

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.133.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ
МЕТАЛЛОВ ИМЕНИ М.Н. МИХЕЕВА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИФМ УрО РАН)
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ
НАУК**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 18.10.2024, № 11

О присуждении Валовой-Захаревской Евгении Григорьевне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Структура сверхпроводящих слоев и токонесущая способность композитов на основе Nb_3Sn , изготовленных по бронзовой технологии и методом внутреннего источника олова» по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния принята к защите 08.07.2024, протокол № 7, диссертационным советом 24.1.133.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, приказы Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012 и № 188/нк от 26.02.2015.

Соискатель Валова-Захаревская Евгения Григорьевна, 1989 года рождения, в 2012 году окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» с присвоением степени магистра техники и технологии по направлению «Нанотехнологии». Валова-Захаревская Е. Г. освоила

программу подготовки научно-педагогических кадров в очной аспирантуре при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, год окончания аспирантуры 2017, работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории прецизионных сплавов и интерметаллидов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург.

Диссертация выполнена в лаборатории прецизионных сплавов и интерметаллидов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург.

Научный руководитель – доктор технических наук, Попова Елена Нахимовна, ведущий научный сотрудник лаборатории прецизионных сплавов и интерметаллидов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург.

Официальные оппоненты:

1) Овчинников Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории пучковых воздействий, ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения РАН (ИЭФ УрО РАН), г. Екатеринбург,

2) Пугачева Наталия Борисовна, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов, ФГБУН Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН (ИМаш УрО РАН), г. Екатеринбург

– дали положительные отзывы на диссертацию Е.Г. Валовой-Захаревской.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», (ФГАОУ ВО «УРФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина») г. Екатеринбург в

своем положительном заключении, подписанном Поповым Артемием Александровичем, доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой термообработки и физики металлов Института новых материалов и технологий, указала, что «диссертационная работа Е.Г. Валовой-Захаревской обладает внутренним единством и является законченной научно-квалифицированной работой. Результаты диссертации могут быть использованы для дальнейшего развития высокотехнологичных и востребованных в современном мире сверхпроводящих материалов. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее основные результаты. Диссертационная работа «Структура сверхпроводящих слоев и токонесущая способность композитов на основе Nb_3Sn , изготовленных по бронзовой технологии и методом внутреннего источника олова» полностью соответствует критериям ВАК РФ, определенным пунктами 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 №842 (с последующими изменениями). Автор представленной работы, Валова-Захаревская Евгения Григорьевна, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния».

Соискатель имеет 45 (17.33 п.л.) опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 32 работы, из них статей, опубликованных в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях и входящих в перечень ВАК – 14, тезисов докладов в материалах российских и международных конференций – 18.

В результате проведённых исследований автором была решена актуальная задача определения влияния легирования и режимов отжига на структуру сверхпроводящих слоёв в композитах разной конструкции, изучена кинетика образования сверхпроводящих слоев и построена модель, связывающая структуру сверхпроводящей фазы с максимально достижимой силой пиннинга в композитах на основе Nb_3Sn .

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Characteristic Length for Pinning Force Density in Nb₃Sn / E.F. Talantsev, E.G. Valova-Zaharevskaya, I.L. Deryagina, E.N. Popova. – Текст: непосредственный // Materials. — 2023. — V. 16. — P. 5185—5198.
2. Effect of Intermediate Heat Treatment on the Formation and Structure of Superconducting Layers in Multifilamentary Nb₃Sn-Based Wires / E.N. Popova, I.L. Deryagina, E.G. Valova-Zaharevskaya – Текст: непосредственный // Defect and Diffusion Forum. — 2019. — V. 391. — P. 239—245.
3. Effect of diffusion annealing regimes on the structure of Nb₃Sn layers in ITER-type bronze-processed wires / E.G. Valova-Zaharevskaya, E.N. Popova, I.L. Deryagina, I.M. Abdyukhanov, A.S. Tsapleva. – Текст: непосредственный // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — V. 969. — P. 12055–12060.
4. Growth Rate and Morphology of Nb₃Sn Layers in ITER-Type Bronze-Processed Wires Under Different Diffusion Annealing Regimes / E. Valova-Zaharevskaya, E. Popova, I. Deryagina, I. Abdyukhanov, A. Tsapleva, M. Alekseev – Текст: непосредственный // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2018. — V. 28. — P. 6001305–6001309.
5. Характеризация структуры сверхпроводящего слоя в процессе его формирования в композитах Nb/Cu–Sn, изготовленных по бронзовой технологии / Е.Г. Валова-Захаревская, Е.Н. Попова, И.Л. Дерягина, И.М. Абдюханов, М.О. Курилкин, А.С. Цаплева, М.В. Алексеев – Текст: непосредственный // Ядерная физика и инжиниринг. — 2017. — V. 8. — P. 56–61.
6. Effect of Nb₃Sn layer structure and morphology on critical current density of multifilamentary superconductors / I.L. Deryagina, E.N. Popova, E.I. Patrakov, E.G. Valova-Zaharevskaya – Текст: непосредственный // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2017. — V. 440. — P. 119–122.

7. Structure of superconducting layers in bronze-processed and internal-tin Nb₃Sn-based wires of various designs / I. Deryagina, E. Popova, E. Patrakov, E. Valova-Zaharevskaya – Текст: непосредственный // Journal of Applied Physics. — 2017. — V. 121. — P. 233901–233908.
8. Влияние режимов отжига на структуру сверхпроводящих слоев Nb₃Sn в композитах с внутренними источниками олова / Е.Н. Попова, И.Л. Дерягина, Е.Г. Валова-Захаревская, Е.И. Патраков – Текст: непосредственный // Физика металлов и металловедение. — 2016. — V. 117. — P. 1063–1072.
9. Morphology and Structure of Nb₃Sn Diffusion Layers in Superconductors with Tubular Nb Filaments / E.N. Popova, I.L. Deryagina, E.I. Patrakov, E.G. Valova-Zaharevskaya – Текст: непосредственный // Defect and Diffusion Forum. — 2015. — V. 364. — P. 139–146.
10. The Nb₃Sn layers formation at diffusion annealing of Ti-doped multifilamentary Nb/Cu–Sn composites / E.N. Popova, I.L. Deryagina, E.G. Valova-Zaharevskaya – Текст: непосредственный // Cryogenics. — 2014. — V. 63. — P. 63–68.

На диссертацию и автореферат поступило 5 отзывов:

1. От кандидата технических наук Поликарповой Марии Викторовны, старшего научного сотрудника АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара», г. Москва.

Замечание 1: «Для исследованных образцов приведено значение критического тока, или критической плотности тока без указания величины n – параметра нарастания тока, характеризующего однородность сверхпроводящего материала. Интересно было бы сопоставить параметр n с шириной распределения среднего размера зерен».

Замечание 2: «Отсутствует информация о составе сверхпроводящих слоев, а также о напряжениях в слое, которые также оказывают влияние на токонесущую способность стренда».

Замечание 3: «В главе 4 критикуется «Традиционный подход к представлению зависимости максимальной плотности силы пиннинга (F_p, max) от размера зерна Nb₃Sn (d)». И эта критика не убедительна. Автор считает, что в этом традиционном подходе

зависимость представлена формулой: $Fp, \max(d) = A \times \ln(1/d) + B$, а логарифмическая функция может работать только с безразмерной переменной, тогда как переменная в этом уравнении имеет размерность, обратную длине. Эта проблема решается путем несложных преобразований - формулу можно переписать так: $Fp, \max(d) = A \times \ln(d_0/d)$, где $d_0 = \exp(B/A) = 0.643$ ».

2. От доктора физико-математических наук Имаева Марсея Фаниревича, ведущего научного сотрудника Института проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа.

Замечание 1: «О том, что столбчатые зерна сверхпроводящей фазы сильнее, чем равноосные обеднены оловом, написано только на 15 стр. Об этом стоило сообщить ранее. Следовало бы также указать при какой степени нестехиометрии по олову происходит смена морфологии зерен сверхпроводящей фазы. Автор концентрирует внимание на связи плотности критического тока с размером зерен равноосной формы. Между тем, степень стехиометрии равноосных зерен коррелирует с их размером: чем больше размер зерен, тем выше степень стехиометрии. В этой связи следовало бы также оценить влияние степени стехиометрии по олову на критический ток».

Замечание 2: «В таблицах 1 и 2 токонесущие способности приведены в разных размерностях – в «А» и «А/мм²», что не позволяет сравнивать их между собой. Для серии образцов «БР» (таблицы 3-7) не приведены значения плотности критического тока».

3. От доктора физико-математических наук Титовой Светланы Геннадьевны, заведующей лабораторией статики и кинетики процессов Института металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург.

Замечание 1: «Четкость формулировок положений, выносимых на защиту, оставляет желать лучшего. Первое положение утверждает, что «Максимальные значения критического тока достигаются при определенной объемной доле и размерах равноосных зерен сверхпроводящей фазы...». Из данных таблицы 2 следует, что чем больше доля равноосных зерен, тем выше плотность критического тока, нет зависимости с максимумом. Если автор настаивает на наличии максимума критического тока при некоторой доле и размерах равноосных зерен, в положении следовало бы указать их конкретные величины.

В положении 2 (стр. 4) указано, что «Кинетика формирования сверхпроводящих слоев в стрендах... позволяет получить одинаково эффективную структуру в интервале температур 575–650°C при длительности диффузионного отжига 10–100 ч.». Непонятно, является ли «одинаково эффективная» структура оптимальной.

В третьем положении говорится, что *«рассчитываемый... новый количественный параметр характеризует максимальную токонесущую способность многоволоконных сверхпроводников в сильных магнитных полях»*. Из текста автореферата непонятно, почему предложенный параметр справедлив для сильных магнитных полей».

Замечание 2: «Допущена небрежность в оформлении текста, номер рисунка на стр. 9 должен быть 2 вместо 1, на стр. 10 должен быть 4 вместо 2».

Замечание 3: «В последнем предложении на стр. 8 утверждается, что *«Применение двухступенчатого отжига к композитам... привело к заметному увеличению среднего размера зерен и понижению критического тока...»*. Анализ данных таблицы 1 показывает, что это утверждение неверно: образцы К1 и К8, полученные при одно- и двухступенчатом отжиге соответственно, демонстрируют одинаковый критический ток. Критический ток образца К8 (двухступенчатый отжиг) выше, чем для образцов К2 – К5 (одноступенчатый отжиг)».

Замечание 4: «В тексте автореферата, например, в таблицах 1 и 2, используются термины «критический ток» и «плотность критического тока», измеряемые в А и А/мм², соответственно. Отсутствие единого подхода затрудняет сравнение и сопоставление результатов».

Замечание 5: «Как определяли критический ток и плотность критического тока, каковы погрешности их определения?».

4. От кандидата физико-математических наук Гаджимагомедова Султанахмеда Ханахмедовича, старшего преподавателя кафедры физики конденсированного состояния и наносистем физического факультета Дагестанского государственного университета, г. Махачкала.

Без замечаний.

5. От доктора физико-математических наук Овчинникова Сергея Геннадьевича, профессора, руководителя научного направления "Магнетизм" Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения РАН, г. Красноярск.

Без замечаний.

Выбор официальных оппонентов доктора физико-математических наук, В.В. Овчинникова и доктора технических наук Н.Б. Пугачевой, а также ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский

федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», (ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина») г. Екатеринбург обосновывается публикациями оппонентов, тематикой структурного подразделения ведущей организации, относящимися к сфере исследований, которым посвящена диссертация.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований получены следующие новые научные результаты:

1. Установлено, что критическая плотность тока в композитах на основе Nb_3Sn зависит не только от среднего размера зёрен и их распределения по размерам, но также от объёмной доли равноосных зёрен в сверхпроводящей фазе.
2. При исследовании композитов, легированных титаном, показано, что при увеличении содержания титана (Ti) в волокнах ниобия (Nb) наблюдается рост толщины сверхпроводящих слоёв и увеличение размера как равноосных, так и столбчатых зёрен. Наиболее мелкозернистая структура при увеличенном количестве сверхпроводящей фазы обнаружена при легировании бронзовой матрицы 0.24 мас.% Ti.
3. Показано, что сокращение длительности диффузионного отжига с 350 до 200 часов в промышленных сверхпроводниках приводит к увеличению объёмной доли равноосной фазы Nb_3Sn и уменьшению размера зёрен этой фазы. Это улучшает сверхпроводящие свойства, снижает затраты на производство и уменьшает риск неконтролируемой диффузии олова (Sn) через диффузионный барьер.
4. Установлено, что в промышленных сверхпроводниках, изготовленных по бронзовой технологии, со спаренными Nb волокнами, температура отжига (в диапазоне 575–650 °C) оказывает большее влияние на структуру и скорость формирования сверхпроводящего слоя Nb_3Sn , чем его длительность.

5. Показано, что зависимость максимальной силы пиннинга от среднего размера зерен является экспоненциальной с характерной длиной $\delta = 175$ нм, причем параметр δ одинаков для разных технологий изготовления и, следовательно, является константой материала Nb_3Sn .

6. Впервые построена модель и предложен количественный параметр, который связывает статистическое распределение зёрен по размерам и объёмную долю равноосной фазы Nb_3Sn с максимальной токонесущей способностью композита в сильных магнитных полях. Этот параметр позволяет рассчитывать силу пиннинга и прогнозировать токонесущую способность.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что разработана и обоснована количественная модель, связывающая объёмную долю и статистическое распределение зёрен Nb_3Sn с максимальной силой пиннинга и токонесущей способностью композитов, что позволяет прогнозировать их сверхпроводящие свойства при различных режимах диффузионного отжига. Данная модель даёт фундаментальное понимание роли равноосных зёрен в механизме пиннинга магнитного потока, углубляя теоретические представления о процессах, влияющих на критическую плотность тока в сильных магнитных полях, и создаёт научную базу для дальнейшего совершенствования методов создания высокоэффективных сверхпроводников.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что выбранные оптимальные режимы диффузионного отжига и легирования позволяют значительно улучшить микроструктуру сверхпроводящих слоёв Nb_3Sn , ускоряя их формирование и увеличивая токонесущую способность проводников. Это открывает возможности для повышения эффективности сверхпроводящих соленоидов на основе Nb_3Sn , используемых для создания сильных магнитных полей в

таких установках, как ускорители частиц и термоядерные реакторы, за счёт контроля структурных параметров и экономии времени при их изготовлении.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что экспериментальные исследования, представленные в диссертационной работе, проведены с помощью метрологически контролируемого оборудования и апробированных методик. Выводы, приведенные в работе, не противоречат литературным данным, опубликованным в открытой печати.

Личный вклад соискателя состоит в том, что все результаты, приведенные в диссертации, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии под руководством научного руководителя ведущего научного сотрудника, доктора технических наук Е.Н. Поповой. Постановка цели и задач исследования проводилась диссертантом совместно с научным руководителем доктором технических наук Е.Н. Поповой.

Автором лично проведена обработка электронно-микроскопических изображений структуры и расчёт электронограмм всех исследованных материалов; выполнен анализ геометрических параметров сверхпроводящих слоёв Nb_3Sn и их зёрновой структуры, произведена статистическая обработка полученных результатов.

Нелинейный регрессионный анализ экспериментальных данных зависимости максимальной плотности силы пиннинга от среднего размера зерна Nb_3Sn в сверхпроводящих композитах проводился диссертантом совместно с кандидатом физико-математических наук Е.Ф. Таланцевым.

Автор участвовала в подготовке образцов для просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии (совместно с научным руководителем и кандидатом технических наук И.Л. Дерягиной) и в работе на микроскопах (совместно с научным руководителем, научным сотрудником Н.В. Николаевой, кандидатом технических наук И.Л. Дерягиной и кандидатом химических наук Е.И. Патраковым).

Изготовление композитов, диффузионные отжиги и измерения электрических характеристик проведены в АО «ВНИИНМ им. ак. Бочвара».

Автор принимала участие в обсуждении полученных результатов, написании статей и тезисов докладов, выступала на российских и международных конференциях с устными и стендовыми докладами.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная задача определения влияния легирования и режимов отжига на структуру сверхпроводящих слоёв в композитах разной конструкции, изучена кинетика образования сверхпроводящих слоев и построена модель, связывающая структуру сверхпроводящей фазы с максимально достижимой силой пиннинга в композитах на основе Nb_3Sn . В целом диссертация соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (с последующими изменениями).

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

На заседании 18.10.2024, проведенном в очном режиме, диссертационный совет принял решение присудить Валовой-Захаревской Евгении Григорьевне учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 6 докторов наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений, 5 докторов наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в

состав совета, дополнительно введены на разовую защиту – нет,
проголосовали: «за» – 17, «против» – нет, «недейств.» – нет.

Председатель диссертационного совета,

доктор физ.-мат. наук, академик РАН



В.В. Устинов

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физ.-мат. наук

Т.Б. Чарикова

21 октября 2024 г.