

УДК 621.791.14

Харламов Ю. А., Петров П. А., *Орлов А. А.
 Донбасский государственный технический университет
 *E-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru

ПОЛУЧЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Статья посвящена развитию сварочных технологий и их применению. Рассмотрены такие высококонцентрированные источники энергии, как плазменные, электронно-лучевые, лазерные и другие. Авторы выделяют ряд недостатков, присущих сварке плавлением. Параметры геометрии инструмента и режимы сварки трением с перемешиванием являются ключевыми факторами, влияющими на формирование качественного сварного соединения. Геометрические особенности фрикционного инструмента и жесткость технологической системы имеют важное значение для обеспечения высокого качества сварки. Помимо этого, параметры, определяющие формирование соединения при СТП, включают тип соединяемых материалов, их теплофизические и физико-механические свойства, тип сварного шва и толщину соединяемых деталей. Работа содержит информацию о системах автоматического управления процессами сварки, что может быть использовано для разработки новых автоматических систем управления сварочными процессами.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, СТП, сварные соединения и конструкции, рабочий инструмент, режимы сварки, сварочное оборудование.

Введение. Развитие и активное расширение применения сварочных технологий, начиная с 50-х годов прошлого века, связано с применением высококонцентрированных источников энергии (плазменных, электронно-лучевых, лазерных и др.), а также с разработкой теории и новых способов сварки материалов в твердой фазе. Однако сварке плавлением присущ ряд недостатков: остаточные напряжения, приводящие к деформации изделия; прочность сварного шва ниже прочности основного металла; термическое разупрочнение металла, снижающее конструктивную прочность; образование дефектов в виде трещин при сварке ряда высокопрочных термоупрочняемых сплавов; высокая трудоемкость (при многопроходной аргоно-дуговой сварке необходимо зачищать каждый проход шва для снижения вероятности появления дефектов; большое количество слесарных операций при подготовке сварочных кромок перед сваркой и удаление (зачистка) проплава после сварки); для целого ряда высокопрочных сплавов отсутствует сама возможность получить качественное соединение [1]. Поэтому одним из перспективных направлений технологии

изготовления новых видов изделий машиностроения является изыскание и разработка прогрессивных способов сварки, способных устранить или уменьшить недостатки и расширить технологические возможности существующих способов получения неразъемных соединений.

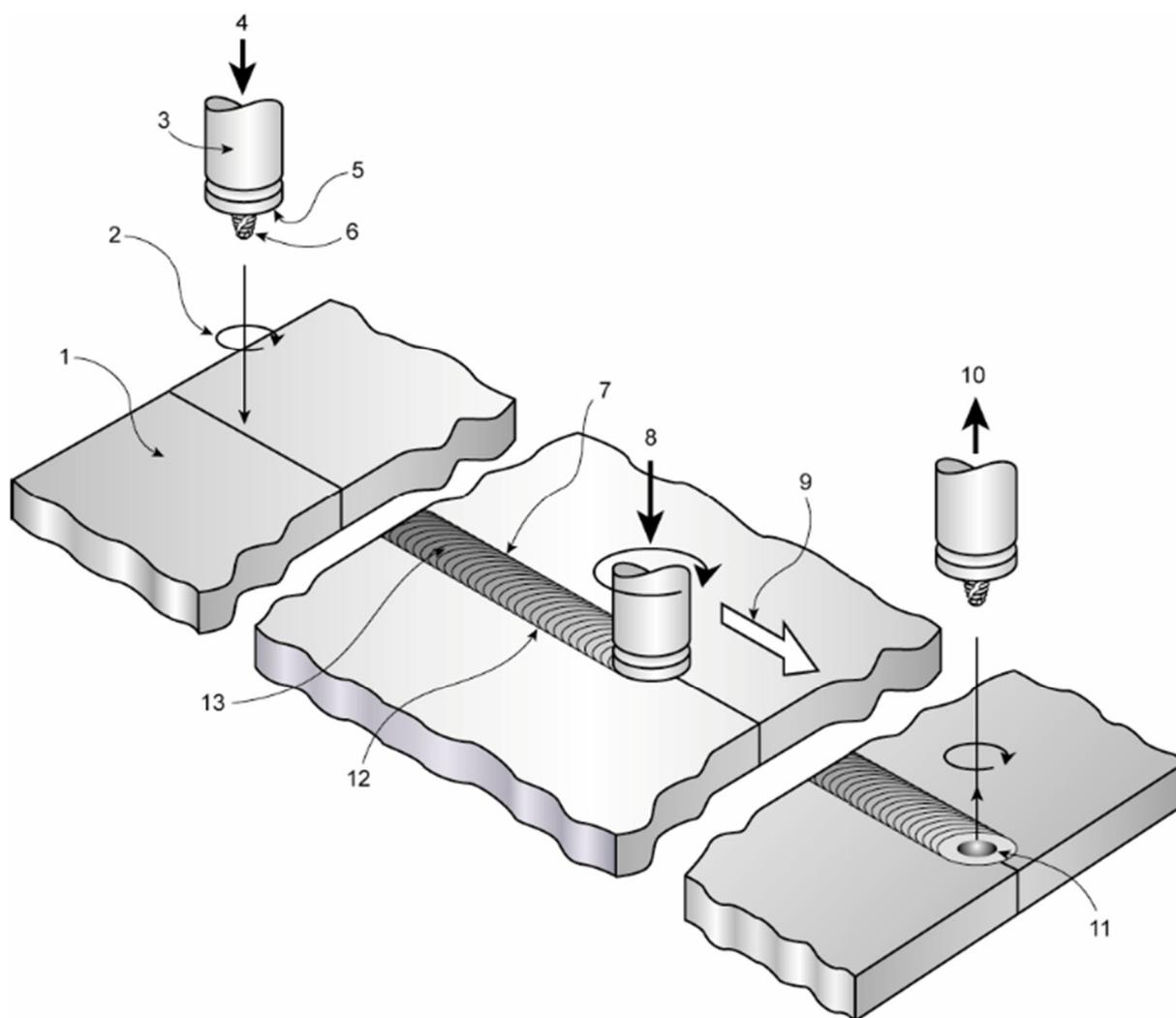
Одним из таких решений явилось изобретение способа сварки трением с перемешиванием (Friction Stir Welding — FSW) (СТП). Этот способ был запатентован в 1991 г. Британским институтом сварки (TWI) и бурно развивается. СТП стала интенсивно изучаться и быстро доведена до широкого применения. Наибольшее распространение сварка трением с перемешиванием получила при производстве корпусных изделий транспортного и авиакосмического назначения из алюминиевых сплавов, что связано в первую очередь с достаточно низкой температурой перехода алюминиевых сплавов в сверхпластичное состояние. Основная проблема использования сварки трением с перемешиванием для более тугоплавких материалов связана с деградацией рабочего инструмента и его износом при повышенных температурах.

Преимущества и недостатки СТП подробно изложены в многочисленной литературе, новые результаты исследований и практических разработок обсуждаются на специальных международных симпозиумах по сварке трением с перемешиванием [2–6].

Целью данной статьи является системный анализ процессов сварки трением с

перемешиванием и путей обеспечения качества получаемых сварных швов.

Сварка трением с перемешиванием относится к механической группе видов сварки. СТП осуществляется с помощью специального фрикционного инструмента, перемещающегося в направлении сварки. Сущность процесса СТП иллюстрирует принципиальная схема на рисунке 1 [7].

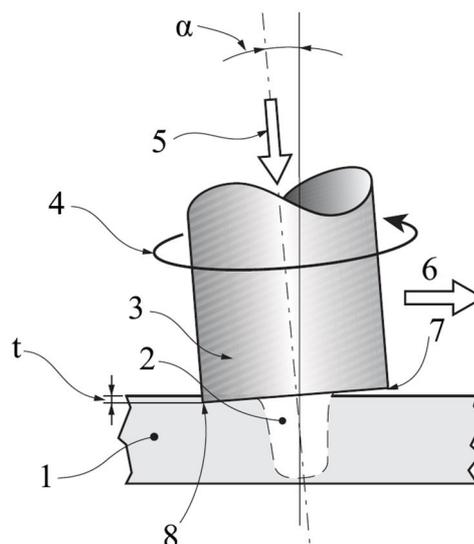


- 1 — свариваемые детали; 2 — направление вращения инструмента (по часовой стрелке);
 3 — фрикционный инструмент; 4 — направление перемещения сварочного инструмента в начале сварки;
 5 — заплечик фрикционного инструмента; 6 — наконечник фрикционного инструмента;
 7 — наступающая сторона сварного соединения; 8 — осевая сила; 9 — направление сварки;
 10 — направление перемещения фрикционного инструмента в конце сварки; 11 — выходное отверстие —
 кратер; 12 — отступающая сторона сварного соединения; 13 — сварной шов

Рисунок 1 — Схема сварки трением с перемешиванием [7]

Рабочая часть инструмента 3 имеет специальный профиль. Начальным этапом процесса является введение вращающегося инструмента с заданным усилием внедрения в стык заготовок свариваемого материала. Фрикционный инструмент 3 конструктивно состоит из заплечика 5 и наконечника (рабочего стержня) 6. Процесс СТП заключается во внедрении наконечника вращающегося инструмента в стык свариваемых деталей 1 до контакта и прижима с ними заплечика и его движения вдоль линии стыка и выхода из стыка заготовок в конце сварного шва [7]. Одновременно с этим заготовки прижимаются к подложке вращающимся заплечиком с необходимой осевой силой (поз. 8). Трение, возникающее в контактах «заплечик — лицевая сторона деталей» и «наконечник — материал деталей», приводит к локальному разогреву материала деталей в области сварки и его переходу в высокопластичное состояние. При этом температура материала в области сварки не превышает температуры плавления металла [2, 3]. За движущимся фрикционным инструментом образуется сварной шов 13. При окончании процесса сварки фрикционный инструмент извлекается из деталей. После извлечения инструмента в конце сварного шва образуется выходное отверстие — кратер 11.

На рисунке 2 приведено эскизное изображение фрикционного инструмента в процессе сварки (вид сбоку). В общем случае фрикционный инструмент наклонен под некоторым углом α относительно нормали к лицевой поверхности свариваемых деталей. Это приводит к некоторому внедрению задней кромки заплечика в заготовку на величину занижения сварного шва t . При этом заплечик защищает место сварки от воздействия окружающей среды. В результате нагрева от трения и приложенного давления металл под буртом переходит в размягченное пластифицированное состояние. За счет перемешивания пластифицированного металла с помощью фрикционного инструмента и приложения к нему давления за инструментом образуется сварной шов.



1 — свариваемые детали, 2 — наконечник, 3 — заплечик, 4 — направление вращения, 5 — осевая сила, 6 — направление сварки, 7 — передняя кромка заплечика, 8 — задняя кромка заплечика, t — занижение сварного шва, α — угол наклона

Рисунок 2 — Взаимодействие фрикционного инструмента с заготовками в процессе сварки [2, 3]

Параметры, определяющие формирование соединения при СТП. Подбор технологических параметров для формирования качественного соединения при СТП зависит от типа соединяемых материалов, их теплофизических и физико-механических свойств, типа сварного шва, толщины и конфигурации соединяемых деталей, геометрии и материала фрикционного инструмента, технологического оснащения для установки и закрепления свариваемых деталей и др. *Основными технологическими параметрами режима сварки*, влияющими на качество сварного соединения при СТП, являются: частота вращения инструмента (шпинделя) (n , об/мин); направление вращения инструмента (по часовой или против часовой стрелки); направление и скорость перемещения инструмента вдоль сварного шва (скорость сварки ($v_{св}$, м/мин); величина внедрения инструмента (h , мм), учитывающая показатели заглубления наконечника и заглубления заплечика; угол наклона

инструмента (α); жесткость технологической системы (j), условия и силы закрепления свариваемых заготовок.

Основными параметрами геометрии инструмента являются: форма и диаметр рабочей поверхности заплечика; длина, геометрическая форма и размеры поперечного сечения наконечника и их изменение по длине. Заплечик и наконечник могут быть выполнены гладкими или с различными канавками, выступами, углублениями и другими конструктивными элементами. Чем выше твердость и прочность свариваемых материалов, тем более высокие требования предъявляются к материалам фрикционных инструментов.

В процессе сварки на инструмент действует сила, составляющими которой являются: F_x — сила сопротивления перемещению в направлении сварки (вдоль шва); F_y — сила, действующая перпендикулярно направлению сварки в плоскости, параллельной или касательной (при сварке криволинейных поверхностей) поверхностям стыкуемых элементов (плоскость сварки); F_z — сила, действующая в направлении, перпендикулярном плоскости сварки, с которой связана нормальная сила прижатия инструмента к свариваемым листам ($P = F_z, H$).

На процесс СТП влияют свойства свариваемых материалов: коэффициенты теплопроводности ($\text{Вт}/(\text{см}\cdot\text{К})$); объемная теплоемкость ($\text{Дж}/\text{см}^3\cdot\text{К}$); коэффициенты температуропроводности ($\text{см}^2/\text{с}$); температурные зависимости коэффициента трения между материалами фрикционного инструмента и свариваемых заготовок; температура плавления; температурные зависимости предела текучести и др.

Вращение инструмента обеспечивает нагрев материала путем тепловыделения при трении и его перенос в процессе движения инструмента вдоль шва от фронтальной к тыловой части зоны сварки. Увеличение частоты вращения инструмента повышает тепловыделение, интенсифицирует перенос материала и его перемешивание [2, 3].

Температура соединяемых материалов в зоне сварки определяется достигаемыми скоростями и моментом вращения инструмента, условиями трения и тепловыделения. Слишком низкая температура материала вызывает высокие силовые воздействия, приводит к повышенному износу или разрушению инструмента. Слишком высокая температура может привести к дефектам, обусловленным плавлением материала, фазовому переходу и рекристаллизации. Максимальная температура при сварке трением с перемешиванием составляет около 70 % значения температуры плавления и для алюминия не превышает $550\text{ }^\circ\text{C}$ [2].

Основными источниками теплоты являются работа трения на поверхностях контакта инструмента и изделия, а также энергия деформации свариваемого металла. Основным источником стока тепла является его отвод в детали за счет высокой теплопроводности алюминия. Остальными источниками — подкладка и прижимы сборочно-сварочной оснастки, а также конвективный теплообмен с окружающей средой. В инженерных расчетах теплообменом с окружающей средой обычно пренебрегают. Общая тепловая мощность при СТП возникает вследствие преобразования в теплоту работы внешних сил трения в месте контакта инструмента и свариваемой детали, т. е. механической работы. Между механической мощностью и тепловой теоретически нет полной количественной идентичности, так как часть механической энергии переходит в поглощенную энергию деформации кристаллической решетки. Принято считать, что вся механическая энергия переходит в тепловую [8]. При СТП тепловая мощность (тепловложение) определяется зависимостью $q = M_{\text{тр}}\omega$, где $M_{\text{тр}}$ — крутящий момент (момент трения), Нм ; $\omega = \pi n/30$ — угловая скорость вращения инструмента, с^{-1} ; n — скорость вращения инструмента, $\text{об}/\text{мин}$.

Скорость сварки — один из важнейших параметров. Малые скорости сварки могут привести к перегреву материала, изменению

условий термомеханического воздействия инструмента на заготовки, увеличению зоны термического влияния и в результате — к возникновению дефектов и снижению прочностных характеристик сварного соединения. Скорость сварки и угловую скорость инструмента выбирают так, чтобы температура в зоне сварки была ниже температуры фазового перехода и/или точки твердофазного превращения этих материалов. Для достижения оптимальных условий при увеличении скорости сварки необходимо увеличивать скорость вращения инструмента.

Силы, действующие на инструмент (прижатия и перемещения), зависят от материалов свариваемых заготовок, геометрии сварочного инструмента и его ориентации (наклона) относительно плоскости сварки, скорости сварки и др. При прочих равных условиях значения силы растут с уменьшением температуры и увеличением скорости сварки. Высокие силы могут привести к разрушению инструмента.

Угол наклона инструмента относительно нормали к поверхности сварки устанавливается в некоторых случаях для улучшения условий формирования сварного соединения инструмента. Обычно такой наклон производится на угол $1,5 \dots 4,5^\circ$ с обеспечением более низкого положения края бурта за ее зоной. Наклон инструмента способствует улучшению условий проковки шва буртом. Если угол наклона слишком мал, то это может привести к образованию дефектов в виде непроваров на наружной поверхности шва, а если угол наклона слишком велик — возможно нарушение сплошности шва у корня с образованием тоннельного дефекта.

Крутящий момент, обеспечиваемый на шпинделе инструмента, зависит от частоты вращения инструмента, усилия прижима инструмента к заготовке, коэффициента трения предела текучести материала. Величина крутящего момента определяет мощность процесса сварки ($N = (M_{кр} \cdot n) / 9549$, кВт).

Глубина внедрения инструмента определяется как расстояние от поверхности заготовки до нижнего положения торца

наконечника. Наиболее важными являются глубина заглабления заплечика и положение конца наконечника в корне сварного шва. Глубина погружения заплечика инструмента определяется как расстояние от поверхности заготовки до нижнего положения торца заплечика. Глубина погружения должна обеспечивать условия проковки шва на всю толщину свариваемого материала и исключение образования дефектов.

Слабое прижатие инструмента к поверхности деталей в процессе сварки или недостаточное заглабление заплечика инструмента в свариваемый материал приводит к увеличению объема, который должен заполняться пластифицированным металлом при формировании шва, и, как следствие, к снижению избыточного давления и образованию несплошностей в швах. Кроме того, при небольшом погружении заплечика инструмента в свариваемый металл в зоне сварки выделяется недостаточное количество тепла для обеспечения требуемого уровня пластифицирования, необходимого для качественного формирования шва, и на лицевой поверхности шва образуются дефекты в виде непроплава. Формирование качественных швов обеспечивается при усилиях прижима инструмента $5 \dots 10$ кН и зависит от марки свариваемого сплава [2, 3]. При этом бурт инструмента должен погружаться в свариваемый металл на глубину $0,1 \dots 0,2$ мм. Чрезмерное заглабление бурта приводит к перегреву металла и образованию на лицевой поверхности шва дефектов в виде надрывов.

Геометрия рабочего инструмента существенно влияет на течение материала в зоне сварки и, соответственно, на качество сварного соединения [9]. Максимальная температура свариваемого материала находится в зоне, подверженной воздействию участка стыка наконечника и заплечика инструмента [10].

Течение материала и распределение температуры в зоне сварки в существенной мере определяется скоростью вращения инструмента. С увеличением скорости вращения инструмента температура нагрева

материала возрастает и улучшается процесс перемешивания пластифицированного материала, однако повышенная скорость вращения приводит к перегреву материала и деградации его структуры [11]. Другим определяющим параметром является скорость сварки, при увеличении которой происходит уменьшение интегральной температуры области сварки и повышение усилий сварки [12, 13]. Угол ориентации инструмента изменяет усилие сварочного процесса и влияет на формирование микроструктуры сварного соединения [14].

При расположении инструмента по нормали процесс СТП может обеспечиваться особой формой опорного бурта фрикционного инструмента [15]. Важными параметрами также являются усилие прижима заготовок друг к другу и усилие внедрения, действующее на инструмент. При правильном подборе указанных параметров микроструктура сварных швов формируется свободной от дефектов, возникающих при сварке плавлением, а сами швы обладают улучшенными характеристиками [16–18]. В настоящее время разрабатываются модели формирования шва при СТП [19, 20], но механизм пластического течения материала в зоне шва требует дальнейшего изучения.

На сегодняшний день не существует полного комплекта нормативной документации, связанной с технологией СТП, в отличие от сварки плавлением. Серия стандартов ГОСТ ISO 25239 под общим наименованием «Сварка трением с перемешиванием.

Алюминий» состоит из пяти частей: 1. Словарь; 2. Конструкция сварных соединений; 3. Аттестация сварщиков-операторов; 4. Технические требования и аттестация процедуры сварки; 5. Требования к качеству и контролю. Их используют при разработке отраслевых стандартов, например в ГОСТ Р 59849-2021 «Соединения сварные конструкций кузовов железнодорожного подвижного состава из алюминиевых сплавов. Требования к проектированию, изготовлению, ремонту и контролю качества».

Характерные зоны соединений при сварке трением с перемешиванием. При СТП формируется шов, в структуре которого можно выделить несколько основных зон: «ядро» сварки, состоящее из термопластически деформированного материала, перенесенного выступом инструмента; зону термопластической деформации и зону термического влияния. Схема формирования сварного шва при перемешивающей сварке трением с указанием типичных зон влияния представлена на рисунке 3 [2, 3].

Центральная зона перемешивания (ядро сварки) имеет мелкие равноосные зерна. Такая структура образуется в результате рекристаллизации при действии интенсивных пластических деформаций и высоких температур. Макроструктура зоны перемешивания часто имеет выраженные «кольца» (луковичная структура) «закрученного» материала, испытывает самое сильное искажение и является следствием данного способа.



А — основной металл; В — зона термического влияния; С — зона термомеханического воздействия; D — зона перемешивания (ядро шва)

Рисунок 3 — Формирование шва при СТП с указанием зон в его сечении

Зона термомеханического влияния лежит по обе стороны зоны перемешивания. Пластическая деформация и температура в этих зонах ниже, чем в зоне перемешивания, следствием чего является образование структуры, имеющей участки мелких и сравнительно крупных зерен, поскольку эта зона рекристаллизована только частично. В зонах термического влияния зерна имеют большие размеры, поскольку их материал подвергается только воздействию повышенных температур при отсутствии пластических деформаций, что сопровождается ростом зерна. Материал в этой зоне имеет наиболее низкие прочностные свойства.

Зона термического влияния формируется в условиях меньших температур и температурных градиентов, чем при сварке плавлением, что положительно сказывается на ее структуре. Рост зерен выражен в значительно меньшей мере.

Асимметрия поперечной структуры шва сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием, обусловлена взаимно противоположным движением частей инструмента по правую и левую стороны от его оси вращения (по ходу движения и против хода движения). Различают сторону набегания, где направление вращения инструмента совпадает с направлением линии сварки, и противоположную сторону — отхода.

Выбор параметров процесса СТП. Проблемы подбора оптимальных параметров процесса СТП требуют комплексного подхода к изучению кинетики деформирования материала, генерирования и распределения тепла, формирования микроструктуры сварного шва и т. д. Все эти составляющие взаимосвязаны и проблемы оптимизации возникают каждый раз при переходе от одного свариваемого материала к другому, изменении толщины свариваемых материалов, применении различных инструментов. В технологии сварки для каждого случая предполагается существование диапазона значений технологических параметров, который обеспечивает качество сварного

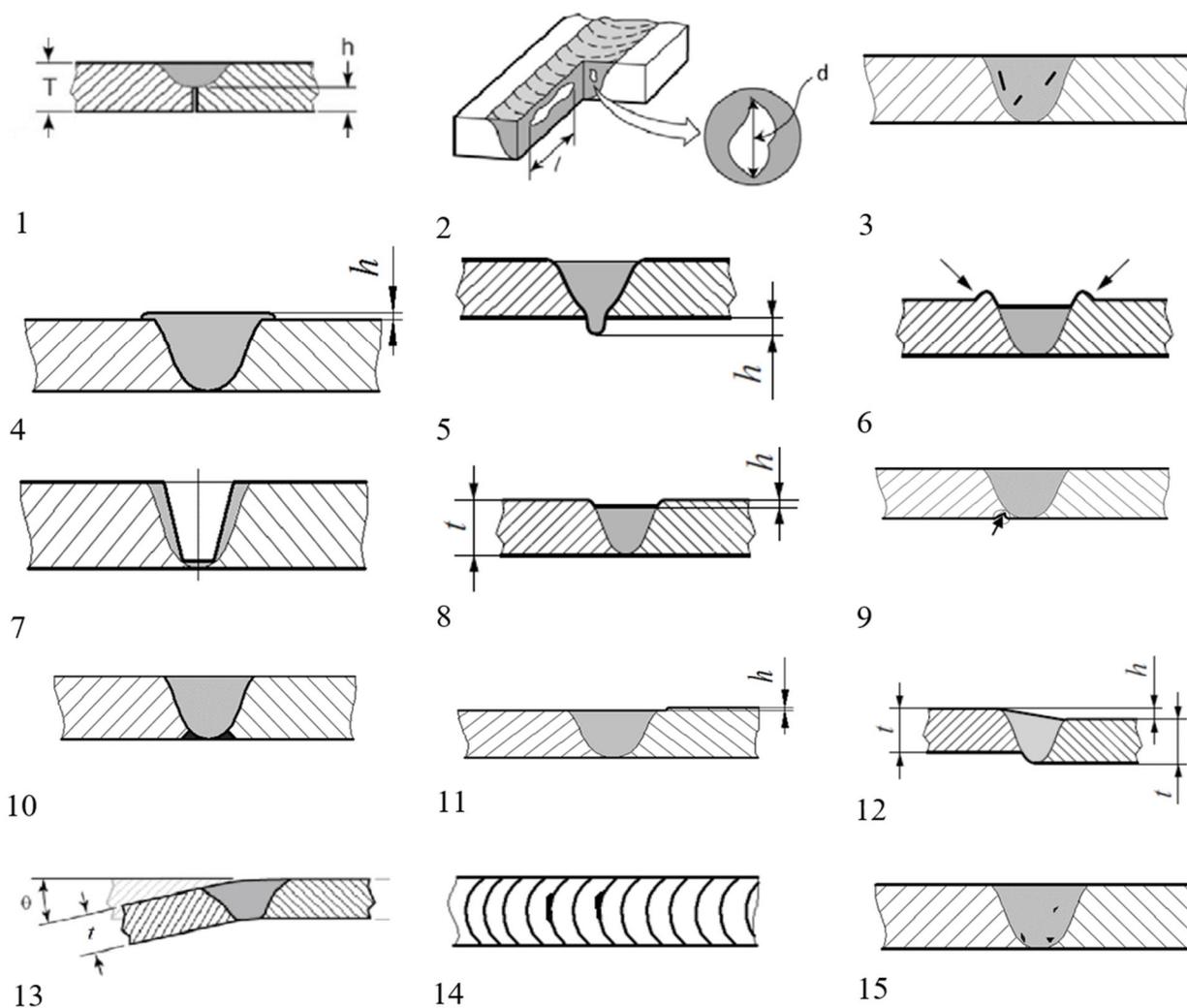
соединения [21]. В случае нарушения технологических параметров методу СТП присуще возникновение тех или иных дефектов структуры сварного соединения (дефектов типа каналов и непроваров, скоплений твердых включений и т. д.).

Разрабатываются способы прогнозирования поведения материала в процессе СТП по параметрам, значения которых обусловлены не возможностями оборудования, а реакцией свариваемого материала на интенсивное воздействие сварочного инструмента. Например, методами моделирования оценивают такие характеристики, как крутящий момент на шпинделе инструмента и усилие сварки [22, 23]. Контроль крутящего момента на инструменте открывает широкие возможности для автоматизации процесса СТП и получения качественных сварных соединений со стабильными характеристиками [24]. Предложена эмпирическая модель, позволяющая спрогнозировать температурный режим процесса СТП в зависимости от величины крутящего момента [25]. Однако эти методы еще не доведены до уровня инженерных методик.

Вследствие нарушения требований к сборке и подготовке поверхности свариваемых заготовок, выбору инструмента, а также режимов сварки трением с перемешиванием и технологии возникают дефекты сварных соединений [26]. Полное отсутствие дефектов, а также достижение всех необходимых свойств, надежности и технологичности соединения можно обеспечить тщательным подбором оптимальных режимов для конкретных свариваемых изделий. Неправильный выбор или их отклонение от оптимального значения может приводить к образованию характерных поверхностных или внутренних дефектов в виде грата, несплавлений и несплошностей. Известна классификация дефектов сварных соединений из меди, выполненных СТП, а также методов неразрушающего контроля для их идентификации и локализации [27]. Однако наиболее полно дефекты, возникающие при сварке трением с перемешиванием, изучены для алюминии-

вых сплавов, что объясняется их широким применением в процессах СТП. При СТП алюминиевых сплавов можно выделить несколько видов характерных дефектов, возникающих по разным причинам, а именно [28]: несплавление на лицевой поверхности шва, перегрев металла на лицевой поверхности шва, несплавление в корневой части шва и

внутренние дефекты в виде несплошностей. Наиболее легко с помощью визуального контроля выявляются внешние дефекты сварных соединений. К таким дефектам можно отнести протяженные и локальные несплавления, а также перегрев металла на лицевой поверхности шва. Основные виды дефектов представлены на рисунке 4.



1 — «Непровар корня шва» (Incomplete penetration); 2 — «Канал» (Cavity); 3 — «Микротрещины»; 4 — «Наплыв с лицевой стороны шва»; 5 — «Наплыв с корневой стороны шва» (Excess penetration); 6 — «Грат» (Toe flash); 7 — «Кратер»; 8 — «Занижение лицевой стороны шва» (Underfill); 9 — «Подрез»; 10 — «Проникновение металла плакировки»; 11 — «Резкий переход от сварного шва к основному металлу»; 12 — «линейное смещение заготовок» (linear misalignment); 13 — «угловое смещение заготовок» (angular distortion); 14 — «Задиры» (Irregular surface); 15 — «Твердые включения»

Рисунок 4 — Основные виды дефектов соединений при сварке трением с перемешиванием

К основным причинам возникновения несплавления на лицевой поверхности шва можно отнести: малый диаметр заплечика инструмента; большой диаметр наконечника инструмента; значительное углубление на рабочей (торцевой) поверхности заплечика инструмента; недостаточное заглубление заплечика инструмента в свариваемый металл; недостаточное усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; малая частота вращения инструмента; значительная скорость сварки; большой зазор в стыке и смещение оси стыка относительно инструмента; ненадежная фиксация свариваемых кромок [29, 30].

Основные причины образования перегрева лицевой поверхности шва следующие: большой радиус заплечика инструмента; чрезмерное усилие прижатия инструмента; большой угол наклона инструмента относительно вертикальной оси; значительная частота вращения инструмента; малая скорость сварки; недостаточная чистота обработки рабочей поверхности заплечика инструмента; загрязнение поверхностей свариваемых деталей.

Грат при СТП возникает вследствие чрезмерного заглубления заплечика инструмента в свариваемый металл, большого угла наклона инструмента относительно вертикальной оси, чрезмерного завышения (депланации) кромки со стороны отхода инструмента; отклонения инструмента от вертикальной оси влево или вправо относительно стыка, ненадежной фиксации свариваемых кромок.

Наиболее часто встречаемым типом дефекта является непровар корня шва (kissingbond). Непровар — это отсутствие металлических связей по сечению свариваемых кромок деталей, возникающее из-за невозможности пластифицированного металла достичь корня шва [31].

Причинами возникновения несплавления в корневой части шва при СП являются: недостаточные для данной толщины свариваемого металла длина наконечника, погружение заплечика инструмента в свариваемый

металл и усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; большое смещение оси стыка относительно инструмента; износ наконечника инструмента в процессе сварки.

Дефекты в виде рыхлоты возникают в швах как в случае перегрева свариваемого металла, так и при недостаточном тепловыделении для пластификации металла в зоне сварки.

Чрезмерный нагрев металла в зоне сварки, приводящий к оплавлению межзеренных границ со скапливающимися там легкоплавкими эвтектиками, происходит в основном по тем же причинам, что и вследствие перегрева лицевой поверхности шва металла и образования грата. Только степень перегрева металла при этом более высокая.

В случае недостаточного тепловыделения в зоне сварки нарушается непрерывность потока пластифицированного металла, и в шве образуются внутренние, не заполненные металлом полости.

В структуре образцов, сварка которых была выполнена с самыми высокими значениями частоты вращения инструмента наблюдали дефекты сварки, получившие в англоязычной литературе название wormhole или «червоточина» [32, 33].

Этот наиболее часто встречающийся тип дефекта при сварке трением с перемешиванием имеет вид несплошности на наступающей стороне шва и возникает, предположительно, вследствие чрезмерно высокой скорости поступательного движения инструмента относительно заготовки, когда увлекаемый инструментом слой металла не успевает заполнять пространство позади этого инструмента. В пластинах большей толщины этот дефект проявился наиболее масштабно. Можно предположить, что при воздействии динамических нагрузок на сварное соединение снижение прочности будет более заметным, поскольку в этих условиях дефект будет активно играть роль концентратора напряжений.

При изготовлении сварных узлов техническими условиями регламентируются

нормы недопустимых без исправления дефектов, в соответствии с категорией соединения оговаривается их максимальный размер, количество и расположение.

При исправлении дефектов путем подварок наблюдается изменение свойств металла шва и близлежащих участков зоны термического влияния. Степень изменения свойств сварных соединений определяется технологией выполнения подварок.

Управление процессами сварки трением с перемешиванием осуществляется соответствующими воздействиями на машину при СТП для обеспечения выполнения заданного технологического процесса сварки с достижением требуемых параметров сварного шва. Оно осуществляется системами автоматического управления (САУ) машин для СТП.

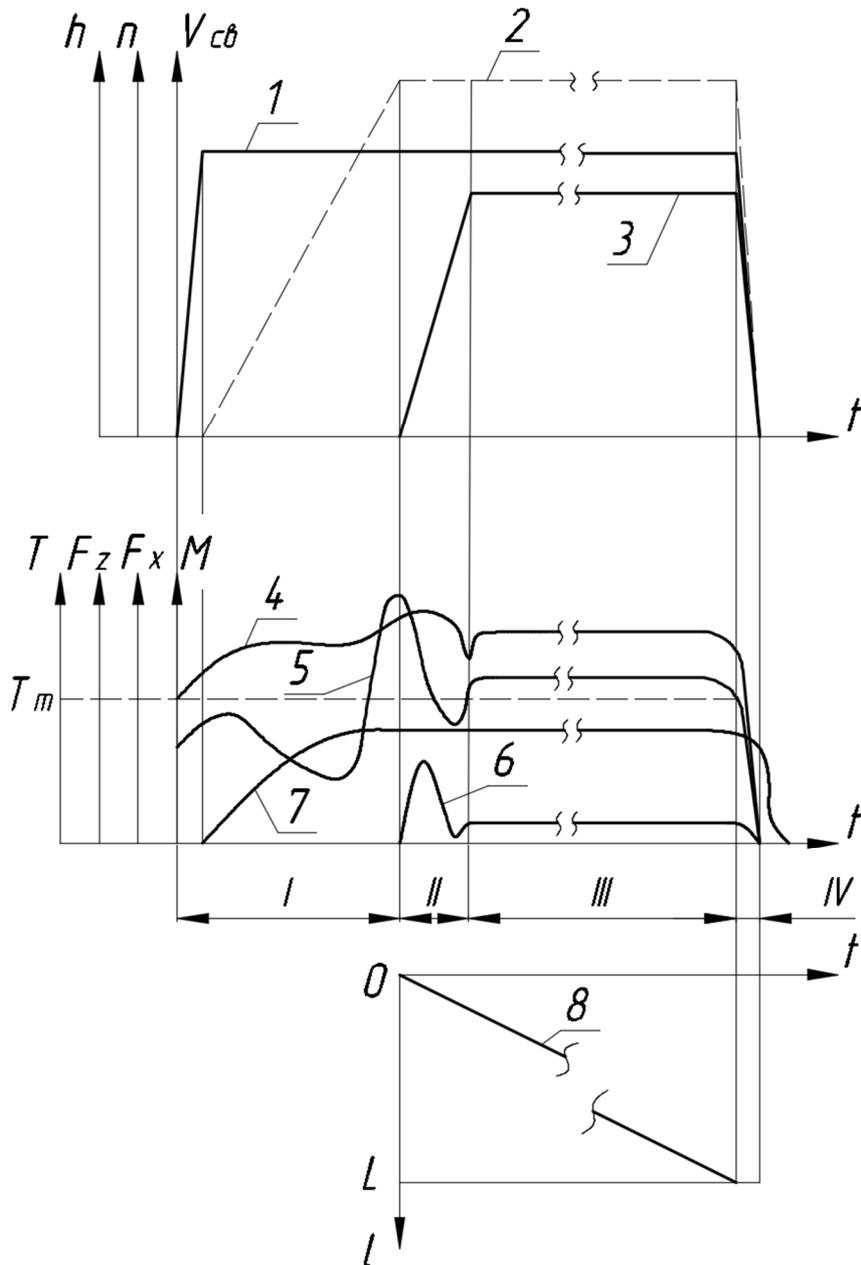
Управление машинами для СТП выполняется на основе заранее разработанных или подобранных программ. САУ обеспечивает: точное и согласованное во времени взаимодействие исполнительных механизмов машины, создающих вращательное движение с заданной угловой скоростью фрикционного инструмента; быстрое перемещение инструмента в точку ввода в заготовки в начале сварного шва; быстрый осевой подвод инструмента к лицевой поверхности заготовок; внедрение с заданной скоростью наконечника в заготовки до точно заданного положения вершины наконечника относительно опорной плиты установочного приспособления; перемещение фрикционного инструмента вдоль сварного шва с заданной скоростью; вывод инструмента из свариваемых заготовок в конце сварного шва. Одной из проблем СТП является формирование качественного соединения в нижней (корневой) части шва, которое зависит, в частности, от величины заглубления инструмента. Эксперименты по сварке тонких листов из сплава АМгб показали, что при отклонении величины заглубления инструмента от номинального значения всего на 0,02 мм в корне шва может возникнуть дефект типа непровара [34].

Обобщенная циклограмма однопроходного процесса СТП представлена на рисунке 5.

Однопроходной процесс получения сварного шва может быть разделен на четыре основных этапа: I — внедрение фрикционного инструмента в свариваемые заготовки в начале процесса формирования сварного шва; II — начало движения фрикционного инструмента вдоль сварного шва до достижения требуемой скорости сварки; III — перемещение фрикционного инструмента вдоль сварного шва (установившийся режим непосредственно сварки); IV — завершение процесса до остановки (вывода) фрикционного инструмента. На первом этапе внедрение инструмента в свариваемые детали начинается с некоторой задержкой от начала его вращения до достижения требуемой угловой скорости. Первый этап заканчивается внедрением инструмента в свариваемые детали на требуемую глубину, разогревом и пластифицированием свариваемых материалов до установленного уровня. После этого начинается второй этап начального движения фрикционного инструмента в направлении сварки с последующим переходом к третьему этапу установившегося режима формирования сварного шва.

По окончании формирования сварного шва на установленной длине начинается заключительный этап вывода инструмента из заготовок. Наибольшие колебания значений осевого усилия на инструменте, момента трения, температуры в зоне сварки и силы сварки наблюдаются на первом и втором этапах. Границы этих этапов смещаются при изменении условий сварки, например, толщины и размеров заготовок.

Системы автоматического управления (САУ) могут работать на основе полной заранее подобранной программы управления процессом СТП для конкретных свариваемых деталей без изменения и корректировки технологических режимов сварки. Подбор и отработка этих режимов выполняются экспериментальными методами или на основе опыта сварки в подобных условиях с экспериментальной проверкой.



I — внедрение фрикционного инструмента в свариваемые заготовки в начале процесса формирования сварного шва; II — начало движения фрикционного инструмента вдоль сварного шва до достижения требуемой скорости сварки; III — перемещение фрикционного инструмента вдоль сварного шва (установившийся режим непосредственно сварки); IV — завершение процесса до остановки (вывода) фрикционного инструмента; 1 — частота вращения фрикционного инструмента; 2 — величина (глубина) внедрения фрикционного инструмента в свариваемые заготовки; 3 — скорость сварки $v_{св}$ (скорость перемещения фрикционного инструмента вдоль сварного шва); 4 — нормальная (осевая) сила F_z ; 5 — величина крутящего момента M ; 6 — сила сопротивления перемещению фрикционного инструмента в направлении сварки F_x (сила сварки); 7 — температура в зоне сварки; 8 — величина перемещения фрикционного инструмента вдоль сварного шва

Рисунок 5 — Обобщенная циклограмма сварки трением с перемешиванием, отражающая изменение режимных параметров

Другая группа САУ может работать на основе неполной начальной информации, которая с целью оптимального управления дополняется и корректируется в процессе сварки на основе использования текущей технологической информации, получаемой с помощью различных датчиков (адаптивные системы управления).

Выводы:

1. Дальнейшее промышленное освоение процессов сварки трением с перемешиванием требует разработки рекомендаций по обеспечению технологичности конструкций, изготавливаемых с применением СТП.

2. Требуют существенного расширения работы по изучению свариваемости и особенностей формирования соединений при СТП более широкой номенклатуры металлов и сплавов, в т. ч. железуглеродистых,

изучение возникающих в них дефектах и методов их предупреждения и разработка норм допустимых дефектов.

3. При разработке фрикционного инструмента для СТП следует учитывать обширный мировой опыт по проектированию, производству и эксплуатации металлорежущего инструмента, а также организации производства фрикционного инструмента на предприятиях инструментальной промышленности.

4. Требуют детального изучения механизмы и причины износа и поломок фрикционного инструмента для СТП и разработка нормативов по их стойкости.

5. Необходимо развивать исследования и разработки по повышению технологической гибкости машин и оснащения для СТП с возможностью снижения серийности производства изделий.

Список источников

1. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / А. В. Коновалов [и др.] ; под ред. В. М. Неровного. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2007. 752 с.
2. Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing // *Materials Science and Engineering R* 50. 2005. P. 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
3. Vilaça P., Gandra J., Vidal C. Linear friction based processing technologies for aluminum alloys: surfacing, stir welding and stir channeling. Chapter 7 // *Aluminium alloys — new trends in fabrication and applications* / ed. by Zaki Ahmad. IntechOpen, 2012. P. 159–197.
4. Люшинский А. В., Баранов А. А. Сварка трением с перемешиванием как альтернативный способ получения неразъемных соединений // *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии : сборник материалов и докладов международной конференции, Москва, 17–20 ноября 2015 года*. М. : Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2015. С. 446–449.
5. Сафиуллин Р. Ш., Никитин В. В. Экспериментальное исследование условий формирования сварных соединений методом СТП // *Инновационное и цифровое машиностроение : материалы Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и цифровое машиностроение», Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сварочного производства России» [Электронный ресурс]*. Уфа : УГАТУ, 2021. С. 358–362. URL: https://ugatu.ru/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf.
6. Влияние подачи на один оборот инструмента при сварке трением с перемешиванием на формирование и свойства швов алюминиевого сплава 1565чМ / А. М. Дриц, В. В. Овчинников, В. А. Бакшаев, Д. В. Малов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2017. Т. 15. № 10. С. 442–451.
7. ГОСТ ISO 25239-2-2020. Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Ч. 1. Словарь. М. : Стандартинформ. 2020. 19 с.
8. Котлышев Р. П., Шучев К. Г., Крамской А. В. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // *Вестник ДГТУ*. 2010. Т. 10. № 5 (48). С. 648–654.
9. Dabeer P., Shindle G. Perspective of friction stir welding tools // *Materials today: proceedings*. 2018. Vol. 5. Iss. 5. Pt. 2. P. 13166–13176.
10. Nosal P., Ganczarski A. Modelling of the temperature field that accompanies friction stir welding // *ITM web of conferences*. 2017. Vol. 15. Article number 03004. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171503004>.

11. Characteristic study on Al7020 friction stir joints with various rotational speeds / A. W. A. Lenin, P. Nagaraj, G. Lincy, L. Thangavelu // *International journal of computer aided engineering and technology*. 2018. Vol. 10. № 6. P. 703–717.

12. Lee Ho-Sung, Lee Ye Rim, Min Kyung Ju. Effects of friction stir welding speed on AA2195 alloy // *MATEC web of conferences*. 2016. Vol. 45. Article number 01003. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164501003>.

13. Исследование процесса сварки трением с перемешиванием пластин из алюминиевого сплава АМГ6 / И. К. Черных, Е. В. Кривонос, Е. Н. Мамузко, Е. В. Васильев // *Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли : материалы IX всероссийской научной конференции, посвященной памяти главного конструктора ПО «Полёт» А. С. Клинышкова*. 2017. С. 126–134.

14. Suresh Babu A., Devanathan C. An overview of friction stir welding // *International journal of research in mechanical engineering & technology*. 2013. Vol. 3. Iss. 2. P. 259–265.

15. Mugada K. K., Adepu K. Influence of tool shoulder end features on friction stir weld characteristics of Al–Mg–Si alloy // *International journal of advanced manufacturing technology*. 2018. Vol. 99. Iss. 5–8. P. 1553–1566.

16. Stephen Leon J., Jayakumar V. Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding // *International journal of student's research in technology & management*. 2014. Vol. 2. Iss. 04. P. 140–144.

17. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H. Recent advances in friction-stir welding: process, weldment structure and properties // *Progress in materials science*. 2008. Vol. 53. Iss. 6. P. 980–1023.

18. Suman P. A., Srinivasa Rao P., Sreeramulu D. Survey on friction stir welding of dissimilar magnesium alloys // *International journal of scientific research and review*. 2019. Vol. 8. Iss. 1. P. 26–38.

19. Principles and thermo-mechanical model of friction stir welding / J. T. Khairuddin, J. Abdullah, Z. Hussain, I. P. Almanar // *Welding processes*. Rijeka, Croatia : InTech, 2012. P. 191–216.

20. Kossakowski P., Wciślik W., Bakalarz M. Macrostructural analysis of friction stir welding (FSW) joints // *Journal of mechanical engineering research*. 2018. Vol. 01. Iss. 01. P. 28–33.

21. Podrżaj P., Jerman B., Klobčar D. Welding defects at friction stir welding // *Metalurgija*. 2015. Vol. 54. Iss. 2. P. 387–389.

22. Research of the friction stir welding process of aluminium alloys // R. Česnavičius [et al.] // *Mechanika*. 2016. Vol. 22. Iss. 4. P. 291–296.

23. Mehta M., Chatterjee K., De A. Monitoring torque and traverse force in friction stir welding from input electrical signatures of driving motors // *Science and technology of welding & joining*. 2013. Vol. 18. Iss. 3. P. 191–197.

24. Torque control of friction stir welding for manufacturing and automation / W. R. Longhurst, A. M. Strauss, G. E. Cook, P. A. Fleming // *International journal of advanced manufacturing technology*. 2010. Vol. 51. Iss. 9. P. 905–913.

25. Torque-based adaptive temperature control in friction stir welding: a feasibility study / A. Bachmann [et al.] // *Production engineering*. 2018. Vol. 12. P. 391–403.

26. Афанасьев Н. Ю., Кулик В. И. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов при изготовлении РКТ // *РИТМ машиностроения*. 2019. № 7. С. 36–39.

27. Сотников А. Л., Муховатый А. А., Орлов А. А. Классификация методов неразрушающего контроля сварных соединений из меди, полученных сваркой трением с перемешиванием // *Сварка и диагностика*. 2022. № 3. С. 19–24. DOI: [10.52177/2071-5234_2022_03_19](https://doi.org/10.52177/2071-5234_2022_03_19)

28. Дриц А. М., Овчинников В. В., Резцов Р. Б. Дефекты, возникающие при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов системы Al–Mg, и способы их устранения // *Технология легких сплавов*. 2022. № 4. С. 14–25.

29. Определение дефектов в виде заглаженного непровара после сварки трением с перемешиванием / А. В. Филиппов, С. Ю. Тарасов, Е. А. Колубаев, В. Е. Рубцов // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 6. С. 296–310.

30. Дриц А. М., Овчинников В. В. Влияние подварок на свойства сварных соединений сплавов 1565ч и 1460, выполненных аргонодуговой сваркой и сваркой трением с перемешиванием // *Технология легких сплавов*. 2018. № 4. С. 65–77.

31. Friction stir welding: process, automation and control / B. T. Gibson [et al.] // *Journal of manufacturing processes*. 2014. Vol. 16. Iss. 1. P. 56–73. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.04.002

32. Microstructural studies of friction stir welds in 2024–T3 aluminum / M. A. Sutton, B. Yang, A. P. Reynolds, R. Taylor // *Materials science and engineering*. 2002. Vol. 323. P. 160–166.

33. Ultrasonic phase array and eddy current methods for diagnostics of flaws in friction stir welds / V. Rubtsov, S. Tarasov, E. Kolubaev, S. Psakhie // *AIP conference proceedings*. 2014. Vol. 1623. P. 539–542.

34. Шипша В. Г. Новый подход в технологии вихревого контроля сварных швов лейнеров, получаемых фрикционной сваркой // *Территория NDT*. 2016. № 4. С. 36–38.

© Харламов Ю. А., Петров П. А., Орлов А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Вишневым Д. А., д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ им. проф. В. Я. Седуша ДонНТУ Сотниковым А. Л.

Статья поступила в редакцию 11.10.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: pavelpetrov@list.ru

Орлов Андрей Андреевич, ассистент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru

Kharlamov Yu. A., Petrov P. A., *Orlov A. A. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, the Russian Federation, *e-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru)

OBTAINING WELDS BY FRICTION STIR

The article is devoted to the development of welding technologies and their application. Such highly concentrated energy sources as plasma, electron-beam, laser and others are studied. The authors highlight a number of shortcomings inherent in melting welding. Tool geometry and friction stir welding modes are the key factors influencing the formation of high-quality welding connection. High quality welding is ensured by the geometric features of the friction tool and the rigidity of the technological system. Aside from that, the parameters that modify the formation of joints at FSW include the type of joinable materials, their thermal and physical-mechanical properties, the weld joint type and thickness of joinable parts. The work contains information about automatic control systems for welding processes, that can be used for the development of a new automatic systems for controlling welding processes.

Key words: friction stir welding, FSW, welded joints and structures, working tool, welding modes, welding equipment.

References

1. Kononov A. V. *Theory of welding processes: textbook for universities eds. V. M. Nerovnogo [Teoriya svarochnyh processov: uchebnik dlya vuzov pod red. V. M. Nerovnogo]*. M.: Bauman University Publishing House, 2007. 752 p. (rus)

2. Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing: Materials Science and Engineering R 50. 2005. Pp. 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.

3. Pedro Vilaça, João Gandra and Catarina Vidal. Linear Friction Based Processing Technologies for Aluminum Alloys: Surfacing, Stir Welding and Stir Channeling. Chapter 7. Aluminium Alloys — New Trends in Fabrication and Applications, ed. by Zaki Ahmad. IntechOpen, 2012. Pp. 159–197.

4. Liushinskiy A. V., Baranov A. A. Friction stir welding as an alternative method for obtaining nondetachable joints [Svarka treniem s peremeshivaniem kak al'ternativnyy sposob polucheniya neraz'mnyh soedinenij]. Nacionalnyy issledovatel'skiy universitet "MEI" 17–20 noyabrya 2015: Sbornik materialov i dokladov. M.: Izdatelstvo MEI, 2015. Pp. 399–406. (rus)

5. Safullin R. Sh., Nikitin V. V. Experimental study of conditions of welded joints formation by the FSM method [Eksperimental'noe issledovanie usloviy formirovaniya svarnyh soedinenij metodom STP]. Innovacionnoe i cifrovoe mashinostroenie: materialy Vserossiiskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii "Stankostroenie i cifrovoe mashinostroenie", Vserossiiskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii "Sostoyanie i perspektivy razvitiya svarchnogo proizvodstva Rossii". UFA: USATU, 2021. Pp. 358–362. URL: https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf. (rus)

6. Drits A. M., Ovchinnikov V. V., Bakshaev V. A., Malov D. V. Impact of single-turn tool application during friction stir welding on the formation and properties of welds of aluminum alloy 1565hM [Vliyanie podachi na odin oborot instrumenta pri svarke treniem s peremeshivaniem na formirovanie i svoystva shvov alyuminievogo splava 1565chM]. Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2017. Vol. 15. No. 10. Pp. 442–451. (rus)

7. GOST ISO 25239-2-2020. Friction stir welding. Aluminium. Part 1. Dictionary. [Svarka treniem s peremeshivaniem. Alyuminij. Chast' I. Slovar']. M.: Standartinform, 2020. 19 p. (rus)

8. Kotlyshev R. R., Shuchev K. G., Kramskoj A. V. Temperature calculation for aluminum alloy friction stir welding [Raschet temperatur pri svarke treniem s peremeshivaniem alyuminievyh splavov]. Vestnik of DSTU. 2010. Vol. 10. No. 5 (48). Pp. 648–654. (rus)

9. Dabeer P., Shindle G. Perspective of Friction Stir Welding Tools. Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. Iss. 5. Pt. 2. Pp. 13166–13176.

10. Nosal P., Ganczarski A. Modelling of the temperature field that accompanies friction stir welding. ITM Web of Conferences. 2017. Vol. 15. Article number 03004. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171503004>.

11. Lenin A. W. A., Nagaraj P., Lincy G., Thangavelu L. Characteristic study on Al7020 friction stir joints with various rotational speeds. International journal of computer aided engineering and technology. 2018. Vol. 10. No. 6. Pp. 703–717.

12. Lee Ho-Sung, Lee Ye Rim, Min Kyung Ju. Effects of Friction Stir Welding Speed on AA2195 alloy. MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 45. Article number 01003 Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20164501003>.

13. Chernykh I. K., Krivonos E. V., Matuzko E. N., Vasiliev E. V. Study of the agitation friction welding process for AMG6 aluminum alloy plates. [Issledovanie processa svarki treniem s peremeshivaniem plastin iz alyuminievogo splava AMG6]. Problemy razrabotki, izgotovleniya i ekspluatacii raketno-kosmicheskoy tekhniki i podgotovki inzhenernyh kadrov dlya aviakosmicheskoy otrasli. Materialy IX Vserossiiskoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj pamyati glavnogo konstruktora PO "Polyot" A. S. Klinyshkova. 2017. Pp. 126–134. (rus)

14. Suresh Babu A., Devanathan C. An Overview of friction stir welding. International journal of research in mechanical engineering & technology. 2013. Vol. 3. Iss. 2. Pp. 259–265.

15. Mugada K. K., Adepu K. Influence of tool shoulder end features on friction stir weld characteristics of Al–Mg–Si alloy. International journal of advanced manufacturing technology. 2018. Vol. 99. Iss. 5–8. Pp. 1553–1566.

16. Stephen Leon J., Jayakumar V. Investigation of mechanical properties of aluminum 6061 alloy friction stir welding. International journal of student's research in technology & management. 2014. Vol. 2. Iss. 04. Pp. 140–144.

17. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H. Recent advances in friction-stir welding: Process, weldment structure and properties. Progress in materials science. 2008. Vol. 53. Iss. 6. Pp. 980–1023.

18. Suman P. A., Srinivasa Rao P., Sreeramulu D. Survey on friction stir welding of dissimilar magnesium alloys. *International journal of Scientific research and review*. 2019. Vol. 8. Iss. 1. Pp. 26–38.
19. Khairuddin J. T., Abdullah J., Hussain Z., Almanar I. P. Principles and thermo-mechanical model of friction stir welding. *Welding processes. Rijeka, Croatia: InTech*. 2012. Pp. 191–216.
20. Kossakowski P., Wciślik W., Bakalarz M. Macrostructural analysis of friction stir welding (FSW) joints. *Journal of mechanical engineering research*. 2018. Vol. 01. Iss. 01. Pp. 28–33.
21. Podržaj P., Jerman B., Klobčar D. Welding defects at friction stir welding. *Metalurgija*. 2015. Vol. 54. Iss. 2. Pp. 387–389.
22. Česnavičius R. [et al.] Research of the friction stir welding process of aluminium alloys. *Mechanika*. 2016. Vol. 22. Iss. 4. Pp. 291–296.
23. Mehta M., Chatterjee K., De A. Monitoring torque and traverse force in friction stir welding from input electrical signatures of driving motors. *Science and technology of welding & joining*. 2013. Vol. 18. Iss. 3. Pp. 191–197.
24. Longhurst W. R., Strauss A. M., Cook G. E., Fleming P. A. Torque control of friction stir welding for manufacturing and automation. *International journal of advanced manufacturing technology*. 2010. Vol. 51. Iss. 9. Pp. 905–913.
25. Bachmann A. Torque-based adaptive temperature control in friction stir welding: a feasibility study. [et al.]. *Production Engineering*. 2018. Vol. 12. Pp. 391–403.
26. Afanasiev N. Yu., Kulik V. I. Aluminium alloy friction stir welding in RCT manufacturing [Svarka treniem s peremeshivaniem alyuminiyevyh splavov pri izgotovlenii RKT]. *Rhythm of machinery*. 2019. No. 7. Pp. 36–39. (rus)
27. Sotnikov A. L., Mukhovatyi A. A., Orlov A. A. Classification of non-destructive testing methods for welded compounds from copper obtained by agitation friction welding [Klassifikaciya metodov nerazrushayushchego kontrolya svarnyh soedinenij iz medi, poluchennyh svarkoj treniem s peremeshivaniem]. Moscow: *Welding and diagnostics*, 2022. No. 3. Pp. 19–24. (rus)
28. Drits A. M., Ovchinnikov V. V., Reztsov R. B. [Defekty, vznikayushchie pri svarke treniem s peremeshivaniem alyuminiyevyh splavov sistemy Al–Mg, i sposoby ih ustraneniya]. *Tekhnologiya legkih splavov*. 2022. No. 4. Pp. 14–25. (rus)
29. Filipov A. V., Tarasov S. Yu., Kolubaev E. A., Rubtsov V. E. Determination of defects in the form of an embedded bad welding after friction stir welding [Opredelenie defektov v vide zaglazhennogo neprovvara posle svarki treniem s peremeshivaniem]. *Fundamental research*. 2015. No. 6. Pp. 296–310. (rus)
30. Drits A. M., Ovchinnikov V. V. Influence of sub-welds on properties of welded joints of alloys 1565h and 1460 made by argon-arc welding and friction welding with agitation [Vliyaniye podvarok na svoystva svarnyh soedinenij splavov 1565ch i 1460, vpolnennyh argonodugovoj svarkoj i svarkoj treniem s peremeshivaniem]. *Tekhnologiya legkih splavov*. 2018. No. 4. Pp. 65–77. (rus)
31. Gibson B. T. [et al.]. Friction stir welding: Process, automation and control. *Journal of manufacturing processes*. 2014. Vol. 16. Iss. 1. Pp. 56–73.
32. Sutton M. A., Yang B., Reynolds A. P., Taylor R. Microstructural studies of friction stir welds in 2024–T3 aluminum. *Materials science and engineering*. 2002. Vol. 323. Pp. 160–166.
33. Rubtsov V., Tarasov S., Kolubaev E., Psakhie S. Ultrasonic phase array and eddy current methods for diagnostics of flaws in friction stir welds. *AIP conference proceedings*. 2014. Vol. 1623. Pp. 539–542.
34. Shipsha V. G. New approach in the technology of vortex control of weld seams of liners, obtained by friction welding [Novyj podhod v tekhnologii vihretokovogo kontrolya svarnyh shvov lejnerov, poluchaemyh frikcionnoj svarkoj]. *Territoriya NDT*. 2016. No. 4. Pp. 36–38. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Yuri Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgical Complex Machine
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Petrov Pavel Aleksandrovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Complex Machine
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: pavelpetrov@list.ru

Orlov Andrei Andreievich, Assistant Lecturer of the Department of Metallurgical Complex Machine
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru