

На правах рукописи



**Губин Антон Михайлович**

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ  
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ**

Специальность: 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет» («Московский Политех») на кафедре «Материаловедение».

Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор  
**Овчинников Виктор Васильевич**

Официальные оппоненты: **Белов Николай Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»,  
профессор  
**Шиганов Игорь Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский  
университет)», профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный  
авиационный технический университет имени  
П.А. Соловьева», г. Рыбинск

Защита состоится «18» июля 2023 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте [skvortsovasv@mai.ru](mailto:skvortsovasv@mai.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте: <https://mai.ru/upload/iblock/27c/dsyi39cfff77yyp5hskv2957nzp87ts/Gubin-A.M.-Dissertatsiya-17.04.2023.pdf>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Скворцова С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Дисперсно-упрочненные сплавы представляют собой композиционные спеченные материалы, содержащие искусственно вводимые в них высокодисперсные, равномерно распределенные частицы фаз, не взаимодействующих с матрицей и не растворяющихся в ней до температуры ее плавления. Наиболее эффективное упрочнение обеспечивается при содержании упрочняющей фазы в количестве 3–15%, размере ее частиц до 1 мкм и среднем расстоянии между ними 0,1–0,5 мкм.

Дисперсно-упрочненные материалы сохраняют микронеоднородное строение и дислокационную структуру, а, следовательно, и работоспособность до  $(0,9-0,95)T_{пл}$  матрицы. Высокая работоспособность дисперсно-упрочненных материалов при повышенных температурах объясняется тем, что при наличии в матрице второй фазы скольжение дислокаций в зернах металла становится возможным при больших напряжениях, границы зерен блокируются, а рост зерен затормаживается практически до температуры плавления матрицы. При создании дисперсно-упрочненных материалов выбирают фазу-упрочнитель и способ введения ее в матрицу.

Фаза-упрочнитель должна иметь высокую термодинамическую прочность, малую величину скорости диффузии компонентов фазы в матрицу, высокую чистоту и большую суммарную поверхность частиц. К упрочняющим фазам с такими свойствами относятся оксиды некоторых металлов (чаще всего  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $ThO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ), карбиды, нитриды и другие соединения.

Способ введения частиц фазы-упрочнителя в матрицу влияет на структуру дисперсно-упрочненного материала, которая может быть дисперсной или агрегатной. Способами введения фазы-упрочнителя и получения смеси является:

- механическое смешивание порошков оксидов металла и упрочняющей фазы с последующим восстановлением оксидов основного металла;
- механическое смешивание порошков металла матрицы и упрочняющей фазы;
- поверхностным окислением порошка основного металла;
- химическое смешивание, предусматривающее совместное осаждение солей и их последующее восстановление с образованием металла и сохранением фазы-упрочнителя;
- внутренним окислением или азотированием порошков.

Первые три метода приводят к образованию агрегатной структуры, а последние два – к дисперсной.

В алюминиевых сплавах в качестве упрочняющей фазы используется оксид алюминия  $Al_2O_3$ , легко образующийся в результате высокой склонности алюминия к поверхностному окислению и позволяющий получать равномерное распределение его в матрице. Содержание упрочняющей фазы ( $Al_2O_3$ ) обычно находится в пределах 4–14%.

Высокие механические характеристики при повышенных температурах имеют дисперсно-упрочненные алюмоматричные композиционные материалы (ДУАКМ) на основе алюминия, упрочненные частицами карбида алюминия  $Al_4C_3$  ( $\sigma_b = 450\text{--}500$  МПа,  $\delta = 4\%$ ) или карбида кремния SiC.

При изготовлении деталей и конструкций из дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе алюминия встает вопрос о соединении отдельных заготовок в конструктивный узел. Для соединения ДУКМ использовалась сварка плавлением, и в частности, аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом.

Процесс дуговой сварки дисперсно-упрочнённых алюмоматричных композиционных материалов (ДУАКМ) связан с рядом проблем, возникающих при данном процессе:

- неблагоприятное влияние армирующей фазы на поведение дугового разряда;
- перераспределение армирующей фазы в сварном шве;
- растворение армирующей фазы в сварочной ванне;
- низкая текучесть ванны КМ с долей армирования 18%.

При сварке плавлением дисперсно-упрочнённых алюмоматричных композиционных материалов отмечается повышенная пористость металла шва, которая вызвана образованием зародышей газовой фазы на подложке из керамических армирующих частиц.

Анализ литературы, а также последние достижения в машиностроении, свидетельствуют о том, что наиболее перспективными методами получения соединений дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов являются процессы формирования соединения в твердой фазе, в частности сварки трением с перемешиванием.

В этой связи, актуальным становится исследование влияния параметров процесса сварки трением с перемешиванием на структурно-фазовое состояние дисперсно-упрочнённых алюмоматричных композиционных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда №19–33–90272 «Закономерности структурно-фазовых превращений в жаропрочных алюминиевых сплавах и дисперсионно армированных керамическими частицами композиционных материалов на алюминиевой основе при сварке трением с перемешиванием и разработка на их основе мероприятий повышения качества соединений».

**Степень разработанности темы.** Большой вклад в решение проблемы повышения комплекса свойств сварных соединений при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов внесли ученые Штрикман М.М., Лукин В.И., Колубаев А.Е., Дриц А.М., Бакшаев В.А., Фролов В.А., Бойцов А.Г., Тарасов С.Ю., Миронов С.Ю., Павлова В.И., W.M. Thomas, C.J. Dawes, R.S. Mishra, Y.S. Sato, E. Cerri и др.

**Целью диссертационной работы** является определение зависимостей свойств сварных соединений от структурно-фазового состояния и параметров режима при сварке трением с перемешиванием дисперсно-упрочнённых алюмоматричных композиционных материалов для создания на их основе сварных конструкций.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Исследовать влияние основных технологических параметров режима сварки трением с перемешиванием листов дисперсно-упрочнённых алюмоматричных композиционных материалов на механические характеристики и шероховатость поверхности сварных соединений.

2. Установить влияние параметров режима сварки трением с перемешиванием на распределение упрочняющих частиц в пределах зоны перемешивания соединения дисперсно-упрочнённого алюмоматричного композиционного материала.

3. Изучить влияние объемной доли упрочняющих частиц в дисперсно-упрочняемом композиционном материале на формирование швов при сварке трением с перемешиванием и их фазовый состав.

4. Исследовать влияние шероховатости поверхности швов на усталостные характеристики сварных соединений ДУАКМ на основе матрицы из сплавов 1565ч и Д16Т.

5. Определить возможность получения качественных соединений ДУАКМ с деформируемыми алюминиевыми сплавами и их свойства при нормальной и повышенной температуре испытаний.

6. Установить влияние объемной доли упрочняющей фазы в дисперсно-упрочнённом композиционном материале на интенсивность и характер износа рабочего инструмента при сварке трением с перемешиванием стыковых соединений.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Экспериментально установлена возможность получения качественных бездефектных соединений дисперсно-упрочнённых алюмоматричных композиционных материалов в условиях сварки трением с перемешиванием при объемной доле упрочняющих частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC и  $\text{B}_4\text{C}$  10–30 об. %.

2. Разработаны расчетные модели зависимостей прочности и шероховатости поверхности сварных соединений дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов от параметров режима сварки (обобщенный показатель подача инструмента на один его оборот) и объемной доли упрочняющих частиц. Определено критическое значение шероховатости поверхности шва, при котором обеспечиваются высокие значения малоциклового усталости.

3. Показано, что очагами разрушения являются поверхностные несовершенства сварного шва. Установлено, что при шероховатости поверхности  $Rz \geq 60$  мкм разрушение является многоочаговым и развивается от неровностей сварного шва на все сечение образца, а при  $Rz \leq 50$  мкм – одноочаговым с присутствием вязкой составляющей.

4. Установлено, что коэффициент прочности сварного соединения дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов составляет 0,81–0,88 и снижается с увеличением объемной доли упрочняющих частиц. При этом временное сопротивление зоны перемешивания превышает значения временного сопротивления сварного соединения.

5. При сварке трением с перемешиванием в сварных соединениях сохраняется равномерное распределение упрочняющих частиц и отсутствует химическое взаимодействие между матричным сплавом и упрочняющими частицами с образованием нежелательных фаз типа  $Al_4C_3$ .

#### **Теоретическая и практическая значимость:**

На основании полученных результатов исследований разработана производственная инструкция и комплект технологической оснастки и рабочий инструмент для сварки трением с перемешиванием алюмоматричных дисперсно-упрочненных композиционных материалов. Также получены следующие результаты, имеющие важное практическое значение:

- определены диапазоны изменения основных технологических параметров процесса сварки трением с перемешиванием, которые рекомендуются для получения сварных соединений ДУКМ на алюминиевой основе с учетом их влияния на свойства композиционных материалов при повышенных температурах;

- проведена оценка работоспособности стыковых соединений ДУАКМ в экспериментальных сварных конструкциях;

- установлены причины повышенного износа рабочего инструмента при сварке трением с перемешиванием дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов по сравнению со сваркой матричного сплава. Снижение износа инструмента может быть обеспечено за счет уменьшения частоты вращения инструмента при сопутствующем подогреве свариваемого

материала до 150–180 °С, а также при нанесении на инструмент вакуумных ионно-плазменных покрытий.

– разработаны технологические рекомендации по изготовлению сварных узлов и сборок из ДУАКМ с применением сварки трением с перемешиванием.

– результаты исследований включены в учебный процесс при преподавании дисциплины «Технологии конструкционных материалов» направления 22.03.01 в ФГАОУ ВО «Московский Политех», а также при руководстве научными работами бакалавров и магистрантов, что подтверждено соответствующим актом.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Совокупность экспериментальных данных о критериях выбора параметров режима сварки трением с перемешиванием дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов в зависимости от объемной доли упрочняющих частиц, обеспечивающих формирование стыковых соединений без внутренних дефектов;

2. Результаты исследования воздействия технологических нагревов на структуру и прочностные свойства стыковых соединений дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов, выполненных сваркой трением с перемешиванием;

3. Совокупность экспериментальных данных, доказывающих отсутствие химическое взаимодействие между матричным сплавом и упрочняющими частицами с образованием нежелательных фаз типа  $Al_4C_3$ , а также формирование соединений с равномерным распределением упрочняющих частиц.

4. Результаты исследований механических свойств стыковых соединений дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов при нормальной и повышенных температурах испытаний.

#### **Методы исследования и достоверность полученных результатов.**

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых, государственные стандарты РФ. Результаты экспериментальных исследований получены с использованием современных методов исследования структуры и свойств материалов, а также сертифицированного испытательного оборудования. Показана воспроизводимость результатов.

#### **Реализация результатов работы.**

Результаты диссертационной работы использованы при разработке технологических процессов сварки трением с перемешиванием изделий из дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов и деформированных алюминиевых сплавов.

Результаты работы были внедрены в учебно-образовательный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлениям 22.03.01 и 22.04.01 "Материаловедение и технологии материалов".

#### **Степень достоверности результатов.**

Все результаты получены на современном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Стандартные испытания и исследования проводились в соответствии с требованиями научно-технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ и ISO). Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации подтверждены теоретическими решениями и экспериментальными данными.

#### **Апробация работы.**

Результаты работы доложены и обсуждены на четырех научно-практических конференциях, в том числе: 9-ая Международная научно-практическая конференция "Перспективное развитие науки, техники и технологии", 1 ноября 2019 г., г. Курск, Юго-Западный государственный университет; научная конференция ГНИИ "Нацразвитие" (Санкт-Петербург, Август 2020); Международная научно-техническая конференция, г. Ялта, 01–05 марта 2021 г.

**Личный вклад** автора состоит в его непосредственном и активном участии в формировании цели и задач исследования, в проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе и обработке полученных результатов, их обобщении, формулировке рекомендаций и выводов по диссертации, а также написании публикаций в журналах и докладов на научных конференциях.

**Публикации:** основное содержание диссертации отражено в 15 научных работах в рецензируемых научных журналах, сборниках и трудах конференций, из них 12 статей, входящих в перечень журналов из списка ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 145 наименований, 2-х приложений, всего 191 страница машинописного текста, в том числе 79 рисунков и 41 таблица.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность и степень разработанности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, обозначена научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, описаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

**В главе 1** представлен обзор отечественных и зарубежных публикаций о состоянии и перспективах развития процессов сварки дисперсно-упрочненных

алюмоматричных композиционных материалов (ДУАКМ). Отмечено, что при дуговой сварке ДУАКМ, армированных частицами карбида кремния, наблюдается нестабильный характер дугового разряда: отмечается блуждание дуги. Показано, что однородность распределения армирующих частиц в металле шва существенно зависит от значения погонной энергии процесса. Отмечается, что при значении объемной доли упрочняющих частиц в ДУАКМ на уровне 15–18% при сварке плавлением сварочная ванна характеризуется большой вязкостью, что существенно затрудняет получения бездефектного шва. Увеличении тепловложения при сварке для повышения жидкотекучести металла сварочной ванны сопровождается растворением армирующей фазы.

Рассмотрены перспективы использования процесса сварки трением с перемешиванием для получения стыковых соединений дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов. На основании проведенного анализа сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования.

**В главе 2** представлены характеристика объектов и методы исследования. В качестве объектов исследования были выбраны дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДУАКМ) с матрицей из сплавов 1565чМ и Д16Т. В качестве упрочняющих частиц использовались частицы интерметаллидов  $Al_2O_3$  и SiC при их различной доле в материале. Объемная доля упрочняющих частиц варьировалась в диапазоне 6–30%. ДУКМ в исследовании применялись в виде листовых заготовок толщиной 5 мм. Стыковые сварные соединения из листовых полуфабрикатов получали на установках ЗАО "Чебоксарское предприятие "Сеспель" и на опытной установке, созданной на базе фрезерного станка с числовым программным управлением.

Структурные исследования сварных соединений были направлены на выявление и объяснение закономерностей процесса структурообразования, которые реализуются при сварке трением с перемешиванием, а также на выявление внутренних дефектов соединений и механизма их разрушения при испытаниях.

В таблице 1 приведены ориентировочные режимы сварки трением с перемешиванием листовых заготовок алюминиевых сплавов 1565чМ и Д16Т толщиной 5-6 мм, которые были взяты за основы при отработке режимов сварки ДУАКМ с алюминиевой матрицей из указанных сплавов.

В общем случае ширина сварного шва зависела от диаметра заплечика и стержня используемого сварочного инструмента. Все сварные соединения, исследованные в данной работе, были выполнены инструментами, которые формировали для пластин толщиной 5,0 мм шов шириной ~16–20 мм.

Таблица 1 – Режимы сварки образцов алюминиевых сплавов 1565чМ и Д16Т способом трения с перемешиванием

Марка сплава	Частота вращения инструмента $\omega$ , об/мин	Скорость подачи инструмента (скорость сварки) $V_{св}$ , мм/мин	Угол наклона инструмента в плоскости свариваемых кромок $\alpha$ , град.	Усилие прижатия инструмента, Р, кг
1565чМ	850	180–200	3–4	2000–2100
Д16Т	1000	130–150	2–3	2700–2900

Первичный контроль сварных соединений выполняли с помощью рентгеновского источника типа ICM CP 120 и цифрового приемника Teledyne Dalsa 6К. Для радиографического анализа дефектов сварного шва использовали рентгеновский телевизор ФИЛИН 1010 производства компании «Тестрон», г.С–Петербург. Для регистрации рентгеновского излучения использовался плоскопанельный цифровой детектор Teledyne DALSA с размером входного окна 100x100 мм и разрешением 2048x2048 пикселей.

Испытания сварных соединений на статическое растяжение и статический изгиб проводили на испытательной машине УТС 110М–100 при комнатной и повышенной температуре. Образцы для испытаний, вырезанные поперек сварного соединения с расположением сварного шва по середине рабочей части образцов, соответствовали требованиям ГОСТ 6996–66.

Качественный и количественный анализ микроструктуры производили на металлографическом инвертированном микроскопе МЕТАМ ЛВ–31 в диапазоне увеличений от x50 до x200, а также на лазерном конфокальном микроскопе LEXT–OLS4000 в оптическом и лазерном режимах при увеличениях x20 и x50.

Исследование структуры методом дифракции отраженных электронов (EBSD–анализа) проводили на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO–50 с вольфрамовым термокатодом, оснащенном детектором обратнорассеянных электронов Nordlys (Oxford Instruments), при ускоряющем напряжении 30 кВ. Анализ результатов осуществлялся при помощи пакета программ обработки EBSD данных Channel 5 разработки Oxford Instruments.

Фрактографические исследования поверхности разрушения образцов после испытаний на растяжение были выполнены при помощи электронного сканирующего микроскопа MiniSEM (Ю. Корея).

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре ДРОН–4 по ГОСТ 16865–79. Измерения периодов решетки  $\alpha$ -твердого раствора осуществляли в фильтрованном  $\text{CuK}\alpha$ -излучении с использованием рефлекса (511)/(333) с углом дифракции  $\theta \sim 80\text{--}81^\circ$ . Текстуру оценивали с помощью

обратных полюсных фигур (ОПФ). Для измерения остаточных напряжений использовали метод  $\sin 2\psi$ .

Распределение микротвердости в различных зонах сварных соединений определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3М.

В главе 3 представлены результаты изучения особенностей структурных превращений в ДУАКМ, происходящих в процессе сварки трением с перемешиванием.

Проведенные эксперименты позволили определить рациональные значения подачи на один оборот инструмента при СТП ДУАКМ на основе матрицы из сплава 1565чМ с различным содержанием армирующих частиц  $Al_2O_3$ . Полученные результаты представлены на рисунке 1.

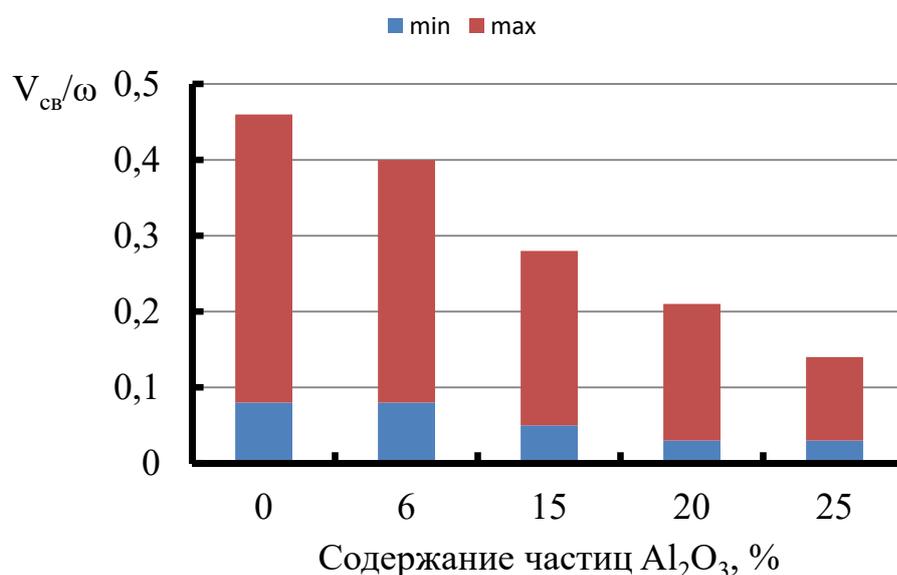


Рисунок 1. Диапазоны рациональных значений подачи инструмента на один оборот при сварке трением с перемешиванием ДУКМ с матрицей из сплава 1565чМ в зависимости от содержания упрочняющих частиц  $Al_2O_3$ .

Можно отметить, что величина минимальной подачи на один оборот инструмента изменяется не существенно при увеличении содержания армирующих частиц  $Al_2O_3$ . В тоже время максимальное значение подачи на один оборот инструмента изменяется весьма существенно. Так при увеличении содержания армирующих частиц с 6 до 25% максимальное значение подачи на один оборот инструмента уменьшается с 0,38 до 0,13 мм/об.

Проведенные эксперименты позволили определить рациональные диапазоны значений подачи на один оборот инструмента при СТП алюмоматричного дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе сплава Д16Т, упрочненного частицами  $Al_2O_3$  и SiC. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Диапазоны рациональных значений подачи инструмента на один оборот при сварке трением с перемешиванием ДУКМ

Объемная доля упрочняющих частиц, %	Диапазон изменения значений подачи инструмента на один оборот, мм/об			
	Матрица 1565чМ		Матрица Д16Т	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC
0	0,08–0,46	0,08–0,46	0,05–0,26	0,05–0,26
6	0,08–0,40	0,07–0,42	0,05–0,24	0,05–0,22
15	0,05–0,27	0,04–0,24	0,04–0,19	0,04–0,16
20	0,03–0,21	0,03–0,18	0,03–0,15	0,03–0,11
25	0,03–0,14	0,03–0,12	0,03–0,11	0,03–0,08

По мере увеличения объемной доли упрочняющих частиц SiC в ДУАКМ наблюдается формирование швов с более шероховатой поверхностью с лицевой стороны, а при объемной доле упрочняющих частиц 25% на границе шва формируется грат (рисунок 2).

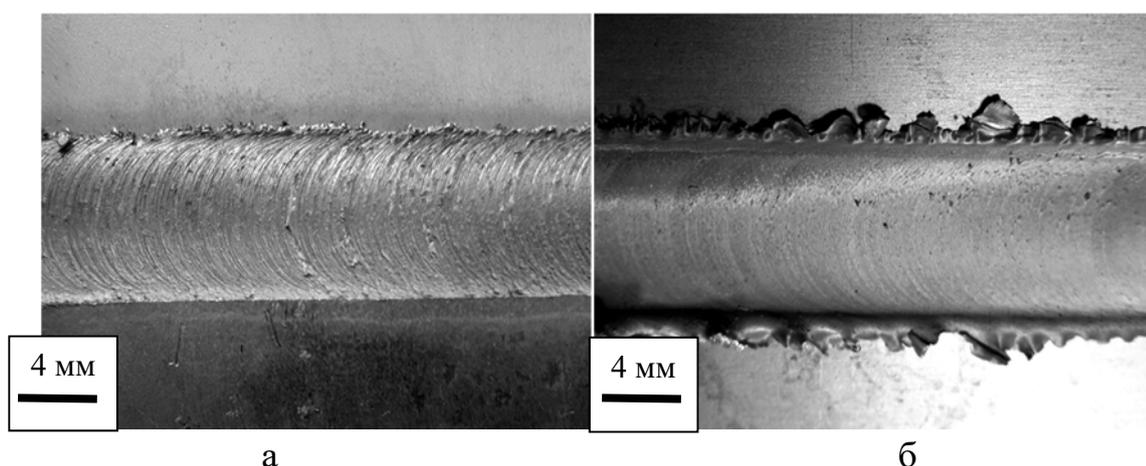


Рисунок 2. Внешний вид лицевой поверхности швов, выполненных СТП на ДУАКМ с матрицей из сплава Д16Т и объемной долей упрочняющих частиц SiC: а 15%; б– 25%

В макроструктуре полученных соединений ДУАКМ можно выделить 4 структурные зоны: зона перемешивания (ЗП), зона термомеханического воздействия (ЗТМВ), зона термического влияния (ЗТВ) и основной металл, структура которого не подвергалась термическому и деформационному воздействию со стороны рабочего инструмента (рисунок 3).

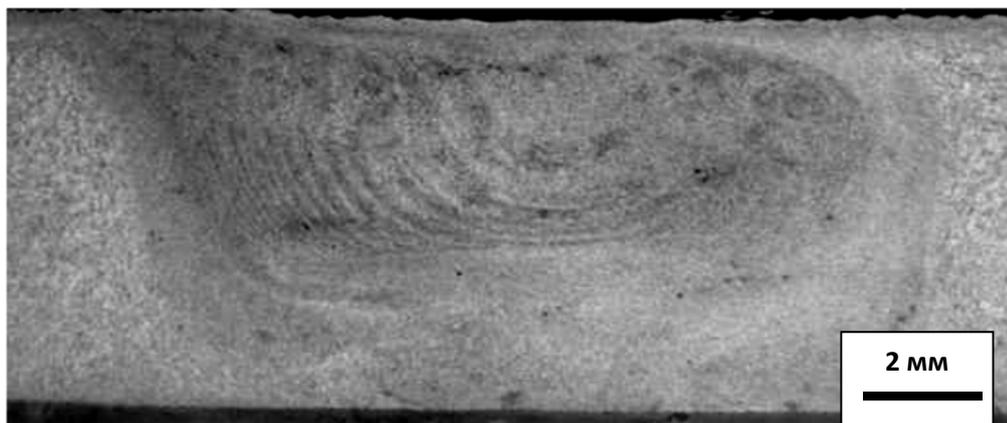


Рисунок 3. Макроструктура соединений ДУАКМ Д16Т + 20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, x5

Зона перемешивания как для дисперсно-упрочненного композиционного материала, так и для сплава Д16Т имела мелкозернистую структуру (рисунок 4). Размер зерна в зоне перемешивания для сплава Д16Т составил  $6,2 \pm 1,3$  мкм, в то время как для ДУКМ Д16Т + 20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> размер зерна был на уровне  $3,5 \pm 1,7$  мкм.

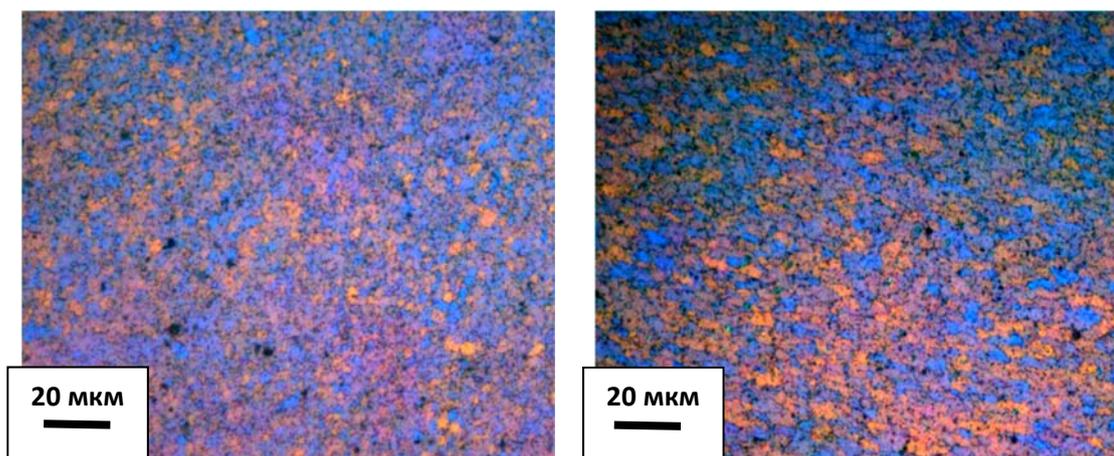


Рисунок 4. Микроструктура ядра сварного шва ДУАКМ Д16Т + 20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (а) и сплава Д16Т (б), x400

В результате предварительной отработки параметров режимов СТП выявлены диапазоны скорости вращения инструмента, обеспечивающие образование бездефектных сварных соединений. Планирование эксперимента проводилось как для сокращения объема испытаний, так и для определения области режимов, обеспечивающих высокие значения прочностных и усталостных характеристик соединений ДУАКМ.

На рисунке 5 приведены результаты построения зависимости временного сопротивления сварных соединений ДУАКМ на основе сплава Д16Т от величины подачи рабочего инструмента на один оборот и объемной доли упрочняющей фазы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Более темным цветом выделена область с повышенными значениями временного сопротивления сварного соединения.

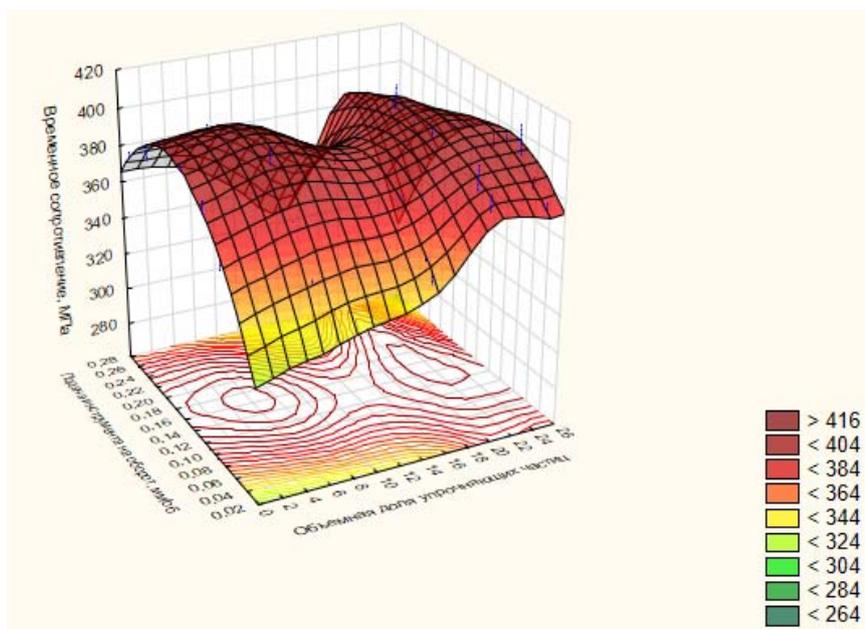


Рисунок 5. Временное сопротивление сварного соединения ДУАКМ с матрицей из сплава Д16Т в зависимости от величины подачи инструмента и объемной доли упрочняющих частиц  $Al_2O_3$

Результаты механических испытаний сварных соединений исследуемых материалов в зависимости от объемной доли упрочняющих частиц представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Механические свойства сварных соединений ДУКМ на основе сплава Д16Т в зависимости от объемной доли упрочняющих частиц  $Al_2O_3$

Материал	Временное сопротивление сварного соединения $\sigma_b$ , МПа	Коэффициент прочности сварного соединений	Временное сопротивление металла шва $\sigma_b^ш$ , МПа	Коэффициент прочности металла шва	Угол изгиба $\alpha$ , град.	Ударная вязкость металла шва $KCU$ , Дж/см <sup>2</sup>
Д16АТ	<u>340–357</u> 349	<u>0,82–0,86</u> 0,84	<u>350–377</u> 365	<u>0,84–0,90</u> 0,88	<u>65–82</u> 74	<u>71–79</u> 73
Д16 + 10% $Al_2O_3$	<u>355–374</u> 370	<u>0,85–0,88</u> 0,87	<u>382–399</u> 391	<u>0,90–0,94</u> 0,92	<u>60–78</u> 69	<u>65–72</u> 67
Д16 + 20% $Al_2O_3$	<u>360–382</u> 373	<u>0,80–0,85</u> 0,83	<u>382–396</u> 387	<u>0,85–0,88</u> 0,86	<u>55–68</u> 62	<u>60–65</u> 62

Результаты механических испытаний показали, что все образцы соединений исследуемых материалов разрушались по зоне термомеханического воздействия (ЗТМВ) со стороны отхода инструмента. Значения коэффициента прочности сварного соединения для всех исследуемых материалов находится в диапазоне 0,80–0,88. При этом значения коэффициента прочности для ДУАКМ с 10%  $Al_2O_3$  выше, чем для материала с 20%  $Al_2O_3$ . Необходимо также отметить, что значения коэффициента прочности металла шва превосходят аналогичные значения коэффициент прочности сварного соединения. Угол

изгиба сварных соединений для исследуемых материалов близок по своим значениям и находится в диапазоне 62–74°.

Сравнительный фрактографический анализ сварных соединений, выполненных СТП после испытаний на *KCU* показал, что изломы обуславливаются мелкозернистой структурой и более пластичным внутризерненным характером разрушения.

Исследование распределения микротвердости сварных соединений (рисунок 6), полученных по различным режимам СТП, показало, что изменение величины подачи на один оборот рабочего инструмента с 0,03 мм/об до 0,09 мм/об в исследуемом диапазоне режимов позволяет повысить механические характеристики сварных соединений, однако, значительного сокращения ширины зоны термического влияния для случая сварки ДУАКМ с матрицей из сплава Д16Т не происходит.

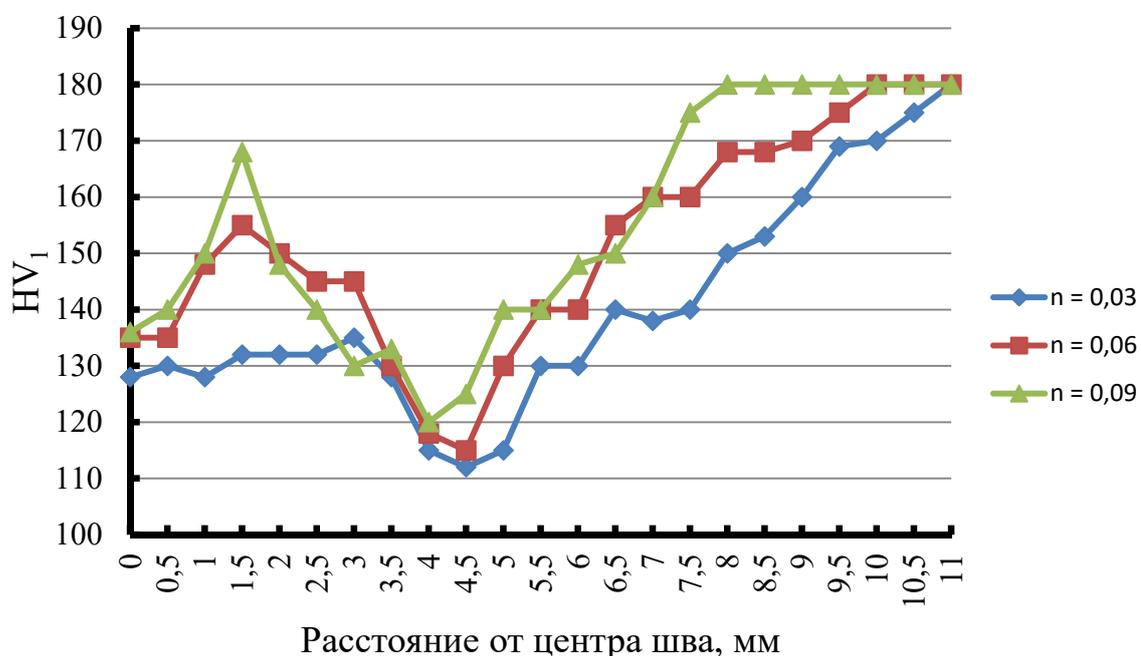


Рисунок 6. Распределение микротвердости в сварном соединении ДУАКМ Д16+20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в зависимости от величины подачи на один оборот инструмента при СТП

Разрушение сварных соединений в случае приложения циклических нагрузок инициируется с поверхности сварного шва при удаленном проплаве. Поэтому именно уровень его шероховатости значительно влияет на уровень характеристик усталости. Для исследуемых дисперсно-упрочненных материалов в диапазоне используемых режимов сварки трением с перемешиванием наблюдается формирование швов с изменением величины Rz от 60 до 135 мкм.

Для установления причин снижения усталостных характеристик проводился фрактографический анализ. Установлено, что очагами разрушения

сварных образцов ДУКМ при испытаниях на малоцикловую усталость являются поверхностные несовершенства сварного шва типа ямок, грубой поверхности и волнообразности рельефа (рисунок 7).

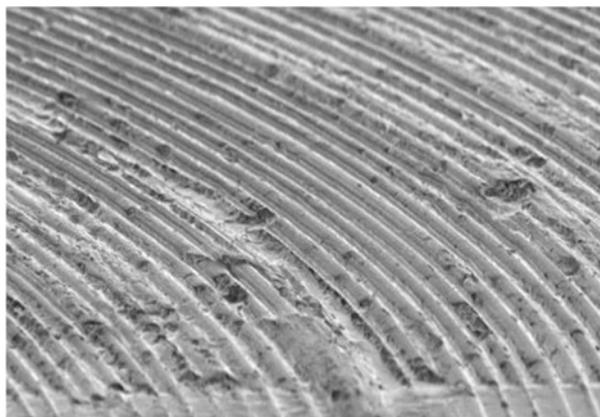


Рисунок 7. Лицевая поверхность сварных соединений ДУАКМ Д16АТ + 20%  $Al_2O_3$  (x50)

Результаты фрактографических исследований показали, что в изломе образца сварного соединения сплава Д16АТ наблюдается один развитый очаг возникновения разрушения, связанный с неровностями лицевой поверхности сварного шва. Усталостная трещина развивается веерообразно по трем разным плоскостям на глубину всего сечения образца, причем, развитие трещины в плоскостях, расположенных за начальной зоной развития, носит явный характер ускоренного развития.

В очагах разрушения образца сварного соединения ДУАКМ наблюдаются усталостные трещины в зоне сварного шва, разрушение развивается от этих трещин и наиболее грубых неровностей шва. Подобный характер поверхности наблюдается при шероховатости  $Rz \geq 85$  мкм, при этом разрушение при циклических испытаниях обоих сплавов является многоочаговым и развивается от неровностей сварного шва на все сечение образца.

Анализ характера разрушения образцов с шероховатостью поверхности  $Rz \leq 70$  мкм показал, что в изломе формируется один очаг разрушения, излом более вязкий по сравнению с многоочаговым разрушением при  $Rz \geq 85$  мкм.

**В главе 4** приведены результаты исследований влияния технологии подготовки поверхности заготовок ДУАМК к сварке трением с перемешиванием на качество и механические свойства сварных соединений. При отсутствии очистки и обезжиривания в швах, полученных СТП, могут содержаться дефекты в виде несплошностей. Установлено, что уровень прочностных характеристик сварных соединений на 5–7% выше у образцов, прошедших до сварки обезжиривание и травление, (независимо от времени

выдержки) по сравнению с образцами, прошедшими перед сваркой только обезжиривание.

Фрактографические исследования причин снижения пластических характеристик шва показали, что в изломе приповерхностной зоны выявлены области, в которых интенсивность пиков кислорода на спектрах выше, чем в основном изломе.

Для формирования бездефектных стыковых соединений ДУКМ при сварке трением с перемешиванием важным фактором является технология подготовки торцевой поверхности свариваемых кромок. В данном исследовании применялись следующие методы раскроя ДУКМ 1565чМ + 20%  $Al_2O_3$ : резка на гильотинных ножницах; гидроабразивная резка; лазерная резка.

Из полученных результатов испытаний можно видеть, что наиболее высокие механические свойства металла шва достигаются при раскрое заготовок на гильотинных ножницах и при гидроабразивной резке. При термическом раскрое (лазерная резка) наблюдается существенное снижение механических свойств металла зоны перемешивания (ядра шва), по-видимому, из-за окисления поверхности кромок в зоне реза и формирования протяженных оксидных пленок в шве при сварке трением с перемешиванием.

Металлографические исследования выявили взаимосвязь между величиной временного сопротивления сварного соединения ДУАКМ Д16Т + 20%  $Al_2O_3$  и толщиной промежуточных слоев в зоне термомеханического воздействия (ЗТМВ). На фотографиях (рисунок 8) микроструктуры зоны термомеханического воздействия соединений, представленных на рисунке 4.5, отчетливо прослеживается влияние кинематических параметров режима СТП на толщину зоны термомеханического воздействия.

Можно отметить, что в диапазоне скоростей сварки 40–80 мм/мин толщина прослойки между металлом шва и металлом зоны термомеханического воздействия составляет 1050–1170 мкм (рисунок 8, а, б). Увеличение скорости сварки до 120 мм/мин сопровождается снижением толщины зоны термомеханического воздействия до 720–780 мкм (рисунок 8, в). Наиболее радикальное снижение толщины зоны термомеханического воздействия до 230–270 мкм отмечается при скорости сварки более 160 мм/мин. При скорости сварки более 170–180 мм/мин в зоне термомеханического воздействия на границе с металлом зоны перемешивания отмечается возникновение микротрещин (рисунок 8), которые являются основной причиной снижения значений временного сопротивления сварного соединения.

С помощью метода дифракции отраженных электронов на растровом электронном микроскопе с энергодисперсионным анализатором определено, что в зоне перемешивания формируется мелкозернистая структура (размер зерна 3,2–5,5 мкм).

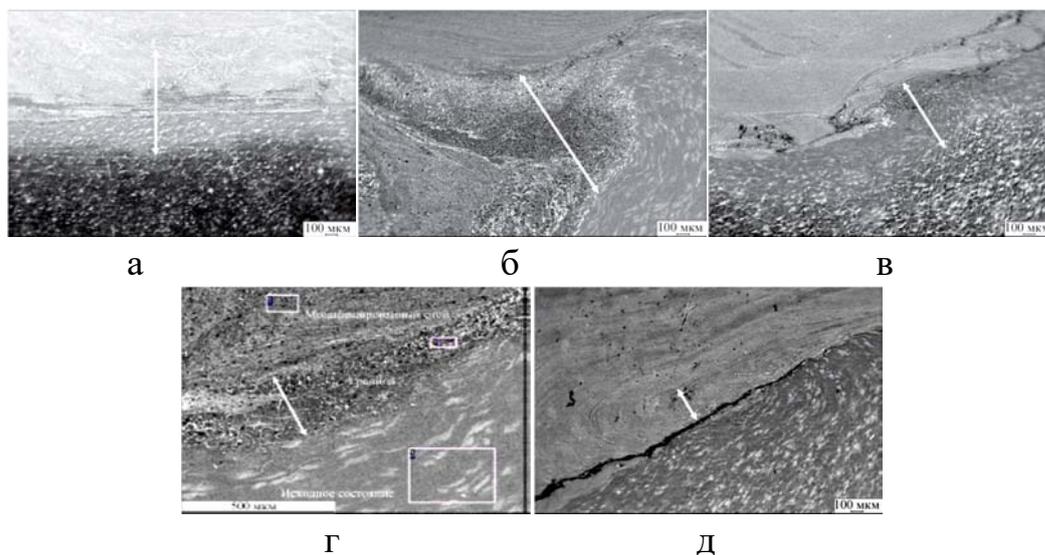


Рисунок 8. Структура границы зоны перемешивания и зоны термомеханического воздействия соединения ДУКМ Д16Т + 20%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , выполненного при частоте вращения инструмента  $800 \text{ мин}^{-1}$  и скорости сварки: а – 60 мм/мин; б – 80 мм/мин; в – 120 мм/мин; г – 160 мм/мин; д – 180 мм/мин

Электронно-микроскопические исследования показали, что соединение ДУАКМ, осуществляемое сваркой трением с перемешиванием в твердой фазы, не приводит к изменению фазово-структурного состояния основного материала. В результате металлографических исследований удалось установить, что средний размер зерна  $\alpha\text{-Al}$  матрицы приблизительно составляет 220–280 нм, а керамических частиц – 90–170 нм, аналогично основному материалу (рисунок 9).

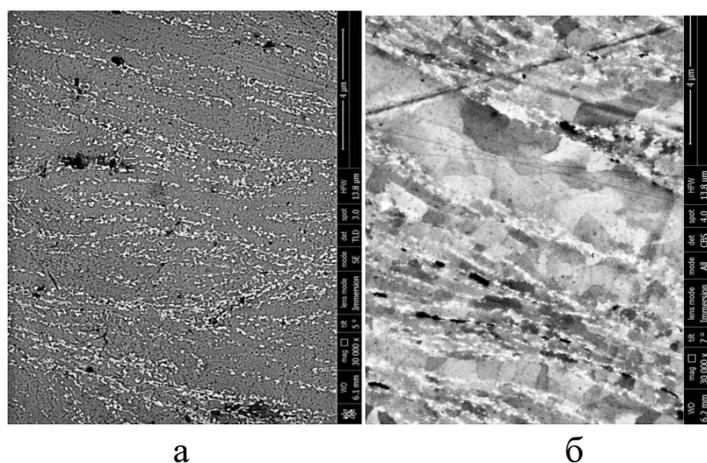


Рисунок 9. Микроструктуры основного материала в продольном (а) направлении и ядра шва (б), полученного при СТП ДУКМ Д16Т + 20%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 6 мм

Анализ тонкой структуры показывает, что упрочняющие оксидные частицы имеют правильную округлую форму, размытые границы в изображении светлого поля и характерный елочный контраст в изображении темного поля, как в основном материале, так и в швах, полученных СТП. При этом в металле шва сформирована равномерная смесь зерен матрицы с оксидными армирующими частицами.

В рамках данной работы были проведены исследования временного сопротивления основного металла и металла шва (зоны перемешивания) соединений сплава Д16АТ и ДУАКМ Д16 + 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при повышенных температурах. Полученные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Механические свойства металла шва и основного металла исследуемых сплавов при нормальной и повышенных температурах

Сплав	Образец	Температура испытаний, °С							
		20		350		400		450	
		σв, МПа	δ, %	σв, МПа	δ, %	σв, МПа	δ, %	σв, МПа	δ, %
Д16АТ	ОМ	415	15,0	80	48	52	64	30	82
	ЗП	365	6,5	65	59	45	86	15	122
Д16АТ + 20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ОМ	450	4,0	255	3,2	190	2,0	80	1,1
	ЗП	387	2,6	245	2,0	185	1,6	75	1,0

Примечание: ОМ – основной материал; ЗП – зона перемешивания (металл шва)

Из данных таблицы 3 следует, что как основной металл сплава Д16АТ, так металл зоны перемешивания проявляет свойство сверхпластичности при испытаниях с высокими температурами нагрева. Можно отметить, что металл зоны перемешивания соединений сплава Д16Т проявляет свойство сверхпластичности в большей мере, по-видимому, вследствие более мелкозернистой структуры. В то же время свойства сверхпластичности у зоны перемешивания соединений ДУАКМ установлено не было.

**В главе 5** представлены результаты исследования стойкости рабочего инструмента при сварке трением с перемешиванием ДУАКМ с различной объемной долей упрочняющих частиц. В результате анализа результатов рентгеновского контроля соединений ДУАКМ, полученных в процессе экспериментов, были установлены инородные металлические включения.

Образование инородных металлических включений связано с длительным использованием инструмента для сварки и образованием на его поверхности переходного слоя в результате интенсивного деформационного и диффузионного взаимодействия материала инструмента и материала свариваемых заготовок.

Анализ поверхности инструмента, который длительно эксплуатируется для выполнения швов, показывает, что на его поверхности присутствует переходный слой, который обладает высокой адгезией к поверхности инструмента. На поверхности штифта рабочего инструмента можно выделить несколько участков с различной интенсивностью адгезии материала свариваемых заготовок. Так на участке 1 (рис. 10) присутствует растрескивание поверхности инструмента и нет существенного объема налипшего металла

заготовки.

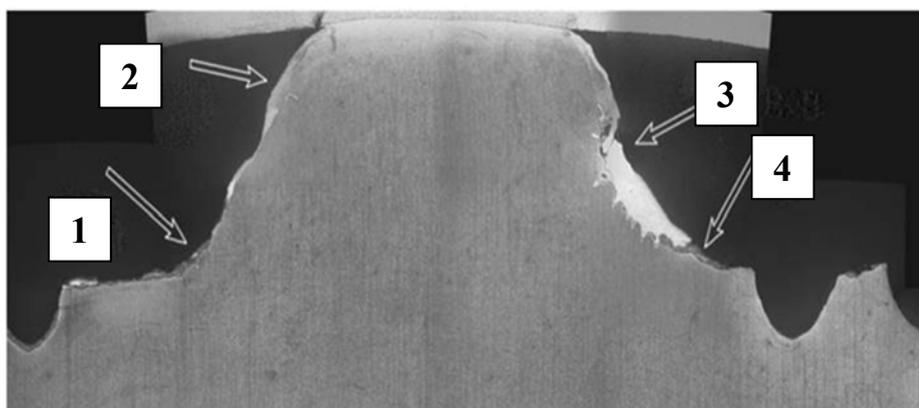


Рисунок 10. Поперечное сечение рабочей части инструмента для СТП:  
1 – участок отрыва материала заготовки; 2 – участок адгезии материала заготовки и материала инструмента; 3 – толстый слой налипшего материала заготовки; 4 – участок переходного слоя

Между слоем переноса и поверхностью стального инструмента присутствует тонкий переходной слой, контраст которого отличается от контраста слоя переноса и стальной основы. На большей части поверхности этот слой имеет протяженную плавную границу со стальной основой. На образующей поверхности штифта инструмента наблюдаются внедрения в виде язычков, направленных в тело инструмента. На торцевой поверхности заплечика инструмента наблюдаются слоистые структуры, свидетельствующие о локальной интенсивной пластической деформации.

Увеличение объемной доли упрочняющих керамических частиц  $Al_2O_3$  и SiC усиливает процесс износа инструмента, особенно в режиме работы на высоких частотах вращения. В данном случае аномально высокий износ инструмента можно связать с абразивным воздействием на него упрочняющих частиц. Такой абразивный износ вызывает рост интенсивности износа инструмента в сочетании с влиянием интерметаллидного слоя, формирующегося в процессе сварки.

Одним из эффективных направлений для сохранения высокой скорости сварки при более низких частотах вращения рабочего инструмента при выполнении соединений ДУАКМ при снижении износа инструмента является использование сопутствующего подогрева соединяемых заготовок. Эксперименты показали, что эффективный диапазон температур подогрева ДУАМК при сварке находится в пределах 100–125 °С.

**В заключении** обобщены основные результаты диссертационной работы.

**В приложении** приведены акты о практическом использовании результатов работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Определена область диапазонов значений параметра подачи на один оборот рабочего инструмента при сварке трением с перемешиванием дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов в зависимости от объемной доли упрочняющих частиц  $Al_2O_3$  и SiC в материале. Показано, что с увеличением объемной доли упрочняющих частиц в дисперсно-упрочненном материале диапазон изменения значений подачи на один оборот инструмента, при котором формируется соединение без дефектов существенно сужается и для ДУАКМ Д16Т + 20%  $Al_2O_3$  от составляет 0,03–0,11 мм/об.

2. Установлено, что рабочий диапазон подачи на один оборот инструмента при упрочнении материала частицами SiC уже на 22–28% по сравнению с рабочим диапазоном материала, упрочненного частицами  $Al_2O_3$  при одинаковой объемной доле упрочняющих частиц в алюминиевой матрице.

3. Разработаны математические модели зависимостей временного сопротивления и шероховатости соединений дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов, которые позволили определить области режимов сварки трением с перемешиванием (в координатах частота вращения инструмента  $\omega$ , скорость сварки  $v$ ), обеспечивающие высокие прочностные и ресурсные характеристики сварных соединений.

4. Сварные соединения ДУАКМ, упрочненные частицами SiC, обладают более высокими значениями прочности (примерно на 6–8%) по сравнению с соединениями материала, упрочненного частицами  $Al_2O_3$ , при одинаковой объемной доле упрочняющих частиц. При этом временное сопротивление металла шва превосходит по своим значениям временное сопротивление соединения в целом.

5. Разрушение сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, как алюминиевых сплавов 1565чМ и Д16АТ, так и дисперсно-упрочненных композиционных материалов на их основе, происходит по зоне термомеханического воздействия соединения со стороны отхода рабочего инструмента.

6. Показано, что разрушение сварных соединений при воздействии циклических нагрузок ДУАКМ инициируется с лицевой поверхности шва, поэтому ее шероховатость значительно влияет на уровень характеристик усталости. Фрактографический анализ образцов после испытаний показал, что наблюдается переход от многоочагового характера разрушения к одноочаговому при  $Rz \leq 70$  мкм.

7. Установлено, что благодаря формированию швов в твердой фазе процесс СТП позволяет получать качественные неразъемные соединения упрочненных оксидными частицами алюмоматричных композиционных материалов, без изменения их фазово-структурного состояния. При СТП ДУАКМ диссоциации армирующих частиц не происходит, а их дисперсность и

равномерность распределения в металле шва сохраняются на уровне основного материала.

8. Испытания на растяжение при повышенных температурах показали, что ДУАКМ и его соединения, полученные сваркой трением с перемешиванием, не проявляют склонность к сверхпластичности при повышенных температурах в отличие от матричного сплава Д16Т и его соединений.

9. Показано, что износ рабочего инструмента при сварке трением ДУАКМ усиливается с увеличением временного сопротивления свариваемого материала и ростом объемной доли упрочняющих керамических частиц в нем. Адгезионное взаимодействие между свариваемым металлом и инструментом может привести к диффузии и образованию хрупкого интерметаллидного слоя в стальном инструменте. Немаловажным фактором является то, что диффузия элементов в налипшем слое может усиливаться за счет механических напряжений, развиваемых в зоне перемешивания за счет сопротивления металла усилию продвижения инструмента.

10. Эффективной мерой повышения скорости сварки ДУАКМ при сохранении высокого уровня механических свойств и снижением интенсивности износа рабочего инструмента является применение сопутствующего подогрева до 100–125 °С соединяемых заготовок в процессе сварки.

11. Подготовлены технологические рекомендации по сварке трением с перемешиванием стыковых соединений дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалы на основе сплавов 1565ч и Д16Т.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Овчинников, В.В. Сварка трением с перемешиванием дисперсно-армированных керамическими частицами композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов. / В.В. Овчинников, А.М. Губин, И.А. Курбатова – Текст: непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018. – Т.16. – №4. – С. 155–161.

2. Феофанов, А.Н. Сварка трением с перемешиванием стыковых соединений упрочненных оксидными частицами композиционных материалов на алюминиевой основе. / А.Н. Феофанов, В.В. Овчинников, А.М. Губин. – Текст: непосредственный // Сварочное производство. – 2019. – №12. – С.23-29.

3. Феофанов, А.Н. Неразъемные соединения дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе алюминия, выполненных сваркой трением с перемешиванием. / А.Н. Феофанов, В.В. Овчинников, А.М. Губин. – Текст: непосредственный // Сварочное производство. – 2020. – №4. – С.19–27.

4. Овчинников, В.В. Влияние режима сварки трением с перемешиванием на прочность стыковых соединений алюминиевого сплава 1565ч. / В.В.

Овчинников, А.М. Губин, О.А. Парфеновская. – Текст: непосредственный // Технология металлов. – 2020. – №7. – С. 23–32.

5. Феофанов, А.Н. Влияние подачи инструмента на механические свойства стыковых соединений при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов. / А.Н. Феофанов, В.В. Овчинников, А.М. Губин. – Текст: непосредственный // Вестник машиностроения. – 2020. – №8. – С. 65–70.

6. Овчинников, В.В. Металлические включения в швах и разрушение инструмента при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов. / А.Н. Феофанов, В.В. Овчинников, А.М. Губин. – Текст: непосредственный // Сварочное производство. – 2021. – №4. – С.33–39.

7. Феофанов, А.Н. Неразъемные стыковые соединения алюмоматричного дисперсионно-упрочненного частицами SiC композиционного материала, выполненные сваркой трением с перемешиванием. / А.Н. Феофанов, В.В. Овчинников, А.М. Губин. – Текст: непосредственный // Вестник машиностроения. – 2021. – №5. – С.64–69.

8. Феофанов, А.Н. Влияние технологической схемы сварки трением с перемешиванием на структуру и свойства соединений алюминиевых сплавов. / А.Н. Феофанов, В.В. Овчинников, А.М. Губин. – Текст: непосредственный // Сварочное производство. – 2021. – №8. – С.20–23.

9. Феофанов, А.Н. Свойства и структура соединений дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов. / А.Н. Феофанов, В.В. Овчинников, А.М. Губин. – Текст: непосредственный // Сварочное производство. – 2021. – №9. – С.23–28.

10. Феофанов, А.Н. Механические свойства соединений алюмоматричного дисперсно-упрочненного композиционного материала, полученных сваркой трением с перемешиванием. / А.Н. Феофанов, В.В. Овчинников, А.М. Губин. – Текст: непосредственный // Сварочное производство. – 2021. – №10. – С.13–18.

11. Феофанов, А.Н. Механические свойства соединений алюмоматричного дисперсно-упрочненного композиционного материала со сплавом 1151Т, выполненных сваркой трением с перемешиванием. / А.Н. Феофанов, В.В. Овчинников, А.М. Губин. – Текст: непосредственный // Сварочное производство. – 2021. – №11. – С.6–11.

12. Дриц, А.М. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием дисперсно-упрочненного алюмоматричного композиционного материала. / А.М. Дриц, В.В. Овчинников, А.М. Губин. – Текст: непосредственный // Технология легких сплавов. – 2021. – №3. С.11–20.

#### Статьи в зарубежных изданиях

13. Mechanical Properties of Joints in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. / A.N. Feofanov, V.V. Ovchinnikov, A.M. Gubin. – Text: Direct. // Russian Engineering Research. – 2020. – 40(11). – pp. 916-921.