



ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ТОНКОЛИСТОВОМ АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ АМг5М ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

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

Исследовано влияние материала подкладки, скорости сварки и диаметра бурта инструмента на изменение характера распределения температур в поперечном сечении сварных соединений. Установлено, что образование неразъемных соединений при сварке трением с перемешиванием происходит при температуре не выше 450 °С.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиевый сплав АМг5М, тонкий лист, стыковые соединения, термический цикл, распределение температур

При сварке трением с перемешиванием (СТП) интенсивно происходят процессы деформирования и перемещения по сложной траектории нагретого до пластического состояния материала, механического измельчения его составляющих, рекристаллизации зерен, диффузии частиц и интенсивного перемещения дислокаций, в результате чего образуется неразъемное соединение в твердой фазе без расплавления основного материала. Эффективность протекания этих процессов в значительной степени зависит от тепловыделения в местах контакта трущихся рабочих поверхностей инструмента со свариваемым металлом.

На распределение температурных полей в зоне соединения существенное влияние оказывают теплофизические характеристики свариваемых сплавов и параметры процесса сварки. Однако анализ результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов, приведенных в зарубежных источниках, показывает, что в большинстве случаев при сварке алюминиевых сплавов средних толщин формирование неразъемных соединений происходит при максимальной температуре нагрева металла не выше 500 °С, что составляет около 70...80 % температуры плавления этих материалов [1–5]. При этом металл в зоне сварки находится при повышенной температуре очень кратковременно, благодаря чему степень разупрочнения и снижение его физико-механических характеристик значительно меньше, чем при сварке плавлением [6–9].

При сварке тонколистовых заготовок возникают определенные особенности, обусловленные изменением характера теплоотвода как в подкладку, на которой происходит формирование неразъемного соединения, так и в продольном и поперечном направлении основного материала. Кроме того, при вращательно-поступательном дви-

жении рабочего инструмента в зонах контакта его рабочих поверхностей со свариваемым сплавом возникают различные термомодеформационные условия как со стороны набегания инструмента (где направления векторов его вращения и линейного перемещения совпадают), так и отхода инструмента, где они имеют противоположные направления.

Цель данной работы — исследование особенностей распределения температур в стыковых соединениях тонколистового алюминиевого сплава АМг5М, выполненных СТП.

Для проведения экспериментальных исследований использовали широко применяемый при изготовлении различных сварных конструкций алюминиевый сплав АМг5М. СТП листов толщиной 2,8 мм осуществляли на сконструированной в ИЭС им. Е. О. Патона лабораторной установке. Для получения стыковых соединений использовали специальные инструменты с диаметром бурта 12 и 14 мм и коническим наконечником. Скорость вращения инструмента составляла 2880 об/мин, а линейная скорость его перемещения вдоль стыка — 8...20 м/ч. Для сравнения термических циклов листы из сплава АМг5М сваривали автоматической аргодуговой сваркой неплавящимся электродом (АДСНЭ) на установке MW-450 («Fronius», Австрия) со скоростью 10 м/ч на токе 160 А с использованием в качестве присадки сварочной проволоки СвАМг5.

Температуру металла в различных зонах сварных соединений измеряли с помощью хромель-алюмелевых термопар диаметром 0,1 мм. Результаты измерений в процессе сварки записывали на компьютер с помощью модуля аналогового ввода I-7018P фирмы ICP DAS, используя программу EZ Data Logger v431. Модуль подключали к компьютеру с помощью дополнительного преобразователя сигнала EX 9530 с программным обеспечением DCON Utility v5.1.8.

Анализ полученных результатов показывает, что характер изменения температуры свариваемого материала обусловлен специфическими ус-

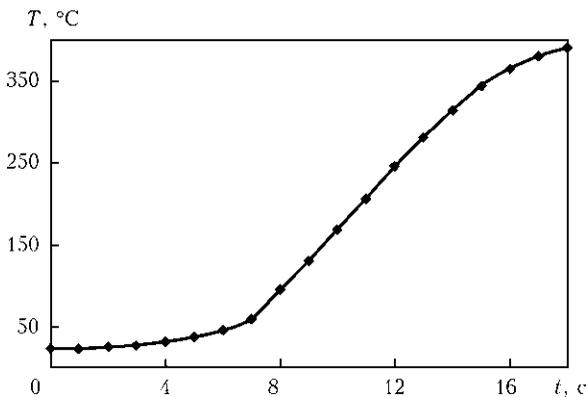


Рис. 1. Распределение температуры нагрева сплава АМг5М на расстоянии 6 мм от центра шва при погружении рабочего инструмента процесса СТП с диаметром бурта 12 мм и накопечником конической формы ($v_{cb} = 8$ м/ч)

ловиями формирования неразъемного соединения в твердой фазе. На начальной стадии процесса СТП, когда вращающийся наконечник инструмента постепенно заглубляется встык, происходит незначительное увеличение количества тепла, выделяемого в результате трения (рис. 1). При дальнейшем погружении рабочего инструмента, когда возникает контакт между торцевой поверхностью его бурта и свариваемым материалом (на седьмой секунде), температура нагрева последнего начинает резко повышаться. Это происходит до тех пор, пока бурт инструмента не проникнет в свариваемый металл примерно на 0,1 мм, когда между подкладкой и рабочими поверхностями инструмента образуется замкнутое пространство, внутри которого пластифицированный материал, находясь под высоким давлением, перемещается по кругу вращающимся инструментом и образует точечный шов.

Когда, кроме вращательного движения, инструмент начинает осуществлять поступательное перемещение вдоль стыка для получения линейного шва, то впереди со стороны набегания инструмента образуется зона избыточного давления, из которой его рабочие поверхности вытесняют препятствующий их движению нагретый до пластического состояния материал. Этот материал благодаря поступательно-вращательному движению инструмента постоянно перемещается в зону, освобождающуюся позади него. Но по пути туда он под высоким давлением проталкивается возле инструмента со стороны его отхода, где уже имеется пластифицированный материал, нагретый до такой же температуры. По-видимому, при возникающем трении между этими объемами материала происходит незначительное дополнительное тепловыделение, в результате чего температура металла в зоне формирования неразъемного соединения всегда со стороны отхода инструмента на 10...15 °C выше, чем со стороны его набегания (рис. 2).

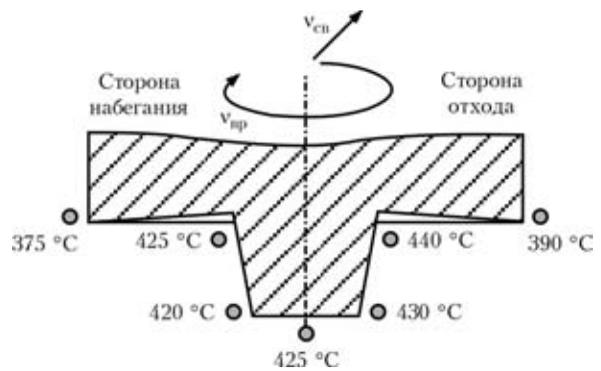


Рис. 2. Температурные точки металла в соединении СТП сплава АМг5М со скоростью 8 м/ч

Нагрев свариваемого материала до максимальных температур происходит вокруг наконечника инструмента у его основания в зоне примыкания к рабочей поверхности бурта. Однако при сварке тонколистовых материалов наконечник инструмента очень короткий. Поэтому значительное количество тепла, выделяемое вследствие трения, распространяется в подкладку, на которой формируется неразъемное соединение. Следовательно, одним из эффективных способов повышения температуры металла в зоне сварки является использование подкладок, изготовленных из материалов с низкой теплопроводностью.

В ходе проведенных экспериментальных исследований установлено, что при использовании асбоцементной подкладки взамен стальной при СТП сплава АМг5М толщиной 2,8 мм температура металла у края бурта инструмента при тех же параметрах режима повышается примерно на 20 %. Так, со стороны набегания инструмента свариваемый металл нагревается до 450, а со стороны его отхода — до 470 °C.

Измерения температур на различном удалении от оси шва со стороны отхода инструмента позволили установить закономерности распространения теплового поля при сварке в твердой фазе стыковых соединений тонколистовых материалов из алюминиевых сплавов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при СТП сплава АМг5М со скоростью 8 м/ч на расстоянии 6 мм от оси шва металл нагревается до температуры 390 °C (рис. 3, а). При этом максимальное значение температуры достигается не в тот момент, когда инструмент располагается напротив термпары, а после перемещения его дальше примерно на 2 мм. На расстоянии 11 мм от оси шва максимальная температура нагрева металла (250 °C) достигается при смещении источника нагрева от термпары почти на 7 мм. С увеличением расстояния от оси шва до 21 мм максимальная температура нагрева металла снижается до 160 °C при удалении источника нагрева на 15 мм от термпары. При дальнейшем увеличении расстояния от оси шва до 31 и 40 мм максимальная темпе-



ратура металла снижается соответственно до 110 и 80 °С. Полученные кривые свидетельствуют о быстром распространении тепла в поперечном и продольном направлениях от оси шва при СТП тонколистовых заготовок из алюминиевого сплава АМг5М, имеющего большую теплопроводность. При этом части кривых, соответствующие процессам нагрева и охлаждения металла, имеют несимметричный характер. Так, термопара, расположенная у края бурта, показывает, что если инструмент находится на расстоянии 5 мм до нее, то металл в этой зоне нагревается приблизительно до температуры 270 °С, а после перемещения инструмента на такое же расстояние за термопару температура металла находится на уровне 380 °С, т. е. охлаждение металла после сварки происходит медленнее, чем его нагрев. Однако общее время пребывания металла в процессе сварки при температурах выше 200 °С не превышает 15 с.

Увеличение скорости линейного перемещения инструмента вдоль стыка оказывает существенное влияние на температуру нагрева металла в зоне сварки. Так, повышение скорости сварки с 8 до 20 м/ч приводит к снижению температуры сплава АМг5М у края бурта со стороны отхода инструмента с 390 до 350 °С (рис. 3, б). При этом максимальное значение температуры металла в этой

точке достигается при удалении инструмента от термопары дальше 4 мм. При смещении инструмента за термопару почти на 10 мм на расстоянии от оси шва 11 мм максимальная температура нагрева металла при скорости сварки 20 м/ч составляет около 220 °С. С увеличением расстояния от оси шва до 21, 31 и 40 мм максимальный уровень температуры нагрева металла снижается до 140, 90 и 65 °С соответственно. Однако анализ полученных сварных соединений показал, что при температуре нагрева сплава АМг5М, которая достигается при скорости сварки 20 м/ч, не обеспечивается достаточная пластичность материала в зоне образования неразъемного соединения, вследствие чего в швах возникают внутренние дефекты.

Одним из способов повышения количества выделяемого в зоне сварки тепла может быть увеличение диаметра бурта инструмента [10], что позволяет увеличить площадь его торцевой поверхности, контактирующей со свариваемым материалом. В ходе проведенных экспериментальных исследований установлено, что при постоянной скорости сварки 8 м/ч использование инструмента с диаметром бурта 14 мм позволяет повысить температуру нагрева металла у основания наконечника со стороны отхода инструмента до 470 °С. При этом пропорциональное повышение температуры металла наблюдается и в остальных характерных зонах вокруг рабочих поверхностей инструмента. Так, при диаметре бурта 14 мм у его края со стороны отхода инструмента металл нагревается до температуры 410 °С, что на 20 °С выше, чем у края бурта диаметром 12 мм. Повышение температуры металла в зоне образования неразъемного соединения приводит к незначительному снижению скорости его охлаждения и увеличению времени пребывания при повышенных температурах.

Сравнительный анализ распределения температуры в поперечном (рис. 4) и продольном (рис. 5) направлениях стыковых соединений сплава АМг5М свидетельствует о существенном различии степени нагрева металла при АДСНЭ и СТП. При АДСНЭ в зоне образования неразъемного соединения происходит полное расплавление металла. На расстоянии 2 мм от оси шва температура металла находится на уровне 1000 °С, а вблизи зоны сплавления шва с основным материалом на расстоянии около 5 мм от оси шва она приближается к 638 °С — температуре, при которой только начинается кристаллизация сплава АМг5М. Кроме того, нагрев металла до высоких температур при сварке плавлением обуславливает и более широкую зону термического влияния. Так, до температур свыше 200 °С свариваемый металл нагревается на расстоянии 19 мм от оси шва, тогда как при СТП в твердой фазе максимальная температура нагрева металла

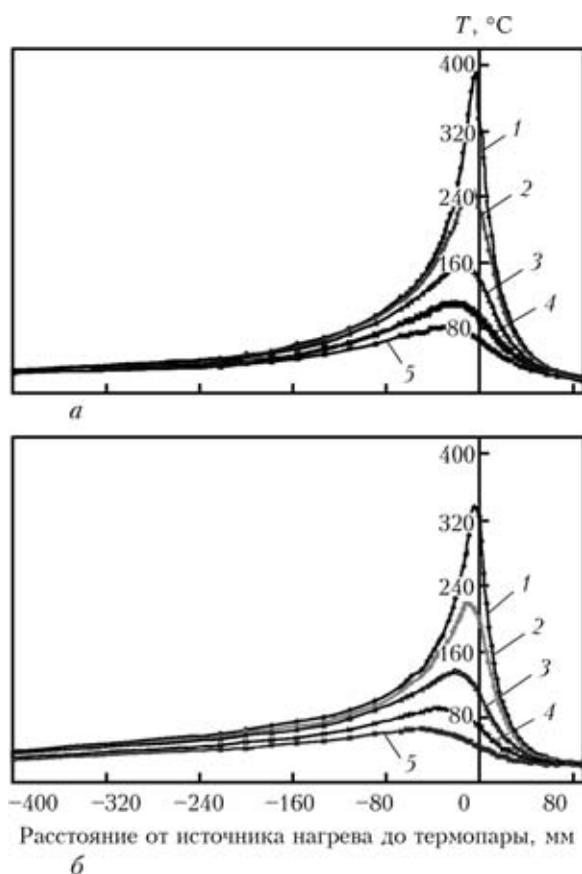


Рис. 3. Распределение температуры при СТП стыкового соединения сплава АМг5М со скоростью 8 (а) и 20 м/ч (б) при различном удалении от оси шва: 6 (1); 11 (2); 21 (3); 31 (4); 40 (5) мм

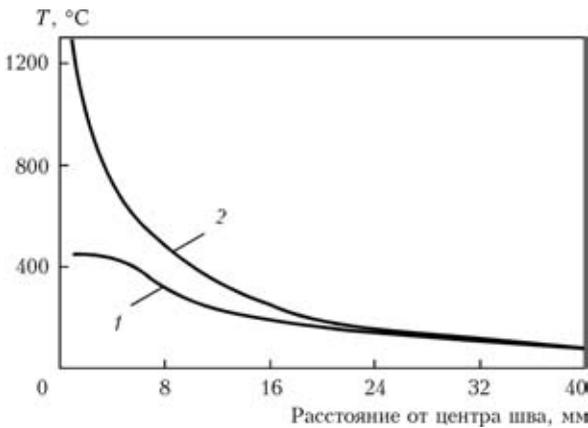


Рис. 4. Распределение температуры в поперечном направлении стыковых соединений сплава АМг5М, полученных СТП (1) и АДСНЭ (2)

в зоне образования неразъемного соединения не превышает 450 °С, а на расстоянии 5 мм от оси шва она находится на уровне 410 °С. При этом нагрев металла до температур свыше 200 °С происходит только на расстоянии 14 мм от оси шва.

В процессе остывания металла при удалении источника нагрева от места сварки происходит постепенное снижение его температуры. Поэтому при АДСНЭ металл в зоне сплавления шва с основным материалом имеет температуру на 150 °С выше, чем при СТП даже при перемещении источника нагрева от этого места на 30 мм. И если при СТП в твердой фазе температура металла на расстоянии 5 мм от оси шва снижается ниже 200 °С при удалении источника нагрева на 35 мм, то при АДСНЭ плавлением — на 75 мм. Следовательно, максимальная температура нагрева металла в зоне образования неразъемного соединения и общее время пребывания основного свариваемого материала при высоких температурах сокращаются, в результате чего уменьшается вероятность протекания необратимых физико-химических процессов, приводящих к существенному снижению механических свойств сварных соединений и вызывающих их деформацию.

В заключение следует отметить, что качественное формирование швов при СТП стыковых соединений алюминиевого сплава АМг5М толщиной 2,8 мм обеспечивается при нагреве металла в зоне сварки до 450 °С, что составляет 79 % температуры начала его плавления. При этом на расстоянии 5 мм от оси шва металл нагревается всего лишь до температуры 410 °С, тогда как при АДСНЭ он в этой зоне еще находится в расп-

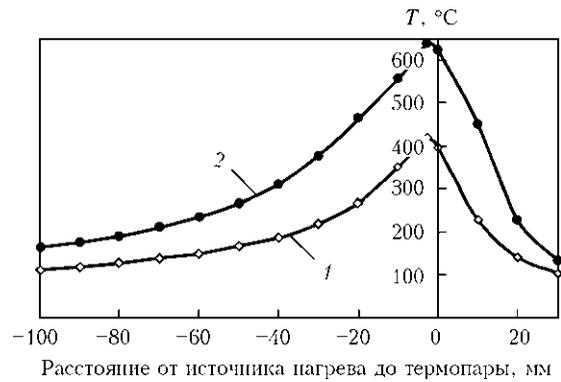


Рис. 5. Распределение температуры в продольном направлении на расстоянии 5 мм от оси шва при СТП (1) и АДСНЭ (2) стыковых соединений сплава АМг5М

лавленном состоянии при температуре начала кристаллизации 638 °С. Снижение максимальной температуры нагрева зоны сварки и сокращение времени пребывания свариваемого материала при повышенных температурах окажет положительное влияние на свойства сварных соединений, полученных СТП.

1. *Analysis of friction stir welds using thermocouple measurements* / S. G. Lambrakos, R. W. Fonda, J. O. Milewski, J. E. Mitchell // *Sci. and Techn. of Welding and Joining*. — 2003. — № 5. — P. 385–390.
2. *Microstructural modeling in friction stir welding of 2000 series aluminium alloys* / H. Shercliff, M. Russell, A. Taylor, T. Dickerson // *Mecanique and Industries*. — 2005. — № 6. — P. 25–35.
3. *Temperature analysis in friction stir welding of ADC12/5052 dissimilar aluminium alloys* / M. Kokubo, Y. Takayama, S. Kazui et al. // *J. of Japan Institute of Light Metals*. — 2007. — № 11. — P. 511–517.
4. *Colegrove P. A., Shercliff H. R. Experimental and numerical analysis of aluminium alloy 7075—T7351 friction stir welds* // *Sci. and Techn. of Welding and Joining*. — 2003. — № 5. — P. 360–368.
5. *Khandkar M. H., Khan J. A., Reynolds A. P. Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model* // *Ibid.* — 2003. — № 3. — P. 165–174.
6. *Cederqvist L., Reynolds A. P. Factors affecting the properties of friction stir welding aluminum lap joints* // *Welding J.* — 2001. — № 12. — P. 281–287.
7. *Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds* / A. A. Hassan, P. B. Prangnell, A. F. Norman et al. // *Sci. and Techn. of Welding and Joining*. — 2003. — № 4. — P. 257–268.
8. *Sato Y. Relationship between mechanical properties and microstructure in friction stir welded Al alloys* // *J. of the Japan Welding Society*. — 2002. — № 8. — P. 33–36.
9. *Chao Y., Wang Y., Miller K. Effect of friction stir welding on dynamic properties of AA2024-T3 and AA7075-T7351* // *Welding J.* — 2001. — № 8. — P. 196–200.
10. *Okamura H. Point of application for FSW* // *Welding Techn.* — 2003. — № 15. — P. 60–69.

Influence of backing material, welding speed and diameter of tool shoulder on the change of the nature of temperature distribution in welded joint cross-section was studied. It is established that formation of permanent joints in friction stir welding takes place at the temperature not higher than 450 C.

Поступила в редакцию 18.04.2011