

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma], \quad (18)$$

где σ и $[\sigma]$ – действующее и допускаемое растягивающее напряжение, МПа; M_{\max} – изгибающий момент в опасном сечении, н/м; W – момент сопротивления поперечного сечения сверла в опасном сечении, м³.

Наиболее опасным поперечным сечением сверла, в котором изгибающий момент от неуравновешенной поперечной силы может вызвать наибольшие напряжения, является ближайшее к хвостовику сечение рабочей части с полной глубиной стружечных канавок. Расстояние от этого сечения до точки приложения поперечной неуравновешенной силы можно принять равным длине рабочей части сверла l .

Подставив в уравнение (18) в качестве M_{\max} произведение ΔP , из выражения (12), на l , и выражение (17), получим условие прочности сверла

$$[\sigma] \geq \frac{5l \cdot s^y \sqrt{(C_{pz}^2 + C_{py}^2) \cdot K^2 \cdot d^2 \left[1 - \frac{\cos(\varphi + \alpha)}{\cos(\varphi - \alpha)} \right]^2} + C_o^2 \cdot d^{2q} \cdot K_o^2 \cdot \sin^2 2\alpha}{2 \cdot c \cdot d^3}, \quad \text{н/мм}^2 \quad (19)$$

Преобразовав выражение (19) так, чтобы в левой части находилась лишь величина подачи, получим выражение для расчета максимальной предельно допустимой оборотной осевой подачи при врезании сверла в наклонную поверхность, при которой гарантируется прочность сверла

$$s \leq \left(\frac{2 \cdot c \cdot d^3 \cdot [\sigma]}{5l \cdot \sqrt{(C_{pz}^2 + C_{py}^2) \cdot K^2 \cdot d^2 \left[1 - \frac{\cos(\varphi + \alpha)}{\cos(\varphi - \alpha)} \right]^2} + C_o^2 \cdot d^{2q} \cdot K_o^2 \cdot \sin^2 2\alpha} \right)^{\frac{1}{y}}, \quad \text{мм/об} \quad (20)$$

Допускаемое напряжение для наиболее распространенной быстрорежущей стали марки Р6М5, используемой для изготовления спиральных сверл [2]

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{K_3} = \frac{3000}{3} = 1000 \text{ МПа} = 1000 \text{ н/мм}^2 \quad (21)$$

где $\sigma_s = 3000$ МПа – предел прочности стали Р6М5 []; $K_3 = 3$ – коэффициент запаса прочности [4].

Так как при составлении выражений (19) и (20) использовались эмпирические формулы для расчета сил резания, при практическом их использовании следует подставлять параметры в определенной размерности: d – мм; $[\sigma]$ – н/мм²; l – мм.

Заключение. Разработанная методика определения ограниченного режимов врезания при сверлении отверстий в наклонных поверхностях позволяет проектировать надежные операции по критерию прочности сверл. Ее использование особенно целесообразно при проектировании операций механической обработки на многоцелевых станках, когда применение кондукторов затрудняет доступ к обрабатываемым поверхностям и поэтому нецелесообразно, а сверление с переменной подачей, задаваемой в управляющей программе, не вызывает существенных затруднений. Рассчитанные по данной методике подачи врезания меньше нормативных подач при сверлении обычных отверстий от 2 до 10 раз для диапазона углов наклона $\alpha = 2^\circ \dots 10^\circ$. Однако из-за малой длины врезания трудоемкость сверления отверстий увеличивается лишь на 5...7%.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Семенченко, И.И. Проектирование металлорежущих инструментов / И.И. Семенченко, В.М. Матюшин, Г.Н. Сахаров – М.: Машгиз, 1962.
2. Ящерицин, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов / П.И. Ящерицин [и др.] – Мн.: Выш. шк., 1990.
3. Справочник технолога-машиностроения в 2-х т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001.
4. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Машиностроение, 1976.

Материал поступил в редакцию 30.10.12

MEDVEDEV O.A., SEN LIN Limited regime of drilling holes in the surface inclination based strength drills

In the article the method of determining the unstable transverse cutting force that occurs when plunging twist drill to the inclined surface. It serves as a basis for calculating the limitation mode insertion drills in the design of drilling operations. Application of the technique can increase the reliability and efficiency of drilling on inclined surfaces.

УДК 621.7.044

Рудак Д.П., Черневич К.В., Штемпель О.П.

СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ: ОСОБЕННОСТИ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ

Введение. Сварка трением выполняется без объемного плавления в зоне сварки за счет тепла выделяемого при трении. Как разновидность сварки трением, сварка трением с перемешиванием (FSW – Friction Stir Welding) – сравнительно новый сварочный процесс, предложенный в 1991 году в Технологическом институте сварки

(TWI – Technological Welding Institute) в Великобритании [1]. Впервые этот вид сварки был применен в промышленности для сварки алюминиевых сплавов на предприятии SAPA (Швеция) и на судовой верфи MarineAluminium (Норвегия). Позже FSW стала применяться в автомобильной промышленности в Австралии, Швеции и Норвегии также

Рудак Дмитрий Петрович, ассистент кафедры технологии конструкционных материалов Полоцкого государственного университета. Черневич Константин Владимирович, аспирант кафедры технологии конструкционных материалов Полоцкого государственного университета.

Штемпель Олег Петрович, к.т.н, доцент, доцент кафедры технологии конструкционных материалов Полоцкого государственного университета.

Беларусь, ПГУ, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина 29.

для сварки алюминиевых сплавов. Результаты непрерывного совершенствования технологии, оборудования и инструмента обеспечили воспроизводимость качества и высокие механические характеристики соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, – главные условия промышленного применения процесса.

Сварка трением с перемешиванием (FSW – Friction Stir Welding) – процесс сварки в твердой фазе без расплавления металла. Вращающийся инструмент (шпиндель) особой формы с заплечиками и штырем в центре погружается в стык подлежащих сварке плотно прижатых друг другу деталей и перемещается вдоль него, выделяя тепло и деформируя материал, переводя его в сверхпластичное состояние. На рабочем торце инструмента цилиндрической формы имеется выступающая центральная цилиндрическая часть меньшего диаметра. Этот выступ (шип), внедряясь при вращении инструмента в стык, создает вокруг себя тонкий слой металла в сверхпластичном состоянии. Этот слой смыкается за шипом по мере продвижения инструмента вдоль стыка и образует прочное соединение его торцов [1]. Таким образом, процесс соединения происходит за счет деформации и сверхпластичности материала, образующихся у вращающегося инструмента (рис. 1).

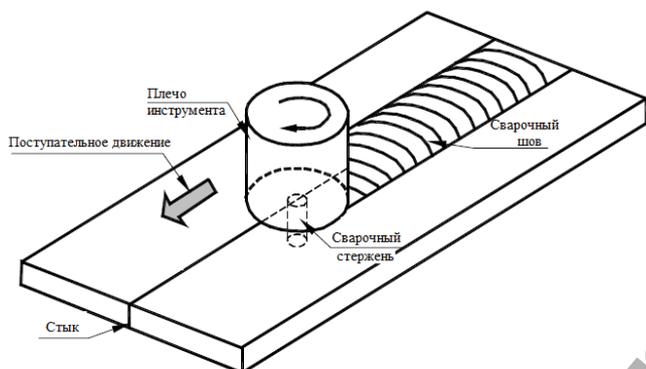


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием

Термический цикл, создаваемый вращением инструмента при различных скоростях, является фактором управления микроструктурой места стыка и зоной термического влияния (ЗТВ). Зависимость между скоростью вращения и максимальной температурой при ротационной сварке алюминиевого сплава АД35 представлена на рисунке 2. Перепад температур на поверхности стыка и у его корня влияет на процесс деформации сверхпластичного металла.

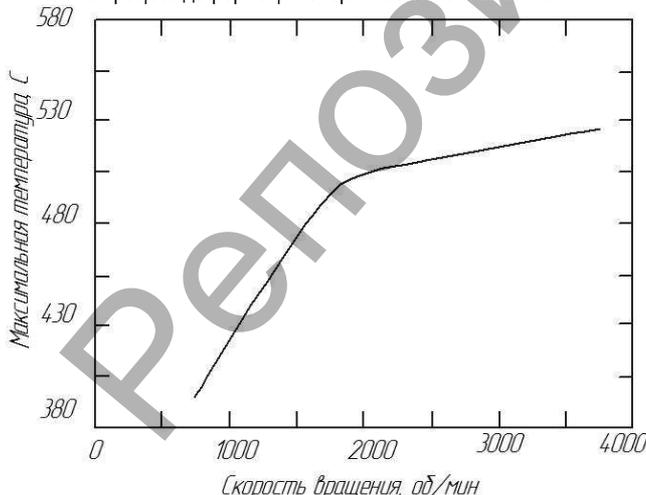


Рис. 2. Зависимость между скоростью вращения инструмента и температурой в зоне сварки [2]

Установлено, что при увеличении частоты вращения (возрастании энергозатрат) твердость по сечению ядра сварной точки более однородна, что влечет увеличение размеров зерен. При очень высо-

кой частоте вращения инструмента ядра сварной точки начинают разрушаться благодаря кристаллизации вокруг крупных зерен. Для каждого материала и его толщины имеется оптимальное соотношение частоты вращения инструмента и скорости перемещения по стыку.

Лучшим способом оценки качества сварки трением с перемешиванием является сравнение его с другими методами сварки. Деформация минимально ограниченного пространства при малом тепловложении и при твердом состоянии материала определяет качество сварки трением с перемешиванием выше качества других методов сварки, таких как полуавтоматическая (MIG/MAG) сварка, электродуговая аргоновая сварка (TIG). На рисунке 3 показано сравнение шва, полученного с помощью сварки трением с перемешиванием (а) и с помощью электродуговой аргоновой сварки (б).

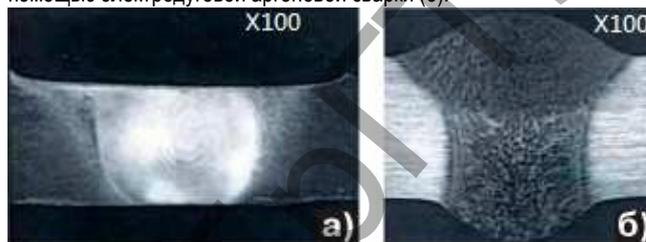


Рис. 3. Сечение швов, полученных сваркой трением с перемешиванием (а) и с помощью электродуговой аргоновой сварки (б) [3]

Проведенные исследования свойств соединений сваркой трением с перемешиванием высокопрочных алюминиевых термически не упрочняемых и термически упрочняемых сплавов, например, сплавов АМг4 и АМг5 (группы Al–Mg) и АД35 (группы Al–Si–Mg), показали, что по пределу прочности соединение сплавов АМг4 и АМг5 близко к основному. Для соединения сплава АД35 коэффициент прочности снижается до ~0,65 [2] вследствие разупрочнения ЗТВ, по которой при испытании идет разрушение. У сварных образцов сплавов АМг4 и АМг5 разрушение происходит в зоне ядра шва. Установлено [1], что σ_b соединения увеличивается при увеличении скорости сварки и частоты вращения инструмента до определенного значения. При дальнейшем увеличении этих параметров σ_b соединения сплавов АМг4 и АМг5 снижается, как и сплава АД35, если продолжать увеличивать скорость сварки.

Уровень усталостной прочности соединений после сварки трением с перемешиванием термически не упрочняемого сплавов АМг4 и АМг5 также выше при меньшей дисперсии значений, чем термически упрочняемого сплава АД35 [5, 6].

Большое количество данных по усталостным характеристикам соединений сваркой трением с перемешиванием в обобщенном виде введено в Европейские рекомендации по проектированию конструкций из алюминиевых сплавов, работающих в условиях усталости (ECCS 68.1992), а также в британский стандарт BS 8118, ч. 1 "Использование алюминия в конструкциях".

Анализ опубликованных результатов исследований процесса сварки трением с перемешиванием и свойств соединений алюминиевых сплавов разных групп легирования подтверждает необходимость разработки для каждого из сплавов параметров режима сварки, соответствующих его термомеханическим характеристикам.

Результаты испытания соединений сплавов АМг6 [7] на общую коррозию, межкристаллитную коррозию и коррозию под напряжением в агрессивной среде, в том числе в контакте с компонентами топлива, показывают значительное преимущество сварки трением с перемешиванием перед сваркой плавлением. Также сообщается о высоких показателях механических свойств соединений алюминиевых сплавов АМг4 и АМг5, 1201 и АМг6 при криогенной и повышенной температурах (рис. 4), что обеспечило возможность использования соединений сваркой трением с перемешиванием в конструкции топливных емкостей и баков изделий, работающих в условиях экстремальных температур.

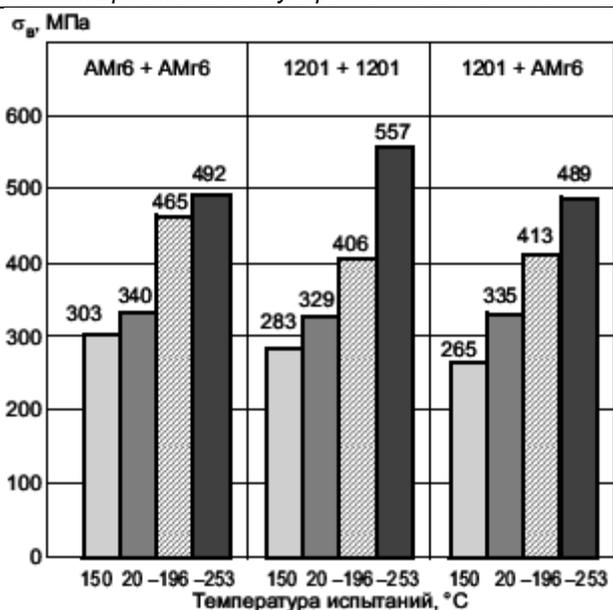


Рис. 4. Механические свойства соединений, полученных фрикционной сваркой (приведены минимальные значения, испытывали 5 образцов толщиной 4,0 мм)

Предложено использовать процесс сварки трением с перемешиванием для сварки разных типов соединений — нахлесточных, угловых, тавровых. Однако, в связи с особенностями геометрии соединений и проведения самого процесса сварки трением с перемешиванием тавровых и угловых соединений, возникает проблема формирования галтелей с плавным сопряжением поверхностей элементов профиля. Такое соединение имеет небольшой ресурс при циклических нагрузках и благоприятные условия для развития коррозии.

Большое внимание уделяется исследованию особенностей процесса сварки нахлесточных соединений, что связано с востребованностью их для многих изделий. Работоспособность данного соединения предложено оценивать по критерию EST (эффективной толщине листа, определяемой расстоянием от наружной поверхности шва до линии пересечения контактных поверхностей соединяемых листов с границей шва). Чем меньше изгиб контактных поверхностей вблизи шва, тем больше EST и прочность соединения. Получен коэффициент прочности, равный 0,86 для нахлесточного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием сплавов Д16 (верхний лист толщиной 3 мм) и 7075 (нижний лист) [9].

Малоизученными остаются процессы сварки трением с перемешиванием материалов с более высокой, чем у алюминиевых сплавов, температурой перехода в пластическое состояние, например, сплавов магния AZ31 и AZ91, меди и медных сплавов, титановых сплавов и сталей. Это связано с необходимостью проведения дополнительных исследований и разработок по совершенствованию инструмента, оборудования и технологического процесса с целью получения устойчивых результатов по формированию соединения и его рабочим характеристикам [4].

Анализ полученных в результате исследований технологий и рабочих характеристик соединений алюминиевых сплавов разных групп легирования в разноименном сочетании позволяет делать выводы о возможности их практического использования в конструкциях изделий ответственного назначения.

Слабоизученным остается процесс сварки трением с перемешиванием разнородных материалов (с большим различием термомеханических характеристик). Имеющиеся результаты исследований не позволяют судить о готовности к промышленному применению процесса сварки таких материалов. Имеются сведения об исследованиях процесса сварки трением с перемешиванием соединений разнородных материалов, например, в сочетаниях алюминиевого сплава с магниевым сплавом, медным сплавом и сталью [10]. Полу-

чены некоторые представления об особенностях процесса, сформулированы требования к ориентации инструмента относительно линии стыка, определена область оптимальных скоростей вращения инструмента и другие параметры, например при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава AMr6 с низкоуглеродистой сталью 30. Прочность соединения при этом составила 0,86 прочности основного материала (алюминиевого сплава) [8]. Из этого следует, что промышленное применение сварки трением с перемешиванием разнородных материалов изделий ответственного назначения требует проведения дополнительных исследований и разработок.

Заключение. Таким образом, сварка трением с перемешиванием является новым и перспективным способом сварки особо ответственных конструкций. Из проведенного анализа можно сделать вывод, что к промышленному применению можно считать подготовленным процесс сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов в одноименном и практически подготовленным в разноименном сочетании. Слабоизученной остается сварка трением с перемешиванием разнородных материалов. В этом направлении предлагается провести ряд исследований. Также актуален вопрос разработки и внедрения соответствующих стандартов и спецификаций при сварке трением с перемешиванием. Несмотря на это, благодаря высоким свойствам получаемых сварных соединений данный вид сварки может найти широкое применение при сварке листовых конструкций особо ответственных деталей и узлов (например, емкостей для криогенных жидкостей, деталей авиакосмической промышленности). Скорость сварки и высокое качество, получаемое без дополнительной предварительной или последующей обработки шва, позволяет применять сварку трением с перемешиванием для получения высококачественных соединений в строительстве и в судостроении.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сеть профессиональных контактов специалистов сварки [Электронный ресурс] / Сварка трением с перемешиванием. – М, 2008. – Режим доступа: <http://www.weldzone.info/technology/ets/497-svarka-treniem-s-peremeshivaniem>. – Дата доступа: 15.04.2012.
2. Karlsson, J. Larsson Microstructure and properties of friction stir welded aluminium / J. Karlsson, B. Karlsson, H. Larsson // INAL-CO'98, 7th International Conference "Joints in aluminium". – Cambridge (UK), 1998.
3. Tanaka, S. et al. Joining dissimilar alloys between AA5083 and A6N01 by friction stir welding // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. – Kobe (Japan), 2001.
4. Steuwer, A. Influence of welding speed on the properties of AA5083-AA6082 dissimilar FSW's // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. – Montreal (Canada), 2006.
5. Larsson, H. Friction stir welding of AA5083 and AA6082 aluminium / H. Larsson, L. Karlsson, L. Swensson // Svetsaren. – 2000. – № 2. – P. 6–10.
6. Nicholas, E.D. Friction Stir Welding – a decade on / E.D. Nicholas, Kalle, W. Stephan // IIW Asian Pacific International Congress. – Sydney, 2000.
7. Служебные характеристики соединений алюминиевых сплавов 1201 и AMr6, выполненных фрикционной сваркой / В.А. Половцев, М.М. Штрикман, Г.В. Шилло [и др.] // Технология машиностроения. – 2006. – № 4. – С. 30–34.
8. Особенности формирования соединения из разнородных алюминиевых сплавов Д19 и 1420 при фрикционной сварке линейных швов / М.М. Штрикман, А.А. Филатов, А.А. Гельман, Л.Б. Бер // Сварочное производство. – 2005. – № 1. – С. 15–21.
9. Hayashi, M. et al. Mechanical properties of friction stir welded 5083 aluminium alloy at cryogenic temperatures // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. – Kobe (Japan), 2001.
10. Cederqvist, L. Factors affecting the properties of friction stir welded aluminium lap joints / L. Cederqvist, A.P. Reynolds // Welding Journal. – 2000. – № 12. – P. 281–287.

Материал поступил в редакцию 09.10.12