

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Голубевой Марины Васильевны

«Хладостойкая свариваемая сталь класса прочности 690 для тяжелонагруженной техники», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Актуальность темы диссертации

Одним из крупнейших потребителей конструкционных материалов сегодня является автомобилестроение, при этом ведущую роль в нем продолжает играть стальной прокат. Конкуренция между производителями стимулирует постоянный рост требований к материалам, в частности, к уровню их прочности. Однако достижение требуемого комплекса механических свойств в высокопрочных сталях требует решения комплекса сложных проблем: определения и разработки оптимальных химического и фазового состава, микроструктуры стали, технологических параметров ее производства. В последнее время активно ведутся работы по созданию высокопрочных сталей экономного легирования с низким содержанием углерода, так как данные стали используются в сварных конструкциях. Наряду с этим необходимо учитывать, что требуемая прочность в стали достигается за счет управления структурой и свойствами сталей посредством введения микродобавок и легирующих элементов, а также варьирования температур деформационной и термической обработки.

В этой связи актуальность диссертационной работы Голубевой М.В., определяемая потребностью в экономнолегированной высокопрочной свариваемой стали для развития тяжелонагруженной техники, в частности, для самосвалов БЕЛАЗ не вызывает сомнений. При этом автору было важно учесть требования завода-производителя по толщине проката (до 50 мм), механическим свойствам, в частности, по пределу текучести не менее 690 МПа и ударной вязкости при температуре испытаний минус 70 °С не менее 35 Дж/см² и, главное, – к ограничению уровня углеродного эквивалента ($C_{\text{жв}}$), что и явилось основной проблемой при разработке новой стали.

Структура и анализ диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 186 страницах, включает введение, семь глав, заключение, список литературы, состоящий из 127 источников, четыре приложения, в которых, в частности, представлен акт внедрения результатов диссертационной работы, 63 рисунка и 19 таблиц.

Федеральное государственное учреждение «Научно-исследовательский институт» ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 3437	в ДЕЛО
14.11.2019 г.	№
Осн. 6 л.	подп.

Актуальность, цели и задачи работы представлены **во введении**. Здесь же описаны объект и предмет исследований. Приводятся основные положения, вынесенные на защиту.

Первая глава представляет собой довольно тщательный обзор научно-технической литературы, в котором проанализированы химические составы и технологии производства существующих высокопрочных марок сталей, основные способы повышения прочностных характеристик при сохранении высоких вязкопластических свойств вне зависимости от уровня легирования. На основании проведенного анализа сформулирована постановка задачи диссертационной работы.

Во второй главе автор приводит исследуемые в работе химические составы стали, описывает используемые методы исследований: анализ фазовых превращений, определение размера исходного зерна, структурных исследований и механических испытаний (в том числе, при низких температурах), испытания на свариваемость. Такой комплекс подход позволяет в полной мере оценить качество созданного материала и его сварных соединений. Следует отметить, что основная часть методов касается структурных исследований – оптическая и электронная микроскопия (растровая, просвечивающая и сканирующая), EBSD-анализ, также в работе использовался метод атомно-зондовой томографии для исследования процессов отпуска.

Третья глава посвящена выбору оптимального химического состава экономнолегированной стали с требуемым заказчиком уровнем углеродного эквивалента ($C_{\text{ЭКВ}}$) не более 0,53 %, позволяющего получить в листовом прокате толщиной до 50 мм при закалке бейнитно-мартенситную структуру. Выбор произведен на основании анализа результатов исследований фазовых превращений при имитации процесса закалки в стали вышеуказанных химических составов и применительно к технологическим возможностям ПАО «Магнитогорского металлургического комбината» (ПАО «ММК») - в диапазоне скоростей охлаждения от 5 до 50 °C/с, характерных для скоростей охлаждения, реализуемых в листовом прокате.

В четвертой главе показано влияние температуры закалки на структуру, размер зерна и свойства стали. По результатам анализа была определена температура закалки, обеспечивающая формирование в стали бейнитно-мартенситной структуры со средним размером зерна аустенита ~11 мкм. Особое внимание автор уделил изучению влияния температуры окончательной термической обработки (высокого отпуска) на структурные изменения в стали, в большей степени на процессы карбидообразования, с целью обеспечения требуемого комплекса механических свойств.

Показано, что в разработанной стали при температуре отпуска 630 °C начинают интенсивно протекать процессы разупрочнения, и только в диапазоне температур 570 -

600 °С достигается требуемый комплекс механических свойств. Анализ карбидных фаз выполнен с помощью атомно-зондовой томографии. Выбор оптимального времени выдержки при отпуске был осуществлен с применением параметра Холломоны-Яффе. Полученные результаты легли в основу, разработанной с участием автора технологической документации для изготовления листового проката толщиной до 50 мм.

В пятой главе приведен полный технологический процесс изготовления листового проката из разработанной стали марки 09Х1Н2МД на ПАО «ММК». Проанализированы термдеформационные схемы прокатки листов и, в зависимости от конечной толщины, рекомендована одно- или двухстадийная прокатка. Показано, что в листовом прокате формируется однородная бейнитно-мартенситная структура, содержащая до 50 % реечного и до 5 % высокотемпературного мартенсита, а также до 20 % бейнита реечной и до 25 % гранулярной морфологии. Однородность структуры в стали по толщине подтверждена данными EBSD анализа. Такая структура позволяет обеспечить требуемую прочность и высокий уровень ударной вязкости, в том числе после механического старения вплоть до температур минус 80 °С, а также полностью вязкий излом полнотолщинных проб. Все вышеизложенное подтверждает высокое качество разработанного материала и позволяет его рекомендовать для работы в сложных климатических условиях.

Шестая глава содержит результаты оценки качества сварного соединения, полученного электродуговой сваркой в условиях завода-производителя – ОАО «БЕЛАЗ», подтверждающие удовлетворительную свариваемость стали. Оценена возможность применения лазерной сварки для листового проката толщиной до 12 мм на основании анализа влияния высокой скорости нагрева (500 °С/с) на фазовые превращения, размер зерна и структуру при имитации термического цикла сварки на различных участках зоны термического влияния (ЗТВ), а также влияние погонной энергии на ширину ЗТВ, микротвердость и структуру в сварном соединении из разработанной стали, полученном в опытно-экспериментальном производстве, что является новизной данной работы. Показано, что твердость порядка 350 - 400 HV_{0,1} на наиболее опасном участке ЗТВ (крупного зерна) не является препятствием для получения сварного соединения лазерной сваркой, отвечающего всем необходимым требованиям, так как имеет малый размер – не более 0,4 мм.

В седьмой главе представлены сведения о внедрении результатов работы:

- предложен и опробован химический состав новой экономнолегированной стали улучшенной свариваемости, подана заявка на патент № 209120117 от 26.06.2019 г.;

- результат внедрения в производство ПАО «ММК» технической и технологической документации, разработанной с участием автора, оформлен актом внедрения.

Выводы по диссертационной работе сформулированы **в заключении**.

Достоверность полученных результатов определяется значительным объемом проведенных исследований, экспериментальных данных, внедрением результатов работы в производство листового проката на ПАО «ММК» по технологической документации, разработанной на основании проведенных исследований, а также положительными результатами обработки на ОАО «БЕЛАЗ» опытной партии листового проката объемом 250 т. из стали марки 09ХГН2МД.

Характеристика научной новизны

Научная новизна работы не вызывает сомнений и состоит в установлении необходимого соотношения в содержании основных легирующих элементов в стали хром-никель-медь-молибденовой композиции легирования, позволяющего после закалки и высокого отпуска получить однородную бейнитно-мартенситную структуру с высокой плотностью дислокаций в листовом прокате в толщинах до 50 мм. Также определено влияние температуры отпуска на карбидообразование в низкоуглеродистой экономнолегированной стали 09ХГН2МД.

Применение высокоскоростного нагрева, характерного для лазерной сварки, дало возможность получить мелкое зерно аустенита вблизи линии сплавления со средним размером ~ 100 мкм и дисперсной бейнитно-мартенситной структуры на крупнозернистом участке зоны термического влияния, что обеспечило высокие значения ударной вязкости (не менее 100 Дж/см^2) при температуре испытаний до минус 100°C в зоне термического влияния стыкового сварного соединения.

Практическая значимость работы очевидна, что подтверждено прилагаемым к работе актом внедрения в производство ПАО «ММК», а также в обеспечении высокопрочной хладостойкой свариваемой сталью марки 09ХГН2МД предприятий, изготавливающих тяжелонагруженную технику, в частности, ОАО «БЕЛАЗ» - завода-изготовителя карьерных самосвалов большой грузоподъемности.

Замечания по диссертационной работе

1. Содержание марганца в разработанной стали находится в пределах, установленных для примесей (до 0,8 %), что характерно для большинства конструкционных сталей. Содержание ниобия в данной стали, напротив, достаточно велико (0,03 - 0,04 %). В таких концентрациях он вводится в сталь (т.е. является легирующим элементом, точнее микродобавкой), в частности, для повышения уровня

ударной вязкости. В этой связи требуется более подробное обоснование выделения марганца как легирующего элемента в марке стали и отсутствие в этом качестве ниобия.

2. Известно, что для обеспечения хорошей свариваемости величина углеродного эквивалента не должна превышать 0,45 %. В этой связи не совсем понятно, почему устанавливается более высокий уровень предельной величины углеродного эквивалента ($\leq 0,53$ %) (в частности, стр. 41 диссертационной работы). Это допускается для высокопрочных сталей, но при введении дополнительных технологических операций – подогрева, послесварочной термической обработки. Однако автор делает акцент на необходимости отказа от этих мероприятий «...из соображений экономичности и требований к работоспособности и надежности» (стр. 40 диссертационной работы).

3. В работе рассматриваются возможности применения только двух видов сварки – электродуговой и лазерной, однако, что ограничило возможность применения других видов, автор не объясняет, хотя в главе 6 на стр.136 диссертации говорится, что «... в настоящее время весьма перспективно применение более высокопроизводительных методов сварки».

4. Много внимания автором уделяется обеспечению необходимого уровня ударной вязкости при низких температурах. Однако информации о влиянии металлургического качества стали на данный показатель явно недостаточно.

5. Из автореферата выпало описание главы 7 «Внедрение результатов работы», имеющийся акт внедрения, что немаловажно для работ такого рода, упомянут вскользь.

6. Выводы по работе слишком «перегружены». Установленные соотношения концентрации легирующих элементов, температурные режимы термической обработки, сварки, требования к структуре можно было сформулировать отдельно в виде рекомендаций, а выводы сделать лаконичней.

Однако сделанные замечания носят технический, дискуссионный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Голубевой Марины Васильевны является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки.

Основные положения работы представлены и обсуждены на российских и международных научных конференциях, основное содержание работы опубликовано в 15 печатных работах, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, а две публикации изданы на английском языке и индексируются в БД SCOPUS.

Автореферат в достаточной степени отражает основное содержание диссертации.

Работа написана хорошим литературным языком, является законченным научным исследованием, содержащим решение поставленной задачи, весьма актуальна, имеет научную новизну и практическую ценность.

В целом, диссертационная работа Голубевой Марины Васильевны на тему: «Хладостойкая свариваемая сталь класса прочности 690 МПа для тяжелонагруженной техники», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по актуальности, научной новизне, практической и теоретической значимости отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением РФ № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор - Голубева М.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент,

доцент кафедры металловедения и физики прочности

НИТУ «МИСиС»,

кандидат технических наук, доцент

Э.А. Соколовская

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», www.misis.ru

Тел.: 8 (495) 638-4686

E-mail: sokolovskaya@misis.ru

ПОДПИСЬ  ЗАВЕРЯЮ
Проректор по безопасности
и общим вопросам
НИТУ «МИСиС»

