

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

На правах рукописи

Замоздра Максим Юрьевич

**Исследование процесса структурообразования при уплотнении и
пластической деформации стружки из магниевых сплавов для
получения заготовок с высокими физико-механическими свойствами**

Направление подготовки 22.06.01 Технологии материалов

Код и наименование

Направленность 22.06.01_05 Порошковая металлургия и композиционные материалы

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы:
Замоздра М.Ю.

Научный руководитель:
д.т.н., проф. Цеменко В.Н.

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 ВШ: – Семенча Александр Вячеславович
– кандидат химических наук,
доцент

Научный
руководитель: – Цеменко Валерий
Николаевич – доктор технических
наук, профессор

Рецензент: – Мазуров Сергей
Александрович – кандидат
технических наук,
начальник лаборатории ЦНИИМ

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

В данном проекте анализируется практическое применение методов уплотнения и пластической деформации при получении полуфабрикатов из стружки магниевых сплавов, исследуется влияние параметров процессов на механические свойства получаемых заготовок. В ходе экспериментов тестируются различные технологические параметры, позволяющие получать наилучшие механические свойства конечного продукта. На основе экспериментальных данных строится математическая модель, в частности, методом конечных элементов. Полученная модель позволит применить реологические данные для других магниевых сплавов. Также, в ходе всего эксперимента будет отслеживаться эволюция макро- и микроструктуры, для физического обоснования полученной математической модели.

Актуальность работы заключается в том, что магниевые сплавы обретают все большую популярность в различных отраслях современной техники, выходящих за рамки авиа- и космической промышленности. Трудно деформируемые сплавы имеют строго регламентированный химический состав. При этом в процессах механической обработки деталей, получается значительное количество отходов в виде стружки, переработка которой традиционными металлургическими методами приводит к существенным потерям материала и утраты регламентируемого химического состава. В этой связи становится актуальным внедрение экономичных технологий переработки стружки в компактные, дешевые заготовки высоких физико-механических свойств, которые могут быть использованы наряду с заготовками из литых сплавов. Данная работа направлена на сохранение как самого материала, так и механических параметров дорогостоящих сплавов.

Цель и задачи исследования

Целью проекта является исследование закономерностей структурообразования при уплотнении и пластической деформации стружки из магниевых сплавов для создания физически обоснованной математической модели эволюции макро- и микроструктуры материала заготовок.

Задачи:

- 1) Проведение анализа исходного материала (стружки) магниевых сплавов;
- 2) Уплотнение и пластическая деформация, в частности методом горячей экструзии. В ходе данного этапа будут получены несколько образцов с варьированием нескольких параметров процесса. Последующая термическая обработка и обработка давлением полученных экструдатов;
- 3) Отслеживание эволюции микро- и макроструктуры в ходе всего хода эксперимента - стружка, брикет, экструдат, обработанный экструдат. Сопоставление с литым материалом магниевых сплавов.

Научная новизна

В результате проведения комплексного исследования, основанного на многочисленных и разносторонних экспериментах получения компактных заготовок из стружки магниевых сплавов, будет установлена закономерность структурообразования при уплотнении и пластической деформации, а также все стадии эволюции макро- и микроструктуры материала заготовок, позволяющая проектировать весь процесс получения заготовок заданных физико-механических свойств.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты, изложенные в диссертации, вносят вклад в существующие представления о закономерностях структурообразования и деформационных параметрах магния и магниевых сплавов в процессе горячей экструзии и последующей термической и механической деформации.

Апробация работы

Результаты работы доложены и обсуждены на российских и международных конференциях: Perspective materials and technologies: from invention to implementation (СПб, 2019); Material Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry (СПб, 2019).

Публикации

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМПАКТИРОВАНИЯ МАГНИЕВОЙ СТРУЖКИ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИИ, М.Ю. Замоздра, С.В. Ганин, С.Ю. Петрович. Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2017): Сборник трудов международной научно – технической конференции. СПб.: Изд – во Политех. ун – та. 2017. С. 66-73.

2. Механические свойства заготовок, полученных горячей экструзией магниевой стружки, Цеменко В.Н., Ганин С.В., Замоздра М.Ю. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 169-184.

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАГОТОВОК ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИИ МАГНИЕВОЙ СТРУЖКИ, Ганин С.В., Замоздра М.Ю., Цеменко В.Н., Перспективные материалы и технологии: от изобретения до внедрения: труды Международной школы молодых ученых, 26 июня 2019 г. – СПб. : Изд- во Политехн. ун-та, 2019. – 36 с.

4. Mechanical Properties of Bars Produced by Hot Extrusion of Magnesium Shavings, Zamozdra Maxim Yu., Karzina Julija S., and Perminova Anna. Key Engineering Materials 822 (September 2019): 185–92.

5. Structure and properties of magnesium chip blanks, Tsemenko, V., Ganin, S., Zamozdra, M., Hootack, M. (2019) Materials Today: Proceedings, 30, pp. 645-649. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.450

Представление научного доклада: основные положения

В главе 1 представлены результаты исследования входного контроля исходного материала, а именно магниевой стружки сплава МА5. В главе используются методы, характерные для исследовательских работ в области порошковой металлургии, соответствующей направлению подготовки аспиранта.

В главе 2 описываются процессы получения образцов методами горячей экструзии, восстанавливающего отжига, а также прокатки в калибрах.

Глава 3 следует из главы 2 и демонстрирует результаты механических испытаний полученного экструдата. Глава дает рекомендательный характер оптимального режима технологических параметров процесса горячей экструзии на основании испытаний, проведенных в главе.

Глава 4 является кульминационной и собирает в себе все полученные в главе 2 образцы (в количестве 27 шт.) для анализа макро- и микроструктуры. Анализ имеет большой спектр исследуемых параметров, и включает оптический, рентгеноскопический и цифровой анализ шлифов и их изображений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Объекты и методы исследования

Объектом исследования был выбран сплав магния МА5, а точнее его стружка. Проводилась горячая экструзия стружки при трех режимах нагрева $T = 300, 350, 400$ °С и трех режимах степени деформации, варьирующийся по внутреннему диаметру фильеры: 10, 8, 6 мм. В результате, было получено 9 опытных образцов-экструдатов. Эти образцы в дальнейшем подвергались термической обработке – отжигу при температуре 400 °С в вакуумной печи в течении 8 часов. А затем – горячей прокатке в калибрах с постепенным увеличением степени обжатия. Итого было получено 27 образцов исследования микроструктурной составляющей для каждого из 9 образцов на трех этапах обработки. Современными методами оптического и

рентгеноскопического контроля и с помощью алгоритмов программы MatLab вычислялись основные параметрические данные структуры на всех этапах жизненного цикла экструдата для выявления оптимального метода переработки стружки.

Результаты и их обсуждение

1. Изучение исходный стружки

Методы входного контроля исходного дисперсной магниевой стружки приведены в таблице 1.1. Отбор пробы для анализа проведён по ГОСТ 23148-78.

Таблица 1 – Методы входного контроля исходного дисперсного магниевого сплава

№ п/п	Измеряемая величина	Принцип метода	Оборудование
1	Гранулометрический состав	сухой рассев	по ГОСТ 18318-94
2	Насыпная плотность	волюмометрия	по ГОСТ 19440-94
3	Плотность после утряски		по ГОСТ 25279-93

1.1. Определение гранулометрического состава

Сущность метода заключается в сухом просеивании пробы порошка через набор стандартизированных сит, измерении массы полученных фракций и расчёте их процентного содержания. Просеивание проводится в наборе сит, закреплённом на подвижной платформе ротапа – механического встряхивателя, осуществляющего кривошипно-вращательное движение с частотой 300 ± 15 об/мин при одновременном встряхивании с частотой 180 ± 10 в минуту. Сетки сит – по ГОСТ 6613-86. Длительность отсева – 10 минут (установлено экспериментально по времени прекращения изменения грансостава). Результаты измерений приведены в таблице 1.2 и на рисунке 1.1.

Таблица 1.2 – Гранулометрический состав магниевой стружки сплава МА5

Фракция,	Величина, мас. %
----------	------------------

мкм	Дифференциальная	Интегральная
-400	0,4	0,4
+400-500	1,4	1,8
+500-630	22,9	24,7
+630-800	18,4	43,0
+800-1000	21,6	64,6
+1000-1250	17,9	82,6
+1250-1600	8,1	90,7
+1600-2500	9,3	100,0

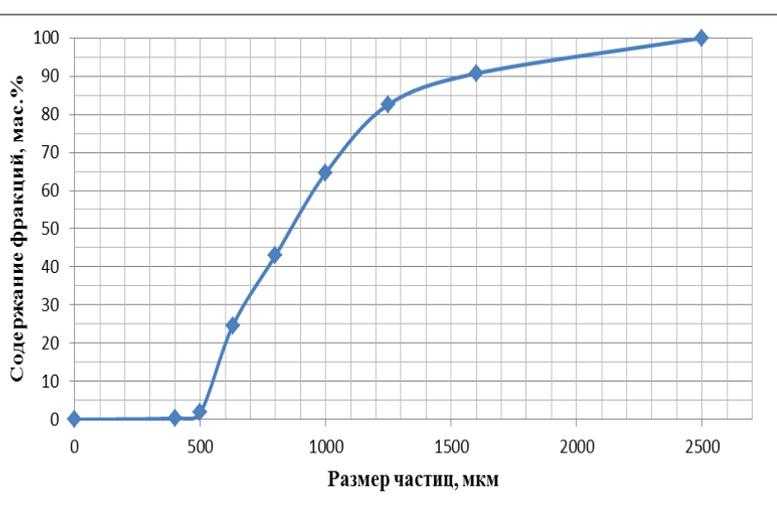


Рисунок 1.1 – График распределение размера фракций стружки в виде интегральной кривой

1.2. Определение прессуемости

Прессуемостью металлических порошков называется их способность образовывать брикет определяемой плотности под влиянием заданных сжимающих усилий.

Порядок определения прессуемости:

- взвесить несколько навесок исходного материала одинаковой массы;
- спрессовать материал в пресс-форме при различных усилиях;
- измерить штангенциркулем диаметр и высоту спрессованных образцов;
- определить объем образцов и найти их плотность.

Результаты приведены в таблице 1.3 и на графике зависимости плотности (кривая уплотнения $\rho = f(P)$) и пористости от давления прессования (рисунок 1.2).

Таблица 1.3 – Данные прессуемости магниевой стружки МА5.

Постоянные параметры: масса стружки – 5 г; диаметр отверстия пресс-формы – 17 мм.

№ образца	Усилие, т	Давление, МПа	Высота, мм	Объем, см ³	Плотность, г/см ³	Среднее значение, г/см ³
1	5,6	241,9	15,80	3,58	1,40	1,38
2			16,20	3,68	1,36	
3			15,90	3,61	1,39	
4	7,2	311,0	15,00	3,40	1,47	1,48
5			14,90	3,38	1,48	

6			14,80	3,36	1,49	
7	8,8	380,1	14,30	3,24	1,54	1,53
8			14,30	3,24	1,54	
9			14,60	3,31	1,51	
10	10,4	449,3	13,90	3,15	1,59	1,58
11			14,00	3,18	1,57	
12			14,00	3,18	1,57	

Прочные неосыпающиеся заготовки из исследованной стружки получают уже при давлении 311 МПа (при пористости ~20%), поэтому дальнейшее увеличение давления прессования для получения экструдированных в дальнейшем брикетов нецелесообразно.

Для сведения. Экстраполяцией кривой уплотнения по методу Штыхнова установлено, что абсолютной компактности брикета ($\rho = 1,80 \text{ г/см}^3$) при холодном прессовании можно достичь, приложив давление прессования ~ 770 МПа.

Сравнением этих кривых обнаружена интересная зависимость: например, при давлении 450 МПа плотность брикета составила $1,58 \text{ г/см}^3$, т.е. по сравнению с плотностью утряски ($0,55 \text{ г/см}^3$) увеличилась в 2,87 раза, при этом пористость снизилась в 5,69 (!) раза (она составила 12,2% против 69,4% в состоянии утряски).

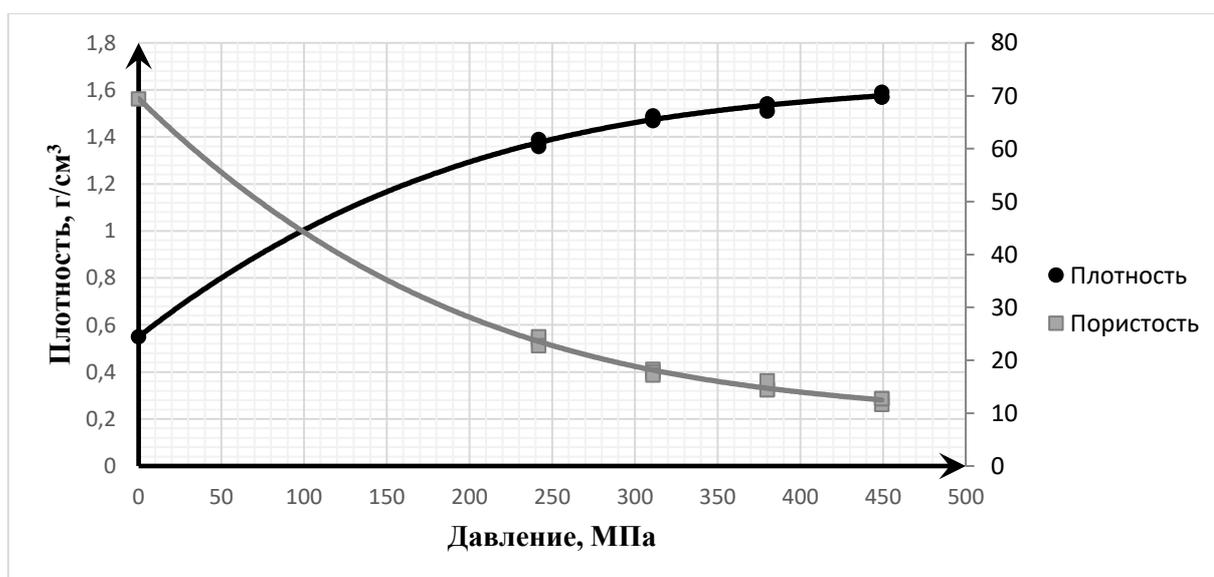


Рисунок 1.2 – Зависимость плотности и пористости образцов от давления прессования

1.3. Изготовление заготовок (брикетов) под горячую экструзию

По результатам изучения технологических свойств (прессуемости и формуемости) материала был принят следующий режим холодного прессования для получения заготовок под горячую экструзию:

масса засыпки – 25 г;

диаметр матрицы – 25 мм;

усилие прессования – 15,2 т, что соответствует давлению 316 МПа.

Сведения о габаритах, плотности и пористости полученных заготовок – в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Габариты, плотность и пористость заготовок перед экструдированием.

№	Высота h, мм	Объем V, см ³	Масса m, г	Плотность, г/см ³	Пористость П, %
1	35,9	17,61	24,6	1,40	22
2	36,5	17,91	24,9	1,39	23
3	36,0	17,66	24,9	1,41	22
4	36,4	17,86	24,9	1,39	23
5	36,35	17,83	25,0	1,40	22
6	36,5	17,91	24,9	1,39	23
7	36,3	17,81	25,0	1,40	22
8	36,0	17,66	24,9	1,41	22
9	36,6	17,96	25,0	1,39	23
10	36,5	17,91	24,9	1,39	23
11	36,7	18,01	24,9	1,38	23
12	36,6	17,96	24,9	1,39	23
13	36,6	17,96	25,0	1,39	23
14	36,4	17,86	24,9	1,39	23
15	35,9	17,61	25,0	1,42	21
16	36,4	17,86	24,9	1,39	23
17	36,3	17,81	24,9	1,40	22
18	37,6	18,45	25,6	1,39	23



Рисунок 1.3 – Заготовка для экструзии, представляющая собой два цилиндра брикетированной

19	35,5	17,42	24,7	1,42	21	стружки и две таблетки графита снизу и сверху.
20	36,2	17,76	24,9	1,40	22	

Высота заготовок оказалась примерно равной 36 мм, что позволяет помещать в пресс-форму для экструзии по две заготовки, а сверху и снизу их размещать графитовые таблетки того же (25 мм) диаметра, высотой не более 5 мм, предназначенные в качестве смазки для снижения бокового трения (рисунок 1.3).

2. Проведение экструзии, отжига и прокатки в калибрах

2.1. Особенности горячей и тёплой экструзии

Экструзия — технология получения линейных изделий («экструдата») путем продавливания материала через формующее отверстие. Основные преимущества этого метода по сравнению с другими производственными процессами:

- способность создавать очень сложные поперечные сечения;
- возможность переработки хрупких материалов за счёт сильных сжимающих и сдвиговых деформаций;
- получение отличной отделки поверхности, зачастую не требующей финишной обработки.

Отношение площадей поперечного сечения материала до экструзии и после неё называют коэффициентом экструзии (степенью обжатия):

$$\lambda = \frac{S_{\text{нач}}}{S_{\text{кон}}},$$

где $S_{\text{нач}}$ — начальная площадь поперечного сечения материала; $S_{\text{кон}}$ — конечная площадь поперечного сечения материала.

Одним из самых значимых аспектов процесса экструзии заключается в том, что эти отношения могут быть очень большими, и в то же время позволяет производить довольно качественные детали. Основным недостатком прямой экструзии является то, что при прохождении заготовки по всей длине

контейнера возникают силы трения. При этом требуется наибольшее усилие, необходимое для начала процесса, медленно снижающееся по мере расхода заготовки.

Деформация материала в процессе экструзии можно описать двумя характерными этапами:

1) Значительное уплотнение формуемого материала в шахте экструдера, до достаточно высокой плотности, близкой к компактной.

2) Процесс выдавливания. При этом при прохождении самого узкого участка фильеры материал почти не получает дополнительного уплотнения, т.к. на этом этапе преобладает уже сдвиговая деформация. При несоблюдении процесса консолидации или при чрезмерном обжатии, экструдат может разуплотняться и даже разрушиться.

2.2. Изготовление прутков

В качестве двух параметров регулирования процесса были выбраны температура нагрева заготовки перед экструзией и коэффициент обжатия (который регулировался за счёт смены фильер, имеющих различные диаметры выходного отверстия – 6,4; 8,8; 10,5 мм). Исходя из данных предварительно проведенного физического моделирования, были выбраны три температурных режима процесса протекания экструзии – 300, 350, 400 °С. Технологические параметры получения прутков (рисунок 2.1) представлены в таблице 2.1.



Рисунок 2.1 – Образец прутка с пресс-остатком, полученный методом горячей экструзии из магниевой стружки МА5

Использование графита привело к уменьшению облоя, затекающего в зазор между пресс-шайбой и матрицей, что облегчило процесс разборки пресс-формы, улучшив его повторяемость. Однако, некоторая часть графита остается на поверхности прутков, а также попадает в виде протяженных графитовых рытвин глубиной 1-1,5 мм. От подобного вида дефекта необходимо было избавиться наждачной бумагой.

Таблица 2.1 – Параметры магниевых прутков сплава МА5, полученных при различных режимах горячей экструзии

Образец	Температура, °С	Диаметр фильеры, мм	Диаметр изделия, мм	Коэффициент экструзии λ	Объем, см ³	Масса, г	Длина, мм	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Давление прессования, МПа	Время экструзии, сек	Скорость экструзии, мм/сек
1	400	10,5	10,1	8,8	24,0	40,9	300	1,70	6	252	265	1,1
2	350		10,1	8,8	23,7	40,9	296	1,73	4	289	195	1,5
3	300		10,2	8,6	24,3	39,2	296	1,61	11	379	305	1,0
4	400	8,8	8,6	12,3	24,5	44,1	425	1,80	1	245	210	2,0
5	350		8,7	11,8	23,8	42,1	398	1,77	2	307	200	2,0
6	300		8,6	12,2	22,6	40,3	390	1,78	1	379	315	1,2
7	400	6,4	6,3	22,5	22,0	37,7	700	1,71	5	404	200	3,5
8	350		6,2	23,6	20,6	36,2	688	1,76	2	505	200	3,4
9	300		6,3	22,5	20,5	34,7	650	1,70	6	548	200	3,3

Восстанавливающий отжиг проводился в горизонтальной проходной печи OTF-1200X при вакууме порядка $1 - 10^{-4}$ мм рт. ст. Температура процесса составляла 400 °С, а время отжига – 8 ч.

Для задания дополнительной пластической деформации, образцы подвергались прокатке в калибрах. Т.к. образцы имеют различающуюся площадь поперечного сечения, варьируемую выходным отверстием фильер, степень обжатия у образцов различается. Прутки 10 мм проходили через 4 формующих калибра ромбовидной формы с максимальной диагональю 9, 7,5,

6, 5 мм. Когда как прутки 6 мм проходили через 3 калибра – 5, 4,5, 4 мм. Прокатка в дальнейших калибрах (при большем обжатии) приводили к разрушению образцов путём их расслаивания напополам вдоль центральной оси. Таким образом, 9 отожженных экструдатов были прокатаны со следующей степенью обжатия в процентном соотношении от начальной площади поперечного сечения (в среднем из трёх): 28%, 8 мм – на 41%, а 10 мм – на 52%.

- прутки 10 мм – 52%;
- прутки 8 мм – 41%;
- прутки 6 мм – 28%.

Температура процесса прокатки выдерживалась в районе 350-380 °С. После каждого прохода образец снова помещался в печь для выдержки в течении 10 минут.

3. Механические испытания

3.1. Статическая осадка

Для осуществления одноосевой статической осадки от прутка отрезали фрагмент, по длине равный его диаметру. При приложении нагрузки образцы разрушались. Откалывание осколков проходило по хрупкому механизму – без видимого образования бочки на стенках образцов, но с образованием диагонального скоса (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Демонстрация образца магниевого экструдата до (слева) и после (справа) испытания статической осадкой. Как видно, разрушение хрупкое, сопровождающееся образованием диагонального скоса

3.2. Статическое растяжение

Результаты испытаний на растяжение и сжатие представлены в таблице 3.1.

По данным таблицы 3.1 построены следующие графики зависимостей: приняв за константу один из параметров – температуру выпрессовки или диаметр фильеры, графически изобразили зависимости показателя временному сопротивлению разрыву от диаметра фильеры при константной температуре (рисунок 3.2), и давление разрушения от температуры при константном среднем коэффициенте обжатия (рисунок 3.3).

Таблица 3.1 – Механические испытания прутков сплава МА5, изготовленных методом горячей экструзии

№	Температура, °С	Диаметр фильеры, мм	Растяжение				Сжатие					
			d _{ср} прутка, мм	Коэф. экстр. λ	λ	Предел прочности		d _{ср} прутка, мм	Коэф. экстр. λ	λ	Предел прочности	
						кгс	МПа				кгс	МПа
1	400	10,5	9,2	10,6	11,0	2310	341	10,2	8,7	8,7	3480	417
2	350		9,0	11,1		2150	332	10,1	8,8		3300	404
3	300		8,9	11,3		2000	313	10,2	8,7		3200	384
4	400	8,8	8,5	12,5	12,5	1820	316	8,5	12,5	12,9	2420	418
5	350		8,5	12,3		1780	304	8,3	13,1		2390	433
6	300		8,4	12,8		1470	260	8,3	13,1		2570	465
7	400	6,4	6,0	25,3	24,6	860	301	6,1	24,2	23,7	1425	478
8	350		6,1	24,2		840	282	6,3	22,7		1570	494
9	300		6,1	24,4		820	278	6,1	24,2		1540	516

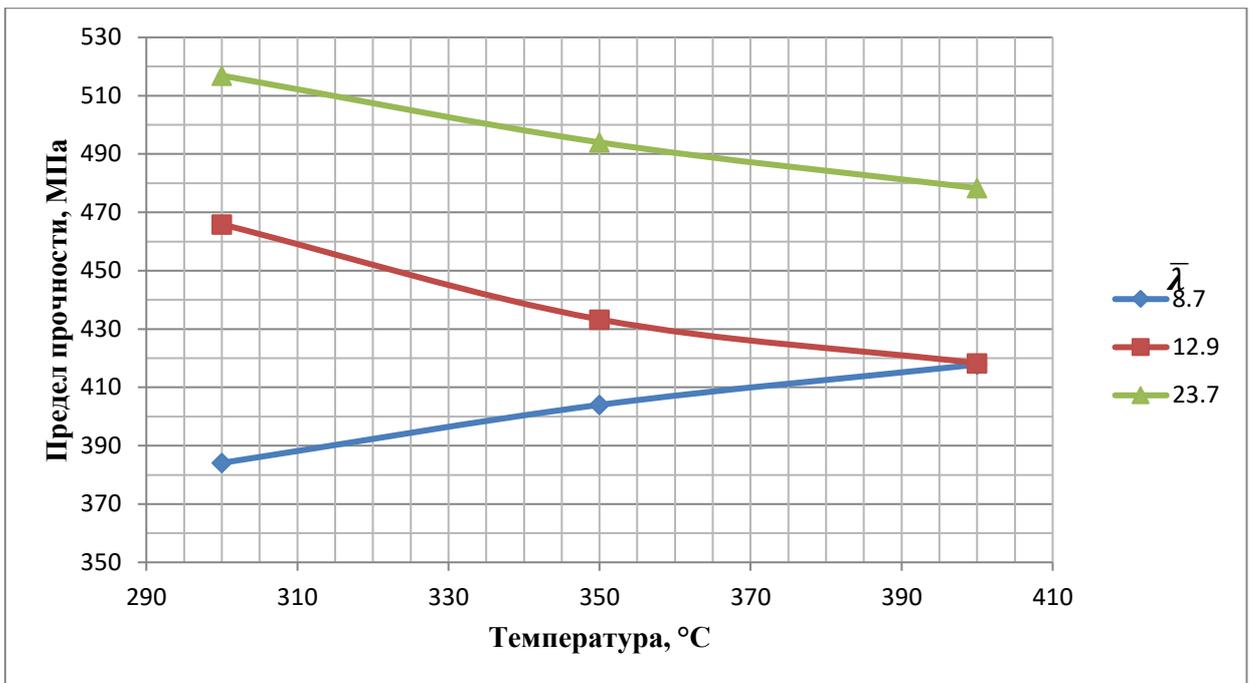


Рисунок 3.2 – Графики зависимости предела прочности при сжатии магниевых прутков от температуры экструзии при $\bar{\lambda} = \text{const}$.

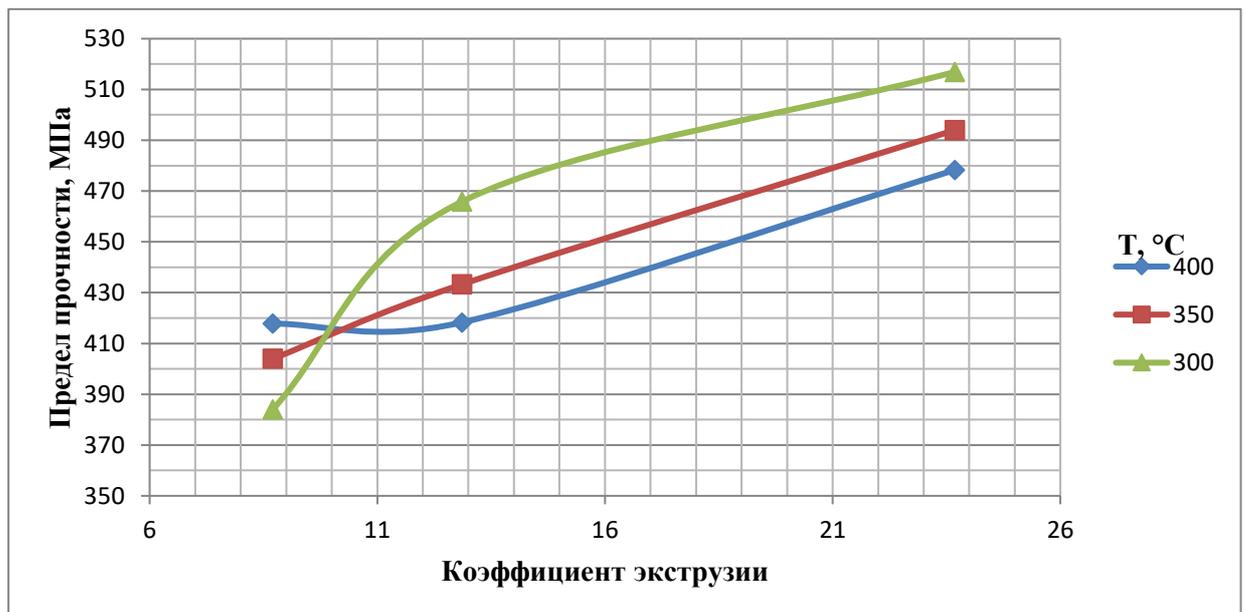


Рисунок 3.3 – Графики зависимости предела прочности при сжатии магниевых прутков от коэффициента экструзии при $T = \text{const}$.

Объединив эти графики, можно построить поверхность (рисунок 3.4) зависимости предела прочности от диаметра фильер и температуры процесса, по характеру которой можно сделать следующий вывод, что предел прочности экструдата при статическом растяжении зависит как от коэффициента

обжатия, так и от температуры экструзии. Чем ниже температура протекания процесса – тем выше требуется усилие для разрыва; чем выше коэффициент обжатия – тем выше показатель временному сопротивлению.

Аналогичные построения графиков при испытаниях на растяжение приведены на рисунке 3.5 – зависимость предела прочности от среднего коэффициента экструзии и рисунке 3.6 – зависимость предела прочности от температуры экструзии. Поверхность зависимости предела прочности при растяжении от диаметра фильер и температуры процесса приведена на рисунке 3.7.

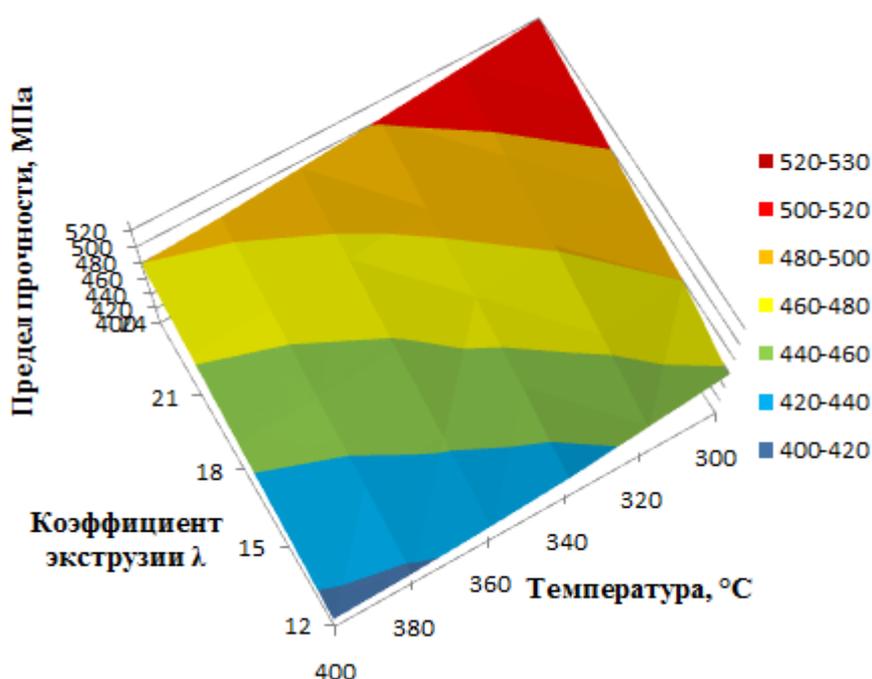


Рисунок 3.4 – Графическое отображение влияния коэффициента экструзии и температуры на прочностной показатель при растяжении магниевых прутков

Из графиков можно сделать вывод, что чем выше температура, тем большее усилие необходимо приложить для разрыва образцов, и, чем меньше степень обжатия (т.е. чем больше диаметр фильеры), тем выше предел прочности. При испытании на временное сопротивление разрыву при статическом растяжении также наблюдается зависимость как от диаметра фильер, так и от температуры экструзии, однако ситуация обратная испытаниям на сжатие.

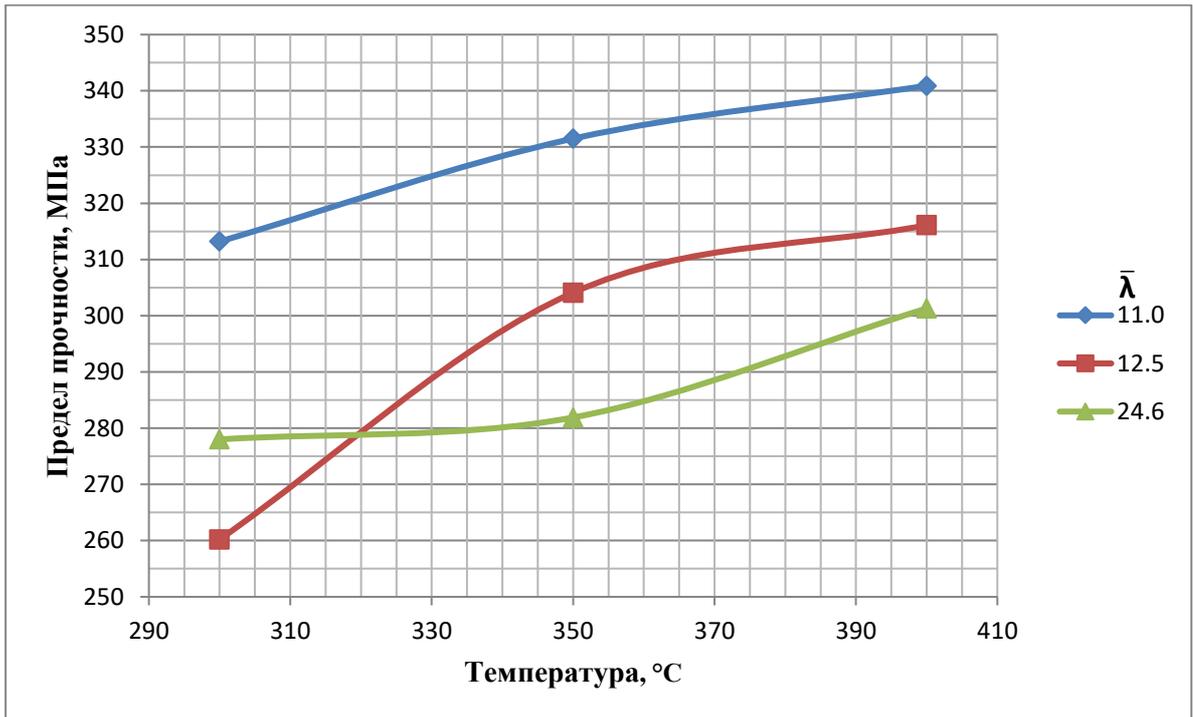


Рисунок 3.5 – Графики зависимости предела прочности при растяжении магниевых прутков от температуры экструзии при $\bar{\lambda} = \text{const}$.

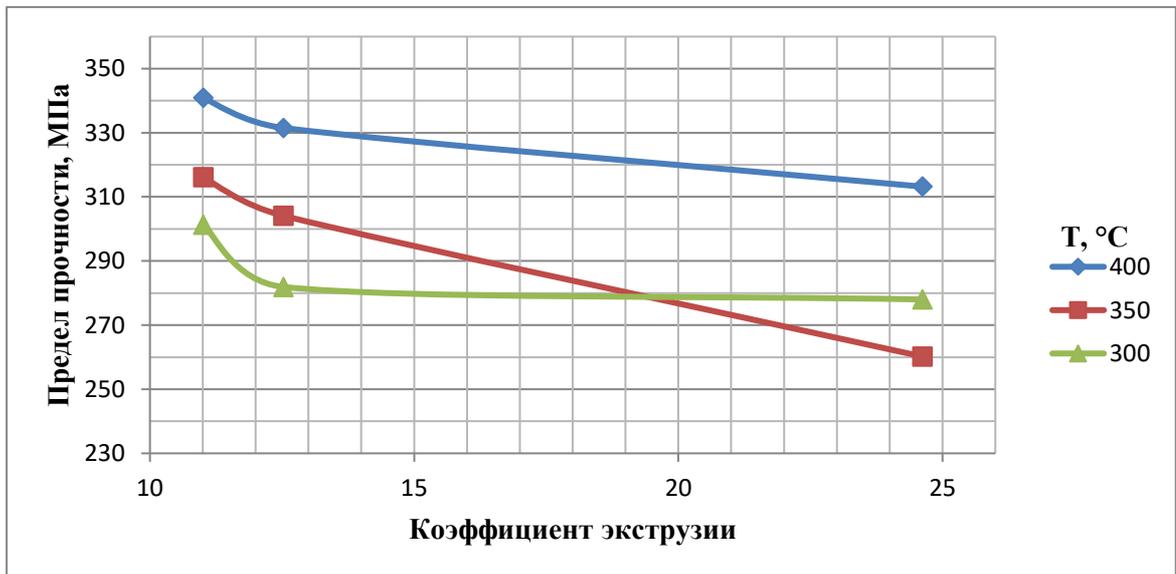


Рисунок 3.6 – Графики зависимости предела прочности при растяжении магниевых прутков от степени обжатия при T=const.

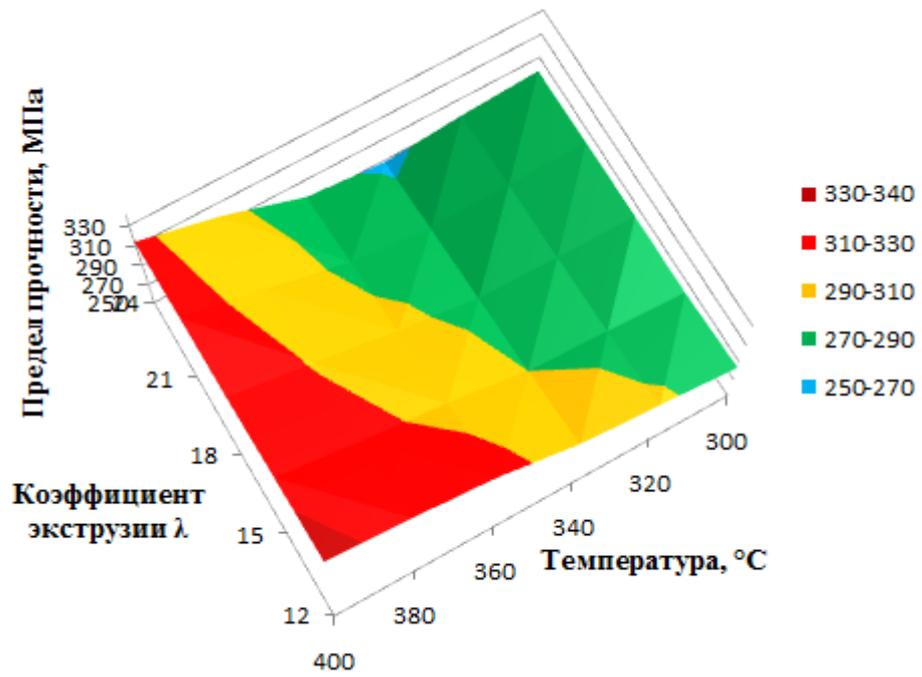


Рисунок 3.7 – Графическое отображение влияния коэффициента экструзии и температуры на прочностной показатель при растяжении магниевых прутков

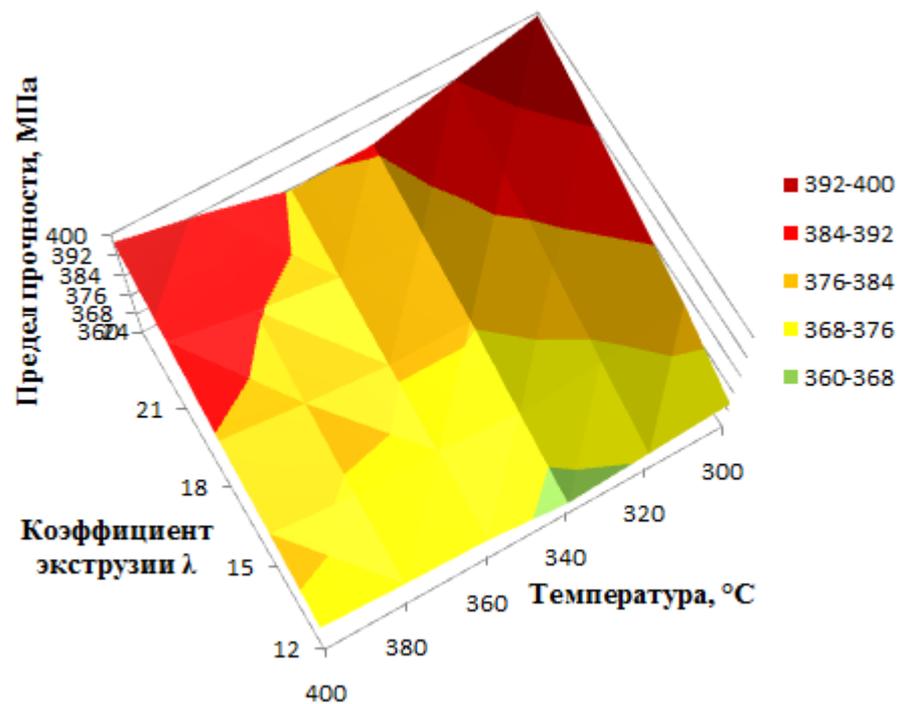


Рисунок 3.8 – Среднее арифметическое значение величин предела прочности магниевого экструдата при сжатии и растяжении

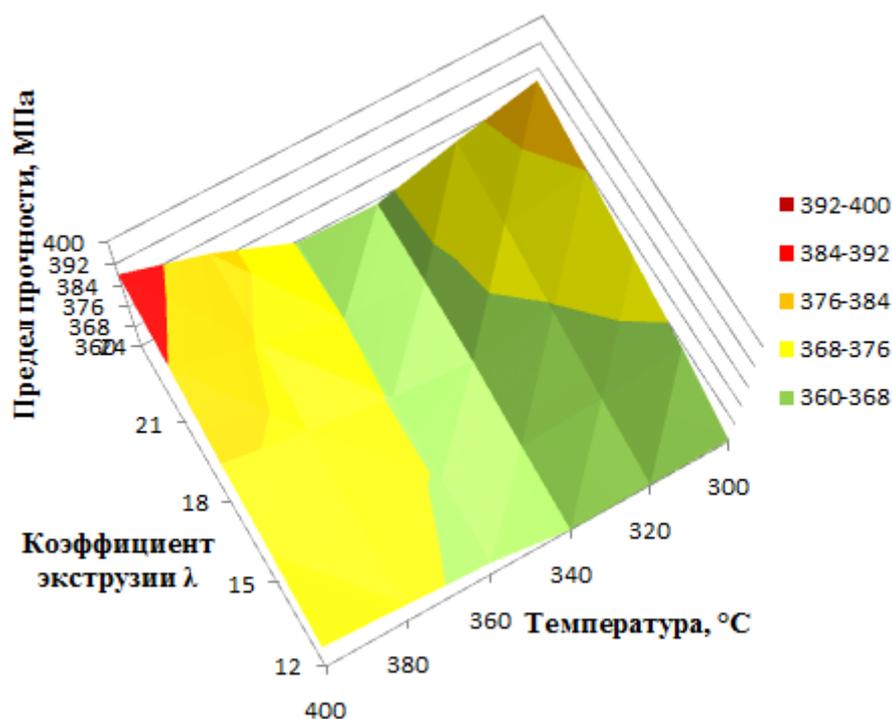


Рисунок 3.9 – Показатель среднего геометрического значения величин предела прочности магниевго экструдата при сжатии и растяжении

Совмещение значений данных поверхностей растяжения-сжатия по средней арифметической величине (рисунок 3.8) даёт двойное представление о наивысших прочностных свойствах изделий. Однако, средняя геометрическая величина этих данных (рисунок 3.9) образует на поверхности ярко выраженную область повышенных прочностных свойств при механических испытаниях. Таким образом, мы приходим к выводу, что наилучшим режимом экструзии является режим при 400 °С и коэффициент экструзии 24 ед.

3.3. Определение твёрдости

Твёрдость получившихся прутков была измерена на твердомере Zwick Roell ZHU (рисунок 3.10). Результаты определения твердости сведены в таблице 3.2.



Рисунок 3.10 – Твердомер лабораторный автоматический Zwick Roell ZHU

Таблица 3.2 – Результаты измерения твёрдости прутков сплава МА5			
№	Измерение 1, HBW	Измерение 2, HBW	Среднее значение, HBW
1	89,4	81,4	85,4
2	96,4	92,5	94,4
3	73,6	95,8	86,0
4	79,7	71,5	75,6
5	83,5	70,8	74,3
6	64,5	86,2	79,2
7	83,9	70,5	83,3
8	96,1	100,0	98,0
9	96,1	97,3	96,7

Анализ результатов показателей твёрдости из таблицы 3.2 говорит о том, что твёрдость экструдата не зависит ни от структуры, ни от степени обжатия фильерами, ни от температуры. Сами показатели твёрдости находятся в пределах от 75 до 100 МПа HBW

4. Анализ эволюции структуры

Анализ эволюции структуры экструдата проходила в несколько этапов для следующих процессов:

Исходная стружка → экструдированные прутки → отожженные прутки → прокатанные в калибрах прутки.

Определялись следующие параметры:

- пористость (процентное соотношение площади пор к площади шлифа);
- распределение размера зёрен (для визуализации использованы дифференциальные кривые);
- средний размер зерна;
- расстояние между границами стружки в продольном сечении прутков.

4.1. Пористость

Относительное содержание неметаллических включений и пор в металле шва определялось с помощью автоматизированного метода определения пор по снимкам шлифов. Значение автоматически рассчитывалось по соотношению площади пор к общей площади шлифа путем обработки фотографий шлифов с помощью алгоритмов программы MatLab. Фотографию шлифа средствами графических редакторов преобразовывали в 8-ми битное изображение (оттенки серого), а затем в MatLab конвертировали в логическую матрицу. Алгоритм поиска регионов с дополнительными возможностями отсеивания регионов по размеру, однородности и эксцентриситету позволяет с высокой степенью точности отделять неметаллические включения и поры от шумовых пятен.

Общая пористость после экструзии была вычислена и сведена в табличное значение в таблице 4.1. Для наглядности, таблица визуализирована в виде диаграммы на рисунке 4.1. На диаграмме видно, что общая пористость каждого из образцов в большей степени зависит от степени обжатия, нежели от температуры. Поэтому, для наглядного сравнения эволюции площади пористости температура принимается за константу. Таким образом мы можем свести все этапы на один график. Графики для температур 300, 350 и 400 °С представлены на рисунке 4.2 а, б и в соответственно.

Таблица 4.1 – Процентные значения пористости образцов после экструзии, отжига и прокатки в калибрах

Температура, °С	Диаметр фильер, мм		
	6	8	10
300-Э	9,9	9,5	7,7
350-Э	5,9	6,1	5,5
400-Э	3,2	4,7	4,9
300-О	9,1	8,9	7,5
350-О	5,5	5,9	5,3
400-О	2,9	4,5	4,7
300-К	6,0	5,8	4,9
350-К	3,9	4,3	3,8
400-К	2,2	3,5	3,6

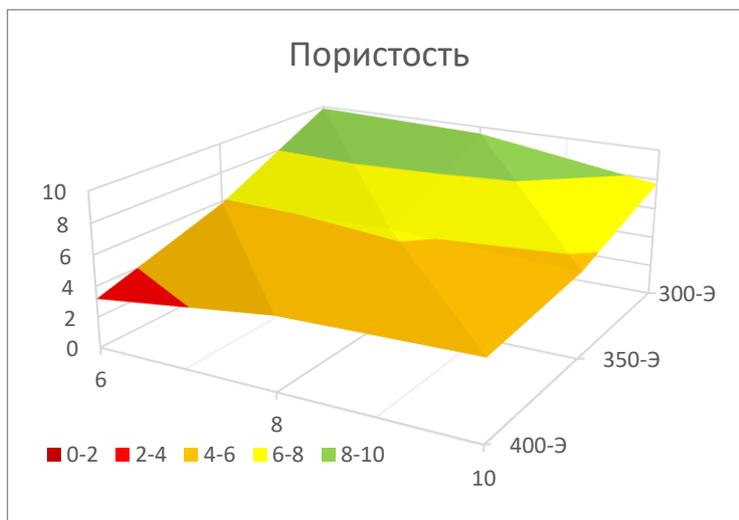
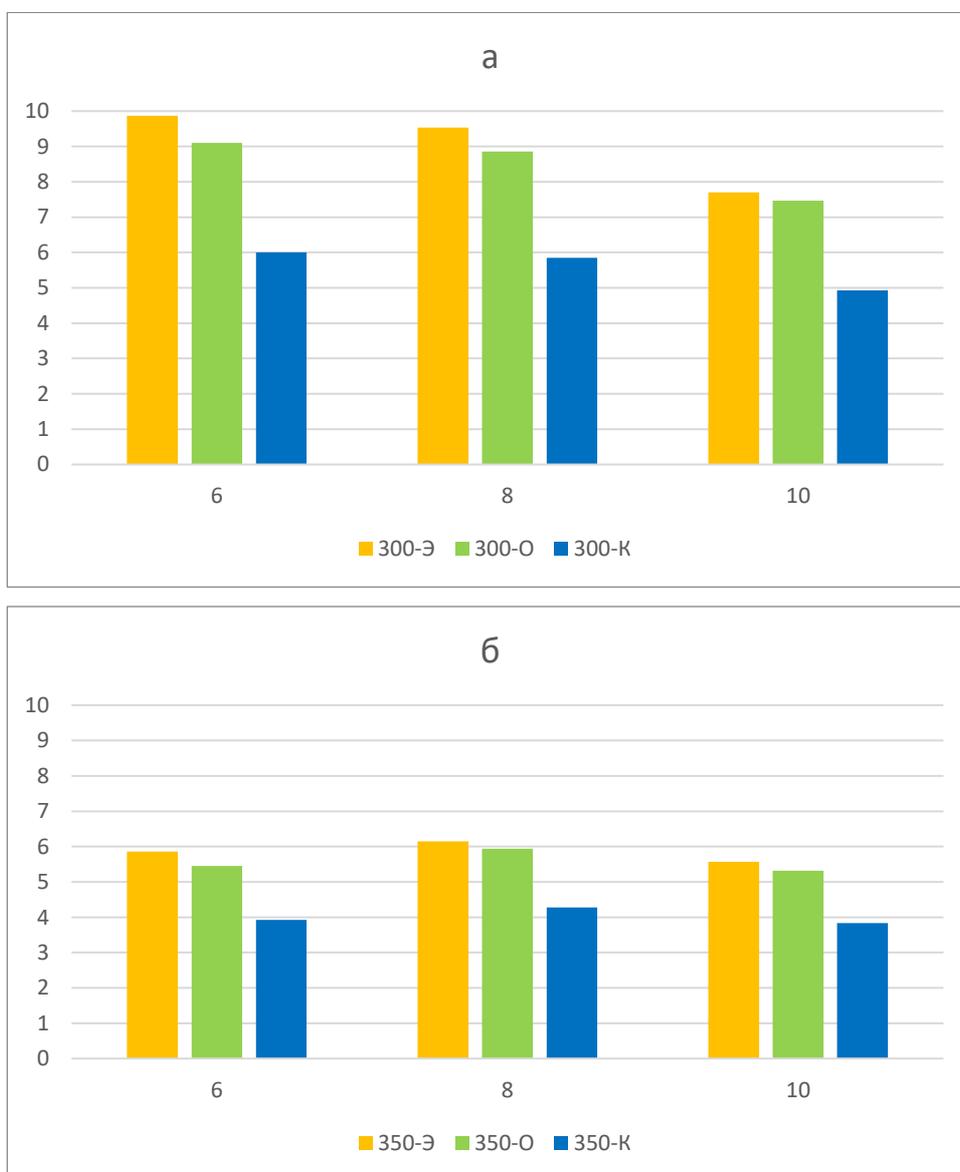


Рисунок 4.1 – Диаграмма процентного значения пористости относительно основных параметров процесса после процесса экструзии

Из графиков следует, что пористость падает примерно на 6% после отжига и на 29% (от начальной площади) после прокатки в калибрах. Однако анализ показал, что количество микропор после отжига уменьшается, когда как сами поры становятся крупнее. Из этого можно сделать вывод, что при отжиге происходит консолидация микропор.



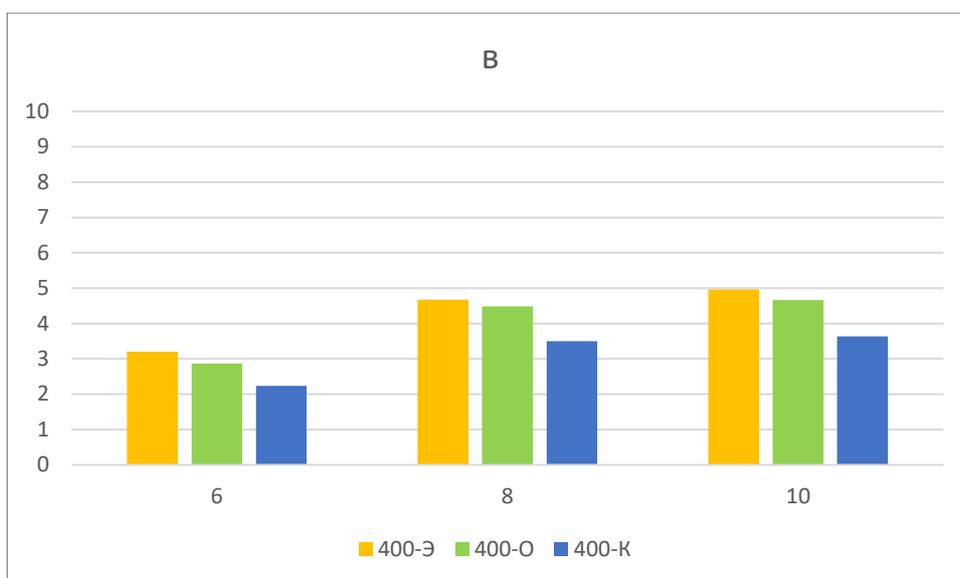


Рисунок 4.2 – Графическое отображение пористости образцов при трех этапах обработки, где а – принятая за константу температура 300 °С, б – 350 °С, в – 400 °С. Цветом обозначаются этапы: Э – экструзия, О – отжиг, К – прокатка в калибрах.

4.2. Структура зерна

Размер зерна был определен при помощи программы JMicroVision. Дифференциальные кривые размера зерна после процесса экструзии приведены на рисунке 4.3. Средний размер зёрен, включающий все этапы, приведен в таблице 4.2. Из графиков кривых и таблицы среднего размера зерна видно, что наименьший размер преобладает в значении температур 350 °С. Это говорит о том, что при температуре 300 °С ещё не достигается температура рекристаллизации, а при температуре 350 °С – начинаются зарождения новых субзёрен. Нагрева до температуры 400 °С и последующем охлаждении экструдата на воздухе достаточно, чтобы начался процесс рекристаллизации и появились более крупные зёрна.

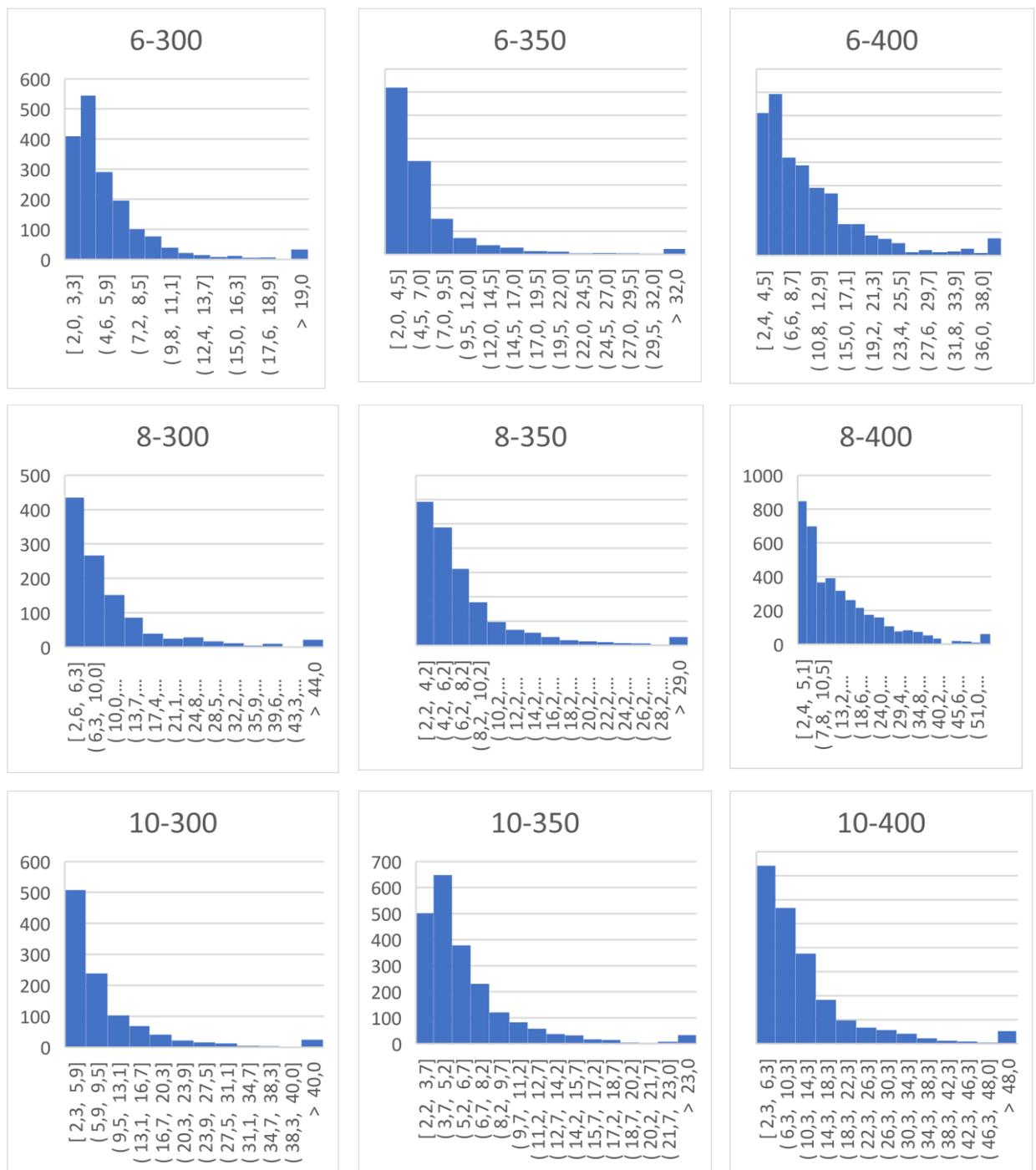


Рисунок 4.3 – Графики дифференциального распределения структуры по размеру зерна. По оси x указан размер зерна, по оси y – количество зёрен

Из таблицы 4.2 также следует, что средний размер после экструзии в большей степени зависит от температуры, а не от степени обжатия, в отличие от пористости. После отжига средний размер зерна у прутков с диаметром 8 и 10 мм становится почти равным. У прутков с диаметром 6 мм хоть и увеличивается средний размер зерна, но не достигает значений среднего

размера прутков 8 и 10 мм. Объяснить подобное поведение можно тем, что у прутков 6 мм значительно большая степень обжатия, что создает дополнительные вертикальные линии разграничения между частицами стружки (подробнее об этом в следующей главе). Показатели среднего размера зерна для всех процессов изображены на графиках а-в в рисунке 4.4.

Таблица 4.2 – Средний размер зерна экструдата

Температура, °С	Диаметр фильер, мм		
	6	8	10
300-Э	5,60	11,13	9,48
350-Э	6,83	7,77	6,56
400-Э	10,95	14,60	12,42
300-О	39,22	61,20	56,90
350-О	40,98	54,36	59,05
400-О	43,82	61,33	62,11
300-К	10,59	23,87	46,65
350-К	13,52	22,29	51,96
400-К	13,58	26,98	48,44

Прокатка в калибрах производилась с разной степенью обжатия. Площадь поперечного сечения для прутков 6 мм уменьшилась в среднем на 28%, 8 мм – на 41%, а 10 мм – на 52%. При этом средний размер зерна приблизительно выровнялся, что видно по графику на рисунке 4.4. Вероятнее всего это говорит о том, что степени обжатия 28% достаточно, чтобы полностью произошел процесс динамической рекристаллизации и началась статическая рекристаллизация с образованием новых, равноосных зёрен.

Стоит отметить, что процесс равноосного роста зёрен не наблюдается при экструзии с температурой 400 °С – зёрна при этом процессе имеют вытянутость вдоль оси экструзии металла. Данное наблюдение имеет цифровое выражение в рисунке 4.5, отображающую эксцентриситет зёрненной структуры на всех этапах протекания процессов.

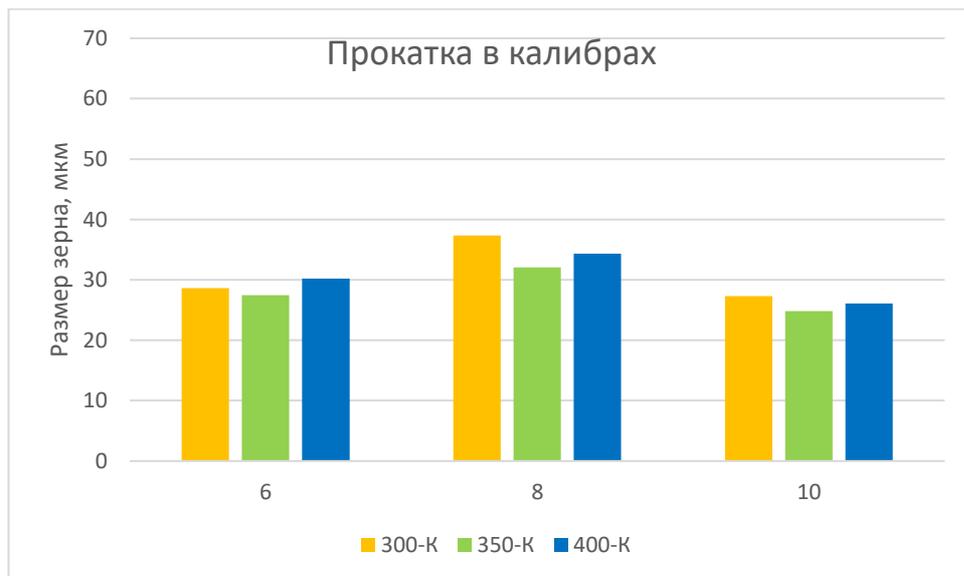
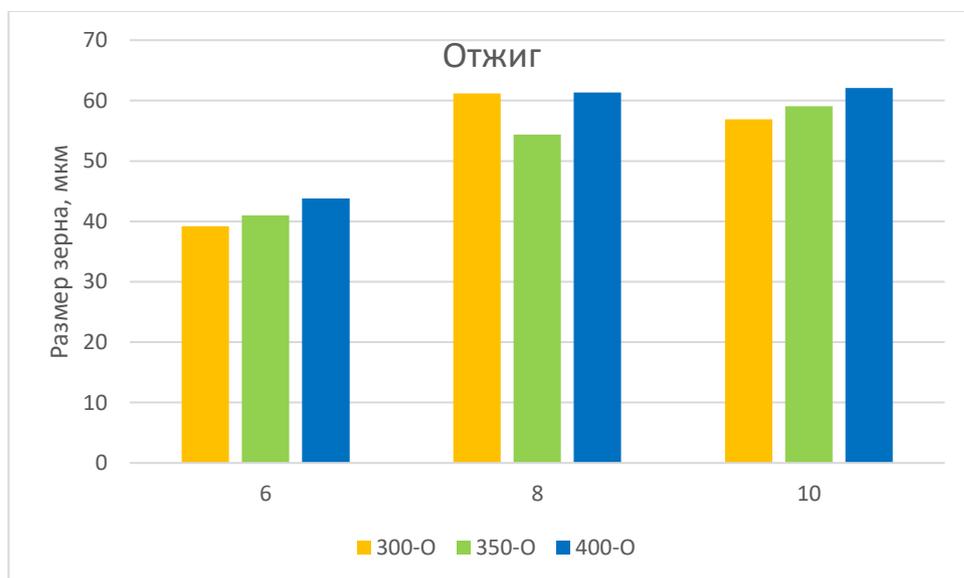
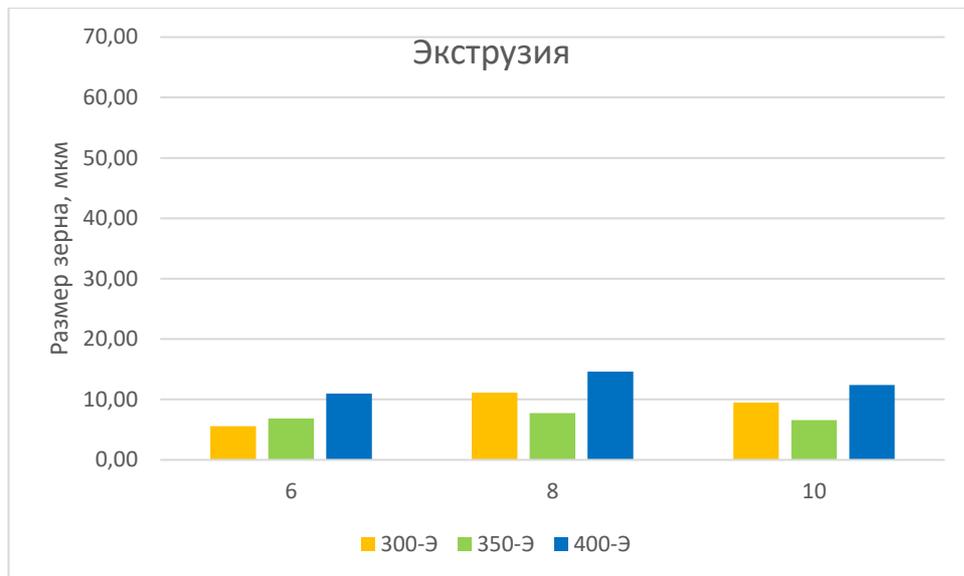


Рисунок 4.4 – Графики среднего размера зерна для всех этапов процессов обработки магниевого сплава МА5

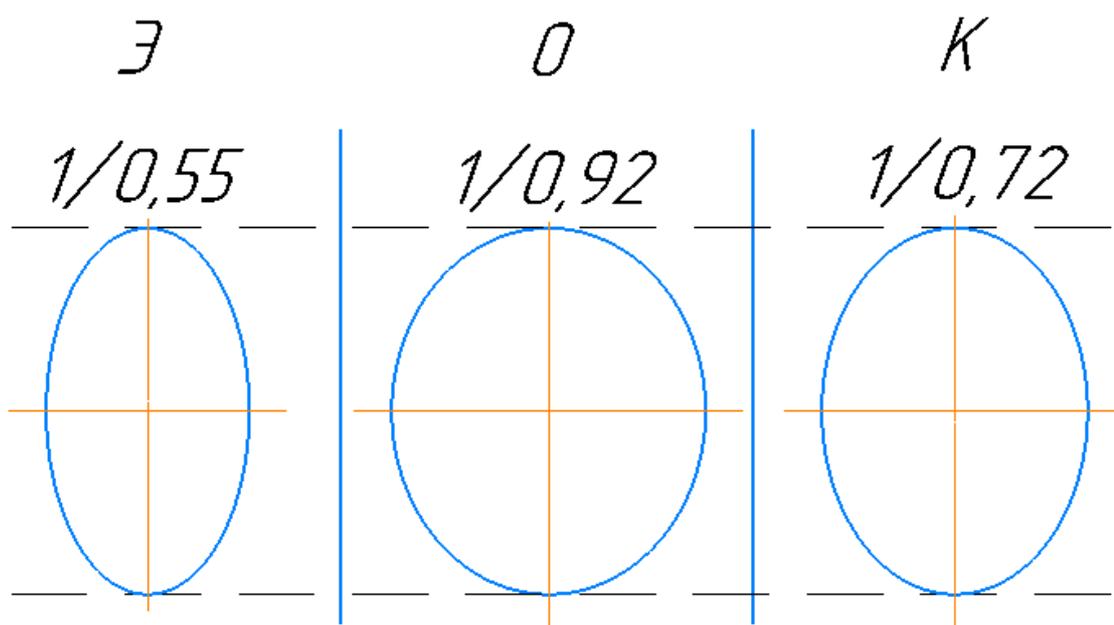


Рисунок 4.5 – Схематическое изображение среднего эксцентриситета зерна на всех этапах обработки

4.3. Межстружчатые границы

Одна из примечательных особенностей макроструктуры экструдата заключается в обнаружении остаточных межстружечных границ раздела. Примеры таких границ приведены на рисунке 4.6.

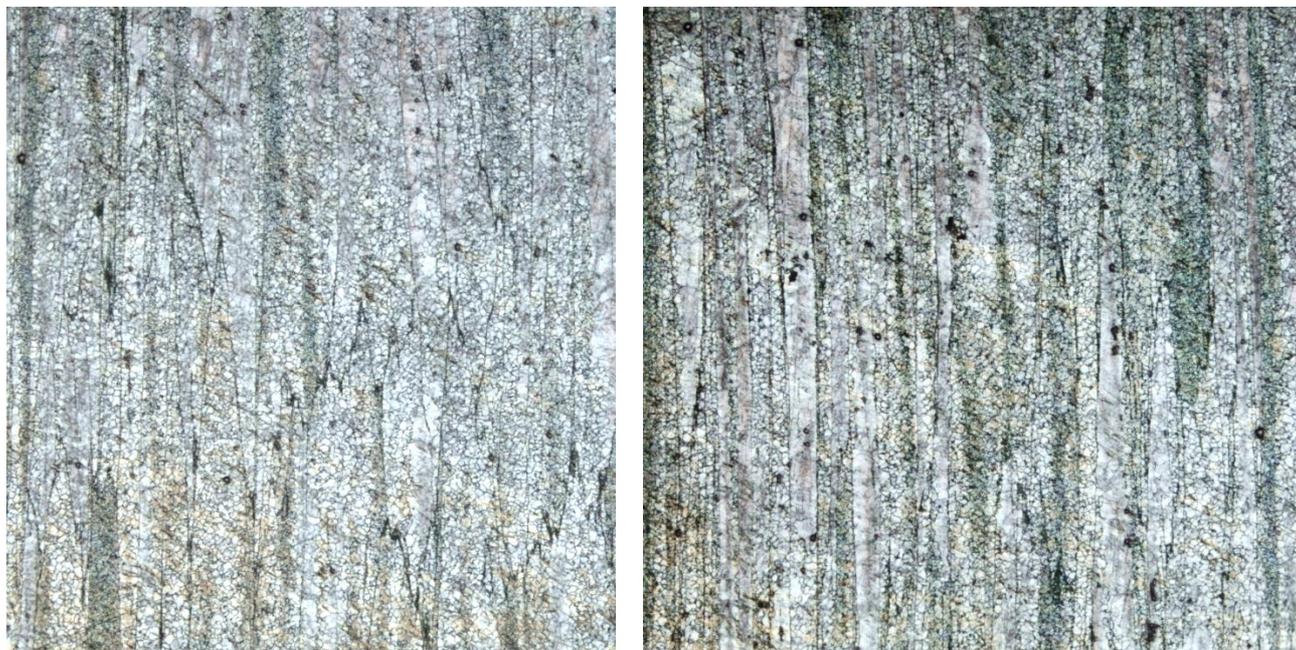
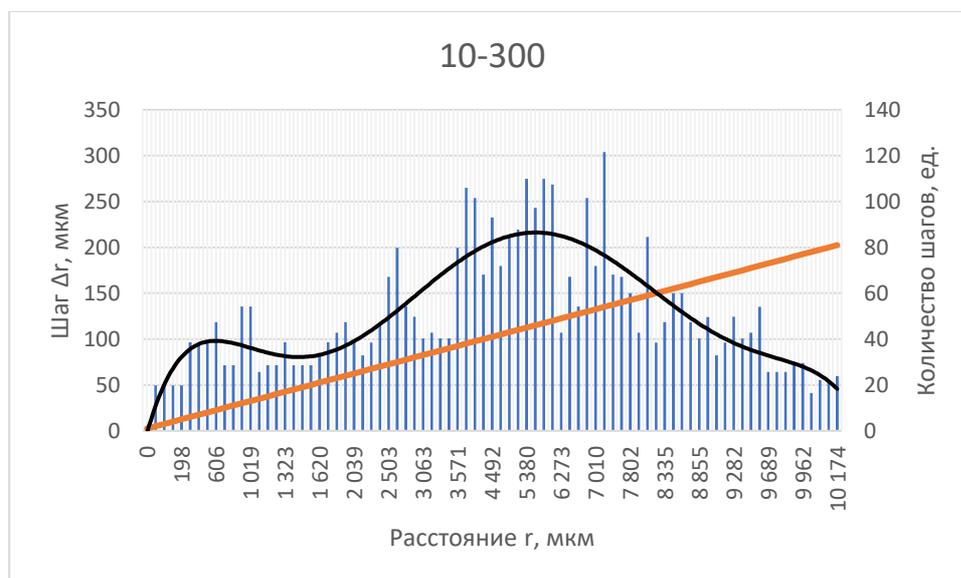


Рисунок 4.6 – Межстружечные границы раздела на примере образца 10-400Э, где слева – центральная часть экструдата, справа – краевая часть

Межстружечные границы имеют бóльшую повторяемость на границах, чем в центральной части. Это обусловлено особенностью протекания процесса экструзии, в ходе которого происходит большое диаметральное уплотнение образцов с неравномерным распределением нагрузки (и, как следствие, плотности) к центру образца, что является классической проблемой прессования порошковой металлургии. Центральная часть выпрессовываемого прутка имеет склонность двигаться чуть быстрее, чем его краевые части. В редких случаях это может приводить к V-образным дефектам отставания металла. Однако все 9 образцы в данном исследовании имеют компактную структуру без видимых дефектов. Расстояния, отделяющие межстружечные границы продемонстрированы диаграммами на рисунке 4.7. Их количество также продемонстрированы на диаграммах рисунка 4.7 и составляет 81, 92 и 126 для температур 300, 350 и 400 °С.



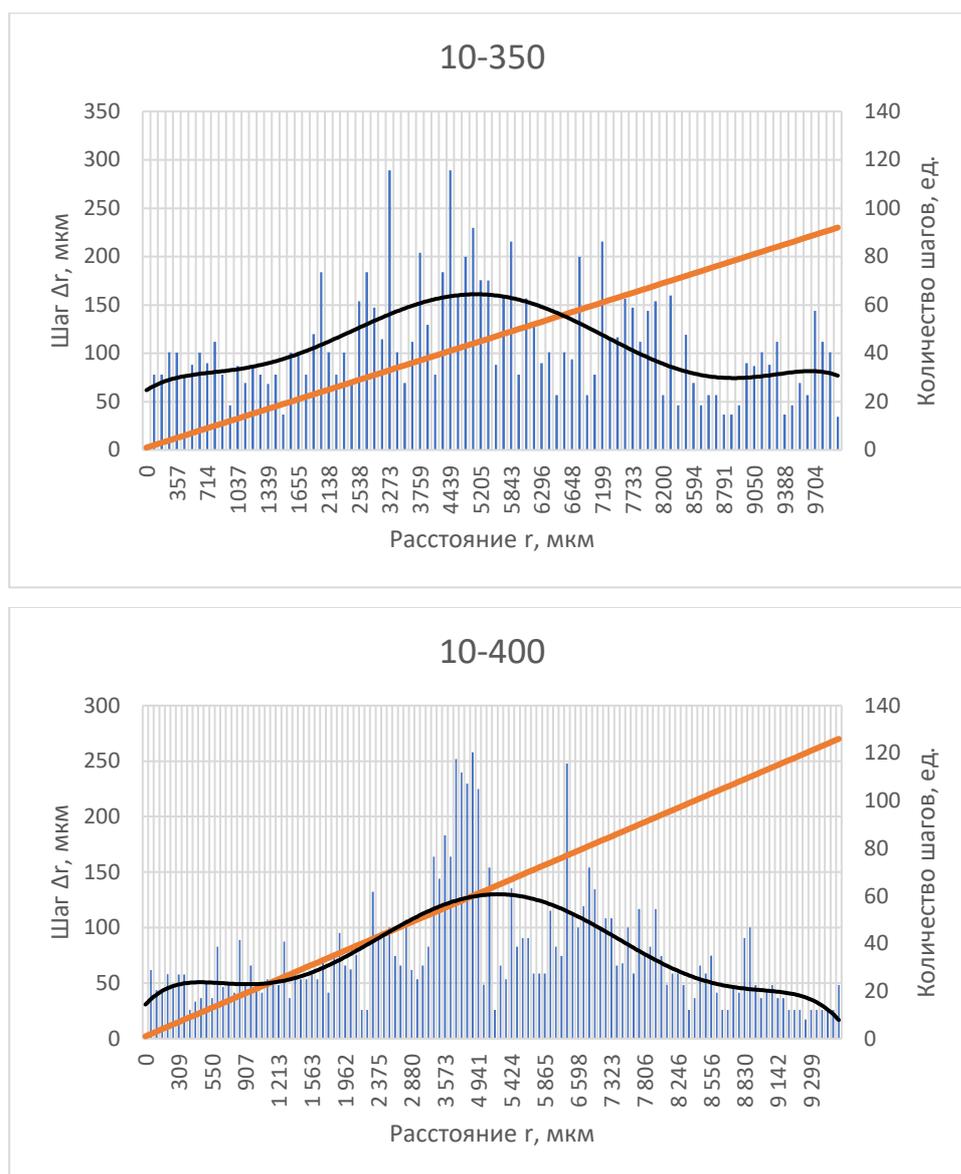


Рисунок 4.7 – Диаграммы распределения межстружчатых границ в продольном сечении образцов $d = 10$ мм

Заметно, что количество шагов и расстояние шага растёт по мере увеличения температуры. Вероятнее всего, это связано с увеличением пластичных свойств магния по мере повышения температуры протекания процесса.

На примере рисунка 4.8 видно, что такие границы значительно тормозят рост зёрен. Множество исследований подтверждает факт увеличения прочностных показателей при укрупнённом размере зерна. Поэтому в наших интересах постараться полностью или частично избавиться от межстружчатых

границ для: 1) отсутствия препятствий росту зерна; 2) созданию условий равноосного роста структуры.

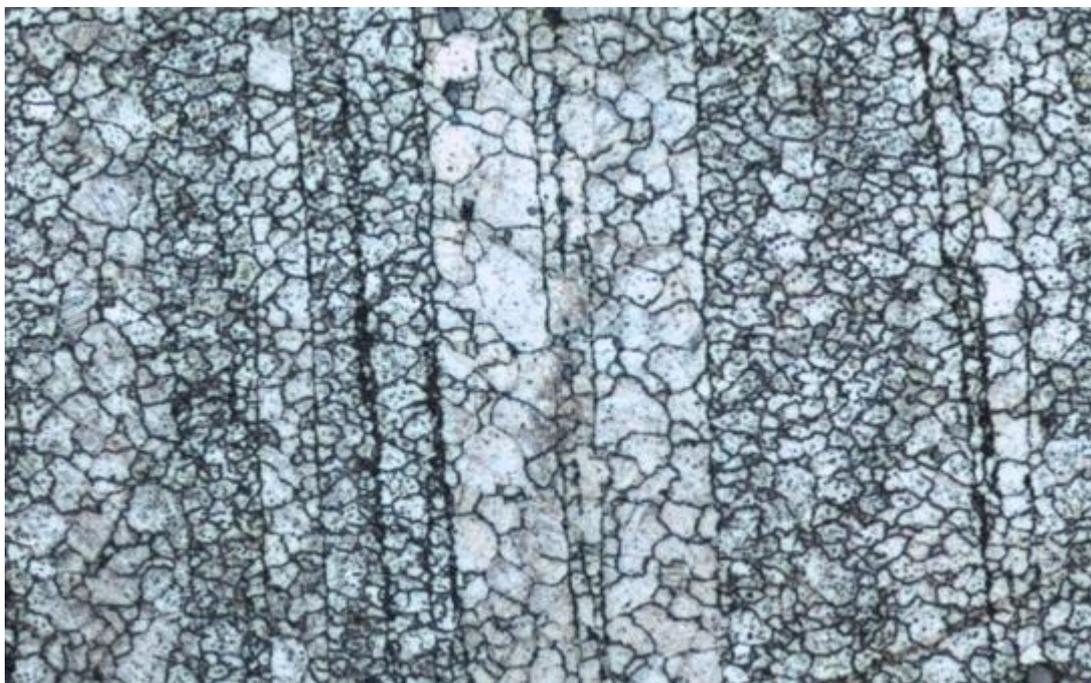


Рисунок 4.8 – Изображение торможения роста микроструктуры межстружчатыми границами

Протяженность границ вдоль оси экструзии (вытянутость одного волокна стружки) в среднем составляет 4,4 мм для прутков $d = 10$ мм, 8,6 мм для прутков 8 мм и 13,1 мм для прутков 6 мм.

Отжиг в течении 8 ч. в значительной степени помогает сократить количество межстружчатых границ и их протяженность. Пример восстановления структуры после отжига можно пронаблюдать на рисунке 4.9, где в центре изображения видны остатки межстружчатой границы. Полную протяженность границ отследить не представляется возможным ввиду фрагментации последних.

После прокатки в калибрах происходит повторное перестроение структуры и перемешивание оставшихся межстружчатых границ таким образом, что отследить их уже не удастся. Охлаждение на воздухе сопровождается равноосным ростом зерна.



Рисунок 4.9 – Пример остатка межстружчатой границы (по центру изображения), оставшейся после 8 ч. отжига экструдированного прутка

Выводы

В результате этой работы был выполнен входной контроль стружки магниевого сплава МА5 методами порошковой металлургии. Из стружки были сперва сбрикетированы, а затем экструдированы профили круглого сечения (прутки). Процесс экструзии регулировался двумя параметрами – температурой выпрессовки и степенью деформации экструдата. Получены 9 экспериментальных образцов. Проведены механические испытания прутков, в ходе которых определены временное сопротивление статическому растяжению и прочность при одноосевой осадке. Определена механическая твёрдость. Сочетательный анализ механических свойств позволил определить наилучший технологический режим по прочностным показателям: температура 400 °С и степень обжатия 24 ед.

Следующим этапом обработки стружки являлся восстанавливающий отжиг экструдата при температуре 400 °С в течение 8 ч. Заключительным, третьим этапом обработки стружки является прокатка в калибрах при температуре 350-380 °С с постепенным увеличением степени обжатия.

Основополагающим исследованием, проходящим сквозь все этапы механической и термической обработки стружки, является анализ макро- и микроструктуры. Определено: распределение размера зерна, средний показатель размера зерна, остаточная пористость, эксцентриситет, межстружчатое расстояние между границами для образцов после экструзии, отжига и прокатки в калибрах. Итого, создана база данных эволюции макро- и микроструктуры магниевого сплава МА5 из 27 образцов.

Дальнейшие исследования будут направлены на построение математической модели структурообразования при уплотнении, термической обработке и пластической деформации магниевого сплава МА5. В перспективе, такая модель будет использоваться в предпроектной подготовке технологического процесса для получения заготовок с заданной структурой, механическими свойствами и геометрическими размерами из магниевых сплавов.

**Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной
работы**

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

Механические свойства заготовок, полученных горячей экструзией магниевой стружки, Цеменко В.Н., Ганин С.В., Замоздра М.Ю. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 169-184.

Mechanical Properties of Bars Produced by Hot Extrusion of Magnesium Shavings, Zamozdra Maxim Yu., Karzina Julija S., and Perminova Anna. Key Engineering Materials 822 (September 2019): 185–92.

Structure and properties of magnesium chip blanks, Tsemenko, V., Ganin, S., Zamozdra, M., Hootack, M. (2019) Materials Today: Proceedings, 30, pp. 645-649. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.450

Публикации в других изданиях

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМПАКТИРОВАНИЯ МАГНИЕВОЙ СТРУЖКИ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИИ, М.Ю. Замоздра, С.В. Ганин, С.Ю. Петрович. Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2017): Сборник трудов международной научно – технической конференции. СПб.: Изд – во Политех. ун – та. 2017. С. 66-73.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАГОТОВОК ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИИ МАГНИЕВОЙ СТРУЖКИ, Ганин С.В., Замоздра М.Ю., Цеменко В.Н., Перспективные материалы и технологии: от изобретения до внедрения: труды Международной школы молодых ученых, 26 июня 2019 г. – СПб. : Изд- во Политехн. ун-та, 2019. – 36 с.

Аспирант _____



(подпись)

Замоздра Максим Юрьевич