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

На правах рукописи

### Борисова Анастасия Юрьевна

### Исследование закономерностей формирования микроструктуры сварных соединений алюминиевых сплавов при сварке трением с перемешиванием, методами математического и физического моделирования

Направление подготовки 22.06.01 Технологии материалов

Код и наименование Направленность 22.06.01\_01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Код и наименование

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Борисова А.Ю. Научный руководитель: доцент, к.т.н., Зотов О.Г.

Санкт Петербург – 2020

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 ВШ/зав. кафедрой:	– Семенча Александр Вячеславович, кандидат химических наук, доцент
Научный руководитель:	– Зотов Олег Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент
Рецензент:	– Сулягин Роман Валерьевич, кандидат технических наук, начальник отдела сварки и материалов, ООО «РусГазШельф»

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

21 век по праву называется веком инноваций, информационных и высоких технологий. Это эпоха, характеризующаяся огромным ростом объема информационных потоков, переходом от "индустриального общества" к "обществу информационному", сменой технологий производства и мировоззрения людей.

Именно поэтому в 2016 году указом Президента РФ была утверждена стратегия научно-технологического развития России, В которой на ближайшие 10-15 лет перечислены семь приоритетных направлений развития, первым из которых является «переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объёмов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

В утверждением приоритетных направлений связи с научнотехнологического развития и интенсивным развитием компьютерных технологий все большему кругу исследователей становятся доступными сверхмощные вычислительные комплексы, суперкомпьютеры, а также средства для хранения и обработки большого объёма информации или данных. Это способствует переходу на новую методологию разработки производственных технологий для нужд различных областей индустрии. Новая методология связана с созданием цифровых двойников (Digital Twins) материалов и технологий, что является компьютерным образом конкретного объекта или технологии. С помощью моделирования разрабатывается даже самый сложный технологический процесс или прогнозируется поведение объекта под любыми воздействиями. Это позволяет с огромной экономией материалов и времени оценить влияние параметров обработки, окружающей среды, внешних нежелательных воздействий на объект или оборудование, а также проследить весь жизненный цикл объекта или оборудования до выхода его из строя, определив его ресурс.

Для создания цифровых двойников и валидации математических моделей необходимым этапом является физическое моделирование. Оно позволяет повысить точность расчётов, а также описать протекание процессов в материалах в процессе обработки. На базе физического моделирования создаются математические модели отдельно взятых процессов, протекающих в материале в процессе обработки. В последующем эти модели процессов связываются в одну интегральную физически обоснованную модель. Такой подход позволяет разрабатывать цифровые двойники новых технологий, не имеющих аналогов в мире.

Β данной работе рассматривается процесс сварки трением С перемешиванием (СТП) алюминиевых сплавов. Он является процессом соединения материалов в твердом состоянии. Процесс уникален тем, что при повышенных температурах реализуются высокоскоростные деформационные которые обеспечивают формирование мелкозернистой процессы, микроструктуры в зоне перемешивания шва. Чтобы охарактеризовать процессы, протекающие в процессе СТП, необходимо зафиксировать микроструктуру, сформировавшуюся в процессе СТП. Но даже в случае быстрого извлечения инструмента с одновременным быстрым охлаждением соединяемых листов процессы релаксации успевают протекать ввиду крайне неравновесного состояния материала. Поэтому физическое моделирование процесса СТП с моментальной фиксацией микроструктурного состояния резким охлаждением после деформации помогло бы исследователям разобраться в процессах, протекающих во время СТП.

Это обуславливает актуальность проведения дальнейших исследований в области материаловедения сплавов на основе алюминия и создания предпосылок для широкого внедрения новых технологических процессов, в том числе сварки трением с перемешиванием.

#### Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является исследование закономерностей формирования микроструктуры сварных соединений алюминиевых сплавов при СТП, методами математического и физического моделирования.

Для реализации цели необходимо выполнить следующие задачи:

- 1. Провести физическое и математическое моделирование процесса высокоскоростного кручения при температурно-деформационных параметрах, приближенных к СТП.
- Изучить влияние температурно-деформационных параметров высокоскоростного кручения на формирование микроструктуры.
- По результатам физического и математического моделирования провести количественный анализ микроструктуры исследуемых сплавов, заключающийся в определении размера зерна в различных зонах.
- 4. По результатам физического и математического моделирования провести качественную оценку влияния деформаций на размер зерна.
- Изучить процессы, протекающие в сплавах на основе алюминия после испытаний на высокоскоростное кручение и отвечающие за формирование мелкозернистой структуры.

#### Научная новизна

Несмотря на многочисленные исследования, до настоящего времени в полной мере не изучен процесс формирования мелкозернистой структуры в сварного шва при СТП. Среди зарубежных и отечественных ядре исследователей единого действующих нет мнения 0 механизмах структурообразования при этом способе сварке как однородных, так и разнородных материалов.

Для более глубокого понимания процессов структурообразования при СТП исследователи часто используют методы физического моделирования.

Поэтому настоящая работа посвящена исследованию закономерностей формирования микроструктуры сварных соединений алюминиевых сплавов при СТП, методами математического и физического моделирования.

#### Теоретическая и практическая значимость

В настоящей работе проведено физическое моделирование процесса высокоскоростного кручения на установке Gleeble-3800 и математическое моделирование с использованием программы Deform 3D<sup>TM</sup>, при температурно-деформационных параметрах, приближенных к СТП.

Установлена закономерность изменения размера зерна от различных температурно-деформационных параметров высокоскоростного кручения.

Определены критические температурно-деформационные параметры для начала протекания динамической рекристаллизации.

Полученные результаты работы, в виде установленных закономерностей, помогут осуществить реальный технологический процесс сварки трением с перемешиванием с получением качественной структуры сварного соединения, обеспечивающей необходимый комплекс механических свойств.

#### Апробация работы

Результаты работы доложены и обсуждены на российских и международных конференциях: New Materials and Technologies In Mechanical Engineering (СПб, 2019); Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2019 (Portland, Oregon, USA, 2019).

#### Публикации

Physical and numerical simulation of friction stir welding for Al-based alloys, Anton Naumov, Hannes Wenzel, Anatolii Borisov, Anastasiya Doroshchenkova, Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2019, MS and T 2019, 2019, c. 996-1001

Numerical simulation of hot high strain rate torsion tests for Al-based alloys, Anton Naumov, Anatolii Borisov, Anastasiya Doroshchenkova, Key Engineering Materials, 2019, vol. 822, pp 66-71 Влияние интенсивной пластической деформации на формирование микроструктуры сплавов цветных металлов, А.С. Борисов, А.А. Наумов, А.Ю. Борисова, О.Г. Зотов, В.Н. Цеменко, Технология металлов, №10 (принята в печать)

#### Представление научного доклада: основные положения

работе проведено настоящей физическое И математическое моделирование процесса высокоскоростного кручения на 24 образцах трех различных сплавов на основе алюминия. Испытания проводились при повышенных температурах ( $T = 350^{\circ}C$  и  $T = 500^{\circ}C$ ), с различными степенями и скоростями деформации. Температурно-деформационные параметры были приближены к реальному процессу сварки трением с перемешиванием. По результатам физического и математического моделирования проведен количественный анализ микроструктуры исследуемых сплавов, заключающийся в определении размера зерна в различных зонах и качественная оценка влияния деформаций на размер зерна. Установлена закономерность формирования размера зерна при различных температурнодеформационных параметрах высокоскоростного кручения. Изучены процессы, протекающие в сплавах на основе алюминия после испытаний на высокоскоростное кручение и отвечающие за формирование мелкозернистой Проведена оценка влияния температурно-деформационных структуры. параметров на процесс динамической рекристаллизации.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

#### Объекты, (предмет) и методы исследования

Алюминий и его сплавы занимают лидирующие позиции во многих отраслях промышленности, поэтому объектом исследования были выбраны сплавы на основе алюминия типа A5H, AMr5M и Д16AT. Проведено физическое и математическое моделирование процесса высокоскоростного кручения при температурно-деформационных параметрах, приближенных к сварке трением с перемешиванием. Испытания проводились при повышенных температурах (T = 350°C и T = 500°C), с различными степенями и скоростями деформации.

По результатам физического и математического моделирования проведен количественный анализ исследуемых сплавов, заключающийся в определении размера зерна в различных зонах, а также качественная оценка влияния деформаций на размер зерна. Установлена закономерность формирования размера зерна при различных температурно-деформационных параметрах высокоскоростного кручения.

На следующем этапе работы с помощью металлографического анализа были изучены процессы, протекающие в сплавах на основе алюминия, после испытаний на высокоскоростное кручение и отвечающие за формирование мелкозернистой структуры. Проведена оценка влияния температурнодеформационных параметров на процесс динамической рекристаллизации.

#### Результаты и их обсуждение

# 1. Влияние температурно-деформационных параметров высокоскоростного кручения на формирование микроструктуры

Для более глубокого понимания процессов структурообразования при СТП исследователи часто используют методы физического моделирования.

В настоящее время широко развиваются такие методы физического моделирования температурно-деформационных процессов, которые позволяют максимально приблизить результаты лабораторных исследований к промышленными условиями. Наиболее распространенным оборудованием, используемым для физического моделирования, является система Gleeble, которая позволяет проводить имитацию сложных температурно-деформационных процессов в широком диапазоне деформаций и температур.

Из опыта исследователей, занимавшихся физическим моделированием формирования структуры шва при СТП, следует, что воспроизвести структуру шва после СТП возможно, используя деформацию на высокоскоростное кручение.

Поэтому в настоящем исследовании при одинаковых условиях было проведено физическое моделирование процесса высокоскоростного кручения Gleeble-3800 установке И математическое моделирование на с Deform 3D<sup>TM</sup>, программы при использованием температурнодеформационных параметрах, приближенных к СТП.

Результаты металлографического анализа и математического моделирования представлены на рис. 1 - 3.



a)

б)



e)



Рисунок 1 - Результаты наложения металлографического анализа и математического моделирования. Изображение микроструктуры образцов с распределением деформации в центральном сечении образца при математическом моделировании: а – А1; б -А2; в – А3; г - А4; д - А5; е - А6; ё - А7; ж - А8







Рисунок 2 - Результаты наложения металлографического анализа и математического моделирования. Изображение микроструктуры образцов с распределением деформации в центральном сечении образца при математическом моделировании: а – М1; б -М2; в – М3;



 $\Gamma - M4; \ \pi - M5; \ e - M6; \ \ddot{e} - M7; \ \pi - M8$ 

б)







Рисунок 3 - Результаты наложения металлографического анализа и математического моделирования. Изображение микроструктуры образцов с распределением деформации в центральном сечении образца при математическом моделировании: а – Д1; б - Д2; в – Д3; г – Д4; д – Д5; е – Д6; ё – Д7; ж – Д8

На рис. 1 - 3 представлены микроструктуры исследуемых образцов после испытаний на высокоскоростное кручение. Видно, что возникающая в процессе кручения деформация, неравномерно распределяется по сечению образца. Вследствие неравномерности деформации, структура образцов неоднородная, с характерными после кручения «крестами» деформации, которые наглядно видны на представленных микроструктурах на рисунке 4.

В центральной области «крестов» (рис. 4 (а, в)) степень деформации ниже, поэтому зерна менее деформированы. В то время как в приповерхностной зоне (рис. 4 (б, г)) степень деформации выше и зерна более деформированные.





Рисунок 4 - Микроструктура образцов М4 (а, б) и Д1 (в, г) в поляризованном свете

Как видно из рис. 1 - 3 характер распределения деформации, полученный при математическом моделировании процесса кручения для образцов А1 - А8, М1 – М6, М8 и Д1 – Д6, Д8, полностью соответствует результатам металлографического анализа. Это свидетельствует о корректности построения математической модели.

Можно заметить, что образцы М7 и Д7, после испытания на высокоскоростное кручение начали разрушаться в приповерхностной зоне, соответствующей зоне максимальных деформаций. Разрушению могли поспособствовать внутренние дефекты в материале. Поэтому, при моделировании стоит учитывать тот факт, что математическое моделирование – это идеальный процесс, в котором не учитываются различные особенности реального материала, например, внутренние дефекты, напряженное состояние до деформации и т.д.

После физического и математического моделирования был проведен количественный металлографический анализ, который заключался В определении размера зерна в различных зонах, в частности, в зоне деформаций. максимальных Важно было получить минимальных И количественную оценку, характеризующую степень деформации микроструктуры.

Размер зерен определялся в продольном и поперечном направлении относительно деформации.

Результаты определения размера зерна для сплавов А5Н, АМг5М и Д16АТ представлены в таблице 1.

	Количество оборотов n = 1					Количество оборотов n = 1,5				
A5H			700	1000				700	1000	
			об/мин	об/мин				об/мин	об/мин	
	T=500		A1	A2	[	T=500		A3	A4	
	ср. размер	min	64,5	62,9		ср. размер	min	59,3	58,2	
	зерна	max	35,6	33,3		зерна	max	29,5	28,1	
	T=350		A5	A6		T=350		A7	A8	
	cp.	min	51,4	49,3		cp.	min	47,6	46,1	
	размер зерна	max	23,6	22,4		размер зерна	max	18,2	16,8	
АМг5М	Кс	личес	гво оборото	3 n = 1		Кол	ичество оборотов n = 1,5			
			700	1000				700	1000	
			об/мин	об/мин				об/мин	об/мин	
	T=500		M1	M2		T=500		M3	M4	
	ср. размер	min	46,6	44,4		ср. размер	min	40,7	38,3	
	зерна	max	26,7	24,3		зерна	max	20,7	18,3	
	T=350		M5	M6		T=350		M7	M8	
	cp.	min	35,5	34,1		cp.	min	31,2	30,1	
	размер зерна	max	16,1	15,6		размер зерна	max	13,7	12,1	
	r									
	Количество оборотов n = 1					Количество оборотов n = 1,5				
Д16АТ			700	1000				700	1000	
			об/мин	об/мин				об/мин	об/мин	
	T=500		Д1	Д2		T=500		Д3	Д4	
	cp.	min	30,1	28,9		cp.	min	25,6	24,3	
	размер зерна	max	15,6	14,4		размер зерна	max	11,5	10,4	
	T=350		Д5	Д6		T=350		Д7	Д8	
	cp.	min	20,1	19,2		cp.	min	15,5	14,3	
	размер зерна	max	8,7	7,5		размер зерна	max	5,6	4,9	

Таблица 1 Результаты определения размера зерна

Ранее сделанный вывод о том, что структура неоднородная из-за неравномерности деформации, подтверждается тем фактом, что размер зерна в центральной зоне, соответствующей зоне минимальной деформации больше, чем в приповерхностной зоне - зоне максимальной деформации.

Из полученных результатов также видно, что на размер зерна значительно влияют степень и температура деформации. Чем больше степень деформации и ниже температура, тем меньше размер зерна. Что касается скорости деформации, то она не значительно влияет на размер зерна. Можно заметить, что размер зерна у сплава Д16АТ, меньше чем у сплава АМг5М и А5Н, что свидетельствует о том, что он обладает большим сопротивлением деформации. Возможно, за счет присутствующих упрочняющих фаз. А размер зерна у сплава А5Н, больше чем у сплава АМг5М и Д16АТ, что свидетельствует о том, что он обладает меньшим сопротивлением деформации.

## 2. Изучение процессов, протекающих в сплавах на основе алюминия после испытаний на высокоскоростное кручение

Алюминиевые сплавы больше подвержены процессам динамического возврата во время деформации, чем динамической рекристаллизации, что связано с энергией дефекта упаковки кристаллической решетки. Поэтому в литературе до сих пор нет единого мнения о превалирующем процессе релаксации напряжений, за счет которого формируется мелкозернистая структура в зоне перемешивания при СТП.

В связи с этим, на следующем этапе работы, после испытаний на высокоскоростное кручение, проведенных при температурнодеформационных параметрах, приближенных к СТП, изучались процессы за счет которых формируется мелкозернистая структура сплавов на основе алюминия.



Результаты металлографического анализа представлены на рис. 5-28.

Рисунок 5 - Изображение микроструктуры образца А1; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 6 - Изображение микроструктуры образца А2; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 7 - Изображение микроструктуры образца А3; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 8 - Изображение микроструктуры образца А4; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 9 - Изображение микроструктуры образца А5; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 10 - Изображение микроструктуры образца А6; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 11 - Изображение микроструктуры образца А7; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 12 - Изображение микроструктуры образца А8; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций

На рис. 5-12 представлены микроструктуры образцов из сплава А5Н при увеличении x200. Структура изучалась в зоне минимальной (рис. 5 - 12, а) и максимальной (рис. 5 - 12, б) деформации после испытаний на высокоскоростное кручение. Структура в зоне максимальной деформации вытянута вдоль направления деформации. Средний размер зерна в этой зоне составляет примерно 26 мкм. В некоторых местах присутствуют новые, мелкие зерна размером до 10 мкм. Это свидетельствует о протекании процесса динамической рекристаллизации. В зоне минимальной деформации, структура менее деформирована, вследствие меньшей степени деформации. Средний размер зерна в этой области составляет примерно 55 мкм. фотографий Рекристаллизованные зерна отсутствуют. Анализ микроструктуры показал, степень И температура деформации что значительно влияет на долю рекристаллизованных зерен. Так, в образце A1  $(\varepsilon = 1)$ , доля рекристаллизации составляет примерно 2%, а в А3 ( $\varepsilon = 1,5$ ) – 7%. В образце А5 (T=350°C) доля рекристаллизации составляет примерно 10%, а в образце A1 (T=500°C) – 5%. Можно предположить, что выбранные параметры высокоскоростного кручения не обеспечивают в полной мере протекание процессов динамической рекристаллизации. Возможно испытание на высокоскоростное кручение для сплава А5Н необходимо проводить при более низкой температуре деформации и большей степени деформации.



а)
 Б)
 Рисунок 13 - Изображение микроструктуры образца М1; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



а)
 б)
 Рисунок 14 - Изображение микроструктуры образца М2; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



а)
 б)
 Рисунок 15 - Изображение микроструктуры образца М3; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 16 - Изображение микроструктуры образца М4; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



a)

б)

Рисунок 17 - Изображение микроструктуры образца М5; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 18 - Изображение микроструктуры образца М6; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 19 - Изображение микроструктуры образца М7; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



a)

б)

Рисунок 20 - Изображение микроструктуры образца М8; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций

На рис. 13-20 представлены микроструктуры образцов из сплава АМг5М при увеличении x200. Структура изучалась в зоне минимальной (рис. 13 - 20, а) и максимальной (рис. 13 - 20, б) деформации после испытаний на высокоскоростное кручение. Структура в зоне максимальной деформации характеризуется вытянутыми вдоль направления деформации зернами с зазубренными границами, на которых в некоторых местах присутствуют новые, мелкие зерна размером до 7 мкм. Это свидетельствует о протекании процесса динамической рекристаллизации. Средний размер зерна в этой области составляет примерно 18 мкм. В зоне минимальной деформации, зерна менее деформированные, на границах, в некоторых местах, также присутствуют рекристаллизованные зерна, но значительно в меньшей степени, чем в зоне максимальной деформации. Средний размер зерна в этой области составляет примерно 38 мкм. Анализ представленных фотографий микроструктуры показал, что степень деформации значительно влияет на долю рекристаллизованных зерен. Так, в образце М1 ( $\epsilon$ = 1), доля рекристаллизации составляет примерно 15%, а в М3 ( $\epsilon$ = 1,5) – 30%. Температура также влияет на долю рекристаллизованных зерен. Чем ниже температура деформации, тем более выражено протекает процесс рекристаллизации. Так, в образце М5 (T=350°C) доля рекристаллизации составляет примерно 60%, а в образце М1 (T=500°C) – 40%.



a)

б)

Рисунок 21 - Изображение микроструктуры образца Д1; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 22 - Изображение микроструктуры образца Д2; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций



Рисунок 23 - Изображение микроструктуры образца Д3; а – в зоне минимальных

![](_page_26_Figure_2.jpeg)

Рисунок 24 - Изображение микроструктуры образца Д4; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций

![](_page_26_Picture_4.jpeg)

Рисунок 25 - Изображение микроструктуры образца Д5; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций

![](_page_27_Picture_0.jpeg)

Рисунок 26 - Изображение микроструктуры образца Д6; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций

![](_page_27_Figure_2.jpeg)

Рисунок 27 - Изображение микроструктуры образца Д7; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций

![](_page_27_Figure_4.jpeg)

Рисунок 28 - Изображение микроструктуры образца Д8; а – в зоне минимальных деформаций; б – в зоне максимальных деформаций

На рис. 21 - 28 представлены микроструктуры образцов из сплава Д16АТ при увеличении x200. Как и для образцов из сплава A5H и сплава АМг5М структура изучалась в зоне минимальной (рис. 21 - 28, а) и максимальной (рис. 21 - 28, б) деформации. Структура образцов Д1 – Д8 в зоне максимальной деформации характеризуется вытянутыми ВДОЛЬ направления деформации зернами, в некоторых местах обнаружены новые, мелкие зерна до 5 мкм, что может свидетельствовать о протекании процесса динамической рекристаллизации, но менее выражено, чем в образцах из сплава АМг5М. Это может быть связано с проведенной термической обработкой (закалка + естественное старение) и присутствием в сплаве Д16АТ упрочняющих фаз, что способствует торможению процесса динамической рекристаллизации. Средний размер зерна в зоне максимальной деформации составляет примерно 10 мкм. В зоне минимальной деформации, зерна менее деформированные, в некоторых местах, также присутствуют рекристаллизованные зерна, но значительно в меньшей степени, чем в зоне максимальной деформации. Средний размер зерна в зоне минимальной деформации составляет примерно 23 мкм. Аналогично сплаву А5Н и АМг5М степень И температура деформации значительно влияет на долю рекристаллизованных зерен. Так, в образце Д1 ( $\varepsilon$ = 1), доля рекристаллизации составляет примерно 10%, а в ДЗ (ε= 1,5) – 15%. В образце Д5 (Т=350°С) доля рекристаллизации составляет примерно 20%, а в образце Д1 (T=500°C) – 10%.

Изучение процессов, протекающих в сплавах на основе алюминия после испытаний на высокоскоростное кручение с помощью металлографического анализа показало, что:

1. В процессе высокоскоростного кручения протекает процесс динамической рекристаллизации.

2. Чем больше степень деформации и ниже температура деформации, тем более выражено протекают процессы динамической

рекристаллизации. Скорость деформации не значительно влияет на протекание рекристаллизационных процессов.

3. B сплаве AMr5M более выражено протекает процесс динамической рекристаллизации, чем в сплаве Д16АТ и А5Н. Так, в сплаве фазы, Д16AT присутствуют упрочняющие которые способствует торможению процесса динамической рекристаллизации. А для сплава А5Н, возможно, испытание на высокоскоростное кручение необходимо проводить при более низкой температуре деформации и большей степени деформации.

#### Заключение

На первоначальном этапе работы было проведено исследование влияния температурно-деформационных параметров высокоскоростного кручения на формирование микроструктуры сплавов на основе алюминия, типа A5H, AMr5M и Д16AT. Для этого было проведено физическое и математическое моделирование процесса высокоскоростного кручения при T =  $350^{\circ}$ C и T =  $500^{\circ}$ C, с различными степенями и скоростями деформации.

Установлено, что построенная математическая модель достаточно точная, однако стоит учитывать тот факт, что математическое моделирование – это идеальный процесс, в котором не учитываются различные особенности реального материала, например, внутренние дефекты, напряженное состояние до деформации и т.д.

По результатам физического и математического моделирования была проведена качественная оценка влияния деформаций на размер зерна. Установлена закономерность формирования размера зерна при различных температурно-деформационных параметрах высокоскоростного кручения:

• на размер зерна значительно влияют степень и температура деформации. Чем больше степень деформации и ниже температура, тем меньше размер зерна. Скорость деформации не значительно влияет на размер зерна.

• Установлено, что для сплавов АМг5М и Д16АТ следующие параметры высокоскоростного кручения: температура деформации T = 350°C, степень

деформации  $\varepsilon = 1,5$  и скорость деформации 1000 об/мин, наиболее оптимальные для протекания процесса динамической рекристаллизации. Для сплава A5H при проведении испытания высокоскоростного кручения необходимо рассмотреть более низкую температуру деформации и большую степень деформации.

На следующем этапе работы с помощью металлографического анализа изучались процессы, протекающие в сплавах на основе алюминия после испытаний на высокоскоростное кручение.

Установлено, что:

• В процессе высокоскоростного кручения протекает процесс динамической рекристаллизации, в результате которого формируется мелкозернистая структура.

• Чем больше степень деформации и ниже температура деформации, тем более выражено протекают процессы динамической рекристаллизации. Скорость деформации не значительно влияет на протекание рекристаллизационных процессов.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что формирование микроструктуры образцов из сплавов на основе алюминия, подвергнутых физическому моделированию процесса СТП зависит от степени и температуры деформации. Можно отметить, что качество физического моделирования зависит от качества исходного выбранные температурно-деформационные Выявлено, ЧТО материала. физического моделирования СТП параметры процесса методом высокоскоростного кручения обеспечивают протекание динамической рекристаллизации, отвечающей за формирование мелкозернистой структуры. Однако, для сплава А5Н можно попробовать провести высокоскоростное кручение с большей степенью деформации и более низкой температурой деформации.

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

#### Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

Physical and numerical simulation of friction stir welding for Al-based alloys, Anton Naumov, Hannes Wenzel, Anatolii Borisov, Anastasiya Doroshchenkova, Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2019, MS and T 2019, 2019, c. 996-1001

Numerical simulation of hot high strain rate torsion tests for Al-based alloys, Anton Naumov, Anatolii Borisov, Anastasiya Doroshchenkova, Key Engineering Materials, 2019, vol. 822, pp 66-71

Влияние интенсивной пластической деформации на формирование микроструктуры сплавов цветных металлов, А.С. Борисов, А.А. Наумов, А.Ю. Борисова, О.Г. Зотов, В.Н. Цеменко, Технология металлов, №10 (принята в печать)

Аспирант

(подпись)

Борисова А.Ю.