

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу

Фоминой Ольги Владимировны

«Создание технологических принципов управления структурой и физико-механическими свойствами высокопрочной аустенитной азотсодержащей стали», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Одним из перспективных направлений создания принципиально новых конструкционных материалов для судостроения, нефтегазодобывающей промышленности, атомной энергетики и других отраслей является легирование азотом аустенитных сталей. В отличие от традиционных коррозионностойких хромоникелевых сталей, в аустенитных сталях, легированных азотом, возможно одновременно обеспечить высокий комплекс различных свойств – прочности, коррозионной и эрозионной стойкости. Кроме того, важным преимуществом таких сталей является их низкая магнитная проницаемость. Несмотря на большое количество публикаций, посвященных результатам исследования структуры и свойств таких сталей, вопросы их промышленного освоения до недавнего времени были изучены недостаточно, что являлось сдерживающим фактором для их более широкого использования. Сказанным определяется **актуальность** диссертационной работы Фоминой О.В., цель которой состояла в разработке научно-обоснованных принципов формирования структуры высокопрочной азотсодержащей стали Cr-Ni-Mn композиции легирования на всех стадиях изготовления металлургических полуфабрикатов, обеспечивающих получение заданных физико-механических и эксплуатационных свойств, и их реализация в промышленных технологических процессах.

Одно из наиболее важных достижений данной работы – это возможность получать из стали одного химического состава металлопродукцию с широким диапазоном прочностных характеристик, например, с пределом текучести для листового проката – от 475 до 900 МПа, для профильного проката – от 450 до 1000 МПа. Это достигается путем управления процессами рекристаллизации и деформационного упрочнения за счет варьирования обжатий и температуры деформации на каждом этапе термомеханической обработки.

НИИЦ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № <u>3505</u>	в ДЕЛО
<u>16</u> <u>11</u> <u>18</u> г.	№
Осн. <u>7</u> л.	полн

Интересные результаты получены при исследовании влияния химического состава, в том числе содержания азота, на условия кристаллизации и кинетику дальнейших фазовых превращений. Большое внимание уделено изучению условий образования вторичных фаз, в том числе карбидных, нитридных и карбонитридных.

Диссертация Фоминой О.В. состоит из введения, шести глав, выводов и приложения. Работа изложена на 428 страницах машинописного текста, содержит 229 рисунков, 61 таблицы, одно приложение на 4 страницах, содержащее акты внедрения разработанных технологий изготовления листового и профильного проката различного сортамента, штамповок из азотсодержащей стали, и список литературы из 345 наименований.

В главе 1 представлен подробный анализ результатов научных исследований по разработке способов управления структурой и свойствами высокопрочных аустенитных сталей, в первую очередь, легированных азотом. Автором детально проанализированы механизмы упрочнения таких сталей, как путем воздействия на матрицу, так и путем формирования выделений избыточных фаз, влияющих на прочность через измельчение зерна, а также приводящих к дисперсионному твердению. Большое внимание уделено рассмотрению методов моделирования формирования структуры сталей на разных стадиях производства. При постановке целей и задач работы отмечено, что практически не изученными является вопросы влияния основных термомеханических параметров (степени дробной деформации в сочетании с температурными интервалами деформирования, скорости деформации, междеформационных пауз на процессы упрочнения и разупрочнения при горячей деформации. И установление закономерностей такого влияния одно из важнейших достижений данной работы.

В главе 2 подробно описаны материалы, на которых проводились исследования, а также основные методики и оборудование, примененные при выполнении комплексных исследований и испытаний. Особо следует отметить комплекс методов, предназначенных для имитационного моделирования технологических процессов. Отмечено, что реализованный комплекс исследований и испытаний позволил выполнить поставленные цели и задачи работы.

В главе 3 представлены результаты исследований формирования структуры азотсодержащей стали в процессе кристаллизации и последующего охлаждения, эволюции литой структуры в процессе горячей деформации по различным режимам и термической обработки. Большая часть результатов, отличающихся научной новизной, представлена именно в этой главе. Показано, что важнейшим фактором, влияющим на формирование литой структуры при кристаллизации и ее эволюцию в процессе дальнейших передела является соотношение хромового и никелевого эквивалентов $Cr_{\text{экв.}}/Ni_{\text{экв.}}$, от значения которого зависит, как будет проходить кристаллизация – через аустенит или через δ -феррит. С этим связан характер структуры, сформировавшейся при кристаллизации, уровень ликвации и характер дальнейших превращений. Интересно, что, несмотря на большую неоднородность химического состава исходной стали после кристаллизации через δ -феррит, дальнейшее превращение δ -феррита в аустенит приводит к уменьшению химической неоднородности тем в большей степени, чем дальше расположение состава стали на диаграмме Шеффлера-Шпайделя от границы областей с различным механизмом кристаллизации. Показано также, что и при горячей деформации динамическая рекристаллизация в стали с δ -ферритом протекает в более полном объеме, чем в аустенитной стали, что приводит к формированию более однородной структуры.

По результатам комплексных исследований влияния термодиформационных параметров ВТМО на формирование структуры определены условия формирования оптимальной структуры путем целенаправленной реализации процессов наклепа и разупрочнения. Сделан интересный вывод о невозможности реализации в промышленных условиях существенного протекания статической рекристаллизации. Поэтому основные процессы структурообразования при ВТМО – динамическая рекристаллизация, протекающая непосредственно при горячей деформации и метадинамическая рекристаллизация, протекающая в междиформационных паузах.

Представлены также результаты исследования влияния параметров ВТМО на образование вторичных фаз.

В четвертой главе представлены материалы, касающиеся разработки технологических режимов и освоения технологии производства листового,

профильного проката и поковок различного сортамента в промышленных условиях. Показано, что реализация конкретных сочетаний температуры, скорости и максимальной степени дробной деформации, а также условий охлаждения после окончания горячей деформации, позволяет обеспечить требуемый уровень свойств проката из рассматриваемой стали в широком диапазоне прочностных характеристик и толщин. Достижение стабильного уровня требуемых механических свойств, соответствующих формируемой конечной структуре, подтверждено при выпуске опытно-промышленных партий металлопродукции.

В пятой главе приведены результаты исследования технологичности стали при изготовлении деталей и конструкций различного назначения. Особо следует отметить рекомендованные технологические режимы изготовления деталей сложной формы. Показано, что при холодной штамповке таких деталей методом последовательного локального деформирования необходимо обеспечить равномерное распределение деформации по площади и толщине детали. В противном случае формируются локализованные области с дефектной наклепанной структурой и неоднородное напряженное состояние, что приводит к более раннему зарождению трещин. Для получения конкретных деталей введены требования к структурному состоянию таких областей и ограничения по максимальной деформации, предупреждающие формирования областей с неблагоприятной структурой.

Важными являются также результаты исследования структуры металла шва и зоны термического влияния сварных соединений из азотсодержащей стали, вывод, что эта сталь сваривается всеми видами сварки и не требует последующей термообработки для обеспечения высокого комплекса механических свойств и стойкости против различных видов коррозии. Установлено, что исследованные сварные соединения из азотсодержащей стали имеют относительно узкую зону термического влияния, которая в зависимости от режимов сварки и толщины исходного проката составляет 300–450 мкм.

В шестой главе представлены результаты исследований эксплуатационных свойств азотсодержащей стали, которые могут меняться в широких пределах, в зависимости от назначения стали, в соответствии с которым регламентируется необходимый комплекс физико-механических свойств. Например, для изделий, используемых в нефтедобывающей промышленности, основными условиями

являются высокая прочность (предел текучести более 800 МПа) и немагнитность; для научно-исследовательских судов, изучающих геомагнитное поле Земли, достаточно применения стали с пределом текучести 500 МПа.

По результатам изучения влияния внешних воздействий при различных видах эксплуатационных нагрузений был, в частности сделан вывод о достаточно высоком запасе пластичности и вязкости стали, ее способности выдерживать значительные динамические нагрузки. В то же время для исследуемой стали характерно меньшее количество циклов между зарождением трещины и разрушением образца по сравнению с обычными аустенитными сталями. В целом, более высокопрочная сталь обладает большей долговечностью, но плохо сопротивляется развитию усталостной трещины.

Результаты, представленные в шестой главе, представляются необходимыми для обоснованного выбора областей использования азотсодержащей стали и поэтому очень хорошо дополняют предыдущие главы, придавая работе более комплексный характер, охватывая практически всю технологическую цепочку – от получения литой заготовки до готовых изделий и оборудования, предназначенных для конкретных эксплуатационных условий.

Таким образом, полученные автором результаты лабораторных исследований и опытно-промышленных работ существенно уточняют и дополняют предшествующие научные и практические знания в области создания новых высокопрочных азотсодержащих сталей, освоения сквозных технологий их производства и обеспечивают возможности их широкого внедрения.

В связи с этим актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы Фоминой О.В., достоверность полученных научных результатов не вызывает сомнений. Работа написана грамотным научно-техническим языком, аккуратно оформлена. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Содержание работы достаточно полно изложена в публикациях автора, в том числе в изданиях, соответствующих перечню ВАК.

К работе можно сделать следующие **замечания**:

1. В главе 1 при описании методов моделирования формирования структуры сталей на различных технологических стадиях производства особенно отмечены методы термодинамического моделирования фазовых и структурных

превращений в многокомпонентных сплавах, их возможности для описания равновесного фазового состава сплава, в том числе фазового равновесия выделения карбонитридов ниобия, ванадия, титана, которые представляют большой интерес, так как оказывают сильное влияние на размер зерна, рекристаллизацию, дисперсионное твердение и механические свойства проката. Отмечены используемые для этих целей программные продукты, такие как Thermo-Calc, Scheil-Gulliver, DICTRA, SGTE и др. в комбинации с различными базами данных. В то же время, в главе 3 результаты расчетов температурных зависимостей равновесных долей избыточных фаз, приведенные на рисунке 3.18, относятся только к стали одного химического состава, в то время как содержание элементов, входящих в состав этих фаз – карбидов, нитридов, в том числе сложных, для исследованных в работе сталей различалось. В свою очередь, это могло привести к смещению температурных интервалов их существования. Кроме того, интересно было бы рассчитать температурные зависимости не только равновесных долей избыточных фаз, но и их химического состава (для сложных карбидов и нитридов), который также может влиять на свойства. Добавление в работу таких результатов еще больше бы повысило ее научную значимость.

2. В недостаточной степени в автореферате представлены результаты исследования влияния параметров ВТМО на образование вторичных фаз. Указано, что комплексные частицы $(\text{Cr}, \text{Nb}, \text{V})_2\text{N}$ и $\text{Nb}(\text{CN})$, которые могут тормозить рекристаллизационные процессы, дисперсны, без указания размеров частиц. Указан только размер более крупных частиц Cr_{23}C_6 – около 300 нм, которые формируются при снижении температуры с 1100 до 900°C. Тем не менее, в самой диссертации приведены размеры всех типов частиц, образующихся при ВТМО. Добавление данных о размерах таких частиц в автореферат повысило бы его информативность.

3. Аналогично, хотелось бы иметь более подробную информацию о характеристиках частиц, выделяющихся при охлаждении в интервале температур 1050-400°C, которые, как отмечено в работе, оказывают отрицательное влияние на свойства (пластичность, вязкость, коррозионную стойкость). Отмечено, что повышение степени деформации от 10 до 30% приводит к увеличению среднего содержания вторичных фаз на 10 и 20%, соответственно, однако сведения о

размерах частиц также отсутствуют, в то время как размер частиц также является их ключевой характеристикой, от которого зависит степень их отрицательного влияния на свойства.

Указанные недостатки не снижают значимости работы.

Диссертация Фоминой О.В. является научно-квалифицированной работой, в которой на основании выполненных автором лабораторных исследований и опытно-промышленных работ разработаны теоретические положения, обосновывающие требования к химическому составу, структурному состоянию, параметрам сквозных технологий производства высокопрочных азотсодержащих сталей для обеспечения высокого комплекса технологических и эксплуатационных характеристик, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Фомина Ольга Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

**Доктор технических наук, с.н.с.,
Заместитель директора Научного центра физико-химических основ и технологий металлургии ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»**



Родионова Ирина Гавриловна

Родионова Ирина Гавриловна, доктор технических наук, специальность 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», старший научный сотрудник, заместитель директора Научного центра физико-химических наук и технологий металлургии (НЦФХО).

Москва 105005, ул. Радио, 23/9, стр.2, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии имени И.П. Бардина». Тел. 8(495)777-93-33. Эл. почта igrodi@mail.ru

Подпись И.Г. Родионовой заверяю

Начальник отдела кадров
ФГУП «ЦНИИчермет им.И.П.Бардина»

