

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(НГТУ)

ПРОРЕКТОР ПО НАУЧНОЙ РАБОТЕ

Минина ул., 24, г. Нижний Новгород, 603155

Тел./факс 8 (831) 436-23-37

E-mail: aakurkin@nntu.ru

ОКПО 0268137 ОГРН 1025203034537

ИНН/КПП 5260001439 / 526001001

30.01.2024 № 03-04/24

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Доктор физико-математических наук
Профессор



А.А. Куркин

« 2024 г.

НИЦ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № <u>344/14-26/2</u>	в ДЕЛО
<u>15.02.2024</u> г.	№ _____
Осн. <u>10</u> л.	подп. _____
Прил. _____ л.	

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Кудрявцева Алексея Сергеевича на тему: «Создание 12 % хромистой стали для парогенератора реакторной установки с натриевым теплоносителем повышенного срока эксплуатации», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность диссертационного исследования

Одна из ключевых ролей в стратегии развития атомной энергетики в нашей стране отводится реакторам на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Результатом развития технологии реакторов этого типа стала реакторная установка (РУ) БН-1200М, являющаяся одним из перспективных типов ядерных энергетических установок Поколения IV. Конкурентоспособность реакторной установки обеспечивается за счёт применения инновационных конструкторских и проектных решений, в том числе в отношении парогенератора.

Разработка корпусного парогенератора (ПГ), совмещающего функции испарения воды и перегрева пара в едином корпусе, взамен секционно-модульного, применяемого в РУ предыдущих поколений, с повышенной до 527 °С температурой натриевого теплоносителя и увеличенным до 240 000 ч (30 лет) сроком службы является одним из основных факторов повышения экономической конкурентоспособности проекта БН-1200М.

Возможность применения конструкционных материалов, используемых для изготовления ПГ предыдущих поколений, не подтверждена, при этом есть основания полагать, что эти материалы не оптимальны для применения в парогенераторе новой конструкции, сталь марки 10X2M - вследствие недостаточной жаропрочности, а сталь марки 10X18H9 (09X18H9) - ввиду склонности к коррозионному растрескиванию.

Таким образом, работа А. С. Кудрявцева, посвященная созданию жаропрочной коррозионно-стойкой стали и технологии ее производства для парогенератора реакторной установки большой мощности (БН-1200М) с натриевым теплоносителем со сроком службы не менее 240 000 ч. является актуальной задачей. Это и определило цель данной работы.

Для решения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Исследование повреждения и старения материалов, эксплуатирующихся в составе ПГ действующих РУ с натриевым теплоносителем, оценка возможности их применения для изготовления ПГ РУ большой мощности.

2. Аналитическое обоснование выбора класса конструкционного материала для ПГ РУ большой мощности на основании анализа обеспечения требуемого уровня служебных характеристик в условиях эксплуатации.

3. Разработка химической композиции новой стали на основании системного подхода, направленного на обеспечение требуемого уровня служебных характеристик и технологичности материала.

4. Разработка технологических режимов изготовления заготовок из новой стали.

5. Промышленная апробация разработанных технологических режимов, разработка схем производства и изготовление опытных партий заготовок новой стали в сортаменте, необходимом для изготовления парогенератора РУ БН-1200М.

6. Проведение исследований новой стали, направленных на подтверждение работоспособности материала применительно к условиям эксплуатации ПГ РУ большой мощности с натриевым теплоносителем (РУ БН-1200М).

Объем, структура и содержание диссертации

Диссертационная работа изложена на 323 страницах, состоит из введения, 7 глав, основных выводов, списка используемой литературы, включающего 159 источников и 2 приложений. Диссертация содержит 306 рисунков и 36 таблиц.

Во введении обоснована актуальность тематики диссертационной работы, сформулирована цель и задачи, направленные на её решение, приведена информация о научной новизне, методологии работы, практической значимости полученных результатов,

степени достоверности и апробации результатов. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации показано, что переход для РУ БН-1200М от секционно-модульного ПГ, в котором процессы испарения воды и перегрева пара разнесены по отдельным модулям, к корпусному ПГ, в котором функции испарителя и пароперегревателя совмещены в едином корпусе, повышение максимальной температуры эксплуатации до 527 °С, а также требование по увеличению срока службы до 30 лет (240 000 ч), предъявляют повышенный уровень требований к конструкционным материалам, тем самым ставя под сомнение возможность применения материалов, использованных в предыдущих проектах. На основании анализа условий эксплуатации корпусного парогенератора реакторной установки с натриевым теплоносителем сформулированы требования к конструкционному материалу.

Во второй главе приведены объекты исследования, методики исследований и используемое оборудование. Исследования проводились на металле фрагментов модулей парогенератора ПГН-200М РУ БН-600 после эксплуатации из стали марок 10X2М, 10X18Н9, 08X16Н11МЗ, на хромистой стали лабораторных плавок и заготовках, полученных в промышленных условиях, с применением современного оборудования и методов исследования.

В третьей главе представлены результаты исследования старения и повреждения конструкционных материалов после эксплуатации в составе парогенератора ПГН-200М РУ БН-600. Исследования направлены на подтверждение работоспособности стали марок 10X2М, 10X18Н9 (09X18Н9) и 08X16Н11МЗ в условиях эксплуатации парогенератора РУ БН-600, а также на оценку возможности применения этих материалов для ПГ РУ БН-1200М.

Исследования подтвердили правильность выбора конструкционных материалов для парогенератора ПГН-200М РУ БН-600. Они не только обеспечили безопасную эксплуатацию модулей ПГ в течение проектного ресурса, но и может быть рассмотрен вопрос о его увеличении. При этом отмечено, что применение конструкционных материалов, использованных для ПГ РУ БН-600, РУ БН-800, в конструкции ПГ РУ БН-1200М нецелесообразно. Сталь марки 10X2М не рекомендуется вследствие недостаточного уровня жаропрочности. Применение стали марок 10X18Н9 и 08X16Н11МЗ недопустимо для теплообменных труб ПГ РУ БН-1200М из-за её склонности к хлоридному коррозионному растрескиванию. Таким образом подтверждена необходимость разработки нового конструкционного материала.

Четвертая глава посвящена разработке химической композиции нового конструкционного материала. На основании сравнительного анализа стали и сплавов различного класса по критериям коррозионная стойкость, жаропрочность и теплопроводность показано, что для изготовления корпусного ПГ РУ БН-1200М оптимальным конструкционным материалом является высокохромистая сталь мартенситного класса.

В результате комплексного анализа влияний различных химических элементов на структуру и свойства жаропрочной хромистой стали мартенситного класса разработана химическая композиция новой марки стали 07X12НМФБ. Коррозионная стойкость новой марки стали обеспечивается за счет легирования Cr, основной эффект на упрочнение оказывают C, N, V, Nb, образующие дисперсные выделения, тормозящие перемещение дислокаций и миграцию границ субзерен, легирование Mo позволяет реализовать упрочнение стали по твердорастворному механизму и за счет выделения фазы Лавеса, благоприятный эффект на жаропрочность стали также обеспечивает легирование B, который закрепляет границы зерен и замедляет протекания диффузионных процессов, ограничение содержания феррита достигается за счет легирования Ni и Mn.

Отмечено, что несмотря на широкое использование 12 % хромистой стали отечественной промышленностью, материалы близкие по химической композиции к разработанной автором диссертации, отсутствуют.

В пятой главе диссертационной работы представлены результаты разработки технологии изготовления заготовок из стали марки 07X12НМФБ и ее апробации на отечественных металлургических предприятиях.

Установлено, что основным фактором, влияющим на технологичность стали марки 07X12НМФБ при горячей пластической деформации, является содержание δ -феррита в структуре заготовки в процессе передела. С целью его минимизации разработано дополнительное требование к химическому составу стали марки 07X12НМФБ по соотношения аустенито- и ферритостабилизирующих элементов $Cr_{экр}/Ni_{экр} \leq 3,1$, которое наряду с ограничением температуры нагрева под горячую пластическую деформацию значением 1150 °С, обеспечивает возможность проведения бездефектного горячего передела. В результате исследование процессов формирования фазового состава стали марки 07X12НМФБ при различных режимах температурного воздействия и влияния фазового состава на свойства разработан режим окончательной термической обработки, обеспечивающий оптимальное соотношение прочности и сопротивления хрупкому разрушению.

Промышленная апробация технологии изготовления заготовок из стали марки 07X12НМФБ в требуемом для изготовления парогенератора РУ БН-1200М сортаменте выполнена на отечественных металлургических предприятиях с оформлением соответствующих технических условий на поставку. Разработана и оформлена технологическая инструкция АЕИШ.25221.00045 «Горячая пластическая обработка и термическая обработка основного металла и сварных соединений стали марки 07X12НМФБ».

Шестая глава посвящена оценке работоспособности стали марки 07X12НМФБ в условиях эксплуатации корпусного парогенератора реакторной установки с натриевым теплоносителем.

В результате выполненной экспериментальной работы подтверждена работоспособность стали марки 07X12НМФБ в качестве основного конструкционного материала парогенератора РУ БН-1200М. Получены необходимые для обоснования работоспособности конструкции и расчетной оценки срока службы парогенератора свойства стали. В результате исследования эволюции структуры стали марки 07X12НМФБ в процессе термического воздействия определены граничные условия применения нового материала.

В седьмой главе приводятся совокупные данные по внедрению результатов диссертационной работы, связанным с промышленным освоением и применением новой марки стали в области использования атомной энергии.

Сталь марки 07X12НМФБ включена в ГОСТ 5632-2014 «Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки» и Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» (НП-104-18).

Полученные данные по свойствам стали марки 07X12НМФБ включены в нормативную документацию:

- ГОСТ Р 59115.2-2021 «Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Модуль упругости, температурный коэффициент линейного расширения, коэффициент Пуассона, модуль сдвига»;
- ГОСТ Р 59115.3-2021 «Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Кратковременные механические свойства конструкционных материалов»;
- ГОСТ Р 59115.4-2021 «Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Длительные механические свойства конструкционных материалов».

Сталь марки 07X12НМФБ принята в качестве основного конструкционного материала парогенератора Н-532 РУ БН-1200М на этапе технического проекта.

Обоснованности и достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.

По результатам анализа диссертационной работы можно отметить, что все представленные научные положения и выводы обоснованы теоретически и экспериментально. Достоверность результатов исследования подтверждается высокой воспроизводимостью и применением как стандартных методов исследований, так и специально разработанными. При выполнении работы для исследования структуры и физических свойств использовалось современное (поверенное) оборудование, выполнен большой объем доверительных экспериментов по обоснованию технологии деформирования. Полученные данные подтверждены положительными результатами промышленного освоения.

Оценка новизны научных положений.

Полученные результаты обладают научной новизной. К наиболее значимым из них стоит отнести:

1. Разработана химическая композиция новой 12 % хромистой стали марки 07X12НМФБ мартенситного класса, комплексно легированной углеродом, азотом, хромом, никелем, марганцем, ванадием, ниобием, молибденом и бором, ориентированная на обеспечение требуемых в условиях эксплуатации корпусного парогенератора реакторной установки на быстрых нейтронах служебных характеристик.

2. Установлено, что высокий уровень кратковременной и длительной прочности стали марки 07X12НМФБ обеспечивается за счет формирования в результате окончательной термической обработки карбидов и нитридов ванадия размером (5–10) нм, которые являются эффективными барьерами, тормозящими перемещения дислокаций и миграцию границ субзерен.

3. Установлены критерии, определяющие пластичность стали марки 07X12НМФБ в условиях горячей деформации. Получение бездефектных заготовок обеспечивается введением требования к химическому составу стали по ограничению значения отношения хромового к никелевому эквиваленту $Cr_{\text{экв}}/Ni_{\text{экв}} \leq 3,1$ и ограничением температуры нагрева значением 1150 °С.

4. Обнаружен эффект снижения ударной вязкости при одновременном повышении прочности стали марки 07X12НМФБ после отпуска при температурах (700 – 750) °С

длительностью до 8 ч. Природа явления связана выделением частиц легированного цементита в процессе отпуска, дальнейшее увеличение продолжительности отпуска приводит к их растворению и восстановлению сопротивления хрупкому разрушению стали.

5. Обнаружены структурные изменения в стали марки 07X12НМФБ в процессе термического старения, приводящие к ускоренному разрушению образцов и ограничивающие применение материала при температурах свыше 600 °С. К этим изменениям относятся: образование частиц фазы Лавеса размером более 1 мкм, выступающими центрами зарождения дефектов, а также растворение дисперсных карбонитридов ванадия при формировании крупных частиц Z-фазы.

6. Обнаружено снижение длительной прочности сварных соединений стали марки 07X12НМФБ в результате разрушения материала по разупрочнённой прослойке в зоне термического влияния на расстоянии (1,5 – 2,2) мм от линии сплавления. Установлено, что в процессе термического цикла сварки в аустените, образовавшемся на участке ЗТВ, не успевают раствориться первичные карбиды, и после охлаждения он превращается в обедненный по углероду и другим легирующим элементам мартенсит, который в процессе послесварочного отпуска распадается с образованием практически равновесного феррита, обладающего низкой прочностью.

Оценка практической значимости результатов работы и рекомендации по дальнейшему применению.

Разработка стали марки 07X12НМФБ обеспечила создание парогенератора, совмещающего функции испарения воды и перегрева пара в едином корпусе, с повышенной до 527 °С температурой натриевого теплоносителя, увеличенным до 240 000 ч сроком службы и пониженной до 3 раз удельной металлоёмкостью для реакторной установки на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.

Технология изготовления стали марки 07X12НМФБ оформлена в виде технологической инструкции и успешно внедрена на отечественных предприятиях, в том числе: Филиал АО «АЭМ-технологии» «АЭМ-Спецсталь», ПАО «Челябинский металлургический комбинат», ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ», ПАО «Ашинский метзавод», АО «Челябинский трубопрокатный завод», ООО «Киберсталь». В ходе промышленной апробации разработанной технологии изготовлены кованные и листовые заготовки, холоднодеформированные трубы, в сортаменттребуемом для изготовления парогенератора РУ БН-1200М.

Сталь марки 07X12НМФБ включена в нормативную документацию, действующую в области использования атомной энергии. Полученные служебные характеристики стали

марки 07X12НМФБ использованы для расчетного обоснования конструкции и срока службы парогенератора Н-532 РУ БН-1200М.

Дальнейшее внедрение результатов работы рекомендовано для металлургических предприятий, занимающихся изготовлением заготовок из жаропрочной хромистой стали, и конструкторским организациям, проектирующим котельное оборудование и оборудование для тепловой и атомной энергетики.

По теме диссертации опубликовано 12 печатных работах, из них 11 статей в рецензируемых научных изданиях, в том числе 6 публикаций индексируется в БД SCOPUS, получено 2 патента РФ. **Автореферат диссертации и публикации достаточно точно отражают содержание диссертационной работы.**

Замечания по диссертационной работе:

1. Во Франции эксплуатировались реакторы с натриевым теплоносителем, в том числе реакторная установка большой мощности – Суперфеникс. В работе не показано, учитывался ли опыт конструирования и эксплуатации парогенератора РУ Суперфеникс и применяемых для его изготовления конструкционных материалов.

2. Безопасность реакторной установки с натриевым теплоносителем определяется в том числе поведением конструкционного материала парогенератора в аварийных ситуациях при протечках воды в натрий, в работе не показана стойкость стали марки 07X12НМФБ в факеле реакции воды с натрием по сравнению со сталью марки 10X2М, применяемой для парогенератора РУ БН-800.

3. Свойства стали марки 07X12НМФБ получены при испытаниях на воздухе и в водной среде, экспериментальные исследования в среде натрия, за исключением стойкости к щелочному коррозионному растрескиванию отсутствуют.

4. В работе говорится о выделении частиц легированного цементита при отпуске 700-750 С, время отпуска 8 часов, при увеличении времени выдержки при отпуске до 10 часов происходит растворение. Из-за чего происходит растворение, если температура не изменяется? Проводились ли испытания при 12, 14 и ... часах, как ведут себя контролируемых характеристики?

5. Сталь имеет в составе хром, но про образование, количество, размеры карбидов хрома нет информации. Как ведут себя карбиды хрома, размер частиц, их расположение и влияние на свойства? Сколько карбонитридов ванадия и ниобия при микролегировании (Nb 0,1±0,05 %; N 0.05±0,01; V 0.2% ±0,5 % в стали)?

6. рис.7 стр.25 как объяснить разницу значений относительного сужения для плавок 268 (предположительно оптимальная) и 269 (с пониженным содержанием углерода и

повышенным ниобия и ванадия)? Почему выбран для контроля именно этот параметр (относительное сужение)?

7. Выделение Z –фазы происходит при 600 С, Лавес –фазы при 500 С, изменение дислокационной структуры после 450С, в режим термической обработки входит выдержка при 750 С более 10 часов, процессы выделения Z и Лавес-фаз начитается при этих выдержках?

8. В диссертации и в автореферате недостаточно обоснован системный подход, на основании которого автор разрабатывает химический состав стали, где содержание хрома составляет 12%.

9. В работе недостаточно полно приведены результаты исследований по оценке влияния наводороживания поверхности исследуемой стали на её трещиностойкость при различных видах эксплуатационных нагрузок.

Заключение

Однако отмеченные недостатки существенно не снижают теоретической и практической значимости выполненных исследований, а полученные в диссертации результаты соответствуют поставленным цели и задачам. В целом диссертационная работа Кудрявцева Алексея Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития технологии производства жаропрочных хромистых сталей, применяемых для производства парогенератора реакторной установки большой мощности (БН-1200М) с натриевым теплоносителем, имеющих важное значение для развития материаловедения и машиностроения.

По своей актуальности, научной новизне и практической значимости диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями (в редакции от 20.03.2021г., Постановление Правительства РФ № 426), предъявляемым к диссертациям на соискание доктора технических наук, а её автор Кудрявцев Алексей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Отзыв составлен на основании анализа диссертации, автореферата, публикаций и доклада Кудрявцева А.С. на заседании кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов» (МТМиТОМ) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский

государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (протокол № 2 от «23» января 2024 г. Результаты голосования: За -18, Против -нет, Воздержались - нет).

Даем согласие на включение персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени доктора технических наук Кудрявцева А.С. и их дальнейшую обработку.

Профессор кафедры «МТМиТОМ», доктор технических наук

(05.16.01 Металловедение и термическая

обработка металлов и сплавов),

профессор

Геннадий Николаевич Гаврилов

Профессор кафедры «ТиОМ», доктор технических наук

(05.16.01 Металловедение и термическая

обработка металлов и сплавов),

профессор

Кабалдин Юрий Георгиевич

Секретарь кафедры «МТМиТОМ»

Елена Всеволодовна Сибирякова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24. Тел./факс 8 (831) 436-63-22

E-mail: mtnm@nntu.ru

Подписи Гаврилова Г.Н., Кабалдина Ю.Г., Сибиряковой Е.В.

заверяю, Заместитель директора Института физико-химических

технологий и материаловедения НГТУ им. Р.Е. Алексеева



А.А. Калинина

23.01.2024г.