

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Капуткина Дмитрия Ефимовича

на диссертационную работу

Седухина Вадима Валерьевича

«Совершенствование химического состава и технологии выплавки дуплексной марки стали, легированной азотом, в открытой индукционной печи»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.6.2 – Металлургия черных, цветных и редких металлов

Актуальность темы диссертации. В хлорид-содержащей среде (например, в морской воде) для замедления коррозии используются высоколегированные стали аустенито-ферритного класса. В настоящее время широкое применение в качестве конструкционного материала при подводной добыче нефти и газа получила аустенитно-ферритная (дуплексная) сталь марки UNS S32750 (Super Duplex 25Cr, российские аналоги: 02X25H7M3 и 02X25H7M4 по ГОСТ ISO 13680-2016). Многочисленные работы как российских, так и зарубежных учёных показали, что дополнительное легирование азотом в равновесных концентрациях повышает прочностные и коррозионные свойства высоколегированных сталей, не требуя существенной перестройки технологической цепочки плавки, разливки и термомеханической обработки. Однако, в настоящее время значительных объемов дуплексных марок сталей, легированных азотом, в России не производится. В связи с этим результаты исследований по совершенствованию химического состава и технологии выплавки дуплексной марки стали, легированной азотом, в открытой индукционной печи с целью замены аналогов зарубежного производства, полученные Седухиным Вадимом Валерьевичем при выполнении диссертационной работы, являются актуальными, и вносят существенный вклад в развитие металлургических технологий, позволяющих изготавливать металлопродукцию с необходимыми показателями физико-механических и коррозионных свойств.

Структура и содержание диссертации. Диссертационная работа Седухина В.В., изложенная на 125 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 123 наименования, и 2 приложений.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, кратко изложено содержание работы, сформулированы цель работы и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен хорошо составленный аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы по теме диссертации. Представлены сведения о химическом

составе и свойствах дулексных сталей, используемых в настоящее время различными отраслями промышленности. Автором приведено описание влияния азота как легирующего элемента в дулексных сталях и структура вторичных фаз, выделяющихся при кристаллизации дулексных сталей, рассмотрены вопросы растворимости и предельной концентрации азота в сплавах на основе железа.

По результатам выполненного аналитического обзора автор отметил, что ближайшие отечественные аналоги данного типа марок сталей не удовлетворяют конечного потребителя показателями физико-механических и коррозионных свойств. Однако существующий запрос на изделия из данного класса сталей диктует необходимость разработки их оптимальных составов, технологий выплавки и режимов дальнейших переделов, в том числе для возможности реализации проектов по созданию малотоннажных производств. Выбрана марка стали, представляющая интерес для конечного потребителя, и которая будет являться основой для проведения теоретических и экспериментальных работ – сталь марки UNS S32750.

Во второй главе описаны материалы и методы исследований, применяемые в работе. Описана методика термодинамического моделирования с использованием пакета программ FactSage 6.4 и методология уточнения расчетного выражения для прогнозирования предельной концентрации азота в стали исследуемого состава.

Подробно описаны выплавка в двадцатикилограммовых слитков в открытой индукционной печи с использованием чистых шихтовых материалов, в т.ч. металлического хрома, никеля, марганца и молибдена, хрома металлического азотированного, феррованадия и ферросилиция, методы и оборудование для определения химического состава, металлографической структуры и текстуры.

Физическое моделирование процессов горячей деформации с помощью физического симулятора термомеханических процессов Gleeble 3800 производилось в двух направлениях – моделирование процессов горячей деформации и оценка склонности материала к образованию трещин при горячей деформации, для каждого из которых были подготовлены образцы необходимого размера.

Испытания физико-механических свойств проводились согласно ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9454-78, ГОСТ 9012-59, ASTM G48-11 с помощью специализированного оборудования.

Третья глава посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям по получению усовершенствованного состава стали марки UNS S32750. По результатам термодинамического моделирования диссертантом определен химический состав

супердуплексной стали UNS S32750, позволяющий увеличить температурный интервал существования образования феррита, а также увеличить температурный интервал образования нитридной фазы в стали, что позволит увеличить предельную концентрацию азота в нем. Также установлена температура плавления (ликвидус) данного состава стали – 1430 °С, позволяющая рассчитать температуры выпуска и разлива стали при дальнейших экспериментальных работах.

При анализе имеющихся в открытом доступе данных различных исследователей и математических расчетов, автором установлено значение температуры, описывающее условие предельной концентрации азота в дуплексных сталях – 1480 °С. Автором выдвинуто положение о том, что в случае, если рассчитанный показатель предельной концентрации азота при данной температуре выше его фактической концентрации в стали, то обеспечивается получение бездефектного слитка (отсутствие газовой пористости).

По результатам экспериментальных работ (выплавка, исследование химического состава и микроструктуры) Селухиным В.В. предложен усовершенствованный химический состав стали UNS S32750, скорректированы параметры и операции технологии ее выплавки в открытой индукционной печи, что позволяет вкпе получать слитки без наличия газовой пористости.

В четвертой главе представлены результаты моделирования горячей деформации стали

усовершенствованного состава для определения ряда зависимостей, описывающих процесс формирования микроструктуры.

По результатам моделирования процессов горячей деформации установлено, что при деформации стали UNS 32750 усовершенствованного состава при температурах ниже 1100 °С многочисленные макротрещины и разрывы на поверхности образцов наблюдаются уже после истинной деформации в интервале 0,5-0,6. Низкая пластичность стали в указанном низкотемпературном интервале обусловлена сохранением в структуре нерастворённых включений хрупких вторичных фаз.

В процессе деформации при температуре 1100 °С появление поверхностных трещин происходит, начиная с деформации 0,8, а при температурах 1150 °С и выше, при которых аустенит испытывает частичную динамическую рекристаллизацию, поверхностные трещины наблюдаются только после истинной деформации в интервале 1,0-1,1 либо вообще отсутствуют.

При скорости деформации 0,1–1 с⁻¹ частичная динамическая рекристаллизация аустенита протекает более полно и наблюдается во всем диапазоне исследованных

температур деформации. При скорости деформации 10 с^{-1} , характерной для процессов горячейковки, наиболее безопасным температурным интервалом деформации исследуемой стали является диапазон температур $1150-1250 \text{ }^\circ\text{C}$, в котором отсутствует испытывает частичную динамическую рекристаллизацию, уменьшающую риски образования трещин. Установлено, что наиболее безопасным температурным интерваломковки исследуемой литой стали является диапазон температур $1150-1250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Автором получено выражение для пикового напряжения течения в виде гиперболической функции параметра Зенера-Холломома с энергией активации около 500 кДж/моль , которое с высокой точностью описывает массив экспериментальных данных и может использоваться для оценки требуемых энергосиловых параметров ковочного и прокатного оборудования.

В пятой главе представлены результаты промышленной апробации положений диссертационной работы в условиях ООО «Златоустовский металлургический завод». В ходе работ выплавки получено 2 слитка (массой 1 т каждый) стали UNS S32750 усовершенствованного химического состава. Макроструктура полученных слитков соответствует требованиям технических условий предприятия на металлопродукцию по центральной пористости, точечной неоднородности, ликвационному квадрату и подсулочной ликвации.

Показано, что применение схемы передела слитка стали UNS S32750, включающей в себя операции горячейковки и последующей прокатки, обеспечивает достижение предъявляемых к металлопродукции показателей физико-механических свойств.

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

В работе получены результаты, имеющие научную новизну, среди которых хотелось бы отметить следующие:

- установлено влияние концентрации основных легирующих элементов (Cr, Ni, Mo) на фазовый состав стали UNS S32750, а также влияние легирования ванадием стали исследуемого химического состава; определена температура ликвидус исследуемого состава стали – $1430 \text{ }^\circ\text{C}$;

- установлена зависимость, описывающая предельную концентрацию азота в стали UNS S32750 и определено значение температуры ($1480 \text{ }^\circ\text{C}$), которое необходимо применять для выполнения расчетов;

- экспериментально установлено, что при выплавке в индукционной печи стали UNS S32750, применение схемы окончательного раскисления «SiCa/кальций металлический из расчета на $0,1 \text{ масс. \% Ca}$ и никель-магниева лигатура из расчета $2,5 \text{ кг/т}$ позволяет

снизить содержание кислорода в стали до значений 0,0019-0,0023 масс. % по сравнению со схемой «алюминий из расчета 1 кг/т, Si/Ca-кальций металлический из расчета на 0,1 масс. %

и никель-магний из расчета 1,5 кг/т) – 0,0040-0,0071 масс. %

- определено значение энергии активации процесса динамической рекристаллизации для стали UNS S32750 усовершенствованного состава – 501,3 кДж/моль, позволяющее рассчитать параметр Зинера-Холломома для различных температурно-скоростных режимов деформации.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в положениях, представленных ниже, которые нашли свое применение в промышленных условиях и образовательной деятельности:

- уточненное уравнение для определения предельной концентрации азота в стали, что позволяет в оперативном режиме производить расчеты для получения слитков стали без дефектов в виде газовой пористости;

- скорректировано значение усвоения азота из азотированных ферросплавов при выплавке стали UNS S32750 в индукционной печи – 80-85 %, вместо принятого по действующей технологии 60-65 %;

- скорректированы температуры выпуска и разлива стали – 1550...1590 °С и 1510...1540 °С, соответственно, по сравнению с действующей технологией – 1570...1600 °С и 1530...1570 °С, соответственно;

- установлен оптимальный температурный интервал ковки исследуемого состава стали UNS S32750 – 1150...1250 °С;

- полученные научно-технические результаты использованы при разработке Временной технологической инструкции «Производство трубной заготовки из стали марки 03X25N7AM4 (UNS S32750, Super Duplex 25Cr)» и освоении производства продукции с требуемыми показателями физико-механических свойства из стали данной марки на ООО «Златоустовской

металлургический завод»;

- основные научно-технические результаты, представленные в работе, внедрены и используются в учебном процессе при подготовке студентов по направлению подготовки 22.03.02 и 22.04.02 «Металлургия» в филиале ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте.

Последние два пункта практической значимости подтверждаются соответствующими актами и справками, представленными в приложениях диссертационной работы.

Достоверность результатов исследований обеспечивается их получением на основе экспериментов, проведенных с использованием современного научного оборудования и апробированных аналитических методов, применением комплекса взаимодополняющих экспериментальных и аналитических методик, а также подтверждена их воспроизводимостью в промышленных условиях.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Предположение автора, что в стали при плавке и разливке необходимо обеспечивать сохранение как можно более высокого содержания растворенного азота (то есть приближающегося к расчётной термодинамически возможной при атмосферном давлении), представляется не очень обоснованным. Такой подход, во-первых, сужает технологические возможности при выплавке и разливке, и, во-вторых, значительно усложняет в дальнейшем процессы сварки.
2. В описании личного вклада автора неясно значение слов «Систематическая консультация с техническими специалистами ООО «ЗМЗ» - кто кого консультировал?
3. Параметры уравнения Зинера-Холломома приведены с точностью 4-5 значащих цифр (то есть, погрешность их определения не превышает тысячных долей процента), что явно не соответствует действительной точности измерений и расчётов.
4. Энергия активации горячей деформации, рассчитанная в работе, составляет около 500 кДж/моль, что примерно вдвое превышает энергию активации объёмной самодиффузии и диффузии элементов замещения. Какой же физический процесс с такой высокой энергией активации контролирует деформационное поведение материала? В работе нет ответа на этот вопрос.
5. В автореферате (стр. 8) указано, что в разделе «Введение» «сформулированы цель работы и задачи исследования, сформулированы цель и задачи работы», однако в указанном разделе никакой отдельной «цели исследования» не приводится. К тому же в автореферате формулировка цели работы не приведена.
6. По-моему, выражать благодарности в автореферате (стр. 7) не следует.

Общее заключение

Вышеуказанные замечания не снижают ценности представленной работы. В целом, диссертационная работа Седухина Вадима Валерьевича выполнена на современном научно-техническом уровне и представляет собой законченное исследование, соответствующее отрасли технических наук, а именно паспорту специальности 2.6.2 –

... черных, цветных и редких металлов».

Содержание автореферата Седухина В.В. соответствует содержанию диссертации. Результаты работы доложены на 3 международных научных конференциях, основные данные проведенных исследований представлены в 8 научных публикациях, из которых 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Также по результатам работы подана заявка на получение патента на изобретение РФ.

Считаю, что диссертационная работа «Совершенствование химического состава и технологии выплавки дуплексной марки стали, легированной азотом, в открытой индукционной печи» полностью удовлетворяет пп. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, а ее автор, Седухин Вадим Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2 «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Профессор кафедры физики

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический

университет гражданской авиации», доктор технических наук по специальности 05.16.01

«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», доцент

Капуткин Дмитрий Ефимович

«28» февраля 2023 г.

125493, г. Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации»

тел. (499) 459-07-01

Эл. почта: d.kaputkin@mstuca.aero

Я, Капуткин Дмитрий Ефимович, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в этом документе



Печатью подписан
Специально: УИ