

## ОТЗЫВ

официального оппонента Ланина Александра Алексеевича на диссертационную работу: «Создание 12% хромистой стали для пароперегревателя реакторной установки с натриевым теплоносителем повышенного срока эксплуатации», представленную Кудрявцевым Алексеем Сергеевичем на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Развитие атомной энергетики, наряду с ростом единичной мощности энергоустановок, связано с необходимостью решения экологических проблем при утилизации отработанного ядерного топлива.

Создание в России замкнутого энергетического цикла с применением реакторов на быстрых нейтронах позволяет в значительной степени решить экологические проблемы. Однако применение в реакторных установках натриевого теплоносителя требует разработки новых конструкционных материалов, обеспечивающих повышенные прочностные свойства и необходимый ресурс эксплуатации 240 тыс. час.

Диссертационная работа посвящена созданию 12% хромистой стали для парогенератора реакторной установки с натриевым теплоносителем, является несомненно актуальной и крайне необходима для практического использования при конструктивно-технологическом проектировании новых энергоблоков.

Автор диссертации логично и последовательно сформулировал цели и задачи работы, основываясь на анализе, приведённом в первой главе. В этой главе автор диссертации проанализировал особенности конструкции парогенератора «натрий-вода», условия эксплуатации конструкционных материалов, а также влияние повреждающих факторов.

НИИ «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 260/17-26/12	ДЕЛО
«26» 01 2024 г.	№
Осн. 7 л.	подп.
Прил. - л.	

Выполнен всесторонний анализ используемых конструкционных материалов для парогенератора реакторной установки применительно к основным повреждающим эксплуатационным воздействиям. Сформулированы требования к конструкционным материалам для парогенератора с натриевым теплоносителем большой мощности.

Во второй главе подробно рассмотрены материалы и методики исследований, подтверждающие достоверность полученных результатов исследований структуры, физических и прочностных характеристик металла.

В третьей главе выполнены исследования влияния старения и других повреждающих эксплуатационных факторов уже используемых конструкционных материалов с целью оценки их возможного применения для парогенератора большей мощности. Установлены границы применимости марок 10X2M, 10X18H9, 08X16H11M3 и определены направления исследований для разработки новой стали.

Четвёртая глава является основополагающей в разработке системы легирования новой стали. Результаты исследований, представленные в этой главе, позволили установить новые закономерности формирования структуры 12%Cr стали и упрочняющих фаз в зависимости от соотношения легирующих элементов, а также определить оптимальный с точки зрения эксплуатационных воздействий, химический состав. Полученные результаты, основанные на комплексных исследованиях, несомненно являются новыми научными достижениями.

Пятая глава посвящена разработке технологии изготовления заготовок из стали марки 07X12HMФБ с применением горячей пластической деформации. Результаты, полученные в этой главе, представляют значительный научный и практический интерес для промышленного применения разработанной стали. Одной из проблем при изготовлении поковок из 12%Cr стали является появление трещин при горячей пластической деформации.

В результате выполненных исследований предложен новый критерий по химическому составу стали в виде отношения  $Cr_{\text{экв}}/N_{\text{экв}} \leq 3,1$  при одновременном ограничении температуры нагрева до температуры начала фазового превращения аустенита в  $\delta$ -феррит.

Приведены результаты комплексных исследований закономерностей формирования прочностных свойств на стадиях изготовления заготовок из стали 07X12НМФБ. Следует отметить строгую логическую последовательность проведённых исследований, включая этапы выплавки стали, изготовление поковок, проката, термической обработки.

Все выполненные исследования являются основой последующих этапов промышленного освоения стали 07X12НМФБ для изготовления элементов парогенератора реакторной установки. На базе выполненных исследований разработано и выпущено семь технических условий на изготовление заготовок из стали 07X12НМФБ.

В главе шесть представлены результаты исследований стали 07X12НМФБ применительно к условиям эксплуатации. Установлены гарантированные значения механических свойств для заготовок с учётом термического старения для условий статического нагружения.

Впервые получены также пределы длительной прочности стали в широком диапазоне температур от 425 до 600 °С. Установлена критическая температура хрупкости  $T_k = +50$  °С. Исследования коррозионной стойкости показали высокую сопротивляемость стали к хлоридной и щелочной коррозии. Определены коррозионные прибавки на толщину конструктивных элементов.

Представленные в главе шесть результаты имеют исключительно высокий практический интерес прежде всего для проектно-конструкторских организаций и позволяют использовать разработанную сталь для энергоустановок нового поколения.

В главе семь соискатель подробно изложил результаты внедрения выполненных исследований, показывающие глубину проработки поставленной и решённой проблемы. Приведён перечень ряда разработанных нормативных и технических документов, необходимых для использования стали 07X12НМФБ в энергетике.

По диссертационной работе следует сделать отдельные замечания:

1. В отличие от ранее применяемых для парогенераторов сталей 10X2М, 10X18Н9, (09X18Н9), 08X16Н11М3, новая высокопрочная мартенситно-ферритная сталь 07X12НМФБ отличается пониженной технологической прочностью сварных соединений. Так при сварке сталей этого класса в околошовной зоне образуются «горячие» трещины в узком интервале температур 1270...1280 °С, в околошовной зоне также возникают «холодные» трещины, проявляющие склонность к трещинам повторного нагрева.

Указанные зародышевые технологические трещины не выявляются неразрушающим контролем и могут в процессе эксплуатации приводить к развитию хрупких разрушений как при умеренных температурах, так и локальных разрушений при ползучести, снижая ресурсные характеристики стали.

Однако в работе технологическая трещиностойкость сварных соединений не рассмотрена.

2. В разделе 6.3.2 приведены результаты исследований снижения длительной прочности сварных соединений. При этом, на стр.231 снижение длительной прочности объясняется образованием в сварных соединениях в зоне термического влияния «мягкой» прослойки (трещины IV типа). На этой основе принят коэффициент снижения прочности сварных соединений  $\varphi_w=0,7$ .

Однако появление «мягкой» прослойки может быть исключено за счёт применения оптимального технологического процесса сварки. В теплоэнергетике имеются технологические решения, позволяющие исключить опасность появления разупрочнённой зоны в сварных соединениях и обеспечить  $\varphi_w=1$ . Использование коэффициента снижения прочности  $\varphi_w=0,7$  приведёт к необоснованному повышению толщины элементов и росту металлоёмкости конструкции.

3. В работе не приведён анализ выбора температуры термической обработки сварных соединений конструкций. В околошовной зоне сварного соединения имеет место значительный перегрев и рост зерна, который последующей термической обработкой невозможно исправить. Возникает опасность появления трещин повторного нагрева.

4. В разделе 6.3 при испытаниях на длительную прочность не приведены величины длительной пластичности, которые являются важными критериями, определяющими смену физических механизмов разрушения от вязкого к хрупкому межзёренному. Автор диссертации обращает на это внимание, указывая на перелом кривой длительной прочности (рис.6.13) при  $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$  (срт.216).

Учитывая, что временная база испытаний на длительную прочность не превышает 30 тыс. часов, определение времени до перехода к хрупкому разрушению (с минимальной длительной пластичностью) является важнейшим результатом для прогнозирования длительной прочности с учётом смены механизма разрушения при длительной эксплуатации до 240 тыс. часов.

Однако в работе такие оценки не сделаны.

5. Результаты испытаний стали 07X12НМФБ на длительную прочность показали, что при температурах 425 и 450  $^{\circ}\text{C}$  разрушение

реализуется в основном только в диапазоне напряжений, превышающих предел текучести при заданных температурах.

Поэтому выбор предельной температуры проявления ползучести  $T=425^{\circ}\text{C}$  не обоснован и в дальнейшем при проектировании будет приводить к необходимости выполнения сложных ненужных расчётов на длительную прочность элементов оборудования с температурой в диапазоне  $425\dots 450^{\circ}\text{C}$ .

6. При исследовании статической трещиностойкости основного металла не приведена оценка корректности выбора размеров образцов (разделы 6.4.2, 6.4.3). Применение для испытаний образцов толщиной 25 мм и эмпирического метода пересчёта результатов испытаний по ASME 1820-09 является косвенной оценкой трещиностойкости металла. Это же подтверждает и автор диссертационной работы (см. стр.245), принимая значение  $T_0=20^{\circ}\text{C}$ .

Тогда возникает вопрос о необходимости выполнения корректных испытаний. Такое же несоответствие с использованием метода пересчёта результатов оценки трещиностойкости, полученных на малых образцах, обнаружено и в работах ОАО «НПО ЦКТИ», при исследовании ряда сталей с  $9\dots 12\%\text{Cr}$ .

7. В работе приведены хорошие результаты по исследованию сопротивляемости коррозионному воздействию. Однако учитывая высокую чувствительность стали к технологическим воздействиям и опасность возникновения технологических трещин, особенно в сварных соединениях, необходимо было дополнить работу оценкой коррозионной трещиностойкости с определением скорости роста коррозионных трещин.

В целом диссертация Кудрявцева Алексея Сергеевича является законченной научной работой, выполненной с использованием современных методов теоретических и экспериментальных исследований на высоком

научно-техническом уровне. Результаты работы по разработке новой отечественной стали вносят существенный вклад в развитие атомной энергетики, обладает несомненной научной новизной. Автореферат соответствует выводам диссертации. Результаты диссертации нашли полное отражение в публикациях в научных изданиях.

Диссертационная работа Алексея Сергеевича Кудрявцева «Создание 12% хромистой стали для пароперегревателя реакторной установки с натриевым теплоносителем повышенного срока эксплуатации» отвечает требованиям п.28 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор Кудрявцев Алексей Сергеевич заслуживает присуждение учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент, д.т.н.

А.А. Ланин

Ланин Александр Алексеевич, доктор технических наук, 05.16.09 – материаловедение (машиностроение), заведующий отделом 13 ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»;

104021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.24;

Тел. раб.: 8 (812) 717-28-76;

Тел. моб.: +7 (921) 937-99-43;

E-mail: [LaninAA@ckti.ru](mailto:LaninAA@ckti.ru)

**Подпись Ланина А.А. удостоверяю**

Генеральный директор ОАО «НПО ЦКТИ»



В.Е. Михайлов

*Озкокашова*  
*Федорова*  
26.01.24