

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт Машиностроения, Материалов и Транспорта**

На правах рукописи

Ожегов Михаил Андреевич

**Повышение качества сварных соединений, выполненных методом
точечной сварки трением с перемешиванием, из тонких листов
алюминиевых сплавов**

Направление подготовки 22.06.01 Технологии материалов

Код и наименование

Направленность 22.06.01_04 Обработка металлов давлением

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Ожегов М.А.
Научный руководитель: к.т.н., доцент Наумов А.А.

Санкт-Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе физики и технологии материалов Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор Высшей школы физики
и технологии материалов: – *Семенча Александр
Вячеславович, к.х.н, доцент*

Научный руководитель: – *Наумов Антон Алексеевич,
к.т.н., доцент*

Рецензент: – *Матвеев М.А., к.т.н., ведущий
эксперт, АО «Северсталь
Менеджмент» ДТРК, УНПУТ.*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Во всем мире в настоящее время увеличивается спрос на алюминий и его сплавы в таких отраслях, как автомобилестроение и судостроение. Растущие объемы производства и сложности при соединении новых алюминиевых сплавов традиционными методами сварки приводят к развитию инновационных методов сварки, таких как сварка трением с перемешиванием (далее - СТП). При использовании данного процесса сварное соединение образуется в результате одновременной пластической деформации и перемешивания соединяемых деталей в твердой фазе.

Одной из разновидностей СТП является точечная сварка трением с перемешиванием (далее – ТСТП) (Рисунок 1).

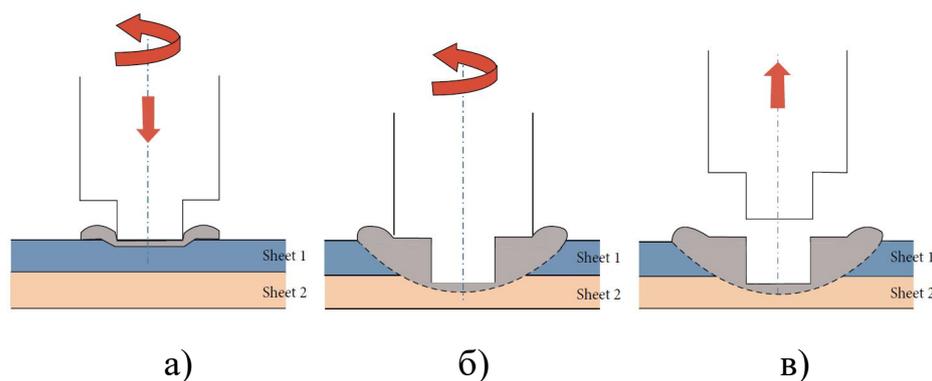


Рисунок 1 – Иллюстрация процесса ТСТП: а) погружение, б) перемешивание, в) извлечение

Процесс ТСТП начинает находить свое применение в авиации, авиакосмической промышленности и автомобилестроении. Такие компании, как «Mazda», «Honda» и «Toyota» широко используют ТСТП в своих производственных процессах. ТСТП позволяет им использовать алюминий в кузовах автомобилей и таким образом, снизив его вес, также повысить эффективность производства, при повышенных требованиях к качеству.

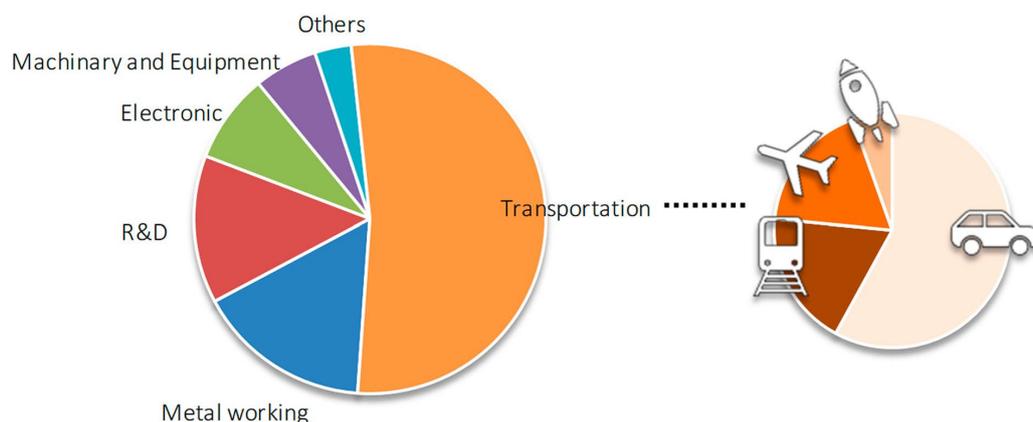


Рисунок 2 – Основные отрасли промышленности, использующие СТП

Автомобильная промышленность занимает один из ключевых сегментов, использующих СТП и ТСТП в своих производственных процессах, далее идет производство железнодорожных составов, авиастроение и космическая промышленность. В связи с этим, исследования в области точечной сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов являются востребованными для промышленности в сфере транспортной индустрии.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является повышение качества сварных соединений, выполненных методом точечной сварки трением с перемешиванием, из тонких листов алюминиевых сплавов.

Для реализации данной цели необходимо выполнить следующий задачи:

- Выбор алюминиевых сплавов для исследования;
- Подбор режимов сварки выбранных алюминиевых сплавов;
- Проведение испытаний на растяжение для выбора режимов сварки;
- Определение температур сварочного процесса каждого из исследуемых алюминиевых сплавов;
- Анализ макроструктуры сварных соединений с лучшими механическими характеристиками;
- Создание математической модели процесса ТСТП;
- Валидация модели процесса ТСТП по температуре;

Научная новизна

Обнаружен различный характер течения материала разных сплавов при ТСТП идентичными инструментами в зоне перемешивания. Экспериментально подтверждено равномерное распределение температуры относительно центра сварной точки. Обнаружен идентичный характер достижения максимальной температуры сварочного процесса для алюминиевых сплавов АМг5М и АД35Т1, но для сплава В95АТ1 характер достижения максимальной температуры иной, чем у сплавов выше.

Теоретическая и практическая значимость

Практическая значимость работы заключается в получении точечного сварного соединения, используя инновационный метод ТСТП. В работе рассмотрены наиболее актуальные и перспективные алюминиевые сплавы для российского автомобилестроения, такие как АМг5М, АД35Т1, В95АТ1. Проведена оптимизация скорости вращения инструмента, скорости погружения инструмента, усилия и рабочего инструмента с целью повышения качества. Создана математическая модель процесса ТСТП.

Апробация работы

Полученные результаты были доложены и опубликованы на российских и международных конференциях: Современные материалы и новые производственные технологии: от изобретения до внедрения (СПб 2019, 2021), The Minerals, Metals and Material Series (USA, Pittsburgh, 2021), Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Современные проблемы материаловедения» (Липецк, 2021).

Публикации

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

Физико-механические процессы соединения тонких листов алюминия при сварке трением с перемешиванием встык, Наумов А.А., Ожегов М.А., Смелянский Р.И., Алали Алхалаф А., Поляков П.Ю., Материаловедение. Энергетика, 2020, Т. 26 №2, с. 88-102.

Публикации в изданиях, рецензируемых Scopus

Temperature Distribution During Friction Stir Spot Welding of Thin AA 6082-T6 and AA5082-O Sheets, Mikhail Ozhegov, Fedor Isupov, Roman Smelianskii, Minerals, Metals and Materials Series №XI, с. 209-217, 2021.

Представление научного доклада: основные положения

Данная работа посвящена повышению качества сварных соединений, выполненных методом точечной сварки трением с перемешиванием, из тонких листов алюминиевых сплавов, также анализу характеристик трех алюминиевых сплавов АМг5М, АД35Т1 и В95АТ1. При помощи испытаний на разрыв были определены механические характеристики сварных соединений, выполненных методом ТСТП для каждого из исследуемых алюминиевых сплавов. При помощи металлографических исследований был проведен анализ макроструктуры исследуемых алюминиевых сплавов, определен характер течения материала в зоне перемешивания, были выявлены дефекты в виде непровара и трещин в зоне термомеханического влияния сварного соединения. При помощи термопар было определено распределение температур при ТСТП каждого из алюминиевых сплавов. Была проведена валидация температурной модели процесса ТСТП в программном комплексе ANSYS Fluent 2020R2.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Объекты, (предмет) и методы исследования

Объектами исследования были выбраны алюминиевые сплавы АМг5М (1x25x100 мм), АД35Т1 (1x25x100 мм), В95АТ1 (2x25x100 мм).

Таблица 1 – Химический состав алюминиевого сплава АМг5М

Al	Mg	Fe	Zn	Si	Mn	Cr	Cu	Ti
93.5-96	4.0-5.0	0-0.35	0-0.25	0-0.2	0-0.15	0-0.15	0-0.15	0-0.1

Таблица 2 – Химический состав алюминиевого сплава АД35Т1

Al	Mg	Fe	Zn	Si	Mn	Cr	Cu	Ti
95.2-98.3	0.6-1.2	0-0.5	0-0.2	0.7-1.3	0.4-1.0	0-0.25	0-0.1	0-0.1

Таблица 3 – Химический состав алюминиевого сплава В95АТ1

Al	Mg	Fe	Zn	Si	Mn	Cr	Cu	Ti
86.3-91.5	1.8-2.8	0-0.5	5-7	0-0.5	0.2-0.6	0.1-0.25	1.4-2	0-0.5

Предварительно осуществлялся подбор режима сварки методом ТСТП для образцов, выполненных из перечисленных выше сплавов. На стадии подбора режима варьировались скорость вращения инструмента, скорость погружения инструмента в тело материала, глубина погружения инструмента в тело материал и усилие. После изготовления ряда пробных образцов были проведены испытания на разрыв. Для этого использовалась специализированное оборудование Zwick/Roell Z100. Режимы, которые показали лучшие результаты на разрыв, были зарегистрированы как результат интеллектуальной собственности (программа для ЭВМ).

Далее для более глубокого понимания процесса сварки, с лучшими режимами был произведен процесс измерения температур сварочного процесса при помощи термопар. Полученные результаты с термопар были использованы для валидации математического моделирования процесса в программном комплексе ANSYS Fluent 2020R2.

Дополнительно были изготовлены образцы для оценки макроструктуры трех сварных точек, которые показали лучшие результаты на разрыв, и определения размера дефекта, непровара, который является одним из основных видов дефектов подобных сварных соединений.

Результаты и их обсуждение

Подбор режимов сварки и испытания на разрыв

В данном пункте приводятся результаты этапа подбора режима сварки для исследуемых алюминиевых сплавов. Для достижения необходимых

параметров сварного соединения варьировались следующие параметры сварки:

- Скорость вращения инструмента;
- Скорость внедрения инструмента в свариваемые заготовки;
- Усилие;
- Время выдержки инструмента в теле свариваемых заготовок;
- Диаметр заплечиков инструмента;
- Форма заплечиков инструмента;
- Длина сварочного наконечника;
- Диаметр сварочного наконечника;
- Глубина погружения наконечника в тело свариваемых заготовок.

После сварки ряда пробных образцов каждого алюминиевого сплава проводились испытания на разрыв, выполненные по ГОСТ 1497-84 на специализированном оборудовании Zwick/Roell Z100. Проводились испытания 80 образцов 25x100x1/1/2 мм соответственно.

Результаты испытаний по каждому алюминиевому сплаву представлены в Таблицах 4-5, 7-8, 10-11. Для каждого режима сварки испытывалось по 3 образца для большей точности измерений. В первую очередь рассмотрим результаты механических испытаний для алюминиевого сплава АМг5М (Табл. 4-5).

Таблица 4 – Результаты испытания образцов АМг5М (скорость вращения 1000 об/мин)

Выдержка (сек)	Обозначение образца	L0 (mm)	mE (GPa) среднее	Rm (N) среднее	A (mm)
2	6/6,1/6,2	35,0	1065,2	2860,03	0,6/0,6/0,4
4	7/7,1/7,2	35,0	956,8	2842,8	0,5/0,6/0,7
6	8/8,1/8,2	35,0	1062,5	3161,6	0,9/0,9/1,0
8	9/9,1/9,2	35,0	1207,0	3291	1,0/0,6/0,7
10	10/10,1/10,2	35,0	1092,3	3003,4	0,5/0,6/0,5

Таблица 5 – Результаты испытания образцов АМг5М (скорость вращения 8000 об/мин)

Выдержка (сек)	Обозначение образца	L0 (mm)	mE (GPa) среднее	Rm (N) среднее	A (mm)
2	1/1,1/1,2	35,0	943,6	2222	0,4/0,5/0,5
4	2/2,1/2,2	35,0	1050,6	2116,6	0,1/0,8/0,4
6	3/3,1/3,2	35,0	1211,9	2358,5	0,3/0,1/0,2
8	4/4,1/4,2	35,0	971,9	2016,2	0,4/0,6/0,1
10	5/5,1/5,2	35,0	961,6	2264,6	0,3/0,4/-

В результате анализа таблиц 4–5 можно сделать вывод, что процесс сварки стабильнее протекает при скорости вращения инструмента 1000 об/мин, средние показатели на разрыв больше, чем при скорости 8000 об/мин при одинаковых параметрах сварочного инструмента. Оптимизируя время сварки, выбираем для алюминиевого сплава АМг5М следующий режим сварки, указанный в таблице 6.

Таблица 6 – Сварочный режим для сплава АМг5М

Скорость вращения инструмента (об/мин)	Выдержка инструмента (сек.)	Скорость погружения инструмента (мм/мин)	Усилие (кН)	Усилие на разрыв (Н)
1000	4	50	4	2842,8

Режим сварки, указанный в таблице 6, зарегистрирован как результат интеллектуальной собственности (программа для ЭВМ) №2021618827.

Далее рассмотрим результаты сварки алюминиевого сплава АД35Т1. Результаты испытаний на разрыв указаны в Таблицах 7–8.

Таблица 7 – Результаты испытания образцов на разрыв АД35Т1 (скорость вращения 1000 об/мин)

Время выдержки (сек)	Обозначение образца	L0 (mm)	mE (GPa) среднее	Rm (N) среднее	A (mm)
2	5/5,1/5,2	35,0	834,2	2038,9	0,0/0,7/0,3
4	6/6,1/6,2	35,0	1033,1	3009,1	0,9/1,0/0,6
6	7/7,0/7,2	35,0	1029	2919,4	1,2/1,1/1,1
8	8/8,1/8,2	35,0	1032,2	2739	1,2/1,2/1,1

Таблица 8 – Результаты испытания образцов на разрыв АД35Т1 (скорость вращения 8000 об/мин)

Время выдержки (сек)	Обозначение образца	L0 (mm)	mE (GPa) среднее	Rm (N) среднее	A (mm)
2	1/1,1/1,2	35,0	932,4	1812,6	0,7/0,6/0,7
4	2/2,1/2,2	35,0	924,6	1932,9	0,7/0,7/0,6
6	3/3,1/3,2	35,0	820,9	1768,8	1,2/0,7/1,0
8	4/4,1/4,2	35,0	832,3	1692,5	0,7/0,9/0,8

В результате анализа таблиц 7–8 можно сделать вывод, что процесс сварки стабильнее протекает на скорости 1000 об/мин, испытания на разрыв

показали большие значения, чем на скорости 8000 об/мин при одинаковых параметрах сварочного инструмента. Оптимизируя время сварки под сокращение времени процесса, выбираем для алюминиевого сплава АД35Т1 следующий режим сварки, указанный ниже (Таблица 9)

Таблица 9 – Сварочный режим для сплава АД35Т1

Скорость вращения (об/мин)	Выдержка инструмента (сек.)	Скорость погружения инструмента (мм/мин)	Усилие (кН)	Усилие на разрыв (Н)
1000	4	50	4	3009,1

Режим сварки, указанный в таблице 9, зарегистрирован как результат интеллектуальной собственности (программа для ЭВМ) №2021618846.

Далее рассмотрим результаты сварки алюминиевого сплава В95АТ1. Результаты испытаний на разрыв указаны в Таблицах 10–11.

Таблица 10 – Результаты испытания образцов на разрыв В95АТ1 (скорость вращения 2000 об/мин)

Выдержка (сек)	Обозначение образца	L0 (mm)	mE (GPa) среднее	Rm (N) среднее	A (mm)
2	1,1/1,2/1,3	35,0	914,3	1646,7	0,3/0,3/0,2
4	2,1/2,2/2,3	35,0	1077,7	1947,4	0,2/0,2/0,3
6	3,1/3,2/3,3	35,0	1043,2	2410	0,2/0,2/0,2
8	4,1/4,2/4,3	35,0	1163,6	3352,2	0,2/0,2/0,2
10	5,1/5,2/5,3	35,0	1223,9	3829,9	0,3/0,3/0,3

Таблица 11 – Результаты испытания образцов на разрыв В95АТ1 (скорость вращения 8000 об/мин)

Выдержка (сек)	Обозначение образца	L0 (mm)	mE (GPa) среднее	Rm (N) среднее	A (mm)
2	6,1/6,2/6,3	35,0	1095,4	2362	0,5/0,0/0,0
4	7,1/7,2/7,3	35,0	1274,9	4428	0,5/0,1/0,1
6	8,1/8,2/8,3	35,0	1354,6	4921	0,1/0,1/0,1
8	9,1/9,2/9,3	35,0	1358,6	4613,3	0,0/0,1/0,1
10	10,1/10,2/10,3	35,0	1273,3	4068,6	0,3/0,1/0,0

Рассматривая таблицы 10–11 можно сделать вывод, что процесс сварки стабильнее протекает при скорости вращения инструмента 8000 об/мин, средние показатели на разрыв больше, чем при скорости 2000 об/мин при одинаковых параметрах сварочного инструмента. Оптимизируя время сварки под сокращение времени процесса, выбираем для алюминиевого сплава В95АТ1 следующий режим сварки, указанный в таблице 12.

Таблица 12 – Режим сварки алюминиевого сплава В95АТ1

Скорость вращения инструмента (об/мин)	Время выдержки (сек.)	Скорость внедрения инструмента (мм/мин)	Усилие (кН)	Усилие на разрыв (Н)
8000	4	150	4	4428

Режим сварки, указанный в таблице 12, зарегистрирован как результат интеллектуальной собственности (программа для ЭВМ) №2021616082

Определение температур сварочного процесса

Для определения температур сварочного процесса было изготовлено 9 образцов (по три на каждый алюминиевый сплава) из 18 листовых заготовок. Сварку каждой пары образцов по заранее подготовленному режиму. Режимы отличались друг от друга скоростью вращения инструмента, скоростью

погружения инструмента в тело материала, длиной наконечника, глубиной сварки (Таблица 13). Процесс снятия значений температур ТСТП для трех сплавов производили с использованием специализированного оборудования National Instrument cDag- 9184 (Рисунок 3). Анализ и обработка результатов происходила в программе Excel.



Рисунок 3 – National Instrument cDag- 9184

Таблица 13 – Сварочные режимы для определения значений температур

Марка алюминиевого сплава	Вращение инструмента	Усилие сварки кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Глубина сварки, мм	Время выдержки, сек	Длина наконечника, мм	Вид заплечиков
АМг5М	1000	4	50	1,8	10	2	Конический
	4000		85				
	8000		150				
АД35Т1	1000	4	50	1,8	10	2	Конический
	4000		85				
	8000		150				
В95АТ1	2000	4	65	3,8	10	2	Конический
	5000		95				
	8000		150				

Подготовительный этап эксперимента осуществлялся по следующему механизму: две листовые заготовки 100x100 мм предварительно обезжирили, разметили верхнюю заготовку для определения центра, далее приварили по 4 термопары 9 верхних листов, предварительно отступив определенное расстояние от центра.

Термопары (тип К) изготовленные из хромель-алюмелевой проволоки толщиной 0.2 мм каждая. Термопары приваривались к верхним заготовки

при помощи аппарата для импульсного-дуговой сварки Orion 150S. Схема расположения термопар и геометрия образцов изображены на рисунке 4.

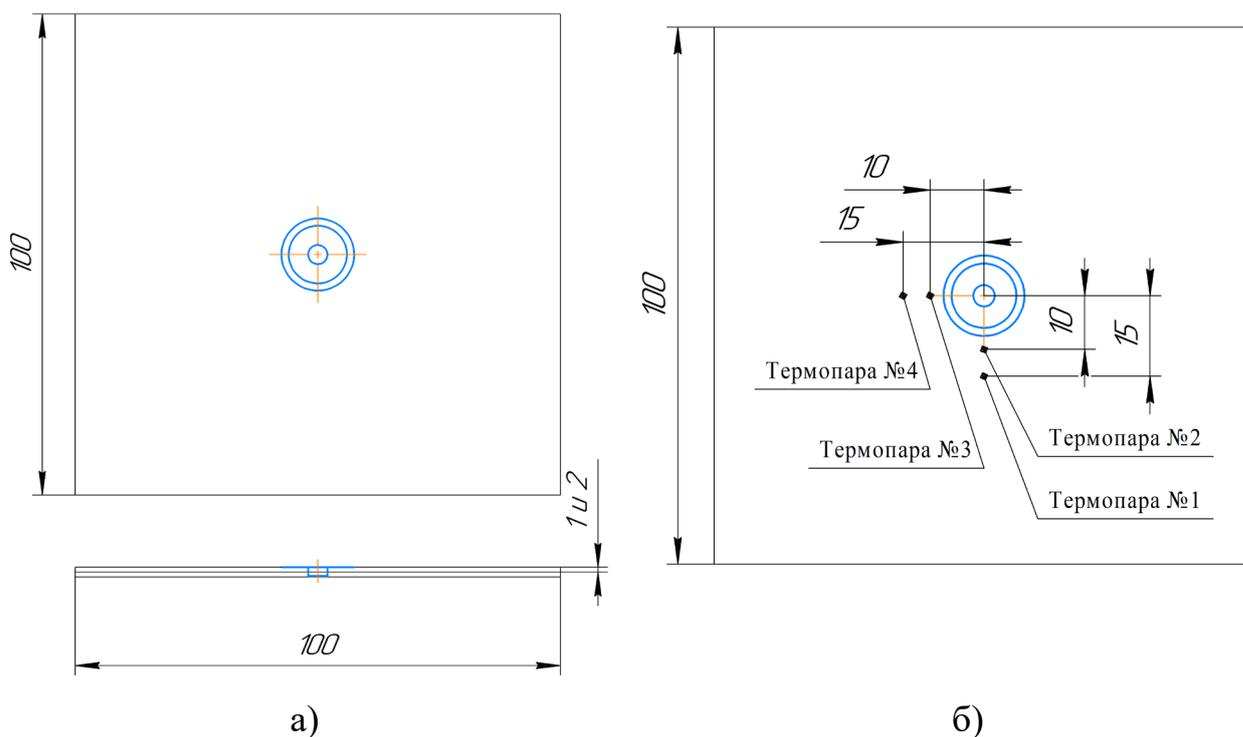


Рисунок 4 – а) Геометрия образцов, б) Расположение термопар, мм

Рассмотрим распределение температур для алюминиевого сплава АМг5М. На графике (Рисунок 5) изображено распределение температур в процессе сварки образца №1, полученные только с двух термопар, так как 2 другие отказали.

Таблица 14 – Сварочный режим образца №1

Вращение инструмента	Усилие сварки кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Глубина сварки, мм	Время выдержки, сек	Длина наконечника, мм	Вид заплечиков
1000	4	50	1.8	10	2	Конический

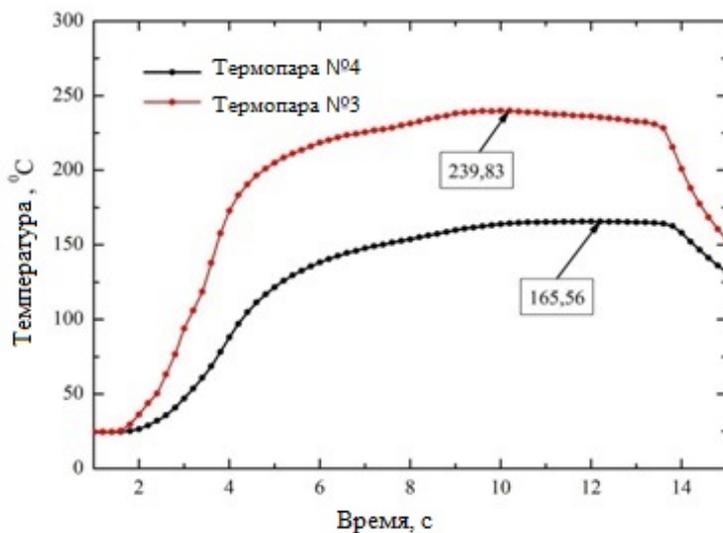


Рисунок 5 – График температуры сварки для первого образца

Таблица 15 – Сварочный режим образца №2

Вращение инструмента	Усилие сварки кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Глубина сварки, мм	Время выдержки, сек	Длина наконечника, мм	Вид заплечиков
4000	4	85	1,8	10	2	Конический

На рисунке 6 показан график распределения температуры сварочного процесса для второго образца.

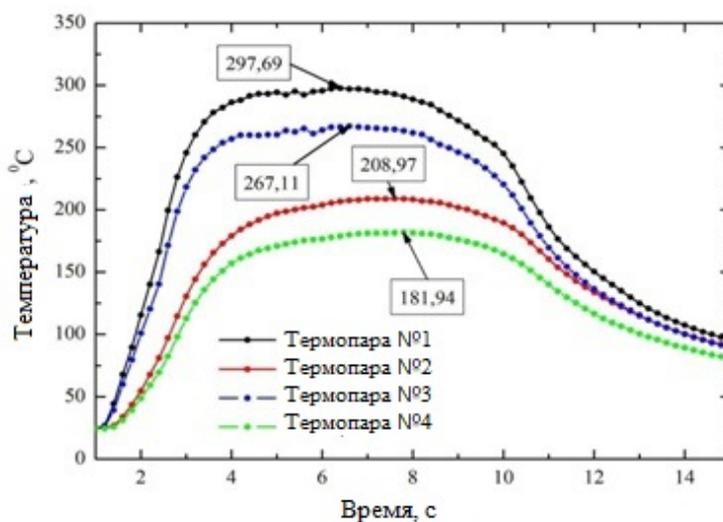


Рисунок 6 – График температуры сварки для второго образца

Таблица 16 – Сварочный режим образца №3

Вращение инструмента	Усилие сварки кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Глубина сварки, мм	Время выдержки, сек	Длина наконечника, мм	Вид заплечиков
8000	4	150	1,8	10	2	Конический

На рисунке 7 показан график распределения температуры сварочного процесса для третьего образца.

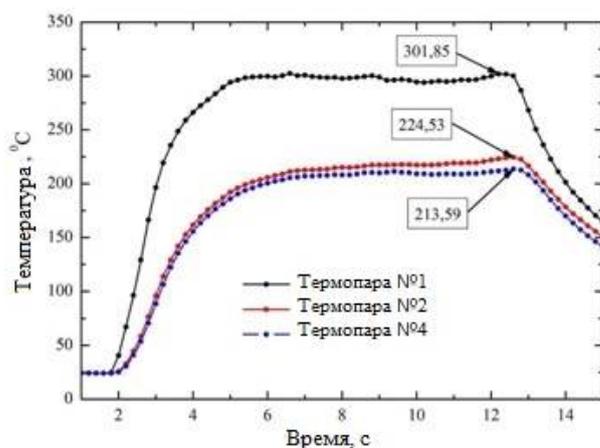


Рисунок 7 – График температуры сварки третьего образца

Рассмотрев результаты распределения температур во время ТСТП алюминиевого сплава АМг5М, можно заметить следующие, что, если увеличить скорость вращения инструмента и увеличении скорости погружения наконечника в тело заготовки, замечается, что значительно увеличивается максимальная температура. Максимальные показатели демонстрировали те термопары, которые находились на расстоянии 10 мм от центра сварной точки. Результаты сравнения температур для каждой из трех скоростей вращения, приведены ниже (Таблица 17).

Таблица 17 – Сравнение температур для трех скоростей вращения инструмента

Образец	Скорость вращения инструмента (об/мин)	Максимальная температура, (градусы Цельсия)
1	1000	239,83
2	4000	297,69
3	8000	301,85

Рассмотрим распределение температур для алюминиевого сплава АД35Т1.

Таблица 18 – Сварочный режим образца №4

Вращение инструмента	Усилие сварки кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Глубина сварки, мм	Время выдержки, сек	Длина наконечника, мм	Вид заплечиков
1000	4	50	1,8	10	2	Конический

На рисунке 8 показан график распределения температуры сварочного процесса для четвертого образца. Изображены результаты только с термопар №3 и №4, так как термопары №1 и №2 отказали в процессе сварки.

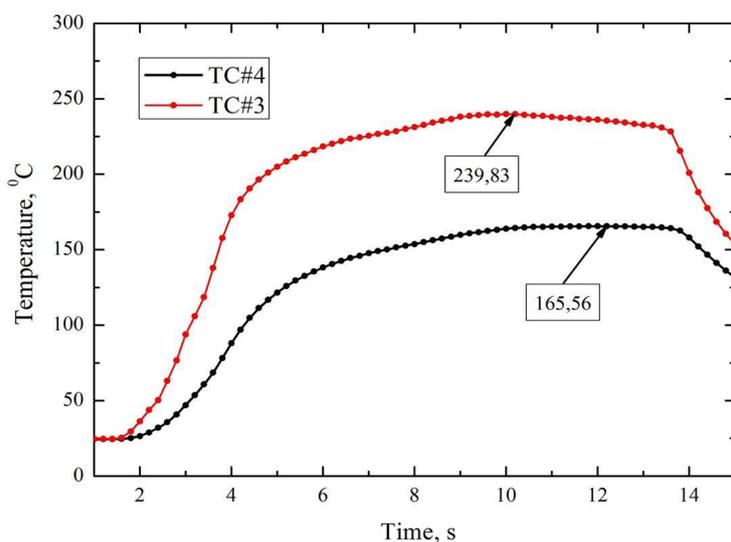


Рисунок 8 – График температуры сварки четвертого образца

Таблица 19 – Сварочный режим образца №5

Вращение инструмента	Усилие сварки кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Глубина сварки, мм	Время выдержки, сек	Длина наконечника, мм	Вид заплечиков
4000	4	85	1,8	10	2	Конический

На рисунке 9 показан график распределения температуры сварочного процесса для пятого образца. Изображены результаты только с термопар №1, №2, №3, так как термопара №4 отказала в процессе сварки.

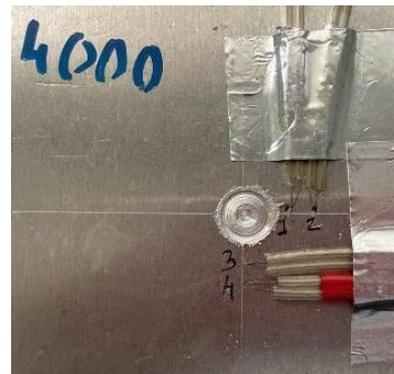
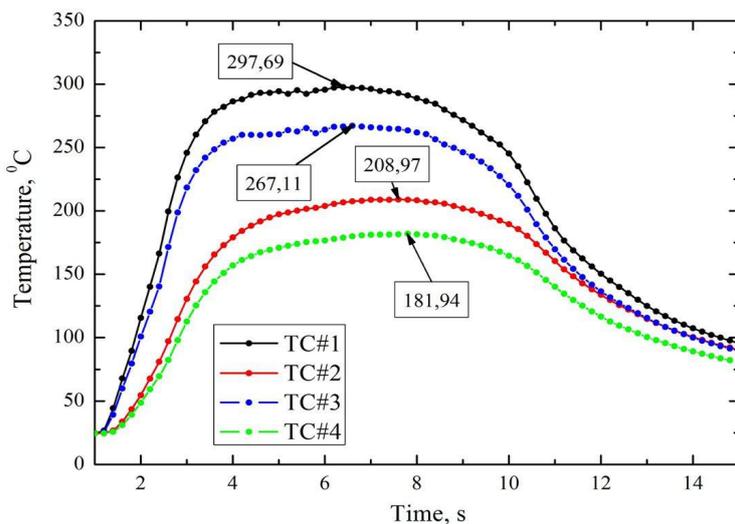


Рисунок 9 – График температуры сварки пятого образца

Таблица 20 – Сварочный режим образца №6

Вращение инструмента	Усилие сварки кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Глубина сварки, мм	Время выдержки, сек	Длина наконечника, мм	Вид заплечиков
8000	4	150	1,8	10	2	Конический

На рисунке 10 показан график распределения температуры сварочного процесса для шестого образца. Изображены результаты только для термопар №1, №2 и №4, так как термопара №3 отвалилась во время сварочного процесса.

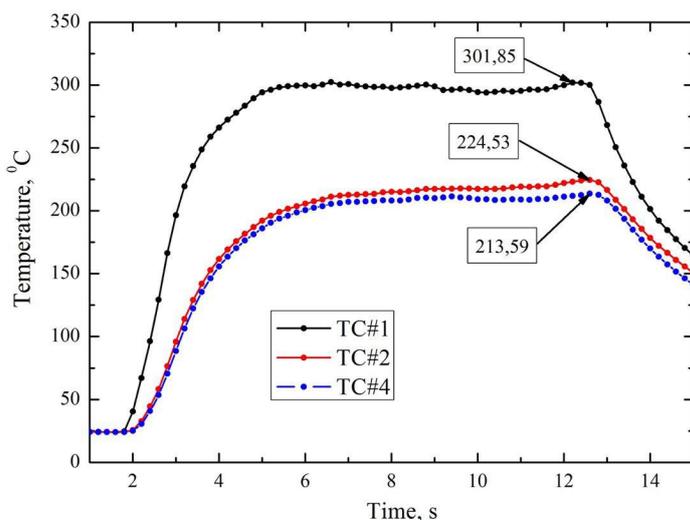


Рисунок 10 – График температуры сварки шестого образца

Рассмотрев результаты распределения температур во время ТСПП алюминиевого сплава АД35Т1, можно заметить следующие, что, если

увеличить скорость вращения инструмента и увеличении скорости погружения наконечника в тело заготовки, замечается, что значительно увеличивается максимальная температура, однако максимальное значение температур отличается от результатов сплава АМг5М, так как максимальное значение достигается на скорости вращения инструмента в 4000 об/мин. Максимальные показатели демонстрировали те термопары, которые находились на расстоянии 10 мм от центра сварной точки. Результаты сравнения температур для каждой из трех скоростей вращения, приведены ниже (Таблица 21).

Таблица 21 – Сравнение температур для трех скоростей вращения инструмента

Образец	Скорость вращения инструмента (об/мин)	Максимальная температура, (градусы Цельсия)
4	1000	239,83
5	4000	297,69
6	8000	301,85

Перейдем к анализу температур при ТСТП алюминиевого сплава В95АТ1.

Таблица 22 – Сварочный режим образца №6

Вращение инструмента	Усилие сварки кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Глубина сварки, мм	Время выдержки, сек	Длина наконечника, мм	Вид заплечиков
8000	4	150	1,8	10	2	Конический

Ниже (Рисунок 11) показаны результаты распределения температур образца №7.

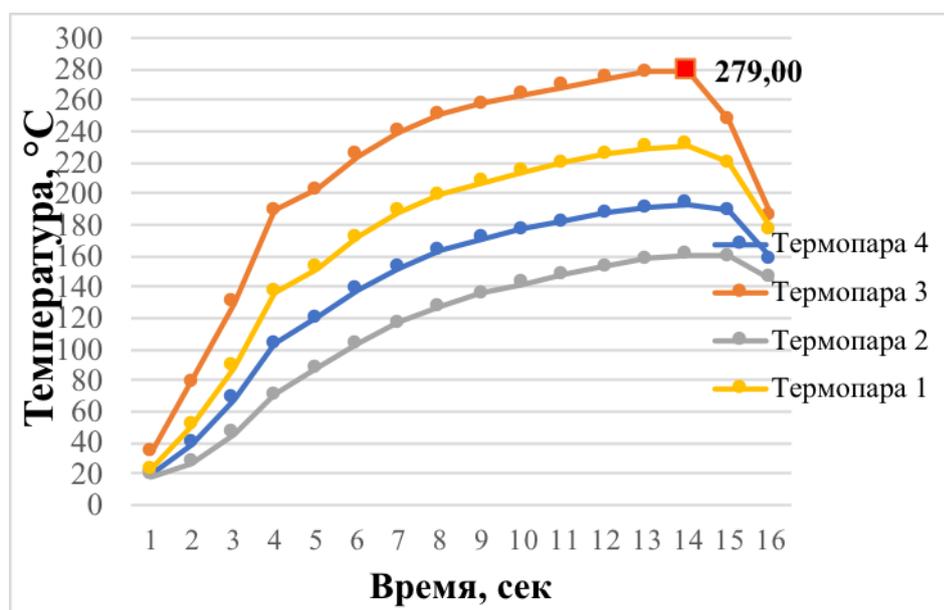


Рисунок 11 – График температуры сварки седьмого образца

Таблица 23 – Сварочный режим образца №7

Вращение инструмента	Усилие сварки кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Глубина сварки, мм	Время выдержки, сек	Длина наконечника, мм	Вид заплечиков
5000	4	95	3,8	10	4	Конический

Ниже (Рисунок 12) показаны результаты распределения температур образца №8.

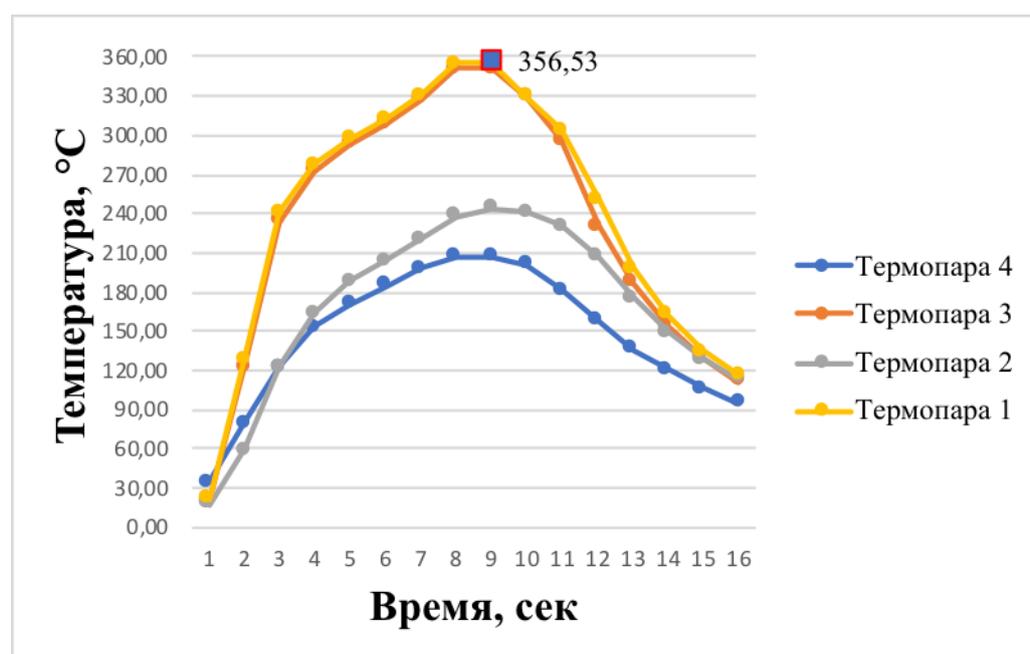


Рисунок 12 – График температуры сварки восьмого образца

Таблица 24 – Сварочный режим образца №9

Вращение инструмента	Усилие сварки кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Глубина сварки, мм	Время выдержки, сек	Длина наконечника, мм	Вид заплечиков
8000	4	150	3,8	10	4	Конический

Ниже (Рисунок 13) показаны результаты распределения температур образца №9.

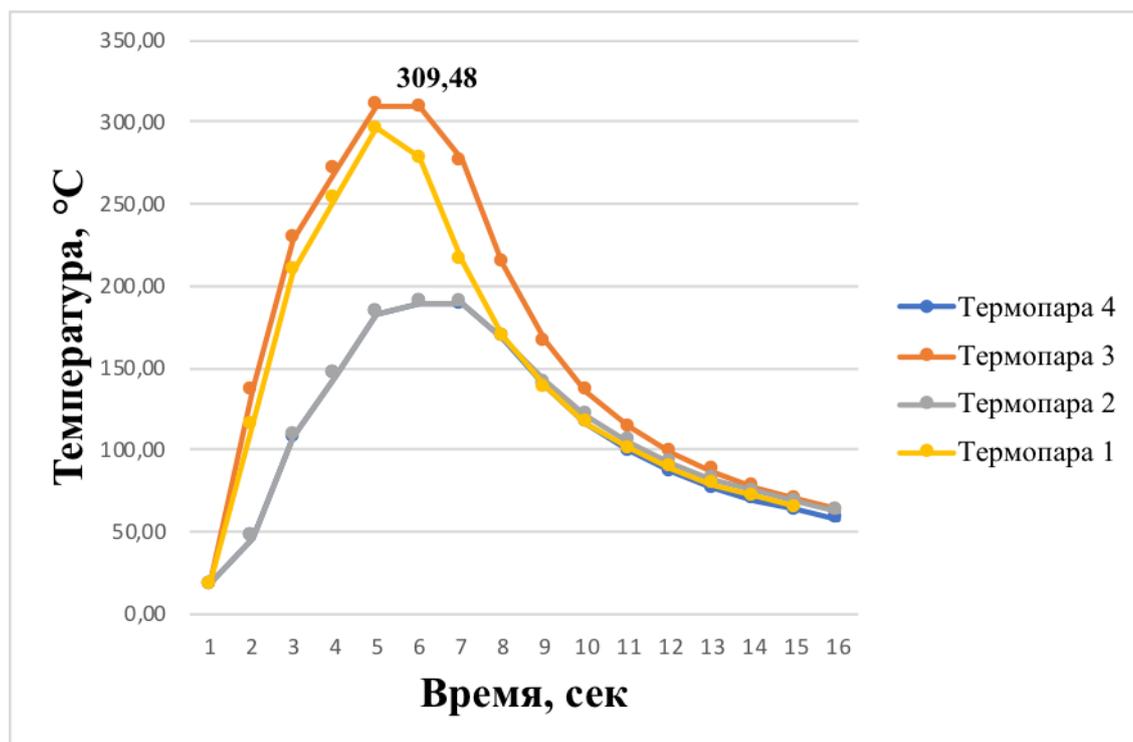


Рисунок 13 – Распределение температур в процессе сварки образца №9

Рассмотрев результаты распределения температур во время ТСТП алюминиевого сплава В95АТ1, можно заметить следующие, что, если увеличить скорость вращения инструмента и увеличении скорости погружения наконечника в тело заготовки, замечается, что значительно увеличивается максимальная температура, однако максимальное значение температур отличается от результатов сплава АМг5М, так как максимальное значение достигается на скорости вращения инструмента в 5000 об/мин. Максимальные показатели демонстрировали те термопары, которые находились на расстоянии 10 мм от центра сварной точки. Результаты

сравнения температур для каждой из трех скоростей вращения, приведены ниже (Таблица 25).

Таблица 25 – Сравнение температур для трех скоростей вращения инструмента

Образец	Скорость вращения инструмента (об/мин)	Максимальная температура, (градусы Цельсия)
7	2000	279,0
8	5000	356,53
9	8000	309,48

Анализ макроструктуры

Для проведения исследований макроструктуры сварных точек алюминиевых сплавов АМг5М, АД35Т1 и В95АТ1 использовался оптический микроскоп Leica-DMI5000 (Рисунок 14) с системой работы с изображениями Thixomet.

Исследования макроструктуры предварительно проводилось на 6 шлифах. Для травления использовался раствор Келлера с временем выдержки шлифов в растворе порядка 10 секунд. Шлифы для проведения исследования макроструктуры предварительно подготавливались на комплексе шлифподготовки (Рисунок 15). После резки образцов они были запрессованы в эпоксидную смолу, далее осуществлялась шлифовка (шлифовальная бумага 400, 600, 800, 1000 и 1200) и полировка образцов до зеркального блеска. Для полировки использовались алмазные суспензии с размерами частиц 9, 3 и 1 мкм и диск, изготовленный из шелковой ткани.

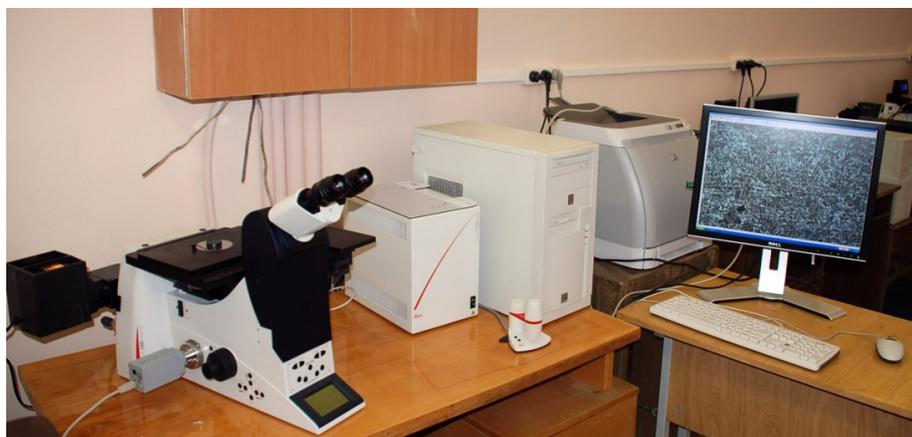
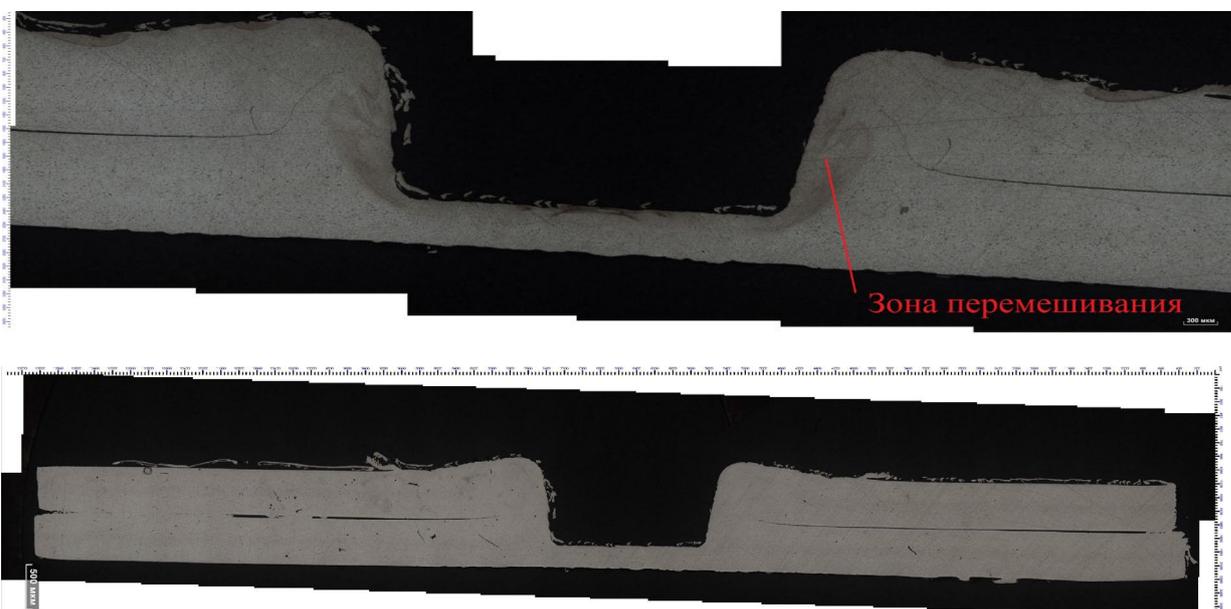


Рисунок 14 – Оптический микроскоп Leica-DMI 5000

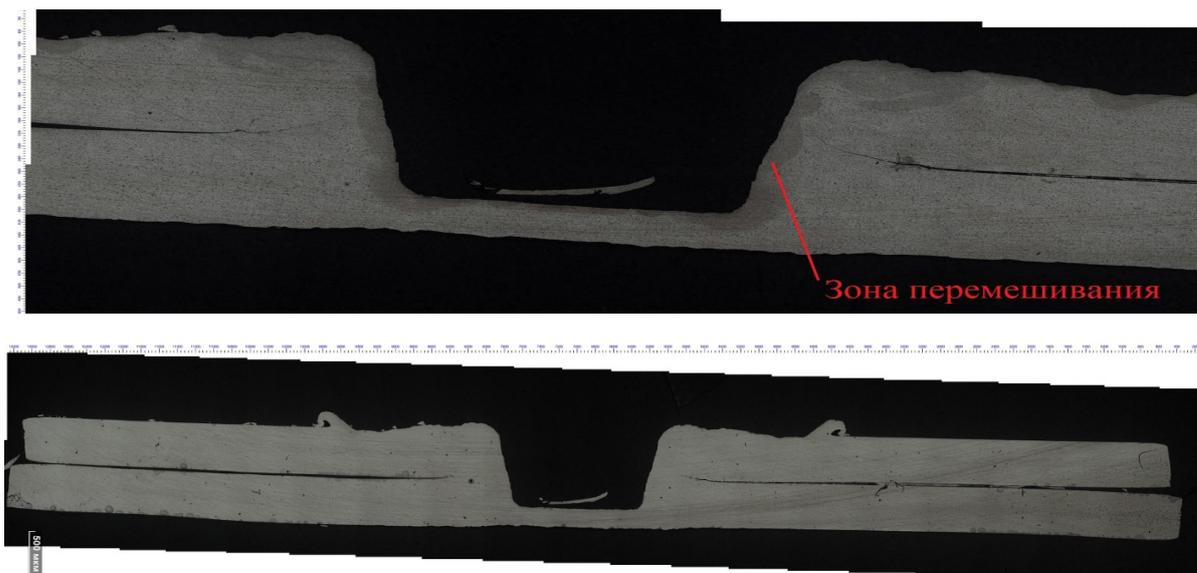


Рисунок 15 – Устройства, использованные для шлифподготовки образцов

Ниже (рисунок 16) показаны панорамные снимки макроструктуры образцов алюминиевого сплава АМг5М.



(1)



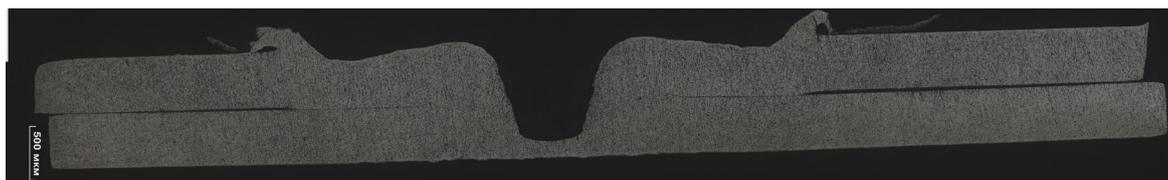
(2)

Рисунок 16 – Изображения макроструктуры двух образцов выполненных из алюминиевого сплава АМг5М

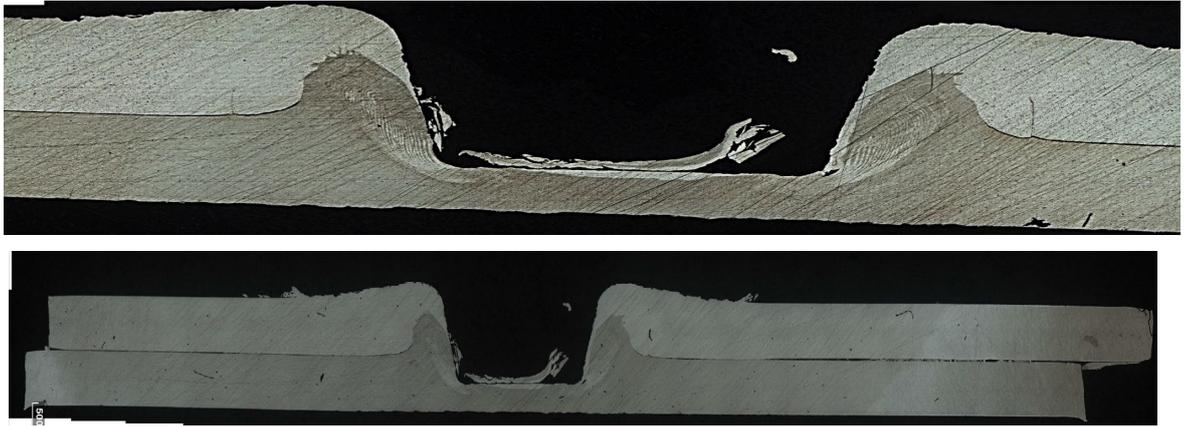
Проводя визуальную оценку макроструктуры, можно заметить, что основные дефекты (непровары и трещины) отсутствуют. Сварное соединение симметрично с хорошо выраженным отверстием, повторяющим контуры наконечника.

Заметно, что на изображении (2) зона перемешивания менее выражена, нежели на образце (1). Так же на верхней части шлифа отчетливо видны задиры, повторяющие форму заплечиков инструмента.

Ниже (рисунок 17) показаны панорамные снимки макроструктуры образцов алюминиевого сплава АД35Т1.



(1)



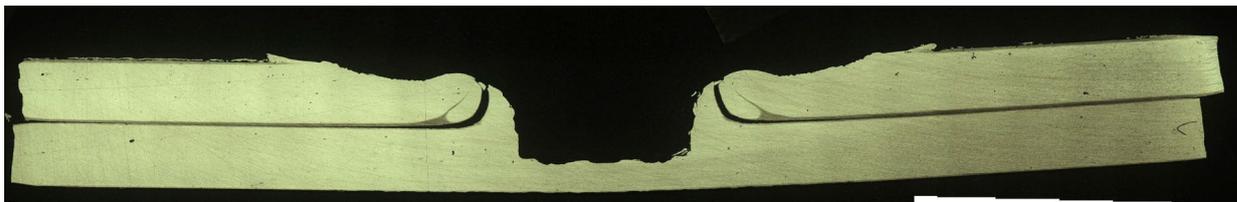
(2)

Рисунок 17 – Изображения макроструктуры двух образцов выполненных из
алюминиевого сплава АД35Т1

Проводя визуальную оценку макроструктуры, можно заметить, что основные дефекты (непровары и трещины) отсутствуют. Сварное соединение симметрично с хорошо выраженным отверстием, повторяющим контуры наконечника.

Заметно, что на изображении (1) зона перемешивания менее выражена, нежели на образце (2). Так же на верхней части шлифа отчетливо видны задиры, повторяющие форму заплечиков инструмента.

Ниже (рисунок 17) показаны панорамные снимки макроструктуры образцов алюминиевого сплава В95АТ1.



(1)



(2)

Рисунок 17 – Изображения макроструктуры двух образцов выполненных из алюминиевого сплава В95АТ1

Проводя визуальную оценку макроструктуры, можно заметить, что отчетливо видны дефекты в виде непровара и трещин в зоне перемешивания. Зона перемешивания слабо выражена и едва заметна. Сварная точка симметрична с хорошо выраженным отверстием, повторяющим контуры наконечника. На верхней части шлифа отчетливо видны задиры, повторяющие форму заплечиков инструмента.

Валидация модели распределения температур в процессе ТСТП

Для валидации модели распределения температур использовали программный комплекс ANSYS Fluent 2020R2. В данном пункте проверялись только те термопары, которые показали максимальные температур. На рисунках 19-21 представлены графики зависимости температуры модели от времени для каждого из режимов, показавших максимальное значения температур. Данные указаны для датчиков на расстоянии 10 мм от центра сварного соединения.

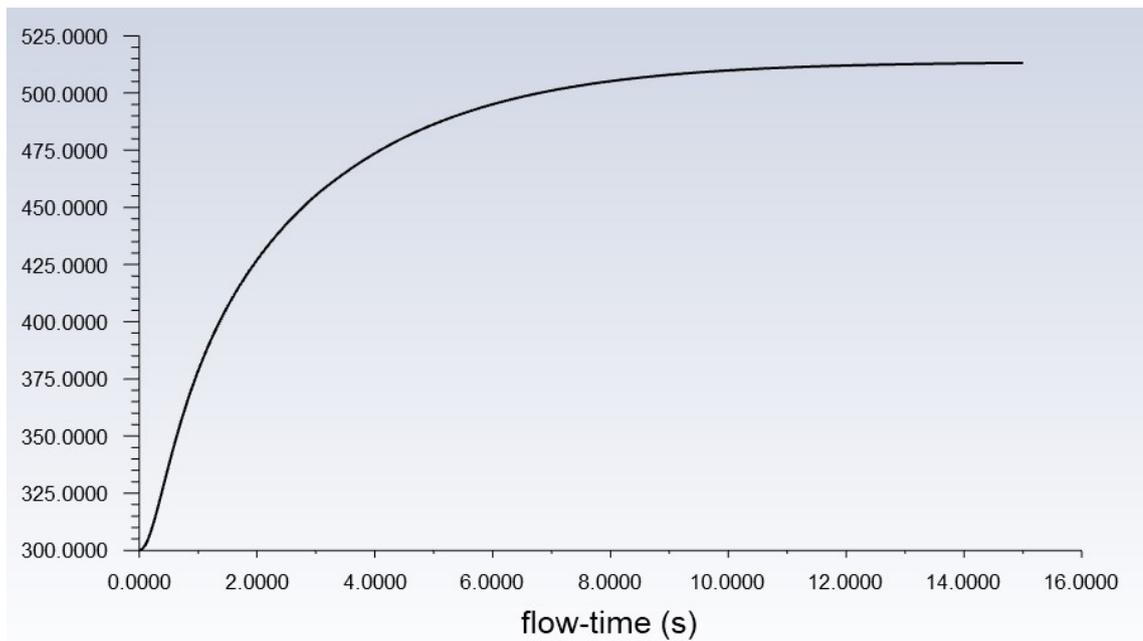


Рисунок 19 – Зависимость температур от времени на расстоянии 10 мм от центра для алюминиевого сплава АМг5м (размерность в Кельвинах)

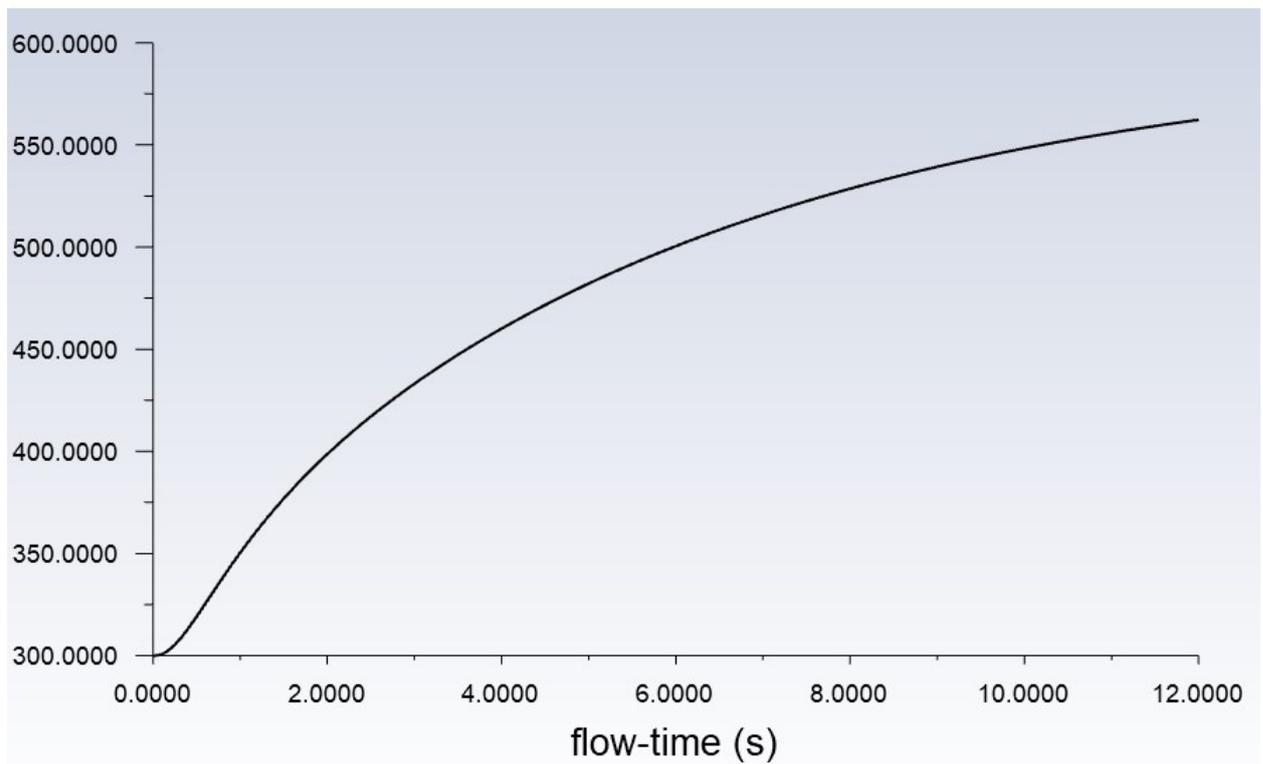


Рисунок 20 – Зависимость температур от времени на расстоянии 10 мм от центра для алюминиевого сплава АД35Т1(размерность в Кельвинах)

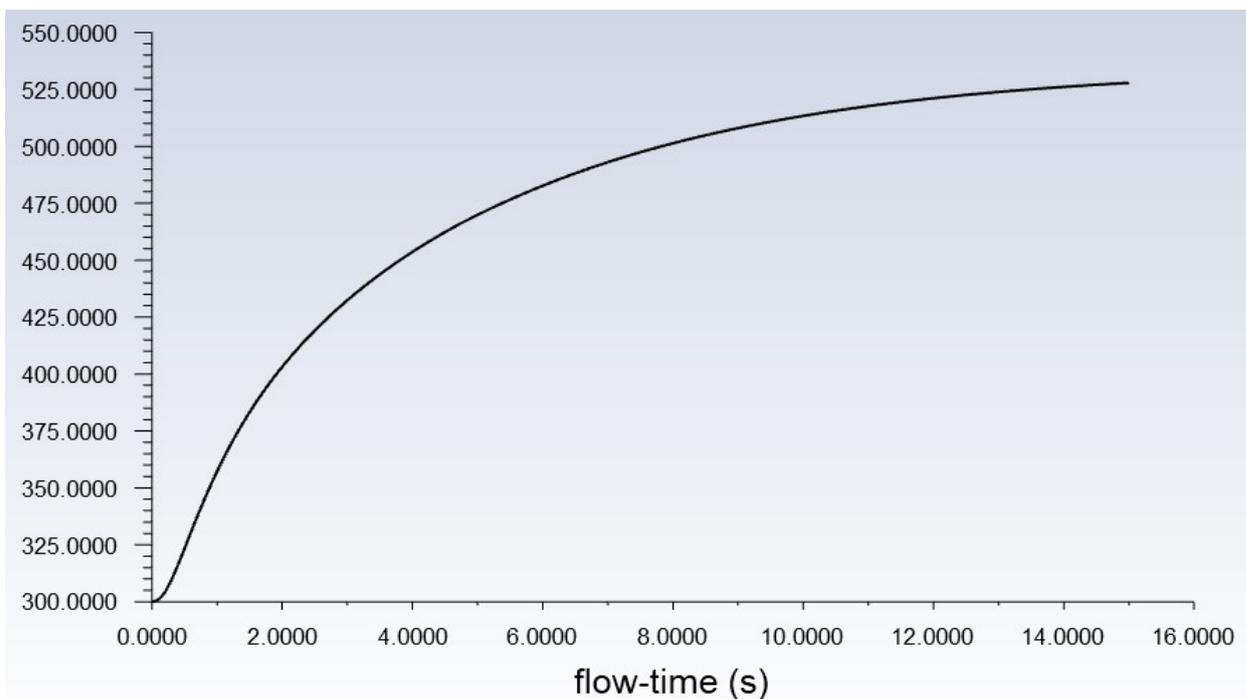


Рисунок 21 – Зависимость температур от времени на расстоянии 10 мм от центра для алюминиевого сплава В95АТ1(размерность в Кельвинах)

Сравнивая рисунки 5-13 и 19-21, можно сделать вывод, что модель выходит на установленный режим с запозданием, по сравнению с экспериментом. Возможно, из-за того, что модель не полностью описывает все аспекты процесса ТСТП, а только начальную стадию процесса активного перемешивания, а конкретнее процесс погружения наконечника в тело свариваемых заготовок, где присутствуют большие пластические деформации.

Заключение

Исходя из результатов проделанной работы можно сказать следующее:

1. Прослеживается зависимость снижения прочностных характеристик сварного соединения, выполненного методом ТСТП, при повышении скорости вращения инструмента. Увеличивается скорость роста зерен при повышении скорости вращения инструмента, в результате чего и происходит разупрочнение.
2. Анализ макроструктуры показал, что у каждого из трех исследуемых алюминиевых сплавов существует различие в форме и характере зоны перемешивания материала. На рисунках 16-18 видно, что, чем менее выражена зона перемешивания, тем больше шанс возникновения дефектов сварного соединения, таких как непровар и трещины, которые ярко выражены на рисунке 18.

3. Анализ температур сварочного процесса для алюминиевых сплавов АМг5М и АД35Т1 показал идентичный характер достижения максимальной температуры процесса (Таблица 17, 21). Однако, стоит заметить, что данный характер температур не прослеживается у сплава В95АТ1 (Таблица 25).

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых Scopus

Temperature Distribution During Friction Stir Spot Welding of Thin AA 6082-T6 and AA5082-O Sheets, Mikhail Ozhegov, Fedor Isupov, Roman Smelianskii, Minerals, Metals and Materials Series №XI, с. 209-217, 2021.

Патенты

2021616082, Точечная сварка трением с перемешиванием листов толщиной 2 мм из алюминиевого сплава В95АТ1 внахлест, программа для ЭВМ, Ожегов М.А., Наумов А.А., Рыльков Е.Н., начало действия 03.06.2021.

2021618827, Точечная сварка трением с перемешиванием листов толщиной 1 мм из алюминиевого сплава АМг5М внахлест, программа для ЭВМ, Ожегов М.А., Наумов А.А., Рыльков Е.Н., начало действия 01.06.2021.

2021618846, Точечная сварка трением с перемешиванием листов толщиной 1 мм из алюминиевого сплава АД35АТ1 внахлест, программа для ЭВМ, Ожегов М.А., Наумов А.А., Рыльков Е.Н., начало действия 01.06.2021.

Публикации в других изданиях

Распределение температур в процессе точечной сварки трением с перемешиванием алюминиевого сплава АМг5М, Ожегов М.А., Смелянский Р.И., Современные проблемы материаловедения, с. 26-30, 2021.

Аспирант _____ ФИО

(подпись)