

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Сперанского Константина Андреевича  
«Разработка количественных методов оценки текстуры и анизотропии  
свойств магниевых сплавов методом обратных полюсных фигур»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности

2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

### Актуальность работы

Магний и его сплавы находят широкое применение в качестве конструкционных материалов благодаря высоким показателям удельной прочности. Однако, магниевые сплавы, как конструкционный материал, имеют ряд серьезных недостатков, прежде всего, это ярко выраженная анизотропия деформационного поведения, приводящая к низкому пределу текучести на сжатие вдоль направления вытяжки прессованных профилей, что существенно ограничивает применение магниевых сплавов в машиностроительных конструкциях, а также относительно низкая технологическая пластичность, обусловленная отсутствием необходимого числа систем скольжения с низкой величиной критических сдвиговых напряжений.

Анизотропия механических свойств характерна и для других сплавов на основе Ti или Zr, обладающих гексагональной плотноупакованной структурой, однако в них она менее выражена. Связано это с ограничением числа систем скольжения, действующих в магнии при пластической деформации, а также с особенностями формирующейся острой кристаллографической текстуры, которая опять же определяется системами деформации. Поскольку для Mg отношение  $c/a$  очень близко к величине 1,633, характеризующей идеальную решетку, основной системой скольжения оказывается базисное скольжение. Причем, если для Ti и Zr предпочтительными являются три системы призматического скольжения, то для Mg характерно наличие единственной базисной системы скольжения. Поэтому при пластической деформации Mg требуется активизация дополнительных систем с более высокими критическими напряжениями сдвига, что и объясняет его низкую пластичность.

Для магниевых сплавов, как и для других сплавов, характерно сильное влияние легирующих элементов на их механизм деформации и текстуру, что

затрудняет получение контролируемых эксплуатационных свойств, в том числе их анизотропии. Поэтому одной из важных задач является разработка простых и надежных методов оценки текстуры и анизотропии свойств для сплавов разных систем легирования на основе количественных текстурных данных. Одним из таких методов, который широко используется в заводских и ряде исследовательских лабораторий является метод обратных полюсных фигур (ОПФ), одним из достоинств которого кроме простоты реализации самой методики является возможность непосредственной оценки анизотропии свойств текстурированных поликристаллов. Этот метод также не принципиальным недостатком метода является ограниченность количества экспериментальных точек на ОПФ.

В этой связи является актуальной диссертационная работа Сперанского К.А., в которой проводится оценка точности определения параметров текстуры и анизотропии свойств в зависимости от количества экспериментальных рефлексов на ОПФ и реализация предлагаемых методов для интерпретации эффектов анизотропии прочностных и коррозионных характеристик магниевых сплавов.

#### **Общая характеристика работы**

В диссертации уточнены нормировочные коэффициенты для 17 рефлексов на ОПФ, число которых соответствуют количеству экспериментальных отражений в дифракционном спектре, полученном для титана на медном излучении, и вновь рассчитаны нормировочные коэффициенты для 20 рефлексов, которые соответствуют количеству экспериментальных отражений дифракционного спектра для магния и циркония при использовании медного излучения. Оценивали точность определения коэффициентов Кернса, термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) и модуля Юнга в зависимости от количества полюсов на стереографическом секторе с использованием трех различных вариантов усреднения по ОПФ, первый из которых не учитывает неравномерность распределения экспериментальных рефлексов на сфере проекций, второй и третий варианты учитывают эту неравномерность с помощью нормировки по Моррису и факторам повторяемости соответственно.

Для магниевых сплавов Mg-Al-Zn (MA2-1), Mg-Zr-Zn (MA14) и Mg-5Li-3Al определяли относительные значения критических напряжений сдвига (КНС) для действующих систем скольжения и двойникования. На этой основе были рассчитаны параметры анизотропии, которые используются в критерии текучести Хилла для анизотропных материалов, построены контуры текучести, оценен вклад в анизотропию сплавов

эффектов текстурной и монокристалльной анизотропии. В заключительной, 5-ой главе диссертации исследовали влияние количественных характеристик текстуры и фазового состава на коррозионные свойства сплавов MA14, MA2-1 и MA12(Mg-Nd-Zr).

### **Научная новизна**

Наиболее ценным в научном плане результатом работы является простая и убедительная методология оценки точности определения текстурных параметров из ОПФ. Возможно, что предложенный подход инициирует аналогичные оценки для других текстурных методик. Здесь важно отметить два интересных результата. Во-первых, показано, что при расчетах различных текстурных параметров разбиение стереографического сектора на сегменты шириной 2 градуса обеспечивает достаточную практически для любых расчетов точность, что можно использовать для упрощения программного обеспечения различных вычислительных процедур. По-видимому, это обусловлено углом расходимости отраженного рентгеновского пучка при использовании стандартной геометрии съемки дифракционного спектра.

Вторым неожиданным результатом является тот факт, что способ усреднения свойств на ОПФ оказывает сильное влияние на точность расчетов. Нормировка по Моррису была предложена исключительно для вычисления нормировочных коэффициентов, где ее использование не давало особых преимуществ по сравнению с обычной нормировкой по Мюллеру, которой пользовались в большинстве случаев при построении ОПФ. Оказалось, что при расчетах коэффициентов Кернса, ТКЛР, модулей Юнга и конечно других свойств нормировка по Моррису дает очень большой эффект, особенно для случая выраженной базисной текстуры. Объяснение этому элементарно, для ориентаций, близких к оси «с» резко меняются свойства, при этом доля ориентаций вблизи этой оси невелика, что учитывает нормировка по Моррису. Нормировка по Мюллеру, которая не учитывает неравномерного распределения рефлексов на сфере проекций, сильно завышает долю близких к базису ориентаций и приводит к ошибке при усреднении свойств, которая увеличивается по мере усиления базисной текстуры.

В диссертации показана эффективность сочетания микромеханического и макроскопического подходов к анализу особенностей анизотропии магниевых сплавов. На первом этапе оценивали различия в монокристалльной анизотропии сплавов разного состава как разницу в относительных значениях КНС для этих сплавов. Для этого осуществляли решение обратной

задачи по отношению к задаче оценки анизотропии пределов текучести на основании известных значений КНС и количественных текстурных данных. Решение обратной задачи сводилось к вычислению отношений КНС для каждого сплава на основе равенства отношения пределов текучести для двух направлений прессованного прутка с отношением интегральных значений обратных факторов Шмида, рассчитанных из ОПФ для тех же двух направлений прутка. Показано, что наиболее выраженной монокристалльной анизотропией пределов текучести из исследованных трех сплавов обладает сплав МА2-1, для которого КНС для двойникования и  $\langle \bar{c} + \bar{a} \rangle$ -скольжения выше, чем для базисного скольжения, в 1,7 и 2,2 раза соответственно, а для сплава МА14 – в 1,5 и 1,8 раза. В сплаве Mg-5Li-3Al двойникование отсутствует, а деформация осуществляется базисным и призматическим скольжением, величина КНС для которого в 1,4 раза выше, чем для базисного скольжения.

Полученные значения относительных значений КНС использовали для оценки параметров анизотропии в уравнении Хилла, позволяющем определить предел текучести сплавов при любом виде напряженного состояния. Для того, чтобы разделить влияние на прочностные показатели текстуры и различий в механизме деформации сравнивали поведение сплавов с одинаковой текстурой. При этом рассматривали два типа текстуры, базисную текстуру, характерную для прокатанных листов, и призматическую текстуру, свойственную прессованному профилю. В результате был сделан неожиданный важный вывод, что для исследованных сплавов вклад в анизотропию предела текучести от монокристалльной анизотропии существенно превышает вклад от текстурного фактора.

#### **Практическая значимость работы**

Значительный интерес для исследований текстуры металлов и сплавов с гексагональной решеткой представляют методические результаты, включающие уточненные нормировочные коэффициенты по Моррису для построения ОПФ, а также для повышения точности расчетов коэффициентов Керса, ТКЛР и модулей Юнга.

Анализ контуров текучести для сплавов МА2-1, МА14 и Mg-5Li-3Al показал, что листы с базисной текстурой имеют преимущество в прочностных показателях по сравнению с прутками с призматической текстурой при изготовлении из них трубчатых изделий, работающих в условиях внутреннего давления.

Исследования коррозионных характеристик магниевых сплавов МА2-1 и МА14 не показали заметного влияния текстуры на коррозионные

характеристики. Для сплавов MA2-1, MA14 и MA12 определены объемные эффекты выделения интерметаллидных фаз и показано, что низкие показатели коррозионной стойкости сплава MA14, возможно связаны с высоким отрицательным эффектом выделения  $MgZn_2$  фазы (-0,46% на 1% выделившейся фазы), что значительно выше, чем в сплавах MA2-1 (+0,072%) и MA12 (-0,036%).

### **Достоверность результатов и выводов**

Достоверность и обоснованность установленных в работе количественных закономерностей влияния химического состава магниевых сплавов на действующие в них механизмы деформации и анизотропию свойств не вызывает сомнения, поскольку автор использует современные методические и научные подходы.

### **Замечания по работе**

1. В методической части (глава 2, стр. 48) приведены загадочные выражения для расчета полюсной плотности без объяснения коэффициентов (ниже, в главе 3, эти выражения приведены под номерами 3.4 и 3.5). Затем идет выражение (2.1) также без описания используемых в нем величин. В выражении (2.2) используется концентрация алюминия в весовых процентах, хотя закон Вегарда справедлив для атомных %.
2. В диссертации использовали достаточно произвольное аналитическое представление ориентационной зависимости полюсной плотности для двух типов идеальных текстур: базисной и призматической. Такое описание обратных полюсных фигур позволило оценить точность расчетов параметров Кернса, ТКЛР и модулей Юнга в зависимости от способа усреднения и количества ориентировок на ОПФ. Но при этом остается не ясным, подтвердятся ли полученные результаты для других вариантов аналитического представления полюсной плотности и для других типов текстур.
3. Полученные в 3-ей главе методические результаты, безусловно, удобны для расчетов текстурных характеристик из ОПФ, однако в исследовательской практике в настоящее время все расчеты проводятся с использованием ФРО, для построения которой используются прямые полюсные фигуры или результаты EBSD-метода, для которых проблемы точности также существуют, но они не связаны с принципиальными ограничениями количества используемых ориентировок как для метода

ОПФ. Поэтому сомнительно, что полученные для ОПФ результаты будут иметь значение для других текстурных методик.

4. Точность получаемых параметров Кёрнса и рассчитываемых по ним физико-механических свойств определяется точностью расчета полюсных плотностей по дифракционному спектру. При этом необходимо знать, как обрабатывался профиль каждого рентгеновского отражения, какое значение интенсивности использовалось максимальное или интегральное, а также какие интенсивности рассматривались в качестве эталонных (табличные или экспериментальные для бестекстурного образца). Однако в диссертационной работе вообще не представлено ни одного спектра, по которому проводился расчет ОПФ.

Сделанные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают общей высокой оценки диссертации. Достоверность результатов не вызывает сомнений и подтверждается их согласованностью с литературными данными. Это позволяет утверждать, что обозначенные в работе цели и задачи исследования достигнуты, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны. Диссертационная работа Сперанского К.А. выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технические и методические решения оценки точности определения коэффициентов Кернса, ТКЛР и модулей Юнга в зависимости от количества экспериментальных рефлексов на ОПФ для ГП металлов и реализации усовершенствованных методик для исследования влияния состава на особенности механизма деформации и анизотропии свойств магниевых сплавов.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 5 научно-технических конференциях, опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 6 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, из которых 3 статьи входят в Международную систему научного цитирования Scopus. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в авиакосмической технике и медицине. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №

842, а ее автор Сперанский Константин Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

**Официальный оппонент**

Исаенкова Маргарита Геннадьевна



25 ноября 2021 г.

Профессор отделения ядерной физики и технологий офиса образовательных программ / Институт ядерной физики и технологий / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», доктор физико-математических наук, доцент по специальности 01.04.07 (1.3.8). Специальность, по которой была защищена диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук - 01.04.07(1.3.8) «Физика конденсированного состояния».

Адрес: Каширское шоссе, д. 31, 115409, г. Москва

Телефон (рабочий): +7 (495) 788-56-99 доб. 96-39

Адрес электронной почты: [MGIsaenkova@mephi.ru](mailto:MGIsaenkova@mephi.ru)

Подпись Исаенковой Маргариты Геннадьевны заверяю



Подпись удостоверяю  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ

*В.М. Саллеродова*