

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
металлургии и материаловедения им. А.А.
Байкова Российской академии наук
(ИМЕТ РАН),
доктор технических наук


В.С. Юсупов
«13» _____ 2026 г.


ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Развитие большинства современных наукоемких технологий требует создания новых материалов с улучшенными механическими, электрическими, магнитными и другими свойствами. Одним из новейших направлений исследований в этой области является разработка материалов на основе разупорядоченных твердых растворов с несколькими основными компонентами, которые получили название «высокоэнтропийных» сплавов и соединений (ВЭС). Это направление зародилось совсем недавно, в 2004 году, но уже представлено десятками тысяч научных статей, патентов, многими монографиями и специализированными российскими и международными конференциями. Наиболее актуальными задачами в области высокоэнтропийных материалов являются поиск оптимальных химических составов и эффективных методов получения этих материалов. Основные методы получения –

кристаллизация из расплавов, механохимический синтез из порошков, а также самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Для консолидации высокоэнтропийных порошковых материалов чаще всего применяется искровое плазменное спекание, реже – горячее прессование. Поиск новых составов затрудняется чрезвычайно большим числом возможных комбинаций из нескольких равноценных элементов и отсутствием полноценной теории этих материалов, которая помогла бы радикально сузить круг поиска. С этой точки зрения сочетание методов механосинтеза и СВС весьма эффективно, так как позволяет быстро и с минимальными затратами получать широкий спектр материалов, исследовать их свойства и отбирать наиболее перспективные составы и режимы их получения.

Согласно литературным данным, многие ВЭС обладают высокой механической прочностью в сочетании с вязкостью, сохраняющихся при температурах вплоть до криогенных. Металлические ВЭС имеют сравнительно высокое удельное электросопротивление и низкий термический коэффициент электросопротивления. Кроме того, некоторые из них ведут себя как магнитомягкие ферромагнетики с высокой намагниченностью насыщения и низкой коэрцитивной силой; отмечены также материалы с парамагнитными и суперпарамагнитными свойствами. Имеются сообщения о каталитической активности ВЭС, их высокой коррозионной стойкости, износостойкости и других интересных свойствах.

Таким образом, тема диссертационной работы Вергуновой Юлии Сергеевны, посвященной механосинтезу и самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу высокоэнтропийных сплавов переходных металлов, карбидов и керамико-металлических материалов на их основе, соответствует актуальным тенденциям материаловедения. Актуальность работы подтверждается также тем, что она выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проекты РНФ 20-13-00277 и 20-13-00277П.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа 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 кратко описана история открытия ВЭС, термодинамика и условия их образования, а также приведены основные критерии формирования многокомпонентных твердых растворов. Рассмотрены наиболее перспективные методы получения ВЭС, а также показано возможное применение полученных материалов. На основе проведенного обзора литературы сформулирована цель работы: исследование процессов механосинтеза и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения высокоэнтропийных сплавов переходных металлов CrFeCoNiCu, TiCrFeNiCu, TiVNbTaW, TiVNbMoTa, VNbMoTaW, высокоэнтропийных карбидов (TiVNbMoTa) C_5 , (VNbMoTaW) C_5 и керамико-металлического материала TiC – высокоэнтропийная связка CrFeCoNiCu; исследование структуры и свойств полученных материалов.

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

В работе исследовались пятикомпонентные композиции в эквиатомной концентрации: Cr-Fe-Co-Ni-Cu, Ti-Cr-Fe-Ni-Cu, Ti-V-Nb-Ta-W, Ti-V-Nb-Mo-Ta, V-Nb-Mo-Ta-W для получения ВЭС; для получения керамико-металлического материала TiC со связкой из CrFeCoNiCu использовали порошок ВЭС CrFeCoNiCu, полученный после 120 мин высокоэнергетической механической обработки (ВЭМО) и исходную смесь образующих его металлов Cr+Fe+Co+Ni+Cu, для получения высокоэнтропийных карбидов использовали предварительно подготовленные смеси ВЭС TaTiNbVW и TaNbVMoW, полученные после 180 минут ВЭМО, с углеродом и исходные смеси металлов Ti+Ta+Nb+V+W+5C и Ta+Nb+V+Mo+W+5C.

Механическое сплавление реакционных смесей происходило в ходе ВЭМО в планетарной шаровой мельнице «Активатор 2S». Консолидацию порошков проводили методом искрового плазменного спекания (ИПС).

Для получения керамико-металлических материалов в качестве экзотермической составляющей использовали смесь Ti+C, обладающую высокой теплотой реакции.

Третья глава посвящена получению методом ВЭМО порошков ВЭС, их спеканию и исследованию свойств полученных материалов на основе эквиатомных смесей 3d переходных элементов Cr, Fe, Co, Ni, Cu и Ti, Cr, Fe, Ni, Cu. При ВЭМО происходит ряд процессов, включающих перемешивание, измельчение и механическое сплавление частиц металлов с образованием твердых растворов.

В частности, было показано, что материал, произведенный методом ИПС при 800 °С из порошка ВЭС CrFeCoNiCu, полученного после 120 мин ВЭМО, обладали плотностью 8,2 г/см³, прочностью на изгиб 1,3 ГПа, микротвердостью 4,86 ГПа и удельным электросопротивлением – $6,87 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Полученный материал является ферромагнетиком с коэрцитивной силой 5,5 кА/м.

В четвертой главе представлены результаты исследования образования высокоэнтропийных сплавов на основе тугоплавких элементов VNbMoTaW, TiVNbMoTa, TiVNbTaW в процессе ВЭМО и получение компактных ВЭС методами искрового плазменного и традиционного вакуумного спекания. Для получения твердого раствора на основе тугоплавких элементов в процессе ВЭМО была увеличена скорость вращения водила мельницы до 900 об/мин. Время варьировалось от 30 до 180 минут.

Микротвердость ВЭС на основе тугоплавких элементов определялась при нагрузке 100 г для механосинтезированных в течение 180 минут и спеченных методом традиционного спекания образцов и составила: VNbMoTaW – 10,6 ГПа, TiVNbMoTa – 6 ГПа, TiVNbTaW – 8,54 ГПа.

Пятая глава посвящена получению методом СВС керамико-металлического материала TiC – CrFeCoNiCu и высокоэнтропийных карбидов TiVNbTaW +5C, VNbMoTaW+5C. Исследование микротвердости образцов показало, что добавление 30–70 вес. % Ti + C увеличивает микротвердость образцов с 2,4–6,9 ГПа до 3,6–10,0 ГПа. Основной вклад в повышение значений этого показателя вносят близость друг к другу частиц TiC и равномерность их распределения по объему.

Новизна результатов диссертационной работы

1. Впервые 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.

2. Впервые методом СВС получен керамико-металлический материал TiC – CrFeCoNiCu с содержанием высокоэнтропийного связующего CrFeCoNiCu 30-70 масс. %.

3. 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 °С, а температуры воспламенения Ti+C с исходной смесью металлов (Cr+Fe+Co+Ni+Cu) ниже на 200 °С.

4. Определено, что скорость горения Ti+C с высокоэнтропийной связкой в 2–3 раза превышает скорость горения смесей Ti+C с исходными металлами. Обнаружено, что 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.

Практическая значимость результатов работы.

1. 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.

2. Отработаны благоприятные 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 и искрового плазменного спекания при 800 °С и давлении 50 МПа и времени

выдержки 10 минут. Полученный материал обладает достаточно высокими механическими свойствами, которые делают перспективным его использование в качестве конструкционного.

3. Разработаны технологические режимы для получения керамико-металлического материала карбид титана – высокоэнтропийный сплав FeNiCoCrCu. В депозитарии ИСМАН зарегистрировано ноу-хау № НХ-1-2026.

4. Исследование магнитных свойств сплава CrFeCoNiCu (коэрцитивная сила 5,5 кА/м) показали перспективность их применения в качестве ферромагнетиков для изделий энергетической промышленности и электроники.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа Механосинтез и самораспространяющийся высокотемпературный синтез высокоэнтропийных сплавов переходных металлов, карбидов и керамико-металлических материалов на их основе, соответствует паспорту научной специальности 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества», (отрасль науки – технические), в частности направлениям исследований:

пункт 1: «Поведение веществ и структурно-фазовые переходы в экстремальных условиях – в условиях статического и динамического сжатия...»;

пункт 4: «Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения ... связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками термического разложения, горения... термодинамика, термохимия и макрокинетика процессов горения и взрывчатого превращения»;

пункт 5: «процессы горения и взрывчатого превращения в устройствах и аппаратах для ... получения веществ и продуктов».

Достоверность результатов исследования

Полученные в ходе исследования результаты можно с уверенностью назвать достоверными, что подтверждается использованием современного научно-лабораторного оборудования и аттестованных методик исследований для изучения высокоэнтропийных сплавов и материалов на их основе, значительным количеством

воспроизводимых экспериментальных данных и сопоставлением полученных результатов с результатами других отечественных и зарубежных авторов. Достоверность полученных результатов также подтверждается публикациями в высокорейтинговых научных журналах и докладами и обсуждениями результатов на конференциях.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в работе, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автором выполнен анализ литературных данных, проведены экспериментальные исследования по получению высокоэнтропийных сплавов и соединений, проведена количественная и аналитическая обработка полученных результатов, обобщение результатов и подготовка научных публикаций.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати.

Основное содержание диссертационной работы полностью отражено в 6 статьях в реферируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus (в т.ч. Q1), а также в одном «Ноу-Хау»:

1. Вадченко, С.Г. Тепловой взрыв в смесях порошков Ta-Ti-Nb-V-W-C и Ta-Nb-V-Mo-W- C / С.Г. Вадченко, **Ю.С. Вергунова**, А.С. Рогачев, И.Д. Ковалев, Д.Ю. Ковалев // Физика горения и взрыва. –2025. – Т. 61 – № 1. – С. 68-76. DOI: 10.15372/FGV2023.9370;
Vadchenko, S.G. Thermal explosion in Ta-Ti-Nb-V-W-C and Ta-Nb-V-Mo-W-C powder mixtures / S.G. Vadchenko, **Yu.S. Vergunova**, A.S. Rogachev, I.D. Kovalev, D.Yu. Kovalev // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2025. – Vol. 61. – P. 71–80. DOI: 10.1134/S0010508225010071;
2. Rogachev, A.S. Hierarchical structure and remarkable properties of the CoCrFeNiCu high entropy alloy produced by fast mechanical synthesis and spark plasma sintering / A.S. Rogachev, D.Yu. Kovalev, **Yu.S. Vergunova**, S.G. Vadchenko, D.O. Moskovskikh, N.Yu. Yurchenko, E.S. Panina, C. Zhang, O.V. Boyarchenko, Yu.G. Morozov, A. Sheardy, M. Zhukovskyi, A.S. Mukasyan //

- Journal of Alloys and Compounds. – 2024. – Vol. 1002. – P. 175401. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175401;
3. **Вергунова, Ю.С.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез высокоэнтропийных карбидов в режиме безгазового теплового взрыва / Ю.С. Вергунова, С.Г. Вадченко, И.Д. Ковалев, Д.Ю. Ковалев, А.С. Рогачев, М.И. Алымов // Доклады академии наук. Химия, науки о материалах. – 2023. – Т. 513 – № 1. – С. 131-134. DOI: 10.31857/S268695352360023X;
Vergunova, Yu.S. Self-propagating high-temperature synthesis of high-entropy carbides in the gasless thermal explosion mode / Yu.S. Vergunova, S.G. Vadchenko, I.D. Kovalev, D.Yu. Kovalev, A.S. Rogachev, M.I. Alymov // Doklady Physical Chemistry. – 2024. – Vol. 513. – No 2. – P. 187-190. DOI: 10.1134/S001250162360033X;
 4. Вадченко, С.Г. Формирование продуктов при воспламенении, горении и плавлении смесей высокоэнтропийного сплава FeNiCoCrCu с титаном и углеродом / С.Г. Вадченко, **Ю.С. Вергунова**, А.С. Рогачев, И.Д. Ковалев, Н.И. Мухина // Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 28 - 38. DOI: 10.17073/1997-308X-2023-1-28-38;
 5. Shkodich, N.F. Fast mechanical synthesis, structure evolution, and thermal stability of nanostructured CoCrFeNiCu high entropy alloy / N.F. Shkodich, I.D. Kovalev, K.V. Kuskov, D.Yu. Kovalev, **Yu.S. Vergunova**, Yu.B. Scheck, S.G. Vadchenko, O. Politano, F. Baras, A.S. Rogachev// Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 893. – P. 161839. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161839;
 6. Shkodich, N.F. Structural evolution and magnetic properties of high-entropy CuCrFeTiNi alloys prepared by high-energy ball milling and spark plasma sintering / N.F. Shkodich, M. Spasova, M. Farle, D.Yu. Kovalev, A.A. Neparushev, K.V. Kuskov, **Yu.S. Vergunova**, Yu.B. Scheck, A.S. Rogachev Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 816. – 152611. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152611.
- Ноу-хау: **Вергунова Ю.С.**, Вадченко С.Г., Рогачев А.С. «Технологические режимы для получения керамико-металлического материала карбид титана – высокоэнтропийный сплав FeNiCoCrCu» НХ-1-2026 от 18.03.2026 г.

Апробация работы

Работа достаточно хорошо апробирована. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на 8 международных и всероссийских конференциях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации и соответствует основным ее положениям. Структура автореферата и оформление его структурных элементов выполнено согласно ГОСТ Р 7.0.11-2011.

В качестве замечаний по диссертационной работе можно отметить следующее:

1. При формулировке цели работы не указано какие преимущества будут иметь разрабатываемые процессы и материалы перед существующими в настоящее время.
2. Пункт 3 новизны научных результатов работы в большей степени подходит к разделу «Практическая значимость результатов работ».
3. Нет информации о практическом использовании полученных в диссертационной работе результатов.
4. В разделе 1.1 «История открытия высокоэнтропийных сплавов» упущена информация о профессоре О. Н. Сенкове (бывшем сотруднике ИФТТ РАН), родоначальнике класса тугоплавких высокоэнтропийных сплавов, которым посвящена часть диссертационной работы.
5. В работе в процессе размола используются стальные шары, но информации об их химическом составе и твердости не представлено. Поэтому возникает вопрос о вероятном намоле в порошковых смесях после многочасового механического высокоэнергетического воздействия железа и иных элементов, а, следовательно, и изменении стехиометрии. Учитывался ли при загрузке в размольные стаканы вероятный намол?
6. В разделе 2.3.2 «Оборудование и условия искрового плазменного спекания (ИПС) порошков ВЭС» указано, что для ИПС использовали порошки и разделительную графитовую бумагу, но из практики горячего прессования известно, что часто порошки перед горячим прессованием и ИПС прессуют в холодную. Информация о использовании или не использовании такого подхода в диссертации нет.

Сделанные замечания, однако, не снижают общую положительную оценку работы, ее научную и практическую значимость.

Заключение

Представленная диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и является завершённой научно-исследовательской работой, содержащей новые научно-технические и технологические решения, направленные на разработку новых высокоэффективных методов синтеза высокоэнтропийных карбидов и сплавов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. За счет высоких конструкционных характеристик и ферромагнитных свойств разработанные материалы имеют важное значение для отечественного машиностроения, энергетической промышленности и электроники.

Автореферат и публикации в научных изданиях подробно отражают содержание диссертации. Выводы полны, логичны и обоснованы. Основные результаты и положения докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях и семинарах, а также опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. На их основе зарегистрировано ноу-хау «Технологические режимы для получения керамико-металлического материала карбид титана – высокоэнтропийный сплав FeNiCoCrCu» НХ-1-2026 от 18.03.2026 г.

Тематика диссертации Вергуновой Ю.С., ее содержание и основные полученные результаты в достаточной степени соответствуют требованиям паспорта научной специальности 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества», (отрасль науки – технические) в части пунктов 1 и 4.

По актуальности, научному уровню, полученным результатам, их новизне и практической значимости представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9 – 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденных Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. от 25.01.2024 г.), 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».

Диссертационная работа Вергуновой Юлии Сергеевны рассмотрена и обсуждена в ИМЕТ РАН на совместном коллоквиуме сотрудников Лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов, Лаборатории пластической деформации металлических материалов и Лаборатории конструкционных сталей и сплавов (12 мая 2026 г., протокол №1). Отзыв составлен на основании диссертации, автореферата и публикаций Вергуновой Ю.С.

Председатель коллоквиума
Заведующий лабораторией прочности и
пластичности металлических и композиционных
материалов и наноматериалов, главный научный
сотрудник,
чл.-корр. РАН, д.т.н.

Колмаков А.Г.

Ученый секретарь коллоквиума
ведущий научный сотрудник, к.т.н.

Кобелева Л.И.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Адрес: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49

Телефон: +7 (499) 135-20-60

Адрес электронной почты: imet@imet.ac.ru

Сайт: <https://www.imet.ac.ru/>