сборка позволяет настраивать направления таким образом, чтобы камера постоянно отслеживала площадь ±1 мм на пересечении между заплечиком и соединяемой поверхностью на полукольцевой стороне тыльной части инструмента, где температура максимальная.

Наличие дефектов обнаруживается радиографическим контролем в виде всплеска на температурном графике (рис. 2). Следовательно, изменение температуры в сварном шве можно использовать для контроля качества сварного шва.

Математическое моделирование потока материала при сварке трением с перемешиванием. Разработана модель для потока материала и

температурного поля в процессе сварки трением с перемешиванием с учетом тепла, выделяемого при трении на границе раздела между инструментом и материалом, и внутреннего тепла, выделяемого внутри материала изделия вследствие пластической деформации [4–6]. В модели процесс сварки трением с перемешиванием рассматривается в его стабильной фазе, так называемой фазе сварки, где все параметры процесса стабильны, инструмент имеет цилиндрический штифт без какой-либо канавки или углубления на поверхности заплечика.

Для упрощения моделирования вращающийся инструмент, вокруг которого растекается материал под воздействием пластической деформации, и материал, не подвергающийся никакой деформации, будем рассматривать как неподвижные края области. Общее количество тепла, выделяемого во время сварки трением с перемешиванием, рассеивается согласно схеме, представленной на рис. 3. Моделирование, выполненное на листах из сплава 5754 (500×210×6 мм), показывает поведение потока материала, перекрывающего температурное поле, которое развивается в процессе сварки. Как видно из рис. 4, температурное поле более протяженное с продвигающейся стороны инструмента, так как пластицированный материал проталкивается в эту сторону вращающимся движением инструмента. При рассмотрении линии обтекания можно наблюдать, что материал с лицевой стороны инструмента и даже с проталкиваемой стороны накапливается вокруг стержня инструмента и проталкивается на тыльную сторону инструмента. Линии обтекания показывают, что скорость движения частиц, обтекающих стержень инструмента, повышается, когда расстояние до стержня инструмента сокращается. Это является результатом двух противоречащих процессов, взаимосвязанных между собой и играющих роль саморегулирования процесса образования тепла, подобного тому, который имеет место при обычной сварке трением с перемешиванием.

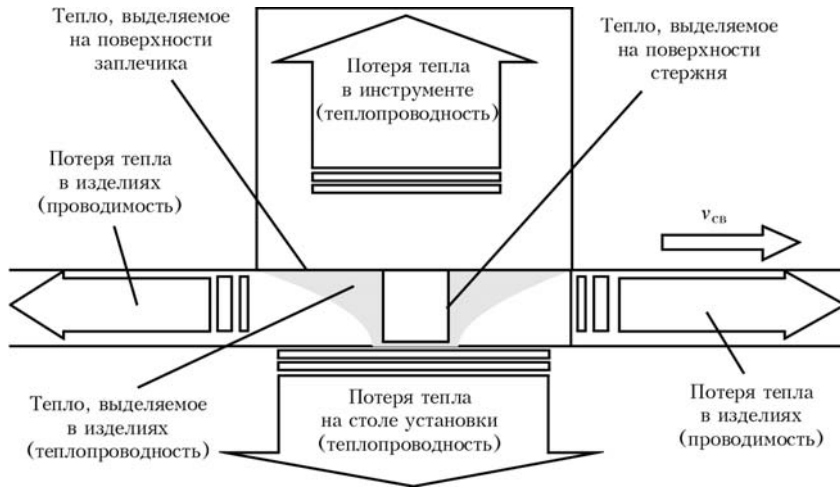


Рис. 3. Модель тепла, выделяемого и рассеиваемого в процессе сварки трением с перемешиванием

Первый процесс происходит, когда частицы материала втягиваются во вращательное движение с высокой скоростью, что способствует выделению большего количества тепла, а второй — при размягчении материала за счет образования большего количества тепла скорость сдвигающего усилия и количество образуемого тепла снижаются. Несмотря на это одновременно с вращательным перемещением частицы также перемещаются и в вертикальном направлении, они устремляются в нижнюю часть от поверхности изделий (рис. 4, б). Это движение подтверждает наличие вершины в ядре сварного соединения.

Контроль качества сварных соединений. Процедура контроля качества соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, была разработана с помощью инфракрасной термографии. Для этого была использована камера термовидения типа А40М, установленная на головку сварочной машины и имеющая специальную программу для термографического анализа изображений в реальном масштабе времени. Камера была направлена таким образом, чтобы локализовать повер-

хность пересечения между заплечиком сварочного инструмента и поверхностью соединения. Для эксперимента использовали листовой алюминиевый материал А199,5 толщиной 10 мм. Сварку выполняли со скоростью вращения $n = 1500$ об/мин и скоростью сварки $v_{св} = 75$ мм/мин, при этом использовали конусный инструмент с резьбой, имеющий диаметр заплечика 21 мм, а диаметр конусов — 9/7 мм.

В ходе экспериментов исследовали два вида искусственных дефектов:

- внутренние дефекты, расположенные перпендикулярно поверхности листов с продольным швом, выполненным сваркой трением с перемешиванием; глубина дефектов была меньше, чем длина инструмента. Они включали цилиндрические отверстия, расположенные с одинаковым шагом и имеющие разный диаметр (2...7 мм), эллиптические канавки постоянной длины и разной ширины и глубины ($b = 2...6$ мм) и вставки (3×4 мм) из меди, магниевого сплава, инструментальной и нержавеющей стали;

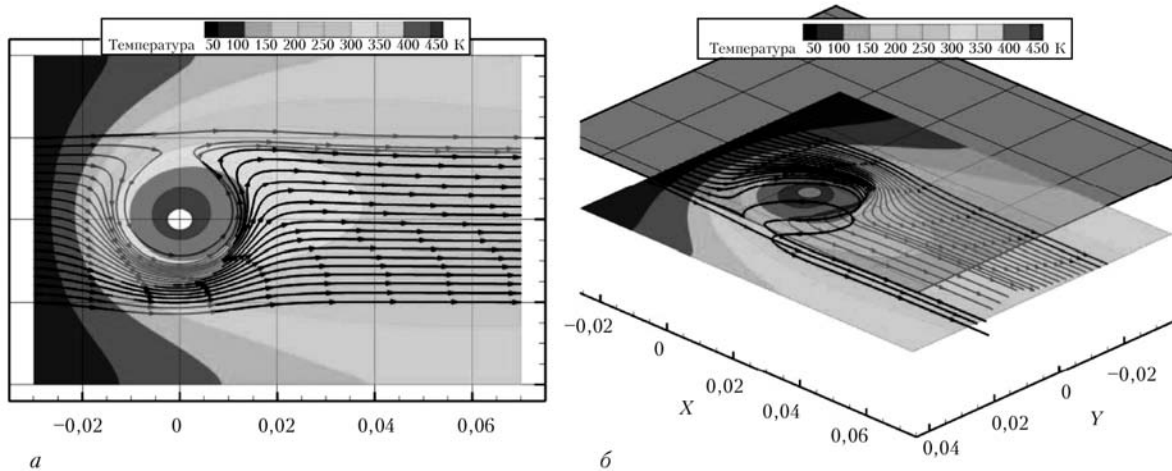


Рис. 4. Линии обтекания, показывающие поток материала, который накладывается над температурным полем на поверхности изделий (а) и то же, но вид снизу (б)

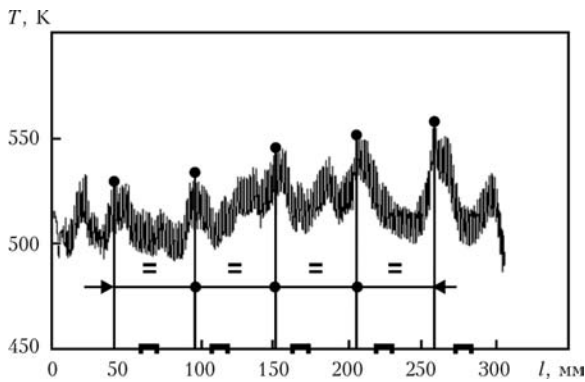


Рис. 5. Запись температуры при наличии дефектов, расположенных на фронтальной лицевой плоскости отступающей стороны

– дефекты, расположенные на фронтальной осевой плоскости соединения, которое выполнено сваркой трением с перемешиванием, имели разную ширину и глубину (2...6 мм) и располагались на продвигающейся или отступающей поверхности соединения.

На основании выполненного исследования можно отметить, с одной стороны, хорошую повторяемость результатов с учетом локализации дефектов, а с другой — зависимость между температурой и объемом дислокаций. В качестве примера на рис. 5 даны записи термографа, полученные при контроле дефектов, расположенных во фронтальной (лицевой) плоскости отступающей стороны. Максимальные температуры соответствуют положениям дефектов вдоль сварного шва, обозначенным жирной линией на абсциссе.

Максимальные значения температур расположены на одинаковом расстоянии соответственно положению, в котором заплечик инструмента начинает покрывать дефект.

Рис. 6 подтверждает экспоненциальную зависимость между двумя параметрами с высоким коэффициентом корреляции.

Таким образом, разработанная система контроля процесса сварки трением с перемешиванием, для которой проведены эксперименты с использованием инфракрасного термографа на искусственных дефектах, показала зависимость между реальным температурным полем, измеренным с помощью инфракрасной термографии в неавтономном режиме, и качеством швов, выполненных

A three-dimensional modeling of material flow during the friction stir welding process is presented. The model considers both the heat developed when friction takes place between the material and the tool and the plastic deformation developed by its. The dependency between the real thermal field during the welding process appreciated by infrared thermographic control and the quality of welded joints is analyzed. An original on-line monitoring system for FSW using the infrared thermography is described.

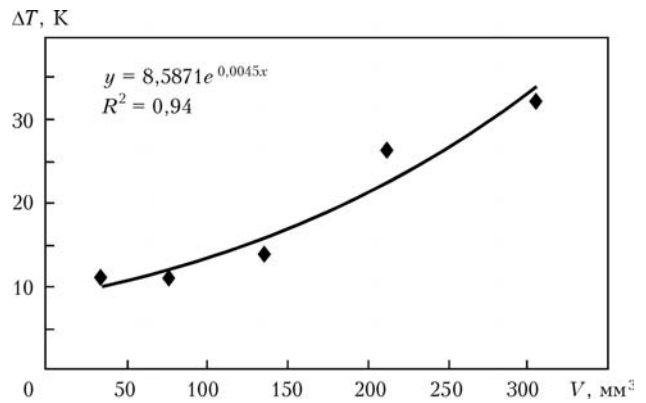


Рис. 6. Изменение температуры ΔT в сравнении с объемом дислоцированных дефектов V при наличии дефектов, расположенных на фронтальной осевой плоскости отступающей стороны

сваркой трением с перемешиванием. Независимо от формы смоделированного дефекта в соответствии с пределами точности можно определить минимальный объем для адекватной оценки записей термографа. Фактически эксперименты подтвердили оригинальную систему контроля процесса.

Данный доклад подготовлен в рамках проекта СЕЕХ 66/2006-2008 при поддержке Национального агентства по научным исследованиям Румынии.

1. Friction stir butt welding / M. W. Thomas, J. Nicholas, J. C. Needham et al. — GB Pat. Application 9125978.8, Dec. 1991.
2. Cojocar R., Dehelean D., Botila L. Friction stir welding of aluminum alloys sheets // Proc. of ASR Inter. conf. «Sudura 2007». — Timisoara, 2007. — P. 291–303.
3. Safta V., Cojocar R., Radu B. Considerations about fault detection of friction stir welded joints // Proc. ISIM Intern. conf. «Innovative technologies for joining advanced materials». — Timisoara, 2007. — P. 70–77.
4. Radu B., Dehelean D., Susan-Resiga R., Safta V. Aspects of the material flow during friction stir welding of 5754 Al alloy. // IIW. Doc. III 1434-07.
5. Colegrove P. A., Shercliff H. R. 3-Dimensional CFD modeling of flow round a threaded friction stir welding tool profile // J. Material Proc. Technol. — 2005. — 160. — P. 320–327.
6. Seidel T. U., Reynolds A. P. Two dimensional friction stir welding process model based on fluid mechanics // Sci. and Technol. of Welding and Joining. — 2003. — 8, № 3. — P. 175–183.

Поступила в редакцию 11.03.2008