

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО КОНСУЛЬТАНТА

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

Макаров Андрей Сергеевич, 1988 года рождения, в 2011 году окончил физический факультет Воронежского государственного университета (ВГУ) и получил степень магистра физики по направлению «Физика» (специализация «Физика конденсированного состояния вещества»). В 2011–2014 гг. прошел обучение в аспирантуре по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» на базе кафедры общей физики Воронежского государственного педагогического университета (ВГПУ). В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Взаимосвязь релаксации высокочастотного модуля сдвига и тепловых явлений в объемных металлических стеклах» в диссертационном совете Д 212.038.06 при Воронежском государственном университете (ВГУ).

В 2012 году Макаров А.С. начал свою научно-педагогическую деятельность в качестве ассистента кафедры общей физики ВГПУ. В настоящее время занимает должность доцента кафедры. В 2018 году ему было присвоено ученое звание доцента по специальности «Физика конденсированного состояния». Макаров А.С. активно занимается научной работой в области физики некристаллических металлических материалов. С 2012 года по н.в. является исполнителем/руководителем научных работ, выполняемых в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, грантов Российского фонда фундаментальных исследований, Министерства науки и высшего образования РФ, Российского научного фонда и занимает должность старшего научного сотрудника кафедры по совместительству (0,5 ставки). Таким образом, Макаров А.С. успешно совмещает педагогическую работу на кафедре общей физики ВГПУ с научной деятельностью при реализации проектов, поддержанных научными фондами и организациями.

В диссертационной работе Макарова А.С. изложены результаты комплексного исследования термически индуцированных релаксационных процессов в металлических стеклах. Разработанный в ходе исследования подход, демонстрирующий высокую продуктивность, основан на модели, согласно которой структурная релаксация в металлических стеклах протекает в наномасштабных дефектных областях. Данные области возникают при закалке расплава, когда в структуре фиксируется неравновесное для некристаллического твердого тела соотношение между крупными кластерами (определяющими икосаэдрическую симметрию) и подсистемой дефектов, представленной малыми кластерами и одиночными упругими диполями, которые по своим свойствам аналогичны межузельным дефектам (гантельная конфигурация) в кристаллах. Для межузельных дефектов характерна неустойчивость положения ядра диполя, что обуславливает их высокую чувствительность к внешним сдвиговым напряжениям. Данное свойство проявляется в повышенной колебательной энтропии и возникновении специфических низко- и высокочастотных мод в спектре атомов дефекта. Приложение внешнего сдвигового напряжения индуцирует кооперативное перемещение примерно двадцати атомов в области ядра дефекта. Этот процесс приводит к существенному снижению модуля сдвига, что регистрируется экспериментально как диаупругий эффект.

Как научно-квалификационная работа, диссертация Макарова А.С. содержит ряд оригинальных разработок и решений, имеющих существенное значение в области физики некристаллических материалов: 1) разработан метод расчета температурной зависимости нерелаксированного модуля сдвига металлических стекол, основанный на совместном использовании данных дифференциальной сканирующей калориметрии и измерений модуля сдвига стекла после кристаллизации. Ключевым преимуществом разработанного подхода является возможность определения температурной зависимости модуля сдвига металлических стекол в широком интервале температур, включая область ниже температуры стеклования, непосредственно в области стеклования, а также на стадии кристаллизации, без необходимости проведения прямых экспериментальных измерений сдвиговой упругости стекла; 2) установлено аналитическое соотношение, описывающее кинетику релаксационной составляющей относительного изменения объема (плотности) металлических стекол при структурной релаксации и кристаллизации; 3) показано, что изменение энтальпии при структурной релаксации металлических стекол описывается произведением энтальпии формирования дефектов межузельного типа (упругих диполей) на изменение их концентрации; 4) предложен термодинамический подход для интерпретации связи диаупругого и тепловых эффектов, который количественно описывает три процесса: экзотермическую структурную релаксацию ниже температуры стеклования, эндотермический эффект в области стеклования и экзотермический эффект кристаллизации; 5) разработан метод оценки хрупкости по данным релаксации модуля сдвига в состоянии переохлажденной жидкости.

Отдельного внимания заслуживает предложенный в работе оригинальный метод расчета избыточных термодинамических функций (энтальпии, энтропии и потенциала Гиббса), обусловленных некристаллической структурой металлических стекол, для реализации которого достаточно данных стандартной калориметрии. Также крайне важными для физики некристаллических материалов являются результаты, касающиеся фундаментального вопроса стеклования металлических расплавов. В диссертации введен безразмерный параметр структурного порядка, который непосредственно характеризует степень разупорядочения некристаллической структуры металлического стекла относительно полностью расплавленного состояния при температуре ликвидус. Продемонстрирована корреляция этого параметра в состоянии переохлажденной жидкости с критической скоростью охлаждения, определяющей стеклообразующую способность расплавов. Установленная взаимосвязь между избыточной энтропией переохлажденной жидкости и критериями стеклообразующей способности интерпретируется с единых позиций в рамках разрабатываемого подхода. Результаты работы подтверждают перспективность применения данного подхода для интерпретации аналогичных явлений в других стеклообразных материалах.

Проведенное Макаровым А.С. диссертационное исследование имеет пионерский характер. Его ключевая научная новизна заключается в разработке и апробации единого подхода, позволяющего описывать релаксацию широкого спектра физических свойств металлических стекол в рамках модели, учитывающей свойства как кристаллической, так и жидкой фаз. Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание фундаментальных механизмов стеклования металлических расплавов и релаксационных явлений в металлических стеклах. Основные положения и выводы исследования полностью отражены в 27 публикациях в рецензируемых научных журналах (рекомендуемых ВАК РФ и индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus), а также были апробированы на ряде авторитетных международных и всероссийских конференций.

В период работы над докторской диссертацией Макаров А.С. продемонстрировал качества зрелого ученого и высококлассного специалиста в области физики конденсированного состояния. В процессе работы над докторской диссертацией он подтвердил способность самостоятельно ставить и решать сложные научные задачи, владея современными методами эксперимента и анализа данных. Научные достижения Макарова А.С. отмечены рядом премий: он является лауреатом премии Правительства Воронежской области для молодых ученых (2014 г., 2019 г.) и премии Совета ректоров высших учебных заведений Воронежской области (2022 г.). Индекс Хирша Макарова А.С. по данным Web of Science составляет 16.

Диссертация Макарова Андрея Сергеевича является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой. Учитывая актуальность диссертационной работы, ее новизну, научную и практическую значимость для физики некристаллических материалов, а также уровень научной квалификации и достижений соискателя, считаю, что диссертация Макарова А.С. удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к работам, представленным на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор несомненно заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Научный консультант,  
 доктор физико-математических наук  
 по специальности 01.04.07 – «Физика  
 конденсированного состояния»,  
 профессор,  
 зав. кафедрой общей физики ВГПУ  
 Тел.: +7 (473) 255-47-22,  
 E-mail: v.a.khonik@yandex.ru

  
 Хоник Виталий Александрович



«12» марта 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
 «Воронежский государственный педагогический университет»  
 394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 86.