

Отзыв

официального оппонента

на диссертационную работу Вергуновой Юлии Сергеевны
«Механосинтез и самораспространяющийся высокотемпературный синтез высокоэнтропийных сплавов переходных металлов, карбидов и керамико-металлических материалов на их основе», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»

Актуальность диссертационной работы

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), состоящие из пяти и более элементов, обладают уникальными физическими и механическими свойствами, такими как высокая прочность, устойчивость к коррозии, износостойкость и термическая стабильность. Поэтому являются перспективными материалами для разнообразных приложений в различных отраслях промышленности. Это делает актуальным проведение исследований, направленных на установление связи химический состав – структура – свойства ВЭС. При этом широкий диапазон комбинаций элементов в ВЭС создает трудности оптимизации их свойств для конкретных приложений, поэтому одним из подходов к решению этой проблемы является применение теоретических методов моделирования, например, на основе теории функционала плотности. Это позволяет проектировать состав и прогнозировать свойства ВЭС из «первых принципов». Другим научно и практически важным направлением являются экспериментальные исследования, направленные на разработку и изучение перспективных методов синтеза ВЭС, в том числе и с использованием СВС, получение данных о закономерностях формирования их структурно-фазового состава, а также комплекса конструкционных и функциональных свойств. Нужно

отметить, что такие научные знания также могут быть основой верификации результатов моделирования.

Для разработки новых методов получения ВЭС различных химических составов, Вергуновой Ю.С. проведен комплекс исследований, направленных на изучение способов механического и СВС синтеза, характеристики структуры, фазового состава и свойств порошковых, а также объемных ВЭС переходных металлов, карбидов и керамико-металлических материалов на их основе.

Актуальность исследования также подтверждается выполнением проектов РНФ 20-13-00277 и РНФ 20-13-00277П «Структура и стабильность высокоэнтропийных сплавов и соединений, полученных методами механического сплавления и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза».

Научная новизна заключается в том, что показана возможность механического сплавления пятикомпонентных составов высокоэнтропийных сплавов: CrFeCoNiCu – за 120 минут, TiCrFeNiCu – за 30 минут, (TiVNbTaW, TiVNbMoTa, VNbMoTaW) – за 180 минут высокоэнергетической механической обработки. Методом СВС получен керамико-металлический материал TiC – CrFeCoNiCu с содержанием высокоэнтропийного связующего CrFeCoNiCu 30-70 масс. %. Установлено, что температуры воспламенения образцов из смесей на основе порошков высокоэнтропийного сплава CrFeCoNiCu при концентрации Ti+C в смеси 30–70 масс. % близки к температуре воспламенения исходной смеси Ti+C и составляют 1200 ± 30 °C, а температуры воспламенения Ti+C с исходной смесью металлов (Cr+Fe+Co+Ni+Cu) ниже на 200 °C. Определено, что скорость горения Ti+C с высокоэнтропийной связкой в 2–3 раза превышает скорость горения смесей Ti+C с исходными металлами. В керамико-металлическом материале со связкой из предварительно приготовленного сплава CrFeCoNiCu количество частиц TiC в единице объема в 1,5–3,0 раза больше, чем в сплаве со связкой из смеси металлов. Представлен новый метод синтеза высокоэнтропийных

карбидов $(TiVNbMoTa)C_5$ и $(VNbMoTaW)C_5$, сочетающий предварительную высокоэнергетическую механическую обработку в планетарной мельнице АГО-2 в течение 20 минут при скорости вращения размольных барабанов 2200 об/мин и отношении массы смеси к массе шаров 1:40, с последующим СВС в режиме теплового взрыва, который позволяет за короткое время получить однофазные высокоэнтропийные карбиды с ГЦК структурами.

Практическая значимость состоит в том, что отработаны оптимальные режимы получения высокоэнтропийного сплава $CrFeCoNiCu$ с помощью комбинированного использования методов механосинтеза в процессе высокоэнергетической механической обработки в течение 120 минут в аргоне при давлении 4 атм и скорости вращения барабанов 1388 об/мин, искрового плазменного спекания (температура 800 °С, давление 50 МПа и время выдержки 10 минут). Полученный материал обладает высокой прочностью на изгиб – 1362 МПа и твердостью 4,8 ГПа (489 HV), что позволяет использовать его в качестве конструкционного. Разработаны технологические режимы для получения керамико-металлического материала карбид титана – высокоэнтропийный сплав $FeNiCoCrCu$. В депозитарии ИСМАН зарегистрировано ноу-хау № НХ-1-2026. Исследованы магнитные свойства сплава $CrFeCoNiCu$ (коэрцитивная сила 5,5 кА/м) показана перспективность их применения в качестве ферромагнетиков для изделий энергетической промышленности и электроники.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа, представленная на отзыв, содержит введение, 5 глав, выводы и список использованных источников и приложение. Общий объем работы составляет 143 страницы, включая 73 рисунка, 23 таблицы и библиографию из 150 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, научная новизна и практическая значимость выполненной работы.

В первой главе представлен литературный обзор по тематике работы, в котором описана история открытия ВЭС, термодинамика и условия их образования. Рассмотрены наиболее перспективные методы получения ВЭС, их свойства, а также показано возможное применение полученных материалов.

Во второй главе приведены характеристики исходных порошков, используемых для приготовления реакционных смесей, описаны экспериментальные методики и установки, а также методы анализа структуры, фазового состава и свойств синтезированных продуктов.

Третья глава посвящена синтезу и консолидации порошков ВЭС на основе эквиатомных смесей элементов Cr, Fe, Co, Ni, Cu и Ti, Cr, Fe, Ni, Cu. Изучена эволюция фаз в процессе высокоэнергетической механической обработки. Исследована термическая стабильность CrFeCoNiCu методом высокотемпературного рентгенофазового анализа. Рассмотрены вопросы влияния условий искрового плазменного спекания (температуры 800, 900 и 1000 °C) на формирование структуры и фазового состава ВЭС CrFeCoNiCu. Определены физико-механические свойства компактных образцов ВЭС, а также получены экспериментальные данные об их удельном электросопротивлении и магнитных свойствах.

В четвертой главе представлены результаты исследования образования ВЭС на основе тугоплавких элементов VNbMoTaW, TiVNbMoTa, TiVNbTaW в процессе высокоэнергетической механической обработки, а также получения компактных ВЭС методами традиционного вакуумного и искрового плазменного спекания. Для этого изучено влияние продолжительности высокоэнергетической механической обработки на изменение фазового состава порошковых смесей и проанализирована их микроструктура. Проведено сравнение фазового состава и микроструктуры компактных ВЭС, консолидированных методами традиционного вакуумного и искрового плазменного спекания. Получены данные о микротвердости образцов.

В пятой главе рассматриваются процессы горения и теплового взрыва высокоэкзотермической смеси титан-углерод, разбавленной инертным ВЭС CrFeCoNiCu, приводящим к образованию кермета. Разработан и исследован метод синтеза высокоэнтропийных карбидов, сочетающий предварительную высокоэнергетическую механическую обработку и СВС в режиме теплового взрыва. Изучено формирование структуры высокоэнтропийных карбидов TaTiNbVWC5 и TaNbVMoWC5 непосредственно в режиме теплового взрыва. Получены данные о температуре воспламенения ВЭС TiVNbTaW и VNbMoTaW с углеродом.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современного научно-лабораторного оборудования и аттестованных методик исследований для изучения высокоэнтропийных сплавов и материалов на их основе, а кроме того значительным количеством экспериментальных данных и их воспроизводимостью, а также сопоставлением полученных результатов с результатами других отечественных и зарубежных авторов.

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 6 статей в реферируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus (в т.ч. Q1), 8 тезисов в сборниках трудов перечисленных выше конференций, зарегистрировано 1 ноу-хау.

Замечания

1. В п. 1.6.1 сообщается, что «...известно о получении магнитомягкого ВЭС CoCrFeCuNi с высокой микротвердостью 1,6 МПа...». Микротвердость 1,6 МПа нельзя назвать высокой.
2. В работе присутствуют абзацы текста, полностью дублирующие друг друга. Например, стр. 70 и стр. 73.
3. Некоторые разделы работы, например, п. 3.1.1 изложены излишне аннотационно.
4. Изучение структуры и фазового состава ВЭС TiCrFeNiCu было выполнено на объемных образцах, полученных ИПС при 700°C. Однако, для

исследования плотности, механических характеристик и магнитных свойств были использованы образцы, консолидируемые при 800°C. Насколько это правомерно?

5. В п. 3.3 соискатель сообщает, что объемные образцы ВЭС трескались при предварительной шлифовке. Следовало бы обсудить причины и обозначить пути решения данной проблемы.

6. В п. 3.3.3 автор приводит данные о влиянии термической обработки на изменение микротвердости ВЭС CrFeCoNiCu. Чем обусловлен выбор параметров режима отжига? Было бы полезно также получить данные об изменении показателей прочности и пластичности ВЭС после термообработки.

7. В диссертационной работе убедительно показано, что высокоэнергетическая механическая обработка является эффективным способом получения порошковых ВЭС. В экспериментах варьировали скоростью вращения водила, отношением массы размольных тел и шихты, а также продолжительностью процесса механической обработки. Насколько значим вклад каждого из этих параметров в энергонапряженность процесса механической обработки? Каковы пути повышения производительности процесса синтеза порошковых ВЭС с помощью механической обработки?

Указанные замечания носят рекомендательный характер, направлены на совершенствование представления полученных научных результатов в будущих работах и не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы. Цели и задачи, сформулированные в работе, достигнуты в полном объеме, положения, выносимые на защиту, доказаны экспериментальными исследованиями, приведенными в работе. Диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, является законченной научно-квалификационной работой и соответствует паспорту специальности 1.3.17 - «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

На основании полученных результатов, новизны и практической значимости, считаю, что диссертационная работа «Механосинтез и самораспространяющийся высокотемпературный синтез высокоэнтропийных сплавов переходных металлов, карбидов и керамико-металлических материалов на их основе» соответствует требованиям п. 9 «Положение о порядке присуждения ученых степеней» (№ 842 от 24.09.2013 г., ред. от 01.10.2018, с изм. от 26.05.2020), а ее автор, Вергунова Юлия Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 - Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Официальный оппонент:

кандидат технических наук (специальность 05.02.02 Машиноведение, системы приводов и детали машин), доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ)

Аборкин

Артемий Витальевич

03.06.2026

Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87

Телефон: +7 (4922) 47-96-06

E-mail: oid@vlsu.ru



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЖУ
УЧЕБНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
КОНОП А Т Г

Я, Аборкин Артемий Витальевич, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в этом документе.