

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



"Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина"

ГНЦ ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина"

105005 г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2
Тел.: +7 (495) 777-93-01; факс: +7 (495) 777-93-00
e-mail: chermet@chermet.net
www.chermet.net

« 06 » 09 2008 год № 3193-4/16
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ:

Первый заместитель генерального
директора
Государственного научного центра
Федерального государственного
унитарного предприятия «Центральный
научно-исследовательский институт
черной металлургии им. И.П. Бардина»,
к.т.н.



Г.Н. Еремин

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Николаевой Натальи Сергеевны, представившей диссертацию «Оптимизация структурно-фазового состояния ферритно-мартенситных сталей в процессе термической обработки в технологическом цикле производства оболочечных труб» на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Актуальность диссертационной работы

В действующих реакторах на быстрых нейтронах в качестве материала оболочек твэлов используют аустенитные стали. Однако, достижение перспективных эксплуатационных параметров топлива в таких реакторах сегодня лимитируется, в основном, радиационным распуханием материала оболочек твэлов, а именно используемыми аустенитными сталями. Экспериментально установлено, что стали ферритно-мартенситного класса обладают высокой стойкостью к радиационному распуханию в широком

диапазоне повреждающих доз, и рассматриваются основным конструкционным материалом для оболочек твэлов, например, БН-1200.

Представленная работа посвящена исследованию оболочечных труб из 12 % хромистых ферритно-мартенситных сталей ЭК181 и ЧС139 применительно к обоснованию и обеспечению их промышленного производства. Освоение производства оболочечных труб, в частности разработка заключительной термической обработки, – один из основных этапов достижения требуемого комплекса физико-механических характеристик, необходимых для последующего научно-технического обоснования применения сталей ЭК181 и ЧС139 в качестве оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах.

Актуальность представленной работы определяется перспективой применения ферритно-мартенситных сталей в качестве оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах для повышения эффективности и безопасности топливного цикла активной зоны.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Изложена на 151 странице, содержит 100 рисунков, 20 таблиц, 126 источников в списке литературы, 3 приложения с актами об использовании и практическом применении результатов диссертационной работы.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ научно-технической литературы по результатам исследования структуры и свойств 9-12 % хромистых ферритно-мартенситных сталей до и после облучения. Рассмотрены способы

повышения структурной стабильности и механических свойств ферритно-мартенситных сталей. Выявлено, что перспективным способом повышения длительной прочности сталей является термомеханическая обработка. При этом данная обработка является актуальной при производстве оболочечных труб из ферритно-мартенситных сталей только на этапе подготовки трубной заготовки и гильзы. Производство особотонкостенных труб для оболочек твэлов должно обеспечить получение труб с высокой точностью заданных размеров и высоким качеством наружной и внутренней поверхностей. На сегодняшний день, это реализуемо при использовании в технологическом цикле операций холодной деформации в сочетании с оптимальной термической обработкой.

Во второй главе описаны материалы и методы их исследования. Материалами исследования послужили передельные и готовые трубы различных типоразмеров из ферритно-мартенситных сталей 16X12B2ФТaP (ЭК181) и 20X12НМВБФАР (ЧС139), изготовленные из трубных заготовок промышленных плавок. Структурные исследования проводились с применением оптической, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии. В качестве экспрессных методов оценки прочностных свойств использовались измерения микротвердости по методу Виккерса. Испытания на кратковременные механические свойства проводились на двух типах образцов – трубчатых и кольцевых. Использование кольцевых образцов позволяют сопоставить данные дореакторных и послереакторных исследований механических свойств оболочечных труб. Испытания на длительную прочность и термическую ползучесть в исходном состоянии проводились на трубчатых образцах и специальных поперечных микрообразцах.

Третья глава посвящена исследованиям структурно-фазового состояния и комплекса механических свойств оболочечных труб из сталей ЭК181 и ЧС139, изготовленных с применением различных технологий

закалки – стандартной технологии в камерной печи «VSQ» и технологии скоростной закалки на установке форсированного нагрева «Атон». Установлено, что полученная дисперсная структура и фазовый состав стали с повышенным содержанием тугоплавких элементов, сформированные в результате скоростной закалки и последующего отпуска, позволяют повысить кратковременные и длительные механические свойства оболочечных труб при максимальных рабочих температурах 670 и 700 °С. По результатам исследований структурно-фазового состояния стали обоснован выбор режимов термической обработки, и использование на заключительной стадии производства оболочечных труб закалки на установке «Атон». В главе также представлены результаты исследования структурно-фазового состояния стали и механических свойств образцов труб из сталей ЭК181 и ЧС139 после длительного термического старения при 450-700 °С. Оценена структурная стабильность материала труб на максимальной временной базе 19000-22000 ч.

В четвертой главе представлены результаты промышленного освоения и технологические особенности производства оболочечных труб. Структурно обоснованы и предложены к реализации режимы термической обработки (режим промежуточного отжига, способ и режим закалки, режим отпуска) в термодформационных циклах изготовления опытных партий оболочечных труб четырех типоразмеров ($\varnothing 6,9 \times 0,4$ мм, $\varnothing 9,3 \times 0,6$ мм, $\varnothing 9,3 \times 0,5$ мм и $\varnothing 10,5 \times 0,5$ мм) из сталей ЭК181 и ЧС139 на базе АО «МСЗ».

В пятой главе представлены результаты исследования по облучению сталей ЭК181 и ЧС139. При изготовлении комплектующих деталей экспериментальных твэлов с нитридным уран-плутониевым топливом облучательного устройства реактора БОР-60 и трубчатых образцов материаловедческой сборки реактора БН-600 использованы трубы $\varnothing 6,9 \times 0,4$ мм из сталей ЭК181 и ЧС139, изготовленные с применением технологии скоростной закалки на установке «Атон».

Представлены данные по кратковременным механическим свойствам оболочек твэлов после облучения в реакторе БОР-60. Показано, что при температуре облучения 350-460 °С происходит упрочнение материала оболочек твэлов. При этом оболочки твэлов из сталей ЭК181 и ЧС139 показали наличие запаса пластичности в низкотемпературном интервале.

Результаты исследования образцов из стали ЧС139 после облучения в реакторе БН-600 показали, что в области максимальной повреждающей дозы ~135 сна при температурах 450-460 °С, распухание стали не превышает 0,1 %. Особенности структурно-фазового состояния стали ЧС139 обеспечивают сохранение высокого уровня механических свойств после облучения при исследованных дозо-температурных параметрах. При комнатной температуре испытания предел прочности стали после облучения при 600°С до ~130 сна снижется на 10 % по сравнению с исходным состоянием.

Работа хорошо оформлена, материал изложен логично и понятно, наглядно иллюстрирован. Стиль написания работы – научный. Внимательный подход соискателя к оформлению материала свидетельствует о соответствующем подходе и к выполнению всей научно-квалификационной работы в целом.

Оценивая **научную новизну** работы, отмечаем следующие основные положения:

- Для оболочечных труб из 12 % хромистых сталей ЭК181 и ЧС139, отличающихся системой легирования, в зависимости от способа термической обработки в технологическом цикле производства определены структурные характеристики матрицы, размер и состав карбидных фаз, структурная стабильность и комплекс функциональных свойств. Установлена взаимосвязь параметров закалки, структуры и свойств оболочечных труб.

- Показаны преимущества структурно-фазового состояния стали при применении скоростных нагрева и охлаждения при закалке оболочечных

труб из ферритно-мартенситных сталей ЭК181 и ЧС139 в термомеханическом цикле производства. Установлено, что применение скоростных режимов закалки приводит к измельчению структурных составляющих (размер зерна, мартенситных пакетов, ширина мартенситных реек, размер карбидов типа $M_{23}C_6$) и изменению состава карбидов типа $M_{23}C_6$ в сторону увеличения в них тугоплавких элементов W, Mo, что обеспечивает повышение кратковременные и длительные механические свойства оболочечных труб при максимальных рабочих температурах 670 и 700 °С.

- Установлено, что высокая термическая стабильность труб из сталей ЭК181 и ЧС139 при температурах 450 и 550 °С, выдержка до 19000 ч достигается за счет малой скорости распада пересыщенного твердого раствора и сохранения структурных параметров сталей, в частности, размера карбидов типа $M_{23}C_6$ и бывших мартенситных реек, на исходном уровне. Структурная стабильность сталей при температурах 650 и 700 °С, выдержка до 19000-22000 ч определяется снижением их прочностных характеристик, что происходит в результате активизации процессов формирования субзеренной структуры и коагуляции карбидов типа $M_{23}C_6$ во всем временном интервале старения, начиная с выдержки 1000 ч.

- Показано, что радиационная стойкость стали ЧС139 после облучения при 600 °С в реакторе БН-600 характеризуется высоким уровнем прочностных свойств оболочечных труб за счет образования в структуре дислокационных стенок, радиационно-индуцированных пор размером 1-3 нм, дисперсных карбонитридных фаз нанометрического размера и выделения радиационно-индуцированной χ -фазы, имеющей переменный состав (Cr-Mo-Ni-Si-W-N). Пластичность стали сохраняется на удовлетворительном уровне. Радиационное распухание стали ЧС139 после облучения при температуре 450-460 °С до повреждающей дозы ~135 сна не превышает 0,1 %.

Практическая значимость подтверждена актами об использовании и практическом применении результатов диссертационной работы и состоит в следующем:

- Рекомендованные режимы закалки труб на установке форсированного нагрева «Атон» внедрены в производственный процесс изготовления особотонкостенных оболочечных труб из ферритно-мартенситных сталей ЭК181 и ЧС139 в АО «МСЗ», и обеспечивают равномерность структуры и свойств по всей длине трубы и от одной трубы в партии к другой, что определяет стабильность качества трубной продукции.

- Изготовленные трубы $\varnothing 6,9 \times 0,4$ мм из сталей ЭК181 и ЧС139 использованы в качестве оболочек экспериментальных твэлов с нитридным уран-плутониевым топливом и облучены без замечаний в реакторе БОР-60.

- Разработана Методика № 320.635.001М определения величины зерна сорбита особотонкостенных холоднодеформированных труб из ферритно-мартенситных сталей ЭК181, ЧС139, которая была распространена на другие марки сталей ферритно-мартенситного класса (ЭП823 и ЭП450) и внедрена в процесс контроля качества изготавливаемой продукции (8009.00.043 ТУ, 8009.00.020 ТУ, 8009.00.028 ТУ).

- Полученные данные по механическим свойствам оболочечных труб из сталей ЭК181, ЧС139 использованы при разработке технического проекта на твэл типа БН-1200М.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением аттестованных методик исследований с использованием современного научно-исследовательского оборудования, отсутствием научных противоречий с результатами работ отечественных и зарубежных авторов.

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации. Основные этапы работы, выводы и результаты в достаточном объеме представлены в автореферате. Публикации (6 статей в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК и Scopus/web of science) в полной мере отражают содержание

работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийских и Международных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

По содержанию диссертации и автореферата следует отметить следующие замечания:

1. В таблице 3.7 диссертационной работы не указана скорость установившейся ползучести для труб, изготовленных по технологии «VSQ».

2. Учитывая важность вклада выделяющейся в процессе длительных выдержек фазы Лавеса и ее влияния на механические свойства, в частности, длительную прочность, полезно установить температурный интервал и время начала ее выделения.

3. В работе не достаточно подробно исследовано структурно-фазовое состояние в термдеформационном цикле на промежуточных этапах деформации и термической обработки труб.

Заключение

Отмеченные замечания не снижают общей ценности диссертации, которая является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится комплекс экспериментальных результатов и особенности промышленного освоения труб из сталей ЭК181 и ЧС139, необходимых для обоснования использования этих сталей в качестве оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах.

В целом, представляемая диссертационная работа по своему теоретическому и экспериментальному уровню, объему работы, актуальности, научной новизне и практической значимости полученных результатов соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС», предъявляемым к диссертациям на соискание

присуждения учёной степени кандидата наук, а ее автор, Николаева Наталья Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 - «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

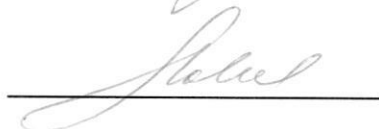
Отзыв на диссертационную работу и автореферат Николаевой Натальи Сергеевны заслушан и обсужден на заседании Научно-технического совета Научного центра качественных сталей и Центра сталей для труб и сварных конструкций ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» 16 августа 2023 г. (протокол № 4).

Директор Научного центра
качественных сталей
ГНЦ ФГУП "ЦНИИчермет им.
И.П. Бардина", д.т.н., профессор



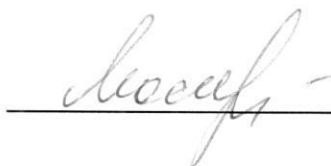
Г.А. Филиппов

Начальник лаборатории сталей и
сплавов для атомной энергетики
(КС-3), к.т.н.



О.В. Новичкова

Ученый секретарь ГНЦ ФГУП
"ЦНИИчермет им. И.П. Бардина"
к.т.н.



Т.П. Москвина



Данные о ведущей организации:

Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» (ГНЦ «ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»)

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр.2

тел.: +7(495)777-93-01, эл. почта: chermet@chermet.net