

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертационную работу Валовой-Захаревской Евгении Григорьевны
«Структура сверхпроводящих слоев и токонесущая способность композитов на
основе Nb_3Sn , изготовленных по бронзовой технологии и методом внутреннего
источника олова» на соискание учёной степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

В настоящее время актуальной задачей для многих отраслей современной промышленности, включая энергетику, транспорт и медицинскую технику, является разработка сверхпроводников с улучшенными характеристиками, такими как высокая токонесущая способность в сильных магнитных полях и устойчивость к внешним воздействиям. В частности, высокоэффективные сверхпроводники на основе соединения Nb_3Sn востребованы в таких высокотехнологичных установках, как Интернациональный термоядерный экспериментальный реактор (ИТЭР) и большой адронный коллайдер (БАК). В Институте физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН группой ученых, в состав которых входит научный руководитель рассматриваемой диссертационной работы, на протяжении многих лет в тесном сотрудничестве с ВНИИ Неорганических Материалов им. ак. Бочвара (г. Москва) проводятся исследования промышленных сверхпроводников на основе соединения Nb_3Sn . Институт Бочвара является главным разработчиком этих важнейших материалов в России, а в ИФМ развивается научный подход к их усовершенствованию, и получено много интересных результатов, свидетельством чему являются многочисленные публикации и выполненные ранее диссертационные работы. Настоящая работа является продолжением и дальнейшим развитием этих систематических исследований. Поскольку требования к эксплуатационным характеристикам промышленных сверхпроводников постоянно возрастают в связи с созданием новых современных устройств, работа Е.Г. Валовой-Захаревской, в которой на основании проведенных структурных исследований анализируются возможности и перспективы развития этих сверхпроводников, безусловно, является **актуальной**.

Диссертация изложена на 135 страницах, включая 92 рисунка, она состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 111 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования и показана степень ее разработанности на настоящий момент, определена цель работы и описаны задачи, которые предстояло решить для достижения этой цели, представлены методологические основы исследования, сформулированы основные положения, которые выносятся на защиту, описана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Показано, чем достигается научная достоверность полученных результатов. Указано, каким пунктам Паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

соответствует содержанию работы. Приведены результаты апробации работы и подробно описан личный вклад автора.

В первой главе диссертации приведен литературный обзор, в котором даны общие представления об особенностях сверхпроводящего соединения Nb_3Sn и подробно описаны современные методы изготовления многоволоконных проводников на его основе, существующие конструкции этих композиционных материалов, имеющиеся наработки по структуре и кинетике формирования сверхпроводящего слоя. Приведены имеющиеся данные по влиянию параметров процесса твердофазного получения сверхпроводящих слоев и исходного состава композитов на получаемые структуру и сверхпроводящие характеристики. Показано, какие задачи уже решены, и какие еще стоят проблемы для дальнейшего усовершенствования этих материалов. Обзор включает 111 ссылок на основополагающие и самые современные работы российских и зарубежных авторов, касающиеся разработки, развития и перспектив использования сверхпроводников на основе Nb_3Sn . На основании литературного обзора сформулирована цель работы и поставлены задачи, которые предстояло решить для достижения этой цели.

Во второй главе описаны исследуемые материалы и основные методики исследования. Объекты исследования являются сложными образцами промышленных проводников, разработанных во ВНИИ им. Бочвара, полученных разными методами твердофазной диффузии (внутренний источник олова и бронзовая технология) и имеющих разную конструкцию и состав. Основными методами исследования были выбраны электронная микроскопия (сканирующая и просвечивающая) и рентгеновский энергодисперсионный анализ. Подробно описано, как определялись параметры структуры сверхпроводящих слоев на основании данных ПЭМ и СЭМ, и каким образом осуществляли статистическую обработку результатов. Выбранные для исследования методы свидетельствует о том, что представленная диссертационная работа является комплексным исследованием, выполненным на современном уровне.

В третьей главе представлены результаты изучения структуры сверхпроводящих слоев в композитах разного типа. На композитах, изготовленных по бронзовой технологии, но с особой геометрией ниобиевых волокон - в виде трубок, а не в виде традиционных сплошных стержней (они называются композиты с кольцевыми волокнами) проанализировано влияние температуры и длительности диффузионных отжигов на структуру формирующихся при этом сверхпроводящих слоев и критический ток. Установлена корреляция между размерами зерен сверхпроводящей фазы и величиной критического тока. На композитах, полученных методом внутреннего источника олова, выявлена корреляция между структурными параметрами сверхпроводящих слоев (морфологией зерен, их размерами, разбросом по размерам) и критической плотностью тока проводников. Показано, какие режимы отжига являются оптимальным для получения более совершенной структуры сверхпроводящей фазы. Выявлено положительное влияние легирования медной матрицы марганцем на зеренную структуру фазы Nb_3Sn . На композитах со спаренными ниобиевыми волокнами, полученных бронзовым методом,

особое внимание уделено влиянию легирования титаном на формирование сверхпроводящих слоев, а также на возможности варьирования параметров диффузионных отжигов для создания самой оптимальной структуры, обеспечивающей самые высокие значения критической плотности тока. Установлено, какой способ введения титана (в матрицу или в ниобий) и в каком количестве позволяют повысить токонесущую способность. Показана возможность сокращения диффузионных отжигов без потери качества конечного продукта.

В четвертой главе, представляющей, на мой взгляд, наибольший интерес, на примере промышленных, изготовленных по бронзовой технологии проводников, рассмотрена кинетика формирования сверхпроводящих слоев Nb_3Sn и токонесущая способность композитов. Установлено, что параметры структуры сверхпроводящей фазы, включая ее состав и морфологию, в исследованных диапазонах температур и длительностей диффузионного отжига более чувствительны именно к температуре, и изменять ее в ту или иную сторону нужно чрезвычайно осторожно, в то время как длительность отжига не настолько критична. Принципиально новой является представленная в этой главе модель, связывающая структуру сверхпроводящей фазы с силой пиннинга. Установлен общий для проводников разного типа параметр, показывающий, на каком расстоянии происходит экспоненциальное уменьшения силы пиннинга и сверхпроводник перестает работать. На основании этого предложен коэффициент эффективности проводников, расчет которого позволяет не только качественно, но и количественно связать структурные характеристики с основным физическим свойством сверхпроводников второго рода - силой пиннинга.

В заключении представлены основные результаты и выводы, полученные в работе.

Научная новизна и значимость результатов.

Многоволоконные композиты на основе соединения Nb_3Sn активно исследуются во всех развитых странах, и большой вклад в эти исследования за последние десятилетия внесла группа ученых из ИФМ, в которую вошла Евгения Григорьевна, работающих в тесном сотрудничестве с ВНИИ Неорганических материалов им. ак. Бочвара, являющимся главным разработчиком таких сверхпроводников в России. За эти годы накоплен огромный экспериментальный материал, выявлено много интересных закономерностей, позволивших целенаправленно влиять на их эксплуатационные характеристики. Тем не менее, в своей диссертационной работе Е.Г. Валовой-Захаревской удалось сказать свое новое слово. Она не только установила кинетику формирования сверхпроводящих слоев в промышленных сверхпроводниках, изготовленных по бронзовой технологии, но и оценила количественно влияние температуры и длительности диффузионных отжигов на скорость формирования и структуру сверхпроводящих слоев. Автором предложен новый количественный параметр (коэффициент эффективности стрендов, K_{eff}), позволяющий ранжировать сверхпроводники по качеству и выявлять предельные возможности достижения максимальных сверхпроводящих характеристик. Полученные результаты

являются значимыми для науки и практики, поскольку они открывают новые возможности для дальнейшего развития промышленных сверхпроводников.

Методология исследования включает использование не только самых современных методов структурных исследований (просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального анализа, статистической обработки данных с помощью программного обеспечения SIAMS-600), но также построение модели, позволяющей связать структурные характеристики с физическими свойствами (силой пиннинга). Такой комплексный подход к проведению экспериментов и анализу полученных результатов позволил детально изучить структурные изменения в композитах, определить оптимальные режимы термической обработки и легирования, оценить эффективность работы каждого конкретного сверхпроводника и разработать рекомендации по улучшению эксплуатационных характеристик.

Практическая значимость работы состоит в разработке рекомендаций по режимам термической обработки и легированию с целью улучшения структуры сверхпроводящих слоев и увеличению их токонесущей способности на основании оценки их эффективности. Эти рекомендации могут быть внедрены в производство, что приведет к повышению качества сверхпроводников и снижению затрат на их изготовление. Применение результатов диссертации может существенно повлиять на эффективность работы высокотехнологичных установок и оборудования. Расчет возможной достижимой силы пиннинга из проведенных структурных исследований позволит уменьшить объем непосредственных измерений критических токов на сложнейших дорогостоящих и не всегда доступных установках.

Достоинства работы:

1. Автором применены современные методы структурных исследований, такие как просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия, и рентгеноспектральный анализ, что позволило получить детальные и надежные данные о структуре и свойствах исследуемых материалов, представляющих собой сложнейшие объекты, в которых провод диаметром 1 мм и менее может содержать тысячи Nb волокон с формирующимся сверхпроводящим слоем. В работе использовались статистические методы обработки данных с применением специализированного программного обеспечения SIAMS-600 и строились модели для расчетов площадей каждой фазы в поперечных сечениях. Такой высокий уровень технической оснащенности и методологической базы исследований обеспечивает достоверность и воспроизводимость полученных результатов.

2. Работа Вальной-Захаревской Евгении Григорьевны обладает высокой степенью научной новизны. Автором впервые предложен и апробирован новый количественный параметр - коэффициент эффективности стрендов, который позволяет объективно оценивать качество сверхпроводников, исходя из их конструкции и внутренней структуры. Введение такого параметра в научный оборот способствует более точной оценке характеристик материалов и их ранжированию по качеству. Это особенно важно

для промышленного производства, где требуется высокая стабильность и предсказуемость свойств продукции.

3. Одним из главных достоинств диссертации является комплексный и системный подход, примененный автором. Работа охватывает не только исследование структуры сверхпроводящих слоев в композиционных материалах разного типа, полученных разными методами, но и детальный анализ их токонесущей способности. Такой многогранный подход позволил глубже понять взаимосвязь между технологическими параметрами изготовления сверхпроводников и их конечными характеристиками. Это, в свою очередь, открывает новые возможности для оптимизации производственных процессов и повышения качества конечного продукта.

4. Результаты диссертационного исследования имеют большое значение для развития технологии изготовления сверхпроводниковых материалов. Установленные закономерности формирования структуры сверхпроводящих слоев и их токонесущих свойств могут быть использованы для улучшения характеристик существующих сверхпроводников и разработки новых материалов с улучшенными параметрами.

Полученные Е.Г. Валовой-Захаревской научные и практические результаты соответствуют поставленным цели и задачам.

Содержания автореферата соответствует содержанию диссертации.

Кандидатская диссертация Евгении Григорьевны Валовой-Захаревской «Структура сверхпроводящих слоев и токонесущая способность композитов на основе Nb_3Sn , изготовленных по бронзовой технологии и методом внутреннего источника олова» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук представляет собой законченную диссертационную работу по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния в пунктах 1 и 6.

Вопросы и замечания по работе:

1. Автору следовало обосновать выбор температур отжига для исследованных композитов.

2. В первом положении, выносимом на защиту, а также в выводах говорится о влиянии легирования, однако отсутствуют конкретные рекомендации. Следовало указать, при каких условиях легирование титаном оказывает положительное влияние на токонесущую способность композита, а при каких отрицательное. Кроме того, в выводах не сказано о влиянии легирования марганцем, которое рассмотрено в работе.

3. На многих СЭМ-изображениях (например, Рис. 3.5, 3.10, 3.11, 3.20 и др.) присутствуют микротрещины, микропоры и отслоения. В работе отсутствуют пояснения, чем вызвано их появление и как они влияют на свойства исследованных композитов.

4. Одной из главных целей работы было создание модели, но в научной новизне, положениях, выносимых на защиту и выводах ничего о ней не сказано: в чем ее отличия от известных ранее и преимущества.

5. В автореферате неверно указана нумерация рисунков: два рисунка под номером 1 и отсутствует рисунок 4.

Отмеченные замечания не являются принципиальными и не влияют на общее положительное впечатление от диссертации Валовой-Захаревской Евгении Григорьевны. Работа выполнена на высоком научном уровне, включает в себя элементы новизны, теоретическую и практическую значимость, а также методологически обоснованные результаты.

Заключение

Диссертация Е.Г. Валовой-Захаревской «Структура сверхпроводящих слоев и токонесящая способность композитов на основе Nb_3Sn , изготовленных по бронзовой технологии и методом внутреннего источника олова» отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (с последующими изменениями) и предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сама диссертант — Валова-Захаревская Евгения Григорьевна — несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник
лаборатории микромеханики материалов
Института машиноведения имени Э.С. Горкунова
Уральского отделения Российской академии наук,
(ИМАШ УрО РАН)
Тел.: 8 (343) 374-59-53,
nat@imach.uran.ru

Пугачева Наталия Борисовна

«25» сентября 2024 г.

Подпись Пугачевой Наталии Борисовны заверяю

Ученый секретарь института, к.ф.-м.н.

Григорьева Валентина Викторовна

С отзывом ознакомлена.

26.09.2024

Валова-Захаревская Е.Г.

Сведения об официальном оппоненте

по диссертации Валовой-Захаревской Евгении Григорьевны на тему «Структура сверхпроводящих слоев и токонесущая способность композитов на основе Nb₃Sn, изготовленных по бронзовой технологии и методом внутреннего источника олова» по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Фамилия, имя, отчество	Пугачева Наталия Борисовна
Гражданство	РФ
Учёная степень	Доктор технических наук
Учёное звание	Доцент
Наименование отрасли науки и специальности, по которой защищена диссертация	2.6.17 «Материаловедение»
Место работы:	
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	ИМАШ УрО РАН
Почтовый адрес, индекс организации	620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34
Адрес официального сайта в сети «Интернет»	www.imach.uran.ru
Должность	Главный научный сотрудник
Структурное подразделение	Лаборатория микромеханики материалов
Телефон	8 (343) 374-59-53
Адрес электронной почты	nat@imach.uran.ru
Список основных публикаций за последние пять лет по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	
<p>1. Pugacheva N.B., Orishich A.M., Volkova E.G., Makarov A.V., Senaeva E.I., Malikov A.O. Role of ultra-fine intermetallic particles and martensite in strengthening of AISI 321/Cu/Ti laser welded joint// Material Characterization 185 (2022) 111702. [10.1016/j.matchar.2021.111702]</p>	

2. Pugacheva N.B., Veretennikova I.A.; Khalevitskiy Yu.V., Smirnova E.O . Numerical simulation of elastic-plastic deformation of AISI 321/Cu/Ti laser welded joint under tension and compression // Materials Characterization. 2022. Vol. 189. P. 111984. [10.1016/j.matchar.2022.111984]
3. Пугачева Н.Б. Николин Ю.В. Быкова Т.М. Сенаева Е.И. Структура и свойства СВС-композита системы Cu- Ti-C-B // Физика металлов и металловедение. 2022. Т. 123. № 1. С. 47-54. [10.31857/S0015323022010107]
4. Пугачева Н. Б., Быкова Т. М ., Сенаева Е. И. Структура и характер разрушения композита Cu-Ti-Al-Ni-Fe-C-B после абразивного износа/ /Физика металлов и металловедение . 2022. Т. 123. № 10. С. 1029- 1037.[10.31857/S0015323022100254]
5. Pugacheva N.B. Kruchkov D.I. Bykova T.M . Vichuzhanin D.I. Studying the Plastic Deformation of Cu-Ti-C-B Composites in a Favorable Stress State // Materials. 2023. Vol. 16. 3204. [10.3390/ma16083204]

Ученый секретарь ИМАШ УрО РАН,
к.ф.-м.н.

 В. В.