

На правах рукописи

Тимченко Светлана Леонидовна

**УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ С ПОМОЩЬЮ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ**

Специальность 1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Светлана

Москва 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты:

Зайцев Александр Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И. П. Бардина», директор Научного центра физико-химических основ и технологий металлургии

Беляев Игорь Васильевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», профессор кафедры технологии машиностроения

Соломонов Константин Николаевич,
доктор технических наук, профессор, филиал ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» в г. Воронеж, профессор кафедры социально-гуманитарных, естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин

Ведущая организация:

ФГБУН Институт metallurgии и
материаловедения им. А.А. Байкова РАН
(ИМЕТ РАН)

Защита состоится «27» октября 2021 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», по адресу: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана и на сайтах <http://www.bmstu.ru>, <http://www.bmstu-kaluga.ru>

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Лоскутов Сергей Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Экспериментальное и теоретическое изучение явления воздействия электрического тока, магнитных полей на физические свойства кристаллических тел, как в твердом, так и в жидкоком состоянии имеет широкое практическое приложение. Электромагнитное воздействие обеспечивает нетепловое разупрочнение электропроводных материалов, которое выражается в снижении деформирующего усилия за счет резкого снижения сопротивления металлических кристаллов деформированию под влиянием электрического тока высокой плотности ($j \sim 10^9 \text{ A/m}^2$) в импульсном режиме (длительность импульсов $\sim 10^{-4} \text{ с}$), было названо **электропластическим эффектом**. Особенность данного эффекта заключается в том, что он проявляется только при пластической деформации материала. В 80-х годах 20 века электропластический эффект нашел применение в процессах, связанных с пластической обработкой материала, которые относятся к наукоемким производствам.

Модернизация технологических процессов, создание новых технологий требует применения дополнительных воздействий в виде физических полей. Получение изделий с заданными физическими, эксплуатационными свойствами, характеристиками структуры материала предполагает выработку критериев их достижения на основе детального анализа физической природы и свойств конденсированных сред. Это позволит решить задачи современного производства по развитию технологий, технологических процессов, приспособленных к реализации на практике, открытых к развитию и совершенствованию. Влияние электрического тока на формирование свойств литых изделий из алюминиевых сплавов, черных металлов в России изучали А.И. Батышев, В.Б. Деев и многие другие ученые. Одним из путей решения данной задачи является согласованное совмещение технологических операций по получению формы изделия с использованием дополнительного внешнего воздействия в виде электрического и магнитного полей. Это позволит создать требуемый уровень свойств изделия за счет формирования изменений в структуре его материала в процессе изготовления в присутствии внешнего воздействия.

Степень разработанности темы

Первые экспериментальные исследования влияния электрического тока на физические свойства металлов были проведены в 1844 г. G. Wertheim, который доказал нетепловое влияние тока плотностью $j \sim 10^7 - 10^8 \text{ A/m}^2$ на модуль упругости различных металлов. Спустя 125 лет О.А. Троицкий, Н. Conrad и др. наблюдали электропластический эффект - нетепловое разупрочнение проводящих материалов, выраженное в снижении деформирующего усилия под влиянием электрического тока высокой плотности. Эффект нашел свое применение в процессах, связанных с пластической обработкой материалов и сплавов. Эффект проявлялся в виде характерных сбросов деформирующего усилия на диаграммах растяжения - сжатия монокристаллов или скачков деформации, что связано со скоплением достаточного количества дислокаций, движение которых может быть

зарегистрировано посредством скачка деформирующего усилия и указывает на нетепловое, анизотропное действие электрического тока. Электрический ток вызывает преобразование структуры при пластической деформации. Наличие примесей и увеличение их концентрации приводило к возрастанию скачка дополнительного механического напряжения под действием тока. Это объясняется потерей устойчивости большего числа дислокаций под действием тока. При легировании кристаллов повышается однородность сдвигового образования и уменьшается эффективная величина областей локализации незавершенных сдвигов.

Было установлено влияние постоянного электрического тока на характерный параметр процесса рекристаллизации – температуру рекристаллизации, а также на размер зерен и твердость после завершения процесса рекристаллизации. С увеличением плотности тока температура рекристаллизации уменьшается, при этом размер зерна также уменьшается, а твердость увеличивается.

Активно изучали физическую природу воздействия электрического тока высокой плотности на физические свойства металлов и при построении физических моделей учитывали вклад воздействия тока в механически напряженное состояние проводников, среди них В.Л. Гинзбург, В.Б. Фикс, Я.И. Френкель, В.М. Конторович, В.В. Сидоренков и др.

Наряду с влиянием электрического тока на процессы пластического деформирования материала, рекристаллизацию, исследовалось также его влияние на процесс, связанный с фазовым превращением – кристаллизацию сплавов. Начиная с 70-х годов 20 века усилиями ученых, А.И. Батышева, В.Б. Деева, А.В. Дорофеева, А.Б. Килина, И.Ю. Кольчугиной, И.Ф. Селянина, и др. велись экспериментальные исследования по применению воздействия электрического тока на свойства сплавов в процессе кристаллизации отливок.

В настоящее время задачи по созданию способов управления структурой и свойствами сплавов, выбору составляющих технологического процесса изготовления литых изделий по-прежнему являются актуальными и практически востребованными. Электрический ток и магнитное поле оказывают влияние на эксплуатационные свойства различных сплавов. Модифицированием сплавов в режиме пропускания через расплав электрического тока, наложением электромагнитных полей, ультразвуковым воздействием, обуславливают изменение кристаллической структуры отливок, уменьшают пористость. Применение такого дополнительного воздействия приводит к улучшению эксплуатационных свойств материала. Существует связь между изменениями параметров структуры под действием электрического тока и физическими свойствами материала. В эвтектических сплавах наблюдается измельчение, диспергирование эвтектики. Экспериментально доказано, что преимущественное влияние оказывает ток постоянный по сравнению с переменным током промышленной частоты.

Диссертационная работа содержит результаты экспериментального исследования состояния и свойств конденсированных веществ (металлы и сплавы) в условиях электромагнитного воздействия. Для исследования

результатов нетеплового действия электрического тока и магнитного поля на физические свойства металлов и их соединений были использованы методы ферромагнитного резонанса (ФМР) и магниторезистивного эффекта (МРЭ). В работе исследовалось применение внешнего воздействия - постоянного и импульсного электрического тока, магнитного поля на процесс кристаллизации алюминиевых сплавов, в результате которого был, достигнут положительный результат: обнаружены изменения в структуре сплава, уменьшился размер дендритной ячейки, увеличилась твердость и плотность сплава, возникла дополнительная структурная анизотропия и связанная с ней анизотропия электросопротивления.

Несмотря на значительное количество исследований, подтверждающих не тепловое, механическое действие электрического тока и магнитного поля на процесс пластического деформирования материалов, свойства сплавов, полученных в процессе их кристаллизации, отсутствуют исследования наблюдаемых закономерностей для физических величин, параметров структуры, связанных с дополнительным воздействием электрических и магнитных полей. До настоящего времени не создано единой физической модели, описывающей результаты электромагнитного воздействия. Поэтому исследование физических свойств металлов и их сплавов при внешних воздействиях весьма значимы в контексте создания проводящей среды с управляемыми физическими характеристиками, а изучение процессов, происходящих в металлах и сплавах в твердом и жидком состоянии, представляется **актуальным**.

Цель работы: исследование физической природы процессов, происходящих в электропроводных средах в твердом, жидком состояниях и в состоянии фазового перехода, возможности изменения структуры материала, физических и эксплуатационных свойств при воздействии электрического и магнитных полей. Исследования диссертационной работы направлены на создание методов управления физическими свойствами электропроводных материалов, а также на модернизацию технологических процессов, в которых внешнее электромагнитное воздействие является определяющим фактором, дающим возможность управления параметрами процессов формирования свойств материала и содержит исследование закономерностей для физических величин, параметров структуры, связанных с применяемым воздействием в электропроводных кристаллических структурах, исследование процессов, происходящих в металлах и сплавах в твердом и жидком состоянии при пропускании электрического тока.

Задачи исследования:

- 1.Исследовать влияние электрического тока высокой плотности и магнитного поля на магнетосопротивление ферромагнетика с помощью магниторезистивного эффекта.
- 2.Исследовать влияние электрического тока высокой плотности и магнитного поля на высокочастотные свойства ферромагнетиков с помощью ферромагнитного резонанса.

- 3.Сформировать физические модели проводящих сред, находящихся под действием электрического тока и магнитного поля в условиях магниторезистивного эффекта и ферромагнитного резонанса.
- 4.Исследовать особенности вольтамперных характеристик проводников при высокой плотности тока, вплоть до $j_{max} \sim 2 \cdot 10^9$ А/м², механической деформации проводников в условиях интенсивного охлаждения для выработки физической модели проводника в данных условиях и практического применения результатов исследования.
- 5.Создать установку для изучения влияния электрического тока на процесс формирования кристаллической структуры фасонной отливки при ее кристаллизации под действием электрического тока.
- 6.Провести комплексное исследование возможности управления формированием кристаллического строения отливок из алюминиевых сплавов с помощью электрического тока.
- 7.Выявить основные закономерности влияния электрического тока, пропускаемого при кристаллизации сплавов на структуру, физические и эксплуатационные свойства алюминиевых сплавов.

Научная новизна

1. Экспериментально установлен обобщенный закон электропроводности металлов при высоких плотностях тока.
2. Экспериментально установлена функциональная связь между напряженностью электрического поля и относительной деформацией проводника.
3. Построена модель, описывающая движение фронта кристаллизации при использовании электрического тока, которая позволяет объяснить временную зависимость падения напряжения на образце, а также контролировать процесс кристаллизации сплава.
4. Разработаны физические модели, объясняющие влияние электрического тока и магнитного поля на физические свойства электропроводного материала в состоянии фазового перехода.

Практическая ценность

1. Сформулированы технические рекомендации по использованию воздействия электрического тока при создании проводящих сред с управляемыми физическими характеристиками.
2. В рамках теории пластического деформирования под действием электрического тока проведена оценка количества дислокаций, участвующих в структурных превращениях и разработан метод расчета энергии, выделяемой при перестройке дислокационной структуры, основанный на анализе вольтамперных характеристик проводников.
3. Разработан метод изготовления фасонной отливки, в котором использовано действие электрического тока ($10^5 - 10^9$ А/м²) на материал в процессе его кристаллизации, что дает возможность обратимо изменять соотношение твердой и жидкой фаз при затвердевании отливки.

4. Экспериментально доказано, что максимальное влияние на формирование структуры и физические свойства электропроводного сплава электрический ток оказывает на этапе фазового перехода сплава.

5. Разработана физическая модель эффекта влияния электрического тока на структуру и свойства алюминиевых сплавов, осуществляемого на этапе фазового перехода сплава.

6. Предложен путь совмещения технологического процесса и электромагнитного воздействия, позволяющий создавать высокоэффективные инновационные технологии процессы по изготовлению микроизделий, в частности разработан способ электромагнитоимпульсного заполнения микроформ расплавом.

7. Получен новый безразмерный критерий образования микропористости в отливках, пригодный в цеховой практике, и практике компьютерного моделирования формирования отливки, учитывающий не только термические условия процесса затвердевания, но и технологические параметры.

Результаты диссертационной работы, а именно:

- применение критерия для оценки газовой пористости в фасонных отливках из алюминиевых сплавов;
- использование метода изготовления фасонных отливок из алюминиевых сплавов (*AK 12, AK12M2MgH*) кристаллизация которых осуществляется в песчаных формах под действием постоянного и импульсного электрического тока;
- механизм уменьшения пористости в отливках при кристаллизации сплавов под действием электрического тока

были использованы в деятельности ООО «Пульсатор» г. Курган, что подтверждается актом об использовании. Применение указанных результатов позволило оптимизировать время техпроцесса изготовления литых изделий, обеспечивает заданный уровень эксплуатационных свойств отливок из алюминиевых сплавов и позволяет совершенствовать литейные технологии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обратимый характер влияния электрического тока на параметры ферромагнитного резонанса в пленках пермаллоя (*86Ni14Fe* толщиной 1 мкм на стеклянной подложке) с большим значением поля наведенной магнитной анизотропии ($H_k \sim 1600$ А/м), где электрический ток пропускался ортогонально оси легкого намагничивания и с малым полем наведенной магнитной анизотропии ($H_k \sim 160$ А/м), где электрический ток пропускался вдоль оси легкого намагничивания при различной ориентации поля подмагничивания H_o относительно оси легкого намагничивания. Установлено, что при $\theta \approx 30^\circ$ пропускание тока в пленке ($j = (0,2 \dots 2) \cdot 10^9$ А/м²) не влияло на величину резонансного поля H_r .

2. Методика расчета характеристик ферромагнитного резонанса в тонких магнитных пленках с угловой дисперсией (α_0) поля магнитной анизотропии

(H_k) на основе статистической модели магнитоневзаимодействующих блоков.

3. Аномальное возрастание величины магниторезистивного эффекта в фольгах поликристаллического Ni при пропускании электрического тока плотностью $j \approx (0,5 - 5) \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ при внешнем магнитном поле $H_0 = 0,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}$ и при воздействии внешним магнитным полем ($H_0 = (0,5 - 6) \cdot 10^5 \text{ A/m}$) при фиксированном токе в образце.

4. Количественный метод расчета энергии, выделяемой при перестройке дислокационной структуры, основанный на анализе вольт-амперных характеристик проводников при высоких плотностях тока ($j > 10^8 \text{ A/m}^2$).

5. Способ управления процессом формирования фасонных отливок, позволяющий за счет воздействия постоянного и импульсного электрического тока на электропроводный материал в процессе его кристаллизации, обратимо изменять соотношение твердой и жидкой фаз, что делает возможным регулирование времени фазового перехода, поддерживать во времени существование данного агрегатного состояния материала.

6. Способ контроля процесса кристаллизации и определение интегральной скорости процесса кристаллизации, а также времени фазового перехода по измерению временной зависимости падения напряжения на образце.

7. Механизм уменьшения пористости в отливках при кристаллизации сплавов под действием электрического тока.

8. Новый критерий для оценки вероятности образования микропористости в отливках, имеющий безразмерную форму и учитывающий, как термические условия процесса затвердевания, так и технологические параметры.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в данной работе, обеспечивается:

- применением современных методов исследования магнитных и электрических свойств ферромагнетиков;
- разработкой установки для реализации способа изготовления литого изделия при пропускании электрического тока;
- применением современных методов исследования химического состава, структуры, свойств литьевых сплавов;
- применением традиционной методики измерения эксплуатационных свойств литьевых сплавов.

При этом методика эксперимента была усовершенствована использованием ряда устройств, автоматически исключающих систематические ошибки, которые ранее исключались вручную или не учитывались вовсе. Достоверность полученных экспериментальных результатов обеспечивается корректностью постановки решаемых задач, их физической обоснованностью, большим объемом экспериментальных данных, полученных с помощью сертифицированного оборудования и апробированных, современных методов исследования физических и эксплуатационных свойств, структуры материала образцов. Результаты

работы подтверждаются их воспроизводимостью и согласованностью между собой.

Методология и методы исследования

Экспериментальные методы: оптическая микроскопия (Leika DM ILM); измерение удельного электросопротивления; ферромагнитный резонанс; магниторезистивный эффект; параметры структуры сплава (дендритный параметр, площадь α – твердого раствора, микропористость) были определены с помощью компьютерной программы анализа изображений (Qwin); метод определения твердости по Бринеллю - Wilson Wolpert Universal Testor 930; метод определения твердости по Виккерсу – универсальный твердомер DuraScan 20 G5; химический анализ сплавов - атомно-эмиссионный спектрометр с лазерным возбуждением «LAES MATRIX»; рентгеноструктурный анализ (ДРОН 4-07); методы измерения плотности сплава; метод гидростатического взвешивания (весы ВЛР-200).

Расчетные методы: регрессионный анализ; методы математической статистики. Для выполнения расчетов использованы программы: Mathcad, Maple, Excel.

Личный вклад автора. Автором сформулировано содержание научной проблемы, выполнена постановка и решение ее задач, создана установка по исследованию магнитных свойств ферромагнетиков методом магниторезистивного эффекта, проведены исследования электрических свойств анизотропных тонких магнитных пленок, создана установка по кристаллизации алюминиевых сплавов в присутствии электрического тока, проведено исследование свойств и параметров структуры алюминиевых сплавов, кристаллизация которых происходила при воздействии электрического тока. Проведена обработка, апробация и анализ полученных результатов.

Приоритет автора зафиксирован в четырех авторских свидетельствах и одном патенте.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на: XVI, XVII Всесоюзных школах-семинарах «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (МГУ, Москва –1998, 2000). V – ой, VII – ой Международной конференции “Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов” (Воронеж, Россия, 2003, 2007), XXII – ой Международный семинар «Физико-математическое моделирование систем» (ФММС-22, Воронеж, 2020), IV-ой, VI-ой, VII-ой, X-ой, XI-ой Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (2007, 2011, 2013, 2019, 2021 НППТ, Москва, Россия), 1-ой международной конференция по композиционным материалам «Advance in Composite Science and Technologies» 5-8 декабря 2018 года, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации автора. Основное содержание работы изложено в 43 печатных работах [1-43], из которых [1-19] – научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов научных работ соискателей ученой степени доктора

наук, [6,7,11,15,16] - статьи в Scopus, [22-38] – статьи в трудах конференций, [20-21] – статьи в прочих печатных изданиях, [39-43] – авторские свидетельства и патенты.

Фундаментальная и практическая значимость работы. Работа направлена на экспериментальное исследование общих закономерностей, определяющих взаимосвязь физических и эксплуатационных свойств металлов и их сплавов с воздействием электрического тока и магнитного поля, которое осуществляется в твердом состоянии, а также в состоянии фазового перехода. Данные исследования актуальны для физики конденсированного состояния, материаловедения, современных научноемких технологий.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, заключения, списка использованных источников и приложений, включающих документы об использовании результатов работы. Полный объем диссертации - 290 страниц, включая 84 рисунка, 16 таблиц и библиографию из 167 наименований.

Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, приведены цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности, вклад автора и апробация результатов исследования, сформулированы задачи исследования.

Первая глава содержит обзор литературы по результатам исследования электропластического эффекта, рекристаллизации металлов и сплавов. Показано преимущество воздействия электрического тока на процесс кристаллизации литьевых сплавов.

Во второй главе представлены результаты экспериментального исследования электропластического деформирования металлов при высоких плотностях электрического тока $j > 10^8 \text{ A/m}^2$ и проведен их анализ, установлена аналитическая форма закона электропроводности металлов при высокой плотности тока. В результате анализа ВАХ (вольтамперные характеристики) проводников рассчитана энергия, выделяемая при перестройке дислокационной структуры. В рамках теории пластического деформирования под действием электрического тока, «модели электронного ветра», была проведена оценка количества дислокаций, участвующих в структурных превращениях. Учтено влияние магнитного поля тока на перемещение вакансий в твердом теле.

При исследовании электрических свойств структурно неоднородных проводников при токах плотностью $j \leq 10^9 \text{ A/m}^2$, в условиях интенсивного охлаждения, достаточной для осуществления процесса необратимого, не термоактивируемого деформирования, показана возможность косвенного наблюдения структурных изменений в проводящих средах через их влияние на электросопротивление проводников. Энергия, запасенная в дефектах структуры, и выделяющаяся при обработке электрическим током образцов (никелевая фольга, медная проволока), была рассчитана с помощью анализа ВАХ образцов. Мощность, выделяемая при удалении дислокаций:

$\Delta P = \Delta N \cdot P_0$, где ΔN – количество дислокаций, а энергия, требуемая на движение одной дислокации в расчете на единицу времени - $P_0 \cdot \Delta t = E_0$. Изменение энергии всей системы: $\Delta E = \Delta N \cdot P_0 \cdot \Delta t$. Предполагая, что все структурные изменения связаны с движением дислокаций, количество дислокаций ΔN в единицу времени, которые были подвергнуты действию электрического тока и участвовали в перестройке дислокационной структуры, определяли, как:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{\Delta P}{E_0} \quad (1)$$

Согласно оценке количество дислокаций, пришедшее в движение под действием электрического тока в единицу времени для никелевой фольги составило - $\frac{\Delta N}{\Delta t} \approx 9,8 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$. Изменение электрической мощности составило $\Delta P = 1,58 \text{ Дж/с}$.

В результате исследования процесса электропроводности металлических проводников (медная проволока, никелевая фольга) при высокой плотности тока в условиях, близких к изотермическим установлена аналитическая форма закона электропроводности металлов, связь напряженности электрического поля E и плотности тока j :

$$E(j) = \rho(j)j = a j + b j^2, \quad (2)$$

где $a \equiv \rho_0$ - удельное электрическое сопротивление материала при $j \rightarrow 0$, b – некоторая положительная константа, определяемая физическими свойствами образца.

При измерении удлинений образцов, было установлено, что гальваномеханические деформации ξ пропорциональны плотности тока:

$$\xi(j) = \gamma j, \quad (3)$$

где коэффициент $\gamma = \frac{b \alpha_T}{\rho_0 \alpha_\rho}$ был назван *гальваномеханическим коэффициентом*, α_ρ и α_T - температурные коэффициенты удельного электросопротивления и линейного удлинения проводника.

Связь между напряженностью электрического поля в металле и его гальваномеханическими деформациями:

$$E(\xi_j) = \frac{\rho_0}{\gamma} \xi_j + \frac{\rho_0 \alpha_\rho}{\gamma \alpha_T} \xi_j^2, \quad (4)$$

В полученной зависимости $E(\xi_j)$ заметна определенная аналогия с пьезоэлектрическим эффектом в диэлектриках. Однако, в отличие от пьезоэффекта, который существует только в нецентросимметричных кристаллах, эффект, описываемый выражением (4), наблюдается в металлах произвольной сингонии. Данный феномен был условно назван "электроупругим эффектом".

Численные оценки коэффициентов при ξ_j показывают, что для упругих деформаций металла ($\xi \ll 10^{-4}$) первое слагаемое в (4) по крайней мере на два порядка больше второго, а потому при небольших значениях плотности

тока ($j \leq 3 \cdot 10^7$ А/м²) получается линейная зависимость напряженности электрического поля от гальваномеханических деформаций в виде закона $E(\xi_j) = d\xi_j$, где коэффициент $d = \rho_o / \gamma$ был назван *электроупругим модулем* металла (для меди $d \cong 2,6 \cdot 10^4$ В/м).

В третьей главе содержатся результаты экспериментального исследования влияния электрического тока на параметры ФМР в тонких магнитных пленках (ТМП) и на величину МРЭ в фольгах поликристаллического никеля.

Для доказательства обратимого влияния электрического тока на магнитные свойства ферромагнетиков в условиях интенсивного охлаждения был использован метод ФМР и измерены параметры ФМР в ТМП. Были рассмотрены линии резонансного поглощения при ФМР ($v \sim 2,4 \cdot 10^9$ Гц) в пермаллоевой пленке ($86Ni14Fe$ толщиной 1 мкм на стеклянной подложке) с *большим значением поля наведенной магнитной анизотропии* ($H_k \sim 1600$ А/м), где электрический ток пропускался *ортогонально* оси легкого намагничивания (ОЛН). При плотности тока $j \geq 2 \cdot 10^8$ А/м² наблюдалось изменение величины резонансного поля H_r , которое с ростом тока убывало или возрастало (не более $\pm 15\%$) в зависимости от угла θ между полем подмагничивания H_o и ОЛН. Изменение величины резонансного поля было связано только с действием электрического тока высокой плотности и наблюдалось при $j \geq 2 \cdot 10^8$ А/м² в условиях интенсивного охлаждения в среде жидкого азота. При этом амплитуда линий ФМР плавно уменьшалась (максимально в 1,5 - 2 раза), а эффективное поле анизотропии H_k^{ef} , измеренное методом ФМР, снижалось (на 10 - 20 %). При $\theta \approx 20$ - 25° изменение резонансного поля под действием тока отсутствовало.

Также были рассмотрены линии резонансного поглощения при ФМР ($v \sim 2,4 \cdot 10^9$ Гц) в пермаллоевой пленке с аналогичным составом, но с *малым полем наведенной магнитной анизотропии* ($H_k \sim 160$ А/м), где электрический ток пропускался *вдоль* ОЛН при различной ориентации поля подмагничивания H_o относительно ОЛН. При $\theta = 0^\circ$ наличие электрического тока ($j = (0,2 \dots 2) \cdot 10^9$ А/м²) приводило к сдвигу по полю линии ФМР так, что с ростом плотности тока j значение резонансного поля H_r снижалось. При ортогональной ориентации ОЛН ($\theta = 90^\circ$) с ростом j поле H_r возрастало. При $j = 2 \cdot 10^9$ А/м² измеренное методом ФМР максимальное значение поля эффективной магнитной анизотропии составляло $H_k^{ef} \sim 640$ А/м, то есть $H_k^{ef} / H_k \sim 4$. Существенно, что при $\theta \approx 30^\circ$ пропускание тока в пленке ($j = (0,2 \dots 2) \cdot 10^9$ А/м²) не влияло на величину резонансного поля H_r .

Установлено, что во всех рассмотренных случаях влияние электрического тока на параметры ФМР в ТМП имеет динамический (обратимый) характер, так как после выключения тока значения параметров ФМР возвращались к исходным.

Для объяснения влияния электрического тока высокой плотности, пропускаемого в металлических ТМП на параметры ФМР в указанных пленках, была использована статистическая модель

магнитоневзаимодействующих блоков. В этом случае, учитывая поликристаллическое строение исследуемых образцов, результаты этих экспериментов можно объяснить наличием в ТМП угловой дисперсии $\alpha_0(j)$ (разброса) поля магнитной анизотропии H_k , зависящей от плотности электрического тока j в образце.

Локальная восприимчивость блока в зависимости от частоты ω описана соотношением, справедливым для одноосной пленки:

$$\chi''_l = \frac{\gamma^2 M^2 \cos\varphi_p}{\omega\lambda} \left[1 + \left(\frac{\omega_r}{4\pi\lambda} \right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2 \right]^{-1} \quad (5)$$

где $\omega_r^2 = 4\pi\gamma M [H_0 \cos\varphi_p + H_k \cos 2(\theta - \alpha - \varphi_p)]$ - квадрат резонансной частоты блока. Здесь γ - гиromагнитное отношение; λ - параметр затухания; θ - угол между средней ОЛН пленки и внешним подмагничивающим полем H_0 в плоскости образца; H_k - поле наведенной магнитной анизотропии; угол α задает ориентацию локальной ОЛН в блоке пленки, а φ_p - равновесный угол между вектором намагниченности M и полем подмагничивания H_0 определяется выражением:

$$2H_0 \sin\varphi_p + H_k \sin 2(\varphi_p + \alpha - \theta) = 0. \quad (6)$$

Интегральная восприимчивость пленки, зависящая от угловой дисперсии (среднеквадратичного отклонения), определялась усреднением локальных значений χ''_l по параметру α :

$$\chi''(\alpha_0) = \int \chi''_l(\alpha) P(\alpha, \alpha_0) d\alpha, \quad (7)$$

Для параметра α было использовано распределение Гаусса:

$$P(\alpha, \alpha_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha_0} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\alpha_0^2}\right) \quad (8)$$

В данных расчетах амплитудная дисперсия поля магнитной анизотропии не учитывалась. Интегрирование проводилось в пределах $\pm 2,6\alpha_0$, что обеспечивает точность расчета не ниже 1 %.

На основе соотношений (5) - (8) были проведены численные расчеты для значений угловой дисперсии α_0 , меняющейся в достаточно широких пределах ($0 \leq \alpha_0 \leq 35^\circ$), на частотах $\omega = (2 \dots 10) \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$ и параметров, соответствующих пермаллоевым пленкам: $4\pi M = 8 \cdot 10^5 \text{ A/m}$, $\lambda = 10^8 \text{ c}^{-1}$, $H_k = 1600 \text{ A/m}$.

Расчетом подтверждено, что интегральная резонансная магнитная восприимчивость χ'' пленки уменьшается с ростом угловой дисперсии ОЛН при всех θ (Рис.1).

Уменьшение χ'' с ростом α_0 , физически обусловлено уменьшением числа блоков, участвующих в резонансе при данном значении подмагничивающего поля. Наибольшее влияние угловая дисперсия ОЛН на амплитудное значение χ'' оказывает при $\theta = 40^\circ - 50^\circ$, что связано с наибольшим числом блоков, участвующих в ФМР. Наименьшее влияние на амплитудное значение $\chi''(\alpha_0)$

угловая дисперсия ОЛН α_0 оказывает при углах $\theta = 0^\circ$ и 90° , где χ'' уменьшается в 1,5 раза. Отметим, что влияние угловой дисперсии на χ'' при $\theta = 40^\circ$ максимально для диапазона $\alpha_0 = (0 - 20)^\circ$. При $\alpha_0 > 20^\circ$ влияние угловой дисперсии является максимальным для $\theta = 0^\circ$ и 90° и минимальным для $\theta = 40^\circ$.

На Рис.2 показаны расчетные зависимости величины относительного изменения резонансного поля при ФМР от угловой дисперсии ОЛН $\delta H_r^{\text{отн}}(\alpha_0) = \frac{H_r(\alpha_0) - H_r(0)}{H_r(0)}$ для различных положений пленки относительно внешнего магнитного поля. Видно, что на частоте $\omega = 2 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$, максимальное влияние на величину резонансного поля угловая дисперсия оказывает при $\theta = 40^\circ - 50^\circ$ и минимальное при $\theta = 0^\circ$ и 90° . Расчеты показывают, что с ростом частоты ФМР влияние угловой дисперсии ОЛН на ширину линии резонансного поглощения быстро исчезает.

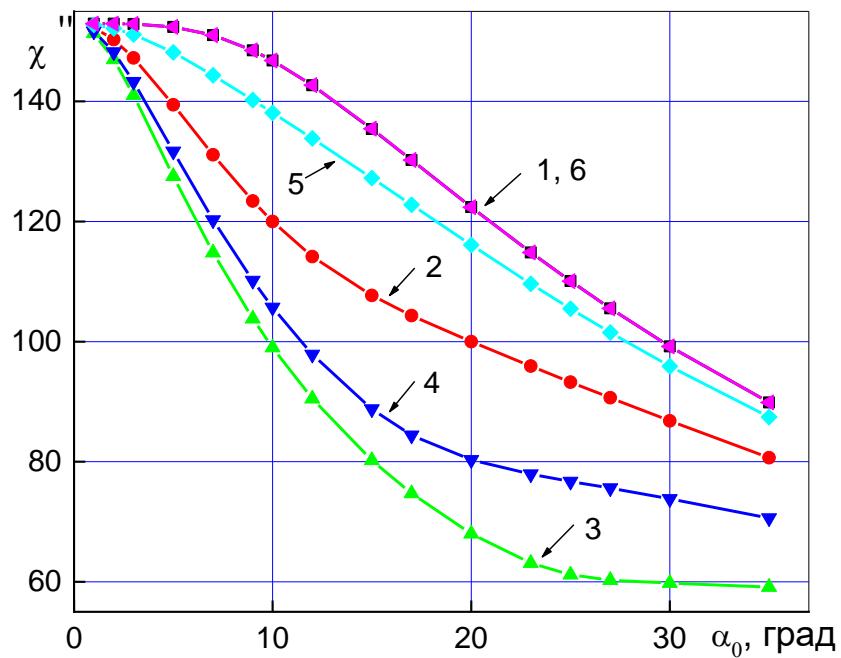


Рис.1. Расчетные зависимости интегральной резонансной магнитной восприимчивости от угловой дисперсии ОЛН пленки для резонансной частоты при различных углах ОЛН пленки по отношению к внешнему магнитному полю $\theta = 0, 20, 40, 60, 80, 90^\circ$ - кривые 1-6, соответственно.

На Рис.3 приведены частотные зависимости эффективного поля магнитной анизотропии $H_k^{ef}(\omega)$ при измерениях его методом ФМР в диапазоне частот $2 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1} \leq \omega \leq 10 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$ для различных значений угловой дисперсии ОЛН. В пленках с малой дисперсией ($\alpha_0 < 10^\circ$) значение эффективного поля магнитной анизотропии $H_k^{ef}(\omega)$ почти не зависит от частоты, так как в указанном диапазоне частот относительное изменение $H_k^{ef}(\omega)$ при $\alpha_0 < 10^\circ$ составляет менее 1 %. В сильно дисперсных пленках ($\alpha_0 = (20 - 30)^\circ$)

величина $H_k^{ef}(\omega)$ с ростом частоты существенно уменьшается. Для пленок с $\alpha_0 = 20^\circ$ при увеличение частоты ФМР в 5 раз относительное уменьшение H_k^{ef} составляет $\sim 10\%$, а для $\alpha_0 = 30^\circ$ значение H_k^{ef} уменьшается на $\sim 23\%$.

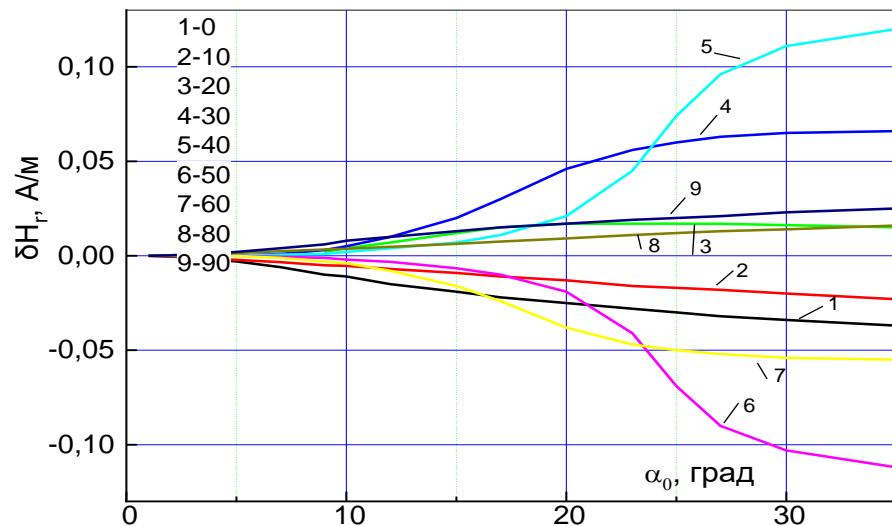


Рис. 2. Расчетная зависимость сдвига резонансного поля H_r для пермаллоевой ТМП ($H_k = 1600$ А/м) от угловой дисперсии оси электрической анизотропии в условиях ФМР на частоте $2 \cdot 10^{10}$ с⁻¹ при различных углах поворота пленки в ее плоскости $\theta = 0 - 90^\circ$: кривые 1-9, соответственно.

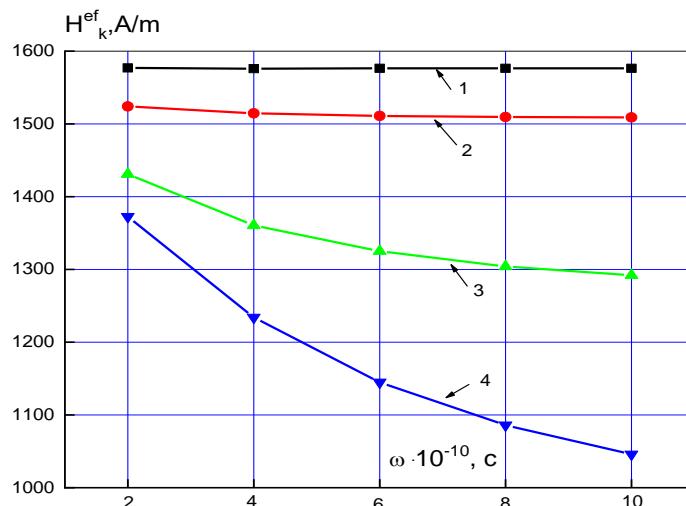


Рис. 3. Расчетная зависимость эффективного поля анизотропии от частоты при ФМР для пермаллоевой пленки ($H_k = 1600$ А/м) при различных значениях угловой дисперсии оси электрической анизотропии $\alpha_0 = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$: кривые 1-4, соответственно.

Методом ФМР доказано обратимое влияние постоянного электрического тока на магнитные свойства ферромагнетиков в условиях интенсивного охлаждения образцов. Показана методика расчета интегральных

характеристик ФМР в ТМП с угловой дисперсией (α_0) поля магнитной анизотропии (H_k) на основе статистической модели магнитоневзаимодействующих блоков, результаты расчета по которой согласуются с результатами эксперимента других авторов.

Особенности магниторезистивного эффекта в ферромагнитном металле. На основе измерения ВАХ образцов (полоски фольги из поликристаллического никеля ($Ni - 99,999\%$), толщиной 5 мкм), помещенных во внешнее однородное магнитное поле напряженность которого составляла $H_0 = 0,5 \cdot 10^5$ А/м при токе силой $I = 0,1 - 10$ А, были получены зависимости магнетосопротивления образца от плотности электрического тока в нем и рассчитана величина МРЭ (Рис. 4):

$$\frac{\Delta R}{R_o}(j) = \frac{R_{//}(j) - R_{\perp}(j)}{R_o(\theta = 0^\circ) + R_o(\theta = 90^\circ)} \quad (9)$$

Зависимость $\frac{\Delta R}{R_o}(j)$ (Рис. 4) имеет три характерных участка: в интервале $0,5 \cdot 10^8 < j < 2,5 \cdot 10^8$ А/м² происходит увеличение магнетосопротивления так, что при $j = 2,5 \cdot 10^8$ А/м² значение МРЭ достигает своего максимума – $\frac{\Delta R}{R_o} \cong 11,6\%$. При $j > 2,5 \cdot 10^8$ А/м² наблюдается резкое снижение величины МРЭ, которая затем при $j = (6 - 10) \cdot 10^8$ А/м² слабо зависит от плотности тока и уменьшается до $\frac{\Delta R}{R_o} \cong 1,2\%$.

Исследования влияния внешнего магнитного поля $H_0 = (0,5 - 6) \cdot 10^5$ А/м на величину магнетосопротивления и МРЭ (9) в образцах из фольги поликристаллического никеля при неизменном токе, пропускаемом через образец, представлены на Рис. 5.

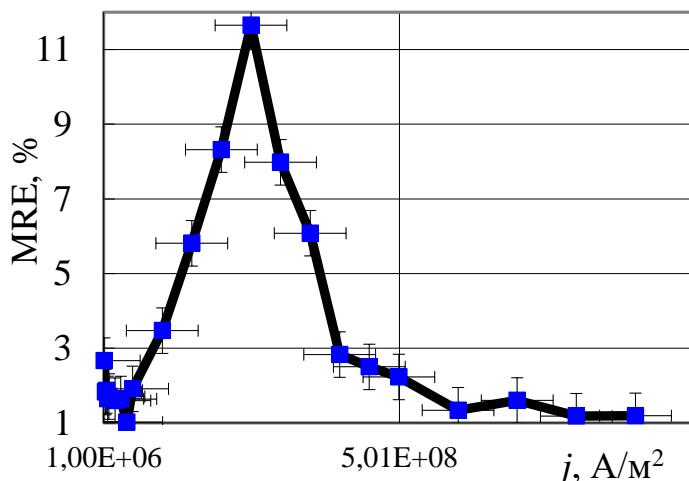


Рис. 4. Зависимость МРЭ от плотности тока в никелевой фольге.

При токе в образце $j = 3 \cdot 10^8$ А/м² и внешнем магнитном поле напряженностью $6 \cdot 10^5$ А/м величина МРЭ достигает 11 % (кривая 2, Рис. 5). При фиксированной плотности электрического тока в образце $j = 1 \cdot 10^8$ А/м² с увеличением внешнего магнитного поля H_0 от $0,5 \cdot 10^5$ А/м до $6 \cdot 10^5$ А/м МРЭ возрастает от ~ 1% до ~ 6%, то есть в 6 раз (Рис. 5, кривая 1). При плотности электрического тока в образце $j = 4 \cdot 10^8$ А/м² увеличение внешнего магнитного поля H_0 приводит к уменьшению МРЭ с ~ 5 % до табличного значения ~ 2,5 % (кривая 3, Рис. 5).

Результаты эксперимента (Рис. 4,5) можно объяснить состоянием структуры образца. Так при малых токах ($j = 1 \cdot 10^8$ А/м²) применение внешнего магнитного поля H_0 и его дальнейшее увеличение приводят к уменьшению дисперсии намагниченности и увеличению МРЭ. При $j = (2,5 - 3) \cdot 10^8$ А/м² в образце происходят структурные изменения, которые сопровождаются пластическими деформациями. Аномальное значение МРЭ (11,6%) при $j = 2,5 \cdot 10^8$ А/м² можно объяснить структурными изменениями в образце под действием тока, сопровождающимися пластическими деформациями, что обуславливает появление дополнительной намагниченности, а увеличение внешнего магнитного поля H_0 , обеспечивает уменьшение разброса вектора намагниченности \vec{M} в фольге и, следовательно, МРЭ возрастает. Так как МРЭ является структурно чувствительным эффектом, то по окончании процесса пластического разупрочнения при $j = 4 \cdot 10^8$ А/м² величина МРЭ уменьшается до своего табличного значения.

Характер изменения физических характеристик ТМП и тонких ферромагнитных фольг при ФМР и МРЭ доказывают возможность динамического обратимого влияния тока на высокочастотные

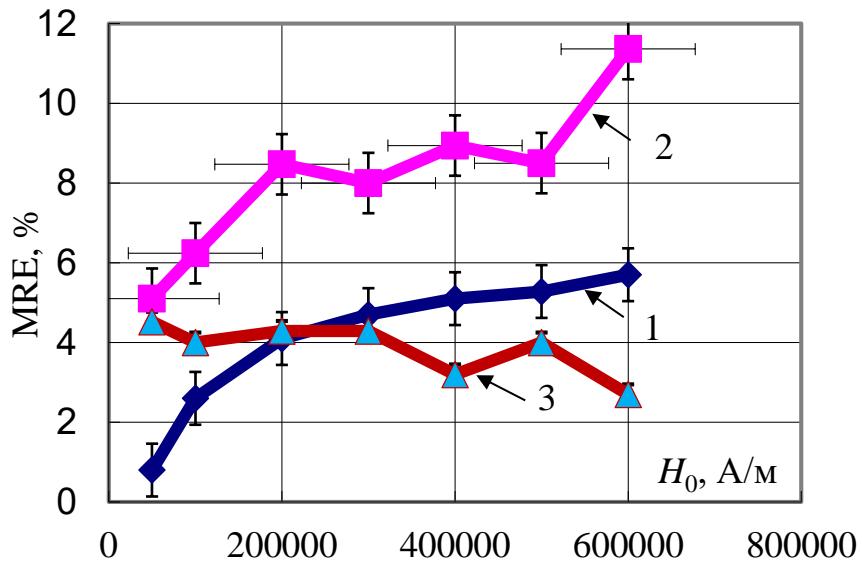


Рис. 5. Зависимость МРЭ в никелевой фольге от напряженности внешнего магнитного поля при фиксированном токе в образце:
 $j = 10^8; 3 \cdot 10^8; 4 \cdot 10^8$ А/м², кривые 1-3, соответственно.

характеристики ТМП при ФМР. Как показывают результаты

экспериментального исследования, проведенного с помощью метода МРЭ в фольгах ферромагнитного металла (Рис. 4, 5), электрический ток высокой плотности и внешнее магнитное поле оказывают необратимое влияние на электросопротивление образцов, вызванное структурными изменениями в них.

В четвертой главе описан способ воздействия электрического тока на процесс кристаллизации при литье алюминиевых сплавов в песчаные формы (ПФ) и представлены результаты экспериментального исследования параметров процесса кристаллизации алюминиевых сплавов при литье в ПФ. Экспериментальная установка для проведения экспериментального исследования по влиянию электрического тока на процесс кристаллизации алюминиевых сплавов подробно описана в работах [8-15, 17-19, 43].

Схема экспериментальной установки представлена на Рис. 6 [43]. Силовое оборудование (элементы 1-3) предназначено для создания постоянного электрического тока. Для достижения непосредственного действия тока на металл в момент его заливки в форму используются последовательно расположенные контакты, примыкающие к отливке, что позволяет оказывать действие тока на всех этапах затвердевания образца, которое не зависит от электрических параметров литейной формы. В качестве материала образцов использовали силумины (*AK12, AK12M2MgH*). Постоянный электрический ток плотностью $j \sim (10^4 - 10^7)$ А/м² пропускался по отливке, находящейся в жидком состоянии, в состоянии фазового перехода и твердом состоянии, вплоть до охлаждения отливки, когда ее температура принимала значение

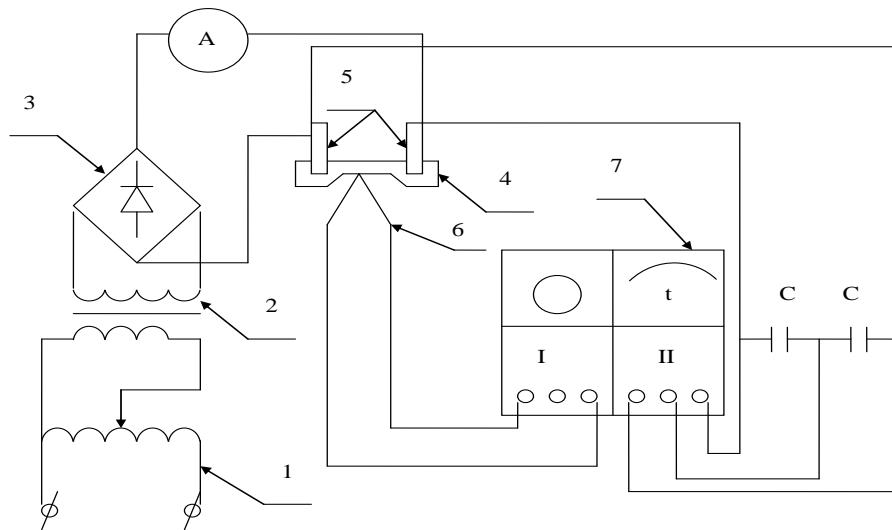


Рис. 6. Схема экспериментальной установки: 1 – автотрансформатор; 2 – силовой трансформатор; 3 – выпрямительный мост; 4 – образец; 5 – электроды; 6 – термопара; 7 – регистрирующее устройство (двухканальный записывающий осциллограф).

$T_{\text{отл.}} \approx (0,2-0,5) \cdot T_{\text{пл.}}$. Воздействие электрического тока плотностью $10^4 < j \leq 10^8$ А/м² на отливку, находящуюся в твердом состоянии, после завершения процесса кристаллизации и охлаждения ее до температуры $(0,2 - 0,5) \cdot T_{\text{пл.}}$

приводит к дополнительному снижению механических напряжений, что равноценно операции отжига.

Выбор значения плотности электрического тока, пропускаемого по формируемой отливке, определяется фазовым состоянием ее материала. Максимальное значение плотности электрического тока, пропускаемого в процессе кристаллизации материала, лимитируется, за счет тепла Джоуля-Ленца, отсутствием возможности осуществления фазового перехода, а минимальное - условиями зародышеобразования.

Контроль параметров процесса кристаллизации сплава под действием электрического тока, пропускаемого в процессе кристаллизации образца, осуществлялся за счет измерения временной зависимости падения напряжения $U(t)$ на образце, которая позволяет без измерения температурной зависимости материала отливки при ее кристаллизации определить скорость, а также время фазового перехода образца. Для образцов из сплава AK 12 время кристаллизации составляло $\sim ((5,0 \dots 6,0) \pm 0,5)$ с.

На Рис. 7 показана экспериментальная зависимость падения напряжения на образце $U(t)$ (кривая 1) и силы тока $I(t)$ (кривая 2) для сплава AK12 в условиях фазового перехода.

Используя зависимость $U(t)$ (кривая 1, Рис. 7), можно определить скорость фазового перехода $dU(t)/dt$, а также время фазового перехода образца. Изменение массы твердожидкой фазы образца также можно определить с помощью зависимости $U(t)$:

$$\frac{dm_{L-S}}{dt} = a \cdot \frac{dU}{dt} \quad (10)$$

Здесь a - коэффициент $a = \frac{m_o}{U(0)}$, m_o – исходная масса жидкого расплава, $U(0)$

– значение разности потенциалов в момент времени, соответствующий началу фазового перехода.

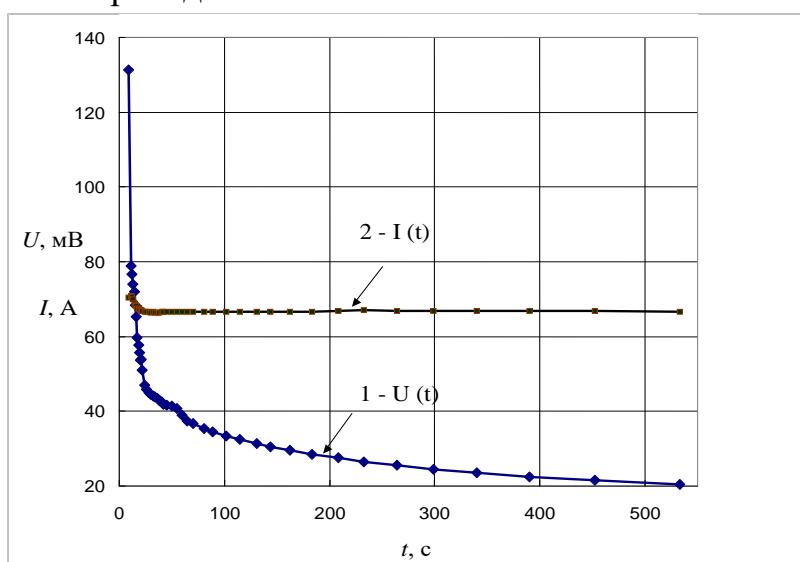


Рис. 7. Экспериментальная зависимость падения напряжения $U(t)$ на образце (кривая 1) и силы тока $I(t)$ (кривая 2) для сплава AK12 в условиях фазового перехода.

При пропускании тока через образец силой $I = 66$ А, получаем для $U(0) = 0,225$ В, $m_0 = 60 \cdot 10^{-3}$ кг, значение коэффициента - $a = 0,3$ кг/В.

Одновременное измерение температуры образца, силы тока и падения напряжения на нем позволило определить коэффициент теплопроводности сплава, как в жидкоком состоянии, так и на этапе фазового перехода.

Рассмотрена задача о движении фронта кристаллизации и проведен анализ влияния теплофизических свойств окружающей среды и электрического тока на кинетику движения фронта кристаллизации в условиях фазового перехода сплава.

В результате решения уравнения теплового баланса при условии, что тепло, выделяемое при кристаллизации и подводимое за счет источника тока, передается в окружающее пространство через боковую поверхность радиуса a и длиной l было получено уравнение для скорости движения фронта кристаллизации в поперечном направлении:

$$-\frac{d\zeta}{dt} = \frac{\mathbf{B}}{\sqrt{a^2 - 2 \cdot \mathbf{B} \cdot t}} \quad (11)$$

Здесь $\mathbf{B} = \frac{1}{2\pi l \gamma L} \cdot (2\pi a l k(T - T_o) + j^2 \rho_L \pi a^2 l)$: j – плотность тока, ρ_L – удельное

электросопротивление жидкой фазы при температуре фазового перехода; L – удельная теплота плавления, Дж/кг, γ – плотность; k – коэффициент теплоотдачи формы, Вт/(м²·К); T_o – температура окружения (формы).

Рассматриваемый фронт кристаллизации движется от периферии к центру, поэтому эквивалентная электрическая схема образца может быть представлена параллельно включенными электрическими сопротивлениями, и падение напряжения $U(t)$ на образце имеет вид:

$$U = I \cdot \frac{\rho_s \cdot \rho_L \cdot l}{\pi \cdot (2Bt \cdot (\rho_L - \rho_s) + \rho_s \cdot a^2)} \quad (12)$$

Данная физическая модель процесса по измерению падения напряжения на образце позволяет определить коэффициент теплоотдачи формы и анализировать влияние теплофизических свойств окружающей среды, а также внешнего воздействия – электрического тока на кинетику движения фронта кристаллизации.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований параметров структуры, физических и эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов, кристаллизация которых осуществлялась под действием электрического тока при литье в песчаные формы и в кокиль.

С помощью металлографического анализа структуры материала доказано влияние электрического тока на размеры и характер распределения эвтектики в сплаве *AK 12*. Выявлено ориентирующее действие электрического тока на параметры структуры и физические свойства сплава, которые имеют в результате действия тока анизотропный характер.

Анизотропный характер структуры материала образцов подтверждается как прямыми, так и косвенными измерениями. Обнаружена анизотропия электросопротивления в отливках из сплава *AK12*, кристаллизация которых

проходила при действии постоянного электрического тока плотности $j \cong 10^4 - 10^7$ А/м². Установлено, что значение удельного электросопротивления вдоль оси образца $\rho_{//}$ (вдоль тока) меньше, чем в поперечном направлении ρ_{\perp} (перпендикулярно току). В образцах, кристаллизация которых осуществлялась при пропускании постоянного электрического тока плотностью $j \cong 1,6 \cdot 10^7$ А/м² относительное отличие удельного электросопротивления составило: $\frac{\langle \rho_{\perp} \rangle - \langle \rho_{//} \rangle}{\langle \rho_{//} \rangle} \approx 0,20$, а при кристаллизации в

отсутствии тока $j = 0$: $\frac{\langle \rho_{\perp} \rangle - \langle \rho_{//} \rangle}{\langle \rho_{//} \rangle} \approx (0,05 - 0,06)$. Анизотропия удельного

электросопротивления обусловлена статической текстурой материала образцов, возникшей при кристаллизации сплава под действием электрического тока, и подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа.

Пропускание электрического тока в процессе кристаллизации, приводит к изменениям в распределении эвтектики в твердом растворе сплава, что влияет на твердость сплава. Твердость сплава, кристаллизация которого происходила под действием тока, возрастает, размеры и количество пор уменьшаются.

Экспериментально установлено, что микротвердость (МТВ) H_V сплава AK12 зависит от пространственного расположения области сканирования и от значения плотности тока. Кристаллизация отливок происходила под действием постоянного электрического тока (сила тока – 60 А, 140 А), который пропускался вдоль оси отливки.

На Рис. 8 представлена пространственная зависимость МТВ образца при плотности тока $j \cong 3,5 \cdot 10^5$ А/м² (кривая 1) и при $j = 0$ (кривая 2). Кривые 1 и 2 (Рис. 8) аппроксимируются соответственно зависимостями вида: $H_{v1} = -0,0638 \cdot x^2 + 2,045 \cdot x + 71,73$ и $H_{v2} = 0,0973 \cdot x^2 - 1,559 \cdot x + 61,16$. В обоих случаях твердость материала возрастает от периферии к центру, что связано с направлением тепловых потоков в поперечном сечении образца. Однако при $j \neq 0$ (кривая 1, Рис. 8) значение МТВ выше не только в периферийной части, но и в центре. Относительное значение МТВ периферийной и центральной частей отливки показано кривой 3 на Рис. 8.

На Рис. 9. показана зависимость МТВ от плотности тока в центральной (кривая 1) и в периферийной части образца (кривая 2). Кривая 3 представляет среднее арифметическое значение МТВ для центральной и периферийной части в целом: $\langle H_V(j) \rangle = \frac{\langle H_{kp}(j) \rangle + \langle H_{центр}(j) \rangle}{2}$.

Микроструктура сплава AK12 для отливок, кристаллизация которых происходила в ПФ без воздействия электрического тока, представлена на Рис. 10, а), а с пропусканием электрического тока силой $I = 66$ А во время кристаллизации – на Рис. 10, б).

Микроструктура сплава AK12M2MgH для отливок, кристаллизация которых происходила без воздействия электрического тока представлена на

Рис. 11, а), а с пропусканием электрического тока ($I = 82$ А) при кристаллизации – на Рис. 11, б).

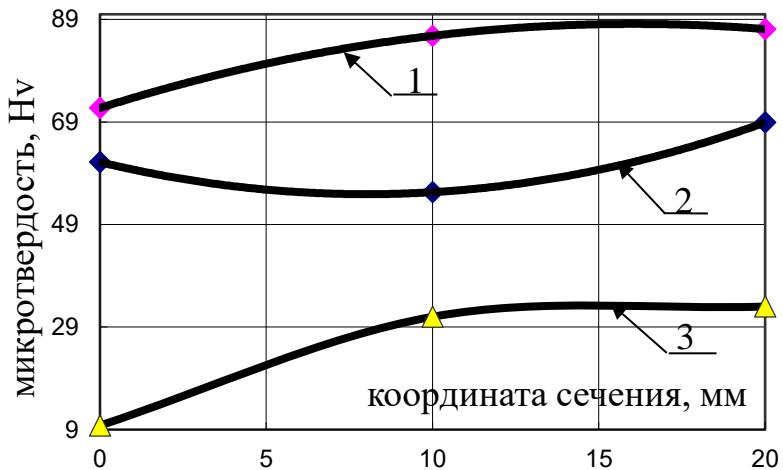


Рис. 8. Пространственная зависимость МТВ сплава AK12 в сечении $S_{A-A} \cong 4 \cdot 10^{-4}$ м²: кривая 1 - $j \cong 3,5 \cdot 10^5$ А/м²; кривая 2 – $j = 0$; кривая 3 – относительное изменение микротвердости, %.

В образцах, кристаллизация которых происходила под действием тока, происходит изменение в распределении и размерах эвтектики, возможно за счет активирования тепловыделений на границах включение-матрица. В сплаве *AK12M2MgH*, для которого в данном способе изготовления (литье в ПФ) была характерна газовая и усадочная пористость, при кристаллизации в присутствии электрического тока, произошло уменьшения количества пор и их размеров. Логично предположить, что уменьшение пористости сплава при кристаллизации в присутствии электрического тока связано с активизацией фильтрационных процессов в сплаве за счет влияния электрического тока.

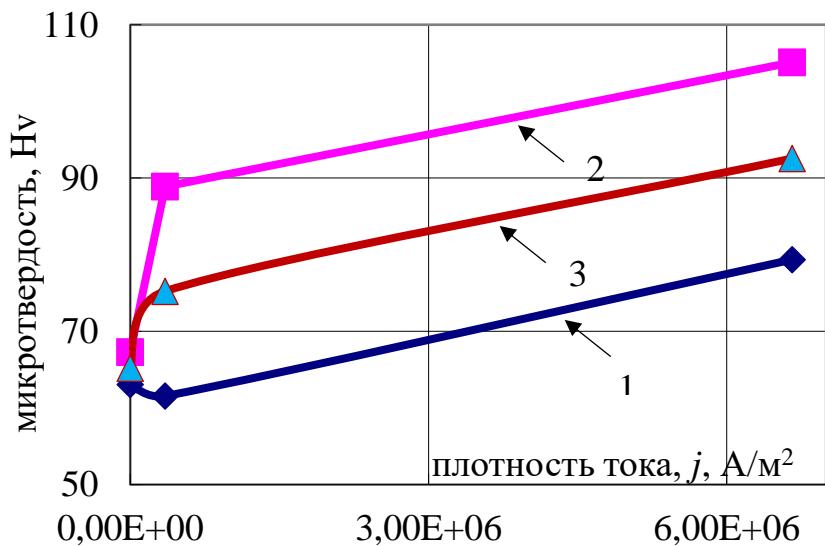


Рис. 9. Зависимость микротвердости сплава AK12 от плотности тока: кривая 1 – центральная часть; кривая 2 – периферийная часть; кривая 3 – среднее арифметическое.

Для анализа влияния электрического тока на размеры пор был выбран сплав *AK12M2MgH*, как сплав, который имеет большее количество фаз и площадь межфазных границ, чем сплав *AK12*. При $I = 0$ А размер пор в среднем (проведено усреднение по продольным и поперечным сечениям) составил $(21,48 \pm 2,15)$ мкм, а при $I = 82$ А - $(12,50 \pm 1,82)$ мкм. Таким образом, размер пор уменьшился на 42% в условиях кристаллизации сплава *AK12M2MgH* под действием электрического тока.

Обнаружено, что плотность материала сплавов (*AK12* и *AK12M2MgH*) кристаллизация которых проходила в присутствии тока увеличивается, а пористость уменьшается. При кристаллизации сплава *AK12* в присутствии тока силой $I = 66$ А относительное увеличение плотности материала в среднем составило 3,8%, а при $I = 140$ А - 2,45%, а для сплава *AK12M2MgH* при $I = 82$ А увеличение плотности сплава составило 2,1%. Несмотря на то, что сплав *AK12M2MgH* более склонен к образованию газовых и усадочных пор, чем сплав *AK12*, при его кристаллизации в ПФ под действием электрического тока, площадь, занимаемая порами и размер пор, уменьшились.

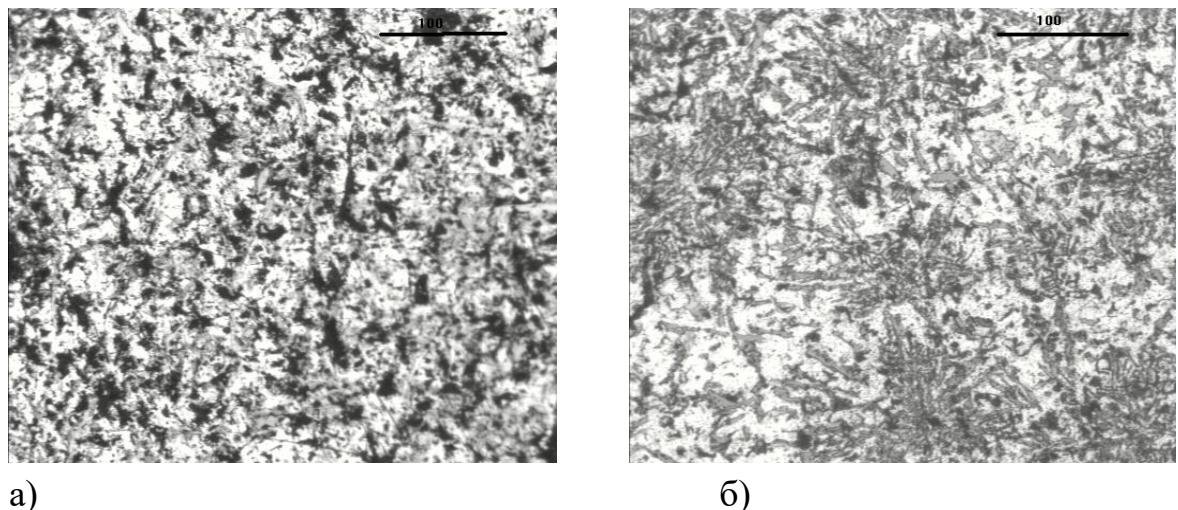


Рис.10. Микроструктура сплава *AK 12*.

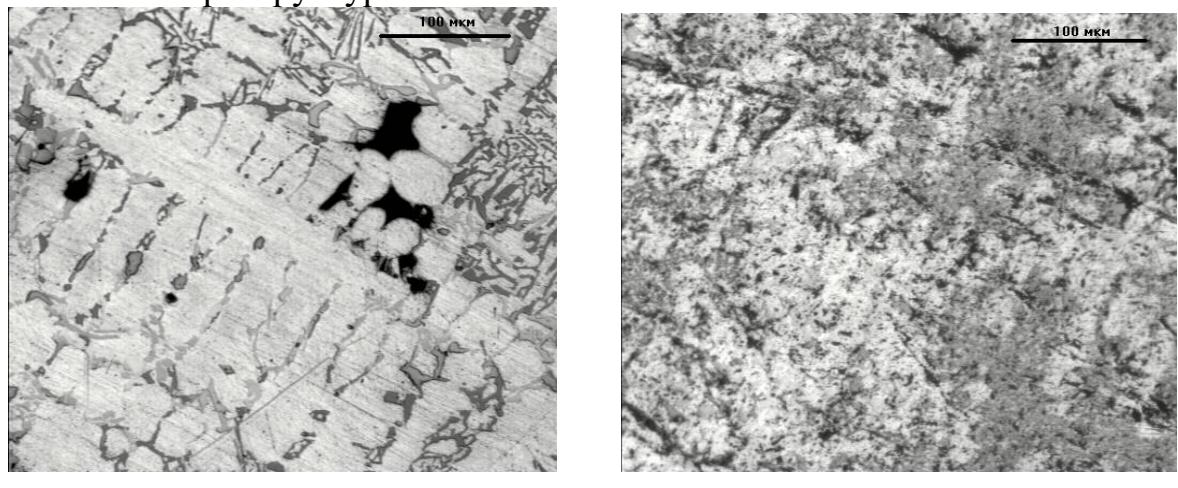


Рис. 11. Микроструктура сплава *AK12M2MgH*.

Дополнительно проведено исследование влияния импульсного электрического тока на параметры структуры сплава *AK12M2MgH*. Проведен

сравнительный анализ параметров структуры, твердости и микротвердости сплава (*AK12M2MgH*), полученного литьем в кокиль и литьем в ПФ без внешнего воздействия ($I = 0$), а также при литье в ПФ с пропусканием импульсного электрического тока (сила тока в импульсе $I = 82$ А) в процессе кристаллизации сплава.

В Таблице 1. приведены значения дендритного параметра (ДП), площади твердого раствора, а также макро- и микротвердость сплава *AK12M2MgH*.

Таблица 1. Результаты исследования параметров структуры и твердости сплава *AK12M2MgH*.

Параметр структуры Воздействие \	Литье в кокиль (край отливки)	Литье в ПФ, $j = 0$	Литье в ПФ, $j = 3 \cdot 10^5$ А/м ²	Литье в ПФ, $j = 9 \cdot 10^6$ А/м ²
Дендритный параметр, мкм	$9,67 \pm 0,86$	$5,98 \pm 0,64$	$4,44 \pm 0,55$	$3,39 \pm 0,30$
Площадь твердого раствора, %	$44,67 \pm 2,68$	$72,53 \pm 2,62$	$29,77 \pm 8,50$	$46,30 \pm 2,36$
Твердость, НВ	105,2	104,4	114,73	105,8
Микротвердость, H_V	54	55	72	59

Относительное изменение значения площади твердого раствора при литье в ПФ без тока и с током составило 47,5%, а ДП – 34 %. Выявленные изменения, по-видимому, связаны с повышением активности процессов, происходящих на границе включение-матрица, диспергированием кремния под действием электрического тока. Активизация перемещений *Si* в *Al* возможна также за счет протекания процесса электропереноса.

В результате анализа параметров структуры сплава, кристаллизация которого осуществлялась под действием электрического тока была выявлена анизотропия по дендритному параметру у сплава *AK12M2MgH*. Значение ДП в продольном сечении оказалось большим, чем в поперечном. В среднем, при $I = 82$ А разница значений ДП в указанных сечениях составила 23%. Возможно зависимость ДП от расположения сечения связана с различием в температурном градиенте и скорости кристаллизации для данных направлений. По теории Уитни-Нернста, в случае направленной кристаллизации, размер дендритной ячейки уменьшается с увеличением скорости охлаждения: $\text{ДП} \sim \frac{1}{v_{\text{охл}}}$. В нашем случае, отношение площадей

рассматриваемых сечений составило $\frac{S_{A-A}}{S_{B-B}} \cong 32$, а, следовательно, градиент

температуры и скорость кристаллизации были больше в сечении *B-B*. Также применяемое в процессе кристаллизации воздействие импульсным электрическим током, не может обеспечить изменение в распределении температурного фронта, определяемого условиями теплообмена.

Для независимого доказательства влияния электрического тока на структуру сплава был проведен рентгеноструктурный анализ сплава *AK12*, кристаллизация которого происходила под действием постоянного электрического тока силой $I = 96$ А. Исследования выполнены на дифракционном спектрографе Дрон 4-07. Использовался метод дифракции рентгеновского излучения кобальта (*Co*), отраженного от поверхности образца при косом падении. Эффективная глубина проникновения излучения составляла – 0,3 мкм. Рентгеноструктурный анализ позволил выявить характерные кристаллографические направления для *Al* (5 линий) и для *Si* (7 линий). Дифракционные максимумы интенсивности были выявлены для следующих кристаллографических направлений алюминия - $\langle 111 \rangle$, $\langle 200 \rangle$, $\langle 220 \rangle$, $\langle 311 \rangle$, $\langle 222 \rangle$ и для кристаллографических направлений кремния - $\langle 111 \rangle$, $\langle 220 \rangle$, $\langle 311 \rangle$, $\langle 400 \rangle$, $\langle 331 \rangle$, $\langle 422 \rangle$, $\langle 511 \rangle$. Анализ параметров спектральных линий доказал факт влияния внешнего воздействия – постоянного электрического тока, на структуру материала. Дифракционные линии становятся более интенсивными, меняется их полуширина. Изменения межплоскостного расстояния наблюдались только на малых углах скольжения.

Сравнение соответствующих линий рентгенограмм позволило выявить количественное различие в их интенсивности и ширине. Для всех наблюдаемых кристаллографических направлений, как алюминия, так и кремния интенсивность и ширина линий больше для тех образцов, кристаллизация которых происходила под действием тока, проявляется закономерность в ориентировке кристаллов в поликристаллическом веществе. Дополнительные оптические исследования микроструктуры сплава показали, что размеры кристаллов уменьшаются. Параметры рентгенограммы указывают на образование ориентированной текстуры сплава при его кристаллизации под действием тока.

Для подтверждения эффективности применения электрического тока при кристаллизации и количественной оценки его влияния, был измерен дендритный параметр сплава, как расстояние между осями второго порядка. При $I = 96$ А в поперечном сечении образца среднее значение ДП сплава составило $\langle \text{ДП}_{\perp} \rangle = 25,7$ мкм, а в продольном - $\langle \text{ДП}_{\parallel} \rangle = 29,3$ мкм. При $I = 0$ среднее значение ДП - $\langle \text{ДП}_{\perp} \rangle = 31,12$ мкм и $\langle \text{ДП}_{\parallel} \rangle = 30$ мкм. Рассчитано относительное различие в значении ДП в зависимости от направления (продольное, поперечное):

$$\varepsilon_{\langle \text{ДП} \rangle} = \frac{\langle \text{ДП}_{\perp} \rangle - \langle \text{ДП}_{\parallel} \rangle}{\langle \text{ДП}_{\perp} \rangle} \quad (13)$$

Для образцов с $I = 0$ А составило 3,6 %, а для образцов с $I = 96$ А составило 14 %. Следовательно, $\left(\frac{\langle \text{ДП}_{\perp} \rangle - \langle \text{ДП}_{\parallel} \rangle}{\langle \text{ДП}_{\perp} \rangle} \right)_{I=0} > \left(\frac{\langle \text{ДП}_{\perp} \rangle - \langle \text{ДП}_{\parallel} \rangle}{\langle \text{ДП}_{\perp} \rangle} \right)_{I=96}$ и, таким образом при кристаллизации в присутствии постоянного тока наблюдается различие по значению ДП в поперечном и продольном направлениях образца, то есть возникает анизотропия по ДП. Скорее всего это связано с возникновением статической текстуры при кристаллизации сплава под действием

электрического тока. В продольном направлении образца (вдоль тока) градиент температуры меньше, чем в поперечном. Поэтому скорость процесса зародышеобразования и выделения эвтектики в поперечном направлении больше, чем в продольном.

Итог: пропускание электрического тока при кристаллизации сплава приводит к уменьшению размера ДП, увеличению твердости, плотности и к формированию тонкодифференцированной эвтектики в структуре сплава, текстурированию сплава.

В шестой главе рассмотрены способы управления свойствами проводящих сред с помощью электромагнитного воздействия. Здесь представлены результаты применения прецизионного электромагнитного воздействия при изготовлении фасонных отливок из алюминиевых сплавов и микроизделий. Разобран способ управления процессом формирования фасонных отливок.

Представлено описание метода использования электромагнитных сил при изготовлении микроизделий из легкоплавких сплавов. Для осуществления операции заполнения формы жидким электропроводным материалом малого объема, по указанному объему при нахождении его в заливочном отверстии литника формы, пропускают электрический ток в виде прямоугольных импульсов в направлении перпендикулярном оси заливочного отверстия и одновременно включают однородное внешнее поперечное магнитное поле. Выбор значений параметров импульса тока определяется физическими свойствами литьевого расплава, индукцией внешнего магнитного поля, диаметром литникового канала, давлением газа в форме и давлением сжатого газа, видом заливки (вертикальная: сверху, снизу; горизонтальная). Длительность импульса выбирается из условия $\Delta t = \tau / (2 \cdot N)$, N - количество пульсаций, τ - время заполнения формы. Время заполнения формы выбирается из условия $\tau < \tau_{\phi n}$, $\tau_{\phi n}$ – время фазового перехода. В результате такого воздействия, возникает сила Ампера, направленная против сил поверхностного натяжения, что улучшает условия заполнения формы жидким электропроводным материалом. Дополнительное механическое воздействие будет способствовать течению расплава. После затвердевания периферийной части отливки необходимо поменять направление индукции внешнего магнитного поля на противоположное или изменить полярность источника. В результате возникнет сила Ампера, направленная из формы наружу. Это позволит исключить контакт между оставшейся частью металла в литнике и отливкой в форме. Применение электромагнитного воздействия делает возможным согласование скорости заполнения расплавом формы со скоростью охлаждения, и оказывает влияние на зародышеобразование.

Извлечение готовой отливки из формы производят с помощью магнитной силы Ампера с предварительным раскрытием литьевой формы и наложением механического воздействия на систему отливка-форма от пьезодатчиков. Предпочтение имеет импульсный режим извлечения отливки. Параметры

электромагнитного воздействия выбираются из условия сдвига отливки: $F_A > F_{\text{сц}} + F_{\text{тр}}$. Чтобы извлечь отливку из формы необходимо преодолеть силы сцепления $F_{\text{сц}}$ и трения покоя $F_{\text{тр}}$. Величина силы сцепления $F_{\text{сц}}$ определяется химическим взаимодействием жидкого металла с материалом формы. Параметры, определяющие электромагнитное воздействие, должны быть по значению меньше критических, приводящих, например, к плавлению материала отливки. Применение электромагнитного воздействия в условиях фазового перехода позволяет управлять не только движением металла в литейной форме, но физическими свойствами материала, в частности, позволяет измерить коэффициент сопротивления жидкого металла и формы.

Показана актуальность использования нового критерия для оценки вероятности образования микропористости в отливках. Критерий образования микропористости наряду с термическими условиями процесса затвердевания учитывает ряд существенных технологических факторов, среди которых атмосферное и металlostатическое давление, газонасыщенность сплава. Критерий имеет безразмерную форму, содержит только измеряемые или контролируемые параметры и не требует дополнительной экспериментальной информации.

Особенностью критерия является отсутствие радиуса критического зародыша микропоры. Вместо этого используется его оценка по расстоянию между вторичными осями дендритов - λ_2 . Это позволяет отказаться от технически сложного экспериментального определения радиуса критического зародыша микропоры в металлических сплавах. Критерий рекомендуется использовать в системах моделирования затвердевания отливки для более точного предсказания образования микропористости.

В компактной формулировке новый критерий образования микропористости имеет следующий вид:

$$Por = \min \left(\frac{\frac{\lambda_2 \sigma}{45 \mu \beta \Delta T} \frac{G}{V}, \frac{P_a + \rho g h + \frac{4\sigma}{\lambda_2}}{P_g}}{\frac{P_a + \rho g h + \frac{4\sigma}{\lambda_2}}{P_g}} \right) < 1 \quad (14)$$

Здесь $P_{or} = \frac{\Delta P_{cr}}{\Delta P_l}$, ΔP_{cr} - критический перепад давления в точке двухфазной зоны, при котором возникают условия для образования микропор, ΔP_l - перепад давления в данной точке расплава, μ - динамическая вязкость, V - скорость движения фронта кристаллизации, β - коэффициент объемной усадки сплава.

Если неравенство (14) выполняется, то в двухфазной зоне будет образовываться микропористость, если не выполняется – пористости не будет. В критерии используется геометрическое условие, ограничивающее размеры возможного кавитационного пузыряка в жидкой фазе, содержащегося в пространстве между вторичными осями дендритов.

В случае малой газонасыщенности расплава $P_g < P_a + \rho g h$ значение критерия на фронте затвердевания однозначно определяет условия образования

пористости во всей двухфазной зоне. Если $Por(0) > 1$, то пористости не будет во всей двухфазной зоне.

При высокой газонасыщенности сплава $P_g \geq P_a + \rho gh$ для отсутствия в двухфазной зоне микропористости уже необходимо выполнение двух условий при нулевом и единичном значении доли жидкой фазы:

$Por(0) > 1$ и $Por(1) > 1$. Второе условие - условие отсутствия микропористости на ликвидусе, когда твердой фазы еще нет и $f_l^* = 1$. Перемещение жидкой фазы в двухфазной зоне по фильтрационной модели начинается со значения доли жидкой фазы, меньше некоторого критического значения $f_{l_{kr}} < 1$ ($f_{l_{kr}}$ – критическое значение доли жидкой фазы). Для алюминиевых сплавов во многих экспериментах установлено значение $f_{l_{kr}} = 0,35$. Поэтому условие отсутствия в двухфазной зоне микропористости при единичном значении доли жидкой фазы правильнее переписать в виде $Por(f_{l_{kr}}) > 1$. Условие $Por(1) > 1$ является более жестким ограничением для отсутствия пористости. Если это условие выполняется, то тем более будет выполняться условие $Por(f_{l_{kr}}) > 1$. На практике, условие $Por(1) > 1$ может быть полезно для оценки образования пористости в отливках из сплавов, где величина $f_{l_{kr}}$ еще неизвестна.

В частном случае при постоянной скорости фронта затвердевания $V = const$ и выполнении условий:

$$\begin{cases} T(f_l) = T_s + (T_L - T_s)f_l \\ \varphi = 1 \\ \theta(f_l) = f_l \\ d\theta / df_l = 1 \end{cases} \quad (15)$$

время t нахождения точки отливки в двухфазной зоне будет $t = L/V$, L – длина двухфазной зоны, T_L, T_s – температура ликвидуса и солидуса сплава.

Соответственно скорость охлаждения $R = \frac{T_L - T_s}{t} = \frac{GL}{t} = GV$. Если в (14) выразить $V = R/G$, то в новом критерии появится хорошо известный критерий Ниямы $Ni = G/\sqrt{R}$:

$$Por = \min \left(\frac{\lambda_2 \sigma}{45 \mu \beta \Delta T_l} Ni^2, \frac{P_a + \rho gh + \frac{4\sigma}{\lambda_2}}{P_g} \right) < 1 \quad (16)$$

Последнее выражение позволяет провести анализ области применимости критерия Ниямы в приближение $V = const$. В случае малой газонасыщенности расплава, при $P_a + \rho gh - P_g \geq 0$, для отсутствия пористости достаточно

выполнения только одного условия: $\frac{\lambda_2 \sigma}{45 \mu \beta \Delta T} Ni^2 \geq 1$, которое можно переписать в виде:

$$Ni \geq Ni_{kr} = \sqrt{\frac{45\mu\beta\Delta T}{\lambda_2\sigma}} \quad (17)$$

При этом атмосферное давление, металлостатическое давление и давление газа в этом условии отсутствуют, и образование пористости будет зависеть только от одной переменной - числа Ниямы (считаем, что $\mu, \beta, \sigma, \lambda_2 = const$). В теории подобия это интерпретируется как выпадение факторов влияния (атмосферного давления, давления газа и металлостатического давления). Из полученного условия можно определить критическое значение числа Ниямы, выше которого пористость в отливках образовываться не будет.

В случае высокой газонасыщенности сплава, при $P_a + \rho gh - P_g < 0$, значение числа Ниямы выше критического, по новому критерию уже не будет соответствовать условию отсутствия порообразования. Микропористость

будет образовываться, если $\frac{P_a + \rho gh + \frac{4\sigma}{\lambda_2}}{P_g} < 1$ вне зависимости от числа Ниямы.

Однозначное влияние числа Ниямы на образование пористости сохраняется при высокой газонасыщенности, только для ситуации, при которой $\frac{P_a + \rho gh + \frac{4\sigma}{\lambda_2}}{P_g} \geq 1$.

Таким образом, новый критерий не содержит трудно измеряемых физических параметров и не требует дополнительной «экспериментальной» настройки, что полезно для практического использования в системах моделирования литьевых процессов, на этапе оценки условий образования микропористости в отливках.

Разобран способ обработки электрическим током алюроматричного композиционного материала (КМ). Алюроматричный композиционный материал на основе алюминиевого сплава *AK12* получали в проходной емкости добавлением на струю расплава частиц композита. Удельная мощность электрического тока рассчитывалась по мощности, подводимой к электродам, отнесённой к величине массового расхода жидкого композита (кг/с), заливаемого из проходной ёмкости в литьевые формы. Величина удельной мощности для данной проходной ёмкости составила 650...663 Дж/кг. В качестве композиционной добавки использовали графит обогащённый кристаллический марки *ТГ-1* и частицы карбида титана (*TiC*), количество вводимых компонентов составляло 15 объёмных процентов.

Измерения механических свойств исходного сплава *AK12* и композиционного материала на основе сплава *AK12* с добавлением частиц композита, проводимого без воздействия электрического поля и, с воздействием показали, что электрическое поле влияет на процесс формирования межфазной границы между металлической матрицей и дисперсным включением. Упрочнение структуры межфазной границы вызывает повышение прочности структуры КМ (Таблица 2).

Таблица 2. Данные по воздействию обработки электрическим полем на механические свойства КМ.

Исходные необработанные сплавы			
<i>AK12</i>	<i>AK12 + TG-1</i>	<i>AK12 + TiC</i>	Механические свойства сплавов
149	161	182	σ_B , МПа
5,1	9,6	8,2	δ , %
52	49	53	НВ, кг/см ²
Сплавы с обработкой электрическим полем			
			σ_B , МПа
153	192	219	σ_B , МПа
5,9	11,1	8,1	δ , %
54	58	66	НВ, кг/см ²

В заключении представлены основные результаты исследования диссертационной работы.

1. Доказано, что электрический ток высокой плотности ($j \leq 10^9$ А/м²) в условиях интенсивного охлаждения вызывает структурные изменения в проводнике. В результате анализа *BAX* проводников (*Ni* – фольга, *Cu* – проволока) рассчитана энергия, выделяемая при перестройке дислокационной структуры. В рамках теории пластического деформирования под действием электрического тока проведена оценка количества дислокаций, участвующих в структурных превращениях.

2. Методами ФМР и МРЭ доказано, что электрический ток и внешнее магнитное поле влияют на магнитные характеристики ферромагнитных металлов. Изменение физических характеристик ТМП и тонких ферромагнитных фольг при ФМР и МРЭ доказывают возможность динамического обратимого влияния тока на высокочастотные характеристики ТМП при ФМР и необратимого, связанного со структурными изменениями в образце, как в случае МРЭ в фольгах.

3. Установлено, что влияние тока на высокочастотные характеристики ТМП имеет динамический (обратимый) характер, так как после выключения тока значения параметров ФМР возвращались к исходным. Указанное влияние постоянного тока на параметры ФМР в ТМП объясняется в рамках статистической модели магнитоневзаимодействующих блоков.

4. Показано, что при кристаллизации под действием постоянного электрического тока происходят структурные изменения в алюминиевых сплавах, выражющиеся в уменьшении дендритного параметра, увеличении твердости и плотности сплава. Происходит изменение текстуры материала, возникает анизотропия, что подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа и наличием анизотропии электросопротивления. Твердость материала, кристаллизация которого происходила под действием тока, возрастает.

5. Исследования параметров структуры, физических и эксплуатационных свойств образцов из силуминов, подтверждают, что электрический ток влияет на интенсивность массопереноса, газосодержание металлов,

растворимость примесных компонент, размер и содержание газовых пор уменьшается, а эксплуатационные свойства улучшаются. Указанные изменения обусловлены механическими напряжениями, энергией электрического и магнитного полей.

6. Физическая модель, описывающая движение фронта кристаллизации при пропускании электрического тока, позволяет объяснить временную зависимость падения напряжения на образце, а также контролировать процесс фазового перехода.

7. Обнаружено уменьшение газовой пористости в сплавах *AK 12* и *AK12M2MgH* при их кристаллизации под действием электрического тока и предложена физическая модель, объясняющая полученный результат.

8. Предложен метод электромагнитоимпульсного заполнения микроформ расплавом. Метод предназначен для улучшения условий заполнения фасонной литейной формы малым объемом жидкого металла, когда доминируют силы поверхностного натяжения и сопротивления движению. Данная схема воздействия имеет практическое значение не только как метод управления движением объема, но и позволяет измерить коэффициент сопротивления жидкого металла и формы, что может быть использовано в инженерных расчетах, связанных с движением жидкого электропроводного материала.

9. Получен новый критерий образования микропористости в отливках, имеющий безразмерную форму и учитывающий не только термические условия процесса затвердевания, но и технологические параметры, такие как атмосферное и металlostатическое давление, газонасыщенность сплава. Предложена схема анализа условия образования пористости на основе графической интерпретации модельных неравенств, позволяющая наглядно представить влияние термических и технологических параметров и не требующая проведения натурного эксперимента.

Основные результаты исследования опубликованы в работах

1. Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. Динамический механизм дисперсии высокочастотных магнитных параметров поликристаллических ферромагнитных металлов //Физика металлов и металловедение. 1987. Т. 64, Вып. 4. С. 821-824 (0,35 п.л./ 0,15 п.л.).
2. Семенцов Д.И., Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. Влияние электрического тока на магниторезистивный эффект в магнитных пленках// Письма в журнал технической физики 1991. Т.17, Вып.4. С.28-32 (0,35 п.л./0,15 п.л.).
3. Особенности ферромагнитного резонанса в металлических магнитных пленках с дисперсией оси электрической анизотропии / С.Л. Тимченко [и др.] // Вестник МГТУ, сер. Приборостроение. 1991. № 1. С.106-114 (0,6 /0,2 п.л.).
4. Гальваномагнитные эффекты в пленках с угловой дисперсией магнитной анизотропии / С.Л. Тимченко [и др.] // Вестник МГТУ, сер. Приборостроение 1993. № 2. С. 125-132 (0,55 п.л./0,15 п.л.).
5. Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. О физической природе феноменологического закона электропроводности металлов// Вестник МГТУ, сер. Приборостроение. 1994. № 2. С.110-119 (0,8 п.л. /0,4 п.л.).

- 6.Корнев Ю.В., Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. О физической природе закона электропроводности металлов//Доклады Академии Наук. 2001. Т.380, № 4. С.1-4 (0,3 п.л./0,1 п.л.).
(Kornev Yu. V., Sidorenkov V.V., Timchenko S.L. The physical nature of the electric-conduction law for metals// Doklady Physics 2001. T. 46, №10. C. 690-693 (0,3 п.л./0,1 п.л.)).
- 7.Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. О механизме влияния электрического тока высокой плотности на ферромагнитный резонанс в пленках ферромагнитного металла// Вестник МГТУ, сер. «Естественные науки». 2003. №2. С. 112-118 (0,5п.л. /0,25 п.л.).
8.Рыбкин В.А., Тимченко С.Л. Кристаллизация алюминиевого сплава под действием электрического тока// Литейное производство 2003. № 10. С. 17-19 (0,3 п.л. /0,15 п.л.).
(Rybkin V.A., Timchenko S.L. Crystallization of aluminum alloy under the action of electric current// Litejnoe Proizvodstvo. 2003. №10. C. 17-19 (0,3 п.л. /0,15 п.л.)).
- 9.Тимченко С.Л., Задорожный Н.А. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевого сплава // Литейное производство. 2005. №9. С. 12-13 (0,3 п.л./0,2 п.л.).
(Timchenko S.L., Zadorozhnyj N.A. Effect of electric current on the crystallization of an aluminum alloy// Litejnoe Proizvodstvo. 2005 (0,3 п.л./0,2 п.л.))
- 10.Тимченко С.Л. Изменение твердости в отливках из силумина// Литейное производство. 2010. №10. С. 28-30 (0,3 п.л.).
- 11.Тимченко С.Л. Движение жидкого металла в форме под действием электромагнитной силы// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки» 2011. №2. С. 78-86 (0,6 п.л.).
- 12.Тимченко С.Л. Исследование кристаллизации сплава под действием электрического тока// Расплавы. 2011. №4. С.53-61 (0,6 п.л.).
- 13.Тимченко С.Л., Хартман Р. Применение электромагнитных сил в литейном процессе // Литейное производство. 2011. №9. С.29-32 (0,3 п.л./0,15 п.л.).
- 14.Тимченко С.Л., Кобелева Л.И., Задорожный Н.А. Влияние электрического тока на структуру и свойства алюминиевого сплава// Физика и химия обработки материалов. 2011. №6. С.82-87 (0,4 п.л. /0,2 п.л.).
- 15.Тимченко С.Л. Способ контроля кристаллизации алюминиевого сплава// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2012. №1. С. 64-73 (0,7 п.л.).
- 16.Тимченко С.Л. Особенности ВАХ структурно-неоднородных проводящих сред // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2012. №5 (специальный выпуск). С. 56-64 (0,6 п.л.).
- 17.Тимченко С.Л., Кобелева Л.И., Задорожный Н.А. Влияние электрического тока на пористость алюминиевых сплавов//Расплавы. 2013. №4. С.58-68 (0,8 п.л./0,4 п.л.).
- 18.Тимченко С.Л., Кобелева Л.И. Особенности дендритного строения силумина АК12 при кристаллизации под действием тока//Физика и химия обработки материалов. 2013. №4. С. 78-83 (0,4 п.л./0,2 п.л.).

19. Тимченко С.Л., Задорожный Н.А. Особенности формирования структуры алюминиевого сплава при кристаллизации под действием тока//Литейное производство. 2016. №8. С. 11-14 (0,3 п.л./0,2 п.л.).
20. Тимченко С.Л. Механические напряжения отливки цилиндрической формы в области скин-слоя // Литейщик России. 2010. №10. С. 34-36. (0,3 п.л.).
21. Тимченко С.Л. Влияние электрического тока на дендритную структуру алюминиевого сплава // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 8 (20). С.47-58 (0,9 п.л.).
22. Timchenko S. L. Magnetoresistance effect in ferromagnetic metal foil // J. Phys.: Conf. Ser. 918 (2017) 012018 (0,4 п.л.).
23. Poliakov S. N., Korotchenko A. Yu., Timchenko S. L. A criterion for estimating the probability of microporosity formation in castings // J. Phys.: Conf. Ser. 918 (2017) 012001. (0,4 п.л./0,15 п.л.).
24. Timchenko S. L., Zadorozhnyj N. A. Change in the structure of the aluminium alloy under the action of direct electric current // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 683 012044 (Advances in Composite Science and Technology, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 683 (2019) 012044 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/683/1/012044) (0,4 п.л./0,2 п.л.).
25. Minenko G. N., Timchenko S. L. Electric treatment of alumina composite materials//IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 683 012035(Advances in Composite Science and Technology, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 683 (2019) 012035 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/683/1/012035) (0,4 п.л./0,2 п.л.).
26. Timchenko S. L., Zadorozhnyj N. A. Features of the formation of an electric field in a non-uniform conducting medium // J. Phys.: Conf. Ser. 1348(2019) 012085 (0,4 п.л./0,3 п.л.).
27. Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. О механизме влияния электрического тока высокой плотности на параметры ФМР в пленках ферромагнитного металла // Тез.докл. XVI всероссийской школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». М.: МГУ. 1998. С. 324-325 (0,2 п.л./0,1 п.л.).
28. Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. Динамическое намагничивание вещества под действием вихревого электрического поля // Тез. докл. XVII всероссийской школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». М.: МГУ. 2000. С. 841-842 (0,2 п.л./0,1 п.л.).
29. Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. Об электрическом поле в металле при электропроводности // Тез. докл. Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике». М., 2001. С. 220-221 (0,2 п.л. /0,1 п.л.).
30. Задорожный Н.А., Тимченко С.Л. Влияние электрического тока на кристаллизацию сплавов // Материалы V международной конференции «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов». Воронеж. 2003. С. 122-125 (0,3 п.л./0,2 п.л.).
31. Тимченко С.Л., Задорожный Н.А., Хартман Р. Магнитоимпульсное заполнение литейной формы // Необратимые процессы в природе и технике: Труды четвертой всероссийской конференции 29-31 января 2007 г. (в 2-х

частях) Ч. II. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФИАН. 2007. С.473-478 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

32. Тимченко С.Л., Задорожный Н.А. Влияние электрического тока на газовую пористость отливок // Материалы VII международной конференции «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов». Воронеж. 2007. С. 75-79 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

33. Тимченко С.Л., Задорожный Н.А. Метод контроля твердожидкого состояния сплава // Необратимые процессы в природе и технике: Труды шестой всероссийской конференции 26-28 января 2011 г. (в трех частях) Ч. II. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. С.177-182 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

34. Тимченко С.Л., Поляков С.Н., Баст Ю. Управление податливостью литейных стержней // Необратимые процессы в природе и технике: Труды шестой всероссийской конференции 26-28 января 2011 г. (в трех частях) Ч. II. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. С.286-291 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

35. Тимченко С.Л., Кобелева Л.И. Влияние электрического тока на дендритную структуру сплава АК12 // Необратимые процессы в природе и технике: Труды седьмой всероссийской конференции 29-31 января 2013 г. (в трех частях) Ч. II. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. С.157 – 162 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

36. Тимченко С.Л., Задорожный Н.А. Кристаллизация алюминиевых сплавов под действием постоянного электрического тока // В сборнике: Ключевые тренды в композитах: наука и технологии сборник материалов Международной научно-практической конференции. Москва. 2019. С. 717-721 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

37. Тимченко С.Л., Задорожный Н.А. Формирование электрического поля в неоднородной проводящей среде // В сборнике: Необратимые процессы в природе и технике. Труды Десятой Всероссийской конференции. В 3-х частях. Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2019. С.150-153 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

38. Миненко Г.Н., Тимченко С.Л. Способ обработки электрическим током алюроматричных композиционных материалов // В сборнике: Ключевые тренды в композитах: наука и технологии сборник материалов Международной научно-практической конференции. Москва. 2019. С. 504-511. (0,4 п.л./0,2 п.л.).

Авторские свидетельства и патенты

39. Способ обработки ферромагнитных металлов и сплавов / Тимченко С.Л. [и др.] // А.С. №1693113. Б.И. 1991. № 43.

40. Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. Способ текстурирования металлов // А.С. №1770399. Б.И. 1992. № 39.

41. Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. Способ измерения электросопротивления тонких магнитных пленок // А.С. №1803892. Б.И. 1993. № 11.

42. Способ индукционного нагрева плоского изделия из электропроводного материала / С.Л. Тимченко [и др.] // А.С. № 1707782 А1. Б.И. 1992. № 3.

43. Способ управления процессом формирования фасонных отливок / С.Л. Тимченко [и др.] Патент России 2220816С2 // Опубл. 10.01.04. Бюл. № 1. Открытия, изобретения, товарные знаки.

Тимченко Светлана Леонидовна

Управление физическими свойствами металлов и сплавов с помощью
электрического и магнитного полей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 02.07.2021

Объем: 2 усл. п. л.

Тираж: 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в типографии «11-й ФОРМАТ»

115230, г. Москва, Варшавское ш., 36

(499)788-78-56 www.autoreferat.ru