

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**доктора физико-математических наук А.Ю. Долгобородова
на диссертационную работу Вергуновой Юлии Сергеевны
«Механосинтез и самораспространяющийся высокотемпературный
синтез высокоэнтропийных сплавов переходных металлов, карбидов и
керметов 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.**

Диссертационная работа Вергуновой Ю.С. посвящена поисковым исследованиям по разработке способов получения высокоэнтропийных сплавов, высокоэнтропийных карбидов и металлокерамических материалов на их основе методами механосинтеза и СВС.

Актуальность работы определяется необходимостью получения новых материалов, обладающих высокой прочностью в широком диапазоне температур. Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) и соединения на их основе обладают не только высокой механической прочностью и вязкостью, а также имеют достаточно 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.

Наиболее актуальными задачами в области высокоэнтропийных материалов являются поиск оптимальных химических составов и эффективных методов их получения. В то же время выявление новых составов затрудняется огромным количеством возможных комбинаций из нескольких равноценных элементов и отсутствием всеохватывающей теории этих материалов, которая могла 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 высокоэнтропийных материалов, исследовать их свойства и отбирать наиболее перспективные составы и режимы их получения.

Целью работы являлось исследование процессов механосинтеза и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения

высокоэнтропийных сплавов переходных металлов CrFeCoNiCu, TiCrFeNiCu, TiVNbTaW, TiVNbMoTa, VNbMoTaW, высокоэнтропийных карбидов (TiVNbMoTa)C₅, (VNbMoTaW)C₅ и керамико-металлического материала TiC – высокоэнтропийная связка CrFeCoNiCu; исследование структуры и свойств полученных материалов.

Таким образом можно сделать вывод, что диссертационная работа Вергуновой Ю.С., посвященная разработке новых способов получения высокоэнтропийных сплавов переходных металлов, карбидов и керамико-металлических материалов на их основе, **актуальна и имеет как научное, так и практическое значение.**

Актуальность работы подтверждается также тем, что она выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проекты РНФ 20-13-00277 и 20-13-00277П.

Диссертация общим объемом 143 страницы состоит из введения, 5-и глав и заключения, содержащего основные результаты и выводы. Библиография содержит 150 ссылок.

Во **введении** обоснованы актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость диссертации, приведены выносимые на защиту положения.

В **первой главе** приведен литературный обзор имеющихся данных в области исследования ВЭС, термодинамики и условий их образования, а также приведены основные критерии формирования структуры твердого раствора. Рассмотрены наиболее перспективные методы получения ВЭС, а также показано возможное применение полученных материалов. На основе проведенного обзора литературы была сформулирована цель и поставлены задачи данного исследования.

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 **третьей главе** приводятся результаты исследования динамики фазообразования ВЭС на основе эквиатомных смесей 3d переходных элементов Cr, Fe, Co, Ni, Cu и Ti, Cr, Fe, Ni, Cu в процессе механосинтеза и искрового плазменного спекания (ИПС). Представлены исследования термической стабильности CrFeCoNiCu при 600, 800 и 1000 °С. В результате экспериментов было обнаружено, что образцы, спеченные методом ИПС при 800 °С из порошка ВЭС CrFeCoNiCu, полученного после 120 мин

высокоэнергетической механической обработки (ВЭМО), обладают плотностью $8,2 \text{ г/см}^3$, высокой прочностью на изгиб $1,3 \text{ ГПа}$, микротвердостью $4,86 \text{ ГПа}$ и удельным электросопротивлением – $6,87 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Полученный материал является ферромагнетиком с коэрцитивной силой $5,5 \text{ кА/м}$. Показано, что механосинтез позволяет повысить микротвердость материала TiCrFeNiCu в три раза - до $7,7 \text{ ГПа}$.

В четвертой главе приведены результаты исследования образования высокоэнтропийных сплавов на основе тугоплавких элементов VNbMoTaW , TiVNbMoTa , TiVNbTaW в процессе ВЭМО и получение компактных ВЭС методом ИПС. Микротвердость ВЭС на основе тугоплавких элементов определялась при нагрузке 100 г для механосинтезированных и спеченных образцов составила: VNbMoTaW – $10,6 \text{ ГПа}$, TiVNbMoTa – 6 ГПа , TiVNbTaW – $8,54 \text{ ГПа}$.

В пятой главе изложены результаты получения керамико-металлического материала TiC-CrFeCoNiCu и высокоэнтропийных карбидов TiVNbTaW+5C , VNbMoTaW+5C методом СВС. Исследование микротвердости образцов показало, что добавление $30\text{--}70 \%$ $\text{Ti} + \text{C}$ увеличивает микротвердость образцов с $2,4\text{--}6,9 \text{ ГПа}$ до $3,6\text{--}10,0 \text{ ГПа}$. Основной вклад в повышение значений этого показателя вносят близость друг к другу частиц TiC и равномерность их распределения по объему.

В конце диссертации приведены **основные результаты и выводы** по работе.

Диссертационная работа в целом выполнена на высоком научном уровне. **Достоверность** полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью, использованием современного научно-лабораторного оборудования и аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных и сопоставлением полученных результатов с результатами других отечественных и зарубежных авторов.

Результаты работы получили свое отражение в достаточном количестве публикаций в российских и зарубежных изданиях из перечня ВАК, докладывались на ряде международных и российских конференциях. Результаты, полученные в работе, являются новыми, интересными и имеют важное научное и прикладное значение. Основные выводы работы вполне **обоснованы**.

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, 8 тезисов в сборниках трудов научных конференций, зарегистрировано 1 ноу-хау

По тексту диссертации есть ряд замечаний:

1. В названиях глав 3 и 4 обозначения элементов в составе смесей приведено большими буквами CRFECONICU, TICRFENICU, VNBMOTAW, TIVNBMOTA, TIVNBTAW, что затрудняет понимание, в дальнейшем – в названиях подразделов и в тексте обозначения элементов приведено в соответствии с их общепринятыми обозначениями Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Ti, V, Nb, Mo, Ta, W.

2. Для получения ряда смесей использовалась высокоэнергетическая механическая обработка в шаровых мельницах Активатор - 2S и АГО - 2 со стальными шарами и барабанами, обрабатываемые материалы обладают достаточно высокой твердостью, что должно приводить к износу барабанов и шаров и появлению в смесях намота железа. Однако на стр. 74 указано, что за время ВЭМО образца ВЭС TiCrFeNiCu от 30 до 180 минут увеличения содержания железа в материале не наблюдается, однако это не значит, что намота железа нет, в исходном материале уже содержится железо, а отсутствие увеличения содержания железа возможно связано с недостаточно точным анализом продукта или образованием железа в аморфной фазе. Результаты по уменьшению массы шаров и барабанов после механообработки в работе на приводятся.

3. В главе 5 (параграф 5.1.1) рассмотрены режимы горения в смесях Ti+C с порошками из частиц ВЭС и исходных металлов. Результаты измерения скоростей горения показали более высокие значения скорости в смесях с ВЭС в 2–3 раза выше по сравнению со смесями Ti+C с исходными металлами. Предполагается, что этот эффект связан с различными микроструктурами смесей. Приведен рисунок 59 с мелкими частицами металлов и крупными частицами ВЭС, однако размер этих частиц ВЭС в тексте не указан.

Однако в целом, указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки работы.

Считаю, что диссертационная работа «Механосинтез и самораспространяющийся высокотемпературный синтез высокоэнтропийных сплавов переходных металлов, карбидов и керметов на их основе» соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе отвечает критериям пп. 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), 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.

Долгобородов Александр Юрьевич

Доктор физико-математических наук
специальность 01.04.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Зав. лабораторией ударно-волновых воздействий
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН)
125412. г. Москва, ул. Ижорская, д.13. стр.2
тел. 8(495)4832295, e-mail: aldol@ihed.ras.ru

05 июня 2026 г.

Я, Долгобородов Александр Юрьевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись зав. лабораторией ударно-волновых воздействий ОИВТ РАН
д.ф.-м.н. А.Ю. Долгобородова

ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ОИВТ РАН
д.ф.-м.н.



А.Д. Киверин

05 июня 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН)
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
тел. 8(495)4844433, e-mail: alexeykiverin@gmail.com