



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

**ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ
им. А.А. Байкова
Российской академии наук
(ИМЕТ РАН)**

119334, г. Москва, Ленинский пр., 49
Тел. +7 (499) 135-20-60, факс: +7 (499) 135-86-80
E-mail: imet@imet.ac.ru <http://www.imet.ac.ru>
ОКПО 02698772, ОГРН 1027700298702
ИНН/КПП 7736045483/773601001

№ 12202-
На № _____ от _____

191015, г. Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная, 49,
НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ
КМ «Прометей»,

Ученому секретарю диссертационного
совета, д.т.н., проф. Е.И. Хлусовой

НИЦ «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 340/17-26/12	в ДЕЛО
«01» 02 2024г.	№ _____
Осн. 6 л.	подп. _____
Прил. - л.	

ОТЗЫВ

доктора технических наук, доцента, ведущего научного сотрудника, зав.
Лабораторией «Физикохимии и механики металлических материалов» ИМЕТ РАН
Костиной Марии Владимировны на диссертационную работу
Кудрявцева Алексея Сергеевича

«Создание 12 % хромистой стали для парогенератора реакторной установки с натриевым теплоносителем повышенного срока эксплуатации», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Диссертационная работа Алексея Сергеевича Кудрявцева посвящена решению актуальной проблемы – обеспечению отечественной атомной энергетики надежным конструкционным материалом для парогенератора новой реакторной установки на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, сочетающим жаропрочность с экономичным составом, рассчитанным на срок службы не менее 240 000 ч при 550°C.

Диссертантом были предварительно изучены, для условий эксплуатации указанного оборудования, ранее предлагавшийся в РФ вариант стали перлитного класса марки 10X2МФБ и литературные данные, и в итоге была предложена, изучена и успешно доведена до стадии внедрения (этап технического проекта) композиция стали, описываемая маркой 07X12НМФБ и технология её производства.

Глава 1 представляет собой обзор литературы, посвященной парогенератору (ПГ) реакторной установки на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Диссертантом проанализированы особенности конструкции, условия эксплуатации двухкорпусного интегрального ПГ. Рассмотрены механизм коррозионных процессов в трубе теплообменного модуля, использующиеся для модулей ПГ материалы, сформулированы требования к конструкционному материалу ПГ с натриевым теплоносителем большой мощности. На этой основе были поставлены задачи, последовательно решенные диссертантом при выполнении работы: от исследования повреждения и старения применяющихся материалов и аналитического обоснования класса материала, выбора композиции, способной обеспечить заданный уровень характеристик, до разработки и апробации режимов получения заготовок и проверки работоспособности нового материала.

Глава 2 описывает материалы и методики исследований и испытаний.

Глава 3 посвящена исследованию произошедшей при длительной эксплуатации сталей марок 10X2M, 10X18N9 (09X18N9) и 08X16N11M деградации их структуры и связанного с этим процессом изменения их служебных свойств. Это исследование металла фрагментов модулей парогенератора ПГН-200М реакторной установки БН-600 выявило верхние температурные границы службы этих сталей, до которых они могут длительно эксплуатироваться, несмотря на некоторое снижение служебных характеристик. Оно также показало, что эти материалы в силу термической нестабильности и склонности к тепловому охрупчиванию, недостаточной коррозионной стойкости (в т.ч. склонности к хлоридному растрескиванию) не могут быть использованы для изготовления вертикального ПГ, совмещающего в едином корпусе функции испарителя и перегревателя.

В Главе 4 с использованием литературных данных и результатов собственных экспериментов обоснован выбор структурного класса, а затем и композиции стали, способной обеспечить требуемый функционал. Анализ жаропрочности, коррозионной стойкости и теплопроводности сталей разных структурных классов, их технологичности при деформации, свариваемости, показал, что обеспечить сочетание этих свойств способны стали мартенситного класса с 9-12% Cr. Литературные данные о влиянии на структуру, фазовый состав, длительную прочность и пластичность таких сталей элементов аустенито- и ферритообразователей, позволили обосновать пределы легирования стали с 12 % элементами Cr Ni, Mn, Mo, C, V, B, ограничение содержания Al. Для выявления влияния азота на её структуру и свойства были исследованы механические свойства стали 07X12НМФБ с 0,01 и 0,06%N при температурах до 600°C, и её длительной прочности при 550 и 600°C. На этой основе предложена комплексная концепция легирования стали 07X12НМФБ. Проведенный анализ уже известных сталей РФ с 12 % Cr показал, что они не отвечают разработанной концепции легирования и их применение для парогенератора РУ с натриевым теплоносителем нецелесообразно.

Глава 5 описывает разработку технологии выплавки стали 07X12НМФБ, её горячей пластической деформации (ГПД) и термической обработки, вначале на лабораторном, затем

на опытно-промышленном и промышленном уровне. Диссертантом выявлено влияние количества феррита на деформационную способность стали, предложен критерий $Cr_{\text{ЭКВ}}/Ni_{\text{ЭКВ}}$ для оценки её способности к ГПД без образования трещин и уточнена температура появления дельта-феррита (как верхняя граница нагрева под ГПД). Изучено влияние параметров прокатки и термической обработки на структуру и фазовый состав, механические свойства. Разработан, на основе анализа литературы и собственных экспериментов режим финишной термической обработки после ГПД, формирующий состояние с лучшим уровнем жаропрочности.

В части, касающейся промышленной технологии, описаны разработанные для данной стали: - варианты опытной выплавки в вакуумно-индукционной печи; - промышленной выплавки дуплекс-процессом; - разливки сифонным способом на воздухе с защитой поверхности металла аргоном и разливки через промежуточный ковш в вакуумной камере; - рафинирующий электрошлаковый переплав большого слитка с получением трубной заготовки; - получение кованных заготовок разного сортамента, а также проката (от тонколистового холоднокатаного до толстолистового горячекатаного); - получение бесшовных горячедеформированных труб по схемам прошивки и сверления и бесшовных холоднодеформированных труб; - технология штамповки полусферической крышки парогенератора.

В Главе 6 приведены результаты исследований, направленных на оценку работоспособности новой марки стали 07X12НМФБ. Были изучены, в том числе для структур, сформированных при тепловом старении статическая прочность, длительная прочность, в т.ч. сварных соединений при растяжении, статическая трещиностойкость, Изучены структуро- и фазообразование как факторы, определяющие сопротивление хрупкому разрушению и критическую температуру хрупкости. Диссертантом были также выполнены эксперименты, направленные на оценку коррозионной стойкости стали в условиях эксплуатации парогенератора (в водной среде, продуктах взаимодействия натрия с водой), стойкость против водородного охрупчивания, щелочного коррозионного растрескивания.

Глава 7 описывает на нескольких страницах результаты внедрения разработанной жаропрочной стали 07X12НМФБ, микролегированной азотом.

Характеризуя диссертационную работу в целом, необходимо отметить следующее.

Несомненна научная новизна работы. Работа весьма масштабна, но характеризуя сформулированные самим диссертантом *основные* положения научной новизны *в целом (позиции 2-8 раздела «Научная новизна»)*, можно отметить следующее. Разработана, в полном соответствии с современной парадигмой «функциональное назначение – химический состав – технология – структура – свойства» научная идеология создания новой жаропрочной стали, рассчитанной на условия эксплуатации в качестве материала парогенератора новой реакторной установки на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. При этом впервые установлены закономерности влияния химического состава новой стали на изменения её структуры и фазового состава, происходящие на этапах её обработки, вплоть до сварки заготовок,

а также при воздействии смоделированных и реальных условий эксплуатации, которые определяют все базовые служебные свойства, возможности и ограничения этой стали.

При этом, на предварительной стадии работы, для того, чтобы обосновать необходимость отказа от изготовления элементов конструкции парогенератора РУ БН-600 из применяющейся в отрасли экономнолегированной стали марки 10Х2М, диссертанту пришлось предпринять исследования, результат которых также характеризуется самостоятельной научной новизной (позиция 1 раздела «Научная новизна»).

Научная новизна подтверждена также двумя патентами, на саму сталь и на сварочный материал.

Работа имеет высокую **научную значимость** как источник новых системных знаний о поведении жаропрочных сталей и образец для проведения подобных исследований и разработок в части научных и методологических подходов и концепций. Особенно важно подчеркнуть, что все разработанные технологические процессы опираются на выявленные диссертантом в работе закономерности влияния на структуру и фазовый состав вариаций химического состава новой стали 07Х12НМФБ (в пределах марки) и вариаций воздействий на сталь, осуществляемых для получения полуфабрикатов разного сортамента

Достоверность результатов также не подвергается сомнению, благодаря:

- наличию в работе расчетного моделирования фазового состава, использованию предварительного экспериментального моделирования воздействия на материал условий термической и деформационной обработки, условий эксплуатации;

- проведению экспериментов с применением широкого спектра современных методов материаловедения, с получением взаимно согласованных прямых и косвенных результатов;

- грамотной обработке и интерпретации полученных результатов, в том числе в - сопоставлении с известными литературными данными;

- полученными на практике результатами внедрения, промышленного опробования и испытаний нового материала, т.е. доказанной работоспособностью и эффективностью, что подтверждено актами внедрения.

Работа имеет **высокую практическую значимость**. Российская промышленность получила адресно сконструированный для заданных условий службы материал с повышенной надежностью и долговечностью. Предложен химический состав новой жаропрочной стали с доказанной для условий эксплуатации высокой структурной стабильностью и хорошей коррозионной стойкостью, стойкостью к охрупчиванию, с гарантированным уровнем служебных свойств. В том числе разработаны варианты выплавки для разных по объему потребностей в металле, технологические процессы получения широкого спектра полуфабрикатов, получения сварных соединений. Важно, что, поскольку предложенные технологии опираются на обоснованные закономерности структуро- и фазообразования, они позволяют осознанно контролировать получаемые механические свойства. Особо следует подчеркнуть и тот факт, что разработана нормативная документация на (семь ТУ), сталь внесена в ряд

ГОСТов. Разработана, экспертно оценена и документально узаконена методология проверки новой стали как жаропрочного материала (ползучесть, жаропрочность и т.д.)

Результаты диссертационной работы прошли апробацию в научном сообществе. Основные результаты доложены на конференциях, изложены в 12 печатных работах, из них 11 статей в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, в том числе 6 публикаций индексируются в журналах, индексируемых в базе данных SCOPUS, получено 2 патента РФ.

По диссертации можно сделать некоторые замечания:

1. В диссертации имеется раздел, посвященный методикам исследований, есть методологические пояснения в главах работы. Однако, по ряду позиций исследований и экспериментов методология их выполнения не имеет должного отражения. В том числе:

- Не ясно, как, по какой методике определяли долю волокна в изломе (данные на с.51, 161 - 167, 236). (Не приведены непосредственные результаты этого исследования, нет фрактотграмм или обычных фото изломов).

- В тексте (с.239 – 243) нет пояснений относительно концепции «Master curve».

- Имеются вопросы по данным ПЭМ. По каким признакам в тонкой структуре был идентифицирован гранулярный бейнит (рис.4.4); - как проводилась оценка количества фаз, (например, стр. 255), при том, что метод ПЭМ весьма локальный; - насколько точна идентификация фазы на с. 258 именно как карбонитрида $V_2(C,N)$, при том, что далее в таблице 6.10 на стр.263 содержание Cr в составе частиц этой фазы - 21 ат.% против 11% для V. (Частицы, идентифицируемые именно как Cr_2N , кстати, часто наблюдаются в азотосодержащих коррозионностойких сталях, в том числе ванадийсодержащих).

2. Из раздела по технологиям выплавки не ясно, как обеспечивается и контролируется оптимальная для разработанной стали концентрация азота на уровне 0,06% при использовании в технологическом процессе вакуумирования (например, варианты выплавки, описанные на с.123).

3. Было бы желательно дать общий комментарий к особенностям разработанной стали, приводящим к значительному колебанию результатов испытаний одного и того же металла в одних и тех же условиях. В том числе: - разброс значений длительной прочности для стали с 0,06%N в координатах «напряжение – время до разрушения» при 500 и 600 °C (рисунок 4.2. на с.88); - разброс значений критической температуры хрупкости для разных видов металлопродукции из этой стали от -30 до +50°C (в разделе 6.4.1 диссертации, в т.ч. таблица 6.4 на с.235). По данному разделу не содержится каких-либо комментариев к экспериментальным данным.

4. При описании причин пониженной прочности околошовной зоны сварного соединения на с. 221 указано: «...с помощью растровой сканирующей электронной микроскопии отличий в структуре металла ЗТВ от исходного состояния не было обнаружено». При этом, однако, в ЗТВ на рис.6.18 на панорамном фото, демонстрирующем участок шлифа разрывного образца с локализованной деформацией в ЗТВ виден некий относительно крупный дефект микроструктуры. Других СЭМ-изображений не приведено, хотя они были бы в данном случае желательны.

5. Имеется несколько небольших замечаний по изложению материала:

- К таблице 4.1. на с.81 (в рамках обзора литературы) не приведена ссылка на литературный источник;

- К странице 230. Что имеется в виду при описании структуры распада обедненного мартенсита, как «аналогичной» равновесному ферриту. (Иногда, в таких случаях, пишут о том, что происходит распад мартенсита на феррито-карбидную смесь).

- На с. 146 отмечено: «...повышение содержания феррита приводит не только к снижению ударной вязкости, но и к снижению механических свойств». (Примечание: ударная вязкость — тоже механическое свойство).

- Вопрос терминологии. На с. 242 автор пишет о верхнем шельфе статической трещиностойкости. В зарубежной литературе есть понятия «upper shelf» и «lower shelf» («верхняя и нижняя полка» на кривой с перегибом). В российской научной литературе этот термин как слово «шельф» видеть не доводилось.

Указанные замечания ни в коей мере не снижают общей высокой оценки актуальной, научно и практически значимой диссертационной работы А.С. Кудрявцева. На основе предложенной им, теоретически и экспериментально обоснованной, концепции новой жаропрочной стали, осуществлена разработка для энергетики России долговечного, надежного, экономнолегированного материала для парогенератора новой реакторной установки на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Решена важная научная проблема обеспечения у высокопрочной стали одновременного наличия свойств прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости. Развиты научные основы металловедения жаропрочных сталей и методологии оценки её свойств.

Представленная докторская диссертационная работа является законченным научным исследованием, с высокой научной и практической ценностью, свидетельствующем о высокой квалификации соискателя как ученого. Она соответствует «Критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней» согласно Положению о присуждении ученых степеней, утвержденному Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.; соответствует паспорту специальности 2.6.1 — Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. Автор диссертации — **Кудрявцев Алексей Сергеевич** — заслуживает присуждения ему искомой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 — «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Д.т.н., доцент, в.н.с., зав.

Лабораторией «Физикохимии и механики металлических материалов»

ИМЕТ РАН



Костина Мария Владимировна

Подпись М.В. Костиной заверяю

Ученый секретарь ИМЕТ РАН

К.т.н.



Фомина Ольга Николаевна

Оукаашеев
А.Ф.Сидоров
01.02.2014