

ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 44-41426/12	в ДЕЛЮ
«18» 02 20 24 г.	№
Осн. 4 л.	подп.
Прил. л.	

ОТЗЫВ

официального оппонента Мишакина Василия Васильевича 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

Диссертационная работа А. С. Кудрявцева посвящена решению научных и практических задач по разработке, промышленному освоению и оценке работоспособности в условиях эксплуатации парогенератора реакторной установки БН-1200М новой жаропрочной 12 % Cr марки стали мартенситного класса.

Актуальность диссертационной работы

Стратегия развития атомной энергетики в нашей стране предусматривает создание замкнутого топливного цикла, которое невозможно без применения реакторных установок (РУ) на быстрых нейтронах. Положительный опыт эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БН-600 и БН-800 послужил основой для разработки нового поколения РУ – БН-1200М. С целью повышения эффективности эксплуатации и конкурентоспособности в проекте новой реакторной установки применены инновационные конструкторские решения, осуществлен переход от секционно-модульной конструкции парогенератора (ПГ) к корпусной, при которой процессы испарения воды и перегрева пара совмещены в едином модуле. Изменение конструкции парогенератора, наряду с повышением температуры эксплуатации и увеличением расчетного срока службы делают невозможным применение конструкционных материалов, используемых для ПГ РУ БН-600 и БН-800. Там образом актуальность работы А. С. Кудрявцева не вызывает сомнений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации А. С. Кудрявцева, обеспечивается правильной постановкой задач исследований и комплексным подходом, направленным на их решение. В рамках логически построенной структуры работы автор последовательно приходит к выводу о необходимости разработки

разработчиного материала для ПГ РУ БН-1200М, обосновывает класс конструкционных материалов, максимально отвечающий предъявляемым к материалам ПГ требованиям, на базе аналитических и расчетно-экспериментальных исследований разрабатывает химическую композицию новой марки стали и технологию изготовления требуемого для ПГ сортамента заготовок из неё, экспериментально обосновывает работоспособность новой марки стали в условиях эксплуатации ПГ РУ БН-1200М.

Результаты исследований прошли успешную промышленную апробацию в условиях промышленного производства отечественных металлургических предприятий, опубликованы автором в научных трудах и обсуждались на научных конференциях.

Достоверность и научная новизна

Достоверность представленных результатов обеспечена воспроизводимостью полученных с использованием стандартных и специально разработанных методик исследований данных, применением современного оборудования и успешной промышленной апробацией разработанных рекомендаций.

К основным положениям научной новизны представленной диссертационной работы следует отнести:

1. Химическую композицию новой марки стали комплексно легированную углеродом, азотом, хромом, никелем, марганцем, ванадием, ниобием, молибденом и бором, разработанную для обеспечения требуемого уровня служебных характеристик в условиях эксплуатации корпусного парогенератора РУ БН-1200М.

2. Требуемый уровень прочности стали марки 07X12НМФБ достигается за счет легирования азотом в пределах от 0,04 мас. % до 0,06 мас. %, который обеспечивает формирование после окончательной термической обработки нитридов и карбонитридовванадия размером (5–10) нм, являющихся эффективными барьерами, тормозящими перемещения дислокаций и границ субзерен.

3. Деформируемость стали марки 07X12НМФБ при горячем пластическом переделе обеспечивается введенным в требование к химическому составу ограничением по отношению хромового к никелевому эквиваленту 3,1.

4. При отпуске после закалки длительностью менее 10 ч возможно охрупчивание стали марки 07X12НМФБ в результате образования метастабильных частиц легированного цементита.

5. Ускоренное разрушение стали марки 07X12НМФБ при температуре 600 °С и выше связано с образованием частиц фазы Лавеса размером более

1 мкм, а также растворением карбонитридов ванадия при формировании Z-фазы.

6. В зоне термического влияния сварного соединения стали марки 07X12НМФБ в процессе термического цикла сварки образуется обедненный мартенсит, который после отпуска превращается в практически равновесный феррит, что приводит к снижению длительной прочности сварного соединения.

Значимость результатов диссертации для науки и практики

Результаты, полученные в диссертационной работе, расширяют область знаний о фазовых превращениях в процессе термического старения стали аустенитного и перлитного классов и их влияния на механические свойства. Несомненный научный и практический интерес представляют результаты исследования деформируемости хромистой стали мартенситного класса в процессе горячего передела, установленные закономерности обеспечили успешное промышленное освоение стали марки 07X12НМФБ в широком сортаменте полуфабрикатов, необходимых для изготовления парогенератора РУ БН-1200М.

Применение новой марки стали 07X12НМФБ обеспечило переход от секционно-модульной конструкции парогенератора РУ БН, при которой процессы испарения воды и перегрева пара разнесены по отдельным модулям к корпусной, совмещающей оба эти процесса в едином модуле, что в конечном счете обеспечило снижение удельной металлоемкости ПГ РУ БН-1200М до 3 раз (по сравнению с ПГ РУ БН-800) при одновременном увеличении срока службы до 240 000 ч и температуры эксплуатации до 527 °С.

Выполненное в работе исследование механизма снижения длительной прочности сварных соединений стали марки 07X12НМФБ не только раскрывает природу этого явления, но и определяет направление дальнейших работ по его минимизации.

Полученные при оценке работоспособности стали марки 07X12НМФБ в условиях эксплуатации ПГ РУ БН свойства имеют исключительное практическое значение при проектировании и обоснования конструкции различного теплообменного и котельного оборудования.

Оценка содержания диссертационной работы, её завершенности

Диссертационная работа А. С. Кудрявцева изложена на 323 страницах, состоит из введения, 7 глав, выводов и 2 приложений. Диссертация содержит 306 рисунков и 36 таблиц. Списка используемой литературы включает 159 источников.

Во введении обоснована актуальность тематики диссертационного исследования, определена цель работы и сформулированы задачи, обеспечивающие её выполнение. Раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена анализу условий эксплуатации парогенератора РУ БН-1200М, сформулированы требования, предъявляемые к конструкционному материалу.

Во второй главе приведены исследуемые материалы, методики исследования и применяемое оборудование. Следует отметить, вовлечение в исследование большого количества материалов, как лабораторного, так и промышленного изготовления, в том числе материала прошедшего эксплуатацию в составе парогенератора реакторной установки БН-600, а также применение современных методов исследования структуры материалов и физических свойств.

В третьей главе на основании полученных результатов исследования повреждения стали марок 10X2М, 10X18Н9 и 08X16Н11М3 после эксплуатации в составе оборудования ПГ РУ БН-600, выработавшего назначенный срок службы, однозначно установлена необходимость разработки нового конструкционного материала для ПГ РУ БН-1200М.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена выбору класса конструкционного материала и разработке химической композиции новой марки стали. Диссертант на базе выполненного анализа соответствия специфических свойств конструкционных материалов различных классов требованиям, предъявляемым к материалам ПГ, обоснованно установил целесообразность применения хромистых сталей мартенситного класса для изготовления парогенератора, совмещающего в едином корпусе процессы испарения воды и перегрева пара, реакторной установки на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. В результате обобщения литературных данных и выполненных экспериментальных исследований разработана новая марка стали 07X12НМФБ, при этом созданная химическая композиция ориентирована на обеспечение требуемого для ПГ РУ БН-1200М уровня служебных характеристик.

В пятой главе приводятся результаты исследований, направленных на разработку технологии изготовления заготовок из стали марки 07X12НМФБ в требуемом для парогенератора РУ БН-1200М сортаменте. Для обеспечения бездефектной горячей пластической деформации стали марки 07X12НМФБ автором разработан и введен в обязательные требования к химическому составу стали критерий, учитывающий соотношение феррито и аустенитостабилизирующих элементов – $Cr_{\text{ЭКВ}}/Ni_{\text{ЭКВ}} \leq 3,1$. Разработан режим

окончательной термической обработки, обеспечивающий удовлетворительный уровень сопротивления стали хрупкому разрушению и высокий уровень механических свойств. Разработанные технологические режимы успешно прошли промышленную апробацию на отечественных металлургических предприятиях в процессе изготовления заготовок из стали марки 07X12НМФБ в требуемом для ПГ сортаменте: кованных заготовок массой до 13 т, листового проката в толщинах от 1 до 180 мм, холоднокатаных и горячепрессованных труб.

Шестая глава диссертации содержит результаты исследований, убедительно доказывающих работоспособность стали марки 07X12НМФБ в условиях эксплуатации парогенератора РУ БН-1200М. Получены механические свойства стали как в исходном состоянии, так и после теплового старения, имитирующего эксплуатационные режимы. Определена максимально допустимая температура применения стали марки 07X12НМФБ. Подтвержден высокий уровень коррозионной стойкости материала, в том числе стойкость против хлоридного и щелочного растрескивания. Установлена природа снижения длительной прочности сварных соединений из стали марки 07X12НМФБ, определен коэффициент, учитывающий это явление.

В седьмой главе приведена информация о внедрении результатов диссертационной работы, имеющих большое практическое значение как для металлургической промышленности, так и для применения новой марки стали на объектах использования атомной энергии. Сталь марки 07X12НМФБ принята в качестве основного материала парогенератора Н-532 РУ БН-1200М на этапе технического проекта.

Заключение подводит итог выполненной работы, приведенные выводы обоснованы и полностью соответствуют поставленным задачам и результатам исследования.

Диссертация А. С. Кудрявцева представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, оформленную на должном уровне в соответствии с предъявляемыми требованиями.

По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, получено 2 патента РФ. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертационной работе:

1. В ходе разработки технологии изготовления заготовок из стали марки 07X12НМФБ выполнено детальное исследование режима окончательной термической обработки на структуру и свойства стали, при этом в работе никак

не отражены вопросы, связанные с предварительной (противофлокенной) термической обработкой.

2. В работе приводятся результаты исследования термического старения на механические свойства и структуру стали марки 07X12НМФБ, однако отсутствует оценка влияния структурных изменений в стали на её коррозионную стойкость.

3. При изготовлении парогенератора отдельные его узлы из стали марки 07X12НМФБ могут проходить многократную послесварочную термическую обработку, при этом данных по влиянию послесварочного отпуска на свойства стали в работе не приведено.

4. Испытания на статическую трещиностойкость проводились в диапазоне температур от минус 50°С до 20°С. При более высоких температурах оценочные значения трещиностойкости предполагается определять расчетным методом. Было бы целесообразно провести прямые лабораторные испытания на статическую трещиностойкость при более высоких температурах вплоть до максимальной, также провести испытания металла ЗТВ на трещиностойкость для некоторых типичных сварных соединений.

5. Диссертантом проделана большая работа по исследованию повреждения и старения материалов, эксплуатирующихся в составе ПГ. Проведены исследования характеристик новой стали, направленные на подтверждение работоспособности материала применительно к условиям эксплуатации ПГ РУ большой мощности. Однако нет данных об усталостной прочности разработанной стали и ее разрушении при термоциклическом нагружении.

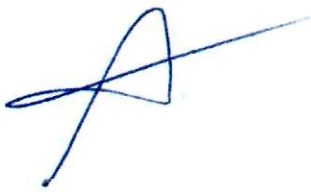


Обозначенные замечания не снижают научную ценность и практическую значимость полученных в диссертации результатов.

Заключение

Диссертационная работа Кудрявцева Алексея Сергеевича выполнена на высоком научно-техническом уровне и является законченным научно-квалификационным трудом. Изложенные в работе технологические решения и разработки, имеют существенное значение для совершенствования технологии производства жаропрочных хромистых сталей, а разработанная сталь марки 07X12НМФБ вносит весомый вклад в развитие технологии быстрых натриевых реакторов.

По актуальности исследования, научной новизне и практической значимости результатов, а также их прикладному использованию 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.

<p>Официальный оппонент доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем машиностроения РАН - филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПМ РАН)</p>	 <p>Мишакин Василий Васильевич</p>
<p>Белинского ул., д. 85, Нижний Новгород, 603024. Институт проблем машиностроения РАН. Рабочий телефон: +7(831)4322159 Электронная почта: ndt@ipmran.ru</p>	
<p>Подпись Мишакина Василия Васильевича заверяю. Заместитель директора ИПМ РАН, доктор физ.-мат. наук</p>	 <p>Павлов И.С.</p>

Одобрено
08.02.2024

