

ОТЗЫВ

официального оппонента Родионовой Ирины Гавриловны
на диссертационную работу Пазиловой Ульяны Анатольевны
«Формирование структуры при изготовлении листового проката и отпуске
сварных соединений из низкоуглеродистых высокопрочных сталей и
взаимосвязь ее с физико-механическими свойствами», представленную на
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Важной особенностью современного этапа развития материалов на основе железа является всё более широкое использование высокопрочных конструкционных экономнолегированных свариваемых сталей, при постоянном росте требований к их уровню прочности, хладостойкости, свариваемости, другим характеристикам. В значительной степени это относится к судостроительным сталям, повышение комплекса свойств которых позволяет облегчить конструкцию, повысить ее надежность, снизить трудоемкость сварочных работ на судостроительных заводах. Помимо выбора оптимального содержания легирующих и микролегирующих элементов, важную роль в обеспечении высокого комплекса технологических и служебных свойств таких сталей играют режимы термомеханической обработки, направленные, в частности, на повышение дисперсности структуры. Кроме высокого комплекса свойств самих сталей, необходимо обеспечить и высокое качество их сварных соединений. Важной задачей является предупреждение формирования трещин в сварных соединениях в процессе их отпуска, направленного на снятие остаточных сварочных напряжений (ОСН). Для решения такой задачи необходимо понимать закономерности формирования структуры в различных зонах сварного соединения, как в процессе сварки и последующего охлаждения, так и в процессе отпуска.

Сказанным определяется актуальность диссертационной работы Пазиловой У.А., целью которой была разработка термомеханических режимов горячей пластической деформации для обеспечения

гарантированного предела текучести 750 МПа листового проката толщиной до 40 мм и установление особенностей влияния послесварочного отпуска на структуру, механические свойства и склонность к растрескиванию в ЗТВ сварных соединений из высокопрочных легированных сталей.

Объектом исследования были низкоуглеродистые высокопрочные легированные стали марок 10ХН4МДФ, 10ХН3МДФ и 10ХН2МДБ и их сварные соединения. **Предметом исследований были** особенности формирования структуры, их влияние на механические свойства и сопротивление хрупкому разрушению листового проката и сварных соединений из высокопрочных сталей указанных марок.

Научная новизна диссертационной работы определяется, прежде всего, установлением возможности измельчения блоков мартенситно-бейнитной структуры и относительного роста доли малоугловых границ с разориентировками не менее 5° в конечной структуре низкоуглеродистой высокопрочной стали с $S_{эв} = 0,6-0,7\%$ путем деформации при постоянной температуре ниже температурного порога статической рекристаллизации на $50-70^\circ\text{C}$ на завершающей стадии прокатки. Это способствует увеличению прочности на 50-100 МПа без изменения уровня легирования.

Важным научным результатом работы является установленная закономерность резкого снижения значений удлинения перед разрушением в крупнозернистом участке ЗТВ с мартенситной структурой, независимо от скорости деформации в широком интервале значений для всех исследованных сталей. Показано также, что растрескивание в крупнозернистом участке ЗТВ сварных соединений низкоуглеродистых высокопрочных легированных сталей с мартенситно-бейнитной структурой после повторных нагревов в области температур высокого отпуска вызвано зернограницным проскальзыванием под действием деформаций при релаксации остаточных напряжений с образованием трещин в тройных стыках бывших аустенитных зерен.

Интерес вызывает также предложенная методика, которая последовательно оценивает влияние кинетики фазовых превращений в ЗТВ сварных соединений высокопрочных легированных сталей с мартенситно-бейнитной структурой, влияние отпуска при выбранной температуре, в том числе с приложением деформации с низкой скоростью (до $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$), на склонность к охрупчиванию в ЗТВ.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработаны и внедрены в опытно-промышленном производстве технологические схемы горячей пластической деформации на завершающей стадии прокатки при закалке с прокатного нагрева с последующим высоким отпуском для повышения прочностных характеристик листового проката из низкоуглеродистой легированной стали с нормируемым пределом текучести 750 МПа. Разработаны методические указания по прогнозированию склонности к охрупчиванию в ЗТВ сварных соединений из низкоуглеродистых высокопрочных легированных сталей при послесварочном отпуске.

Достоверность и обоснованность полученных результатов определяется большим объемом выполненных экспериментов с применением стандартных и современных методов исследования, согласованностью с известными экспериментальными данными других исследователей.

Общая характеристика диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов и списка литературы. Объем диссертации составляет 210 страниц текста, включая 100 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 107 источников.

Во введении дано разностороннее обоснование актуальности темы диссертации, четко сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость. Также приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения о публикациях и перечислены конференции, на которых проведена достаточная апробация работы.

В первой главе приведен аналитический обзор литературы, подтверждающий актуальность выбранной темы диссертации. Хорошо составленный, структурированный литературный обзор показывает, что диссертант хорошо изучил существующие подходы к изучаемой им проблеме. Убедительно показаны возможности управления структурой сталей, в первую очередь, повышения ее дисперсности, путем варьирования технологических параметров. Представлены различные точки зрения на механизмы влияния отпуска на структуру и свойства сварных соединений конструкционных легированных сталей. Проведенный анализ позволил сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе подробно описаны использованные методики исследований и испытаний. В работе были использованы как стандартные методики, обязательные для испытаний судостроительных сталей, так и современные методы исследования тонкой структуры металла, а также методы физического моделирования температурно-деформационных режимов обработки сталей и их сварных соединений с помощью дилатометра DIL 805 и многофункционального исследовательского комплекса «GLEEBLE 3800».

В третьей главе представлены результаты исследования фазовых превращений в исходных сталях марок 10ХН4МДФ, 10ХН3МДФ и 10ХН2МДБ, а также результаты моделирования на дилатометре температурных воздействий в ЗТВ сварных соединений, обусловленных термическим циклом сварки. Выполненный анализ полученных термокинетических диаграмм, а также результатов очень большого объема микроструктурных исследований как на оптическом, так и на просвечивающем электронном микроскопах, позволил установить особенности фазовых превращений при закалке с прокатного нагрева, а также при высокоскоростном нагреве и формировании структуры в ЗТВ исследуемых хромоникельмолибденовых сталей.

Показано, что при снижении уровня легирования в достаточно широком интервале скоростей охлаждения образуются мартенситно-бейнитные структуры. Предварительная деформация 30 % при температуре 950°C повышает температуры начала и конца бейнитного и мартенситного превращений в стали 10ХН2МДБ на 15-20°, но практически не оказывает влияния на морфологию бейнита, которая остается реечной после охлаждения со скоростями более 20°C/с.

Наибольший интерес представляют результаты исследования сталей после обработки, имитирующей термический цикл сварки в наиболее проблемном участке сварного соединения – участке вблизи сварного шва с наиболее крупнозернистой структурой. Так, значения твердости для стали марок 10ХН4МДФ и 10ХН3МДФ равны на участке крупного зерна и составляют 500-540 HV. Это связано с формированием мартенсита одного типа при одинаковых температурах конца $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Для стали марки 10ХН2МДБ значения твердости на участке крупного зерна составляют 360-365 HV, что связано с преобладанием в структуре реечного бейнита. При оценке склонности стали к образованию холодных трещин принят уровень твердости, превышающий 420 HV. Поскольку для сталей марок 10ХН4МДФ и 10ХН3МДФ критические значения твердости достигаются во всем интервале скоростей охлаждения после высокоскоростного нагрева до температур выше 900°C, в главе 5 было исследовано влияние отпуска на структуру и свойства этого именно этого участка.

В четвертой главе представлены результаты исследования условий формирования наиболее однородной структуры и высокого уровня свойств в стали марки 10ХН2МДБ после закалки с прокатного нагрева с отпуском.

При варьировании температурных режимов деформации на заключительной стадии горячей прокатки был выбран режим, включающий деформацию аустенита (с величиной относительной деформации не менее 12-13% за проход) при постоянной температуре 950°C и последующее охлаждение со скоростью 10°C/сек, характерной для охлаждения листового

проката толщиной 40-50 мм в промышленных условиях. После обработки по такому режиму формируется преимущественно бейнитная структура со средним размером зерна аустенита 16 мкм, при этом средний размер структурного элемента (блока) составляет 7,4 мкм, субзерен размером менее 5 мкм в структуре около 40-50 %, доля (относительная протяженность) малоугловых границ составляет 15 %. На основе результатов моделирования были разработаны температурно-деформационные схемы прокатки для опытно-промышленного производства листового проката с использованием технологии закалки с прокатного нагрева с высоким отпуском, гарантирующие однородность и дисперсность конечной (превращенной) бейнитной и мартенситно-бейнитной структуры, формирующейся из мелкозернистого аустенита.

Разработанные режимы были реализованы при изготовлении листового проката в промышленных условиях. В качестве исходных заготовок использовали кованые брамы производства ООО «ОМЗ-Спецсталь». Прокатку осуществляли на одноклетьевом реверсивном стане «Кварто-5000» в ЛПЦ-3 ПАО «Северсталь». Выполненные испытания полученного листового проката из стали марки 10ХН2МДБ с гарантированным пределом текучести 750 МПа показали полное соответствие его всем предъявляемым требованиям, включая вязкость, трещиностойкость, сопротивление коррозионно-механическим нагрузкам. Использование указанных технологических режимов способствует увеличению прочности на 50-100 МПа без изменения уровня легирования.

В пятой главе приведены результаты исследования влияния кратковременного и длительного отпуска на структуру, твердость и свойства различных участков сталей в ЗТВ. При изучении процессов, протекающих при высоком отпуске высокопрочных сталей, показано, что длительное пребывание закаленной стали с мартенситной структурой в области температур среднего отпуска ($\sim 450^{\circ}\text{C}$) приводит к снижению сопротивляемости хрупким разрушениям при низких температурах, что

обусловлено распадом участков остаточного аустенита с образованием хрупких пластинчатых карбидов цементитного типа.

По результатам исследования сделан важный вывод о том, что кратковременный отпуск для наиболее опасного крупнозернистого участка ЗТВ, который может протекать при наложении последующих валиков при многопроходной дуговой сварке, приводит к протеканию быстротекущих процессов, таких как диффузионное перемещение атомов внедрения (углерода) на короткие (несколько нанометров) расстояния с образованием сегрегаций на дислокациях и границах. Это может приводить к некоторому снижению ударной вязкости, но в целом не носит катастрофического характера и, как показывает практика выполнения многопроходной сварки высокопрочных сталей, не способствует трещинообразованию в сварных соединениях. В отличие от такого кратковременного отпуска, длительный (в течение нескольких часов) высокий отпуск сварных соединений, позволяющий снизить остаточные сварочные напряжения, может приводить к изменениям фазового состава и структуры стали, который могут снижать уровень свойств. Однако превращения, связанные только с температурным воздействием (например, остаточного аустенита в мартенсит) не могут быть причиной растрескивания. Важную роль в этом должны играть и деформационные процессы, которые рассмотрены, в частности, в главе 6.

В шестой главе приведены результаты исследования влияния деформации с различной скоростью во время отпуска на структурные изменения и пластичность основного металла и металла ЗТВ с целью найти причины растрескивания сварных соединений, наблюдаемого при послесварочном отпуске. Интересен подход к решению данной задачи, предполагающий, что источником деформации, которая может вызывать образование трещин при термической обработке сварных соединений, является релаксация внутренних сварочных напряжений и напряжений, вызванных объемными изменениями в результате структурных превращений при сварке и термической обработке. Поэтому были проведены комплексные

исследования структурных изменений под влиянием нагрузки, имитирующей релаксацию остаточных напряжений в сварном соединении, и одновременном воздействии температуры при высоком отпуске.

В результате проведенных исследований обнаружен эффект резкого снижения деформационной способности исследованных сталей (как образцов основного металла, так и имитированного крупнозернистого участка при одновременном воздействии температуры 600°C и деформации с низкой скоростью $V_3 = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ (2%/час). При такой скорости, на временной базе, соответствующей времени отпуска сварных конструкций больших толщин, могут быть достигнуты деформации разрушения. Именно такое резкое снижение деформационной способности металла у линии сплавления может являться причиной образования трещин в сварных соединениях низкоуглеродистых легированных сталей при послесварочном отпуске.

Установлена связь эффекта снижения деформационной способности (снижения относительного удлинения перед разрушением) с отсутствием процессов рекристаллизации α -фазы и с низкой интенсивностью процессов карбидообразования при одновременном воздействии температуры высокого отпуска и деформации. Повышение уровня легирования высокопрочной стали элементами замещения и формирование устойчивых специальных карбидов способствует снижению интенсивности протекания указанных процессов, что повышает склонность к охрупчиванию. Показано, что резкое снижение деформационной способности в крупнозернистой мартенситной структуре вызвано зернограничным проскальзыванием под действием остаточных напряжений с образованием трещин в тройных стыках зерен. Высокие значения относительного удлинения обеспечивает мелкозернистая ферритно-карбидная структура, формирующаяся в результате рекристаллизации α -фазы в исходной мартенситной или мартенситно-бейнитной структуре и интенсивного карбидообразования.

В седьмой главе описано внедрение результатов работы. Показано, что выявленные закономерности получили подтверждение при

исследованиях реальных сварных соединений из высокопрочных низкоуглеродистых легированных сталей. Установлено, что помимо оптимизации химического состава и структурного состояния сталей и их сварных соединений, для предотвращения снижения деформационной способности и растрескивания в крупнозернистом участке ЗТВ сварных соединений необходимо предпринять меры по исключению возможности протекания процессов пластического деформирования металла ЗТВ сварных соединений в ходе термического цикла высокотемпературного отпуска. Для этого необходимо исключение неравномерности при нагреве, выдержке и охлаждении сварных соединений, зон высокой концентрации напряжений при выборе конструктивно-технологического оформления сварных соединений.

Разработанные схемы пластической деформации стали марки 10ХН2МДБ были включены в технологическую инструкцию на изготовление листового проката из высокопрочной стали с нормируемым пределом текучести 750 МПа в условиях опытно-промышленного производства.

Работа прошла достаточную апробацию: основные результаты опубликованы в журналах из перечня ВАК, доложены и обсуждены на международных и российских конференциях, получены 2 патента. Диссертация написана и оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат и публикации достаточно полно отражают содержание диссертации.

К работе имеются следующие замечания.

1. В главе 1 при описании выделений карбидных фаз, образующихся при отпуске сталей, не упоминается карбид ниобия, в то время как одна из исследованных сталей содержала ниобий в количестве, достаточном не только для формирования в процессе горячей прокатки частиц субмикронных размеров, подавляющих рекристаллизационные процессы и, тем самым, приводящих к повышению дисперсности структуры, но и для

формирования при отпуске наноразмерных частиц, вызывающих дисперсионное твердение.

2. Аналогично, в главе 1 недостаточно отражена роль титана, как элемента, сдерживающего рост аустенитного зерна при нагреве под прокатку, а также при сварке в области наиболее высокотемпературного нагрева металла (вблизи сварного соединения). Его роль сведена только к смещению начала выделения нитрида алюминия в более низкотемпературную область. В то же время, многочисленные публикации свидетельствуют о том, что титан эффективно тормозит рост зерна аустенита при указанных технологических операциях, участвуя в формировании нитридных или оксидных выделений, не растворяющихся до более высоких температур, чем выделения, формирующиеся при участии ванадия и ниобия.

3. В главах 1 и 5 описаны, в основном по литературным данным, возможности формирования выделений избыточных фаз с участием хрома, молибдена и ванадия при отпуске исследованных сталей. В то же время, результаты собственных комплексных исследований указанных выделений (теоретических - методами термодинамического анализа и экспериментальных – на просвечивающем электронном микроскопе с оценкой количества, размеров и морфологии частиц) в работе отсутствуют.

4. Хотя в целом диссертационная работа написана хорошим научным языком, всё же ее объем представляется несколько завышенным. Его можно было бы сократить, уменьшив количество ссылок на предыдущие главы.

Сделанные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертации У.А. Пазиловой, которая является законченным научным исследованием. Представленная работа полностью соответствует требованиям, сформулированным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, и предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, а сам автор заслуживает присуждения искомой степени

кандидата технических наук по специальности 05.16.01 - «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Заместитель директора ЦФМК
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»
доктор технических наук


08.11.2017

И.Г. Родионова

Родионова Ирина Гавриловна, доктор технических наук, специальность 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», старший научный сотрудник, заместитель директора Центра физической химии, материаловедения, биметаллов и специальных видов коррозии (ЦФМК).

Адрес: 105005, г. Москва, ул. Радио 23/9, стр. 2;
Тел.: +7 (903) 722 96 58
Email: igrodi@mail.ru

Подпись Родионовой И.Г. заверяю:
Ученый секретарь
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»,
кандидат технических наук



Т.П. Москвина

Ознакомлено
15.11.17 