

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Фоминой О.В.  
«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

### Актуальность работы.

Многолетние исследования хромоникельмарганцевых сталей с азотом позволили установить общие тенденции влияния легирующих элементов на механические и эксплуатационные свойства, определить закономерности структурообразования при горячей и холодной деформации, термической обработке. Однако многие аспекты проблемы не потеряли своей актуальности, это относится, в частности, к фактору металлургического качества, требуют дальнейшего изучения процессы рекристаллизации при термомеханической и термической обработке, факторы технологичности, свариваемости, оценка степени трансформации структуры и свойств стали при внешних воздействиях, что в целом необходимо для обеспечения стабильного качества разнообразной металлопродукции.

Это определило необходимость разработки научно обоснованных принципов сквозной системы управления структурой высокопрочной азотсодержащей стали (Cr-Ni-Mn композиции легирования) на всех переделах, обеспечивающих получение заданных физико-механических и эксплуатационных свойств.

### Новизна научных положений, выводов и рекомендаций.

1. Сформулированы научно обоснованные подходы к разработке технологических процессов производства азотсодержащей стали 04X20H6Г11M2АФБ, позволяющие получать листовой (толщиной от 4 до 45 мм), профильный прокат и поковки с пределом текучести от 475

|                                                            |                  |        |
|------------------------------------------------------------|------------------|--------|
| Федеральный научный центр «Прометей»<br>ЦНИИ КМ «Прометей» |                  |        |
| ДОУ                                                        | Вх. № 3523       | в ДЕЛО |
|                                                            | «19» 11 20 18 г. | №      |
|                                                            | Осн. 4 л.        | подп.  |
|                                                            | Прил. л.         |        |

450 и 450 до 900, 1000 и 700 МПа соответственно с гарантированным уровнем пластичности, вязкости и служебных свойств.

2. Определены граничное соотношение хромового и никелевого эквивалентов ( $Cr_{экр}/Ni_{экр}$ ), приводящее к кристаллизации без ( $\leq 1,17$ ) и с ( $\geq 1,21$ ) образованием  $\delta$ -феррита; закономерности совместного влияния содержания никеля (от 5 до 8%) и хрома (с 21 до 19%) на температуру солидуса, величину интервала кристаллизации, снижение доли  $\delta$ -феррита, образующегося в температурном интервале кристаллизации.

3. Выявлено влияние содержания  $\delta$ -феррита в стали 04X20H6Г11М2АФБ, скоростей деформации 1, 10 (листовая или профильная прокатка),  $0,1 \text{ с}^{-1}$  (ковка) в интервале температур 900–1200°C и исходного состояния металла (литое или деформированное) на величину пороговых значений температур и деформации динамической рекристаллизации.

4. Установлено, что в зависимости от схемы дробного деформирования динамическая рекристаллизация проходит с различной степенью и приводит к разной интенсивности прохождения постдеформационных процессов при последующей выдержке, вклад статической рекристаллизации в структурообразование незначителен.

5. Оценены условия образования вторичных фаз в стали марки 04X20H6Г11М2АФБ при горячей деформации, последующей высокотемпературной выдержке и охлаждении и закономерности их влияния на рекристаллизацию и сопутствующий распад  $\delta$ -феррита.

6. Установлены наличие трех этапов и механизмов формирования рекристаллизованной структуры при листовой прокатке, условия формирования оптимальной конечной структуры.

7. Выявлено и оценено влияние однократного и многократного динамического нагружения со скоростью  $103\text{--}104 \text{ с}^{-1}$ , уровня накопленной пластической деформации  $\epsilon_{\text{дин}}$  (0,1...0,4) на изменение

структуры азотсодержащей стали. Для одноосного статического растяжения со скоростью  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  (в т.ч. при предварительном динамическом нагружении  $\epsilon_{\text{дин}} \leq 0,1-0,2$ ) определены структурные факторы начала локализации деформации ( $\epsilon_{\text{лок}}$ ). Критическая деформация при разрушении не зависит от скорости деформирования стали и составляет  $\epsilon_{\text{кр}} \approx 1,2$ .

Достоверность полученных результатов. Подтверждается применением стандартизированных методов лабораторных испытаний и исследований сталей, воспроизводимостью и согласованностью анализируемых данных, использованием современных методов исследования и экспериментального оборудования.

В частности, следует отметить использование универсального пластометра Gleeble 3800, опытного прокатного комплекса «Стан кварто 800» (верифицированных в промышленных условиях), анализ структур проводился средствами световой (Zeiss Axiovert 200 MAT, оснащенный анализатором изображений Thixomet) и просвечивающей электронной (FEI Tecnai G2 30 S-TWIN и Philips EM-400T ) микроскопии. EBSD анализ проводили с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 3D FEG.

В ряде случаев применялись оригинальные (разработанные НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей») методики, например, методика проведения динамического нагружения, для оценки сопутствующих изменений структуры и свойств стали. Понимание механизмов получения конечных структур основывалось на оценке эволюции структур по всей технологической цепочке (технологическая наследственность), что потребовало от автора проявить глубокое понимание явлений и процессов на всех переделах, и было возможно только при наличии разностороннего практического опыта работы в этом направлении.

Полученные экспериментальные данные были сопоставлены с результатами, имеющимися в научно-технической литературе.

В целом, широкий спектр используемых в работе средств и методов исследований и испытаний позволили автору глубоко и всесторонне изучить природу механизмов структурообразования (и факторов их определяющих), находя подтверждение теоретическим выводам широкомасштабными, систематическими экспериментальными результатами.

Степень обоснованности научных положений и выводов. Все сформулированные автором научные положения и выводы основываются на необходимом и достаточном объеме теоретических и экспериментальных данных.

В частности, достаточно всесторонне и глубоко проанализированы вопросы структурообразования исследуемой стали при горячей деформации, оценена роль вариации легирующих элементов.

Применение разномасштабных, взаимодополняющих методик исследования структуры и фазовых превращений (световой металлографии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, в том числе с использованием EBSD-анализа), позволили автору обоснованно подойти к оптимизации состава стали и разработке технологии её получения.

В целом, проведенный полный комплекс исследований обеспечил возможность объективно обосновать сформулированные научные положения и выводы, качество предложенных рекомендаций.

Практическая значимость результатов работы. 1 Разработаны и внедрены в промышленность технологии производства: листового проката толщиной от 4 до 18 мм с пределом текучести от 475 до 900 МПа на стане 2000 АО «ВМК «Красный Октябрь»; листового проката толщиной от 20 до 45 мм с пределом текучести от 500 до 800 МПа на

оборудовании стана 5000 ЛПЦ-3 ЧерМК ПАО «Северсталь» по кооперации с ООО «ОМЗ-Спецсталь»; профильного проката № 7–10 с пределом текучести от 450 до 1000 МПа на стане «630/420» ООО «РМ-стил».

2. Разработаны рекомендации по оптимизации технологических схем изготовления поковок из стали марки 04X20H6Г11M2АФБ с однородной рекристаллизованной структуры по сечению.

3. Разработана промышленная технология изготовления штампованных сферических и торосферических деталей для изготовления сварных конструкций, обеспечивающая за счет оптимального сочетания параметров и схемы холодной деформации, формирование равномерной однородной структуры в объеме заготовки и требуемых механических свойств стали.

Замечания:

- фактически, при разработке научных основ разработки технологии получения высокопрочной аустенитной азотсодержащей стали исходили из представлений о технологической наследственности (закономерной эволюции структур и дефектов от выплавки до термической обработки). Такой подход в целом себя оправдал, и это вполне можно было бы отразить в научной новизне работы;

- вполне закономерно, что при разработке научных основ создания высокопрочной аустенитной азотсодержащей стали и технологии её получения акцент был сделан на вопросах структурообразования. Однако учитывая назначение стали, как конструкционного материала, большее внимания следовало бы уделить анализу механизмов разрушения, особенно в связи с решением проблемы металлургического качества стали;

- не использованы в полной мере возможности цифровизации (масштабы вычислительных мощностей и современные программные

продукты) для более полного извлечения информации о различиях в строении изображений структур, анализируемых в работе;

- не всегда указывается объем проведенных испытаний, например табл. 6.3 (стр. 372 дисс.), что затрудняет оценку значимости полученных результатов. В ряде случаев при указании средних значений величин, например, при описании размера зерна в микроструктуре литой заготовки (рис. 3.16, стр. 110 дисс.), не приводятся соответствующие ошибки;

В целом указанные недостатки не снижают общего положительного впечатления о диссертационной работе О.В. Фоминой.

#### Заключение.

Диссертационная работа О.В. Фоминой является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в создание высокопрочных аустенитных сталей с гарантированным уровнем пластичности, вязкости и служебных свойств.

Результаты работы целесообразно использовать для углубления представлений о процессах эволюции структуры аустенитных сталей, легированных азотом, при разработке алгоритмов сквозного управления качеством металла, оптимизации состава с учетом его назначения.

Автореферат диссертации и публикации автора в т.ч. 18 статья в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ (9 из которых в изданиях, индексируемых в базах данных WoS и SCOPUS), соответствуют содержанию диссертации и достаточно полно ее отражают.

Структура диссертации логична, работа написана доступным языком и аккуратно оформлена.

В целом, диссертационная работа Фоминой Ольги Владимировны по своему теоретическому, методическому и экспериментальному уровню, объему работы, актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости полученных результатов соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям "Положением о порядке присуждения ученых степеней" (в ред. Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 N 842), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент,  
профессор кафедры металловедения  
и физики прочности  
НИТУ "МИСиС", д.т.н.

А.В. Кудря

<http://www.mifp.misis.ru/index-2/index-2-3.htm>

Москва, Ленинский пр-т, 4,

8-(495)-638-4686

AVKudrya@misis.ru

Подпись Кудри Александра  
Викторовича удостоверяю  
Проректор по науке и инновациям

