

УДК 669.14.018.583

АНАЛИЗ ОБРАЗОВАНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДИНАМНОЙ СТАЛИ

©2024 г. А.А. Жемков^{1*}, А.Ю. Ем^{1*}, А.О. Морозов^{1*}, С.Б. Румянцева^{1*}, К.Ю. Демин^{1*},
О.А. Комолова^{1*}, К.В. Григорович^{1*}, А.С. Тимохин^{2*}, А.О. Зырянов^{2*}, А.И. Дагман^{2*}

^{1*}ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва
E-mail: zhemkov96@mail.ru

^{2*}ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», Липецк

Поступила в редакцию 26 июня 2024 г.

После доработки 27 августа 2024 г. принята к публикации 5 сентября 2024 г.

Динамную (изотропную) сталь применяют в качестве основного материала в двигателях и генераторах, работающих во вращающемся магнитном поле. Легирование кремнием, а также алюминием повышает магнитную проницаемость в слабых и средних магнитных полях, уменьшает коэрцитивную силу, потери на гистерезис и вихревые токи. Сильное влияние на магнитные свойства динамной стали оказывают неметаллические включения. Они препятствуют движению границ доменов при перемагничивании стали, а также могут служить очагами разрушения металла в результате создаваемых вокруг них напряжений. Неметаллические включения образуются в процессах рафинирования, затвердевания и охлаждения металла. В работе проведен анализ технологии производства динамной стали. Методами фракционного газового анализа и электронной микроскопии исследованы пробы металла, отобранные на основных этапах внепечной обработки, из промежуточного ковша, от непрерывно литых заготовок и горячекатаных листов для шести промышленных плавок.

Ключевые слова: динамная сталь; технология производства; ковшовая обработка; раскисление; неметаллические включения; фракционный газовый анализ (ФГА); эрозия футеровки.

Электротехнические стали, представляющие собой сплав железа с кремнием (до 6,5%), являются наиболее значительной по потреблению в области электроэнергетики группой магнитомягких материалов. Легирование кремнием повышает магнитную проницаемость в слабых и средних магнитных полях, уменьшает коэрцитивную силу, потери на гистерезис и вихревые токи. Действие алюминия во многом аналогично действию кремния, так как он увеличивает электросопротивление и снижает индукцию насыщения почти до той же степени [1].

В зависимости от технологии производства электротехнические стали разделяют на холоднокатаные (изотропные или анизотропные; содержание кремния до 3,3%) и горячекатаные (изотропные; содержание кремния до 4,5%). Электротехнические стали также условно разделяют по нормируемым характеристикам магнитных свойств на виды:

трансформаторная (анизотропная), динамная (изотропная), релейная (изотропная, нелегированная). Анизотропная сталь имеет высокие магнитные свойства (высокую магнитную индукцию и низкие удельные магнитные потери) в одном направлении — вдоль направления прокатки; в поперечном направлении прокатки магнитные свойства существенно ниже. Изотропная сталь обладает примерно одинаковыми магнитными свойствами во всех направлениях [2].

Изотропные стали широко используются в качестве основных материалов в двигателях и генераторах, работающих во вращающемся магнитном поле. Магнитная анизотропия в изотропной электротехнической стали весьма нежелательна. Она вызывает более или менее сильную пульсацию магнитного потока прежде всего во вращающихся сердечниках электрических машин, что приводит к неравномерному ходу машины и до-

полнительным потерям электроэнергии, а также отрицательно влияет на эксплуатацию электродвигателей. При изготовлении стали не всегда удается устранить магнитную анизотропию, поэтому в стандартах устанавливают допустимые пределы магнитной анизотропии для изотропных электротехнических сталей [3, 4].

На магнитные свойства электротехнических сталей оказывают влияние: химический состав стали, размер зерна, текстура металла и содержание неметаллических включений (НВ) [5]. Степень влияния НВ на магнитные свойства электротехнической стали зависит от числа НВ, их размеров, состава, формы и создаваемых ими напряжений. При перемагничивании стали НВ препятствуют движению доменных границ, увеличивая магнито-статическую энергию [6, 7].

Основным источником внутренних напряжений в стали является пластическая деформация, приводящая к резкому увеличению степени дефектности решетки. Влияние формы НВ на магнитные свойства стали проявляется в степени и характере искажения кристаллической решетки металла [8]. Включения, имеющие неправильную, остроугольную форму, вызывают сильное локальное искажение матрицы, большие микронапряжения. Пластичные включения глобулярной формы меньше искажают микроструктуру близлежащих объемов и потому слабее воздействуют на магнитные свойства, чем иглообразные и твердые частицы [9, 10].

Неметаллические включения (оксиды, нитриды, сульфиды и сложные комплексные включения) образуются в процессах рафинирования, затвердевания и охлаждения металла. Источниками образования НВ в стали могут служить процессы раскисления стали, вторичное (повторное) окисление расплава и адсорбция азота из воздуха, а также попадание в металл частичек шлака, эрозия огнеупорных материалов и т.д. [11]. Существенное влияние на содержание и морфологию НВ в электротехнических сталях оказывает процесс раскисления металла [12, 13].

При производстве сталей, раскисленных алюминием, широко применяется обработка металла кальцием для модифицирования твердых недеформируемых включений Al_2O_3 . Это способствует формированию жидких включений, их коалесценции и укрупнению с последующим удалением из металла. В то

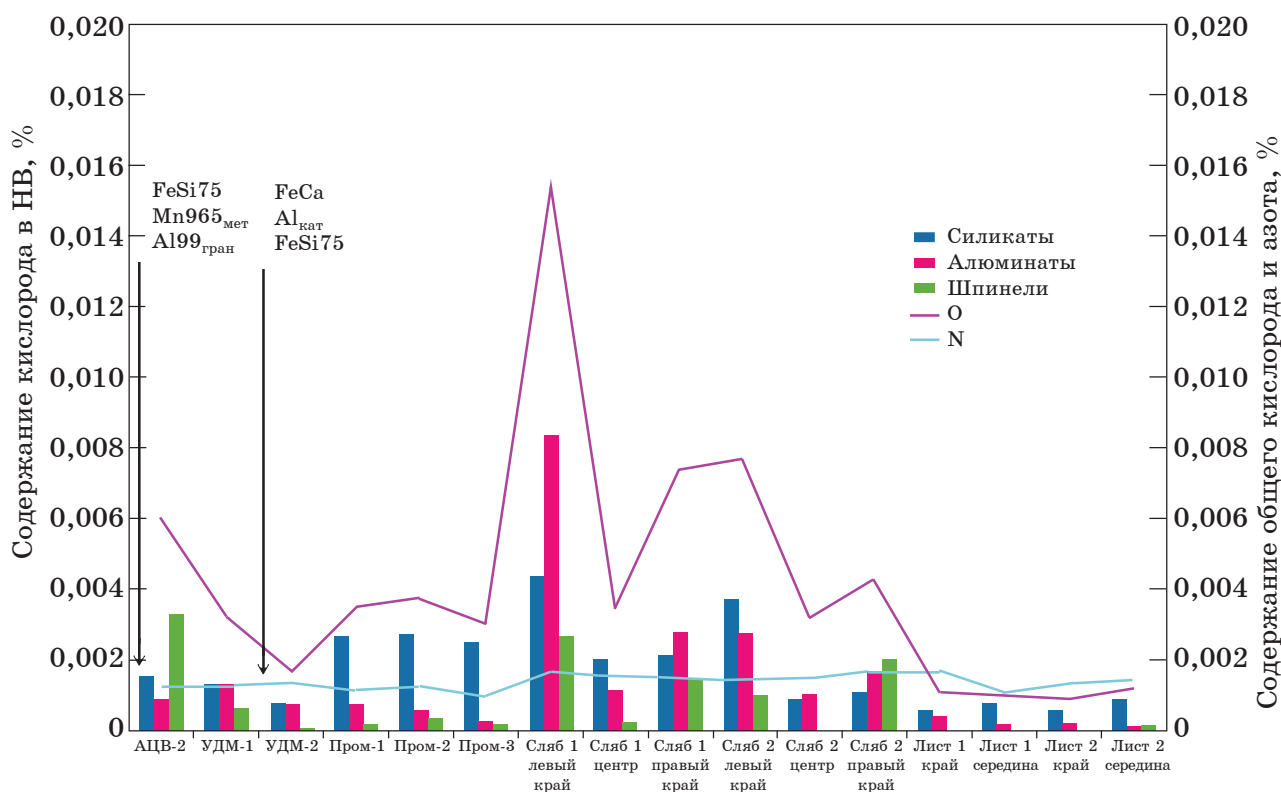
же время включения алюминатов — основная причина «зарастания» сталеразливочной оснастки [14, 15]. Уменьшению содержания НВ и переводу их в шлаковую фазу способствует перемешивание расплава инертным газом (аргоном) через специальные пробки, расположенные в донной части сталеразливочного ковша [16]. Отрицательно влияют на свойства стали и ухудшают качество поверхности проката включения магниевого шпинели. Присутствие магния в составе НВ связано с эрозией огнеупорной футеровки сталеразливочного ковша и с наличием его в составе добавочных материалов [17—19].

Материалы и методы исследования. Технологическая цепочка производства динамной стали включает в себя следующие этапы: 1) выплавка полупродукта в кислородном конвертере (КК); 2) обработка металла на установке печь-ковш (УПК); 3) обработка металла в агрегате циркуляционного вакууматора (АЦВ); 4) обработка на установке доводки металла (УДМ); 5) разливка на машине непрерывной разливки стали (МНРС).

В работе проведен анализ технологии производства динамной стали. Исследованы пробы металла шести промышленных плавок, отобранные на основных этапах внепечной обработки стали (пробы АЦВ-1, АЦВ-2, УДМ-1, УДМ-2), из промежуточного ковша (Пром-1—Пром-3), от непрерывно литых заготовок (Сляб 1, Сляб 2) и горячекатаных листов (Лист 1, Лист 2).

Исследование содержания НВ разного типа в пробах проводили методом фракционного газового анализа (ФГА). Фракционный газовый анализ позволяет определить общее содержание кислорода и азота в пробах металла, содержание кислорода в оксидных НВ разного типа. В основе ФГА лежит метод восстановительного плавления в тигле из графита в потоке несущего газа при заданной линейной скорости нагрева образца [20, 21]. Содержания кислорода в разного типа оксидных НВ, полученные методом ФГА, после пересчета соответствуют объемной доле оксидов данного типа в металле.

Для оценки состава основных типов НВ в пробах металла исследования проводили на электронном микроанализаторе Jeol JXA-iSP100, оснащенном детекторами вторичных (SED) и обратнорассеянных (BED-C) электронов для наблюдения внешнего вида образ-



Фиг. 1. Результаты ФГА проб динамной стали

Средние значения X_{cp} , %, результатов определения содержаний кислорода в разных группах НВ, общего кислорода, общего азота, а также значения СКО, %

Проба (см.фиг.1)	Силикаты			Алюминаты			Шпинели			Общий кислород			Общий азот		
	X_{cp}	СКО	Z	X_{cp}	СКО	Z	X_{cp}	СКО	Z	X_{cp}	СКО	Z	X_{cp}	СКО	Z
АЦВ-2	0,0015	0,0003	0,2	0,0009	0,0002	0,3	0,0033	0,0023	0,7	0,0060	0,0026	0,4	0,0012	0,0003	0,3
УДМ-1	0,0013	0,0007	0,5	0,0012	0,0012	0,9	0,0007	0,0004	0,6	0,0032	0,0015	0,5	0,0013	0,0003	0,2
УДМ-2	0,0008	0,0003	0,4	0,0007	0,0002	0,2	0,0001	0,0000	0,8	0,0017	0,0005	0,3	0,0013	0,0002	0,1
Пром-1	0,0027	0,0008	0,3	0,0007	0,0005	0,6	0,0002	0,0001	0,3	0,0035	0,0012	0,4	0,0011	0,0002	0,1
Пром-2	0,0027	0,0013	0,5	0,0005	0,0004	0,7	0,0003	0,0003	0,8	0,0037	0,0018	0,5	0,0012	0,0002	0,2
Пром-3	0,0025	0,0002	0,1	0,0003	0,0001	0,4	0,0002	0,0001	0,5	0,0030	0,0003	0,1	0,0010	0,0003	0,3
Сляб 1 левый край	0,0044	0,0035	0,8	0,0083	0,0072	0,9	0,0027	0,0011	0,4	0,0154	0,0128	0,8	0,0016	0,0001	0,1
Сляб 1 центр	0,0020	0,0002	0,1	0,0011	0,0012	1,1	0,0002	0,0001	0,6	0,0035	0,0016	0,4	0,0016	0,0001	0,1
Сляб 1 правый край	0,0021	0,0008	0,4	0,0028	0,0039	1,4	0,0015	0,0020	1,4	0,0074	0,0078	1,1	0,0015	0,0001	0,1
Сляб 2 левый край	0,0037	0,0014	0,4	0,0027	0,0021	0,8	0,0010	0,0012	1,2	0,0077	0,0044	0,6	0,0014	0,0001	0,1
Сляб 2 центр	0,0009	0,0003	0,3	0,0010	0,0016	1,6	0,0000	0,0000	—	0,0032	0,0035	1,1	0,0015	0,0001	0,1
Сляб 2 правый край	0,0011	0,0003	0,3	0,0016	0,0018	1,1	0,0021	0,0026	1,3	0,0043	0,0035	0,8	0,0017	0,0002	0,1
Лист 1 край	0,0006	0,0002	0,3	0,0004	0,0001	0,3	0,0000	0,0000	—	0,0010	0,0001	0,1	0,0017	0,0003	0,2
Лист 1 середина	0,0008	0,0002	0,3	0,0002	0,0001	0,4	0,0000	0,0000	—	0,0010	0,0002	0,2	0,0011	0,0003	0,3
Лист 2 край	0,0006	0,0001	0,2	0,0002	0,0001	0,6	0,0000	0,0000	—	0,0009	0,0003	0,3	0,0013	0,0001	0,1
Лист 2 середина	0,0009	0,0003	0,4	0,0001	0,0001	0,1	0,0001	0,0001	0,5	0,0012	0,0004	0,3	0,0014	0,0002	0,2

цов, а также детекторами характеристического рентгеновского излучения: энергодисперсионным (ЭДС) и волнодисперсионным (ВДС) спектрометрами, предназначенными для получения данных о химическом составе образца в точке наблюдения.

Результаты исследования и их обсуждение. На фиг. 1 представлены данные для одной из плавов по изменению содержания общего кислорода и азота, а также содержания кислорода в выделенных группах оксидных НВ. Стрелки указывают на моменты ввода присадок, влияющих на распределение кислорода между оксидными НВ разного типа на этапах внепечной обработки и разливки стали. По результатам ФГА выявлено, что практически весь кислород содержится во включениях силикатов, алюминатов и шпинели.

В таблице приведены средние значения (X_{cp}) результатов определения содержания кислорода в разных группах НВ (силикаты, алюминаты, шпинели), общего кислорода и общего азота, а также значения среднеквадратических отклонений (СКО). Видно, что значения СКО иногда превышают значения средней величины. Для упрощения анализа полученных данных была введена величина Z , равная отношению СКО к среднему значению содержания кислорода ($Z = СКО/X_{cp}$). Высокие значения Z свидетельствуют о неравномерном распределении НВ в исследуемом металле, о большом числе НВ или о наличии большого включения в образце.

Данные фиг. 1 и таблицы показывают, что после ввода в сталеразливочный ковш на этапе вакуумирования раскислителей и шлакообразующих добавок, содержащих кремний, марганец и алюминий, в пробе АЦВ-2 наблюдали определенное количество силикатов, алюминатов и шпинелей (шлаковые включения в данной пробе преобладали над силикатами и алюминатами). Высокое значение величины Z для шпинелей (см. таблицу) говорит о сильной загрязненности пробы металла НВ и о неравномерном их распределении в металле.

В пробе УДМ-1 отмечено снижение содержания общего кислорода. Неметаллические включения в данной пробе перераспределились по сравнению с предыдущей. Высокое значение величины Z для алюминатов (см. таблицу) говорит о неравномерном загрязнении пробы металла включениями.

Перед взятием пробы УДМ-2 была проведена присадка: в расплав вводили FeCa, алюминиевую катанку ($Al_{кат}$) и FeSi75. В пробе УДМ-2 наблюдали снижение содержания общего кислорода и НВ. Однако в пробах Пром-1—Пром-3 всех плавов отмечено повышение содержания кислорода по сравнению с предыдущей пробой УДМ-2. Повышение содержания кислорода и НВ в пробах свидетельствует о возможном влиянии процессов вторичного окисления расплава в промежуточном ковше. Содержание азота в пробах при этом практически не изменилось. В пробах Пром-2 и Пром-3 не наблюдали значительного прироста содержания кислорода и азота по сравнению с предыдущей пробой. Высокое значение величины Z для алюминатов и шпинелей (см. таблицу) говорит о существенной неравномерности распределения НВ в расплаве. В пробе Пром-3 выявлено некоторое снижение содержания общего кислорода и включений.

Для подавляющего большинства проб, отобранных от слэбов, отмечен высокий разброс данных по содержанию кислорода между параллельными определениями. Это свидетельствует о неравномерном распределении НВ в металле слэбов. Для всех проб металла, отобранных от слэбов, получено высокое значение величин Z для алюминатов, для нескольких проб значение Z было высоким и для шпинелей (см. таблицу).

Во всех пробах, отобранных от горячекатаных листов, наблюдалось снижение содержания общего кислорода и числа НВ. В данных пробах обнаружены включения силикатов, отмечается значительно более низкое в сравнении с указанными выше содержание алюминатов; при этом шпинели либо отсутствуют, либо их количество незначительно. Источником обнаруженных в пробах металла шпинелей, алюминатов и силикатов могли быть футеровка или шлак.

Для подтверждения влияния разрушения футеровки была разработана математическая модель, основанная на расчетах материального баланса, т.е. использующая информацию о химическом составе металла, шлака и присадок. По результатам расчетов математической модели действительно происходит разрушение футеровки сталеразливочного ковша во время всей обработки металла, так как при его обработке на УПК даже для тех плавов, на которых не вводили материалы,

содержащие Al_2O_3 , отмечалось увеличение содержания оксида алюминия в шлаке. При содержании Al_2O_3 в конвертерном шлаке на уровне 1—1,5% после ввода извести на УПК содержание Al_2O_3 в шлаке возросло до уровня 6—9%, что может быть вызвано влиянием эрозии футеровки.

Также был проведен анализ изменения содержания углерода на этапах внепечной обработки металла. При обработке стали на АЦВ вакуумно-кислородное обезуглероживание проводили с последующим процессом раскисления-легирования в камере циркуляционного вакууматора. Проба АЦВ-1 была отобрана после процесса обезуглероживания, а проба АЦВ-2 — после раскисления и легирования. В период между этими двумя пробами для всех плавов отмечен прирост содержания углерода в расплаве на 12—17 *ppm*. Исходя из оценки содержания углерода в материалах, введенных при раскислении и легировании, было рассчитано общее количество углерода, которое должно перейти из этих материалов в металл (около 0,8 кг). При пересчете на массовую долю углерода в расплаве этот прирост составил 5 *ppm*. Был сделан вывод, что поступление остальных 7—12 *ppm* углерода (1,05—1,8 кг) в металл вероятнее всего обусловлено разрушением футеровки ковша. С учетом оценки содержания углерода в составе торкретирующей массы было рассчитано, что для увеличения содержания углерода в металле на 7—12 *ppm* должно разрушиться 847—1452 кг торкретирующей массы.

По результатам металлографического анализа проб динамной стали установлен типичный характер загрязненности стали по НВ вне зависимости от плавки, он соответствует этапу, на котором были взяты пробы.

В пробах металла, отобранных на АЦВ, характерно наличие большого количества крупных (до 2 мм) оксидных НВ и протяженных оксидных плен. Состав включений сложный и, как правило, представляет собой комбинацию нескольких оксидных фаз на основе Al, Si, Zr, Ca и Mg. Изображение типичного оксидного НВ в пробе металла, отобранной из АЦВ, во вторичных (SED) электронах, полученное на электронном микроанализаторе Jeol JXA-iSP100 с помощью ВДС, и его элементный состав в точках анализа представлены на фиг. 2, а.

В образцах стали, отобранных на этапе УДМ, присутствует большое количество разнообразных оксидных НВ разного состава на основе системы Al-Mg-Ca-O и плен на основе Al_2O_3 . Электронно-микроскопическое изображение типичного оксидного НВ в пробе металла, отобранной на этапе УДМ, и его элементный состав представлены на фиг. 2, б.

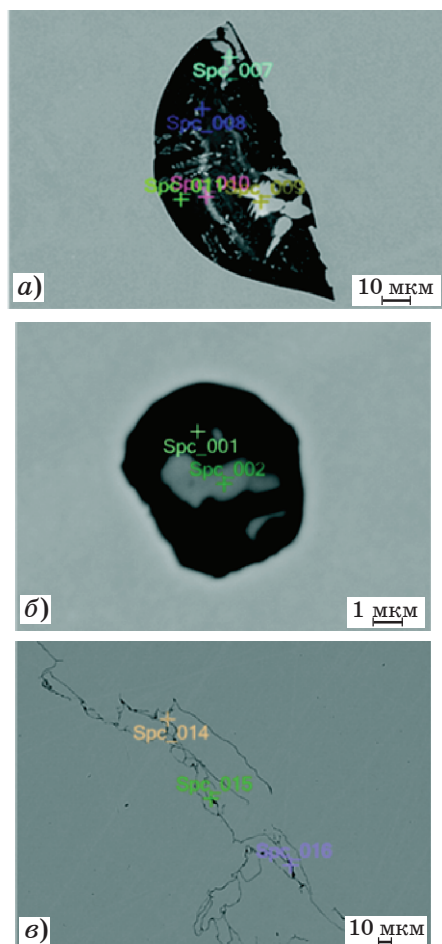
В пробах металла, отобранных из промежуточного ковша, обнаружено большое количество разнообразных оксидных НВ, в том числе крупных (≥ 60 мкм), а также обнаружены плёны размером до 2 мм. Электронно-микроскопическое изображение плёны и ее элементный состав приведены на фиг. 2, в.

Неметаллические включения в образцах, отобранных из слябов, представлены нитридами алюминия AlN и сложными нитридами на основе системы Al-Mg-N. Также выявлено значительное количество сульфидов и оксисульфидов на основе CaS. Как правило, и нитриды, и оксисульфиды являлись многофазными включениями, имеющими оксидное «ядро» на основе Mg-Al-O. Также обнаружены отдельные глобулярные оксиды диаметром до 25 мкм на основе системы Al-Mg-Ca-O. Электронно-микроскопическое изображение НВ в виде сложного агломерата из оксида на основе Al-Mg-N, нитрида AlN и сульфида CaS в образце, отобранном от сляба, и его элементный состав представлены на фиг. 3.

В образцах, отобранных из горячекатаных листов, а именно из центральной части листов, крупные НВ не выявлены. Обнаруженные НВ в основном представлены нитридами алюминия AlN и сложными нитридами на основе системы Al-Mg-N. Изображения типичных НВ во вторичных (SED) электронах нитрида и оксисульфида и их элементный состав в образце, отобранном из толщи горячекатаного листа, представлены на фиг. 4.

В приповерхностном слое горячекатаных листов, непосредственно под окалиной, обнаружены крупные до 100 мкм и более включения Al_2O_3 . Изображение типичного НВ оксида алюминия во вторичных (SED) электронах и его элементный состав в образце, отобранном из приповерхностного слоя горячекатаного листа, приведены на фиг. 5.

Выводы. 1. Проанализированы пробы металла, отобранные на разных этапах ковшовой обработки, из промежуточного ковша,

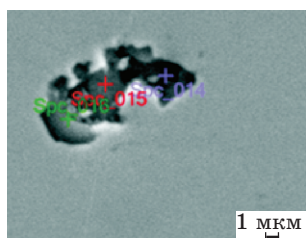


Фиг. 2. Изображения типичных оксидных НВ во вторичных (SED) электронах и их элементный состав в образцах из проб, отобранных на этапах АЦВ (а), УДМ (б) и из промежуточного ковша (в)

Точка	Содержание элемента, мас. %						
	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Zr
Sps_007	29,30	0,39	0,54	—	20,59	0,93	48,24
Sps_008	38,81	3,35	17,29	9,44	24,40	—	6,71
Sps_009	29,03	0,26	1,12	—	21,58	0,47	47,54
Sps_010	38,25	9,44	11,05	10,91	21,63	0,37	8,36
Sps_011	38,76	7,79	16,35	10,14	19,63	0,62	6,70

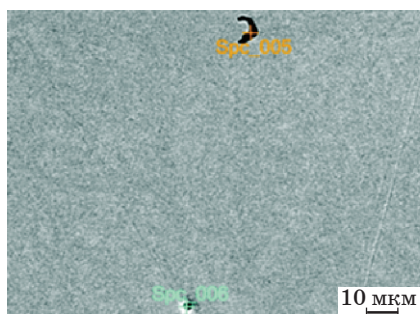
Точка	Содержание элемента, мас. %						
	O	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Fe
Sps_001	33,97	4,20	33,21	8,85	—	13,83	5,95
Sps_002	9,68	0,57	8,82	31,07	0,85	40,86	8,14

Точка	Содержание элемента, мас. %					
	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
Sps_014	22,08	—	23,65	0,78	0,24	53,24
Sps_015	21,11	1,08	20,67	1,54	1,27	54,32
Sps_016	33,84	0,78	30,91	0,70	4,27	29,51



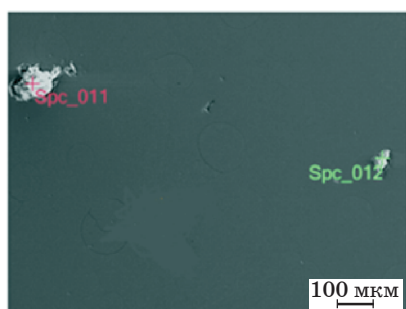
Фиг. 3. Изображение типичного НВ во вторичных (SED) электронах в виде сложного агломерата из оксида на основе системы Al-Mg-N, нитрида AlN и сульфида CaS и его элементный состав в образце, отобранном от слэба

Точка	Содержание элемента, мас. %							
	N	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
Sps_014	3,94	3,63	0,87	13,22	0,66	16,04	29,86	31,77
Sps_015	—	1,9	0,36	2,54	0,30	39,39	45,70	9,81
Sps_016	34,17	2,06	1,91	41,22	—	6,34	8,09	6,16



Фиг. 4. Изображение типичных НВ нитрида и оксисульфида во вторичных (SED) электронах и их элементный состав в образце, отобранном из горячекатаного листа

Точка	Содержание элемента, мас. %							
	N	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
Sps_005	32,27	—	0,98	58,65	2,02	—	—	6,08
Sps_006	—	4,96	8,27	1,85	0,81	4,58	3,21	76,33



Фиг. 5. Изображение типичных НВ оксида алюминия во вторичных (SED) электронах и их элементный состав в образце, отобранном из приповерхностного слоя горячекатаного листа

Точка	Содержание элемента, мас. %	
	O	Al
Spс_011	54,05	45,95
Spс_012	45,05	54,95

от сляба и горячекатаного листа для шести промышленных плавов динамной стали. При исследовании проб металла методами фракционного газового анализа (ФГА) и растровой электронной микроскопией получено следующее. При определении содержания разного типа оксидных неметаллических включений (НВ) в металле методом ФГА установлено, что величина среднеквадратического отклонения (СКО) свидетельствует о значительной неоднородности распределения НВ в металле. По результатам ФГА кислород содержится в НВ типа: силикаты, алюминаты и шпинели. Часть шпинелей, обнаруженных в пробах НВ, образованы за счет циркония, находящегося в составе футеровки (при ее разрушении) и присутствующего в пробоотборнике (в качестве раскислителя); алюминаты и силикаты могли попасть в металл из футеровки или шлака. Результаты анализа проб металла методами ФГА и электронной микроскопии показали значительную загрязненность слябов крупными оксидными НВ.

2. По результатам металлографического анализа проб динамной стали установлено, что вне зависимости от плавки загрязненность стали НВ имеет типичный характер, зависящий от этапа, на котором был проведен отбор проб. В пробах металла, отобранных из АЦВ, характерно наличие большого количества крупных (до 2 мм) оксидных НВ и плён. Состав включений сложный и, как правило, представляет собой комбинацию нескольких оксидных фаз на основе системы Al-Si-Zr-Ca-Mg. В образцах стали, отобранных на этапе УДМ, присутствует большое количество разнообразных оксидных НВ разного состава на основе системы Al-Mg-Ca-O и плён на основе Al_2O_3 . В пробах металла, отобранных из промежуточного ковша, выявлены большое количество разнообразных ок-

сидных НВ, в том числе крупных (≥ 60 мкм), и плёны размером до 2 мм. В образцах, отобранных из слябов, выявленные НВ представлены нитридами алюминия AlN и сложными нитридами на основе системы Al-Mg-N. Также присутствуют в значительном количестве сульфиды и оксисульфиды на основе CaS. Как правило, нитриды и оксисульфиды являются многофазными включениями, имеющими оксидное «ядро» на основе системы Mg-Al-O. Содержатся отдельные глобулярные оксиды диаметром до 25 мкм на основе системы Al-Mg-Ca-O. В образцах, отобранных из горячекатаных листов, а именно из толщи листов, крупные НВ не выявлены. Обнаруженные НВ представлены в основном нитридами алюминия AlN и сложными нитридами на основе системы Al-Mg-N. В приповерхностном слое горячекатаных листов, непосредственно под окалиной отмечено наличие крупных (до 100 мкм и более) включений Al_2O_3 .

3. Разработана математическая модель, основанная на уравнениях материального баланса, результаты расчетов которой указывают на значительное увеличение содержания Al_2O_3 в шлаке на УПК даже на тех плавках, на которых не использовались добавки материалов, содержащих алюминий. По результатам расчета показано, что увеличение содержания Al_2O_3 в шлаке может быть связано с разрушением футеровки сталеразливочного ковша. Наличие крупных алюминатов в центральной части сляба, обнаруженных при металлографических исследованиях, может служить дополнительным подтверждением разрушения футеровки во время разливки. Присутствие в пробах включений, не модифицированных кальцием, указывает на то, что их образование в жидкой стали произошло позже обработки металла кальцием.

4. Отмечен прирост содержания углерода между пробами АЦВ-1 и АЦВ-2 на 12—17 ppm. Исходя из оценки содержания углерода в составе легирующих и раскислителей, вычислена массовая доля углерода, вносимого этими материалами; она составила 5 ppm. В результате сделан вывод, что остальные 7—12 ppm углерода (1,05—1,8 кг) вероятнее всего — результат его перехода в металл футеровки при ее разрушении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Казаджан, Л.Б.* Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов / Л.Б. Казаджан ; под. ред. В.Д. Дурнева. — М. : ООО «Наука и технологии», 2000. 224 с.
2. *Дружинин В.В.* Магнитные свойства электротехнической стали / В.В. Дружинин ; изд. 2-е, перераб. — М. : Энергия, 1974. 240 с.
3. *Moses, A.J.* Electrical steels : past, present and future developments / A.J. Moses // IEE Proceed. 1990. V.137. №5. P.233—245.
4. *Миндлин, Б.И.* Изотропная электротехническая сталь / Б.И. Миндлин, В.П. Настич, А.Е. Чеглов. — М. : Интермет Инжиниринг, 2006. 240 с.
5. *Ying Ren.* Deformation of non-metallic inclusions in steel during rolling process : A review / Ying Ren, Wen Yang, Lifeng Zhang // ISIJ Intern. 2022. V.62. №11. P.2159—2171.
6. *Jose Carlos Santos Pires.* Study of the nature of non-metallic inclusions in samples of aluminum and silicon killed low carbon steels, collected in the refining treatment and continuous casting stages / Jose Carlos Santos Pires, Amauri Garcia // Mater. Res. 2004. V.7. №4. P.517—521.
7. *Yan Luo.* Effect of superheat, cooling rate, and refractory composition on the formation of non-metallic inclusions in non-oriented electrical steels / Yan Luo, Alberto Nava Conejo, Lifeng Zhang, Lingfeng Chen, Lin Cheng // Met. Mater. Trans. B. 2015. V.46. P.2348—2360.
8. *Zhen Li.* Effect of deoxidation process on distribution characteristics of inclusions in silicon steel slabs / Zhen Li, Cheng-Jun Liu, Qun Sun, Mao-Fa Jiang // J. Iron Steel Res. Intern. 2015. №22. P.104—110.
9. *Jiayi Wang.* Effect of non-metallic precipitates and grain size on core loss of non-oriented electrical silicon steels / Jiayi Wang, Qiang Ren, Yan Luo, Lifeng Zhang // J. Magn. Magn. Mater. 2018. V.451. P.454—462.
10. *Zinngrebe, E.* Analysis and significance of non-metallic inclusions in non grain-oriented electrical steel / E. Zinngrebe, P. Šeda, C. van Hoek, B. van Arendonk // ISIJ Intern. 2013. V.53. №11. P.1913—1922.
11. *Qiang Ren.* Effect of oxide inclusions on the magnetic properties of non-oriented electrical steel / Qiang Ren, Lifeng Zhang, Wen Yang // Steel Res. Intern. 2018. V.89. №12. P.1—10.
12. *Shibaev, S.S.* Solubility of oxygen in iron-silicon melts in equilibrium with silica at 1873 K / S.S. Shibaev, P.V. Krasovskii, K.V. Grigorovitch // ISIJ Intern. 2005. V.45. №9. P.1243—1247.
13. *Шубаев, С.С.* Раскисление кремнием и контроль оксидных включений в электротехнических сталях / С.С. Шубаев, П.В. Красовский, К.В. Григорович // Металлы. 2006. №2. С.14—27.
14. *Xingle Fan.* The effect of aluminum addition on the evolution of inclusions in an aluminum-killed calcium-treated steel / Xingle Fan, Lifeng Zhang, Ying Ren, Wen Yang, Songjie Wu // J. Magn. Magn. Mater. Metals. 2022. V.12. №181. P.1—11.
15. *Qiang Ren.* Effect of calcium treatment on magnetic properties of non-oriented electrical steels / Qiang Ren, Wen Yang, Lin Cheng, Zhiyuan Hu, Lifeng Zhang // J. Magn. Magn. Mater. 2020. №494. P.1—8.
16. *Экхардт, Г.* Механизм очистки стали от неметаллических включений в раскисленных алюминием сталях / Г. Экхардт // Новые огнеупоры. 2013. №4. С.16—23.
17. *Pretorius, E.* The effective modification of spinel inclusions by Ca treatment in LCAK steel / E. Pretorius, H. Oltmann, T. Cash // Iron and Steel Techn. 2010. V.7. №7. P.31—44.
18. *Steiner Petrovic, D.* Magnesium non-metallic inclusions in non-oriented electrical steel sheets / D. Steiner Petrovic, B. Arh, F. Tehovnik, M. Pirnat // ISIJ Intern. 2011. V.51. №12. P.2069—2075.
19. *Yan-Hui Sun.* Formation mechanism and control of MgO·Al₂O₃ inclusions in non-oriented silicon steel / Yan-Hui Sun, Ya-Nan Zeng, Rui Xu, Kai-Ke Cai // Intern. J. Miner. Met. Mater. 2014. V.21. №11. P.1068—1076.
20. *Григорович, К.В.* Фракционный газовый анализ — новое направление в контроле качества материалов / К.В. Григорович // Аналитика и контроль. 2000. Т.4. №3. С.244—251.
21. *Григорович, К.В.* Фракционный анализ кислорода в металлах — особенности и возможности метода / К.В. Григорович // Аналитика и контроль. 2002. Т.6. №2. С.151—159.