

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.285.04,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б.Н. ЕЛЬЦИНА», МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 18 апреля 2019 г. № 12

О присуждении Климовой Маргарите Викторовне, гражданство Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Влияние деформационно-термической обработки на структуру и механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni(Al,C)» по специальности 05.16.01 – Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metalliv i spлавov принята к защите 13 февраля 2019 г. (протокол заседания № 5), диссертационным советом Д 212.285.04, созданным на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Минобрнауки России, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19; созданным приказом Минобрнауки России № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель, Климова Маргарита Викторовна, 1991 года рождения.

В 2013 г. окончила ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» по специальности «Наноматериалы»; в 2017 г. окончила очную аспирантуру ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» по специальности 05.16.01 – Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metalliv i spлавov; работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории объемных наноструктурных материалов, ФГАОУ

ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Минобрнауки России.

Диссертация выполнена на кафедре материаловедения и нанотехнологий ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Минобрнауки России.

Научный руководитель – доктор технических наук, Жеребцов Сергей Валерьевич, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Институт инженерных и цифровых технологий, кафедра материаловедения и нанотехнологий, профессор.

Официальные оппоненты:

Астафурова Елена Геннадьевна, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, лаборатория физики структурных превращений, ведущий научный сотрудник;

Илларионов Анатолий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, кафедра термообработки и физики металлов, доцент

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, г. Москва – в своем положительном отзыве, подписанном Добаткиным Сергеем Владимировичем, доктором технических наук, профессором, заведующим лабораторией материаловедения цветных и легких металлов, указала, что диссертационное исследование Климовой М.В. является самостоятельной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований и их интерпретации получены новые экспериментальные и теоретические результаты о взаимосвязи структуры и механических свойств в высокоэнтропийных сплавах на базе системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni. Диссертация отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней (п. 9), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее

автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Соискатель имеет 14 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 14 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 7 работ.

Другие публикации по теме диссертации представлены в виде 7 тезисов докладов, опубликованных в сборниках материалов международных конференций. Общий объем опубликованных работ – 5,31 п.л., авторский вклад – 2,23 п.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значительные работы по теме диссертации:

1. Klimova M. Twinning induced nanostructure formation during cryo-deformation / M. Klimova, G. Dyakonov, S. Zharebtsov, G. Salishchev, D. Molodov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 63(1), 012157; 0,5 п.л. / 0,15 п.л.; Scopus, Web of Science.
2. Klimova M. Effect of cryo-deformation on structure and properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy / N. Stepanov, M. Tikhonovsky, N. Yurchenko, D. Zyabkin, M. Klimova, S. Zharebtsov, A. Efimov, G. Salishchev // Intermetallics. – 2015. – Vol. 59, P. 8 – 17; 0,625 п.л. / 0,1875 п.л.; Scopus, Web of Science.
3. Klimova M. Microstructure refinement in the CoCrFeNiMn high entropy alloy under plastic straining / N. Stepanov, D. Shaysultanov, N. Yurchenko, M. Klimova, S. Zharebtsov, G. Salishchev // Materials Science Forum. – 2017. – Vol. 879, – P. 1853 – 1858; 0,375 п.л. / 0,075 п.л.; Scopus.
4. Klimova M. Microstructure and texture evolution of a high manganese TWIP steel during cryo-rolling / M. Klimova, S. Zharebtsov, N. Stepanov, G. Salishchev, C. Haase, D.A. Molodov // Materials Characterization. – 2017. – Vol. 132, – P. 20 – 30; 0,6875 п.л. / 0,20625 п.л.; Scopus, Web of Science.
5. Klimova M. Microstructure and mechanical properties evolution of the Al, C-containing CoCrFeNiMn-type high-entropy alloy during cold rolling / M.

Klimova, N. Stepanov, D. Shaysultanov, R. Chernichenko, N. Yurchenko, V. Sanin, S. Zherebtsov // *Materials*. – 2017. – Vol. 11(1), – 53; 0,875 п.л. / 0,30625 п.л.; Scopus, Web of Science.

6. Klimova M. Evolution of microstructure and mechanical properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy during high-pressure torsion at room and cryogenic temperatures / S. Zherebtsov, N. Stepanov, Y. Ivanisenko, D. Shaysultanov, N. Yurchenko, M. Klimova, G. Salishchev // *Metals*. – 2018. – Vol. 8(2), – 123; 0,8125 п.л. / 0,325 п.л.; Scopus, Web of Science

7. Klimova M.V. Recrystallized microstructures and mechanical properties of a C-containing CoCrFeNiMn-type high-entropy alloy / M.V. Klimova, D.G. Shaysultanov, R.S. Chernichenko, V.N. Sanin, N.D. Stepanov, S.V. Zherebtsov, A.N. Belyakov // *Materials Science and Engineering A*. – 2019. – Vol. 740–741, – P. 201–210; 0,625 п.л. / 0,25 п.л.; Scopus, Web of Science.

На автореферат поступили положительные отзывы:

1. Конецвой Нины Александровны, д-ра физ.-мат. наук, профессора, профессора кафедры физики ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск. Содержит замечания:

- в диссертации обсуждается прирост прочности в ВЭСах за счет измельчения размера зерна после деформационно-термической обработки. В связи с этим было бы интересно иметь сведения о распределении зерен по размерам;

- в формулах (1)-(4) фактически не представлен дислокационный вклад в прочность сплава, не обсуждается вопрос о роли внутренних напряжений;

- результаты диссертации хорошо опубликованы, но они фактически не представлены в отечественных журналах.

2. Тарасова Сергея Юльевича, д-ра техн. наук, главного научного сотрудника ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск; профессора отделения материаловедения ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Содержит замечания, касающиеся

формулировки положений, выносимых на защиту, п. 1 научной новизны; отсутствия информации о практическом использовании результатов работы;

3. Черкашневой Натальи Николаевны, главного металлурга АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь. Содержит замечания:

- чем продиктован выбор данных концентраций легирующих элементов (алюминия и углерода) в ВЭСе?

- в таблицах 3 и 4 приводятся значения объемных долей частиц вторых фаз, однако не указано, каким методом получены эти данные.

4. Бродовой Ирины Григорьевны, д-ра техн. наук, профессора, главного научного сотрудника лаборатории цветных сплавов ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург. Содержит замечание:

- на странице 17 приведены механические свойства сплава CoCrFeMnNi после кручения под высоким давлением, однако из автореферата не ясно, проводились ли структурные исследования материалов после данного способа деформации?

5. Дьяконова Григория Сергеевича, канд. техн. наук, научного сотрудника НИИ Физики перспективных материалов, и Валиева Руслана Зуфаровича, д-ра физ.-мат. наук, профессора, директора НИИ Физики перспективных материалов ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа. Содержит замечания:

- из текста автореферата не ясно, с чем связано выделение частиц именно в полосах локализации деформации для случая экваторного ВЭС?

- с чем связано различие в размерах рекристаллизованных ГЦК зерен при одинаковых температурах отжига в случае экваторного ВЭС и ВЭС с (Al,C)?

- автор проводит сравнительное исследование ВЭС и TWIP стали Fe-0,3C-23Mn-1,5Al, однако с точки зрения практического применения стоимость ВЭСа системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni(Al,C) может значительно превышать стоимость TWIP стали;

- из текста автореферата не ясно, каким методом были определены величины σ_v и $\sigma_{0,2}$ на миниатюрных заготовках ВЭС, полученных методом кручения под высоким давлением (КВД)? Как соответствовали ГОСТу использованные методики испытаний?

6. Панова Дмитрия Олеговича, канд. техн. наук, старшего научного сотрудника кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь. Содержит замечания:

- каким образом определили энергию дефекта упаковки аустенитной высокомарганцевой TWIP стали?

- чем обусловлено различие в склонности к статической рекристаллизации легированного алюминия и углеродом ВЭСа и эквИАтомного ВЭСа на фоне близких значения расчетной тормозящей силы Зинера у этих сплавов?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями среди научно-технической общественности и специалистов в данной отрасли науки, их высокой научной компетентностью в области структуры и свойств сталей и сложнолегированных сплавов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **установлено**, что в эквИАтомном сплаве CoCrFeMnNi эволюция микроструктуры в ходе прокатки при комнатной температуре имеет следующую стадийность по мере повышения степени деформации: увеличение плотности дислокаций ($\varepsilon=5-20\%$); интенсивное деформационное двойникование ($\varepsilon=20-60\%$); формирование полос сдвига ($\varepsilon=60-80\%$). Показано, что уменьшение температуры деформации до -196°C приводит к смещению стадии двойникования к меньшим степеням деформации и интенсификации двойникования. Обнаружено, что при качественно схожей картине эволюции микроструктуры в аустенитной TWIP стали Fe-0,3C-23Mn-1,5Al в ходе прокатки при комнатной и криогенной температурах,

деформация стали при -196°C дополнительно сопровождается образованием ε мартенсита;

- **определены** температурные области существования вторых фаз, формирующихся после деформационно-термической обработки: обогащенные хромом частицы с ОЦК решеткой в интервале температур $500-700^{\circ}\text{C}$ и частицы сигма фазы - при температурах $600-800^{\circ}\text{C}$. Выделение частиц вторых фаз после отжига при температурах $500-600^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению прочности сплава по сравнению с состоянием, полученным холодной деформацией на 80%;

- **обосновано** замедление развитие двойникования на начальных этапах деформации вследствие повышения энергии дефекта упаковки однофазного ГЦК сплава CoCrFeMnNi из-за легирования 0,7 ат.% углерода (C) и 3,4 ат.% алюминия (Al). Показано, что прокатанный на 80% при комнатной температуре сплав CoCrFeMnNi(Al,C) демонстрирует более высокие прочностные характеристики по сравнению эквивалентным сплавом CoCrFeMnNi вследствие большего вклада твердорастворного упрочнения в общую прочность;

- **предложен** режим деформационно-термической обработки сплава CoCrFeMnNi(Al,C) , который приводит к формированию наноразмерных карбидов типа Me_{23}C_6 , выделяющихся в виде плоских скоплений, параллельных плоскости прокатки;

- **установлено**, что в отожженных после холодной прокатки на 80% ВЭСах наибольший вклад в прочность дает зернограничное упрочнение. В то же время в сплаве CoCrFeMnNi(Al,C) после холодной прокатки и отжига при температурах $700-900^{\circ}\text{C}$ наноразмерные карбиды обеспечивают прирост прочности, сопоставимый с зернограничным упрочнением.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- установлены закономерности эволюции структуры высокоэнтропийных сплавов на базе системы CoCrFeMnNi и их механические свойства;

- определена взаимосвязь между составом, структурой и свойствами сплавов, имеющая фундаментальную ценность для развития области материаловедения, связанную с разработкой новых металлических материалов и методов их обработки.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- **разработан** режим деформационно-термической обработки сплава CoCrFeMnNi(Al,C) , включающий холодную прокатку до степени деформации 80% и отжиг при температуре 700°C , что дает хороший баланс прочности ($\sigma_{0,2}=870$ МПа и $\sigma_{\text{в}}=1060$ МПа) и пластичности ($\delta=25\%$);

- **предложена** возможность использования данного класса материалов для изготовления сложнопрофильных деталей, требующих больших степеней холодной пластической деформации, и последующей термической обработки, что обеспечивает заметно более высокую прочность по сравнению с TWIP сталью.

Оценка достоверности результатов исследований выявила:

- **достоверность полученных результатов** определяется применением комплекса современной экспериментальной техники и измерительных приборов, взаимодополняющих методов исследования, а также воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов, полученных различными методами;

- **установлены:** сходимость полученных результатов и выводов; сходимость теоретических и экспериментальных результатов, полученные автором результаты согласуются с данными зарубежного и отечественного опыта.

Личный вклад соискателя состоит в выполнении основного объема экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включающих: подготовку объектов исследования, проведение экспериментов, обработку результатов исследования, участие в разработке методик проведения экспериментов и обсуждении полученных результатов, подготовку материалов для статей и докладов.

Диссертационная работа Климовой М.В. соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи исследования особенностей формирования структурно-фазового состояния и механических свойств сплавов системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, легированных углеродом и алюминием, имеющей важное значение для развития материаловедения высокоэнтропийных сплавов.

На заседании 18.04.2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Климовой М.В. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета



Попов Артемий Александрович



Ученый секретарь

диссертационного совета

Селиванова Ольга Владимировна

«18» апреля 2019 г.