

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

Понимание природы стеклования металлических расплавов и динамики изменения свойств стекла является одной из ключевых проблем физики конденсированного состояния. Металлические стекла, характеризующиеся исключительным сочетанием механических, магнитных и функциональных свойств, на протяжении последних 20–30 лет остаются в фокусе активных экспериментальных и теоретических исследований. Тем не менее фундаментальные механизмы, ответственные за стеклообразующую способность металлических расплавов и релаксационную динамику стеклообразного состояния, по-прежнему не имеют количественного описания в рамках единой теории. Существующие феноменологические подходы, включая теорию свободного объема и модель единиц течения, не дают непротиворечивого описания связи между структурными и физическими свойствами фаз различной степени упорядочения. В этом контексте работа А.С. Макарова, в которой предложен единый термодинамический подход к описанию релаксационных явлений, представляет несомненный интерес. Результаты данного исследования создают основу для количественного прогнозирования эволюции свойств и целенаправленного проектирования аморфных сплавов с заранее определяемыми характеристиками.

Впечатляет объем выполненной Макаровым А.С. работы: колоссальное количество экспериментальных исследований **40 сплавов** сочетается с продуманным и глубоким теоретическим анализом.

В работе Макарова А.С. впервые предложен и экспериментально проверен комплекс взаимосвязанных методов расчета, обеспечивающий количественное описание широкого круга релаксационных явлений в металлических стеклах: от температурной зависимости модуля сдвига и тепловых эффектов до хрупкости и структурного упорядочения. Особое значение в рамках данного подхода имеет разработка энтропийного критерия оценки структурного упорядочения, для которого введен безразмерный параметр порядка ξ . Установлено, что в состоянии переохлажденной жидкости параметр ξ демонстрирует выраженную корреляцию с критической скоростью охлаждения расплава R_c (наиболее надежным показателем стеклообразующей способности), а также с косвенными критериями, базирующимися на характеристических температурах. Полученные данные позволяют

заключить, что определяющим фактором склонности к стеклообразованию выступает именно степень структурного беспорядка в переохлажденном жидком состоянии: снижение параметра ξ (возрастание беспорядка) закономерно повышает стеклообразующую способность, и обратная зависимость также справедлива. Данный вывод полностью согласуется с современными работами, демонстрирующими корреляцию стеклообразующей способности с шириной первого пика структурного фактора. Вместе с тем отслеживание релаксационных процессов через изменение указанной ширины или радиуса первой координационной сферы представляет значительные трудности ввиду крайне малых вариаций этих величин (порядка десятых и сотых долей процента). Предлагаемый энтропийный подход, напротив, обладает существенно более высокой информативностью, поскольку позволяет количественно оценивать степень порядка непосредственно через избыточные термодинамические функции, получаемые из калориметрических измерений.

Надежность выводов работы базируется на комплексе взаимодополняющих экспериментальных методик, включающих электромагнитно-акустический метод, дифференциальную сканирующую калориметрию, дилатометрию, испытания на ползучесть и рентгенофазовый анализ. Репрезентативная выборка из 40 составов, охватывающих широкий круг стеклообразующих систем, включая высокоэнтропийные сплавы, обеспечила статистическую обоснованность результатов, а сопоставление расчетных данных как с результатами собственных измерений, так и с независимыми литературными данными подтверждает состоятельность предложенных теоретических построений.

По мере ознакомления с авторефератом возникли следующие вопросы и замечания, носящие, уточняющий характер и не снижающие общей высокой оценки работы:

1. В автореферате приведены значения энтропии смешения $\Delta S_{\text{mix}}/R$ для исследованных сплавов. Однако неясно, проводился ли анализ влияния энтропии смешения на другие параметры, помимо температурных коэффициентов модуля сдвига (рис. 2) вязкости при T_g (рис. 9). Наблюдалась ли, например, корреляция энтропии смешения $\Delta S_{\text{mix}}/R$ с параметрами стеклообразующей способности? Если да, то насколько она выражена?

2. В табл. 2 приведены литературные значения хрупкости для ряда исследованных сплавов. Однако из текста автореферата неясно, какими именно методами эти значения были получены – на основе измерений сдвиговой вязкости, времени релаксации, теплоемкости или иных подходов. Как известно, различные методики определения хрупкости могут давать существенно различающиеся результаты для одного и того же материала.

