

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института структурной
макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова Российской академии наук
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН



М.И. Алымов

«10» *март* 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук» на диссертационную работу Ролдугиной Анны Сергеевны «Влияние сегрегационных эффектов на формирование кристаллографической текстуры и структуры на различных этапах производства электротехнической анизотропной стали с различным содержанием олова», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы диссертационной работы

Снижение потерь при передаче электроэнергии является основной задачей в области развития магнитомягких материалов. Улучшение магнитных свойств электротехнической анизотропной стали, которая используется в сердечниках трансформаторов, позволит увеличить эффективность их работы за счет снижения потерь при перемагничивании. По этой причине актуальны металлургические исследования, которые посвящены разработке новых марок данного класса стали с улучшенными свойствами.

Производство электротехнической анизотропной стали является сложным, наукоемким технологическим процессом, главным результатом которого должно быть получение в конечном продукте однонаправленной

текстуры Госсса $\{110\}<001>$, причем близкой к идеальной ориентировке. Работа над свойствами данного материала тесно связана с управлением текстурными преобразованиями, поскольку на формирование текстуры Госсса в конечном продукте влияет кристаллографическая текстура, сформированная на предыдущих переделах. Важную роль также играет явление ингибирования, которое заключается в торможении роста зерен посторонних ориентировок с помощью частиц дисперсной фазы или сегрегации элементов на границах.

Одной из наиболее современных технологий производства электротехнической анизотропной стали является производство по методу приобретенного ингибитора. Особый интерес представляет дополнительное легирование металла оловом при внедрении метода приобретенного ингибитора. Олово относится к элементам, склонным к сегрегации на границах зерен, на поверхности и на границах раздела фаз, и в силу этого свойства олово влияет на формирование кристаллографической текстуры и структурных характеристик электротехнической анизотропной стали. Таким образом, олово вносит дополнительный ингибирующий вклад на различных этапах технологической цепочки и позволяет стабилизировать процесс производства по методу приобретенного ингибитора. Исследование механизмов формирования свойств электротехнической анизотропной стали и влияния олова на эти механизмы позволит успешно разработать технологию производства улучшенных марок стали данного класса по методу приобретенного ингибитора.

Структура диссертационной работы и её основные положения

Диссертационная работа Ролдугиной А.С. представляет собой комплексное исследование, посвящённое определению механизмов влияния сегрегации олова на формирование и эволюцию кристаллографической текстуры и структуры в процессе производства электротехнической анизотропной стали.

Диссертация изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка, 2 таблицы и 123 литературного источника. Структура работы включает введение, шесть глав и заключения. Представленная к рассмотрению диссертационная работа имеет структуру, соответствующую требованиям ГОСТ, выдвигаемым к диссертационным работам.

Введение обосновывает актуальность проводимых исследований, устанавливает цели и задачи исследования. Также во введении изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ литературных источников, позволяющий определить конкретные задачи, которые необходимо решить в рамках исследования.

Вторая глава рассматривает материалы исследования и методы, применяемые в ходе диссертационной работы.

В третьей главе приведены результаты физического моделирования процесса первичной рекристаллизации электротехнической анизотропной стали и исследования образцов после моделирования методом дифракции обратноотраженных электронов (EBSD). Выведены уравнения кинетики первичной рекристаллизации для сплавов с различным содержанием олова и показано, на каком этапе и каким образом олово влияет на кинетику первичной рекристаллизации.

В четвертой главе описаны анализ текстуры образцов на разных этапах первичной рекристаллизации и описано, по какому механизму формируется конечная текстура материала. Показано, как олово влияет на формирование кристаллографической текстуры первичной рекристаллизации электротехнической анизотропной стали. Также приведены результаты моделирования высокоскоростного нагрева перед химико-термической обработкой металла и показано, что высокоскоростной нагрев позволяет достичь повышения доли текстурной компоненты Госса, что благоприятно сказывается на свойствах конечного продукта.

В пятой главе рассмотрен процесс вторичной рекристаллизации, при котором должна быть сформирована однонаправленная текстура Госса в материале. Исследование показало, по какому механизму проходит рост зерен различных ориентировок в процессе вторичной рекристаллизации при высокотемпературном отжиге. Продемонстрирована связь частоты специальных границ с ростом зерен различных ориентировок.

В шестой главе исследовано влияние олова на процессы азотирования, а также на формирование зоны внутреннего окисления при химико-термической обработке. Экспериментально подтверждена сегрегация олова на границе раздела металла и оксидной фазы.

В заключении перечислены основные результаты проведенных исследований, соответствующие поставленным задачам.

Научная новизна диссертационной работы

В представленной диссертационной работе получены новые данные, значительно расширяющие область знаний о свойствах электротехнической анизотропной стали.

Уточнен вклад сегрегационного ингибирования за счет дополнительного легирования ЭАС оловом в формирование структуры и кристаллографической текстуры первичной и вторичной рекристаллизации при производстве ЭАС с высокой магнитной индукцией.

Установлен преимущественный механизм текстурообразования в ЭАС при первичной рекристаллизации. Определено влияние олова на формирование кристаллографической текстуры ЭАС при первичной рекристаллизации.

Получены новые данные о формировании кристаллографической текстуры в процессе аномального роста при вторичной рекристаллизации в ЭАС: выявлены причины аномального роста кристаллографических ориентировок, отличных от текстуры Госса и причины наличия в структуре зерен, не поглощенных при аномальном росте зерен на этапе вторичной рекристаллизации.

Определены особенности влияния химического состава на протекание вторичной рекристаллизации в комплексно - легированной ЭАС.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы

Теоретическая значимость полученных результатов обусловлена расширением имеющихся знаний о формировании кристаллографической текстуры в электротехнической анизотропной стали, а также о протекании процессов окисления и азотирования в данном материале.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в оценке влияния содержания олова на свойства электротехнической анизотропной стали. Проведенные исследования позволили определить диапазон оптимального содержания олова с точки зрения благоприятного протекания первичной и вторичной рекристаллизации, а также формирования поверхности без дефектов. Значимым результатом работы является разработка новых методических подходов к исследованиям материалов данного класса. Разработаны методики анализа остроты текстуры и визуализации доменной структуры. Автором предложена формула вычисления магнитной индукции по параметрам остроты текстуры, которая позволяет достичь более точного совпадения с экспериментальными данными, чем формулы из литературных источников.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности, по которой она рекомендуется к защите

Диссертационная работа «Влияние сегрегационных эффектов на формирование кристаллографической текстуры и структуры на различных этапах производства электротехнической анизотропной стали с различным содержанием олова» соответствует паспорту специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, а именно пунктам:

пункт 2 – «теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, включая технологические воздействия»;

пункт 4 – «теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных, радиационных, акустических и других воздействий на изменение структуры и свойств металлов и сплавов»;

пункт 10 – «разработка новых и совершенствование существующих методов фазового, структурного и физико-химического анализов сплавов с учетом возможности цифровизации измерений».

Достоверность результатов исследования

Полученные в ходе исследования результаты можно с уверенностью назвать достоверными, поскольку исследования проводились с применением современных методик и в соответствии со стандартными мировыми практиками изучения кристаллографической текстуры и структуры образцов. Кристаллографическая текстура была исследована методами дифракции обратноотраженных электронов и рентгеновской дифрактометрии. Для изучения структурных характеристик применялись сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия. Для физического моделирования промышленных процессов использовались методы дилатометрии и моделирование в лабораторных печах. Полученные результаты не противоречат общим представлениям о физике процессов и наблюдениям других исследователей.

Личный вклад автора в получение результатов исследования

Автором лично проводились физическое исследование и микроструктурные исследования образцов для диссертационной работы. Также автором проведено научно-теоретическое обоснование проведенных экспериментов, выполнена подготовка и проведение экспериментов, анализ

полученных данных, обобщение полученных результатов и подготовка научных публикаций.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 12 печатных изданиях, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах по перечню ВАК РФ, 2 статьи в базе данных Scopus.

Публикации в научных изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК:

1. Влияние легирования оловом на свойства зоны внутреннего окисления и характеристики дисперсной фазы в анизотропной электротехнической стали / А.С. Ролдугина, М.В. Рязанов, В.И. Парахин // Проблемы черной металлургии и материаловедения – 2023. – № 2. – С. 60-77. (2,25 п.л./1,13 п.л.).

2. Закономерности процесса первичной рекристаллизации высокопроницаемой электротехнической анизотропной стали с дополнительными легирующими добавками / А.С. Ролдугина, М.В. Рязанов, В.И. Парахин // Физика металлов и материаловедение. – 2024. – Т.125. – № 7–С. 831-839. (1,13 п.л./0,62 п.л.).

3. Исследование формирования текстуры в процессе вторичной рекристаллизации в высокопроницаемой электротехнической анизотропной стали с различными легирующими добавками / А.С. Ролдугина, М.В. Рязанов, В.И. Парахин // Металловедение и термическая обработка металлов – 2024. – №. 12. – С. 32-40. (1,13 п.л./0,68 п.л.).

4. Методика исследования текстурных характеристик и доменной структуры электротехнической анизотропной стали методом микроскопии / А.С. Ролдугина, М.В. Рязанов, В.И. Парахин // Металлы – 2025. – №.2. – С.41-48. (1,00 п.л./0,50 п.л.).

5. Теоретическая и экспериментальная оценка влияния сегрегационных эффектов на формирование кристаллографической текстуры, структуры и свойств поверхности электротехнических сталей / А.С. Ролдугина, М.В. Рязанов, Г.Н. Еремин, В.И. Парахин, А.Е. Чеглов, И.А. Цыганов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2026. – №2. – С.32-40. (1,13 п.л./0,34 п.л.).

6. Взаимосвязь текстуры первичной и вторичной рекристаллизации в электротехнической анизотропной стали / А.С. Ролдугина, И.А. Цыганов, М.В. Рязанов, В.И. Парахин// Проблемы черной металлургии и материаловедения. - 2025. - №. 3. – С. 75-84. (1,25 п.л./0,50 п.л.).

Переводные публикации в научных изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus:

1. Roldugina, A.S. Regularities of Primary Recrystallization of Highly Permeable Electrical Anisotropic Steel with Additional Dopants/ A. S. Roldugina, M. V. 20 Ryazanov, V. I. Parakhin // Physics of Metals and Metallography. – 2024. – Vol. 125. – No. 7. – pp. 730–737. (1,00 п.л./0,55 п.л.).

2. Roldugina, A.S. Formation of Texture in the Process of Secondary Recrystallization of High-Permeability Anisotropic Electrical Steel with Different Alloying Additions / A. S. Roldugina, M. V. Ryazanov, V. I. Parakhin // Metal Science and Heat Treatment. – 2025. – Vol.66. – Pp.754-761. (1,00 п.л./0,60 п.л.).

Апробация диссертационной работы проведена на российских конференциях: «Бардинские чтения» (ЦНИИчермет им. И.П.Бардина, г. Москва, 2023), «Электротехническая сталь 2024» (МИСиС, г. Москва, 2024), «Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах» (г. Воронеж, 2024); «Физико-химические основы металлургических процессов» в рамках XXII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии (г. Сочи, 2024).

Автореферат диссертации полно отражает содержание работы и соответствует требованиям к оформлению автореферата.

Замечания по диссертационной работе

1) В главе 3 на стр. 66 предлагается разделить процесс рекристаллизации на три этапа, что представлено схематически на рисунке 23 (диссертация) и рисунке 3 (автореферат). Однако в тексте описания этих этапов не представлено и разделение процесса рекристаллизации именно на три этапа не обосновано.

2) В исследовании приведены косвенные свидетельства того, что именно теория избирательной мобильности специальных границ способствует аномальному росту зерен при вторичной рекристаллизации. Однако однозначного экспериментального наблюдения этого факта не было сделано. Поэтому рассматривать текстуру первичной рекристаллизации с точки зрения благоприятных и неблагоприятных текстурных компонент в аспекте наличия специальных границ с зернами Госса может быть ошибочным допущением.

3) В главе 5 в п. 5.4 «Исследование доменной структуры в ЭАС после вторичной рекристаллизации» показана методика анализа доменной структуры, но не сделано никаких выводов из приведенных изображений

доменной структуры, и в целом неясно, как была использована эта информация.

4) Исследование процессов первичной рекристаллизации, а также влияния высокоскоростного нагрева на текстуру первичной рекристаллизации проводилось на образцах ЭАС после холодной прокатки двух различных химических составов: сталь А с высоким содержанием олова и низким содержанием хрома и сталь В со средним содержанием олова и высоким содержанием хрома. Автором не представлено, влияет ли на процессы сегрегации олова изменение содержания хрома в стали.

5) В главе 6, п 6.2.2 «Влияние олова на протекание фазовых превращений в процессе химикотермической обработки» при описании строения зоны внутреннего окисления приповерхностных слоев в образцах ЭАС с различным содержанием олова не обозначены элементы структур на рис. 62 (диссертации) и рис. 8 (автореферата), что затрудняет их восприятие.

7) В заключении диссертации (стр. 141), в выводах 5 и 7 автор устанавливает одинаковый результат – оптимальным принимается состав стали со средним содержанием олова. Целесообразно было бы объединить эти выводы.

Тем не менее, отмеченные недостатки не ставят под сомнение научную новизну диссертационной работы и достоверность ее выводов.

Заключение

Диссертационная работа Ролдугиной Анны Сергеевны «Влияние сегрегационных эффектов на формирование кристаллографической текстуры и структуры на различных этапах производства электротехнической анизотропной стали с различным содержанием олова», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, является завершенной научно-квалификационной работой. Поставленные перед исследованием цели достигнуты, полученные результаты вносят значимый вклад в развитие конкретной области металловедения и актуальны в контексте разработки технологии производства улучшенных марок электротехнических сталей.

Диссертационная работа соответствует требованиям к кандидатской диссертации, перечисленным в «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. от 25.01.2024 г.), а ее автор Ролдугина Анна Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки).

Работа заслушана и обсуждена на секции Ученого совета ИСМАН «Материалообразующие процессы горения и взрыва» (протокол № 8 от 14 апреля 2026 г.). Отзыв составлен на основании доклада, анализа диссертации, автореферата и публикаций Ролдугиной А.С.

Рецензент:

ведущий научный сотрудник ИСМАН
д.т.н.

Ольга Леонидовна
Первухина

Председатель секции Ученого совета ИСМАН,
главный научный сотрудник
лаборатории жидкофазных СВС-процессов
и литых материалов ИСМАН,
д.т.н., профессор

Владимир Исаакович
Юхвид

Подписи Первухиной О.Л. и Юхвида В.И. удостоверяю
Ученый секретарь ИСМАН, к.т.н.



Е.В. Петров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН)
142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 8.
Тел.: 8 (49652) 46-376, Факс: 8 (49652) 46-222, E-mail: isman@ism.ac.ru