

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

Диссертационная работа Макарова А.С. посвящена актуальной проблеме физики конденсированного состояния, а именно установлению связи механизмов релаксационных процессов в металлических стеклах с их макроскопическими свойствами. Металлические стекла обладают уникальным комплексом механических, магнитных и коррозионных свойств, что делает их перспективными для применения в самых разных областях – от биомедицинских имплантатов до аддитивных технологий. Однако широкое промышленное внедрение металлических стекол сдерживается комплексом взаимосвязанных проблем: на этапе получения – это недостаточное понимание критериев стеклообразующей способности расплавов, а на этапе эксплуатации – отсутствие надежных методов прогнозирования стабильности свойств, обусловленной физическим старением как проявлением структурной релаксации. Именно поиск физической основы, объединяющей термодинамику и кинетику этих явлений, находится в фокусе настоящего исследования. Работа Макарова А.С. предлагает новый количественный подход к описанию релаксационных процессов, что делает ее **безусловно актуальной** для фундаментальной науки и для развития методологии прогнозирования свойств аморфных материалов.

Полученные результаты имеют высокую **научную и практическую значимость**. Во-первых, они создают строгую физическую основу для интерпретации широкого спектра релаксационных явлений, объединяя разрозненные экспериментальные данные по диаупругому эффекту, тепловыделению и теплопоглощению, изменению плотности и вязкости. Во-вторых, разработанный подход представляет собой мощный инструмент прогнозирования. В частности, возможность прогнозирования температурной зависимости модуля сдвига, тепловых эффектов и изменения плотности, а также расчета фрагильности открывает перспективы в материаловедческом плане. Особо следует отметить высокую практическую значимость для современных исследований, использующих методы искусственного интеллекта и машинного обучения. Представленный в работе большой массив экспериментально обоснованных и верифицированных данных по избыточным термодинамическим функциям (энтальпии, энтропии и потенциалу Гиббса) для обширной номенклатуры систем (40 сплавов) может служить критически важной основой для обучения и валидации моделей машинного обучения. Использование физически обоснованных и непротиворечивых термодинамических параметров вместо феноменологических дескрипторов способно существенно повысить предсказательную силу и интерпретируемость таких моделей при поиске новых стеклообразующих сплавов.

Диссертационная работа Макарова А.С. соответствует паспорту специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния (физико-математические науки): в работе проведено теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических соединений в аморфном состоянии (п. 1), исследование физических свойств неупорядоченных систем, включая стекла (п. 2, 3), осуществлено прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий (п. 5), а

также разработаны физические основы для получения материалов с определенными свойствами (п. 6).

Качество изложения и оформления автореферата заслуживает **положительной оценки**. Текст написан научным языком, структура автореферата логична и последовательна. Приведенные рисунки наглядно демонстрируют основные выводы работы. Однако, при общей положительной оценке, по автореферату имеется ряд **замечаний и вопросов**:

1. В работе используются как объемные, так и ленточные образцы металлических стекол (см. табл. 1). Однако в автореферате не обсуждается, влияет ли форма образца на результаты измерений модуля сдвига.

2. Для достижения релаксированного состояния образцы нагревались до температуры, соответствующей середине интервала переохлажденной жидкости. В автореферате не указана длительность изотермической выдержки при этой температуре. Поскольку кинетика релаксации существенно зависит от времени выдержки, следовало бы привести подробный протокол термической обработки при получении релаксированного состояния образцов металлических стекол.

Указанные замечания **не ставят** под сомнение высокий научный уровень и достоверность результатов проведенного исследования.

Диссертация Макарова Андрея Сергеевича «Диаупругий эффект и термодинамика релаксационных явлений в металлических стеклах» является актуальной, законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне, имеет научную и практическую ценность, соответствует требованиям пп. 9–14 Положения о порядке присуждения ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Макаров Андрей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Профессор кафедры цифровых технологий
ФГБОУ ВО «ВГУ»,
доктор физико-математических наук
по научной специальности
01.04.02. – Теоретическая физика,
профессор

Клинских А.Ф.

Контактные данные: ФИО: Клинских Александр Федотович, тел.: +7 473 220-83-84, e-mail: klinikh@cs.vsu.ru, почтовый адрес: 394006, г. Воронеж, Университетская площадь, д.1, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет». Подтверждаю добровольное согласие на включение и обработку персональных данных в документах, связанных с защитой диссертации.

Подпись д.ф.-м.н., профессора Клинских А.Ф. заверяю:

«08» июля 2026 г.

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)	
Подпись	<u>Клинских Александра Федотовича</u>
заверяю	<u>инженер Алексей ФКи</u>
подпись, расшифровка подписи	
08.07.2026	

