

На правах рукописи



Калашникова Татьяна Александровна

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ
АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ
В УСЛОВИЯХ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

05.16.09 Материаловедение (машиностроение)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Томск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки
Институте физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук

Научные руководитель:

доктор технических наук **Колубаев Евгений Александрович**

Научный консультант:

доктор технических наук **Тарасов Сергей Юльевич**

Официальные оппоненты:

Пугачева Наталия Борисовна – доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов

Соловьева Юлия Владимировна – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», заведующая кафедрой физики, химии и теоретической механики

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Защита диссертации состоится «11» сентября 2020 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д003.038.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) по адресу: 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический 2/4;
e-mail: sbuyakova@ispms.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФПМ СО РАН, а также на официальном сайте ИФПМ СО РАН: <http://www.ispms.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



С.П. Буякова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в инновационной технике используются термически неупрочняемые алюминиевые сплавы с высокими прочностными характеристиками, однако, достаточно актуальной остается проблема поиска более совершенных новых промышленных сплавов системы Al-Mg с улучшенными свойствами и способов изготовления конструкций из них. Перспективным представителем такого семейства материалов является алюминивно-магниевый сплав 01570. Предел текучести сплава 01570 в 1,5-2 раза превосходит массово используемый в авиастроении сплав АМг6, что является большим преимуществом, так как все корпусные конструкции работают в области упругой деформации. За счет этого можно добиться снижения веса конструкции до 20 %.

Технология изготовления конструкций космического назначения предполагает сварку толстостенных изделий с последующей фрезеровкой, поэтому требуется сварка заготовок и деталей больших толщин. Существует проблема потери прочности сварного соединения из данного сплава, связанная с ликвацией соединений скандия при формировании сварочной ванны. В связи с этим наиболее подходящим методом получения неразъемных соединений большой толщины для сплава 01570 является сварка трением с перемешиванием.

Сварка трением с перемешиванием предполагает перенос материала с помощью специального инструмента (СТП-инструмент). Комбинация высоких температур и глубокой пластической деформации способствует сильной адгезии свариваемого материала к инструменту, что в свою очередь оказывает большое влияние на формирование шва. Наличие трения способствует высокоскоростной субповерхностной пластической деформации, которая создает трибологический слой наноразмерных зерен, адгезионная способность которого возрастает и влияет на перенос материала.

Актуальность диссертационной работы связана с исследованием адгезионного взаимодействия и переноса свариваемого материала в процессе сварки трением с перемешиванием во взаимосвязи с параметрами сварки, что делает возможным управление механизмами формирования равнопрочных неразъемных соединений, полученных методом сварки трением с перемешиванием, высокопрочного алюминиевого сплава больших толщин и подтверждается тем, что получена поддержка Минобрнауки России (Госзадание III.23.2.4. «Разработка компьютерных моделей и развитие подходов к созданию материалов и покрытий с многоуровневой структурой, в том числе триботехнического назначения, для систем, работающих в сложных

динамических условиях эксплуатации», а также Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

Степень разработанности темы исследования. Вопросам исследования трибологического взаимодействия материалов и процессам, происходящим при сварке трением с перемешиванием, посвящено большое количество работ известных зарубежных и российских ученых – R.S. Mishra, P.J. Blau, F.P. Bowden, J. Zhang, J.M. Ziman, D.H. Buckley, J. Yang, A.B. Колубаева, A.B. Автократовой, В. В. Карманова и др., в которых рассматривалось трение твердых тел, формирование структуры приповерхностных слоев, пластическая деформация, эволюция структуры металла и адгезионный перенос.

Большинство работ по сварке трением с перемешиванием посвящено подбору технологических режимов, сравнению полученных структур со структурами, полученными процессами интенсивной пластической деформации, такими, как равноканальное угловое прессование, экструзия, кручение под высоким давлением, прокатка и прочие, т.е. там, где трение играет побочную роль в формировании структуры материала. При сварке трением с перемешиванием трение играет непосредственную и основную роль в формировании соединения и поэтому требует детального рассмотрения. Использование полученных при этом результатов может быть полезно для получения высокопрочных соединений.

Таким образом, **цель настоящей работы** заключалась в установлении закономерностей переноса металла в трибологических процессах и формировании сварного соединения алюминиево-магниевого сплава 01570 в условиях адгезионного трибологического контакта со стальным инструментом при сварке трением с перемешиванием.

Для достижения цели в работе ставились следующие **задачи**:

1. Исследовать трибологический перенос металла в условиях высокотемпературного сухого трения скольжения модельной пары «алюминиевый сплав-сталь» в зависимости от температуры контакта.
2. Установить особенности формирования и разрушения структуры приповерхностного слоя стального инструмента в результате адгезионно-диффузионного изнашивания при сварке трением с перемешиванием.
3. Выявить особенности переноса металла и формирования макроструктуры сварного соединения при сварке трением с перемешиванием на примере сварки разнородных материалов.
4. Выявить особенности образования макро- и микроструктуры сварных соединений алюминиевого сплава 01570 больших толщин.

Научная новизна. В работе впервые:

1. На основе результатов модельного эксперимента было показано, что интенсивность прямого и обратного трибологического адгезионного переноса определяется температурой испытания. При этом обратный перенос активизируется при более высокой температуре испытаний

2. Показано, что при сварке трением с перемешиванием происходит послойный перенос материала, связанный с адгезией материала к инструменту и дальнейшей когезией его к материалу шва.

3. Проведены комплексные исследования закономерностей формирования структуры сварных соединений больших толщин из алюминиево-магниевого сплава 01570, полученной сваркой трением с перемешиванием. Показано, что материал зоны термомеханического влияния подвержен гофрированию под давлением от зоны перемешивания.

Теоретическая значимость. Результаты, изложенные в диссертационной работе, имеют фундаментальный характер и вносят вклад в существующие представления о закономерностях формирования структур в характерных зонах и механических свойствах неразъемных соединений при сварке трением с перемешиванием из алюминиево-магниевых сплавов, что может служить основой для дальнейших исследований.

Установленные закономерности формирования структуры расширяют представления об адгезионном конвективном массопереносе при сварке трением с перемешиванием и при трении скольжения пары «алюминиевый сплав - сталь», а также о формировании интерметаллидных соединений на поверхности инструмента в результате адгезионно-диффузионного взаимодействия со свариваемым материалом.

Практическая значимость. Полученные экспериментальные сведения о закономерностях формирования структуры алюминиево-магниевых сплавов больших толщин в условиях адгезионного взаимодействия при сварке трением с перемешиванием позволят получать качественные неразъемные соединения.

Выявленные закономерности формирования структуры при сварке трением с перемешиванием и проведенные исследовательские испытания позволили подобрать параметры технологических режимов для усовершенствованной технологии сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием, о чем был составлен акт испытаний с ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель».

Результаты работы использованы в учебном процессе инженерной школы новых производственных технологий Федерального государственного автономного

образовательного учреждения «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ) при разработке магистерской программы «Технологии космического материаловедения», а также программы повышения квалификации «Формирование неразъемных соединений методом сварки трением с перемешиванием» совместно с ТПУ и ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва», г. Королёв, Московская обл.

Методология и методы исследования. В качестве методологической основы использованы труды отечественных и зарубежных ученых, указанные в диссертации. Для изучения особенностей структуры и свойств исследуемых материалов использован комплекс методов исследования: оптическая микроскопия, лазерная сканирующая микроскопия, растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, механические испытания на сжатие, растяжение, измерение микротвердости, наноиндентирование, рентгеноструктурный анализ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность экспериментальных данных, подтверждающая дискретный характер адгезионного прямого и обратного переноса на алюминиево-магниевом сплаве в условиях трибологического контакта.

2. Адгезионно-диффузионный механизм взаимодействия СТП-инструмента со свариваемым металлом, обеспечивающий послойный перенос материала за инструмент.

3. Особенности процесса формирования сварного соединения при сварке трением с перемешиванием сплава 01570 больших толщин, заключающиеся в неоднородности адгезионного взаимодействия материала с инструментом в результате неравномерного нагрева материала шва по толщине свариваемой заготовки.

4. Структурные особенности формирования зоны перемешивания в алюминиево-магниевом сплаве 01570 при сварке трением с перемешиванием, обусловленные образованием слоев переноса, формирование которых происходит в результате пластической деформации и фрагментации при фрикционном контакте материала с инструментом.

Достоверность результатов исследований, полученных в работе, обеспечивается использованием современных методов экспериментальных исследований на сертифицированном оборудовании, их физической обоснованностью. Результаты работы не противоречат данным, приведенным в литературных источниках.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: Международной конференции «Перспективные материалы с

иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», г. Томск, 2015 г.; XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2016 г.; LVII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», Севастополь, 2016 г.; Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», г. Томск, 2016 г.; Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», г. Томск, 2017 г.; XII Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург, 2018 г., Международный симпозиум «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций», г. Томск 2018 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 7 работах, из них 3 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий из списка ВАК, 4 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора состоит в подготовке образцов для исследования, проведении экспериментов по трению и сварке трением с перемешиванием на стенде для экспериментальных исследований технологических режимов сварки трением с перемешиванием, микроструктурных исследований, механических испытаний, обработке полученных результатов, написании статей по теме диссертации, совместном с научными руководителями формулировке и обсуждении цели и задач диссертационной работы, основных научных положений и выводов.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка литературы, включающего 123 наименования, и 2 приложений. Всего 153 страницы, в том числе 88 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность результатов, апробация работы, публикации и личный вклад соискателя, описаны структура и объем диссертации.

В первом разделе диссертации приведены особенности перспективных алюминиевых сплавов для авиационно-космического применения на примере сплава 01570 системы «алюминий-магний-скандий». Проанализирована литература по адгезионному взаимодействию и особенностям формирования структуры приповерхностных слоев при трении скольжения, а также по сварке трением с перемешиванием. Описаны особенности и механизмы формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием.

Второй раздел включает в себя параметры технологических режимов для экспериментов по трению скольжения и сварки трением с перемешиванием, подробную характеристику объектов исследования и описание методов исследования структурных и механических свойств объектов.

Объектами исследования являются образцы после сухого трения скольжения (шарик из конструкционной подшипниковой стали ШХ15 диаметром 6,0 мм и диски из алюминиевого сплава АМг6 диаметром 50,0 мм и алюминиево-магниевого сплава 01570), фрагменты инструментов для сварки трением с перемешиванием (инструментальная сталь Х40CrMoV5, быстрорежущая сталь Р6М5), разнородные неразъемные соединения из сплава АМг5 и меди марки М1 толщиной 3 мм, неразъемные соединения из сплава 01570 толщиной 30 и 35 мм.

Проводились два вида испытаний на адгезионное трение. В первом случае – испытания по схеме «палец – диск» на высокотемпературном трибометре CSM-Instruments SA ТНТ при температурах 25 °С, 100 °С и 200 °С. Во втором случае – испытания на торцевое трение на стенде для экспериментальных исследований технологических режимов сварки в ИФПМ СО РАН. Сварка разнородных соединений проводилась в Чувашском государственном университете им. И.Н. Ульянова на опытной лабораторной установке, изготовленной ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель»; сварка пластин из сплава 01570 толщиной 30 и 35 мм – в Закрытом акционерном обществе «Завод экспериментального машиностроения Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева» на установке PowerStir 345С.

Для выявления особенностей зеренной структуры выполнялись исследования на металлографическом микроскопе Альтами МЕТ-1С. Структурно-фазовое состояние материала после сварки трением с перемешиванием исследовалось на растровых электронных микроскопах SEMTRAC mini SM3000 и TESCAN VEGA II LMU. Просвечивающая электронная микроскопия проводилась на микроскопе JEM-2100. Фактический химический состав сплава марки 01570 получен при помощи рентген-флуоресцентного спектрометра X-suprem 8000.

Микротвердость измерялась при помощи микротвердомера Duramin 5 на поперечных шлифах, подготовленных для металлографических исследований. Наноиндентирование на стальных инструментах осуществлялось на аппарате Nano Hardness Tester NHT-S-AX-000X методом Оливера и Фарра при нагрузке 50 мН. Испытания на одноосное сжатие и растяжение проводились на универсальной машине для испытания конструкционных материалов УТС 110М-100.

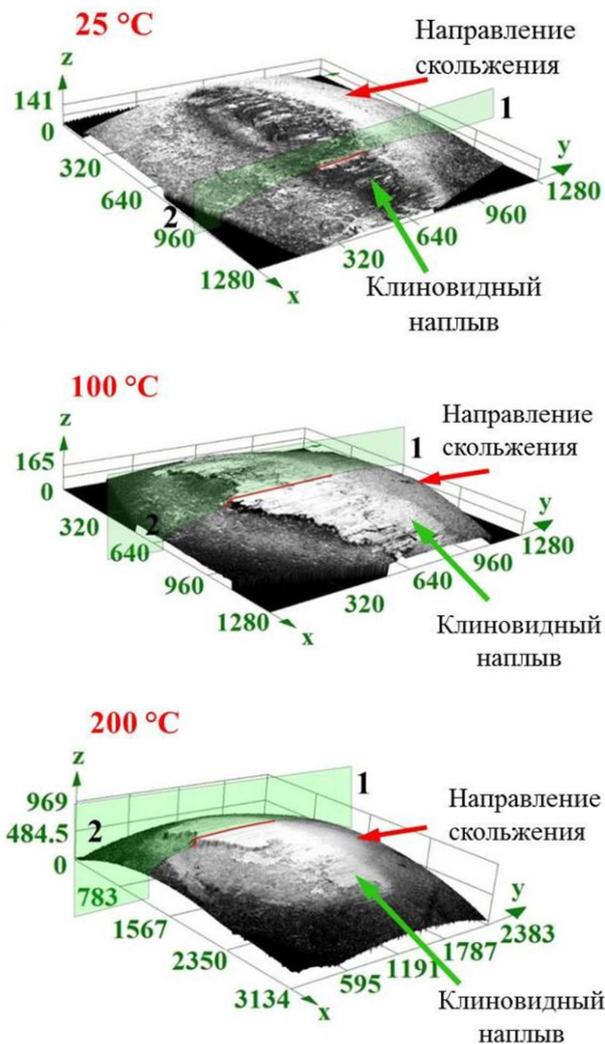


Рисунок 1 – Слой переноса на поверхностях стальных шариков после трения при 25 °С, 100 °С и 200 °С

что продемонстрировано на примере разнородного соединения из алюминиевого сплава АМг5 и меди марки М1.

Установлено, что в результате трения стального шарика по диску из алюминиевого сплава на шарике образуется слой переноса в виде отдельных островков перенесенного материала (рисунок 1). В продольном сечении островки имеют клиновидную форму, при этом наибольшая толщина слоя переноса расположена на задней поверхности шарика относительно его центральной оси. При повышении тем-

В третьем разделе приводятся результаты модельного эксперимента для выявления адгезионного взаимодействия и особенностей переноса в условиях трения скольжения пары «алюминиевый сплав – сталь» и результаты исследования особенностей взаимодействия слоя адгезионного переноса с металлом инструмента для сварки трением с перемешиванием. Показано, что структуры, получаемые трением скольжения и при сварке трением с перемешиванием, являются подобными, так как оба процесса включают трение, выделение тепла, неоднородную деформацию и перемешивание, а также адгезионное взаимодействие между контактирующими металлами. Полученные результаты подтверждают факт образования послойного переноса материала при сварке трением с перемешиванием.

пературы испытания величина клиновидного напыла увеличивается. Наиболее интенсивный перенос наблюдался на образце, испытанном при 200 °С. В данном случае слой переноса более равномерно распределен в пределах контактного участка, чем при испытаниях с меньшими температурами. Для температур 25 °С, 100 °С и 200 °С толщина слоя переноса составляет 6 мкм, 21-33 мкм, 100-110 мкм, соответственно.

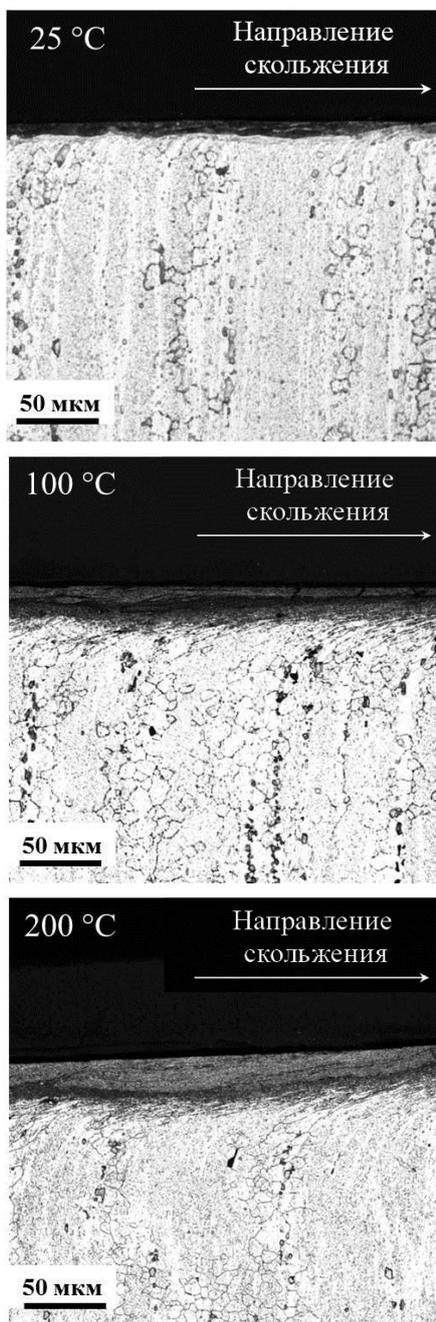


Рисунок 2 – Вид сечения диска алюминиевого сплава в плоскости, параллельной направлению скольжения и перпендикулярной к поверхности износа

42 мкм, 70 мкм и 80 мкм. Вышеприведенные результаты показывают, что трение

Дорожки трения на поверхности диска представляют собой круговую канавку. Выявлено, что при трении диск подвержен интенсивному изнашиванию путем уноса материала стальным шариком. Наблюдается присутствие небольшой доли частиц, перенесенных обратно с поверхности шарика. При температуре испытания 25 °С глубина канавки переменная. При повышении температуры испытания на поверхностях дорожек трения присутствует слой переноса в виде заглаженных напылов. Максимальная ширина и глубина дорожек трения после скольжения при 25 °С, 100 °С и 200 °С составляет $1,1 \pm 0,1$ мм 55 мкм, $1,0 \pm 0,1$ мм 44 мкм и $2,2 \pm 0,1$ мм 207 мкм, соответственно.

Исследование микроструктуры при разных температурах на поверхностях дисков после трения показало, что приповерхностная структура канавки типична для пластичных металлов при адгезионном износе, когда сильно деформированный металл вовлекается в адгезионный перенос, квазивязкое течение и механическое перемешивание. Это в конечном итоге приводит к формированию механически перемешанного трибологического слоя на дорожке износа диска (рисунок 2). Установлено, что толщина механически перемешанного слоя переноса на изношенной поверхности диска увеличивается с повышением температуры испытания и составляет 8,5 мкм, 23 мкм и 32 мкм для 25 °С, 100 °С и 200 °С, соответственно. Общая толщина деформированного слоя составляет соответственно

при повышенных температурах способствуют увеличению адгезионного переноса и скорости адгезионного изнашивания. В данной работе предполагается, что эти три режима могут реализоваться в ходе сварки трением с перемешиванием как режим с недогревом материала, оптимальный режим и режим с перегревом.

Таким образом, предполагается, что сильно деформированный трением алюминиевый сплав начинает формировать адгезионные связи со стальной поверхностью шара, то есть образуется тонкий слой адгезионного переноса. Этот слой прилипает к задней полусфере боковой поверхности шара. Сила сцепления слоя с поверхностью диска определяется длиной контактной линии l_a , которая вначале слишком мала, чтобы оторвать его от поверхности шарика (рисунок 3, а).

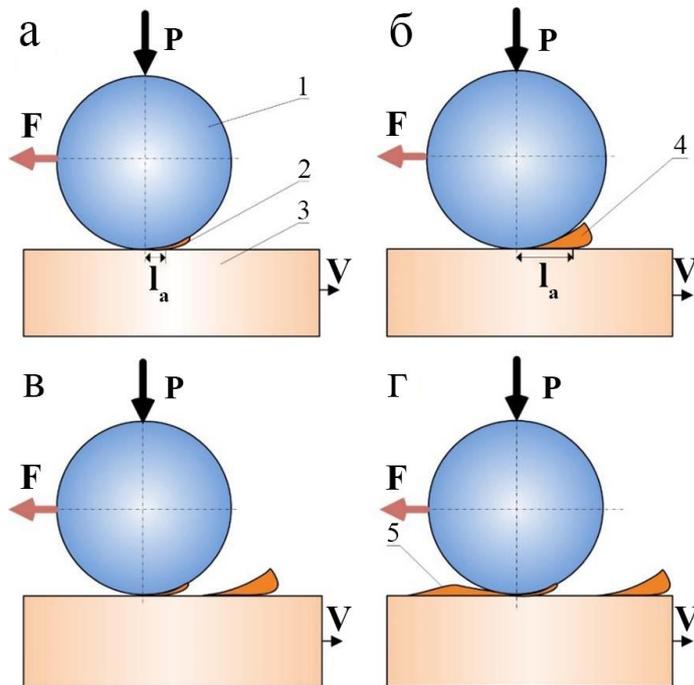


Рисунок 3 – Схема адгезионного переноса при скольжении.

- 1 – неподвижный образец;
 - 2 – зарождающийся адгезионный слой;
 - 3 – подвижный образец;
 - 4 – отделение переходного слоя от стального шарика и прилипание к подвижному образцу (обратный перенос);
 - 5 – деформирование обратного переходного слоя.
- P – нормальная нагрузка;
 F – сила трения;
 V – скорость скольжения,
 l_a – длина прилипания

Этот слой растет, когда шарик скользит по диску (рисунок 3, б), и в некоторый момент времени его контактная длина становится достаточной для обеспечения сильного когезионного сцепления с исходным материалом диска (рисунок 3, в). Этот повторяющийся процесс подобен переносу металла инструментом при сварке трением с перемешиванием.

Исследование адгезионно-диффузионного взаимодействия между инструментом и свариваемым металлом показало, что между ними в процессе сварки образуется тонкий переходный слой, являющийся интерметаллидным соединением $FeAl_3$ (рисунок 4). Образование интерметаллидного слоя подтверждает адгезионно-диффузионный механизм взаимодействия инструмента со свариваемым металлом при сварке трением с перемешиванием, что, обеспечивая послойный перенос материала за инструмент.

Послойный перенос материала в результате адгезионного взаимодействия между инструментом и свариваемым металлом при сварке трением с перемешиванием демонстрирует разнородное соединение из алюминиевого сплава АМг5 и меди марки М1, где медь представлена в качестве маркера (рисунок 5).

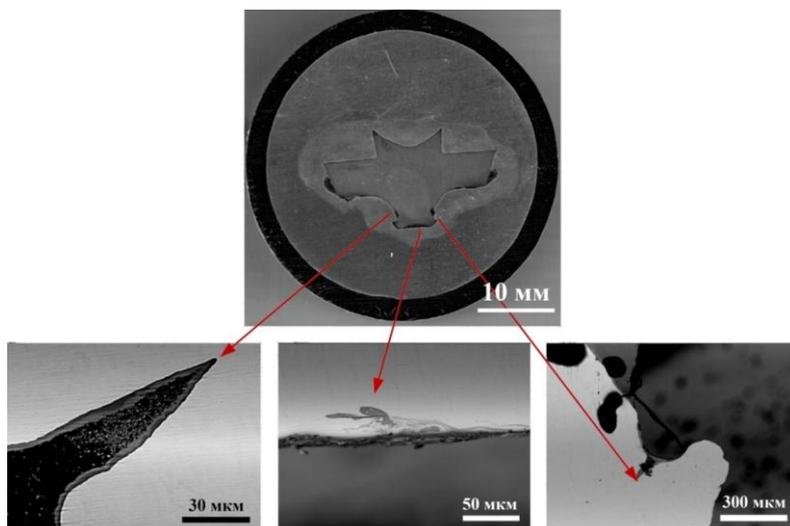


Рисунок 4 – Металлографическое сечение инструмента для сварки трением с перемешиванием из стали X40CrMoV5 и дефекты на поверхности

В четвертом разделе приводятся результаты исследования макро- и микроструктуры и свойств алюминиево-магниевого сплава 01570 после сварки трением с перемешиванием. Данные результаты подтверждают формирование структуры при сварке, обусловленное адгезионным взаимодействием стального инструмента и свариваемого металла, подробно изученного в третьем разделе на примере трения скольжения пары «алюминиевый сплав – сталь».

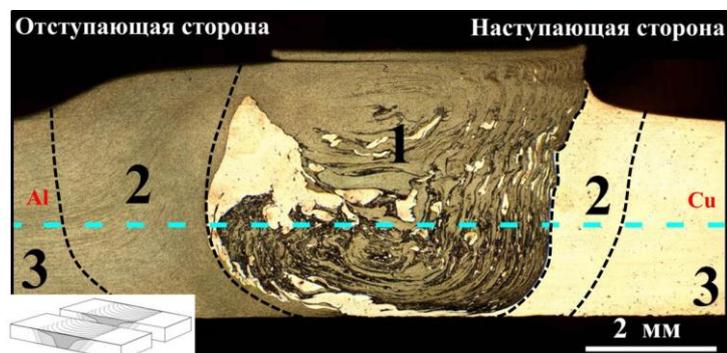


Рисунок 5 – Структура разнородного соединения из алюминиевого сплава АМг5 и меди марки М1. Измерения микротвердости проведены вдоль голубой пунктирной линии. 1 – зона перемешивания, 2 – зона термомеханического воздействия, 3 – зона термического влияния

Проведено сравнение прочностных характеристик металла шва со слоистой структурой, полученного сваркой трением с перемешиванием, с характеристиками послойно наплавленного металла при аддитивном электронно-лучевом производстве.

В связи с тем, что адгезия металла к металлу зависит от площади фактического контакта, при увеличении толщины свариваемых листов роль адгезионного переноса при сварке трением с перемешиванием возрастает. В продольном и поперечном сечениях соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием, толщиной 35 мм из сплава 01570 структура является неоднородной (рисунок 6). В начале соединения хорошо визуализируется сформированное ядро в корне шва (рисунок 6, а). Подобная структура наблюдается в соединении толщиной 30 мм по всей длине. В соединении толщиной

35 мм при дальнейшем продвижении инструмента структура меняется. В корне шва плотное ядро не образуется, но наблюдается несколько несформированных ядер в виде завихрений слоев вследствие течения материала (рисунок 6, б). Это объясняется тем, что в разных участках инструмента, ввиду большой толщины образца, температура в зоне контакта различна. За счет этого возникает различие адгезионного взаимодействия на разных участках.

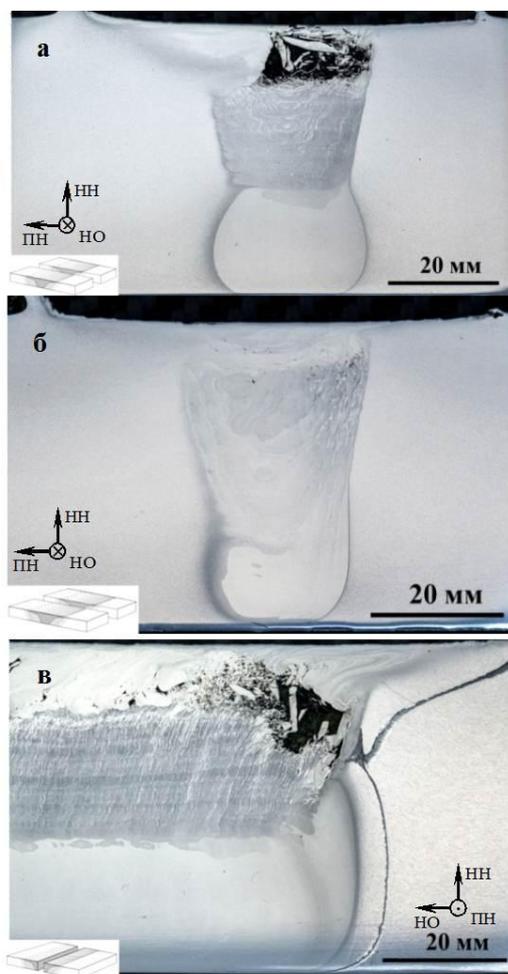


Рисунок 6 – Макроструктура соединения из алюминиевого сплава 01570 толщиной 35,0 мм, полученного сваркой трением с перемешиванием, в поперечных сечениях (а), (б) и продольном сечении (в)

чески и первично рекристаллизованную область со средним размером зерна $2,62 \pm 0,9$ мкм в поперечном сечении и $2,66 \pm 0,85$ мкм в продольном.

Исследование пластического течения металла в зоне от выхода инструмента показало, что у выходного отверстия располагается тонкий слой, в котором наблюдаются признаки полной рекристаллизации, растворения и третичное выпадение избыточных фаз. Толщина этого слоя по высоте соединения увеличивается к корню

Вдоль направления движения инструмента наблюдается периодическое чередование перенесенных инструментом слоев материала (рисунок 6, в). Такой перенос обусловлен адгезионно-когезионными процессами, происходящими во время сварки трением с перемешиванием. На границе зоны перемешивания с зоной термомеханического воздействия наблюдается явление гофрирования, когда первоначально вытянутые соседние зерна волнообразно изгибаются под действием усилия сжатия от зоны перемешивания, прилегаемого вдоль длинной оси зерна. Такое поведение при деформации обусловлено особенностями структуры сплава 01570, когда выделившиеся дисперсные частицы повышают температуру рекристаллизации и препятствуют росту зерна.

Структура зоны перемешивания соединений из сплава 01570 больших толщин, полученных сваркой трением с перемешиванием, представляет собой динамически

шва, т.е. материал перед инструментом испытывает сжатие вдоль направления обработки. В этом слое, кроме кругового течения металла, добавляется восходящее к лицевой стороне спиральное течение, задаваемое рельефом рабочего инструмента. Материал адгезионно взаимодействует с поверхностью рабочего инструмента, после чего имеет место послойное течение металла когезионного характера.

Согласно проведенным исследованиям, в работе предлагается схема пластического течения материала при сварке трением с перемешиванием (рисунок 7).

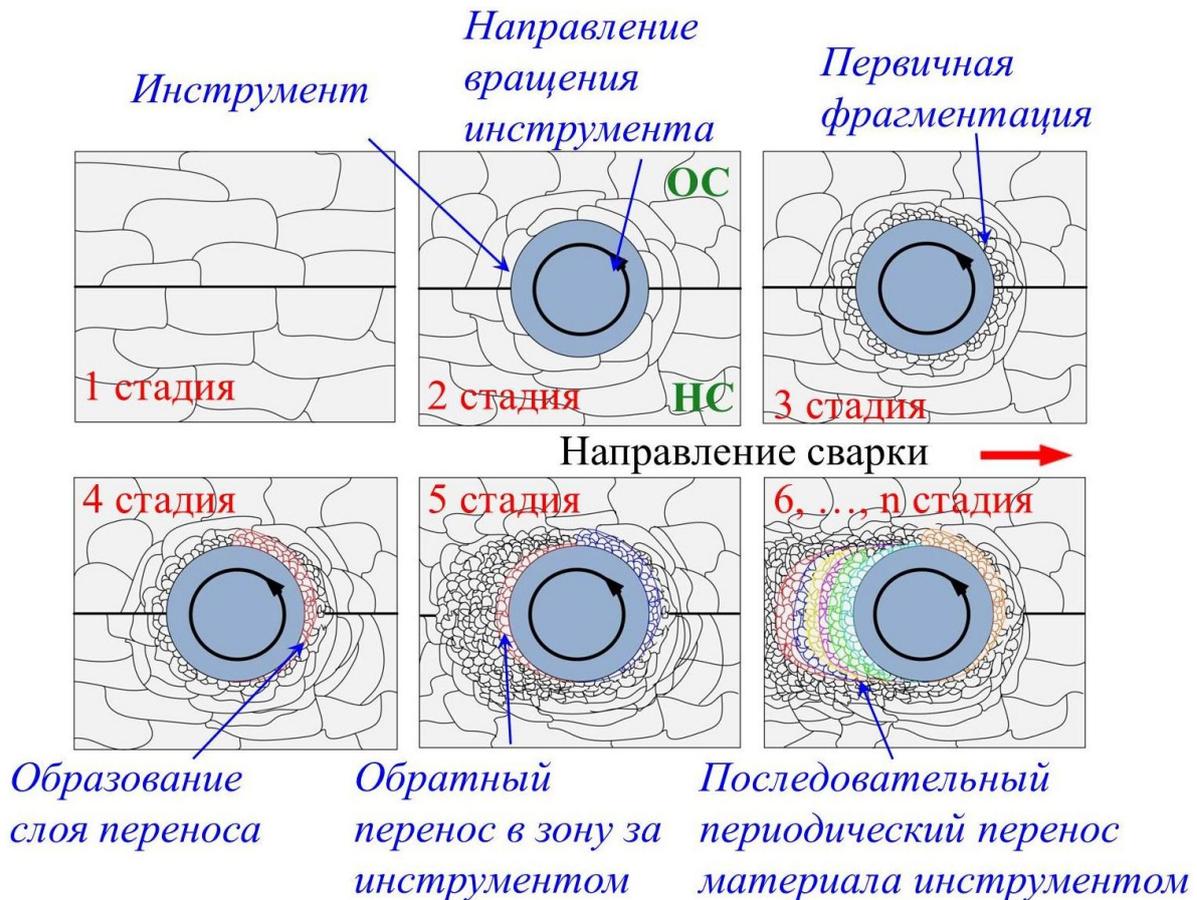


Рисунок 7 – Схема пластического течения материала в зоне термомеханического воздействия штифта и вне области механического влияния плечей

После внедрения сварочного инструмента в стык свариваемых заготовок происходит его подача вдоль линии стыка. За счет вращения инструмента свариваемый материал пластифицируется, не доходя до температуры плавления. Перед инструментом образуется зона сжатия материала, обусловленная условиями всестороннего сжатия, вследствие чего происходит первоначальная фрагментация структуры. Материал в непосредственной близости перед инструментом испытывает нормальное и тангенциальное нагружение, обеспечиваемое вращением инструмента и адгезионным взаимодействием, и происходит захват инструментом слоя определенной толщины и его конвективный перенос в область позади инструмента, что было показано в модельном эксперименте в третьем разделе.

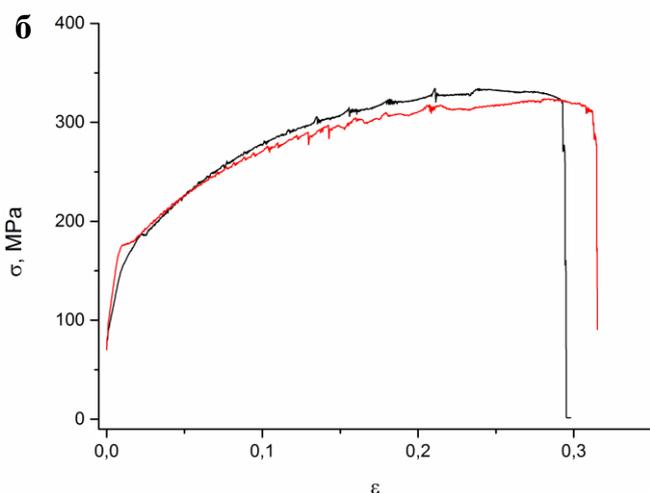
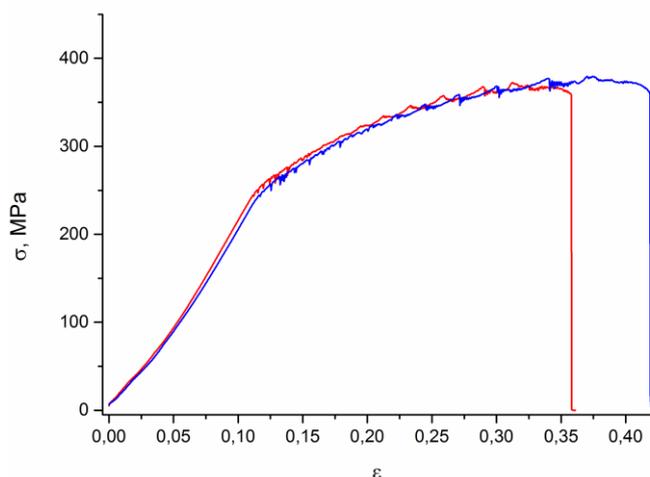


Рисунок 8 – Лиаграммы нагружения при испытаниях на растяжение образцов из сплава а) 01570, б) АМг5

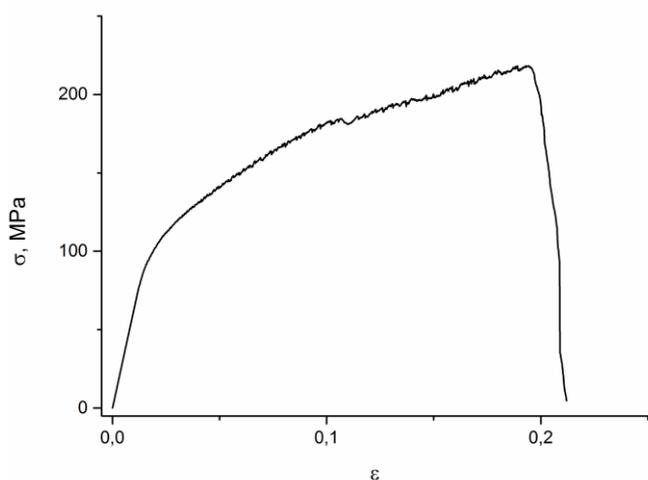


Рисунок 9 – График зависимости напряжений от деформации при испытаниях на растяжения образца из алюминиевого сплава АМг5, полученного электронно-лучевой проволочной аддитивной технологией

Данный процесс переноса повторяется слой за слоем последовательным периодическим переносом материала инструментом. Таким образом, в зоне перемешивания сварного соединения формируется выраженная слоистая (луковичная) структура. При дальнейшем продвижении инструмента вдоль стыка происходит остывание перенесенного материала и его одновременная рекристаллизация.

Сравнение массопереноса в твердом состоянии при сварке трением с перемешиванием с жидкофазным массопереносом при аддитивном производстве показало, что, несмотря на схожую слоистую структуру, образованную при сварке трением с перемешиванием и аддитивном производстве, данные процессы различны по структуре и механическим свойствам, полученных образцов.

Прочность соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, составляет 367-385 МПа и 320 МПа для сплавов 01570 и АМг5, соответственно (рисунок 8). В случае жидкофазного массопереноса, образованные слои представлены в основном дендритной структурой, а

также зернами размером более 100 мкм. Прочность образцов, полученных аддитивным методом, в 1,5-1,8 раза меньше, чем в образцах, полученных сваркой трением с перемешиванием, и составляет 218 МПа. Скачкообразное изменение нагружающего усилия в процессе деформации, связанное с эффектом Портевена–Ле-Шателье, в данном случае менее выражено, чем при сварке трением с перемешиванием. Это связано с выгоранием магния при жидкофазном образовании структуры (рисунок 9).

В приложениях приведена справка об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе инженерной школы новых производственных технологий ТПУ при разработке магистерской программы «Технологии космического материаловедения» и при разработке программы повышения квалификации «Формирование неразъемных соединений методом сварки трением с перемешиванием» и Акт о проведении ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» исследовательских испытаний усовершенствованной технологии сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием для формирования неразъемных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов транспортного и авиакосмического назначения.

ВЫВОДЫ

1. Модельный эксперимент в условиях высокотемпературного сухого трения скольжения пары «алюминиевый сплав-сталь», обеспечивающий условия контактного взаимодействия, схожие с таковыми при сварке трением с перемешиванием, показал, что в процессе трения происходит прямой адгезионный перенос, при этом толщина слоя переноса на стальном шарике растет в зависимости от температуры испытания (в 5 раз для температуры 100 °С и в 20 раз для 200 °С). При достижении контактной длины слоя переноса, достаточной для обеспечения сильного адгезионного сцепления с исходным материалом, происходит обратный перенос материала с шарика на диск.

2. Возникновение слоя переноса на стальном инструменте в условиях сварки трением с перемешиванием приводит к формированию тонкого сплошного интерметаллидного переходного слоя $FeAl_3$ твердостью 7 – 10 ГПа, что является условием адгезионно-диффузионного механизма переноса материала при сварке трением с перемешиванием.

3. Выявлено, что структура зоны перемешивания неразъемных соединений из алюминий-магниевого сплава 01570 больших толщин, полученных

сваркой трением с перемешиванием, представляет собой область рекристаллизованных зерен. Выделение дисперсных частиц способствует торможению мигрирующей границы растущего зерна, в связи с чем размер зерна остается на уровне 2-3 мкм.

4. При сварке трением с перемешиванием пластин больших толщин были выявлены два режима переноса материала и формирования структуры шва. При сварке пластин 30 мм образовалась зона перемешивания с «луковыми кольцами», что доказывает послойный перенос материала путем прямого переноса металла к инструменту и обратного переноса на уже перенесенный ранее материал.

5. При сварке пластин больших толщин наблюдается формирование толстого слоя переноса особенно в верхней части инструмента. Соответственно, нарушается регулярность переноса металла и формирование завихрений перенесенных слоев в нижней части шва. В верхней части шва формируется дефект типа несплошности, что связывается как с большей толщиной пластин, так и ухудшением условий переноса и перемешивания металла.

6. В зоне перемешивания соединений больших толщин микроструктура на разных уровнях горизонтальных сечений по толщине образца одинакова, что свидетельствует о механизме послойного переноса, являющегося макроскопическим.

Основные публикации по теме диссертации

В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Тарасов С. Ю. Контролируемое диффузией изнашивание стальных инструментов для сварки алюминиевых сплавов методом сварки трением с перемешиванием (СТП) / С. Ю. Тарасов, **Т.А. Калашникова**, К. Н. Калашников, В. Е. Рубцов, А. А. Елисеев, Е. А. Колубаев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – № 6-2. – С. 275 – 279.

2. Тарасов С. Ю. Адгезионно-диффузионное изнашивание стального инструмента при сварке трением алюминиевого сплава АМг5М / С. Ю. Тарасов, **Т. А. Калашникова**, К. Н. Калашников, В. Е. Рубцов, А. А. Елисеев, Е. А. Колубаев // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – №7. – С. 39-44.

3. **Калашникова Т. А.** Структура сварных соединений алюминиевого сплава 1570С, полученных методом сварки трением с перемешиванием

[Электронный ресурс] / Т. А. Калашникова, К. Н. Калашников, А. А. Заикина, С. Ю. Тарасов, М. И. Алеутдинова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16074> (дата обращения: 21.06.2018).

В зарубежных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science:

4. Eliseev A. A. Microstructure Modification of 2024 Aluminum Alloy Produced by Friction Drilling / A. A. Eliseev, S. V. Fortuna, E. A. Kolubaev, **T. A. Kalashnikova** // Materials Science and Engineering A. – 2017. – V. 691. – PP. 121-125.

5. Tarasov S. Yu. Adhesion Transfer in Sliding a Steel Ball against an Aluminum Alloy / S. Yu. Tarasov, A. V. Filippov, E. A. Kolubaev, **T. A. Kalashnikova** // Tribology International. – 2017. – V. 115. – PP. 191–198.

6. Tarasov S. Yu. Ultrasonic-Assisted Aging in Friction Stir Welding on Al-Cu-Li-Mg Aluminum Alloy / S. Yu. Tarasov, V. E. Rubtsov, S. V. Fortuna, A. A. Eliseev, A. V. Chumaevsky, **T. A. Kalashnikova**, E. A. Kolubaev // Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde. – 2017. – V. 61 (4). – PP. 679-690.

7. Eliseev A.A. Microstructure of Fixed Butt Joints Formed by Friction Stir Welding on 2024T3 Aluminum Alloy / A. A. Eliseev, **T. A. Kalashnikova**, S. Yu. Tarasov, V. E. Rubtsov, S. V. Fortuna, E. A. Kolubaev // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 683. – PP. 203 – 208.