

05.16.02

Т51

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

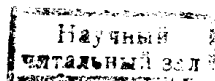
ТОКАРЕВ Александр Владимирович

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА
КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ С НИЗКИМ И ОСОБОНИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА
И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЮ ПРОИЗВОДСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ

Специальность 05.16.02 - "Металлургия черных металлов"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1991



Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете и на Челябинском металлургическом комбинате.

Научный руководитель – лауреат премии Совета Министров СССР и Государственной премии УССР, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Д.Я. Поволоцкий.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор О.К. Токовой.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор В.А. Синельников, кандидат технических наук И.В. Малков.

Ведущее предприятие – Череповецкий металлургический комбинат.

Защита диссертации состоится "4" декабря 1991 г. на заседании специализированного совета (шифр Д – 053.13.03) в 14-00 в Челябинском государственном техническом университете по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института. Автореферат разослан "4" ноября 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор физ.- мат. наук



Д.А. Мирзаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важное значение для народного хозяйства имеет производство трансформаторной стали с низкими удельными ваттными потерями электроэнергии при перемагничивании и высокой магнитной проницаемостью. Получить такой металл можно идя двумя путями. Первый - это совершенствование уже существующих технологий методом модифицирования или микролегирования различными элементами. Второй - разработка принципиально новых технологий производства, включающих выплавку в кислородных конвертерах, внепечную обработку, раскисление и легирование.

При производстве трансформаторного листа в прокатном переделе возникает ряд специфических дефектов, вызывающих повышенные отходы металла. Одним из таких дефектов является "пузырь-вздутие", проявляющийся как в горячекатаном листе промежуточной толщины 24 мм в ЛПЦ-1 ЧМК, так и в холоднокатаном листе анизотропной стали на ВИЗе и вызывающий значительную отбраковку металла. Изучив природу дефекта и механизм его образования в горяче- и холоднокатаном листах можно разработать методы понижения или устранения брака по этому дефекту в листах трансформаторной стали.

В связи с изложенным совершенствование существующих и разработка новых технологий производства трансформаторной стали с высокими электротехническими свойствами, а также снижение уровня брака горяче- и холоднокатаного листа по дефекту "пузырь-вздутие" являются важными задачами.

Цели работы. 1. Исследование кинетики процесса обезуглероживания низко- и особонизкоуглеродистой стали в кислородном конвертере.

2. Совершенствование сульфидного и разработка сульфидно-нитридного вариантов выплавки трансформаторной стали в условиях ККЦ ЧМК.

3. Изучение природы дефекта "пузырь-вздутие", механизма образования, условий возникновения и разработка способов снижения пораженности металла этим дефектом.

Научная новизна. В работе исследована кинетика процесса окисления углерода в кислородном конвертере. Установлены лимитирующие звенья и определены основные кинетические характеристики процесса (константа скорости и кажущаяся энергия активации) в из-

тервалах концентраций 3,6...0,02-0,03% углерода, показано, что при содержании углерода 0,06...0,08% в условиях конвертерного процесса происходит смена кинетического режима его окисления.

Изучена природа образования дефекта "пузырь-вздутие" в горяче- и холоднокатаном листах трансформаторной стали. Предложены гипотеза образования этого дефекта в металле и пути его устранения.

Практическая ценность работы состоит в том, что результаты ее использованы при разработке технологий производства трансформаторной стали по сульфо-нитриднему варианту, позволяющих получить холоднокатаный лист толщиной 0,30 мм, по электротехническим характеристикам не уступающий мировым стандартам. Разработали две возможные гибкие схемы выплавки стали по такому варианту в КИЧ ЧМК.

Результаты исследования природы дефекта "пузырь-вздутие" в горяче- и холоднокатаном листах показали, что наиболее эффективным способом борьбы с данным дефектом является порционная вакуумная обработка трансформаторного металла.

Реализация работы. В кислородно-конвертерном цехе Челябинского металлургического комбината внедрена технология порционной вакуумной обработки трансформаторной стали, которая позволяет снизить уровень брака по дефекту "пузырь-вздутие" в холоднокатаном листе на Верх-Исетском заводе с 0,76 до 0,36%. Годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составил 240 тыс. руб.

Апробация работ. Основные результаты работы доложены и обсуждены на девятом Всесоюзном совещании по физике и металлургии электротехнических сталей и сплавов, Минск, 1991 г.

Публикации. По материалам диссертации имеются две публикации.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 105 наименований, 18 приложений и содержит 47 страниц машинописного текста, 37 рисунков и 25 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ОСОБЕННОСТИ ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА ПРИ ВЫПЛАВКЕ КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ С НИЗКИМ И ОСОБОНИЗКИМ ЕГО СОДЕРЖАНИЕМ В РАСПЛАВЕ

Процесс окисления углерода, являющийся сложным гетерогенным процессом, исследован в большом количестве работ В.И.Баптизманского, А.М.Бигеева, Д.Гоча, М.Я.Меджибожского, А.Н.Морозова, С.И.Филиппова, В.И.Явойского и др. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях, которые отличаются от промышленных масштабностью, турбулентностью, массопереносом и диффузией. Поэтому представляло интерес изучить процесс обезуглероживания стали в промышленном кислородном конвертере.

Исследования проводили в конвертерном цехе Челябинского металлургического комбината (ЧМК). Металл выплавляли в 160-тонных конвертерах по принятой в цехе технологии. В процессе плавки осуществляли 3...4 повалки конвертера, во время которых отбирали пробы металла, измеряли его температуру и фиксировали продолжительность продувки между повалками. Металл продували кислородом сверху через пятисопловую кислородную фурму (интенсивность продувки - 2,9...3,2 $\text{м}^3/\text{мин}\cdot\text{т}$). Часть плавок проводили с одновременной продувкой аргоном через 36 донных магнетитовых блоков (интенсивность продувки - 0,05...0,07 $\text{м}^3/\text{мин}\cdot\text{т}$). Всего было исследовано три группы плавок (20 шт). По результатам контроля первой группы плавок (6 шт) изучали кинетику окисления углерода в промышленном агрегате в интервале концентрации углерода 3,6...0,06-0,12%.

Две другие группы плавок (по 7 шт) использовали для изучения кинетики окисления углерода при особонизких его концентрациях в интервале 0,10-0,12...0,02-0,03%, при этом одна из этих групп плавок была проведена с продувкой аргоном через фурмы, расположенные в днище конвертера по методу, разработанному В.П.Немченко с соавторами и с использованием установленного оборудования.

Для оценки лимитирующей стадии гетерогенного процесса обезуглероживания расплава железа в кислородном конвертере использовали уравнение формальной кинетики определения порядка реакции $W = \frac{dc}{dt} = kc^n$. Оценку проводили методом сохранения постоянства константы скорости реакции обезуглероживания и графическим методом. Сущность первого метода заключается в следующем. В кинетиче-

ские уравнения нулевого ($dc/dt = -k$ или $k = (C_0 - C)/\tau$), первого ($dc/dt = -kC$ или $k = \ln(C_0/C)/\tau$), второго ($dc/dt = -kC^2$ или $k = (1/C - 1/C_0)/\tau$) и третьего ($dc/dt = -kC^3$ или $k = (1/C^2 - 1/C_0^2)/2\tau$) порядков подставляли экспериментальные данные. Затем проводили оценку сохранения постоянства константа скорости процесса обезуглероживания. В качестве критерия использовали среднее для всех интервалов относительное отклонение $\Delta k = 100\% \cdot (k - k_{\text{ср}})/k_{\text{ср}}$ константы скорости процесса, рассчитанной по приведенным выше уравнениям.

При графическом методе оценки порядка реакции кинетические уравнения нулевого, первого, второго и третьего порядков записывали в виде уравнения прямой, соответственно, $C = -kt + C_0$; $\lg C = (k/2,3)\tau + \lg C_0$; $1/C = kt + 1/C_0$; $1/C^2 = 2kt + 1/C_0^2$. Построив в координатах $C - \tau$; $\lg C - \tau$; $1/C - \tau$; $1/C^2 - \tau$, соответственно, графики методом наименьших квадратов по линейной зависимости оценивали тесноту связи между функцией и аргументом по экспериментальным данным каждой плавки.

Проведя анализ графических данных (рис. 1) и проанализировав результаты расчетов, установили, что в течение большей части плавки в интервале концентрации от 3,6 до 0,06% углерода в расплаве процесс обезуглероживания стали в конвертере наилучшим образом описывается кинетическим уравнением нулевого порядка по углероду $k = (C_0 - C)/\tau$ с коэффициентом линейной корреляции $r = 0,995$. Константа скорости реакции нулевого порядка лежит в пределах $3,0 \dots 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и составляет в среднем $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Записав уравнение Аррениуса $k = A \cdot e^{(-E/RT)}$ в виде $\ln k = -E/RT + A'$, определяли кажущуюся энергию активации (E) процесса обезуглероживания как тангенс угла наклона прямой линии, численно равный E/R , в координатах $\ln k - 1/T$. Следует отметить, что экспериментальные данные в работе были получены в политермических условиях, поэтому при расчетах энергии активации использованы средние значения температуры в этом интервале.

В интервале концентраций 0,10 - 0,12...0,02% углерода процесс обезуглероживания в кислородном конвертере одинаково хорошо описывается кинетическими уравнениями первого и второго порядков по углероду (рис. 2а). Среднее значение константы скорости реакции для уравнений первого и второго порядков, соответственно, $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $0,13 \text{ с}^{-1}$. При комбинированной продувке особониз-

Кинетические кривые изменения концентрации углерода и его функций при продувке металла в 160-т кислородном конвертере для реакций нулевого (0), первого (1), второго (2) и третьего (3) порядков

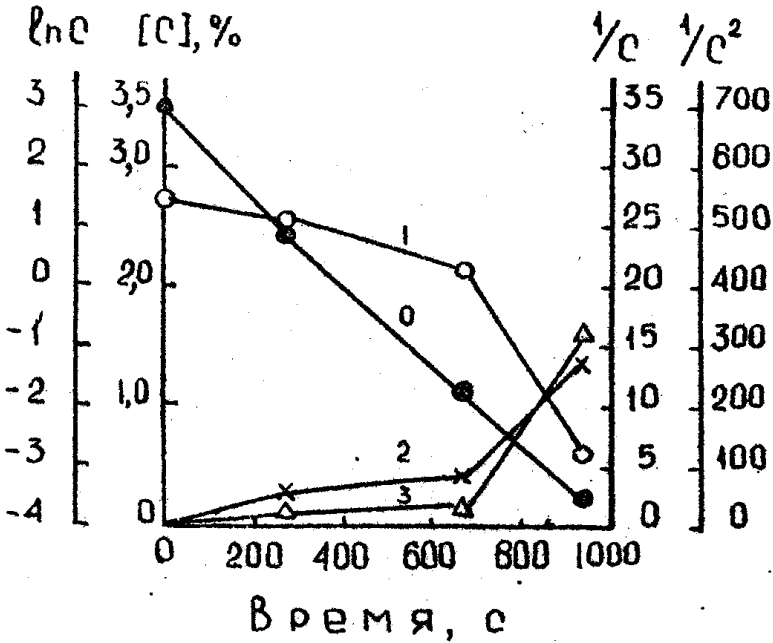


Рис. 1

Таблица

Кинетические характеристики процесса обезуглероживания в промышленном агрегате

Концентрационный интервал, %	Порядок реакции	Константа скорости, c^{-1}	Кажущаяся энергия активации, кДж /моль
3,6...0,06 - 0,12	0	$3,9 \cdot 10^{-3}$	21,6
0,10 - 0,12...0,02	1-2	$6 \cdot 10^{-3}$ - 0,13	298,8
0,10 - 0,12...0,02 с продувкой аргоном	1	$5,5 \cdot 10^{-3}$	70,6

Кинетические кривые обезуглероживания особонизкоуглеродистой стали

в 160-т кислородном конвертере Саз (а) и с продувкой аргоном (б)

для реакций нулевого (0), первого (1), второго (2) и третьего (3) порядков

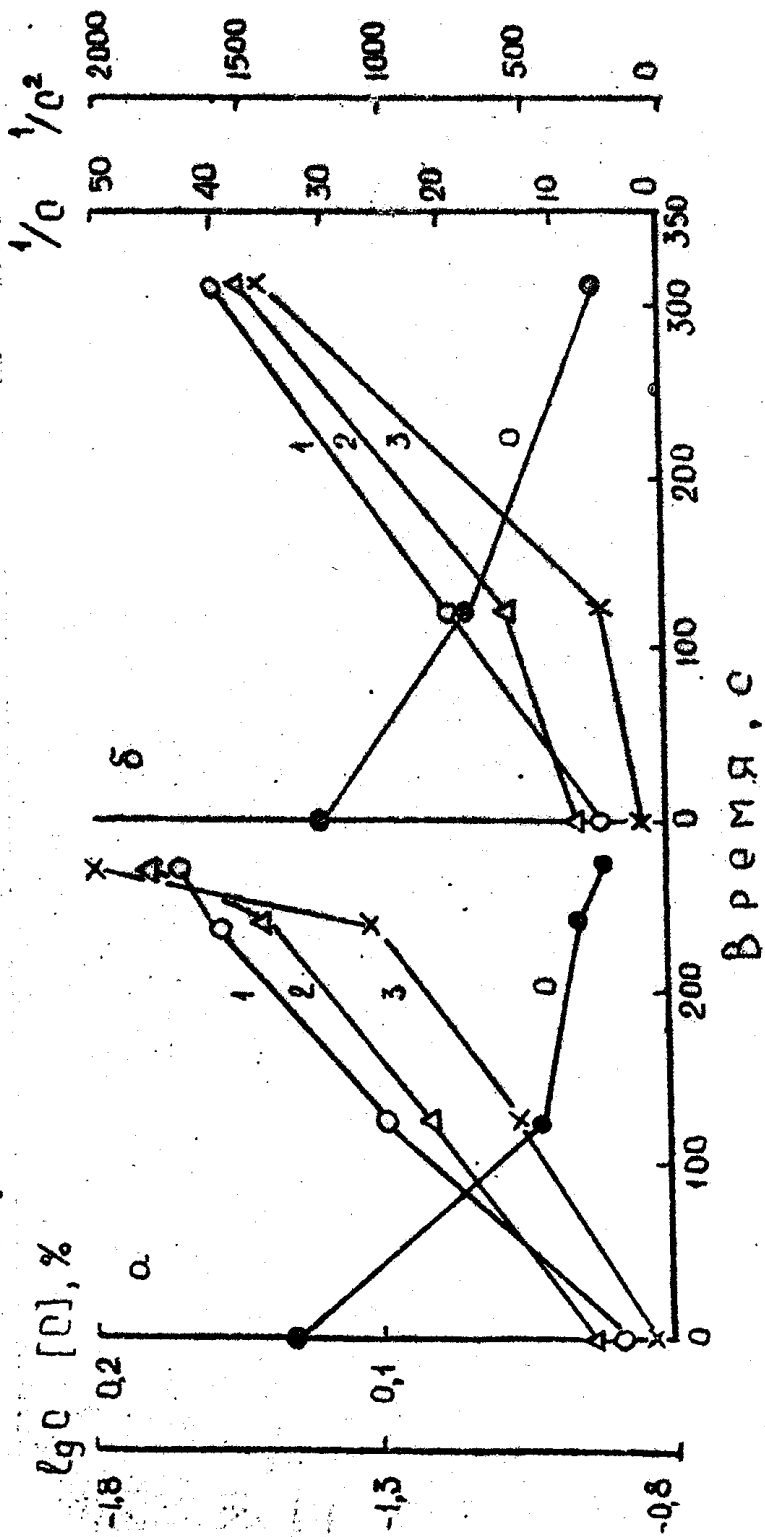


Рис.2

коуглеродистой стали в конвертере (кислородом сверху и аргоном снизу через донные фурмы) этот процесс описывается кинетическим уравнением первого порядка по углероду (рис.26) со средним значением константы скорости $5,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Полученные экспериментальные данные и выполненные на их основе расчеты показывают, что процесс обезуглероживания металла в кислородном конвертере при концентрации углерода 3,6...0,06 - 0,12% описывается кинетическим уравнением нулевого порядка. В интервале концентрации углерода 0,10 - 0,12...0,02 - 0,03% происходит изменение кинетического режима окисления. Эти результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными лабораторных исследований Д.Гоча и С.М.Филиппова и расчетами М.Я.Меджибожского.

Нулевой порядок процесса обезуглероживания при концентрации углерода 3,60...0,06 - 0,12% говорит о том, что в течение большей части плавки лимитирующим звеном этого процесса является внешний массоперенос, т.е. поступление кислорода через неперемешиваемый слой на поверхность металла. В интервалах концентрации углерода 0,10-0,12%...0,02-0,03% процесс окисления одинаково хорошо описывается кинетическими уравнениями первого и второго порядка. Видимо, при данной концентрации углерода лимитирующими стадиями являются одновременно два звена: массоперенос углерода и образование газообразной фазы окиси углерода. Об этом свидетельствует высокое ($298,8 \text{ кДж/моль}$) значение кажущейся энергии активации.

При комбинированной продувке за счет введения в металл готовых газовых пузырей во время продувки аргоном особонизколегированной стали в кислородном конвертере через донные фурмы существенно облегчается стадия молизации и образование газообразной фазы оксида углерода. Поэтому, видимо, происходит смена лимитирующего звена процесс, скорость которого при комбинированной продувке определяется подводом углерода к месту реакции. Об этом говорит первый порядок процесса и относительно небольшая ($70,6 \text{ кДж/моль}$) энергия активации процесса (табл.).

Практическая рекомендация, вытекающая из полученных результатов изучения кинетики окисления углерода в кислородном конвертере, заключается в том, что для получения особонизкого содержания углерода при [C] менее 0,06% необходимо обеспечить, по возможности, интенсивный массообмен в металле, например, продувкой инертным газом, который, к тому же, вносит в металлическую ванну пузырьки газа, на которых может происходить обезуглероживание.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВА АНИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ПО СУЛЬФИДНОМУ И СУЛЬФО-НИТРИДНОМУ ВАРИАНТАМ НА ЕЕ КАЧЕСТВО

Сульфидный вариант производства анизотропной стали основан на использовании в качестве ингибиторной фазы сульфидов марганца и железа. По этому варианту было выплавлено 60 плавок анизотропной стали с раскислением металла рафинированным ферросилицием, а также микролегирование алюминием и сурьмой. Исследовали следующие варианты выплавки стали :

вариант А - раскисление стандартным ферросилицием ФС-69ЭЧ и микролегирование проволочным алюминием на стенде продувки аргоном (34 шт.);

вариант Б - раскисление стандартным ферросилицием ФС-69ЭЧ и микролегирование гранулированным алюминием на вакууматоре ВП-130 (8 шт.);

вариант В - раскисление стандартным ферросилицием ФС-69ЭЧ и микролегирование сурьмой (10 шт.);

вариант Г - раскисление рафинированным ферросилицием ФС-69ЭВЧ (8 шт.).

Особенность выплавки стали по варианту А заключается в том, что алюминий присаживали в ковш в виде бунта проволоки диаметром 8...10 мм за 3...11 мин до окончания продувки аргоном.

Совместно с сотрудниками Всесоюзного НИИ охраны труда и техники безопасности (ВНИИТБ), ЦНИИЧМ и ЧМК изучали экологическую обстановку в рабочей зоне при легировании стали сурьмой. Результаты исследования свидетельствуют о том, что легирование металла сурьмой, разливка и дальнейшие переделы не сопровождаются загрязнением воздуха рабочей зоны соединениями сурьмы в концентрациях, превышающих ЦДК.

Сульфо-нитридный вариант производства анизотропной стали основан на использовании в качестве ингибиторных фаз сульфидов марганца и железа, а также нитридов алюминия. Этот вариант представляет собой сочетание двух основных технологий производства трансформаторной стали, которые характеризуются типом включений, благоприятствующих получению ребровой текстуры.

Согласно техническим условиям трансформаторная сталь, выплавленная по сульфо-нитридному варианту, имеет весьма узкие пределы

по содержанию элементов, % : углерод - 0,015; марганец - 0,05; кремний - 0,25; сера - 0,01 и алюминий - 0,02. Поэтому на стенде продувки аргоном осуществляли корректировку содержания кремния и марганца в металле. А для получения заданных пределов содержания углерода проводили двойную корректировку. Первую корректировочную навеску электродного порошка давали в струю во время перелива во второй ковш, учитывая содержание углерода в металле перед сливом из конвертера. Затем, получив анализ металла из второго ковша, осуществляли дополнительную корректировку содержания углерода путем присадки электродного порошка на поверхность металла во время продувки аргоном на стенде либо на вакууматоре через шлюзовые камеры:

Для более точного и стабильного получения содержания алюминия в достаточно узких пределах, как и в случае с сульфидным вариантом, проводили присадки алюминиевой проволоки в зону продувки за несколько минут до окончания продувки аргоном. Часть плавки после перелива во второй ковш и корректировки содержания кремния, марганца и углерода направляли на вакууматор ВП-130, где производили легирование гранулированным алюминием и вторую корректировку содержания углерода.

Исследовали следующие варианты выплавки:

- вариант А - раскисление стандартным ферросилицием ФС-693С4 и легирование проволочным алюминием на стенде продувки аргоном (27 шт.);
- вариант Б - раскисление рафинированным ферросилицием ФС-693В4 и легирование проволочным алюминием на стенде продувки аргоном (5 шт.);
- вариант В - раскисление стандартным ферросилицием ФС-693С4 на стенде и легирование гранулированным алюминием на вакууматоре ВП-130 (5шт.);
- вариант Г - раскисление стандартным ферросилицием ФС-693С4 и легирование гранулированным алюминием на вакууматоре ВП-130 (11 шт.);
- вариант Д - раскисление стандартным ферросилицием ФС-693С4 и легирование проволочным алюминием при помощи трайб-аппарата на стенде продувки аргоном (6 шт.).

Всего было выплавлено 54 плавки.

Сопоставление электромагнитных свойств опытного металла сульфидного варианта и металла текущего производства показывает,

что испытанные варианты не позволили существенно повысить электромагнитные свойства трансформаторной стали.

Иначе обстоит дело с трансформаторной сталью сульфидно-нитридного варианта выплавки. Этот металл имеет служебные характеристики значительно выше, чем металл текущего производства $B_{100} = 1,747$ Тл. $P_{17/50} = 1,250$ Вт/кг. Увеличилась доля выхода листов высших марок, причем увеличение произошло за счет марок 3407, 3408 и появления новой марки 3409, которая в текущем производстве не встречается. Суммарная доля марок 3409, 3408 и 3407 составила 72,1% против 7,3% на плавках текущего производства.

В работе разработана и опробована технология, имеющая два альтернативных варианта корректировки состава металла на стенде продувки аргоном или в порционном вакууматоре ВП-130.

Эти два альтернативных варианта обеспечивают заданный химический состав металла с узкими пределами содержания основных элементов, что делает его пригодными для дальнейшего передела.

Результаты выполненных исследований использованы ЦНИИЧМ для подготовки сквозной, временной технологической инструкции производства стали по сульфидно-нитриднему варианту.

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ В АНИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ ДЕФЕКТА "ПУЗЫРЬ - ВЗДУТИЕ" И РАЗРАБОТКА МЕР ЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

В процессе производства трансформаторного листа из анизотропной стали возникает дефект "пузырь-вздутие", который проявляется, как в промежуточной горячекатаной заготовке толщиной 24 мм, так и в холоднокатаном трансформаторном листе толщиной 0,30...0,50 мм.

Сложность выявления такого дефекта заключается в том, что визуально он не обнаруживается в промежуточной заготовке (горячекатаном подкате толщиной 2 мм) и им поражены не целые плавки, а только некоторая часть отдельных плавков. В среднем, в масштабах годового производства, с дефектом получается один из двадцати слэбов каждой плавки.

Дефект "пузырь-вздутие" в горячекатаном листе трансформаторной стали толщиной 24 мм иногда обнаруживается в ЛПЦ-1 ЧМК в виде двусторонних пузырей диаметром 300 мм, расположенных приблизительно по оси листа. Дефект "пузырь-вздутие" в холоднокатаном

листе толщиной 0,30...0,50 мм имеет две разновидности. Первая имеет вид пузырей овальной формы шириной 2...8 мм и длиной 4...30 мм. Эти пузыри располагаются строчками, вытянутыми на десятки сантиметров, иногда несколько метров. Вторая разновидность этого дефекта имеет вид полосок или даже ряда полосок, иногда соединенных между собой, шириной 3...5 мм и длиной десятки сантиметров, иногда несколько метров. В ряде случаев вздутие имеет вид втянутых внутрь пузырей.

По ширине холоднокатаного листа дефект "пузырь-вздутие" расположен не хаотично, а достаточно сосредоточено. На 29 образцах листа шириной 750...900 мм можно выделить три области, где встречается этот дефект. Прежде всего - это ось листа. Вторая область расположения дефекта находится в 110...170 мм от края листа и, наконец, третья область, где сосредоточена большая часть пузырей - это область, располагающаяся, в основном, на расстоянии 230...280 мм от края листа. Такое расположение пузырей достаточно хорошо совпадает с расположением в слитке V - образной ликвации ("усов").

Металл исследовали методами оптической и электронной микроскопии. Исследования показали, что внутренняя поверхность пузыря не окислена и имеет вид рваной блестящей поверхности. По своему характеру излом хрупкий. На поверхности излома видны неметаллические включения овальной и остроугольной формы. Для изучения причин зарождения дефекта "пузырь-вздутие" был сделан шлиф устья пузыря в листе толщиной 24 мм. Анализ металла вблизи устья показал наличие несообщающихся между собой пор, размер и количество которых уменьшается по мере удаления от устья и на расстоянии 60 мм практически исчезают. Вблизи устья пузыря металл покрыт сеткой трещин, которые проходят, как по границам, так и через сами зерна. На границе пор и в трещинах встречаются неметаллические включения.

Микроструктуру холоднокатаного трансформаторного листа толщиной 0,30...0,50 мм изучали вблизи пузырей длиной 15...20 мм и шириной 3...8 мм. Из этих участков были приготовлены поперечные и продольные, относительно направления прокатки, шлифы. Кроме того, в ряде случаев пузыри вскрывали и на сканирующем микроскопе "Комебак" изучали состав и структуру внутренней полости дефекта.

Выявлены две разновидности внутренней поверхности полости. Первая разновидность имеет блестящую с металлическим блеском по-

верхность. Другая разновидность внутренней поверхности дефекта имеет матовый налет, состоящий из оксидной неметаллической фазы и покрывающий практически всю внутреннюю поверхность полости. Состав включений внутри полости, в обоих случаях представлен, в основном, оксидами кремния и алюминия. На образцах без налета на блестящей поверхности изредка наблюдаются включения сульфидов марганца, железа и нитридов титана. Кроме того, на внутренней поверхности пузыря встречаются отдельные локальные выделения углерода.

Исследованные образцы шлифов загрязнены неметаллическими включениями, имеющие вид раздробленных строчек и расположенных, в основном, в середине листа. Включения пластичны, но с рваными краями.

Подобного типа включения находятся как в матрице, так и возле дефектных участков. Иногда можно наблюдать переход строчки неметаллических включений в полость с пузырями. Следует подчеркнуть, что перед устьем пузыря, как правило, располагаются строчки включений, которые могут соединять два пузыря между собой. Иногда эти пузыри сообщаются между собой и соединены сплошными неметаллическими включениями. Отдельные вздутия, расположенные вдоль направления прокатки, не являются изолированными, они соединены между собой микротрещинами. Строчечные неметаллические включения могут находиться как в матрице, так и возле дефектных участков, располагаясь над пузырями. На поперечных шлифах встречаются поры размером $10...50 \times 10...20$ мкм.

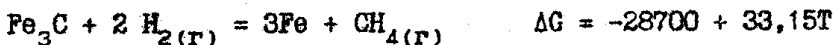
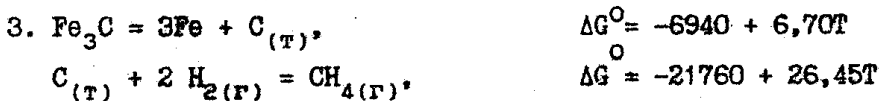
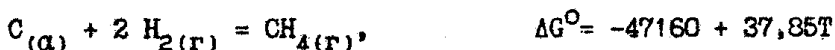
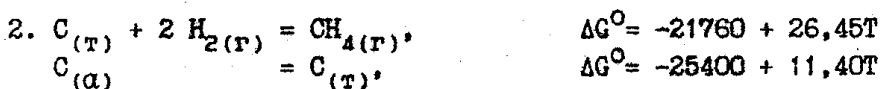
Микрорентгеноспектральный анализ неметаллических включений показал, что включения содержат в основном соединения оксида кремния. В небольшом количестве в этих строчках содержится алюминий, титан, кальций и углерод, причем углерод наблюдается не во всех участках строчечных неметаллических включений.

Анализ показал, что во вздутии находится газ, состоящий из 85,3% метана, 14,2% азота и 0,5% двуокиси углерода. Кислорода, водорода и окиси углерода в этом газе не обнаружено. Таким образом, как видно из состава проанализированного газа, внутри дефекта газ состоит, в основном, из метана.

Состав газа в микропузырях трансформаторного листа толщиной 0,30...0,50 мм определяли косвенным образом, анализируя на углерод участки трансформаторного листа одной плавки с закрытыми пу-

зырями и не имеющими дефекта. Установили что, содержание углерода и азота в металле с пузырями заметно выше, чем в металле без дефекта.

Химический состав газового пузыря в толстом листе, его горичность, повышенное содержание углерода в образцах трансформаторного листа с пузырями, наличие выделений углерода на внутренней поверхности пузыря трансформаторного листа позволяет предполагать, что причиной образования обсуждаемого дефекта является химическая реакция образования метана, протекающая в толще листа металла. Термодинамический анализ возможности протекания реакции образования метана :



показал, что предпочтение следует отдать реакции взаимодействия водорода с углеродом, растворенном в α - железе.

Расчеты, выполненные с использованием уравнения Бойля - Мариотта $P \cdot V = const$ применительно к фактическим геометрическим размерам пузырей в горяче- и холоднокатаном листах при содержании углерода в металле 0,03% и доли метана в газе 85,3%, показали, что содержание углерода в поверхностном слое металла, примыкающем к пузырю, вполне достаточно для образования газового пузыря соответствующего размера.

Анализ полученных результатов позволяет предполагать, что первопричиной образования обсуждаемого дефекта является скопление неметаллических включений в стали. Микротрещины, поры, образующиеся вблизи этих включений, видимо, являются микрополостями, формирующими будущие пузыри.

1 $C_{(a)} = C_{(T)}$ $\frac{1}{-11}$

Как показали результаты исследования дефекта "пузырь-вздутие" в листе трансформаторной стали причиной, инициирующей образование этого дефекта, является скопление неметаллических включений, вблизи которых образуются поры - зародыши будущих пузырей.

Интерес представляет состав оксидной неметаллической фазы вблизи дефектных мест. Как было установлено, оксиды в листе трансформаторной стали представлены в основном алюмосиликатами. Неметаллические включения в металле, разлитом в сквозные изложницы, представлены также строчками силикатов, вытянутых вдоль направления прокатки и расположенных приблизительно по середине листа. Изредка встречаются сульфиды.

Анализ показал, что в устье пузыря, в порах дефекта, помимо алюмосиликатов, содержатся в небольшом количестве и сульфиды марганца.

Таким образом, результаты анализа отбраковки и качественный состав неметаллических включений вблизи дефектов позволяет предположить эндогенный характер неметаллических включений, провоцирующих образование дефекта "пузырь-вздутие".

В связи с предполагаемым механизмом образования дефекта "пузырь-вздутие", любое уменьшение количества неметаллических включений и содержания водорода в исходном металле должно положительно сказаться на качественных показателях трансформаторной стали. С этой целью в КИЦ ЧМК была организована порционная вакуумная обработка трансформаторной стали. Данные исследования показали, что в результате порционного вакуумирования трансформаторной стали из металла удаляется в среднем около $10^{-4}\%$ водорода и около $3 \cdot 10^{-3}\%$ кислорода в виде неметаллической фазы.

В 1988 году в вакууме было обработано 128664,9 тонны трансформаторной стали, что составило 29,4% от общего объема производства. Уменьшение содержания газов и неметаллических включений в трансформаторной стали в результате ее вакуумной обработки позволило существенно снизить отбраковку трансформаторного листа в 1988 году по сравнению с предыдущим годом. Так в 1988 году отбраковка трансформаторного листа на ВМЗ составила 1566,5 тонн, что на 503,6 тонны меньше, чем в 1987 году при приблизительно равном объеме производства этого металла. Причем, если в 1988 году средняя отбраковка по дефекту "пузырь-вздутие" трансформаторного листа на ВМЗ составила 0,75% холоднокатаного трансформатор-

ного листа, то на вакуумированном металле брак составил 0,36%. Это в два раза меньше, чем отбраковка металла текущего производства.

Кроме вакуумирования эффективным методом удаления газов и неметаллических включений из металла является его продувка на стенде аргоном.

Опытным путем установлено, что увеличение длительности продувки металла аргоном во втором ковше снижает отбраковку холоднокатаного листа трансформаторной стали по дефекту "пузырь-вздутие". Влияние на величину отбраковки холоднокатаного листа трансформаторной стали по дефекту "пузырь-вздутие" других факторов (температура металла на переливе, время выдержки его в ковше перед разливкой, характеристика разливки, выдержка состава после разливки) в работе не обнаружено.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Изучена кинетика окисления углерода в металле при производстве низко- и особонизкоуглеродистых сталей в кислородном конвертере. Показано, что при концентрации углерода 0,06...0,12 - 3,6% лимитирующим звеном процесса является внешний (по отношению к металлу) массоперенос. В интервале концентрации 0,02...0,10 - 0,12 лимитирующими звеньями этого процесса являются, по-видимому, внутренний массоперенос и процесс молизации и образования пузырька оксида углерода. Окисление углерода в этом же интервале концентрации при комбинированной продувке описывается уравнением первого порядка, а лимитирующей стадией процесса является внутренний массоперенос. При особо низком содержании углерода в стали (менее 0,10...0,12%) для ускорения его окисления целесообразно интенсифицировать перемешивание ванны в кислородном конвертере и вводить в нее пузырьки газообразной фазы продувочной аргоном через днище.

2. Исследована технология производства трансформаторной стали по сульфидному варианту с микролегированием металла алюминием и сурьмой, а так же рафинированным от алюминия и титана ферросилицием. Спробованные варианты выплавки анизотропной стали по сульфидному варианту не дали существенного прироста электротехнических свойств трансформаторного листа.

3. Разработана технология производства анизотропной стали по сульфо-нитриднему варианту. Предложены и опробованы в промышлен-

ности две технологические схемы выплавки с корректировкой и легированием металла, в одном случае, на стенде продувки аргоном, в другом случае - в порционном вакууматоре. Сульфо - нитридный вариант производства трансформаторной стали позволяет получить лист новой марки с более низкими удельными ваттными потерями - 3409 и увеличить выход выших марок 3407 и 3408 до 66,5%.

4. Исследован дефект "пузырь-вздутие" в горяче - и холодно-катаном листах трансформаторной стали. Изучены природа и место расположения дефекта, проведен металлографический анализ, разработана гипотеза его образования. Разработаны методы, позволяющие уменьшить отбраковку по этому дефекту. Показано, что порционная вакуумная обработка и продолжительная продувка металла аргоном в сталеразливочном ковше существенно уменьшает содержание в трансформаторной стали неметаллических включений и склонность металла к образованию дефекта "пузырь-вздутие".

5. Экономический эффект от внедрения порционной вакуумной обработки трансформаторной стали в конвертерном цехе ЧМК за счет снижения отбраковки холоднокатаного трансформаторного листа составил на ВИЗе 240 тыс. руб в год.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1.Токовой О.К., Поволоцкий Д.Я., Токарев А.В. и Абезгауз М.В. Кинетика обезуглероживания стали в кислородном конвертере// Известия АН СССР. Металлы.-1991.- № 3.- С.27 - 30.

2.Токовой О.К., Поволоцкий Д.Я., Токарев А.В. и др. Раскисление и легирование анизотропной стали сульфо-нитридного варианта выплавки// Девятое Всесоюзное совещание по физике и металлоредению электротехнических сталей и сплавов: Тез. докл.- Минск, 1991.- С.12.

Токарев

Подписано к печати 25.10.91. Формат 60x90 1/16. Печ. л. 1.
Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 286/664.

УОИ ЧИТУ. 454080. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.