

Отзыв

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

В современном мире наука и технологии идут рука об руку, предъявляя всё более жёсткие требования к материалам, используемым в технике специального назначения. Космическая промышленность, ядерная энергетика, глубокая переработка ресурсов и оборонные технологии нуждаются в сплавах, способных выдерживать экстремальные нагрузки, агрессивные среды, высокие температуры и радиационное воздействие. Традиционные конструкционные материалы (кристаллические сплавы на основе Fe, Al, Cu, Ni и др.) во многих случаях уже достигли предела своих свойств, что стимулирует поиск принципиально новых подходов в физике конденсированного состояния и материаловедении. В этом контексте особое внимание исследователей в настоящее время привлекают два взаимосвязанных класса материалов: высокоэнтروпийные сплавы (ВЭС) и металлические стёкла (МС). Каждый из этих классов по отдельности демонстрирует уникальные характеристики. ВЭС, благодаря своей мультикомпонентной структуре, обладают исключительной износостойкостью и жаропрочностью, стойкостью к радиационному охрупчиванию и превосходной коррозионной стойкостью. МС, в свою очередь, характеризуются рекордными показателями прочности и износостойкости, приближаясь к теоретическим пределам. Однако ещё более перспективным направлением является их объединение в рамках концепции высокоэнтропийных металлических стёкол (ВЭМС). Этот подход позволяет синергетически объединить преимущества обоих состояний: высокая энтропия смешения должна способствовать подавлению кристаллизации и образованию аморфной структуры, а отсутствие дальнего порядка открывает путь к созданию материалов с беспрецедентным сочетанием механических, физических и химических свойств, которые недостижимы для традиционных кристаллических сплавов.

Фундаментальное понимание физико-химических процессов, лежащих в основе формирования и стабильности МС, остается крайне ограниченным. Экспериментальные данные фиксируют наличие химически упорядоченных кластеров и неоднородностей в наномасштабе, однако строгая теория, предсказывающая, как именно многокомпонентный состав влияет на топологию ближнего и среднего порядка, до сих пор не построена. Не менее остро стоит вопрос о физической природе релаксационных явлений. Поведение МС в режимах механического нагружения и при нагреве в области переохлажденной жидкости демонстрирует сложную кинетику. При этом широко используемый термодинамический параметр – энтропия смешения ΔS_{mix} – зачастую вступает в противоречие с наблюдаемыми эффектами. В свете современных достижений диссертационная работа, направленная на количественное описание связи между диаупругими релаксациями, тепловыми эффектами, релаксацией плотности, энтропией смешения и избыточными термодинамическими функциями МС в рамках единого подхода с учетом взаимозависимости свойств кристалла, расплава и стекла, является безусловно актуальной и востребованной.

Научная новизна работы заключается в разработке и экспериментальном обосновании оригинального подхода, в рамках которого:

1. Впервые теоретически показано и экспериментально подтверждено равенство температурных коэффициентов модулей сдвига для стеклообразного и кристаллического состояний сплавов в условиях, исключающих структурную релаксацию.
2. Впервые получены соотношения, устанавливающие количественную связь между диаупругими релаксациями, тепловыми эффектами, релаксацией плотности и хрупкостью МС.

3. Впервые предложен метод расчёта избыточных термодинамических функций (энтальпии, энтропии, потенциала Гиббса) МС относительно их кристаллического состояния, основанный исключительно на данных дифференциальной сканирующей калориметрии, что существенно упрощает его широкое применение по сравнению с традиционными подходами, требующими аппроксимации температурной зависимости изобарной теплоёмкости.
4. Впервые показано, что избыточная энтропия МС является физическим параметром, определяющим его релаксационную способность.
5. Впервые введен и обоснован энтропийный параметр структурного порядка, который позволил установить прямую корреляцию между степенью структурной неупорядоченности переохлаждённой жидкости и стеклообразующей способностью расплава. Данный результат подчеркивает важность энтропийного эффекта для стабилизации аморфной структуры.

Значимость результатов диссертации высока. Разработанный подход позволяет не только интерпретировать экспериментальные данные с единой термодинамической позиции, но и прогнозировать свойства МС. Показано, что избыточная энтропия является физическим параметром, определяющим их вязкость в области стеклования и релаксационную способность, а введенный параметр структурного порядка может служить критерием для оценки стеклообразующей способности расплавов. С практической точки зрения предложенные методы расчета тепловых эффектов, изменения плотности, модуля упругости и хрупкости могут быть использованы для контроля стабильности аморфной структуры в твердом и переохлаждённом жидком состоянии.

Достоверность и обоснованность основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обеспечиваются комплексным применением взаимодополняющих экспериментальных методов, позволяющих получать непротиворечивые и воспроизводимые данные о релаксационных явлениях в МС. Важнейшим фактором, подтверждающим достоверность выводов, является широкий охват исследованных систем. Экспериментальная база работы охватывает 40 МС различного химического состава, включая сплавы на основе переходных, благородных и редкоземельных элементов, микролегированные сплавы, среди которых низко-, средне- и высокоэнтропийные системы. Кроме того, предложенные расчетные методы прошли экспериментальную верификацию на независимых наборах данных, а их результаты сопоставлены с литературными данными, полученными альтернативными методами, что свидетельствует о внутренней согласованности и непротиворечивости разработанного подхода. Значимым подтверждением обоснованности ключевых положений диссертации служит их широкая апробация на всероссийских и международных конференциях высокого уровня. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 27 статьях в ведущих отечественных и международных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и РИНЦ. Среди них такие авторитетные издания, как Scripta Materialia, Intermetallics, Journal of Alloys and Compounds, Journal of Non-Crystalline Solids, Journal of Physics: Condensed Matter, Materials Chemistry and Physics, Solid State Communications, Materialia, а также ведущие российские физические журналы: Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, Журнал экспериментальной и теоретической физики и Физика твердого тела.

Автореферат позволяет составить полное представление о проделанной работе, её масштабе и глубине. В качестве замечания можно отметить следующее: в уравнении (26) для параметра структурного порядка ξ используется величина избыточной энтропии МС $\Delta S_{G-x}(T)$, которая, как следует из текста, не зависит от термической предыстории для состояния переохлаждённой жидкости. В знаменателе формулы (26) используется энтропия плавления кристаллического сплава ΔS_{melt} . В тексте автореферата не уточняется, каким образом рассчитывалась энтропия плавления для сплавов, у которых температура солидус и ликвидус могут быть определены с большой погрешностью из-за размытости переходов.

Было бы полезно привести примеры расчета энтропии плавления кристаллического сплава ΔS_{melt} для конкретных систем.

Следует подчеркнуть, что высказанное замечание не затрагивает основных защищаемых положений и не снижает высокой научной и практической значимости полученных результатов.

Диссертация Макарова Андрея Сергеевича «Диаупругий эффект и термодинамика релаксационных явлений в металлических стёклах» соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния (отрасль науки – физико-математические) и является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. Работа соответствует квалификационным признакам диссертации, определяющим характер результатов докторской диссертационной работы. Диссертационная работа полностью соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней (постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842) в его действующей редакции, а её автор, Макаров Андрей Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Отзыв подготовил:

доктор физико-математических наук,
профессор



Коротков Леонид Николаевич

«28» _____ июля _____ 2026 г.

Согласен на включение персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

Сведения об авторе отзыва:

ФИО: Коротков Леонид Николаевич

Учёная степень, учёное звание: доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07. – Физика конденсированного состояния), профессор

Должность: профессор кафедры твердотельной электроники имени В.Г. Колесникова Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Почтовый адрес: 394026, г. Воронеж, Московский пр., 14

Телефон: +7(473) 246-66-47

E-mail: l_korotkov@mail.ru

