

ОТЗЫВ

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

В диссертационной работе Макарова Андрея Сергеевича решается научная проблема, связанная с установлением термодинамических закономерностей релаксационных процессов в металлических стёклах и их стеклообразования из расплавов. Понимание природы структурной гетерогенности и релаксационных процессов в металлических стёклах является ключевым для прогнозирования изменения их механических и физических свойств. При этом существующие модели (свободного объёма, зон сдвиговых превращений, квазиточечных дефектов и др.) часто носят феноменологический характер и не дают единой количественной картины, связывающей свойства кристалла, расплава и стекла. В представленной работе предложен новый подход, позволяющий осуществлять не только качественную интерпретацию, но и количественный прогноз температурных зависимостей модуля сдвига, тепловых эффектов, релаксации плотности, избыточных термодинамических функций и хрупкость металлических стёкол. **Актуальность темы** не вызывает сомнений, так как работа направлена на установление количественных взаимосвязей между структурной релаксацией, тепловыми эффектами, упругими свойствами и термодинамическими функциями металлических стёкол. Эти исследования создают физическую основу для прогнозирования долговременной стабильности материала и разработки стратегий управления его свойствами (например, через термоциклирование или поверхностную обработку) с целью создания металлических стёкол с заданной комбинацией свойств.

Научная новизна работы, безусловно, высока. В работе впервые выявлен ряд фундаментальных закономерностей: равенство температурных коэффициентов модуля сдвига для стеклообразного и кристаллического состояний в отсутствие структурной релаксации; зависимость сдвиговой вязкости при температуре стеклования от избыточной энтропии при этой же температуре; корреляция критериев стеклообразующей способности расплавов с максимальной избыточной энтропией в состоянии переохлаждённой жидкости. Предложены и экспериментально проверены формулы для расчёта температурной зависимости нерелаксированного модуля сдвига, тепловых эффектов и релаксационной составляющей плотности. Разработан метод расчёта хрупкости, базирующийся исключительно на анализе релаксации модуля сдвига в области переохлаждённой жидкости. Предложен метод выделения избыточных термодинамических функций (энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) металлических стёкол относительно кристаллического состояния. Введён безразмерный параметр структурного порядка, установлена его корреляция с критической скоростью охлаждения и критериями стеклообразующей способности расплавов, что вносит существенный вклад в понимание природы стеклообразования.

Значимость результатов для физики конденсированного состояния и материаловедения высока. Разработанный формализм позволяет унифицировать описание релаксационных, тепловых и упругих свойств металлических стёкол, связывая их с дефектной структурой, унаследованной от расплава. Установленные корреляции между избыточной энтропией, вязкостью и стеклообразующей способностью создают основу для физически обоснованного прогнозирования свойств новых аморфных материалов, включая высокоэнтропийные стёкла, что придаёт работе высокую прикладную значимость.

Материал автореферата структурирован логично и последовательно. Представленные рисунки (экспериментальные кривые, корреляционные зависимости)

хорошо иллюстрируют основные выводы. Следует также отметить солидную экспериментальную базу: исследовано 40 сплавов, что придает результатам высокую степень общности и достоверности. Основные результаты диссертации прошли широкую апробацию на всероссийских и международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 27 статей в ведущих рецензируемых журналах, **рекомендуемых ВАК РФ** для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание учёной степени доктора наук. Опубликованные работы в полной мере отражают содержание автореферата.

В качестве **замечания** можно отметить, что за рамками рассмотрения остался вопрос о применимости разработанных методов к неметаллическим стеклообразующим системам. Предложенный энтропийный подход продемонстрировал свою эффективность для металлических стёкол различных систем. Представляется целесообразным проверить его именно на неметаллических стеклообразующих системах, что позволило бы установить универсальность предложенного подхода за пределами класса металлических стеклообразователей.

Указанное замечание **не снижает** общей высокой научной ценности работы и не ставит под сомнение справедливость основных защищаемых положений.

Резюмируя, диссертационное исследование Макарова Андрея Сергеевича «Диаупругий эффект и термодинамика релаксационных явлений в металлических стёклах» является **законченной научно-квалификационной работой** по актуальной проблеме физики конденсированного состояния. Работа полностью **соответствует** паспорту специальности 1.3.8. - Физика конденсированного состояния (отрасль наук: физико-математические). Диссертация **удовлетворяет всем требованиям** пп. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (в действующей редакции), предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Макаров Андрей Сергеевич, **заслуживает** присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. - Физика конденсированного состояния.

Доктор химических наук
(специальность 02.00.01 -
неорганическая химия), ведущий
научный сотрудник лаборатории химии
высокочистых бескислородных стёкол,
заместитель директора по научной
работе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт химии высокочистых веществ
им. Г.Г. Девярых РАН

Ширяев Владимир Семенович

28 июля 2026 года

Телефон: +7 (831) 462-75-61, e-mail: shiryaev@ihps-nnov.ru

Адрес места работы: 603951, г. Нижний Новгород, ул. Тропинина, д. 49. ИХВВ РАН

Согласен на обработку персональных данных, необходимых для формирования аттестационного дела Макарова А.С., в порядке, установленном законодательством Российской Федерации.

Подпись Ширяева В.С. заверяю

и.о. начальника

отдела кадров
Яковлева

