

Отзыв на автореферат диссертационной работы

Ролдугиной Анны Сергеевны на тему «Влияние сегрегационных эффектов на формирование кристаллографической текстуры и структуры на различных этапах производства электротехнической анизотропной стали с различным содержанием олова», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Исследование формирования кристаллографической текстуры в материалах является актуальным направлением развития современного физического материаловедения, которое неразрывно связано с наукоемкими процессами производства соответствующих материалов на практике. Эту связь олицетворяет работа диссертанта Ролдугиной Анны Сергеевны, выполненная на Новолипецком металлургическом комбинате и Центральном научно-исследовательском институте черной металлургии им. И.П. Бардина.

Технология производства холоднокатаной анизотропной электротехнической стали включает в себя последовательность из многих операций деформации и отжига, в процессе которых происходят текстурные и структурные преобразования, определяющие конечную текстуру и свойства. Несмотря на то, что в получении высокого уровня магнитных свойств электротехнической стали в мировой практике достигнуты определенные успехи, дальнейшее совершенствование текстуры и свойств продолжает оставаться актуальным, а особенности и механизмы формирования текстуры при пластической деформации, фазовых и структурных превращениях остаются до сих пор не до конца изученными.

Актуальность темы диссертации

Представленная диссертационная работа Ролдугиной А.С. посвящена исследованию влияния сегрегационных эффектов на формирование кристаллографической текстуры и структуры на различных этапах производства электротехнической анизотропной стали (АЭС) с различным содержанием олова. Магнитомягкие материалы, которые используются при изготовлении мощных силовых трансформаторов, должны обладать острой кристаллографической текстурой с наименьшими углами отклонения осей легкого намагничивания $\langle 001 \rangle$ от направления магнитного потока и оптимальным размером зерна, т.к. от этого зависит уровень магнитных свойств в АЭС. В работе рассматриваются два способа совершенствования технологии производства анизотропной стали – использование, наряду с «врожденным» ингибитором роста рекристаллизованных зерен, «приобретенного» ингибитора, возникающего на этапе азотирования холоднокатаного проката при химико-термической обработке, а также, для усиления роли последнего, добавление олова как легирующего элемента, склонного к сегрегации на границах. Склонные к сегрегации элементы являются альтернативным вариантом усиления ингибирующей способности в процессе первичной и вторичной рекристаллизации, а также положительно влияют на формирование свойств поверхности. В этой связи, диссертационная работа Ролдугиной А.С. является безусловно актуальной.

Структура и основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения. Материал изложен на 155 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка, 2 таблицы. Библиографический список включает 123 наименования.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 12 печатных изданиях, в том числе в 6 статьях в рецензируемых журналах по перечню ВАК РФ, из которых 2 также в переводной версии входят в базу цитирования Scopus.

Во **введении** сформулирована актуальность работы, её цель и задачи, описан объект исследования и процессы, на изучение которых направлено проводимое исследование, перечислены элементы научной новизны, а также теоретической и практической значимости работы, перечислены положения, выносимые на защиту, приведён список конференций, на которых представлены результаты диссертации, и перечислены опубликованные статьи.

Первая глава посвящена литературному обзору по теме диссертационной работы. Проведён краткий экскурс в историю развития электротехнических сталей, приводится анализ результатов работ по эволюции текстуры и свойств в процессе производства электротехнических анизотропных сталей, в том числе обсуждается метод приобретённого ингибитора. Отдельный подраздел посвящён влиянию олова на формирование кристаллографической текстуры и свойств в ЭАС. Рассматривается роль элементов, склонных к сегрегации на границах зёрен и на поверхности в формировании текстуры, зависимость степени сегрегации олова на границах от температуры, влияние олова на первичную и вторичную рекристаллизацию, а также на формирование поверхности в ЭАС.

Литературный обзор достаточно полно отображает современное состояние вопросов по теме работы, логично выстроен и хорошо написан.

Во **второй главе** описаны материалы и методы исследования. В качестве материала исследования взяты анизотропные электротехнические стали, производимые на заводе НЛМК. Образцы промышленной ЭАС с различными химическими составами использованы для исследования процессов первичной рекристаллизации, а также влияния высокоскоростного нагрева на текстуру первичной рекристаллизации: сталь А с высоким содержанием олова (0,05-0,1% (масс.)) и низким содержанием хрома (<0,05% (масс.)) и сталь В с низким содержанием олова (<0,05% (масс.)) и высоким содержанием хрома (0,10-0,15% (масс.)). Исследование механизма вторичной рекристаллизации проводилось на образцах ЭАС этих же двух химических составов. Для лабораторного моделирования использовались образцы в состоянии после обезуглероживания и азотирования, вырезанные из проката ЭАС в виде полосок Эпштейна размером 0,27×30×305 мм.

Исследование свойств поверхности и дисперсной фазы на ЭАС после обезуглероживания и азотирования проводилось также на стали А с высоким содержанием олова (0,05-0,1% (масс.)) и низким содержанием хрома (<0,05% (масс.)) и стали В с низким содержанием олова (<0,05% (масс.)) и высоким содержанием хрома (0,10-0,15% (масс.)). Однако дополнительно некоторые измерения характеристик ЭАС были проведены на образцах стали А с 3 различными химическими составами: сталь А без олова (А.1), сталь А со сниженным содержанием олова (0,03-0,05% вес.) (А.2) и сталь А с повышенным содержанием олова (около 0,07-0,09% вес.) (А.3). Содержание хрома в этих сталях соответствует указанному выше содержанию в стали А (<0,05% (масс.)).

Использование образцов, максимально приближенных по составу к заводскому материалу, является большим преимуществом диссертационной работы и повышает её значимость для реального производства.

Также положительным моментом является разнообразие методов исследования. Так физическое моделирование процесса ПР проводилось с помощью деформационно-закалочного дилатометра. С целью воспроизведения промышленного режима нагрева перед ХТО образцы нагревались со скоростью 30°C/с. Нагрев проводился до температур 650, 660, 670, 680, 690, 700, 720, 740°C, после достижения данных температур образцы резко охлаждались с максимально возможной скоростью в потоке гелия.

Физическое моделирование высокоскоростного нагрева проводилось на термомеханическом симуляторе Gleeble 3800 с разным режимом термической обработки.

Физическое моделирование высокотемпературного отжига осуществлялось в лабораторных печах по режиму: нагрев до 650°C со скоростью 100°C/ч в атмосфере 100% H₂, нагрев от 650 до 1080°C со скоростью 15°C/ч в атмосфере 70% H₂ + 30% N₂, охлаждение в атмосфере 100% N₂.

Комплексное исследование после физического моделирования включало в себя измерение магнитных свойств, а затем, после удаления термостойкого покрытия, изучение текстуры и структуры полученного материала с помощью самых современных рентгеновских и электронно-микроскопических методов.

В третьей главе приведены результаты изучения кинетики начальных этапов первичной рекристаллизации в сплавах с различным содержанием олова. Разные подходы к описанию процесса показали, что разница в кинетике процесса у сталей А и В наблюдается на третьем этапе, когда растут сформировавшиеся рекристаллизованные зерна. По мнению автора, это подтверждает гипотезу о том, что олово влияет на скорость роста зерен в результате сегрегации на границах.

В четвертой главе изложены результаты исследования процесса текстурообразования при первичной рекристаллизации в сталях с различным содержанием олова.

В пятой главе описаны результаты исследования процессов формирования текстуры и текстуры при вторичной рекристаллизации в сталях с различным содержанием олова и проведено физическое моделирование высокотемпературного отжига с прерыванием при температуре 1080°C.

В шестой главе приведены результаты исследования влияния процессов обезуглероживания и азотирования в АЭС с различным содержанием олова на формирование свойств поверхности проката.

Список опубликованных работ содержит 12 наименований среди которых 6 научных статей, опубликованных в Российских научных изданиях и 6 тезисов докладов на научных конференциях.

В результате проведенного фундаментального исследования получены новые научные результаты, достоверность которых не вызывает сомнений, а практическая ценность очевидна.

По объему представленных экспериментальных данных, по их достоверности и новизне, по глубине их теоретической проработки, по научной и практической значимости результатов диссертация Ролдугиной А.С. удовлетворяет требованиям, предъявляемым к

диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, а ее автор Ролдугина Анна Сергеевна заслуживает присуждения ей искомой ученой степени.

620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН)

Гервасьева Ирина Владимировна,



доктор физ.-мат. наук по специальности 01.04.07

Ведущий научный сотрудник лаборатории микромагнетизма

E-mail: gervasy@imp.uran.ru



Подпись *Гервасьева И.В.*
Служащий
Водитель общего отдела
Г. Гервасьева
20.06.18