

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.078.01
(Д 002.060.01),

созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова

Российской академии наук,

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации,

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 17.09.2026 г. № 8/26

О присуждении Макарову Андрею Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Диаупругий эффект и термодинамика релаксационных явлений в металлических стеклах» по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния принята к защите 28 мая 2026 г., протокол № 4/26, диссертационным советом 24.1.078.01 (Д 002.060.01), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49, приказ Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель Макаров Андрей Сергеевич, 24 апреля 1988 года рождения, в 2011 г. окончил магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет» по направлению «Физика», специализация «Физика конденсированного состояния» (диплом Н №01070). В 2014 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Взаимосвязь релаксации высокочастотного модуля сдвига и тепловых явлений в объемных металлических стеклах» по специальности 01.04.07. Физика конденсированного состояния в диссертационном совете Д 212.038.06, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет» (диплом серия КНД №003905). Ученое звание доцента по специальности «Физика конденсированного состояния» присвоено приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 4 июня 2018 г (диплом серия ЗДЦ №013527).

В настоящее время соискатель работает в должности доцента кафедры общей физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный педагогический университет».

Диссертация выполнена на кафедре общей физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный педагогический университет», Министерство просвещения Российской Федерации.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор, Хоник Виталий Александрович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный педагогический университет» (ФГБОУ ВО «ВГПУ»), кафедра общей физики, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

1) Гундеров Дмитрий Валерьевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Физики металлов, Институт физики молекул и кристаллов – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИФМК УФИЦ РАН);

2) Сидоров Валерий Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, директор научно-образовательного центра «Расплав», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный педагогический университет» (ФГАОУ ВО «УрГПУ»);

3) Терехов Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела электронных свойств металлов, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина» (ФГБНУ ДОНФТИ),

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина» (ТГУ им. Г.Р. Державина) в своем положительном отзыве, подписанном профессором кафедры теоретической и экспериментальной физики, Заслуженным деятелем науки РФ, доктором физико-математических наук, профессором Федоровым Виктором Александровичем и заведующим кафедрой теоретической и экспериментальной физики, кандидатом физико-математических наук, доцентом Желтовым Михаилом Александровичем и утвержденном ректором Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», кандидатом экономических наук, доцентом Моисеевым Павлом Сергеевичем указала, что диссертация является завершенной научно-квалификационной работой на актуальную тему, в которой на основе комплекса экспериментальных исследований и теоретического анализа установлены и интерпретированы фундаментальные взаимосвязи между диаупругими релаксациями, тепловыми явлениями, релаксацией объема, хрупкостью и избыточными термодинамическими функциями

металлических стекол. В диссертации разработаны новые методы расчета температурной зависимости нерелаксированного модуля сдвига, хрупкости и избыточных термодинамических функций, а также предложен энтропийный подход к количественной оценке структурного упорядочения, что в совокупности можно квалифицировать как научное достижение в физике конденсированного состояния. Диссертация полностью соответствует всем критериям пп. 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), 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.

Доклад по диссертации «Диаупругий эффект и термодинамика релаксационных явлений в металлических стеклах» Макарова Андрея Сергеевича был заслушан на заседании кафедры теоретической и экспериментальной физики 19.06.2026 г. Отзыв составлен на основании доклада, анализа диссертации, автореферата и публикаций Макарова А.С. по теме диссертации. Отзыв на диссертацию и автореферат Макарова А.С. утвержден на заседании кафедры теоретической и экспериментальной физики (протокол № 12 от 19 июня 2026 г.).

Соискатель имеет 74 опубликованных научных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 27 работ в изданиях, отнесенных к категории К1 согласно Рекомендациям Президиума ВАК от 08.12.2023 г. № 31/1-разн «О категорировании перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук». Материалы диссертации достаточно полно изложены в опубликованных работах автора. Требования к публикациям основных научных результатов диссертации, предусмотренные Положением о присуждении ученых степеней, выполнены. В представленной диссертации не обнаружены заимствования материала без ссылок на автора и (или) источник заимствования и результаты научных работ, выполненных соискателем ученой степени в соавторстве, без ссылок на соавторов. Текст диссертации, представленной в диссертационный совет, идентичен тексту диссертации, размещенной на сайте организации. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения о работах, опубликованных соискателем.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Makarov A.S., Konchakov R.A., Kobelev N.P., Khonik V.A.** Thermodynamic potentials of metallic alloys in the undercooled liquid and solid glassy states // *Materialia*. 2025. Vol. 42. P. 102471.

2. **Макаров А.С., Кончаков Р.А., Афонин Г.В., Цзiao Ц.Ч., Кобелев Н.П., Хоник В.А.** Избыточная энтропия металлических стекол и ее связь со стеклообразующей способностью материнских расплавов // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2024. Т. 120. В. 10. С. 794–801.

3. **Makarov A.S.**, Cui J.B., Qiao J.C., Afonin G.V., Kobelev N.P., Khonik V.A. Relationship between the entropy of mixing, excess entropy and the shear viscosity of metallic glasses near the glass transition // *Intermetallics*. 2024. Vol. 175. P. 108478.
4. **Makarov A.S.**, Afonin G.V., Konchakov R.A., Khonik V.A., Qiao J.C., Vasiliev A.N., Kobelev N.P. Dimensionless parameter of structural ordering and excess entropy of metallic and tellurite glasses // *Scripta Materialia*. 2024. Vol. 239. P. 115783.
5. **Макаров А.С.** Общетермодинамический подход для описания кинетики тепловых эффектов в высокоэнтропийных аморфных сплавах // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2023. Т. 118. В. 3. С. 177–184.
6. **Makarov A.S.**, Afonin G.V., Qiao J.C., Glezer A.M., Kobelev N.P., Khonik V.A. Determination of the thermodynamic potentials of metallic glasses and their relation to the defect structure // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2021. Vol. 33. P. 435701.
7. **Макаров А.С.**, Гончарова Е.В., Цзяо Ц.Ч., Кобелев Н.П., Хоник В.А. Энергетические изменения релаксационной природы в высокоэнтропийных объемных аморфных сплавах // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2021. Т. 160. В. 2 (8). С. 213–222.
8. **Макаров А.С.**, Гончарова Е.В., Цзяо Ц.Ч., Кобелев Н.П., Хоник В.А. Расчет фрагильности высокоэнтропийных объемных аморфных сплавов на основе данных по релаксации сдвиговой упругости // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2021. Т. 113. В. 11. С. 751–756.
9. **Makarov A.S.**, Afonin G.V., Konchakov R.A., Qiao J.C., Aronin A.S., Kobelev N.P., Khonik V.A. One-to-one correlation between the kinetics of the enthalpy changes and the number of defects assumed responsible for structural relaxation in metallic glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. Vol. 558. P. 120672.
10. **Makarov A.S.**, Mitrofanov Yu.P., Goncharova E.V., Qiao J.C., Kobelev N.P., Glezer A.M., Khonik V.A. Relationship between the shear moduli of metallic glasses and their crystalline counterparts // *Intermetallics*. 2020. Vol. 125. P. 106910.
11. **Макаров А.С.**, Гончарова Е.В., Афонин Г.В., Цзяо Ц.Ч., Кобелев Н.П., Хоник В.А. Расчет температурной зависимости нерелаксированного модуля сдвига высокоэнтропийных объемных аморфных сплавов на основе калориметрических данных // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2020. Т. 111. В. 10. С. 691–696.
12. **Makarov A.S.**, Mitrofanov Yu.P., Konchakov R.A., Kobelev N.P., Csach K., Qiao J.C., Khonik V.A. Density and shear modulus changes occurring upon structural relaxation and crystallization of Zr-based bulk metallic glasses: In situ measurements and their interpretation // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2019. Vol. 521. P. 119474.

13. **Makarov A.S.**, Mitrofanov Yu.P., Afonin G.V., Kobelev N.P., Khonik V.A. Predicting temperature dependence of the shear modulus of metallic glasses using calorimetric data // Scripta Materialia. 2019. Vol. 168. P. 10–13.

14. **Makarov A.S.**, Afonin G.V., Mitrofanov Yu.P., Konchakov R.A., Kobelev N.P., Qiao J.C., Khonik V.A. Relationship between the heat effects and shear modulus changes occurring upon heating of a metallic glass into the supercooled liquid state // Journal of Non-Crystalline Solids. 2018. Vol. 500. P. 129–132.

15. **Makarov A.S.**, Mitrofanov Yu.P., Afonin G.V., Kobelev N.P., Khonik V.A. Shear susceptibility – A universal integral parameter relating the shear softening, heat effects, anharmonicity of interatomic interaction and "defect" structure of metallic glasses // Intermetallics. 2017. Vol. 87. P. 1–5.

16. **Макаров А.С.**, Митрофанов Ю.П., Афонин Г.В., Хоник В.А., Кобелев Н.П. Зависимость модуля сдвига стекла от модуля сдвига кристалла и кинетики структурной релаксации для системы $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$ // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 5. С. 965–969.

На диссертацию и автореферат поступило 12 отзывов. **Все отзывы положительные:**

1. Отзыв Мерсона Д.Л., директора Научно-исследовательского института прогрессивных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет», доктора физико-математических наук, профессора, содержит 1 замечание: автором установлена важная корреляция между параметром структурного порядка ξ_{scl} и критической скоростью охлаждения R_c , что открывает перспективы для прогнозирования стеклообразующей способности расплавов. В то же время, в автореферате не обсуждается, насколько чувствителен данный параметр к вариациям состава в пределах одной системы (например, к микролегированию), что могло бы существенно расширить его практическую ценность.

2. Отзыв Клиньских А.Ф., профессора кафедры цифровых технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет», доктора физико-математических наук, профессора, содержит 2 замечания: 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.

3. Отзыв Романова А.Е., директора и главного научного сотрудника Института перспективных систем передачи данных, руководителя научно-исследовательского Центра перспективных функциональных материалов и лазерных коммуникационных систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», доктора физико-математических наук, профессора, содержит 2 замечания: 1) при изложении метода расчета фрагильности по данным релаксации модуля сдвига (формула 21) автором не приведено строгого обоснования выбора верхней границы температурного интервала, в котором определялась производная по температуре зависимости модуля сдвига металлического стекла в состоянии переохлажденной жидкости $d\ln G_{sc}/dT$; 2) в уравнении (17) используется индекс «rt» (по-видимому, комнатная температура, англ. room temperature). Однако в тексте нет пояснения этого индекса. Для ясности рекомендуется добавлять краткое определение непосредственно перед или после записи формул.

4. Отзыв Валиева Р.З., Заслуженного деятеля науки Российской Федерации и Республики Башкортостан, академика Академии наук Республики Башкортостан, директора Научно-исследовательского института физики перспективных материалов, профессора кафедры Материаловедения и физики металлов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», доктора физико-математических наук, профессора, содержит 3 замечания: 1) предложенный метод выделения избыточных термодинамических функций представляет значительный интерес, однако его корректное применение требует детального понимания как алгоритма вычислений, так и полного протокола ДСК-измерений для получения разностного теплового потока. Вместе с тем, в автореферате отсутствуют сведения о расчетной процедуре и технических параметрах калориметрических экспериментов, таких как время выдержки, тип газаносителя и скорость его подачи при продувке ячейки, масса образца, материал тигля, герметичность тигля и др.; 2) в тексте работы упоминается наноструктурирование металлических стекол, однако нет пояснения как обеспечивается этот процесс; 3) в последние годы в научной литературе опубликован целый ряд исследований воздействия интенсивной пластической деформации на структуру аморфных тел, которые вызвали большой интерес. Эта тема близка к задачам настоящей работы, и важно узнать мнение диссертанта об этих результатах.

5. Отзыв Короткова Л.Н., профессора кафедры твердотельной электроники имени В.Г. Колесникова Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет», доктора физико-математических наук, профессора, содержит 1 замечание: в уравнении (26) для параметра структурного порядка ξ используется величина избыточной

энтропии металлического стекла $\Delta S_{G-X}(T)$, которая, как следует из текста, не зависит от термической предыстории для состояния переохлажденной 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.

6. Отзыв Ширяева В.С., ведущего научного сотрудника лаборатории химии высокочистых бескислородных стекол, заместителя директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН, доктора химических наук, содержит 1 замечание: за рамками рассмотрения остался вопрос о применимости разработанных методов к неметаллическим стеклообразующим системам. Предложенный энтропийный подход продемонстрировал свою эффективность для металлических стекол различных систем. Представляется целесообразным проверить его именно на неметаллических стеклообразующих системах, что позволило бы установить универсальность предложенного подхода за пределами класса металлических стеклообразователей.

7. Отзыв Тимошенко В.Ю., профессора физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, доктора физико-математических наук, профессора без замечаний.

8. Отзыв Кузьменко А.П., главного научного сотрудника Регионального центра нанотехнологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», доктора физико-математических наук, профессора, содержит 1 замечание: рис. 9 демонстрирует корреляцию сдвиговой вязкости при температуре стеклования T_g с энтропией смешения и избыточной энтропией металлического стекла. Однако автор ограничивается констатацией этого факта с кратким пояснением. Хотелось бы увидеть более детальное обсуждение механизма, через который конфигурационная энтропия смешения влияет на избыточную энтропию стекла и, как следствие, на вязкость.

9. Отзыв Кадомцева А.Г., заведующего лабораторией физики прочности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, доктора физико-математических наук, содержит 1 замечание: в качестве замечания можно отметить, что в автореферате приведено большое количество расчетных соотношений. Для полноты восприятия следовало бы подробнее пояснить физический смысл ключевых параметров, входящих в эти формулы.

10. Отзыв Рогалина В.Е., главного научного сотрудника лаборатории плазменно-лазерных технологий Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, доктора физико-математических наук, содержит 4 замечания: 1) в автореферате приведены значения энтропии смешения $\Delta S_{mix}/R$ 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 $\Delta S_{mix}/R$ 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. Желательно было бы либо указать метод измерения для каждого литературного значения, либо пояснить, почему различия в методиках не влияют на сравнительный анализ; 3) в автореферате отсутствуют данные о возможной связи, либо о ее отсутствии, между металлическими и диэлектрическими стеклами; 4) при чтении автореферата бросаются в глаза многочисленные аббревиатуры, которые хоть и расшифрованы при первом упоминании, но все равно мешают целостному восприятию текста.

11. Отзыв Сундеев Р.В., профессора кафедры наноэлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», доктора физико-математических наук, доцента, содержит 2 замечания: 1) для высокоэнтропийных сплавов характерна значительная химическая неоднородность и наличие кластерных образований, что может вносить дополнительный вклад в конфигурационную энтропию. Каким образом автор учитывает вклад химического ближнего порядка в рассчитанные значения избыточной энтропии для высокоэнтропийных систем, и не может ли этот вклад искажать наблюдаемые корреляции? 2) из текста автореферата не до конца понятно насколько универсальными является предложенные автором подходы. Может ли он быть распространен на оксидные, халькогенидные или полимерные стекла? Какие ограничения и модификации потребуются для его применения к системам с существенно различным характером межатомных связей (ковалентные, ионные стекла)?

12. Отзыв Варюхина В.Н., научного руководителя Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», член-корреспондента РАН, доктора физико-математических наук, профессора, содержит 2 замечания: 1) в разделе, посвященном расчету изохронной кинетики изменения молярной энтальпии металлических стекол, следовало бы более подробно описать выбор пределов интегрирования в уравнении (9), поскольку данный выбор существенно влияет на количественные значения рассчитываемой энтальпии; 2) в ряде случаев в

автореферате не указаны полные протоколы изохронных измерений, включая скорости нагрева/охлаждения и времена выдержки, что затрудняет понимание и воспроизводимость результатов исследования.

Все отзывы положительные: в них отмечены актуальность, научная новизна и практическая значимость исследования, дана высокая оценка его результатов. Сделанные замечания носят рекомендательный характер и не ставят под сомнение основные положения и выводы диссертации, выносимые на защиту.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и достижениями в области физики конденсированного состояния, а также способностью квалифицированно оценить актуальность, научную новизну и практическую значимость представленной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- *разработан* комплекс методов расчета: 1) температурной зависимости модуля сдвига металлических стекол; 2) температурной зависимости относительного изменения плотности металлических стекол; 3) тепловых эффектов, возникающих при изохронном нагреве металлических стекол; 4) хрупкости металлических стекол в состоянии переохлажденной жидкости; 5) температурной зависимости избыточных термодинамических функций (энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) металлических стекол относительно кристаллического состояния;
- *сформулирована* и экспериментально подтверждена гипотеза о равенстве температурных коэффициентов модулей сдвига для стеклообразного и кристаллического состояний сплавов в отсутствие структурной релаксации;
- *показано* и экспериментально подтверждено, что изменение энтальпии при структурной релаксации металлических стекол в ходе изохронного нагрева определяется произведением энтальпии формирования дефектов межузельного типа (упругих диполей) на изменение их концентрации, оцениваемой по данным релаксации сдвиговой упругости;
- *установлено* равенство калориметрически определенной избыточной энтальпией металлических стекол относительно кристаллического состояния и рассчитанной упругой энергией их дефектной подсистемы в пределах погрешности 10–15%;
- *показано*, что повышенная вязкость при температуре стеклования металлических стекол, полученных из сплавов с высокой энтропией смешения, обусловлена их пониженной избыточной энтропией относительно кристаллического состояния и, соответственно, сниженной релаксационной способностью;

- *введен безразмерный параметр структурного порядка для количественной оценки степени упорядочения металлических стекол;*
- *установлена корреляция параметра структурного порядка металлических стекол в состоянии переохлажденной жидкости с критической скоростью охлаждения расплава и с критерием стеклообразования, базирующим на характеристических калориметрических температурах;*
- *определены закономерности изменения избыточной энтропии металлических стекол относительно кристаллического состояния. Показано, что ее значения при комнатной температуре и температуре стеклования чувствительны к степени структурной релаксации. В то же время максимальная избыточная энтропия в состоянии переохлажденной жидкости не зависит от тепловой предыстории и является физическим параметром, характеризующим стекло;*
- *установлено, что стеклообразующая способность переохлажденных расплавов коррелирует с ростом их структурной неупорядоченности, количественной мерой которой является максимальная величина избыточной энтропии металлических стекол в состоянии переохлажденной жидкости;*
- *в рамках единого подхода, учитывающего взаимозависимость кристаллического, жидкого и стеклообразного состояний, показана возможность количественного описания связи между диаупругими релаксациями, тепловыми эффектами, релаксацией объема, хрупкостью и избыточными термодинамическими функциями металлических стекол.*

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны положения диссертации, вносящие существенный вклад в термодинамику релаксационных процессов и кинетику стеклования металлических стекол, создающие физические основы для понимания природы аморфного состояния во взаимосвязи с кристаллическим и жидким состояниями на основе принципиальной взаимозависимости свойств стекла, материнского кристалла и его расплава;

предложен метод расчета избыточных термодинамических функций на основе калориметрических данных, что позволило выполнить количественные оценки структурной упорядоченности, релаксационной способности металлических стекол и стеклообразующей способности расплавов;

изложены доказательства положения о том, что совместное развитие энтропийного подхода и межузельной теории формирует непротиворечивую количественную картину, связывающую термодинамические характеристики стекла с его дефектной подсистемой и кинетическими свойствами, способствующую пониманию физической природы стеклообразования;

определены факторы, благоприятствующие формированию металлических стекол с высокой стеклообразующей способностью: установлено, что рост структурной неупорядоченности, мерой которой служит максимальная избыточная энтропия переохлажденной жидкости, повышает

стеклообразующую способность расплава, а увеличение параметра структурного порядка ее снижает.

Значение полученных соискателем **результатов исследования для практики** подтверждается тем, что: *разработаны* физически обоснованные методы контроля и описания релаксационных процессов в металлических стеклах: сформулированы методы прогнозирования температурной зависимости нерелаксированного модуля сдвига, расчета тепловых эффектов, оценки хрупкости переохлажденных расплавов, расчета избыточных термодинамических функций (энтальпии, энтропии, энергии Гиббса) и количественной оценки степени структурного упорядочения (параметр структурного порядка).

Определены перспективы практического использования развитых в диссертации представлений: установленная взаимосвязь между диаупругими релаксациями и тепловыми эффектами, а также разработанный метод прогнозирования температурной зависимости модуля сдвига могут быть использованы для оптимизации термической обработки металлических стекол и оценки их структурного состояния по калориметрическим данным; энтропийный анализ открывает возможности для направленного дизайна новых составов металлических стекол с повышенной релаксационной стойкостью, обеспечивающей стабильность свойств при эксплуатации; показанная взаимосвязь избыточной энтропии с глубиной релаксации и сдвиговой вязкостью открывает возможности для направленного управления релаксационной стойкостью материала путем варьирования химического состава в сторону увеличения энтропии смешения, что особенно актуально для разработки высокоэнтропийных металлических стекол с повышенной термической стабильностью и замедленной динамикой структурных перестроек.

Установлены физически обоснованные критерии для поиска новых аморфных сплавов с высокой стеклообразующей способностью, включающие избыточную энтропию в состоянии переохлажденной жидкости и параметр структурного порядка.

Представлены методические рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации в научно-исследовательской деятельности ведущих научных и промышленных центров, занимающихся производством ленточных и объемных металлических стекол, исследованием их структуры и свойств, в том числе для решения следующих задач: анализ структурного состояния металлических стекол путем определения параметра структурного порядка; оценка хрупкости переохлажденных металлических расплавов как важного технологического параметра, влияющего на кинетику стеклования и технологические режимы получения объемных металлических стекол; определение связи между особенностями атомной упаковки и термодинамическими характеристиками переохлажденных расплавов и стекол.

Результаты работы внедрены в образовательный процесс: разработан комплекс учебно-методических материалов по дисциплинам «Физика

некристаллических материалов» и «Избранные вопросы физики конденсированного состояния» для студентов ФГБОУ ВО «ВГПУ».

Оценка достоверности результатов исследования выявила: *результаты* диссертационной работы получены на сертифицированном аналитическом оборудовании; обоснованы методики и калибровки измерений; показана воспроизводимость результатов исследования; проведена статистическая обработка экспериментальных данных; экспериментальная база охватывает 40 сплавов, что обеспечивает репрезентативность выборки и статистическую значимость выявленных закономерностей;

использовано сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике независимыми исследователями альтернативными методами (в частности, сопоставление рассчитанных значений фрагильности с литературными данными по сдвиговой вязкости и времени релаксации, а также сопоставление температурных зависимостей избыточных термодинамических функций металлических стекол с литературными данными для переохлажденных расплавов тех же составов). Установлена количественная согласованность авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках;

теоретические представления базируются на фундаментальных положениях классической термодинамики, физики конденсированного состояния и межузельной теории; полученные результаты и выводы полностью соответствуют законам термодинамики и не противоречат положениям и принципам физики конденсированного состояния и материаловедения, а также базируются на комплексном анализе литературы по эмпирическим критериям и параметрам стеклообразующей способности металлических расплавов и особенностям стеклования высокоэнтропийных сплавов;

представленные результаты прошли широкую апробацию на российских и международных научных конференциях и получили признание отечественного и зарубежного научного сообщества, а основные результаты диссертации были получены при поддержке российских научных фондов и организаций (гранты Минобрнауки РФ и РНФ, прошедшие научную экспертизу на стадиях заявок и отчетов).

Личный вклад автора в полученные результаты является определяющим и соответствует уровню доктора физико-математических наук. Соискателем сформулированы проблема, цель и задачи исследования, обоснована концепция, основанная на явном учете взаимозависимости свойств кристаллической, жидкой и твердой стеклообразной фаз при описании релаксационных явлений в металлических стеклах. Лично или при непосредственном участии автора осуществлялось планирование и проведение экспериментов, обработка и анализ экспериментальных данных, теоретическая интерпретация и формулирование основных выводов, описание и представление результатов исследования. Постановка и решение части задач выполнены совместно с научным консультантом д.ф.-м.н., проф. В.А. Хоником.

В ходе защиты диссертации соискателю был задан ряд вопросов и высказаны замечания по работе. Макаров А.С. дал ответы на все заданные вопросы, а также исчерпывающие пояснения по замечаниям, содержащимся в отзывах на автореферат, в отзывах ведущей организации и официальных оппонентов. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (отрасль науки – физико-математические).

На заседании 17 сентября 2026 года Диссертационный совет принял решение: за разработку и экспериментальное обоснование термодинамической концепции релаксационных процессов в металлических стеклах и их стеклования из расплавов, устанавливающей фундаментальные закономерности эволюции релаксационных свойств и термодинамического состояния металлических стекол и позволяющей количественно описать взаимосвязь между диаупругими релаксациями, тепловыми эффектами, кинетикой релаксации объема, хрупкостью переохлажденного жидкого состояния и избыточными термодинамическими функциями с учетом взаимозависимости свойств кристалла, расплава и стекла, что в совокупности можно квалифицировать как научное достижение в физике конденсированного состояния, присудить Макарову Андрею Сергеевичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный Совет в количестве 16 человек, из них 12 докторов наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав Совета, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета
24.1.078.01 (Д 002.060.01),
чл.-корр. РАН, д.т.н.


Баннх Игорь Олегович

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.078.01 (Д 002.060.01),
д.т.н.


Кольчугина Наталья Борисовна

17 сентября 2026 г.

Подписи Баннх И.О. и Кольчугиной Н.Б. удостоверяю:

Ученый секретарь ИМЕТ РАН,
к.т.н.




Фомина Ольга Николаевна