

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе **Гамова Павла Александровича «Математическое описание роста кристаллов при нанокристаллизации аморфных сплавов»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов» и 02.00.04 – «Физическая химия»

Диссертационное исследование Гамова П.А. посвящено созданию математической модели роста кристаллов, описывающей процесс формирования нанокристаллического материала путем термической обработки аморфного состояния, позволяющей упростить количественный и качественный подбор состава конкретного сплава и режима его термообработки.

АКТУАЛЬНОСТЬ работы обусловлена тем, что в качестве объекта исследований выбраны магнитомягкие сплавы типа «FINEMET», в частности 5БДСР. Они обладают уникальными магнитными характеристиками, такими как высокими относительной начальной и максимальной проницаемостью, намагниченностью, а также низкими потерями на перемагничивание. Особенности их нанокристаллических состояний изучены не в полной мере. Они необходимы для выявления общих закономерностей и природы структурных изменений при кристаллизации аморфных сплавов на основе железа в целях разработки технологических воздействий на эксплуатационные свойства магнитопроводов. Работа посвящена актуальному вопросу предварительного расчета параметров процесса роста нанокристаллов в тех или иных условиях, что позволяет сократить число поисковых дорогостоящих физических экспериментов, существенно упростив количественный и качественный подбор состава конкретного сплава и режима его термообработки.

Автор использовал методы математического моделирования роста частицы новой фазы, основанные на общих положениях равновесной и неравновесной термодинамики. При проведении экспериментальных исследований использованы современные приборы: дифрактометр ДРОН – 4 – 07, металлогра-

фический микроскоп ML-8500, электронный микроскоп JSM-6460LV, оборудованный волновым и энергодисперсионным анализаторами. Для определения температурных интервалов фазовых превращений при нагреве аморфной ленты использован метод дифференциальной сканирующей колориметрии (ДСК).

ДОСТОВЕРНОСТЬ полученных в работе результатов подтверждается:

- применением современных средств физико-химического анализа фазовых превращений, происходящих в результате роста кристаллов в аморфном сплаве;

- тем, что в основе математического описания роста нанокристаллов в аморфных сплавах лежат общие положения равновесной и неравновесной термодинамики;

- согласованием данных, полученных в результате расчета с результатами собственных экспериментальных исследований, а также совпадением с литературными данными других исследователей.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА связана, прежде всего, с созданием научных положений:

- о математическом описании роста нанокристаллов в аморфном сплаве, не использующим априорного задания какой-либо модели роста. В модели одновременно учтены тепловые и диффузионные процессы в аморфном сплаве и растущем кристалле, тепловые и химические процессы на границе кристалл-аморфная фаза. Модель позволяет определять изменение размера кристалла во времени, температуру и концентрации компонентов в любой точке аморфной и кристаллической фаз в любой отрезок времени;

- о количественном определении на основе результатов расчета по разработанной математической модели изменения состава аморфной и кристаллической фаз в процессе роста кристалла;

- о выделении двух стадий процесса роста кристалла. На первой стадии скорость роста определяется скоростью массопереноса компонентов, составляющих кристаллическую фазу, через поверхность раздела кристалл-аморфная

фаза. На второй стадии лимитирующим процессом является отвод малорастворимых в кристаллической фазе компонентов от границы кристалла вглубь аморфной фазы;

- об установлении влияния изменения содержания в сплаве малорастворимых в кристаллической фазе компонентов, а также температуры термообработки на размер кристалла и скорость его роста.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ состоит в том, что на основе сформулированных в диссертационной работе положений разработаны:

- моделирование процесса термической обработки сплава 5БДСР в первом температурном интервале, дающее удовлетворительное совпадение размера кристаллов с результатами экспериментов;

- комбинированный выбор режима термообработки с изменением содержания Nb в сплаве, позволяющий определить необходимые условия роста нанокристаллов в реальных процессах производства.

Диссертантом существенно расширены представления о росте частицы новой фазы в аморфном сплаве. Показана эффективность исследования структуры и химического состава фаз кристаллического сплава 5БДСР на сканирующем электронном микроскопе с использованием волнового энергодисперсионного анализатора.

Результаты дифракционных исследований как аморфных лент, так и тороидов из ленты сплава 5БДСР позволяют сделать обоснованное заключение, что рост кристаллов происходит в две стадии, зависящих как от скорости массопереноса компонентов, так и от лимитирующего процесса отвода Nb от границы кристалла. Это согласуется с отмеченными ранее положениями о том, что формирование нанокристаллической структуры во многом определяется ростом кристаллов в объеме окружающей его аморфной матрицы.

Наряду с отмеченными и многими другими положительными сторонами работы хотелось бы в порядке дискуссии высказать некоторые замечания.

1. Термин «FINMET» некорректен. В литературе общепринято «FINEMET».

2. Термин «чистое железо» неудачен (таблица 2.5, стр. 43). В любом образце всегда есть примеси. Их содержание необходимо указывать. Это и будет характеристика чистого железа. Минимизация содержания примесей задача весьма трудоемкая. Необходимо учитывать влияние малых добавок, например кислорода.

3. При обсуждении экспериментальных данных используется шкала °С, а при математических расчетах шкала °К. Это сильно затрудняет сравнение и обсуждение результатов.

4. Положение 3 в выводе 2 на стр.126. Эти результаты не новы. Следовало бы написать, что результаты расчетов модели подтверждают ранее полученные другими авторами экспериментальные результаты, поэтому теоретическая модель хорошо описывает реальные процессы.

5. Создается впечатление, что автор получил свои результаты и считает их все новыми. Не все положения выводов отражают только новое. Вывод 1 на стр. 126 является вообще очень абстрактным.

6. Совсем обойдены вниманием исследования аналогичных объектов коллективами исследователей НПП «Гаммамет», г. Екатеринбург, Аморфного центра Физико-технического института УрО РАН г. Ижевск, Исследовательского центра физики металлических жидкостей УрФУ. Было бы полезно изучить влияние термовременной подготовки расплава перед аморфизацией. Вероятно, процессы кристаллизации, столь детально исследованные автором, возможно имели бы другие закономерности.

7. Большинство экспериментальных результатов, полученных автором, хорошо известны из литературы. Непонятно, для чего потребовалось проведение дополнительных экспериментальных исследований.

8. После создания общей математической модели автор принимает ряд допущений, которые вызывают сомнения. В частности, сомнительны допуще-

ние о постоянстве плотности аморфной фазы, а также приравнивание значения активностей компонентов их концентрациям.

9. Диссертация изложена грамотно, литературным языком, без орфографических ошибок и опечаток. Список использованных источников приведен в соответствии с ГОСТ. Давность публикаций за последние 5 лет в библиографическом списке составляет лишь 12%. Автору полагалось бы более тщательно провести поиск современной литературы, соответствующий данному исследованию.

Сделанные по работе П.А. Гамова замечания носят дискуссионный характер и не изменяют общего положительного мнения о диссертации.

Это самостоятельная научная работа, представляющая собой существенный вклад в развитие нового направления по использованию методов математического моделирования роста частиц новой фазы, основанных на общих положениях равновесной и неравновесной термодинамики.

Особая ценность состоит в том, что автор сформулировал ряд закономерностей, связывающих одновременно как процессы образования нанокристаллов, так и их роста. Интересен результат, что на начальной стадии кристаллизации сначала растет кристалл железа, а затем следует диффузия в него кремния (рис. 14, стр.110-111).

С результатами диссертации целесообразно ознакомить организации, связанные с производством нанокристаллических магнитомягких материалов.

Основные результаты диссертации обсуждены на Международных и Всероссийских конференциях и опубликованы в сборниках трудов конференций, рецензируемых научных изданиях и журналах, рекомендуемых ВАК. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Оценивая её в целом, можно заключить, что диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 «Постановления о порядке присуждения ученых степеней», а её автор Павел Александрович Гамов заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальностям

