

Отзыв

официального оппонента Губанова Олега Михайловича
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

Основным материалом, используемым для изготовления сердечников трансформаторов, является электротехническая анизотропная сталь. Совершенствование характеристик данного класса сталей является актуальным направлением научных разработок, поскольку позволит достичь значительной экономии электрической энергии в процессе ее трансформации для передачи по ЛЭП. Необходимым условием достижения высокой магнитной индукции и низких потерь при перемагничивании в электротехнической анизотропной стали является наличие во всех макрозернах конечного продукта однонаправленной кристаллографической текстуры $\{110\}<001>$, которая также называется текстурой Госса. Основной задачей при разработке новых марок электротехнической анизотропной стали является улучшение совершенства (остроты) текстуры Госса. На этот параметр влияют многие факторы – явление текстурной наследственности в электротехнической анизотропной стали, состояние дисперсной ингибиторной фазы, характеристики поверхности материала. Мало изучен механизм влияния на свойства электротехнической анизотропной стали элементов, склонных к сегрегации на границах зерен, например, олова, которое по ряду наблюдений может улучшить свойства электротехнической анизотропной стали. Для создания технологии производства марок стали с улучшенными магнитными свойствами необходимы исследования, которые опишут процесс формирования острой текстуры Госса в конечном продукте и выявят пути совершенствования свойств материала. В представленной работе определен эффект от легирования оловом на формирование свойств электротехнической анизотропной стали и показано, что олово комплексно влияет на различные характеристики стали.

Значимость результатов, полученных автором, для науки и практики Научная новизна диссертационной работы

Автор выдвигает ряд положений научной новизны, которые объективно описывают проведенную работу. Так, в ходе исследований были впервые актуализированы параметры уравнения Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврами для рассмотренной анизотропной электротехнической стали промышленного производства, которое описывает кинетику первичной

рекристаллизации. Также определен механизм формирования текстуры первичной рекристаллизации, который до этого момента оставался переменным: было показано, что текстура электротехнической анизотропной стали формируется преимущественно за счет ориентированного роста зерен, а не ориентированного зародышеобразования. Описано влияние олова на содержание различных текстурных компонент. Также получены новые данные по вопросу механизма аномального и нормального роста зерен при вторичной рекристаллизации. Впервые экспериментальным методом продемонстрирована сегрегация олова на границе раздела фаз в зоне внутреннего окисления электротехнической анизотропной стали.

Практическая значимость полученных автором результатов заключается в определении зависимости текстуры первичной и вторичной рекристаллизации от содержания олова, а также влияния олова на протекание процессов химико-термической обработки и на формирование поверхности. Показано, что при превышении оптимального содержания олова снижается количество текстурных компонент первичной рекристаллизации, благоприятных для аномального роста зерен Госсса, а также снижается эффективность азотирования и ухудшается качество поверхности. Среди важных для практического применения результатов также необходимо отметить исследование высокоскоростного нагрева перед химико-термической обработкой, которое показало, что применение высокоскоростного нагрева значительно увеличивает содержание зерен Госсса в текстуре первичной рекристаллизации.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов

Достоверность полученных автором результатов базируется на использовании современной методологической базы для микроструктурных исследований, а также согласованностью результатов с физическими законами и наблюдениями других исследователей. В качестве методов исследования использовались дилатометрия, сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия, анализ методом EBSD, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

Оценка структуры и содержания диссертации

Диссертация оформлена в соответствии с действующим ГОСТ и состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 155 страниц, в том числе 64 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 123 наименования.

Введение в диссертацию обосновывает актуальность поставленных задач и показывает, что на данный момент имеющихся знаний недостаточно для обоснованной корректировки технологии производства электротехнической анизотропной стали с дополнительным легированием оловом. Приведены цель и задачи диссертационного исследования, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен обзор литературных источников по вопросам, которым посвящена диссертационная работа. Рассматривается тема формирования кристаллографической текстуры и структуры электротехнической анизотропной стали, а также известные работы о влиянии легирования оловом на эти процессы. Показано, что по различным вопросам формирования текстуры и структуры электротехнической анизотропной стали отсутствует понимание их механизмов, а приведенные в литературе гипотезы противоречивы. На основании этого наблюдения перед исследованием поставлены задачи, которые позволят заполнить имеющиеся пробелы в знаниях в данной области.

Во второй главе описаны материалы и методы исследования.

В третьей главе на основании физического моделирования с применением метода дифракции обратноотраженных электронов описана кинетика первичной рекристаллизации сплавов электротехнической анизотропной стали с различным содержанием олова. Актуализированы параметры уравнения Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврами, показано влияние легирования оловом на кинетику первичной рекристаллизации электротехнической анизотропной стали промышленного производства.

В четвертой главе выявлен преимущественный механизм формирования текстуры при первичной рекристаллизации в электротехнической анизотропной стали. Определено влияние легирования оловом на кристаллографическую текстуру первичной рекристаллизации, в частности, показано, что олово влияет на содержание текстурной компоненты $\{111\}<112>$ путем сегрегации на субграницах.

В пятой главе на основании физического моделирования высокотемпературного отжига выявлен механизм аномального роста зерен с ориентировкой, отличной от текстуры Госсса. Определена причина наличия в макроструктуре зерен, не поглощенных при аномальном росте зерен Госсса при вторичной рекристаллизации. Показано влияние специальных границ на интенсивный нормальный рост зерен на начальных этапах высокотемпературного отжига. Разработана методика анализа остроты кристаллографической текстуры в конечном продукте электротехнической анизотропной стали. Методика позволяет оценивать остроту текстуры с минимальными внесенными отклонениями, а также визуализировать доменную структуру с применением FSD-детекторов. Выведена формула для вычисления магнитной индукции на основании параметров остроты текстуры и их распределения. Предложенная в диссертационной работе формула дает лучшее совпадение с экспериментальными результатами по сравнению с формулами, приведенными в литературе.

В шестой главе выявлена экспериментальным методом сегрегация олова на границах раздела фаз в пределах зоны внутреннего окисления в электротехнической анизотропной стали. Показано влияние олова на протекание процессов диффузии при химико-термической обработке.

В заключении перечислены основные выводы из проведенных исследований. Выводы корректно отражают полученные результаты и

соответствуют поставленным задачам и цели диссертационной работой, и на основании этого работа является завершённой.

Соответствие содержания автореферата основным положениям автореферата

Автореферат полностью отражает суть диссертационной работы и соответствует требованиям к авторефератам диссертаций.

Также результаты рассматриваемой работы полно отражены в публикациях автора. По теме работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах по перечню ВАК РФ.

По работе есть ряд замечаний и вопросов:

В главе 3 не указана степень деформации стали до начала первичной рекристаллизации и не рассмотрено влияние данного фактора, как одной из основных движущих сил первичной рекристаллизации.

В главе 4 при исследовании общих закономерностей не приведены диапазоны размеров для категоризации мелких, средних и крупных зерен.

В главе 5 не хватает пояснения к выбору граничных условий размерного фактора для разделения зерен отличных от текстуры Госсса между не поглощенными в процессе вторичной рекристаллизации и демонстрирующими способность к аномальному росту.

Указанные замечания и вопросы не снижают ценности диссертационного исследования и общей положительной оценки работы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Полученные автором результаты рекомендуются к использованию при внедрении метода приобретенного ингибитора для производства марок электротехнической анизотропной стали с улучшенными магнитными свойствами. Особенность метода приобретенного ингибитора заключается в том, что дополнительная ингибиторная фаза вводится на этапе азотирования, и поэтому на предшествующих этапах, в том числе при первичной рекристаллизации, ингибирующая способность в материале ниже, чем в классическом методе. Олово, которое склонно к сегрегации на границах, вносит дополнительный вклад ингибирования при формировании текстуры. Поэтому исследования по легированию оловом стали, произведенной по методу приобретенного ингибитора, вносят значимый вклад в развитие технологии.

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, представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу. Проведенные исследования актуальны, поставленные задачи достигнуты, работа удовлетворяет требованиям наличия научной новизны и практической значимости. Диссертационная работа соответствует формальным требованиям к содержанию и оформлению кандидатской диссертации, согласно «Положению о присуждении ученых степеней...» от 24 сентября 2013 г. №842 (в ред. от 25.01.2024 г.). Также 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 Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov i spлавов, а именно пунктам: 2 – «теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, включая технологические воздействия...», 4 – «теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных, радиационных, акустических и других воздействий на изменение структуры и свойств металлов и сплавов...», 10 – «разработка новых и совершенствование существующих методов фазового, структурного и физико-химического анализов сплавов с учетом возможности цифровизации измерений». Автор диссертационной работы Ролдугина Анна Сергеевна заслуживает присуждения степени ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov i spлавов (технические науки).

Я, Губанов Олег Михайлович, выражаю согласие на включение своих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата технических наук Ролдугиной Анны Сергеевны и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент
Кандидат технических
наук,
Директор по науке ООО
«НИЦ «Алиум»

08.05.2026г.

Подпись Губанова О.М.
заверяю:
Ведущий специалист по
кадровому
администрированию

Губанов
Олег Михайлович



Белова
Наталья Анатольевна