

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Жилин Александр Сергеевич

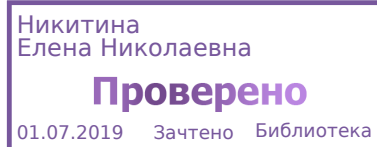
**Исследование процесса формирования структуры и
свойств сварного шва при сварке алюминиевого сплава
давлением**

Направление подготовки

15.04.01 «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2019



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет» на кафедре «Машиностроение и металлургия»

Научный руководитель

кандидат технических наук,
профессор, заведующий кафедрой
«Машиностроение и металлургия»
Бахматов Павел Вячеславович

Рецензент

кандидат технических наук, доцент,
и.о. заведующего лабораторией
химических и фазовых превращений
в материалах, ведущий научный
сотрудник, ИМиМ ДВО РАН, г.
Комсомольск-на-Амуре
Жилин Сергей Геннадович

Защита состоится 28 июня 2019 года в 9 часов 00 минут на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 221/2.

Автореферат разослан 20 июня 2019 г.

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

А.В. Свиридов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В технологическом процессе изготовления изделий из алюминиевых сплавов наибольшие затруднения возникают при операциях сварки из-за наличия плотной оксидной пленки на поверхности и специфических свойств алюминия – высокой теплопроводности в сочетании с низким модулем упругости. В связи с этим при плавлении материала в процессе сварки имеет место неравномерное распределение температуры и увеличение объема зоны расплавления, что приводит к повышенной чувствительности структуры сварного соединения к условиям сварки, появлению трещин и других дефектов сварки. Существующая проблема поставила задачу поиска таких технологий сварки, при которых сварное соединение формируется в результате интенсивного кратковременного термического воздействия на зону стыка, что позволило бы значительно уменьшить размер ванны расплава или полностью избежать плавления металла. Примером успешного решения этой задачи является разработка и внедрение таких высокотехнологичных процессов стыкового соединения алюминиевых сплавов, как сварка трением с перемешиванием.

Большинства этих проблем можно избежать применением способа сварки алюминиевых сплавов в отсутствие жидкой фазы, из которых наиболее перспективным является способ сварки трением с перемешиванием (FSW). В последние десятилетия этот способ соединения алюминиевых сплавов получил приоритетное направление за счет главной особенности технологического процесса – возможности формирования сварного шва в результате пластического течения материала, обусловленного движением вращающегося инструмента по стыку свариваемых поверхностей. Данный способ позволяет получать стыковые, нахлесточные соединения пластин, труб, легко поддается автоматизации. Промышленное применение этого вида сварки реализовано на предприятиях Европы, Японии, Китая и на некоторых Российских предприятиях. Сдерживающим фактором широкого промышленного освоения этого перспективного способа сварки в зарубежной и отечественной промышленности является отсутствие до настоящего времени качественной картины процесса, происходящего в зоне взаимодействия инструмента и свариваемого металла. Многофакторность одновременно протекающих процессов тепло – и массопереноса, интенсивность пластической деформации и сложность механизма структурообразования сварного соединения затрудняют усилия исследователей, направленные на разработку эффективных технологических схем процесса сварки трением с перемешиванием. Это обуславливает актуальность проведения дальнейших исследований в этом приоритетном направлении в области материаловедения алюминиевых сплавов и создания предпосылок для широкого внедрения новых технологических процессов.

Целью данной работы

Обеспечение надежности конструкций из алюминиевых сплавов путем исследования формирования структуры и свойств сварного шва при сварке

трением перемешиванием для улучшения их эксплуатационных характеристик при сокращении затрат и производственного цикла.

Объект исследования.

Получение на модели сварного соединения процесса течения при формировании образования металла шва полученного сваркой трением перемешиванием.

Предмет исследования.

Сварное соединение, полученное с помощью СТП.

Научная новизна:

Физическое моделирование позволяющее упростить задачу подбора инструмента и режимов при сварке трением с перемешиванием.

Обоснованность и достоверность.

Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановки решаемых задач и их физической обоснованностью, большим объемом статистических и экспериментальных данных и сопоставлением полученных результатов с данными других авторов.

Практическая значимость.

Применение разработанной технологии позволяет существенно уменьшить трудоемкость исследования сварного соединения образованного соединения образованного сваркой трением с перемешиванием; влияние формы рабочего инструмента на формирование структуры сварного шва.

Личный вклад автора.

Соискатель активно участвовал в постановке и проведении экспериментов; анализе литературных источников; в проведение экспериментов с последующим анализом и обработкой полученных данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

- исследование механизма формирования металла шва от высокоскоростных режимов сварки трением с перемешиванием с учетом особенностей формирования неразъемных соединений.
- методика выбора технологических режимов и условий сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов инструментом с разработанной геометрией.
- результаты исследования возможности высокоскоростных режимов сварки трением с перемешиванием с учетом особенностей формирования неразъемных соединений.

Объем и структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы. Диссертация содержит 81 страницу; 39 рисунков; 1 таблицы; список литературы, состоящий 33 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, объект и предмет, сформулированы цели и задачи работы, используемые методы исследования, показана научная новизна.

В первой главе представлен литературный обзор по теме диссертации. В данной главе рассмотрены достоинства и недостатки сварки трением с перемешиванием. Рассмотрен процесс сварки трением с перемешиванием, конструкция рабочего инструмента, частота его вращения и угол наклона, а также скорость сварки.

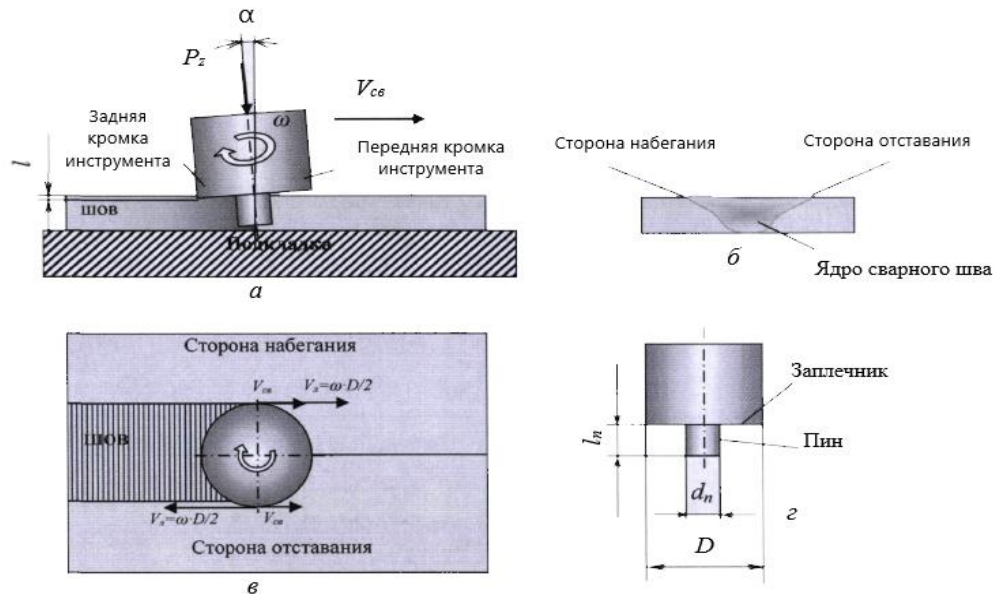


Рисунок 1 - Сущность сварки трением с перемешиванием:
 а - схема СТП; б - поперечное сечение сварного шва;
 в - схема скоростей движения при СТП; г - инструмент для СТП

Произведен обзор существующих методов расчета величины энергии выделяемой при трении, мощность выделяемую при пластичной деформации в объеме заготовки.

Во второй главе приведен анализ механизма формирования структуры сварного шва при сварке трением с перемешиванием, формирования остаточных напряжений, размеров сварного шва и ЗТВ в зависимости от режимов сварки.

Анализ литературы показал, что соединение при СТП происходит в пластическом состоянии в твердой фазе (без расплавления основного металла).

Согласно современной теории твердофазных топохимических реакций, процесс образования сварного соединения в твердой фазе протекает в три стадии

1. Образование физического контакта, т.е. сближение атомов соединяемых материалов за счет пластической деформации на расстояния возникновения взаимодействий.

2. Активация контактных поверхностей (образование активных центров), при которой, благодаря энергетическому воздействию, начинаются процессы химического взаимодействия, приводящие к квантованию электронных оболочек атомов и возникновению межатомных связей. При сварке однородных металлов первая и вторая стадии практически сливаются в одну, так как активация обеих контактных поверхностей начинается уже в

процессе их сближения при совместной пластической деформации отдельных микровыступов.

Объемное взаимодействие. Эта стадия наступает с момента образования активных центров и различного рода связей в зоне контакта. В течение этой стадии происходит развитие взаимодействия соединяемых материалов как в плоскости контакта с образованием прочных химических (в частном случае металлических) связей, так и в приконтактных областях сварного соединения. Этот процесс протекает на активных центрах, представляющих собой, в частном случае, дислокации с полем напряжения. В плоскости контакта он заканчивается слиянием дискретных очагов взаимодействия, а в объеме — релаксацией напряжений, массы, температуры (в той степени завершенности, которая необходима для сохранения образовавшихся связей). Однако, для обеспечения требуемой прочности соединения, часто необходимо дальнейшее развитие релаксационных процессов типа рекристаллизации, гетеродиффузии и др.

В соответствии с концепцией трехстадийности процесса образования соединения между металлами в твердой фазе следует, что независимо от характера и интенсивности деформационного или термомодеформационного воздействия (т.е. от вида энергии и способа ее введения) природа образования соединения едина. Различия заключаются в кинетике протекания отдельных стадий процесса, которая определяется температурой (термический канал активации), характером и интенсивностью деформации материалов (силового воздействия - механический канал активации), степенью локализации деформации и особенностями развития релаксационных процессов в зоне соединения.

Применительно к СТП, этапы процесса образования сварного соединения непосредственно связаны с инструментом и скоростью его продвижения по свариваемому стыку. Так на рисунке 2 представлена принятая схема процесса образования сварного соединения.

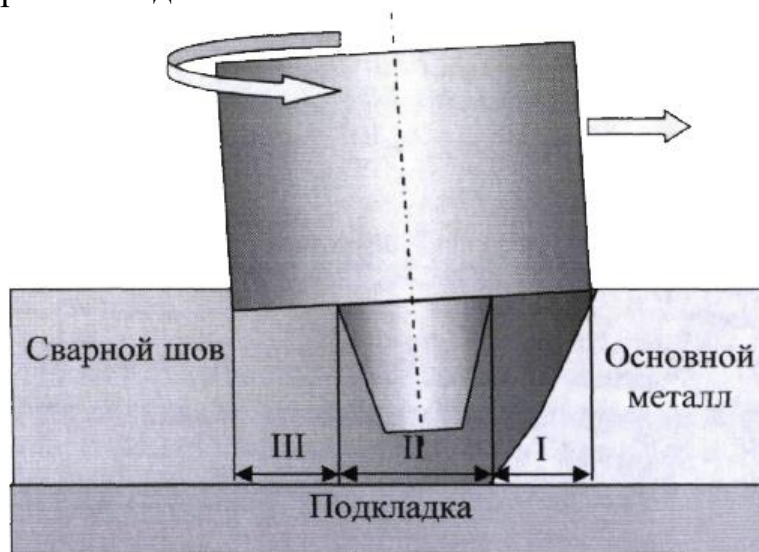


Рисунок 2 - Зоны металла, образующиеся под инструментом в процессе СТП (продольный разрез):

- I - Этап подготовки, подогрева и очистки свариваемых кромок под сварку;
- II - Этап перемешивания свариваемых кромок по толщине (физический контакт, активация поверхностей, деградация линии стыка);
- III - Этап протекания объемного взаимодействия и релаксации напряжений

В зоне I происходит подготовка свариваемых кромок: подогрев за счет трения металла об инструмент, предварительная очистка свариваемых кромок от оксидной пленки преимущественно верхних слоев. В этой зоне за счет небольшого наклона инструмента формируется волна пластифицированного свариваемого металла, т.о. металл постоянно контактирует с передней кромкой заплечика.

Во II зоне происходит перемешивание свариваемого металла по толщине. Металл в этой зоне ограничен с одной стороны инструментом и подкладкой, с другой - основным холодным металлом. За счет сил трения (связанных с высокой адгезией алюминия) нагретый металл вокруг вращающегося пина увлекается за ним и пластически деформируется. На некотором расстоянии от пина пластические деформации угасают. В результате в этой зоне происходит интенсивный массоперенос, свариваемый металл пластически течет. За счет относительного сдвига слоев металла происходит очистка свариваемых поверхностей от оксидных пленок и в контакт вступают ювенильные слои металла (*физический контакт*). В результате интенсивной пластической деформации и нагрева металл переходит в активированное вязко-текучее состояние (*активация*) и непосредственно вокруг пина происходят процессы образования соединения и его разрушения, а также движение и размножение дефектов кристаллического строения атомов, благодаря чему зерна свариваемого металла в зоне действия инструмента сильно измельчаются и имеют мелкодисперсную структуру, что также способствует реализации вязкопластического течения.

В третьей зоне, за счет трения задней кромки инструмента свариваемый металл, он продолжает подогреваться. Благодаря наклону инструмента задняя кромка создает дополнительное давление сжатия, тем самым способствуя более благоприятному протеканию релаксационных процессов (динамической рекристаллизации, релаксации сварочных напряжений), а также уплотнению (проковки) металла (*объемное взаимодействие*). В результате протекания процесса динамической рекристаллизации (а впоследствии собирательной) формируется полиэдрическая структура сварного шва.

Активирующее воздействие давления и температуры на процесс образования прочных связей между атомами металла, свободные связи которого насыщены кислородом, заключается в использовании энергии затрачиваемой на пластическую деформацию металлов в процессе сварки и энергии ранее накопленной деформацией. Следует отметить, что все процессы, приводящие к активированию поверхностных атомов металла, происходят в небольшом объеме металла, прилегающем к зоне физического контакта. В предельном случае этот объем металла ограничен внутренней поверхностью зерен, непосредственно прилегающих к поверхности соединения.

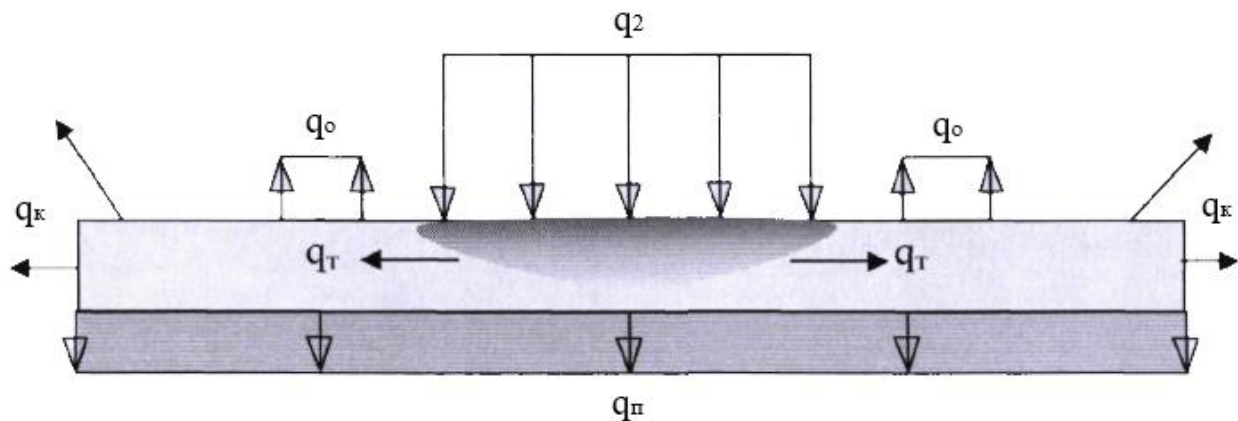


Рисунок 3 - Распределение тепловой энергии от источника тепловой мощности:

q_2 - вводимая тепловая мощность;

q_t - сток тепла в свариваемые детали за счет теплопроводности;

q_p - сток тепла в подкладку;

q_o - сток тепла в сборочно-сварочную оснастку;

q_k - потери тепла на конвективный теплообмен

Основным источником стока тепла является его отвод в детали за счет высокой теплопроводности алюминия. Остальными источниками стока тепла являются подкладка и прижимы сборочно-сварочной оснастки, а также конвективный теплообмен с окружающей средой (рисунок 3). Для инженерных расчетов теплообменом с окружающей средой и отводом тепла в оснастку обычно пренебрегают.

Величину теплового сопротивления контакта между образцом и подкладкой обычно подбирают, исходя из измеренных экспериментальных значений температуры и решения тепловой задачи методом МКЭ. В данной работе отвод тепла в подкладку не учитывался.

В третьей главе представлены результаты исследований процессов происходящий при сварке трением с перемешиванием, для демонстрации процесса образования физического контакта (перемешивания линии стыка) проведен следующий эксперимент. Были изготовлены две полосы $100 \times 20 \times 4$ из пластилина разного цвета, которые укладывали на металлическую оснастку, ограниченную сбоку и с торца стенками. Пластилин выбран в качестве моделирования пластического состояния металла. Далее в стык уложенных пластилиновых полос внедрялся вращающийся инструмент, и осуществлялось его перемещение вдоль стыка. Далее участки, по которым прошелся инструмент, разрезались в поперечном и продольном направлении.

Для проведения исследования и отработки условий сварки трением с перемешиванием были разработаны 3D модели инструментов с различной конфигурацией рабочего инструмента и режимов сварки (рисунок 4).

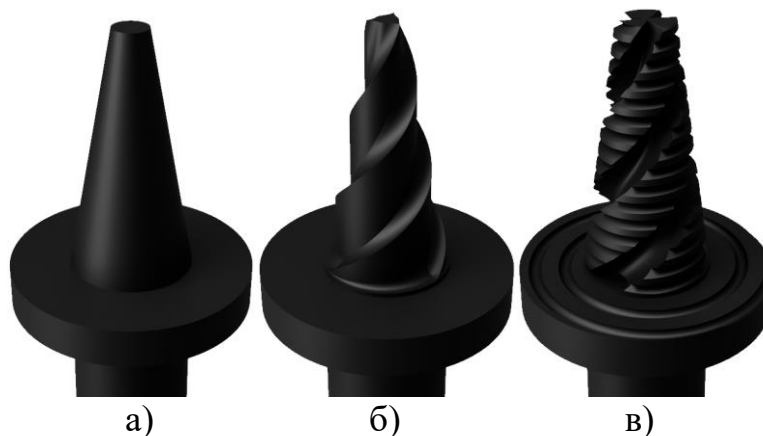


Рисунок 4 – 3D модели инструментов СТП, спроектированные для отработки режимов и условий СТП:

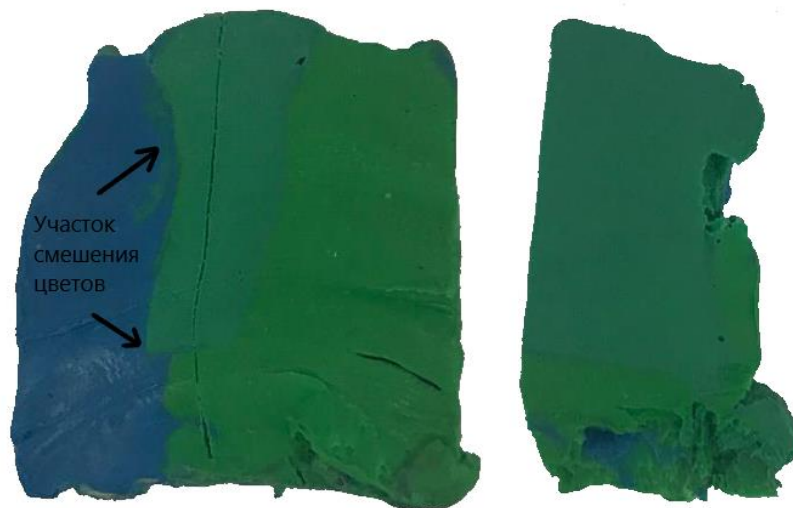
- а) с коническим пином; б) с спиралевидным пином;
в) с горизонтальными насечками на пине и спиральными канавками на бурте

Для проведения исследования в первом случае были установлены режимы сварки скорость вращения $V_{вр} = 710$ об/мин, $V_{сварки} = 210$ мм/мин и угол наклона 3^0 , для инструмента с коническим пином (рисунок 4 а). В результате разреза образца было установлено что перемещение материала было минимальным и происходило в верхней части сварного шва. Также по всей длине был обнаружен дефект – раковина (рисунок 5)



Рисунок 5 – Поперечный разрез двух соединенных пластилиновых полос (скорость вращения инструмента 710 об/мин; угол наклона 3^0 ; скорость сварки 210 мм/мин)

Во втором случае был увеличен режим сварки до $V_{вр} = 1000$ об/мин, $V_{сварки} = 270$ мм/мин и угол наклона 3^0 , для инструмента с спиралевидным пином (рисунок 4 б). В результате при поперечном и продольном разрезе был выявлен видимый участок смешения цветов (рисунок 6).

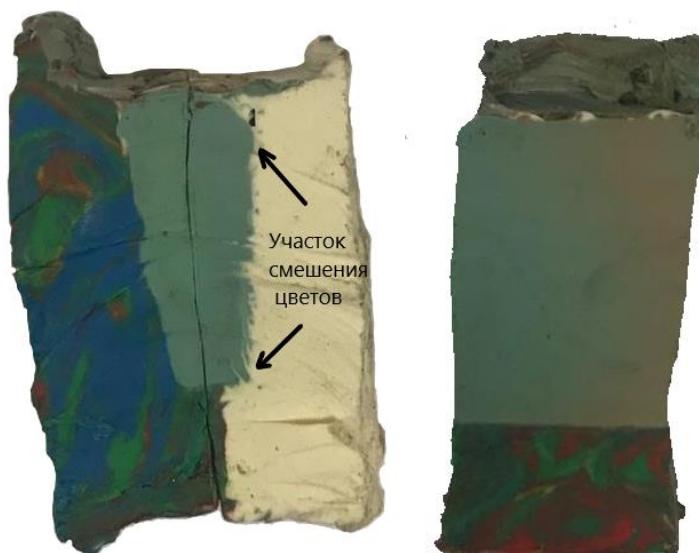


а)

б)

Рисунок 6 –Разрез двух соединенных пластилиновых полос
(скорость вращения инструмента 1000 об/мин; угол наклона 3^0 ;
скорость сварки 270 мм/мин):
а) поперечный разрез; б) продольный разрез

В третьем случае режим сварки был установлен $V_{вр} = 1400$ об/мин, $V_{сварки} = 310$ мм/мин и угол наклона 3^0 , для инструмента с горизонтальными насечками на пине и спиральными канавками на бурте (рисунок 4 в). В результате получился более отчетливый участок смешения в зоне формирования сварного шва.



а)

б)

Рисунок 7 –Разрез двух соединенных пластилиновых полос
(скорость вращения инструмента 1400 об/мин; угол наклона 3^0 ;
скорость сварки 310 мм/мин):
а) поперечный разрез; б) продольный разрез

В результате воздействия сварочного инструмента на поперечном и продольном разрезе видно перемещение (закручивание) стыка в пространстве и перемешивание материала одной кромки с другой (рисунок 7). На это влияет

зависимость формирования структуры и свойств сварного шва на правильно подобранные режимы сварки и форму рабочего инструмента.

Это доказывает, что физический контакт при СТП образуется в результате совместной пластической деформации свариваемых кромок, а точнее их взаимного проскальзывания (трения) друг относительно друга в результате перемешивания.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Из рассмотренного в диссертации материала следует, что высокотехнологичные методы получения неразъемных соединений алюминиевых сплавов с сварки трением с перемешиванием позволяют получать высококачественные соединения, у которых прочностные свойства могут быть обеспечены на уровне свойств основного материала. При сварке трением с перемешиванием металл не плавится, а за счет фрикционного нагрева и адгезионного взаимодействия осуществляется массоперенос подобный тому, как это происходит при трении скольжения в поверхностных слоях контактирующих материалов. Использование в качестве объекта исследований алюминиевого сплава дало возможность оценить преимущества и недостатки того и другого метода сварки.

Сварка трением с перемешиванием обладает значительно бóльшими преимуществами по сравнению со сваркой плавлением. При сварке трением с перемешиванием лучше сохраняются свойства основного металла, сварное соединение имеет меньший уровень остаточных напряжений и деформаций, отсутствует выгорание компонентов сплава, достигаются высокие скорости сварки при больших объемах производства без ухудшения свойств изделий. Недостатком сварки трением с перемешиванием следует считать невозможность применения компактного переносного оборудования. При сварке трением с перемешиванием вращение инструмента в стыке между пластинами металла обуславливает фрикционный нагрев и пластифицирование металла. Перемещение инструмента вдоль стыка приводит к массопереносу металла в зону, освобождающуюся позади инструмента. Благодаря этому происходит перемешивание свариваемого металла с образованием сварного шва. Процессы интенсивной пластической деформации оказывают влияние на формирование микроструктуры сварного шва, от которой зависят его прочностные свойства, однако определяющим фактором является специфика температурно–временных условий, при которых реализуется процесс сварки трением с перемешиванием.

Исследование структуры ядра шва выявило особую слоистую структуру металла, которая состоит из рекристаллизованных зерен, разделенных большеугловыми границами. Независимость этой структуры от исходного состояния и толщины свариваемых листов свидетельствуют о самоорганизации микроструктуры зоны ядра, в формировании которой определяющими являются температура и пластическая деформация. Экспериментально установлено, что при различных режимах сварки на границе сварного шва и основного металла локализуются дефекты в виде несплошностей, образование которых вызвано несовместностью деформации металла шва и прилегающего к

нему основного материала. Показано, что механизм разрушения сварного соединения определяется наличием дефектов, которые снижают эффективное сечение сварного соединения.