

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Макарова Андрея Сергеевича «Диаупругий эффект и термодинамика релаксационных явлений в металлических стеклах», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния»

Металлические стекла являются неравновесными системами. Их структура, формируемая при переохлаждении жидкого состояния, непрерывно изменяется во времени даже при комнатной температуре в процессе физического старения. Известно, что процессы структурной релаксации приводят к значительным изменениям макроскопических свойств, таких как вязкость, энтальпия, удельный объем, модули упругости и другие. Таким образом, изучение структурной релаксации является ключом к управлению функциональными свойствами металлических стекол. Несмотря на многолетние исследования, понимание природы релаксационных процессов в аморфных металлических сплавах остается одной из наиболее сложных и актуальных задач физики конденсированного состояния. Релаксационное поведение металлических стекол определяется эволюцией атомных конфигураций нанометрового масштаба (дефектов/центров релаксации) в аморфной матрице, что делает крайне затруднительным количественное прогнозирование их отклика на внешние воздействия.

Второй ключевой аспект, обуславливающий формирование аморфной структуры металлических стекол, связан с особенностями атомных перестроек в переохлажденном расплаве. В отличие от кристаллических материалов, обладающих трансляционной симметрией, данные системы характеризуются сложной атомной упаковкой с ближним и средним порядком, указывающей на плотноупакованный кластерный характер их структуры.

Актуальность темы диссертационной работы А.С. Макарова не вызывает сомнений, поскольку проведенное исследование было посвящено установлению взаимосвязи между диаупругим и тепловым эффектами, а также зависимости удельного объема и скорости изменения вязкости (фрагильности, англ. fragility) от релаксации модуля сдвига металлических стекол при термическом воздействии и старении, что является крайне важным для установления связи «структура-свойства» изучаемых материалов.

Научная новизна работы заключается в развитии и экспериментальном обосновании оригинального научного подхода, в рамках которого установлены количественные взаимосвязи между диаупругими релаксациями, тепловыми эффектами, изменением удельного объема, фрагильностью и избыточными термодинамическими функциями. В работе **впервые**:

- Экспериментально подтверждено равенство температурных коэффициентов модуля сдвига для стеклообразного и кристаллического состояний в отсутствие интенсивной структурной релаксации.
- Предложены оригинальные методы расчета температурной зависимости модуля сдвига, тепловых эффектов и релаксации удельного объема металлических стекол.
- Выведена и экспериментально проверена формула для расчета фрагильности – ключевого кинетического параметра, описывающего поведение металлического стеклообразующего расплава при охлаждении вблизи температуры стеклования T_g .
- Разработан метод расчета избыточных термодинамических функций (энтальпии, энтропии, энергии Гиббса) металлических стекол относительно кристаллического состояния, позволяющий получать их температурные зависимости без проведения пошаговых измерений изобарной теплоемкости. Последние сопряжены со значительными

экспериментальными трудностями, обусловленными неравновесностью состояния стекла в области переохлажденной жидкости.

— Экспериментально установлена связь между сдвиговой вязкостью металлических стекол при температуре стеклования T_g и их избыточной энтропией, что свидетельствует о взаимозависимости релаксационной способности структуры и величины избыточной энтропии.

— Введен безразмерный энтропийный параметр структурного порядка, позволяющий количественно оценивать степень упорядоченности в аморфной структуре без проведения трудоемких и дорогостоящих исследований изменения структурного фактора.

— Установлена положительная корреляция избыточной энтропии металлических стекол, достигаемой на границе температурного интервала переохлажденной жидкости, со стеклообразующей способностью расплавов.

Научная и практическая значимость результатов диссертации весьма высока. Теоретические разработки и экспериментальные методики, предложенные автором, дают уникальный набор инструментов для прогнозирования релаксационного поведения металлических стекол, оценки их термической стабильности и описании поведения металлических стеклообразующих расплавов.

Автореферат диссертации А.С. Макарова оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ. В автореферате присутствуют все необходимые структурные элементы, предусмотренные стандартом: общая характеристика работы (актуальность темы, степень разработанности, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов), основное содержание работы, заключение и список опубликованных работ автора по теме диссертации. Структура автореферата соответствует предъявляемым требованиям к изложению основных результатов диссертационных работ.

Судя по автореферату, содержание рассматриваемой диссертации полностью соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния» (физико-математические науки), подпадая под следующие пункты:

- п.1 – теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений ... в аморфном состоянии;
- п.2 – теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая стекла различной природы;
- п.3 – теоретическое и экспериментальное изучение свойств конденсированных веществ ...;
- п.5 – разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ ...;
- п.6 – разработка методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

Замечания по тексту автореферата:

1. Обоснование выбора границ температурного интервала. При изложении метода расчета релаксационных характеристик модуля сдвига (формула 21) автором не приведено строгого обоснования выбора верхней границы температурного интервала, в котором определялась производная по температуре зависимости модуля сдвига металлического стекла в состоянии переохлажденной жидкости $d\ln G_{scf}/dT$.
2. Отсутствие расшифровки индексов в формуле. В уравнении (17) используется индекс «rt» (по-видимому, комнатная температура, англ. room temperature). Однако в тексте

нет пояснения этого индекса. Для ясности рекомендуется добавлять краткое определение непосредственно перед или после записи формул.

Высказанные замечания носят уточняющий характер и не снижают общей высокой оценки представленной работы. Они не влияют на научные результаты и выводы диссертации.

Работа «Диаупругий эффект и термодинамика релаксационных явлений в металлических стеклах» удовлетворяет всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Макаров Андрей Сергеевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния».

Рецензент согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Макарова А.С.

Директор и главный научный сотрудник Института перспективных систем передачи данных, руководитель научно-исследовательского Центра перспективных функциональных материалов и лазерных коммуникационных систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», доктор физико-математических наук (по специальности 01.04.07. «Физика твердого тела»),

Профессор, доктор физ.-мат. наук
Директор
Институт перспективных
систем передачи данных
Университет ИТМО

Романов Алексей Евгеньевич

Дата подписания отзыва: 21 июля 2026 года.

Почтовый адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, литер А, Университет ИТМО

Телефон: +7 (812) 607-04-13

Электронная почта: aeromanov@niuitmo.ru

Официальное наименование Университета ИТМО.

Полное наименование: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО».

Сокращенные наименования: Университет ИТМО, НИУ ИТМО, ИТМО.

Подпись профессора Романова А.Е. заверяю:

Менеджер ОПС
Иванова А.С.