

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ГНЦ РФ АО «НПО



В.В. Орлов

«09» ноября 2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ткачёва Евгения Сергеевича на тему
**«Влияние микроструктуры и дисперсных частиц на ползучесть стали
10X9K3B2HMAФБР с повышенным содержанием бора»** представленную на
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы исследования

Высокохромистые стали мартенситного класса являются традиционным материалом для изготовления ответственных компонентов парового контура энергоблоков теплоэлектростанций, работающих на сжигании угля. В последние десятилетия разработка новых модификаций жаропрочных сталей позволила существенно повысить энергоэффективность вводимых в эксплуатацию энергоблоков. Одним из наиболее перспективных путей дальнейшего улучшения жаропрочности сталей данного класса является применение легирования, направленного на обеспечение стабильности вторых фаз, которые в значительной мере определяют сопротивление ползучести при длительной эксплуатации при повышенных температурах. В этой связи диссертационная работа Ткачёва Е.С., которая посвящена исследованию влияния микроструктуры и дисперсных частиц на ползучесть 9%Cr стали с повышенным содержанием бора и пониженным содержанием азота, является весьма актуальной.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа изложена на 148 страницах, включает введение, 6 глав, основные выводы, список публикаций автора по теме исследования и список литературы из 137 наименований.

Во введении представлены сведения об актуальности темы исследования, цели, применяемых в работе методах исследования, научной новизне, практической значимости, количестве публикаций по теме диссертации и апробации работы, определены положения, выносимые на защиту.

В первой главе описана область применения высокохромистых сталей мартенситного класса, особенности микроструктуры, включая описание вкладов различных механизмов упрочнения. Особое внимание уделено анализу причин деградации исходной структуры данных сталей под воздействием ползучести. В соответствии с анализом литературных источников установлены задачи исследования.

Во второй главе описан материал исследования (сталь 10X9K3B2HMAФБР) и режим его термической обработки. Представлены экспериментальные методы и методики, используемые в диссертационной работе.

В третьей главе приведены результаты исследования отпуска на изменения микроструктуры и механических свойств стали. Произведен термодинамический расчет равновесного фазового состава стали с использованием программы ThermoCalc. Выполнен анализ влияния температуры отпуска на структуру стали с использованием методов растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Установлен комплекс механических свойств стали (твердость, ударная вязкость, свойства при растяжении) после отпуска при температурах от 20 до 780°C. Проведен анализ фрактографии поверхности разрушения образцов после испытаний на ударную вязкость.

В четвертой главе изучена эволюция микроструктуры исследуемой стали 10X9K3B2HMAФБР в процессе ползучести. С использованием анализа картин дифракции обратно-рассеянных электронов получены распределения угловых разориентировок межкристаллитных границ и обратные полюсные фигуры для исследуемой стали в исходном состоянии и на различных стадиях ползучести. Представлена модель, описывающая стадийность трансформации реечной структуры троостита отпуска в равноосную субзеренную в условиях ползучести. Детально описаны характеристики частиц вторых фаз в рассматриваемой стали в сопоставлении со схожими по химическому составу сталями P92 и P92+3%Co.

В пятой главе представлены результаты исследования сопротивления ползучести стали 10X9K3B2HMAФБР в области высоких и низких приложенных напряжений. Установлена связь изменения сопротивления ползучести при переходе от краткосрочных испытаний к длительным с изменением в размерах и распределении частиц вторых фаз и их влиянием на

исходную реечную структуру. Предложена теоретическая модель, описывающая укрупнение зернограницных частиц под воздействием деформации при ползучести.

Шестая глава посвящена исследованию возможности применения исследуемой стали в качестве присадочного материала при сварке схожих по химическому составу сталей мартенситного класса. Описан процесс получения сварного соединения с использованием исследуемой стали, исследована микроструктура и установлены механические свойства металла в различных зонах сварного шва. Представлены результаты испытаний на длительную прочность полученного сварного шва. С использованием методики расчета сил, тормозящих миграцию межкристаллитных границ, выявлены причины повышенного сопротивления ползучести металла в зоне сплавления.

В качестве наиболее важных научных результатов диссертационной работы, определяющих ее новизну, следует отметить следующие:

1. Выявлено, что в стали 10X9K3B2HMAФБР при отпуске при температуре 750°C выделяется только около 50% от равновесного удельного объема частиц карбида $M_{23}C_6$, а их довыделение происходит в дальнейшем при ползучести.
2. Понижение содержания азота до 0,007% вес. в 9%Cr стали позволяет существенно замедлить трансформацию дисперсных частиц карбонитридов типа MX в нитрид Z-фазы, тем самым предотвращая разупрочнение стали вызванное данным процессом при длительной ползучести.
3. Показано, что трансформация реечной структуры троостита отпуска в равноосную субзеренную при ползучести происходит в две стадии. На первой стадии слияние реечных границ приводит к формированию протяженных кристаллов внутри отдельных блоков. На второй стадии, под воздействием деформации при ползучести, происходит формирование относительно равноосных субзерен.
4. Предложена теоретическая модель, описывающая укрупнение частиц, расположенных на границах зерен, при одновременном действии зернограницной и трубочной диффузии.
5. Показано, что в стали 10X9K3B2HMAФБР переход от кратковременной ползучести к длительной сопровождается изменением механизмов деформации на различных стадиях ползучести, что связано с процессами выделения и укрупнения дисперсных частиц вторых фаз.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выносимые на защиту, и полученные в работе выводы представляются обоснованными, поскольку они базируются на применении современных взаимодополняющих апробированных методов исследований структуры и определения механических свойств металлических материалов, признанных отечественной и зарубежной научной общественностью, прошли обсуждения на российских и международных научных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК и входящих в международные базы цитирования WOS и Scopus.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных методов исследования структуры и свойств металлических материалов, таких как оптическая металлография, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, анализ картин дифракции обратно рассеянных электронов. Исследование механических свойств, включая испытания на растяжение и на ползучесть, определение твердости, ударной вязкости проводилось по соответствующим ГОСТам. Полученные результаты хорошо согласуются между собой и не противоречат существующим представлениям в современном физическом металловедении.

Практическая значимость полученных автором результатов

Установленные в диссертационной работе закономерности изменения микроструктуры и механических свойств в 9%Cr стали мартенситного класса, дополнительно легированной бором, позволили разработать и защитить патентом сталь, обладающую повышенной жаропрочностью (патент RU2655496) и запатентовать технологию термомеханической обработки исследуемой стали, обеспечивающей повышение долговременной прочности (патент RU2688017).

Результаты диссертационной работы могут представлять интерес для ряда производственных и научно-технических предприятий, занимающихся разработкой и/или внедрением новых модификаций теплотехнических сталей, среди которых следует отметить АО «НПО «ЦНИИТМАШ»; ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ», ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», АО «Силовые машины». Полученные результаты так же могут быть использованы техническими институтами, занимающимися исследованием данного класса

сталей, среди которых можно выделить ЦНИИчермет имени И. П. Бардина и Всероссийский теплотехнический институт (ОАО ВТИ).

Замечания по диссертационной работе

1. Содержание работы не позволяет понять о целевой области применения исследуемого материала 10Х9КЗВ2НМАФБР. Как предполагается использовать материал: как основной (трубопроводы/котельное оборудование) или как сварочный?
2. В выводах к разделу 1 ставятся задачи по получению сварных соединений листов стали 11Х9МВФБР с использованием присадочной проволоки из стали 10Х9КЗВ2НМАФБР, в то же время в разделе 1 тема сварки и проблемы качества сварных соединений никак не освещены.
3. Отсутствуют фактические данные о содержании азота в металле сварного шва. С учетом высокого сродства к азоту высокохромистых сталей, вполне вероятно повышение содержания азота в металле сварного шва до значений на уровне основного металла. В связи с чем, эффективность использования проволоки с низким содержанием азота не представляется практичным.
4. В практической значимости говорится о том, что на основе выявленных закономерностей были выполнены разработки, которые легли в патенты RU 2655496 и RU 2688017. Необходимо дать пояснения, каким образом результаты диссертационной работы легли в основу данных РИД, с учетом того, что патент RU 2655496 распространяется на материалы с содержанием хрома от 10.5% до 12.0%, также имеются отличия по содержанию никеля, марганца, кобальта, отличающиеся от исследуемой марки стали.
5. Следовало более полно осветить технологические вопросы получения исследуемого материала: шихтовые материалы, развес слитка.
6. Выбор термообработки образцов для испытания на ползучесть был основан на каких результатах исследований? Тех исследований, которые проводились в рамках работы или просто как «ТО, применяемой для большинства котельных сталей» (раздел 2.1)?
7. Работа содержит неточности в формулировках и вопросы к терминам и обозначениям:
 - а. В описании актуальности работы (во введении к диссертации) говорится, что «возможность повышения температуры эксплуатации сталей мартенситного класса на 100°С и более до недавнего времени», при этом не говорится относительно какого уровня температур эта возможность рассматривается? Если говорить о современных сталях мартенситного класса, введенных в нормативные документы на проектирование и изготовление котельного и паропроводного оборудования, уже известны материалы, обеспечивающие температуру эксплуатации на ресурс блока – до 620°С, а из научной литературы в

качестве предельной температуры применения мартенситных сталей рассматривается 650°C.

б. Используется не вполне корректное обозначение марки стали 10X9K3B2HMAФБР: согласно примененному обозначению сталь легирована азотом («А»), в то же время согласно таблице 3.1 в Диссертации – содержание азота ограничено на уровне 0.007%, что не позволяет считать его основным легирующим элементом, с учетом того, что в заключении к диссертации также говорится о намеренном снижении содержания азота.

8. Из текста неясно на скольких плавках материала 10X9K3B2HMAФБР проводились исследования, и какими технологическими приемами лимитировалось содержание азота на уровне 0.007%.

Отмеченные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертационной работы и не снижают ее научной и практической ценности.

Заключение

Диссертационная работа Ткачёва Евгения Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук представляет собой законченное исследование, в котором получены новые результаты, которые в совокупности представляют собой решение важной научной проблемы, имеющей значение для развития современного физического металловедения сталей. Содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации. Материалы диссертационной работы полно отражены в 9 статьях в журналах из списка ВАК и представлены в материалах конференций. На основе полученных результатов было получено 2 патента РФ (RU № 2655496 от 28.05.2018; RU № 2688017 от 19.07.2018).

Представленная работа соответствует паспорту специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов:

- в части формулы специальности п. 2 «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях»,
- в части формулы специальности п. 3 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов»,
- в части формулы специальности п. 7 «Изучение взаимодействия металлов и сплавов с внешними средами в условиях работы различных технических устройств, оценка и прогнозирование на этой основе работоспособности металлов и сплавов».

Таким образом, по актуальности и объему выполненных исследований, новизне, достоверности, научной и практической значимости полученных результатов и выводов диссертационная работа Ткачёва Е.С. «Влияние микроструктуры и дисперсных частиц на ползучесть стали 10Х9К3В2НМАФБР с повышенным содержанием бора» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете "МИСиС", а ее автор Ткачёв Евгений Сергеевич заслуживает присуждение ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Диссертационная работа была рассмотрена на заседании научно-технического совета института материаловедения АО «НПО «ЦНИИТМАШ» 09.11.2020.

Заместитель генерального директора
– директор Института материаловедения
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»,
кандидат технических наук



В.Н. Скоробогатых

115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4

<https://cniitmash.com/>

cniitmash@cniitmash.com

тел.: +7 (945) 675-83-02