

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

Алали Алхалаф Ахмад

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С
ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95 С ЦЕЛЬЮ
ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЯ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ПРОЦЕССА**

Направление подготовки 22.06.01 – Технология 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: Алали Алхалаф Ахмад.
Научный руководитель: Наумов Антон
Алексеевич, Кандидат технических наук,
Доцент.

Санкт-Петербург – 2021

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

Директор ВШ: Семенча Александр Вячеславович,
*Кандидат химических наук,
Доцент.*

Научный руководитель: Наумов Антон Алексеевич,
*Кандидат технических наук,
Доцент.*

Рецензенты: Шаболдо Олег Павлович,
*Кандидат технических наук,
Доцент, Центральный научно-исследовательский институт материалов,
Первый заместитель
генерального директора,
заместитель по научной работе.*

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

Соединение термоупрочняемых алюминиевых сплавов традиционными методами плавления является сложной задачей, так как в процессе сварки растворяются или деградируют упрочняющие фазы, что приводит к потере прочностных свойств металла шва по сравнению с основным материалом. К термоупрочняемым высокопрочным алюминиевым сплавам относятся: алюминивно-медные сплавы Al—Cu (Al—Cu—Mg) (серия 2xxx), алюминивно-кремниевые сплавы Al—Si (серия 4xxx), алюминивно-магниевые Al-Mg сплавы (серия 5xxx), сплавы алюминий-магний-кремний Al—Mg—Si (серия 6xxx) и сплавы алюминий-цинк-магний Al—Zn—Mg (Al—Zn—Mg—Cu) (серия 7xxx). Алюминиевые сплавы седьмой серии являются как свариваемыми, так и несвариваемыми плавлением в зависимости от химического состава сплава. Сплавы с низким содержанием Zn, Mg и Cu легко свариваются и обладают особой способностью восстанавливать прочность, потерянную в ЗТВ, в течение нескольких недель после сварки сплава (естественное старение). Сплавы с высоким содержанием Zn, Mg и Cu подвержены образованию горячих трещин после сварки. Вся седьмая серия алюминия имеет чувствительность к межкристаллитной коррозии из-за большого количества легирующих элементов.

Все эти проблемы, связанные со сваркой этих различных сплавов алюминия, привели к развитию процессов сварки в твердом состоянии, таких как сварка трением с перемешиванием (СТП). Этот процесс имеет много преимуществ: с помощью технологии СТП можно сваривать алюминиевые сплавы, которые трудно сваривать с помощью процессов сварки плавлением. Преимущества процессов сварки трением с перемешиванием заключаются в низком короблении сваренных заготовок даже при длинных сварных швах, отсутствии плавления, отсутствии пористости, отсутствии вредных испарений,

очень высоких механических свойствах, что доказано испытаниями на усталость, растяжение и изгиб.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является повышение качества соединения алюминиевого сплава В95АТ1 (аналог АА7075 Т6) и производительности процесса за счет модификации традиционного метода СТП - применения импульсной сварки трением с перемешиванием (ИСТП) и высокоскоростной сварки трением с перемешиванием (ВСТП), и определение влияния этих процессов на микроструктуру и механические свойства алюминиевого сплава В95АТ1.

Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи:

1. Анализ микроструктуры и механических свойств основного материала;
2. Проведение экспериментов по стандартной СТП и подбор технологических параметров сварки для получения качественного соединения;
3. Проведение экспериментов по ИСТП и подбор технологических параметров сварки для получения качественного соединения;
4. Проведение экспериментов по ВСТП и подбор технологических параметров сварки для получения качественного соединения;
5. Анализ влияния параметров ИСТП и ВСТП на микроструктуру и механические свойства сварных соединений, сравнение со стандартной СТП.

Научная новизна

Новизна данной работы заключается в определении влияния импульсов (при ИСП) на выделение упрочняющих фаз в различных зонах сварного соединения. В ходе работы также в шве были обнаружены зерна с дислокациями и без дислокаций, то есть разнородная изначальная структура в исходном металле, сохраняется также в шве несмотря на то, что реализуются большие пластические деформации, которые приводят к рекристаллизации.

Теоретическая и практическая значимость

Состоит в разработке модифицированных методов СП и определении их влияния на механические свойства сварных соединений из термоупрочняемого алюминиевого сплава В95АТ1, поскольку механические характеристики этого сплава зависят от того, каким образом ведут себя упрочняющие фазы в процессе сварки. Понимание влияния импульсов, геометрии инструмента и скорости сварки на выделение упрочняющих фаз необходимо для того, чтобы подобрать параметры модифицированных процессов СП - ИСП и ВСП. Результаты экспериментальных исследований, представление основных положений в ряде докладов на научных конференциях и изданиях обеспечивают обоснованность практических рекомендаций, выводов и научных положений, полученных в данном исследовании.

Апробация работы

Результаты данного исследования, представлялись и обсуждались на следующих научных конференциях:

- The Minerals, Metals and Material Series (USA, Pittsburgh, March 2021).
- II Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Современные проблемы материаловедения», ЛГТУ 2021(Липецк, февраля 2021).

- International Scientific Conference Modern materials and advanced manufacturing technology (ММАМТ-2021), (21 - 23 September, 2021), Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University.

Публикации

Опубликованы 3 статья в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК, из них 2 статья в международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus.

Представление научного доклада: основные положения

1. Результаты анализа микроструктуры и механических свойств основного материала;
2. Оптимальные режимы как для стандартной СТП, так и для модифицированных методов СТП.
3. Сравнение сварных швов, полученных разными методами СТП и исследование влияния параметров сварки на макро- и микроструктуру в различных зонах сварного соединения и на механические свойства алюминиевого сплава В95АТ1.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Объекты, (предмет) и методы исследования

В качестве основного материала в данном исследовании был выбран алюминиевый сплав системы Al-Zn-Mg-Cu AA7075 (аналог В95АТ1) в состоянии Т6 (закаливании и искусственное старение) в листах толщиной 2 мм размером 125×400 мм. Алюминиевый сплав В95 относится к термоупрочняемым алюминиевым сплавам. В табл. 1 представлен химический состав данного сплава. Фактическое содержание химических элементов было получено с помощью сканирующей электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе с использованием приставки рентгеноспектрального анализа. Диаграмма растяжения основного металла представлена на рисунке 1, диаграмма равновесного состояния сплава В95АТ1 заданного химического состава (таблица 1) представлена на рисунке 2, а требования к его механическим свойствам представлены в таблице 2. Исходная структура листов толщиной 2 мм представлена на рисунке 3. Микротвердость листов составляет 120 НВ.

Таблица 1 - Химический состав сплава В95АТ1

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.15	0.11	1.77	0.27	2.05	0.12	6.12	Bal.

Таблица 2 - Механические свойства при растяжении листов толщиной 2 мм из сплава В95АТ1

Сортамент	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , (%)
Фактические	555	254	6
Значение при комнатной температуре для прутков с диаметром от 8 до 100 мм, ГОСТ 21631-76	480	400	7

Диаграмма растяжения основного металла В95

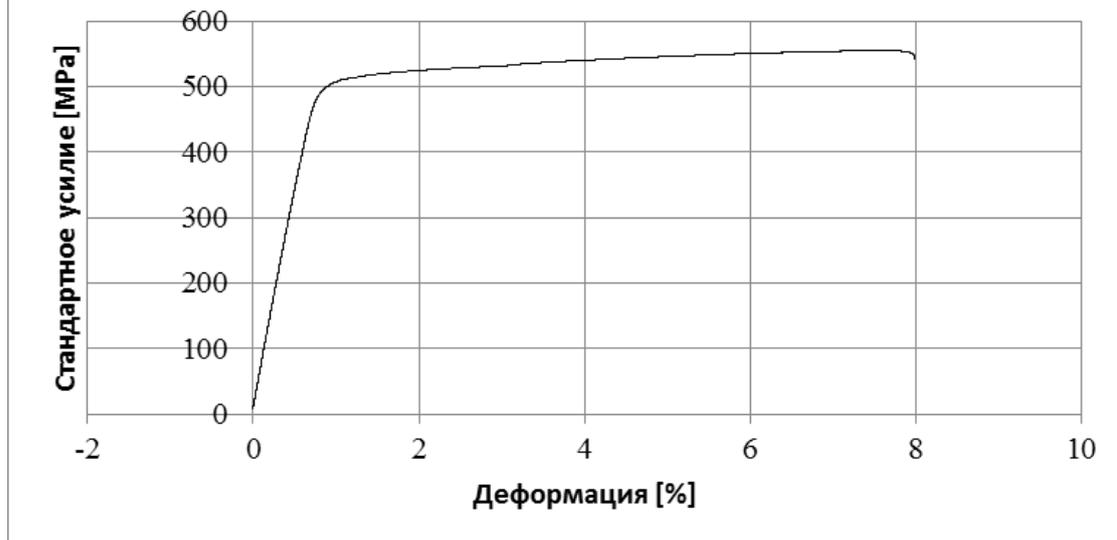
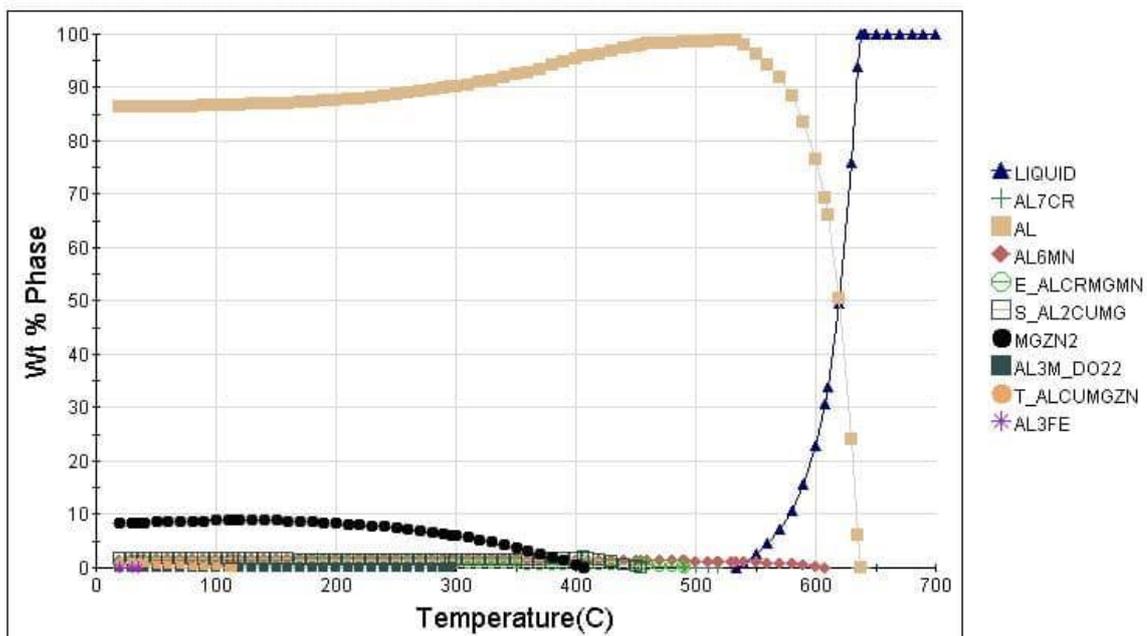


Рисунок 1 – Диаграмма растяжения основного металла В95АТ1

Al-0.12Cr-1.77Cu-0.15Fe-2.05Mg-0.27Mn-0.05Ti-6.12Zn wt(%)



Al-0.12Cr-1.77Cu-0.15Fe-2.05Mg-0.27Mn-0.05Ti-6.12Zn wt(%)

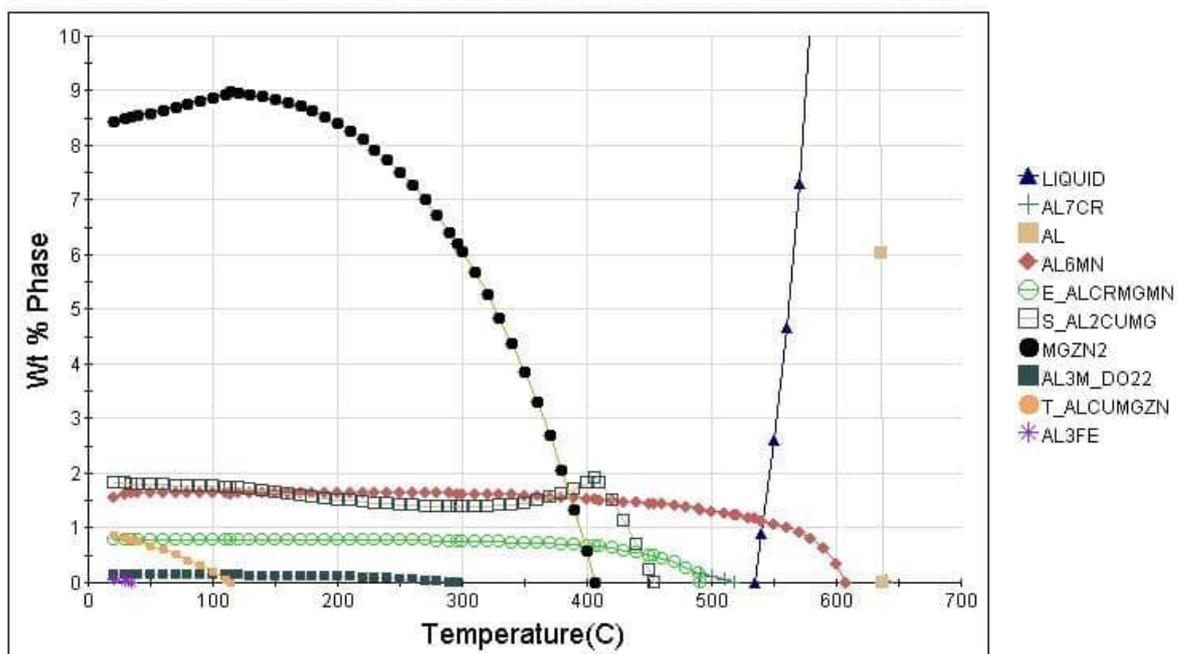


Рисунок 2- Диаграмма равновесного состояния сплава В95АТ1 заданного химического состава

Эксперименты по СТП, ИСТП и ВСТП проводились на пяти-осевом многофункциональном станке «Matec 40P» фирмы «MATEC Maschinenbau». Универсальный комплекс, представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Многофункциональный станок для проведения экспериментов СТП, ИСТП и ВСТП

СТП осуществлялась двумя инструментами:

- Сварочный инструмент, используемый в СТП и ИСТП, состоял из гладкого плоского заплечика диаметром 12 мм и гладкого цилиндрического наконечника диаметром и длиной 5 и 1,5 мм соответственно. Угол наклона составлял 2°.

- Инструмент, используемый для выполнения СТП и ВСТП, состоял из конического инструментального наконечника диаметром 4 мм сверху и 3 мм снизу, а также длиной 1,6 мм. Диаметр гладкого вогнутого заплечика составлял 10 мм.

Образцы для оптической микроскопии и испытаний на твердость были вырезаны перпендикулярно направлению сварки в соответствии с рис. 4 и подготовлены стандартными методами металлографической подготовки (с помощью низкоскоростного алмазного резца под водяным охлаждением и холодным креплением в акриловых смолах, чтобы избежать термического воздействия на микроструктуру). После этого образцы подвергались механическому измельчению из бумаги марки SiC 300-2000, полировке до алмазных суспензий 3 мкм с последующей заключительной стадией полировки с использованием коллоидно-кремнеземной суспензии 0,05 мкм. Отполированные образцы протравливали реагентом Века (1 г NaOH, 4 г KMnO₄, 100 мл H₂O) в течение 10 с. Гранулометрический состав оценивали методом линейных пересечений Российского стандарта (ГОСТ 21073.3-75). Микротвердость по Виккерсу измеряли по средней линии поперечного сечения шва с нагрузкой 0,98 Н (HV 0,1) в течение 10 с через несколько недель. Рентгеновская микротомография была проведена для исследования внутренней структуры сварного шва на устройстве Bruker Skyscan; Анализ данных проводился с использованием программного обеспечения CTvox. Образцы для рентгенографии были вырезаны из листов размером 14 мм в ширину и 16 мм в длину в соответствии с рис. 5а. Испытания на растяжение проводились на универсальном станке Zwick / Roell Z100 со скоростью траверсы 10 мм / мин при комнатной температуре по

российскому стандарту (ГОСТ 6996). По замерам толщины швов уменьшения толщины швов не обнаружено. Механические свойства сварного шва (предел прочности, предел текучести, удлинение) определялись путем тестирования пяти образцов для каждого состояния сварного шва. Анализ химического состава различных фаз в основном материале проводился с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN MIRA 3M, оснащенного детектором для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). Просвечивающий электронный микроскоп ThermoFisher (ПЭМ) использовался для исследования субзеренной структуры основного металла и сварных швов в режиме светового поля, а также для исследования морфологии, распределения и размера выделений в режиме темного поля.

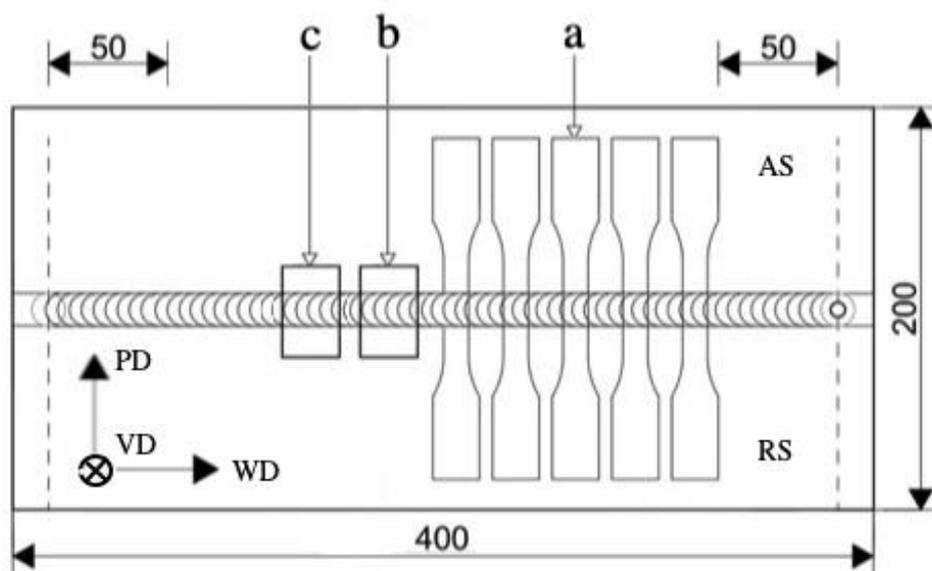


Рисунок 4 – Расположение образцов, отобранных для испытания на растяжение (а); для оптической микроскопии, просвечивающей микроскопии и измерения микротвердости (b) и рентгеновской микротомографии (c); WD - направление сварки, PD - перпендикулярное направление, VD - вертикальное направление; числа в мм.

Все сварные соединения были подвергнуты визуальному осмотру после сварки с целью выявления таких дефектов, как грат, утонение листа и дефекты поверхности. Затем были выполнены рентгеновская микротомография, испытания на растяжение, исследование микроструктуры и измерения микротвердости прочных соединений СТП и ИСТП.

По завершении сварки трением с перемешиванием каждое соединение было проверено с помощью рентгеновской микротомографии для выявления дефектов и оценки пористости внутри сварного шва. Чтобы выявить наличие объемных дефектов в образце, были введены сечения в перпендикулярном и параллельном направлениях через осевые линии сварных швов в соответствии с синим параллелепипедом, показанным на рис.5а. Результаты рентгеновской микротомографии показаны на рис.5b-d.

В результате этого анализа все выбранные условия сварки привели к бездефектным сварным швам в соответствии с ISO 25239-5, с отсутствием дефектов туннелей, пустот, поверхностных дефектов.

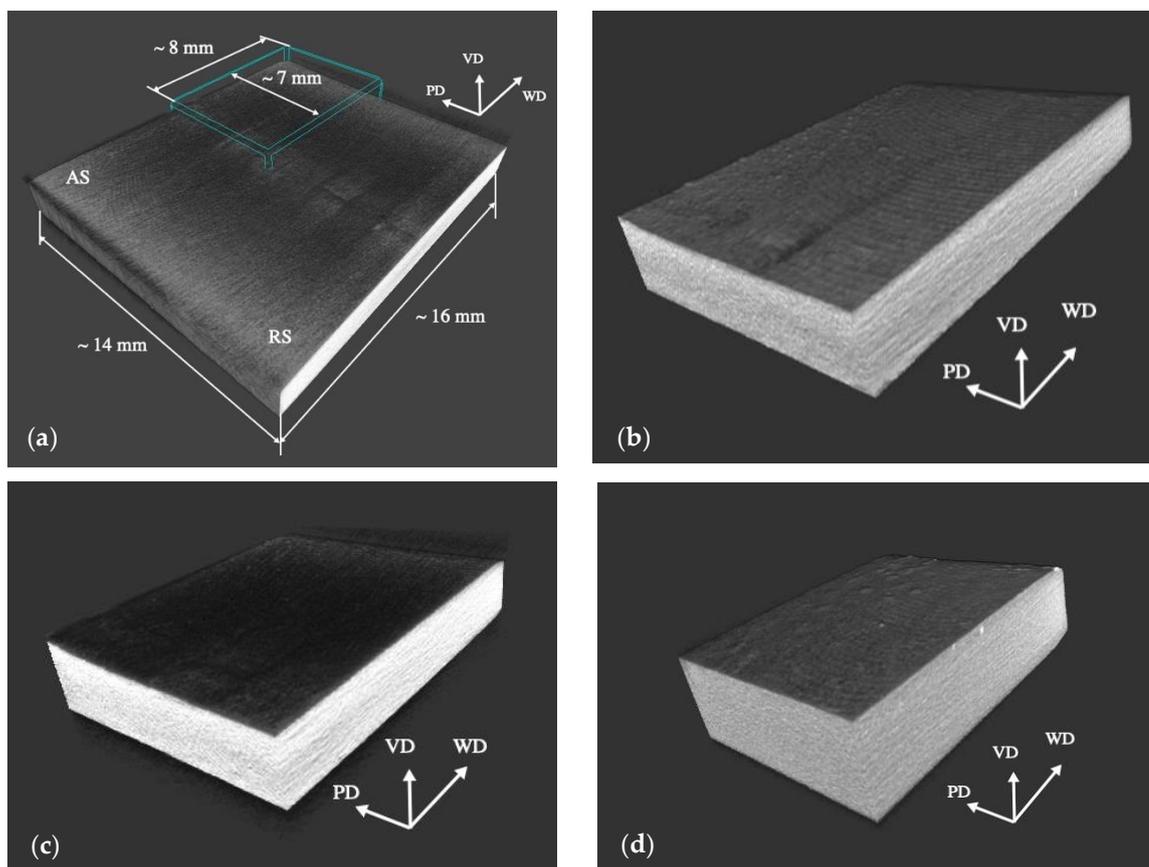
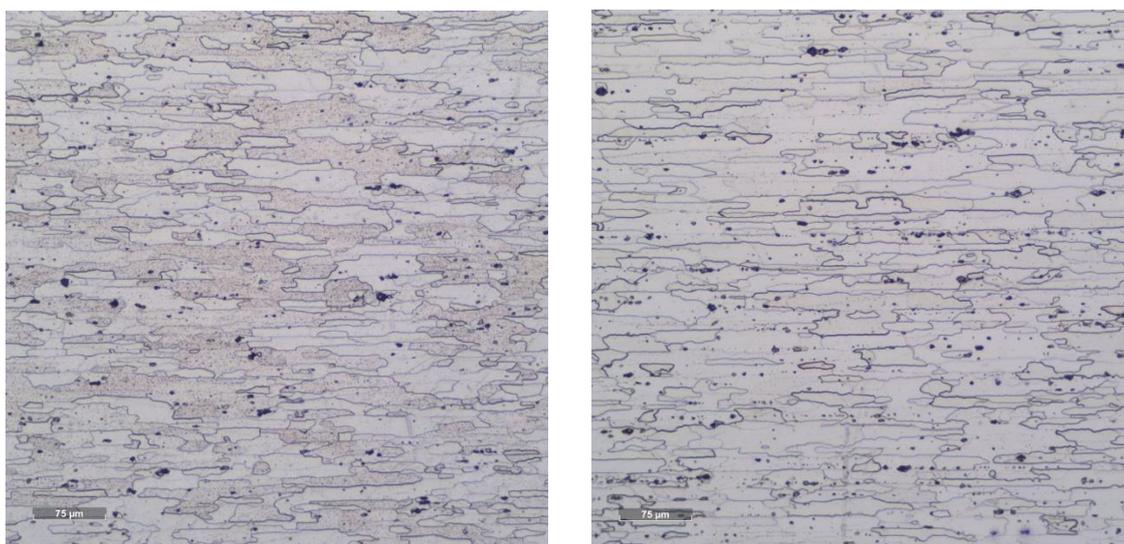


Рисунок 5- Результаты рентгеновской томографии, 1/4 образца: (а) схема подготовки образцов; (b) Сварной шов 1 (500); (c) Сварной шов 2 (700); (d) Сварной шов 3 (800).

На рисунке 6 представлена структура основного материала. Такая микроструктура наблюдалась с помощью оптической микроскопии. Из-за

пластической деформации структура представляет собой вытянуты в направления и поперек направления прокатки зерна. В зернистой структуре листов преобладала удлиненная морфология типа блина в результате прокатки. Средний размер зерен в вертикальном направлении составляет 11,5 мкм (рис. 6а, б.), средняя длина зерен поперек направления прокатки составляет 40,2 мкм (рис. 6а), а вдоль направления прокатки-56,3 мкм (рис. 6б).

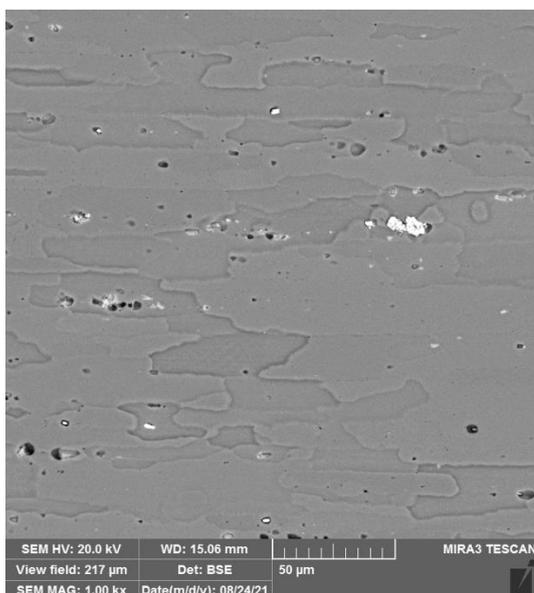


(а)

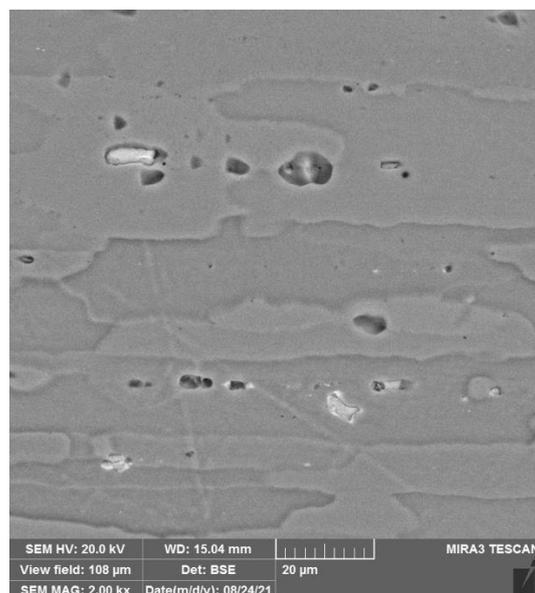
(б)

Рисунок 6 - Исходная структура листов толщиной 2 мм из сплава В95АТ1, образцы для микроструктурного анализа вырезаны поперек направления прокатки (а) и вдоль (б)

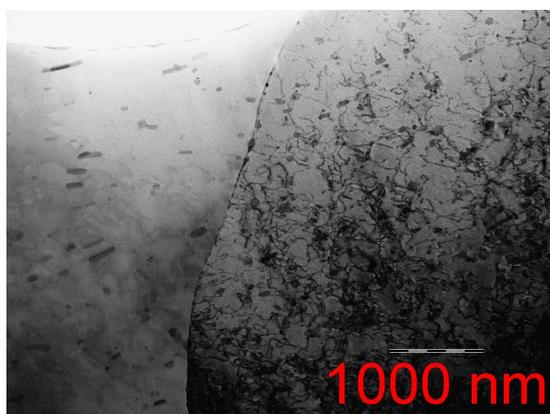
На рисунке 7 представлена микроструктура основного материала. В данном образце присутствуют искомые включения, содержащие Mn и Zn. Между тем, на некоторых зернах также присутствовал различного рода контраст, однако, в этом случае он больше похож на дислокационный. Как видно на изображениях, плотность дислокаций очень неоднородна как в разных зернах, так и внутри одного зерна. В связи с этим оценка плотности напрямую зависит от места исследования. Химический состав упрочняющих фаз представлен в таблице 3.



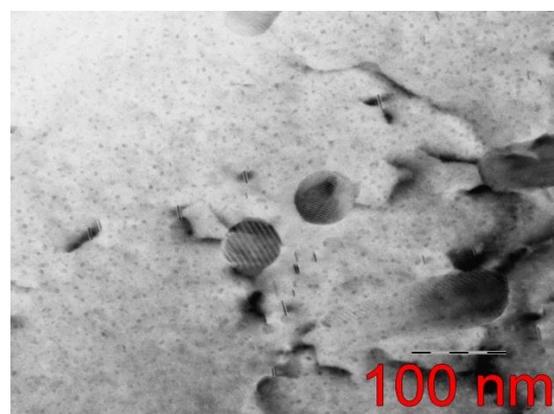
(a)



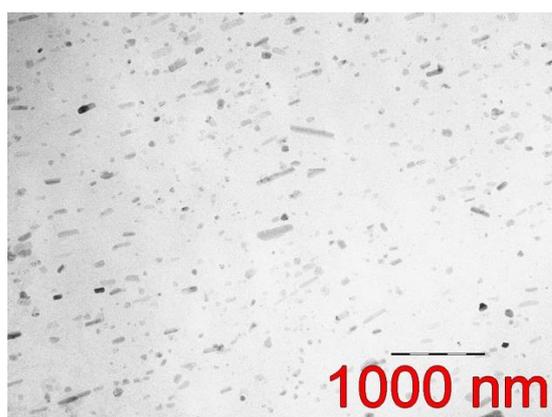
(б)



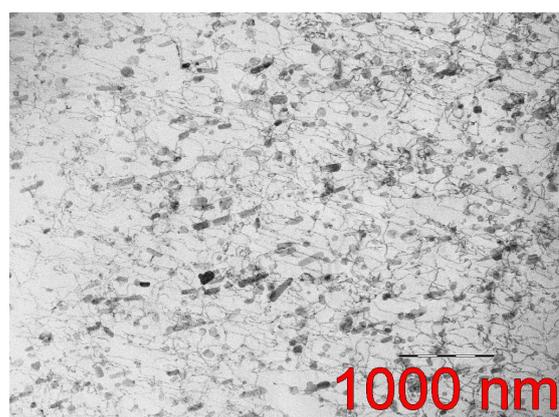
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 7– Микроструктура основного материала: (а, б) СЭМ-изображения V95AT1, показывают различные типы упрочняющие фазы: S-фаза (а) и (FeMn) $3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$ (б); (в, г) светлопольные ПЭМ-изображения V95AT1: большие синие стрелки указывают на некоторые

упрочняющие фазы, а маленькие красные стрелки указывают на выделения η и η' (в правом зерне есть дислокации, а в левом упрочняющие фазы (в)); (д) упрочняющие фазы без дислокаций; (е) равномерная структура (и дислокации и упрочняющие фазы)

Таблица 3. Химический состав упрочняющих фаз.

	Легирующие элементы, (wt%)							
	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Al</i>
Основной металл	2.02	-	-	1.67	0.28	0.20	6.33	88.72
Частица 1 (Рисунок 4а)	1.34	-	-	61.28	-	-	1.34	19.72
Частица 2 (Рисунок 4б)	0.74	0.11	17.81	17.01	3.39	0.46	7.44	52.12
Частица 3 (Рисунок 4б)	0.53	0.13	13.81	7.23	2.17	0.18	3.77	70.11

Результаты и их обсуждение

Листы с размерами 400 мм × 100 мм × 1,7 мм были сварены встык параллельно направлению прокатки с использованием обычного СТП, а также IFSW. Сварка трением с перемешиванием выполнялась на оборудовании Matec 40P с использованием различных параметров процесса, как показано в таблице 4. Стадии погружения и выдержки процесса СТП выполнялись в режиме управления положением, стадия перемещения процесса СТП производилась в режиме управления усилием. Параметры были выбраны после обзора литературы и в соответствии с предыдущими исследованиями.

Таблица 4 – Матрица сварочных испытаний СТП

Weld ID	v , mm/min	N, rpm	F_z , kN	WP, mm/rot	Q_{total} , Watt	l , J/mm
FSW-1	100	500	3.7	0.200	350	210
FSW-2	100	700	4.5	0.143	596	358
FSW-3	100	800	3.7	0.125	560	336

Коэффициент шага сварного шва WP (мм/ оборот) был определен как соотношение между скоростью сварки и скоростью вращения, таблица 4.

В этом исследовании общий подвод теплоты Q_{total} (Вт) был рассчитан с использованием контактного напряжения сдвига, $\tau_{contact}$ (Па), угловой скорости

вращения инструмента, ω (рад /с), радиуса заплечика, R_{shoulder} (мм), радиуса наконечника, R_{probe} (мм) и длину наконечника H_{probe} (мм) по формуле (1):

$$Q_{\text{total}} = 2/3\pi \tau_{\text{contact}} \omega (R_{\text{shoulder}}^3 + 3R_{\text{probe}}^2 H_{\text{probe}}), \quad (1)$$

τ_{contact} и ω были определены с постоянным коэффициентом трения $\mu=0.4$, осевой силой F_z (Н) и скоростью вращения N (оборот/мин) с использованием уравнения (2) и (3) соответственно:

$$\tau_{\text{contact}} = \mu F_z / \pi R_{\text{shoulder}}^2, \quad (2)$$

$$\omega = 2\pi N / 60, \quad (3)$$

Линейная энергия l (Дж/мм) рассчитывалась как соотношение между подводом теплоты и скоростью сварки v (мм/с). Разница в тепловложении и линейной энергии выделена в таблице 4: самые высокие значения общего тепловложения и линейной энергии имеют образец FSW-2, тогда как самые низкие значения общего тепловложения и линейной энергии имеют образец FSW-1.

Для реализации ИСТП был выбран режим FSW-2 с наивысшими значениями суммарного тепловложения и линейной энергии и лучшими механическими характеристиками. Тип импульсной силы был установлен на синусоидальный тип. Частота импульса была выбрана 2 и 6 Гц, амплитуда импульса также была выбрана от 2 до 6 кН. Сварку соединений ИСТП выполняли в гибридном режиме управления: верхнее положение сварочного инструмента при возвратно-поступательном движении задавалось глубиной врезания заплечика 0,1 мм (регулировка положения), а нижнее положение сварочного инструмента регулировалось импульсной силой (управление по силе). ИСТП была выполнена на оборудовании Mates 40P с использованием различных параметров процесса, как показано в Таблице 5.

Таблица 5 – Матрица сварочных испытаний ИСТП

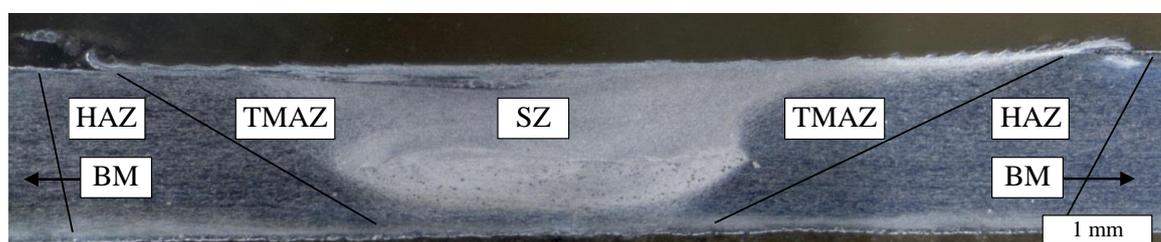
Weld ID	v , mm/min	N, rpm	F_z , kN	ν , Hz	ΔF_z , kN
IFSW-1	100	700	4.5	2	2
IFSW-2	100	700	4.5	6	6
IFSW-3	100	700	4.5	2	6
IFSW-4	100	700	4.5	6	2

Наилучшие параметры, установленные для реализации ВСТП, были выбраны в соответствии с исследованием поверхности сварного шва и представлены в таблице 6.

Таблица 6- Матрица сварочных испытаний СТП, ВСТП

Метод СТП	Скорость вращения [об / мин]	Скорость сварки [мм / мин]	Сила [кН]
СТП	1000	300	3,2
ВСТП	2000	2000	6,5

На панорамных снимках поперечного сечения сварных соединений (Рис. 8) из-за различия подвода теплоты и степени пластической деформации можно хорошо различить следующие области: зону перемешивания (ЗП), зону термомеханического влияния (ЗТМВ), зону термического влияния (ЗТВ) и зону основного материала (ОМ). Все полученные соединения были исследованы с помощью оптической микроскопии на предмет дефектов, чтобы проанализировать влияние различных параметров на качество сварного шва.



(a)



(б)



(б)



(г)



(д)



(е)



(ё)



(ж)

Рис. 8. Макроструктура СТП, ИСТП соединений: (а) ОМ, (б, в, г) FSW-1 FSW-2 FSW-3, (д, е, ё, ж) IFSW-1 IFSW-2 IFSW-3 IFSW-4

На рис. 9 представлены профили микротвердости трех сварных швов, измеренные по средней линии их поперечных сечений. Микротвердость основного материала составляла 120 HV. Как и ожидалось, СТП термоупрочняемых сплавов привела к неоднородному распределению микротвердости, предполагающему образование области с пониженной твердостью. Минимальное значение твердости (~ 70 HV) находилось на расстоянии 6 мм от центра сварного шва как на стороне набегания (AS), так и на стороне отступания (RS). Существенной разницы между профилями микротвердости СТП и ИСП в ЗП не наблюдалось, однако можно было обнаружить уменьшение падения твердости в переходной области в AS с применением импульсов.

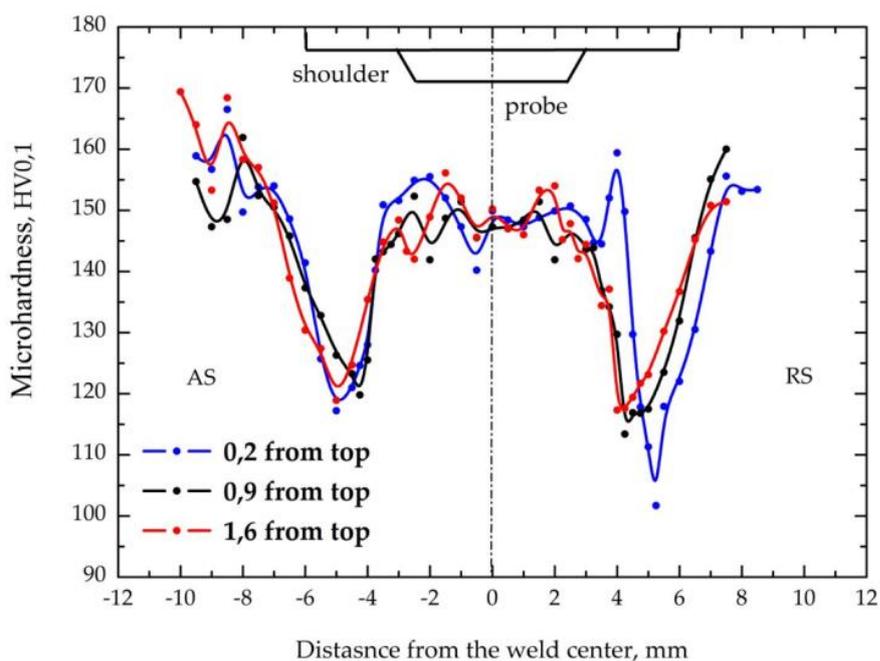


Рис.9 - Распределение микротвердости, полученное на поперечном сечении соединения FSW-2.

Общие механические свойства, такие как предел прочности при растяжении (UTS), предел текучести (YS) и относительное удлинение (E), а также расположение трещин, приведены в таблицах 7 и 8. Очевидно, что UTS и YS были

почти одинаковыми для соединений СТП и ИСТП; однако можно обнаружить положительное влияние импульсов более низкой частоты на удлинение.

Стоит отметить, что все образцы СТП сломались в области ЗТВ на АS, в то время как расположение перелома соединения ИСТП менялось в зависимости от параметров импульса. В таблицах 7 и 8 также представлено количество образцов в процентах, которые распались в ЗП или в ЗТВ на АS в зависимости от параметров. Наиболее интересным аспектом является то, что значение удлинения в ЗП преобладало над соответствующими значениями в ЗТВ.

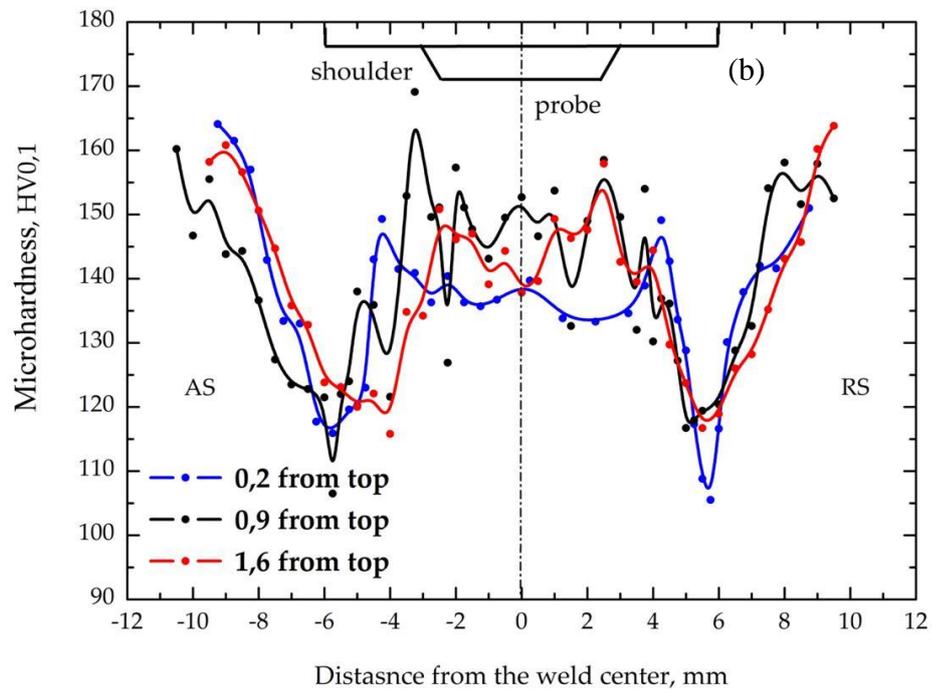
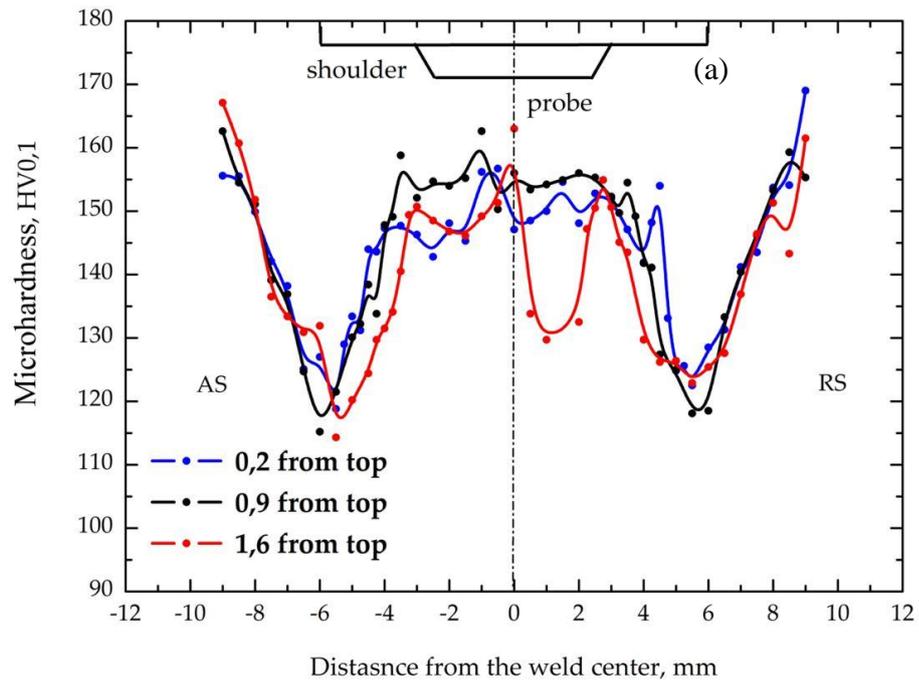
Таблица 7 – Механические свойства исследуемых соединений СТП, испытание на растяжение.

Specimen	UTS (MPa)	YS (MPa)	E (%)	Fracture location
FSW-1	434.0 ± 26.5	353.4 ± 11.3	2.7 ± 1.3	SZ (100%)
FSW-2	478.4 ± 49.2	356.6 ± 12.7	3.9 ± 3.2	SZ (100%)
FSW-3	380.9 ± 102.2	353.9 ± 14.2	1.3 ± 1.9	SZ (100%)

Таблица 8 – Механические свойства исследуемых соединений ИСТП, испытание на растяжение.

Specimen	UTS (MPa)	YS (MPa)	E (%)	Fracture location
IFSW-1	330.8 ± 22.5	324.6 ± 12.9	1.2 ± 0.5	SZ (100%)
IFSW-2	434.1 ± 14.1	310.6 ± 3.4	4.6 ± 0.9	SZ (100%)
IFSW-3	413.3 ± 49.1	328.9 ± 3.8	2.7 ± 1.7	SZ (100%)
IFSW-4	424.2 ± 33.7	309.1 ± 5.5	3.8 ± 2.1	SZ (100%)

На рис. 10 представлены профили микротвердости сварных швов ИСТП, измеренные по средней линии их поперечных сечений.



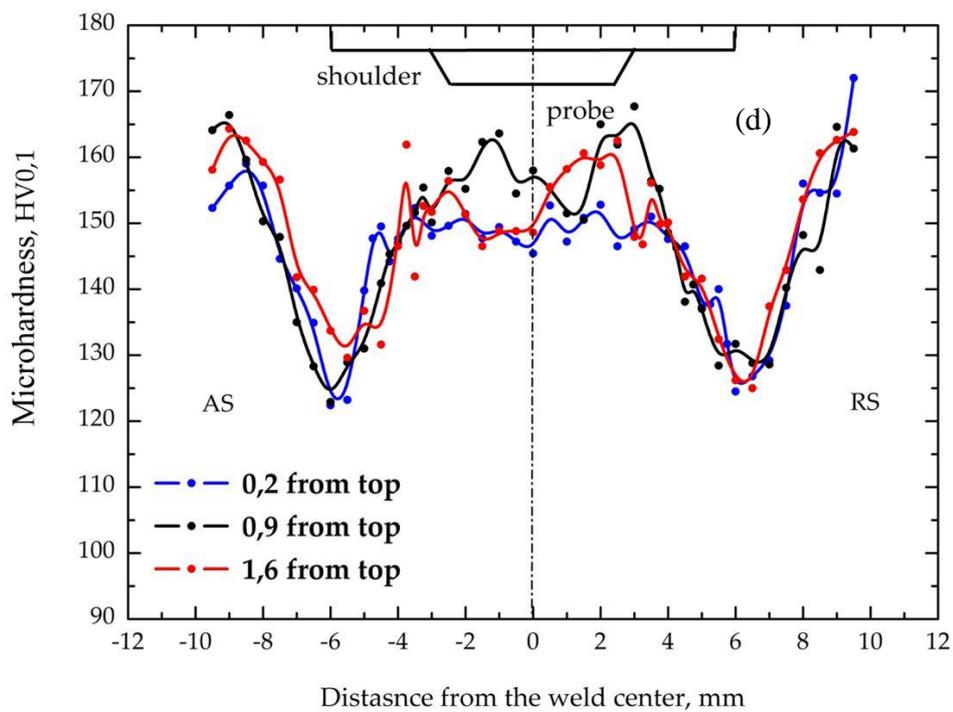
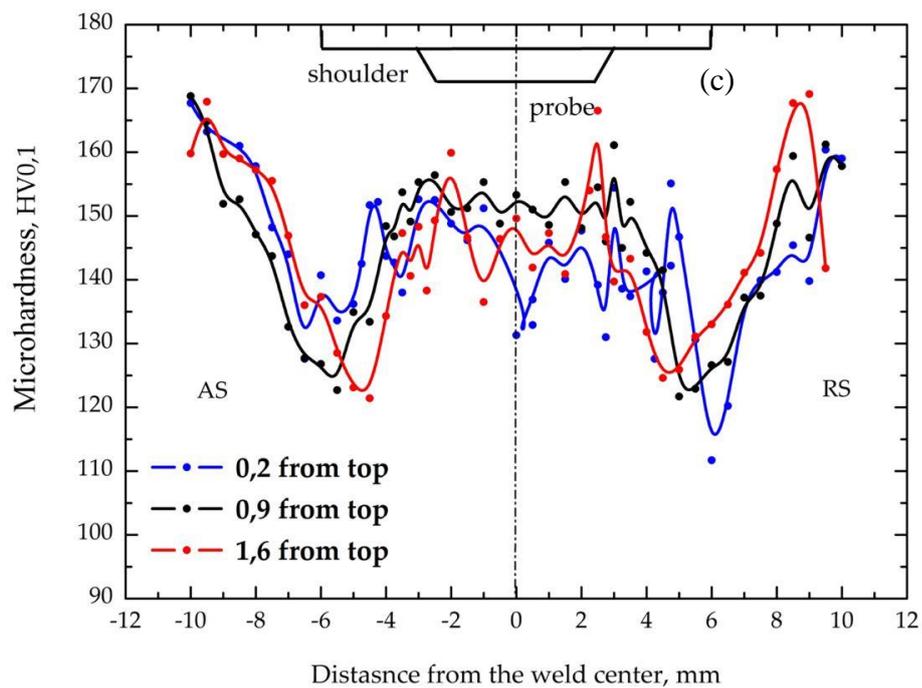


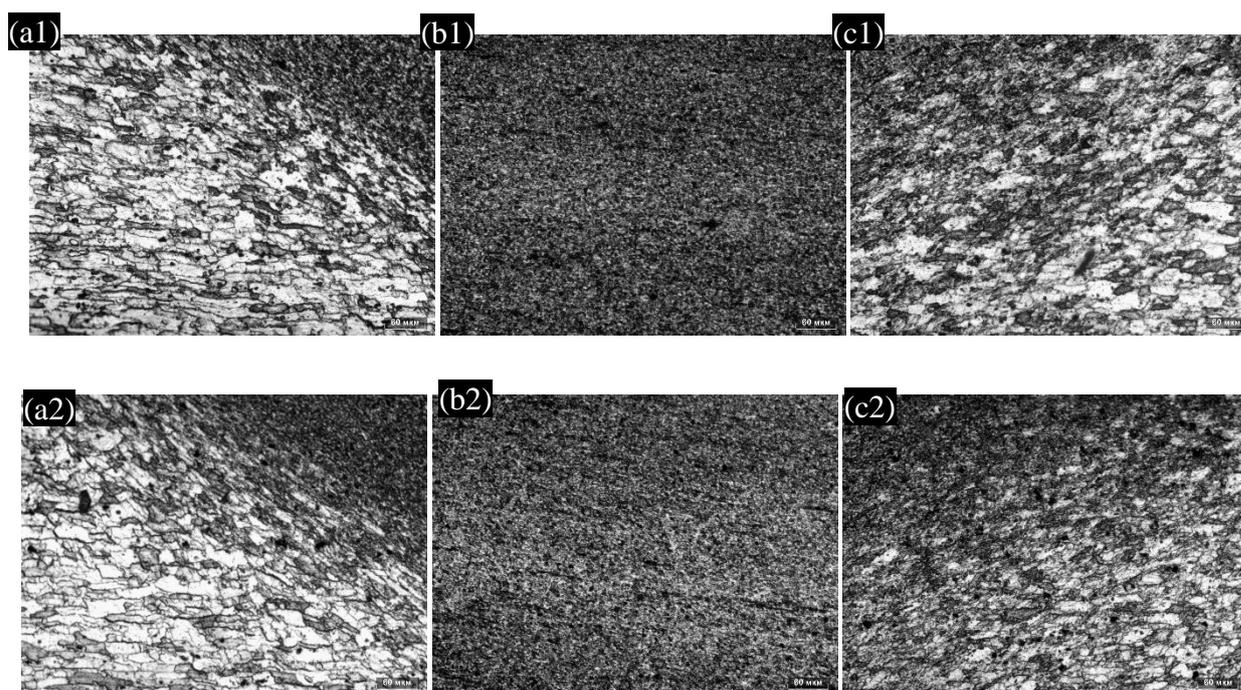
Рис.10 Распределение микротвердости, полученное по поперечному сечению соединений ИСТП: (a) IFSW-1; (b) IFSW-2; (c) IFSW-3; (d) IFSW-4.

На рис. 11,12 представлена эволюция микроструктуры для сварных швов СТП и ИСТП, как заметно никаких дефектов в упомянутых сварных швах обнаружено не было.



Рис. 11. Эволюция микроструктуры при FSW-2.

(a) Зона термомеханического влияния (ЗТМВ) - сторона набегания (AS); (b) Зона перемешивания; (c) ЗТМВ - сторона отступания (RS);



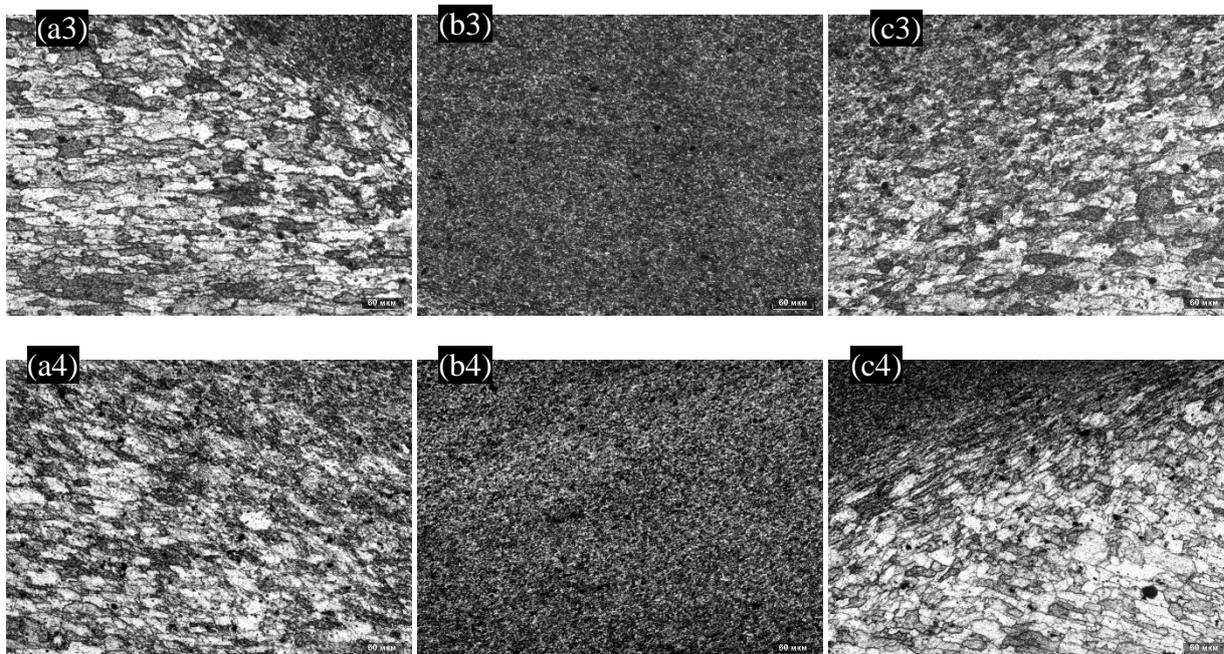


Рис. 12. Эволюция микроструктуры при ИСТП.

(a1) (a2) (a3) (a4) - Зона термомеханического влияния (ЗТМВ) - сторона набегания (AS) IFSW-1,2,3,4; (b1) (b2) (b3) (b4) Зона перемешивания; (c1) (c2) (c3) (c4) ЗТМВ - сторона отступления (RS) - IFSW-1,2,3,4.

Прочность на растяжение изготовленных соединений ВСТП представлена на рисунке 13. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предел прочности сварных швов при растяжении ниже, чем у основного материала, который имеет минимальное значение 480 МПа. Сварные швы, произведенные высокоскоростной СТП, обладали самым низким значением.

На рис.14-15 показаны места разрушения сварных соединений. Разрушение соединений, полученных стандартной СТП, произошло в ЗТВ, где было указано наименьшее значение твердости, как показано на рис. 14. В отличие от хрупкого излома в ЗТМВ или внутри ЗП имели место в случае соединений ВСТП (рис. 15). Это было причиной самой низкой прочности на растяжение. Хрупкое разрушение можно объяснить наличием туннельного дефекта в корневой зоне, который является сильным концентратором напряжений.

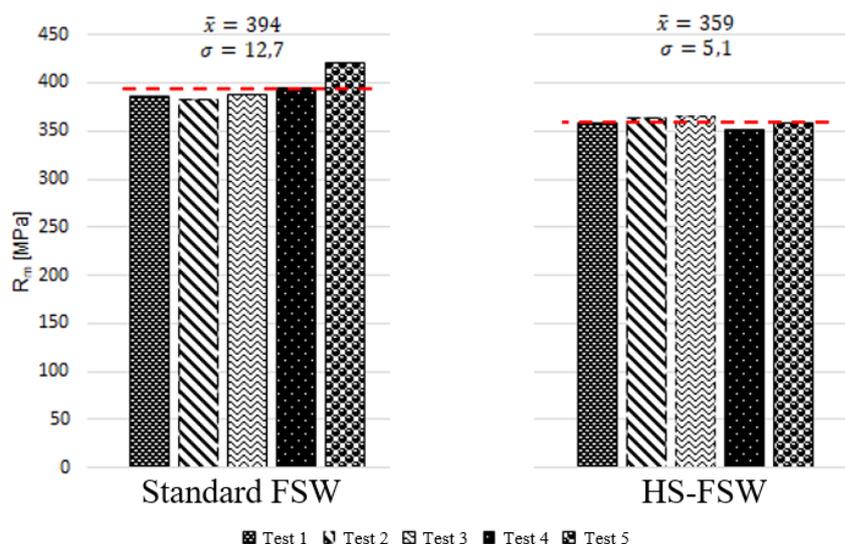


Рис. 13. Предел прочности полученных сварных швов



Рис. 14. Разрушение перпендикулярно направлению растяжения
Образцов стандартной СТП



Рис. 15. Хрупкое разрушение, перпендикулярное направлению растяжения верхней стороны
высокоскоростной СТП

На рис. 16 приведены результаты измерения микротвердости сварных швов, полученных стандартной СТП и ВСТП.

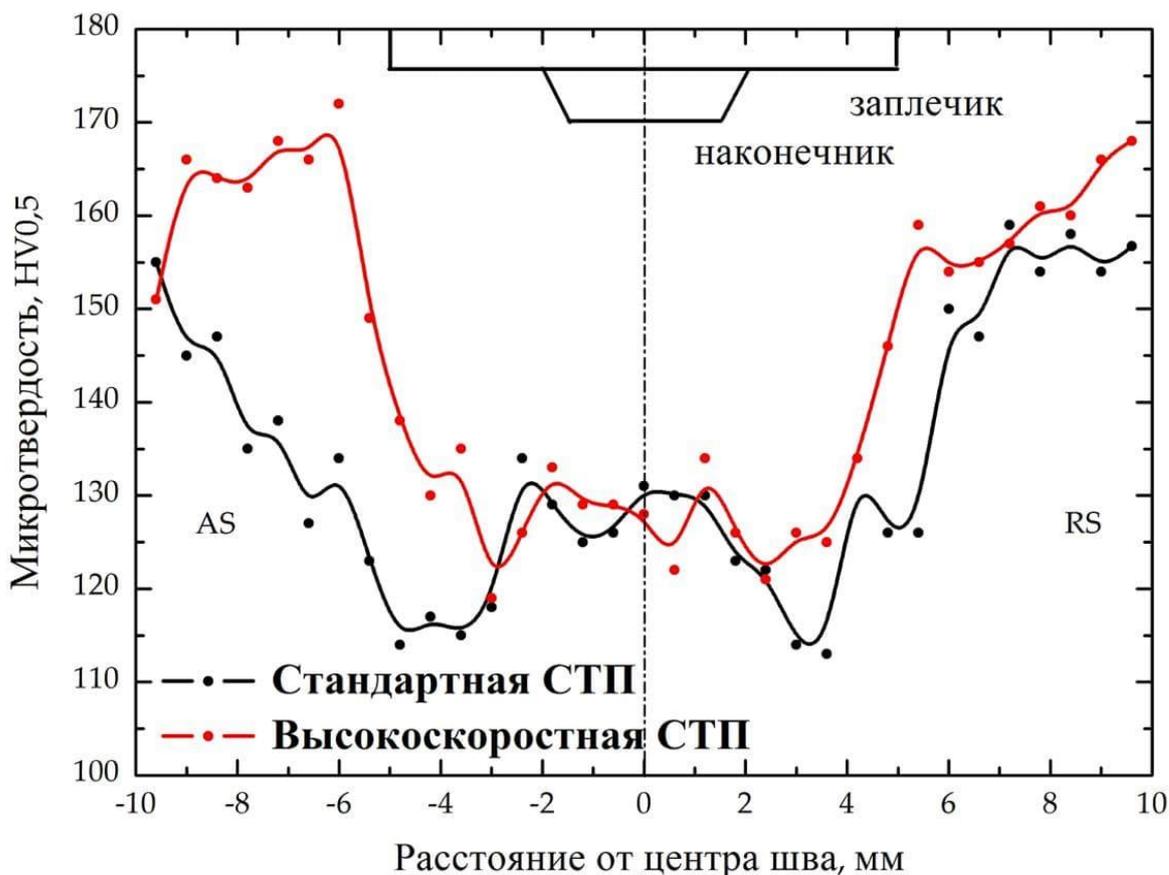


Рис. 16. Микротвердость соединения, полученного, стандартной СТП; ВСТП

Сравнивая три метода СТП, можно сделать вывод, что соединения стандартной СТП и ИСТП имели одинаковое распределение твердости по сечению сварного шва. Его можно охарактеризовать типичным падением твердости в переходной области ЗТМВ/ЗТВ; однако можно подчеркнуть, что твердость как в ЗТВ, так и в ЗП была улучшена процессом ИСТП. Напротив, существует заметная разница в случае соединения ВСТП, представляющая собой ярко выраженную границу в значениях микротвердости между ЗП и ЗТВ. Из-за короткого времени высокого тепловыделения ЗТВ получала меньшее количество теплоты, что приводило к ее сужению и, соответственно, к более высокой твердости по сравнению со стандартной СТП. Принимая во внимание, что

наименьшая твердость в ЗТМВ наблюдалась в соединении стандартной СТП, что свидетельствует о положительном эффекте модифицированных методов.

Как показано на рис.17 (а, b), туннельный дефект наблюдался в корневой зоне как на стороне набегания, так и на стороне отступления в сварном шве ВСТП. Этот дефект может образоваться из-за недостаточного перемешивания вследствие низкой температуры обработки. Чтобы избежать образования туннельного дефекта, рекомендуется сбалансировать скорость сварки и вращения. Изменение конфигурации инструмента на конический наконечник с резьбой на плече также может улучшить перемешивающее действие. Кроме того, в зоне сварного шва имелся свищ, как показано на рис.(17с). Возможной причиной образования этого дефекта может быть чрезмерный подвод теплоты вовремя сварке.



Рис. 17. Туннельный дефект на, а) стороне набегания; б) стороне отступления; в) свищ в высокоскоростном соединении СТП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алюминиевый сплав В95АТ1 был подвергнут различным методам СТП, таким как импульсная СТП, высокоскоростная СТП и стандартная СТП в качестве эталонного метода для определения влияния параметров сварки на свойства соединения.

Множество трудностей в области СТП преодолелось и значительного прогресса был достигнут в обработке данным способом термоупрочняемого алюминиевого сплава В95АТ1. Однако проблема снижения твердости в зоне термического влияния является нерешенной проблемой по сей день. Импульсная сварка трением с перемешиванием (ИСТП) как модифицированный СТП метод обладает большим потенциалом для улучшения свойств свариваемых соединений из термически упрочняемых алюминиевых сплавов. Высокоскоростная сварка трением с перемешиванием (ВСТП) также является модифицированным методом СТП, с помощью которого можно повысить производительность процесса.

Стандартная СТП, импульсная СТП и высокоскоростная СТП выполнялись параллельно направлению прокатки листов толщиной 1,7 мм с помощью пятиосевого станка СТП с различными параметрами сварки. Наилучшие параметры, установленные для каждого типа методов СТП, были выбраны в соответствии с исследованием поверхности сварного шва.

В данной работе было исследовано влияние импульсов, скорости сварки на структуру, механические характеристики получаемых соединений. По результатам работы были сделаны следующие выводы:

1. СТП алюминиевого сплава В95АТ1 привела к неоднородному распределению микротвердости, предполагающему образование размягченной области. Минимальное значение твердости находилось на расстоянии 6 мм от центра сварного шва как на стороне набегания (AS), так и на стороне отступления (RS).

2. Существенной разницы между профилями микротвердости СТП и ИСТП в ЗП не наблюдалось, однако можно было обнаружить уменьшение падения твердости в переходной области в АS с применением импульсов.

3. Соединения, полученные высокоскоростной СТП, показали неубедительные результаты. При исследовании сварных швов был обнаружен дефект «туннель» в корневой области, который является сильным концентратором напряжений и имеет большое негативное влияние на прочностные и пластические свойства. Данный дефект поспособствовал хрупкому разрушению сварных соединений. Причиной его образования является неправильный подбор параметров сварки и геометрии инструмента.

4. Разрушение соединений стандартной СТП и ИСТП произошло в области ЗТВ на АS, в то время как расположение перелома соединения ИСТП менялось в зависимости от параметров импульса. В отличие от этого разрушение швов ВСТП было хрупким из-за наличия туннельного дефекта в корневой зоне, который является сильным концентратором напряжений.

5. Предел прочности при растяжении и предел текучести были почти одинаковыми для соединений СТП и ИСТП; однако можно обнаружить положительное влияние импульсов более низкой частоты на удлинение. Значение удлинения в ЗП преобладало над соответствующими значениями в ЗТВ.

6. Для дальнейшего улучшения свойств сварных СТП соединений также будут проведены исследования процесса высокоскоростной СТП с изменением конфигурации инструмента на конический наконечник с резьбой на плече или на инструмент-шестигранник что может улучшить перемешивающее действие. Также рекомендуется сбалансировать скорость сварки и вращения.

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

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Физико-механические процессы соединения тонких листов алюминия при сварке трением с перемешиванием встык, Наумов А.А., Ожегов М.А., Смелянский Р.И., Алали Алхалаф Ахмад, Журнал «Материаловедение. Энергетика» 2020. №26, 2, с. 88–102.

Публикации в других изданиях SCOPUS

2. Modified Friction Stir Welding of Al–Zn–Mg–Cu Aluminum Alloy, Ahmad Alali Alkhalaf, Anna Tesleva, Pavel Polyakov, Matthias Moschinger, Sebastian Fritsche, Iuliia Morozova, Anton Naumov, Fedor Isupov, Gonçalo Pina Cipriano, Sergio T.Amancio-Filho, Friction Stir Welding and Processing №XI, 2021. с. 43–51.
3. Impact of impulses on microstructural evolution and mechanical performance of Al-Zn-Mg-Cu alloy joined by impulse friction stir welding, Anton Naumov, Fedor Isupov, Ahmad Alali Alkhalaf, Keqi Wang, Marina Gushchina, Oleg Panchenko, Jong-Ning Aoh, (статья принята в печать).

Аспирант: Алали Алхалаф Ахмад

