



- М. И. Гасик /д. т. н./, Л. И. Гасик, А. П. Горобец** Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепро, Украина
e-mail: gasikmi@ua; gorobets.dnepr@gmail.com
- Ю. В. Климчик** ООО «ИНТЕРПАЙП УКРАИНА»,
г. Днепро, Украина
e-mail: yuriy.klimchik@interpipe.bis
- Д. А. Чайка** ООО «МЗ «Днепросталь», г. Днепро, Украина
e-mail: Dmitriy.Chayka@ips.interpipe.bis
- Ю. Н. Бортников** ЧАО «Электрометаллургический завод «Днепрспецсталь», г. Запорожье, Украина
e-mail: bortnikov.iur@gmail.com

Экспериментальное прецизионное исследование типов и химсоставов неметаллических включений в радиальном сечении железнодорожной оси методом электронной микроскопии и рентгеноспектральным микроанализом

- M. I. Gasik /Dr. Sci. (Tech.), L. I. Gasik, A. P. Gorobets** National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine
e-mail: gasikmi@ua; gorobets.dnepr@gmail.com
- Y. V. Klimchik** "INTERPIPE UKRAINE" LLC, Dnipro, Ukraine
e-mail: yuriy.klimchik@interpipe.bis
- D. A. Chaika** JSC "MP "Dniprosteel", Dnipro, Ukraine
e-mail: Dmitriy.Chayka@ips.interpipe.bis
- Yu. N. Bortnikov** Electrometallurgy Plant "Dneprospecsteel", Zaporozhye, Ukraine
e-mail: bortnikov.iur@gmail.com

Experimental precision study of types and of chemical composition of nonmetallic inclusions in radial section of the railway axis by the method of the electronic microscopy and x-ray spectral micro analysis

Цель. Исследование типов и состава неметаллических включений в радиальном сечении черновой железнодорожной оси, полученной после деформационного передела из непрерывнолитой заготовки.

Методика. Исследования морфологии и элементного состава включений выполнены на образцах стали EA1N с применением электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа.

Результаты. Установлено, что при охлаждении расплава и кристаллизации металла непрерывнолитой заготовки формируются включения, близкие по составу к квазиравновесным состояниям двойных и тройных оксидных систем, фазовые составляющие которых определяются соотношением активных концентраций элементов Са, Mg и Al. В исследованных образцах осевого металла не идентифицированы силикатные включения, как в виде самостоятельной фазы, так и в составе гетерофазных оксидных включений, что свидетельствует о преобладающем участии в реакциях раскисления их абсолютных содержаний и, что более важно, соотношении термодинамических активностей элементов с раскислительными и десульфуризирующими свойствами.

Научная новизна. Определено, что включения в осевой стали представлены в основном гетерофазной структурой, включающей магнезиально-корундовую матрицу шпинелидного типа и периферийную зону сульфидной фазы на основе сульфида CaS. Идентифицировано изовалентное замещение в шпинели катионов Mg_{2+} и Al_{3+} катионами соответствующих валентностей Cr_{3+} , Ti_{3+} с образованием твердых растворов $(Mg, Fe)O \cdot (Al, Cr, Ti)_2O_3$. Установлено, что в ходе охлаждения расплава и кристаллизации осевой заготовки формируется сульфидная фаза с изовалентным замещением катионов Ca_{2+} катионами Mn_{2+} с образованием сульфида комплексного состава $(Ca_{1-x}Mn_x)S$.

Практическая значимость. Результаты проведенного исследования определяют режимы раскисления и легирования осевого металла при внепечной обработке на установках печь-ковш и камерном вакууматоре. (Ил. 10. Табл. 3. Библиогр.: 6 назв.)

Ключевые слова: железнодорожная ось, сталь EA1N, внепечная обработка, непрерывнолитая заготовка, деформационный передел, неметаллические включения, электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, типы и составы включений.

DOI: 10.33101/S005-2343455

Постановка задачи исследования. Качество осей с осевой нагрузкой 25 тс тележек вагонов подвижных составов железнодорожного транспорта из непрерывнолитых заготовок должно соответствовать нормам сдаточного контроля по стандарту EN 13261:2009. Повышаются требования к качеству осей с нагрузкой до 27 тс [1]. Непрерывнолитые заготовки в условиях современного сталеплавильного комплекса получают по многостадийной технологической схеме, включающей выплавку металла полупродукта в сверхмощной электропечи с эркерным бесшлаковым выпуском его в ковше, первичную внепечную обработку металла в ковше раскислителями алюминием и ферросиликомарганцем (ферросилицием), науглероживателем, твердыми шлакообразующими материалами (ТШМ), обработку стали на установке ковш-электропечь, в

вакууматоре с последующей разливкой на МНЛЗ с получением заготовки и технологию изготовления прокаткой – ковкой железнодорожных осей.

Ниже приведен химсостав осевой стали марки EA1N в соответствии с требованиями стандарта EN 13261:2009 (табл. 1).

В макроструктуре заготовок регламентируются возможные дефекты, как-то: раковины, расслоения, завороты корок, газовые пузыри, трещины, экзо- и эндогенные неметаллические включения и шлаковые включения. Перечень дефектов макроструктуры, условные обозначения и допускаемые величины дефектов приведены в табл. 2.

Качество металла осей контролируется по типу и количеству (в баллах) неметаллических включений (табл. 3) по нормирующим методам испытаний (ASTME-45, метод А и др.).

Таблица 1

Требования стандарта EN 13261:2009 к химсоставу из углеродистой стали EA1N

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %									
	C	Mn	Si	V	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
EA1N	≤ 0,40	≤ 1,20	≤ 0,5	≤ 0,06	≤ 0,020	≤ 0,02	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,008

Таблица 2

Классификация дефектов макроструктуры непрерывнолитых заготовок осевой стали с оценкой их величин в баллах по СОУ МПП 77.040-191:2007

Наименование дефекта	Условное обозначение	Величина дефекта (балл, не более)
Осевая пористость	ОП	2
Осевая ликвация	ОЛ	2
Трещины осевой зоны	ТО	1
Ликвационные полоски и трещины по сечению	ПТС	1
Точечная неоднородность краевая	ТНК	1
Внеосевая химическая неоднородность	ВХН	1

Таблица 3

Максимальные значения величин для включений большой и малой толщины по ISO 4967:1998 метод А

Тип включения	Категория 1		Категория 2	
	Большой толщины (макс.)	Малой толщины (макс.)	Большой толщины (макс.)	Малой толщины (макс.)
А (сульфиды)	1,5	1,5	1,5	2
В (алюминаты)	1	1,5	1,5	2
С (силикаты)	1	1,5	1,5	2
Д (глобулярные оксиды)	1	1,5	1,5	2
В+С+D	2	3	3	4

Ниже излагается методика и результаты электронно-микроскопического и рентгеноспектрального анализа неметаллических включений в приповерхностном слое железнодорожной оси диаметром 225 мм.

Методика исследования. Образец стали EA1N для исследования неметаллических включений отобран из оси Ø 225 мм из приповерхностного слоя в радиальном сечении оси плавки № 1180157 (ось серии 8) следующего химического состава:

Наименование элемента	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Cu	V ≤
Содержание элемента, % масс.	0,36	0,21	0,87	0,013	0,004	0,12	0,10	0,022	0,17	0,005

Сталь плавки № 1180156 была подвергнута комплексной внепечной обработке и разлита на МНЛЗ с получением заготовки диаметром 470 мм.

Исследование включений образца металла из приповерхностного слоя оси производилось на участках шлифа с наибольшим содержанием включений при помощи растрового электронного микроскопа «SUPRA-40WDS», оснащенного приставкой для рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) химического состава включений.

Методика получения результатов исследований состояла в обобщении электронных изображений и химсоставов неметаллических включений на шлифе. Анализ РСМА предусматривал выявление однотипных включений и оценку их принадлежности к определенным типам – сульфидным (А), алюминатным (В), силикатным (С) и глобулярным (D) [2].

Изложение материалов исследования. На рис. 1 представлено электронное изображение участка приповерхностного слоя оси шлифа с четырьмя включениями с указанием масштабного размера (600 мкм).

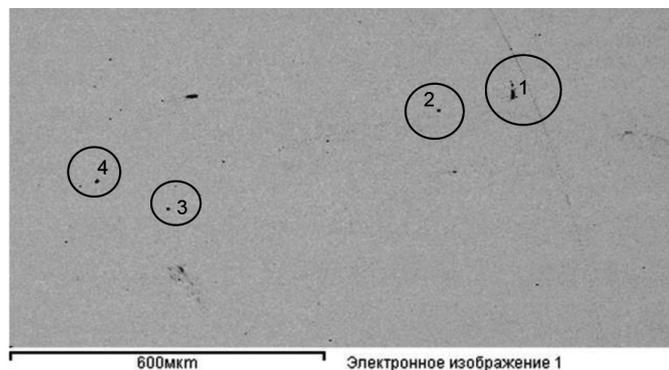
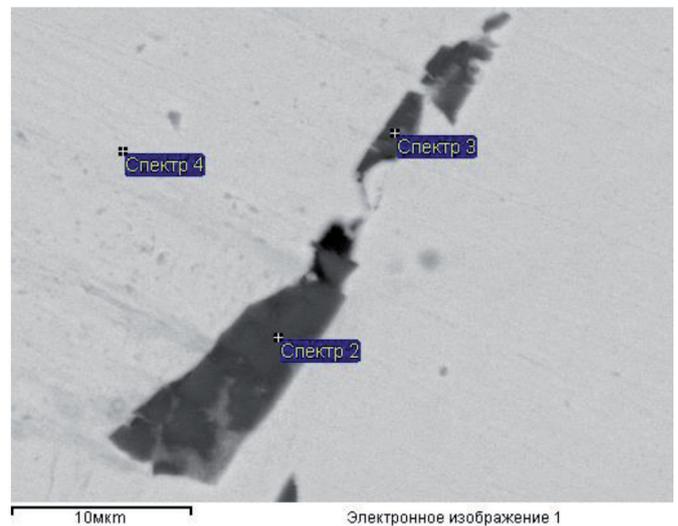


Рис. 1. Электронное изображение расположения включений на участке 1 шлифа образца № 1 приповерхностного слоя оси:
цифры – порядковые номера включений, окружности нанесены для указания места положения и размера соответствующего включения на шлифе

Анализ химического состава и структуры неметаллического включения № 1. Три из четырех (спектры 2, 3 и 4) имеют по сравнению с включением №1 (спектр 1) очень малые параметры и округленный «точечный» вид (рис. 2). Вместе с тем включение № 1 (масштабная величина изображения на шлифе 10 мкм) представляет сравнительно большую раздробленную оксидную структуру эндогенного происхождения и не связано с процессом раскисления, легирования металла и обработкой на установке УКП.

По отношению % Al : % О в составе включения (спектры 2 и 3), равному 1,13 и 1,15 соответственно, его можно отнести к глиноземистому типу (α-корунду), в котором % Al : % О составляет 1,125.

Кристаллическая решетка α-Al₂O₃ относится к ромбоэдрической сингонии: *a* = 0,512 нм, α = 55,25° [3]. В общем, включение корунда можно характеризовать с большой степенью достоверности как редкое явление попадания части глиноземистого огнеупорного покрытия погружного стакана при подаче металла в кристаллизатор. Из-за высокого содержания кислорода при раскислении металла полупродукта в ковше алюминием в локальных объемах металла могут образовываться герценит FeO·Al₂O₃ и корунд (α-Al₂O₃) [4].



Спектр	Содержание элементов, % масс.					
	O	Al	Si	Ti	Cr	Mn
Спектр 2	46,21	52,29	-	1,49	-	-
Спектр 3	45,08	52,22	-	1,59	0,63	0,45
Спектр 4	-	-	0,32	-	-	0,80

Рис. 2. Электронное изображение неметаллического включения 1 и химсоставы зондированных участков включения по данным РСМА

В α - Al_2O_3 могут растворяться элементы Ti^{3+} , Cr^{3+} и др., поступающие с металлошихтой, образуя твердые растворы замещения $(\text{Al}_{1-x}\text{Ti}_x)_2\text{O}_3$. Замещение в корунде иона Al^{3+} ионом Ti^{3+} (радиусы ионов $r_{\text{Al}^{3+}} = 0,057$ нм, $r_{\text{Ti}^{3+}} = 0,057$ нм) сопровождается увеличением межплоскостного расстояния Δd решетки корунда [5]. Предельная насыщенная концентрация Ti^{3+} (или точнее $\text{Ti}_2^{3+}\text{O}_3$) зависит при прочих равных условиях от температуры и описывается уравнением [6]:

$$\lg N_{\text{Ti}_2\text{O}_3} = -\frac{4320}{T} + 2,56.$$

Вблизи температуры плавления корунда (2053 °С) равновесная концентрация Ti_2O_3 в α - Al_2O_3 составляет $\gg 5$ % масс.

В составе включения (спектры 2 и 3) содержится хром в количестве 2,82 и 0,63 % соответственно, который также может входить в α - Al_2O_3 с образованием твердого раствора $(\text{Al}_{1-x}\text{Cr}_x)^{3+}_2\text{O}_3$. Ионный радиус Cr^{3+} $r_{\text{Cr}^{3+}} = 0,615$ нм, что допускает замещение иона Al^{3+} ионом Cr^{3+} с увеличением кристаллической решетки.

По данным РСМА (спектр 4), в стальной матрице шлифа содержится 0,80 % Mn и 0,32 % Si

при отношении этих элементов 2,5, что согласуется с требованиями EN 13261:2009. Как отмечалось выше, содержание Mn и Si в стали E1AN ограничивается значениями 1,2 % Mn и 0,5 % Si (отношение % Mn : % Si равно 2,4).

Анализ химического состава и структуры неметаллического включения № 2. Включение 2 (рис. 3), содержащее 56,02 % Ca и 43,03 % S по ISO 4967:1998 (метод А) относится к типу А (сульфиды). Отношение % Ca : % S в составе включения равно 1,30, что близко к значению этого отношения в сульфиде кальция CaS стехиометрического состава, равного 1,25.

Содержание марганца в матрице шлифа равно 0,03 % и кремния 0,23 %, при этом отношение % Mn : % Si составляет 4,47.

Проведенный анализ состава сульфидного включения подтверждается результатами изменения содержания элементов во включении вдоль линий сканирования (рис. 3).

Электронное изображение неметаллического включения № 3 (масштабный фактор 5 мкм) с указанием мест определения и химсостава участков включения (спектры 2, 3 и 4) представлено на рис. 4.

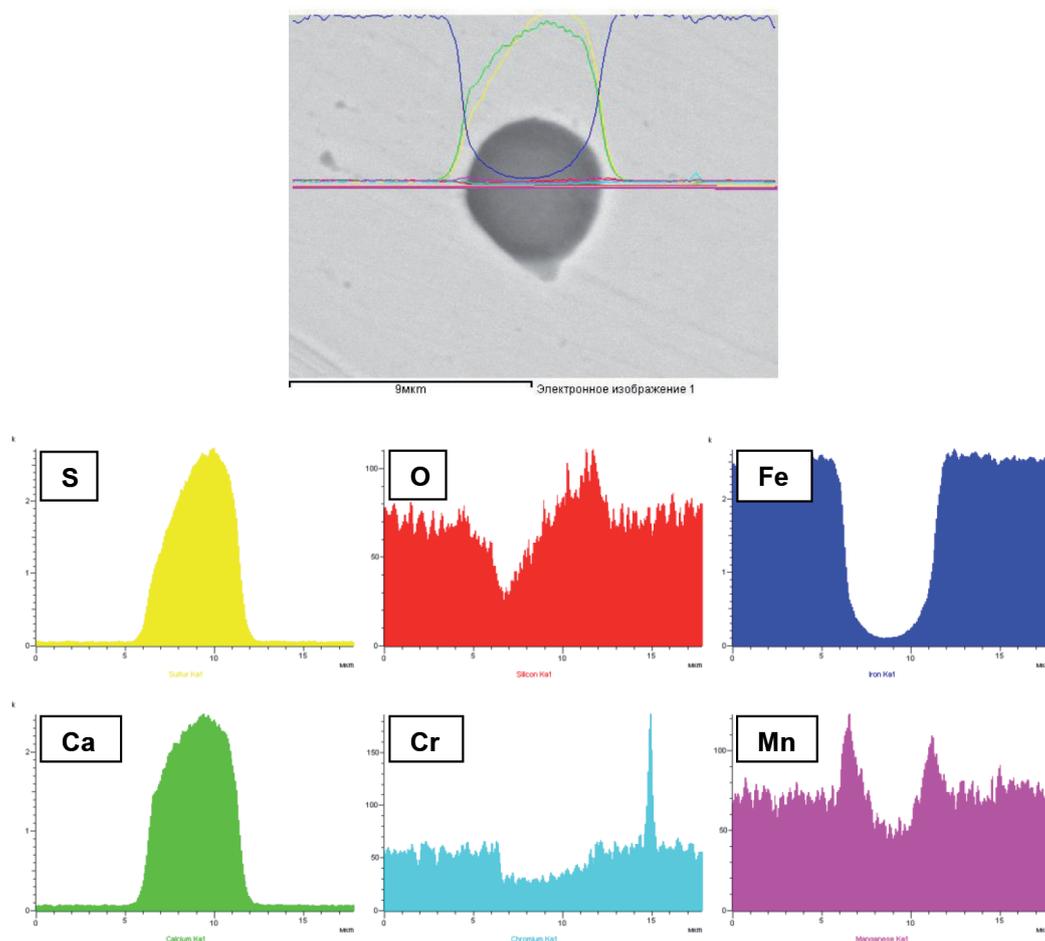
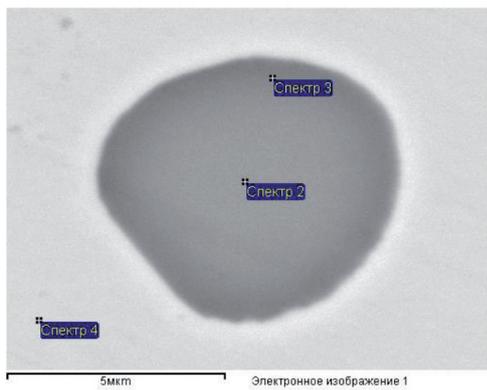


Рис. 3. Электронное изображение неметаллического включения № 2 и распределение химических элементов вдоль линии сканирования



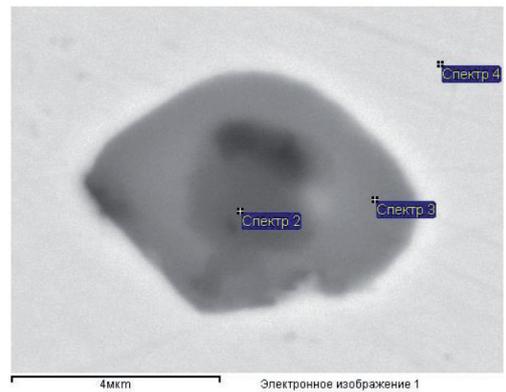
Спектр	Содержание элементов, % масс.						
	Mg	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn
Спектр 2	1,64	0,34	-	43,50	38,40	-	16,12
Спектр 3	1,84	-	-	44,00	35,87	-	18,28
Спектр 4	-	-	0,23	-	-	-	0,87

Рис. 4. Электронное изображение неметаллического включения с указанием химсостава (спектры 2 и 3) и матрицы (спектр 4) по данным РСМА

Анализ химического состава и типа неметаллического включения № 3. Суммарное содержание элементов Ca, Mn и S по данным РСМА суммарного спектра составляет 96,38 %, а сумма % Ca + % Mn (спектр 3) равна 54,15 %. Отношение (% Ca + % Mn) / % S = 1,23. Близкие значения элементов Ca, Mn и S спектров 2 и 3 позволяют представить сульфидное включение типом (A) и формулой комплексного сульфида $(Ca_{1-x}Mn_x)S$.

Анализ химического состава и определение типа неметаллического включения № 4 (участок 1 шлифа). На электронном изображении гетерофазного неметаллического включения № 4 указаны два спектра зондирования: спектр 2 центральной части и спектр 3 периферийной части поля включения. Химические составы различающихся составляющих частей включения по данным РСМА приведены совместно с электронным изображением включения (рис. 5).

Анализ химсостава центральной части включения свидетельствует о неоднородности минерального состава, что, в общем, может быть отнесено к сложной шпинелидо-сульфидной композиции с плавным переходом к явно сульфидной периферийной части. Высокое содержание марганца в составе минеральной периферийной сульфидной части включения свидетельствует о комплексном сульфиде системы Ca – Mn – S состава 39,97 % Ca + 13,25 % Mn (в сумме 53,22 %) и 40,36 % S. Отношение (% Ca + % Mn) / % S составляет 1,32, что согласуется с отношением % Ca / % S в чистом



Спектр	Содержание элементов, % масс.								
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Σ, %
Спектр 2	40,43	6,19	20,63	0,42	14,07	14,36	-	3,14	98,82
Спектр 3	3,57	0,35	3,23	-	40,36	39,27	-	13,27	100,05
Спектр 4	-	-	-	0,33	-	-	-	1,18	100,00

Рис. 5. Электронное изображение гетерофазного неметаллического включения с указанием спектров зондирования центральной и периферийной частей включения и матрицы шлифа

сульфиде CaS. Распределение элементов между минеральными фазами и изменение концентрации элементов вдоль линии сканирования характеризуют сложный фазовый состав центральной части включения № 4 (рис. 6).

При тщательном рассмотрении данных рис. 6 можно однозначно подтвердить синхронное изменение концентрации двух пар элементов: Mg (желтая линия) – Al (зеленая линия) и Ca (синяя линия) – S (темная линия с синеватым оттенком). Кислородное соединение Mg и Al представлено минеральной фазой, называемой шпинелью* $MgO \cdot Al_2O_3$, а серосодержащее соединение Ca и S – сульфидом кальция с растворенным в нем марганцем, т.е. $(Ca_{1-x}Mn_x)S$.

Состав соединения $MgO \cdot Al_2O_3$, называемого шпинелью, имеет кубическую структуру и выражается формулой AB_2O_4 , где А – двухвалентный катион Mg^{2+} , расположенный в тетраэдрической позиции, В – трехвалентный катион Al^{3+} в октаэдрической позиции (рис. 7).

Катион Mg^{2+} в шпинели может замещаться близкими по значению атомных радиусов катионами Fe^{2+} и др., а Al^{3+} катионами Cr^{3+} и др.

Анализ химического состава и структуры неметаллических включений в образце № 1 (участок 2 шлифа). Электронное изображение двух неметаллических включений в приповерхностном слое радиального сечения оси на втором участке шлифа и мест зондирования включения, отмеченных соответствующими спектрами № 2–7, и

*Шпинель ($MgAl_2O_4$) – от латинского spinella – небольшой шип, назван по остроугольной форме кристалла; куб – гексаоктаэдрическая сингония. Твердость по шкале Мооса 18, плотность 3,53–3,65.

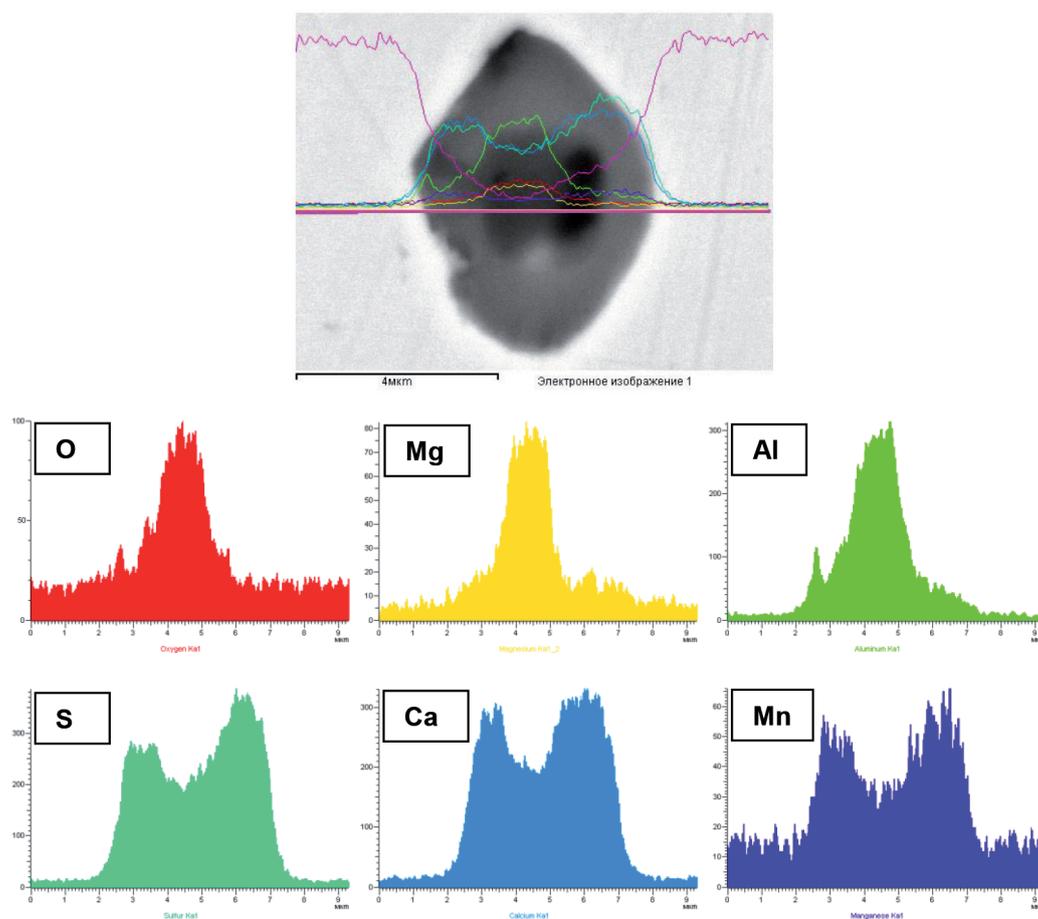


Рис. 6. Электронное изображение гетерофазного неметаллического включения, распределение элементов между центральной и периферийной частями его, а также изменение концентрации этих элементов вдоль линии сканирования

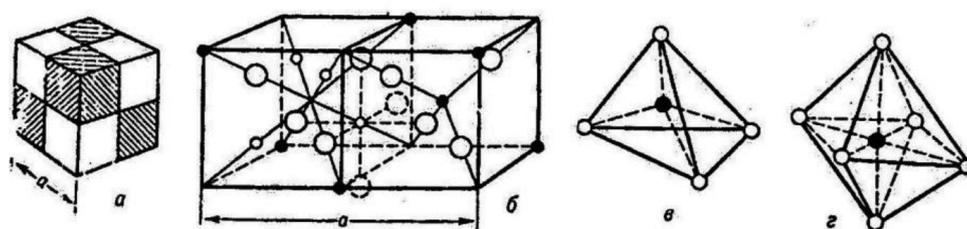


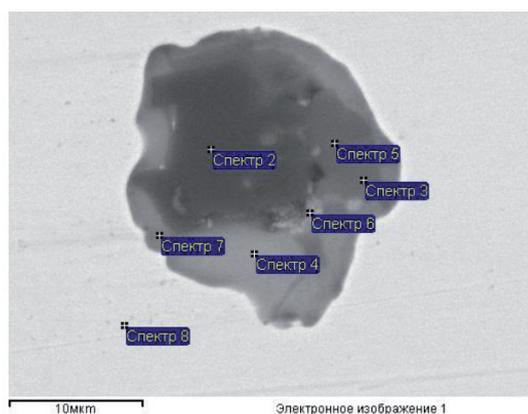
Рис. 7. Кристаллическая структура ферритов-шпинелей:

а – схематическое изображение элементарной ячейки шпинельной структуры, состоящей из восьми октантов; б – расположение ионов в смежных октантах ячейки; белые кружки – ионы O^{2-} , образуют остов; черные – ионы металлов в октаэдрических и тетраэдрических промежутках; в – ионы металлов в тетраэдрическом промежутке; г – ионы металлов в октаэдрическом промежутке

матрицы шлифа 8 представлено на рис. 8, а ниже табулированы результаты определения методом РСМА химического состава зондированных мест гетерофазного включения.

Для анализа минеральных образований в структуре гетерофазного состава при помощи РСМА выполнено исследование распределения элементов в составе включения при сканировании элементов в условиях непрерывного перемещения под электронным лучом (рис. 9).

Анализ хода линий, характеризующих изменение содержания соответствующего элемента в составе включения, показывает, что центральная часть его представлена картами алюминия (слабо-зеленая линия) и магния (желтая линия). Как было установлено выше, такое сочетание кислородного соединения магния и алюминия представляет магнезиально-глиноземистую шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$. Стехиометрический состав шпинели при нормальных условиях 27,66 % MgO и



Спектр	Содержание элементов, % масс.								
	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Cr	Mn
Спектр 2	44,03	15,76	38,26	-	0,16	-	3,30	-	14,50
Спектр 3	39,22	-	18,67	8,44	2,36	-	30,30	1,01	-
Спектр 4	-	0,22	0,74	-	43,79	-	54,58	-	0,54
Спектр 5	41,17	-	30,01	1,35	0,24	0,14	27,07	-	-
Спектр 6	31,87	2,59	8,12	8,12	3,67	-	6,94	45,28	5,50
Спектр 7	6,87	2,59	5,53	-	33,26	-	45,95	-	5,51
Спектр 8	-	-	-	-	-	-	-	0,23	1,00

Рис. 8. Электронное изображение неметаллического включения в приповерхностном слое радиального сечения железнодорожной оси (образец 1, участок шлифа 2); химический состав фаз по данным РСМА, отмеченных номерами спектров

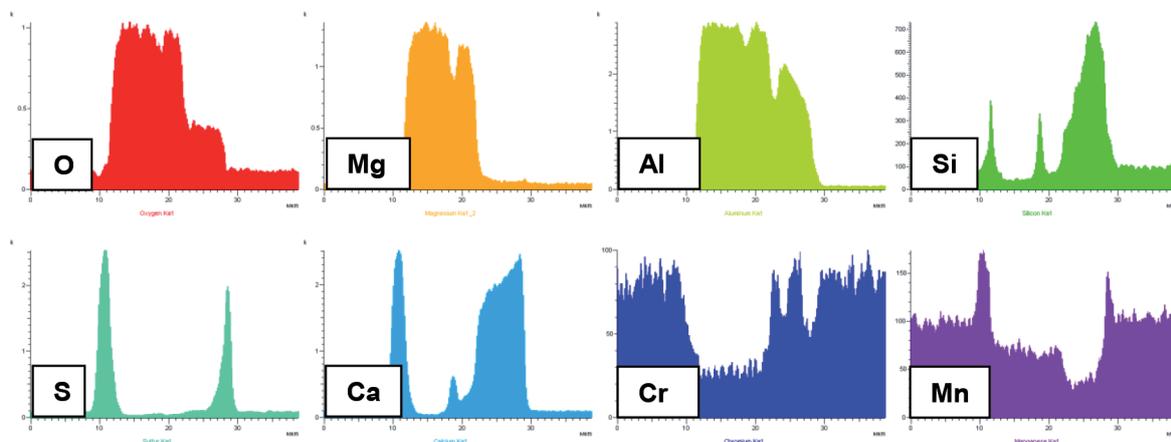
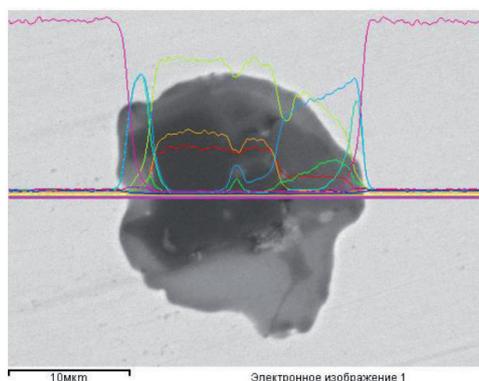


Рис. 9. Результаты исследования распределения элементов в составе неметаллического включения при помощи РСМА в сканировании по линии

71,77 % Al_2O_3 . Из данных таблицы (рис. 8) следует, что при пересчете содержания Mg и Al в составе шпинели на концентрации оксидов $MgO \cdot Al_2O_3$ состав шпинельной фазы в центральной части включения составляет 26,77 и 72,22 % при отношении 0,37.

Периферийная нижняя часть включения (спектр 4) представлена сульфидом кальция с отношением 1,246, что практически полностью согласуется с отношением 1,249 для сульфида CaS стехиометрического состава. К сульфидному типу относится и внешняя часть включения (спектр 7) при отношении % Ca : % S = 1,38. Количественная оценка состава включения, которое окружает шпинельную фазу, подтверждается данными цветных карт кальция и серы (рис. 9).

Заслуживает внимания анализ части включения спектра 3, имеющего состав 39,22 % O, 18,67 % Al, 8,44 % Si и 30,30 % CaO в сумме 96,6 %. В однофазном представлении часть включения (спектр 3) имеет состав: 42,44 % CaO, 32,26 % Al_2O_3 и 18,08 % SiO_2 .

На равновесной терарной диаграмме CaO - Al_2O_3 - SiO_2 часть включения, обозначенная спектром 3, располагается в области существования соединения (минерала) геленита $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$, температура плавления которого составляет 1545 °C (рис. 10).

Неметаллическое включение (рис. 8), близкое к глобулярной форме с размером в диаметре ~ 30 мкм, имеет сложную гетерофазную структуру. Центральная часть включения представлена шпинелидной тугоплавкой фазой $MgO \cdot Al_2O_3$, а периферийная его часть - неравномерной по поверхности шпинели сульфидной фазой CaS с редким частичным замещением катиона Ca^{2+} катионом Mn^{+} . Шпинелидная и сульфидная фазы в составе включения являются определяющими. Идентифицированная единичная фаза в структуре неметаллического включения по своему составу определена, исходя из трехкомпонентной системы CaO - Al_2O_3 - SiO_2 (область геленита), как силикатная. В качестве нерегулярной примеси в составе отдельных структурных составляющих неметаллического включения присутствуют фазы, содержащие хром.

Выводы

1. Впервые выполнено прецизионное исследование электронного изображения и рентгеноспектральный микроанализ неметаллических включений в приповерхностном слое радиально-го сечения железнодорожной оси из стали EA1N.
2. Определено, что включения в осевой стали представлены в основном гетерофазной структурой, включающей магнезиально-алюминиевую

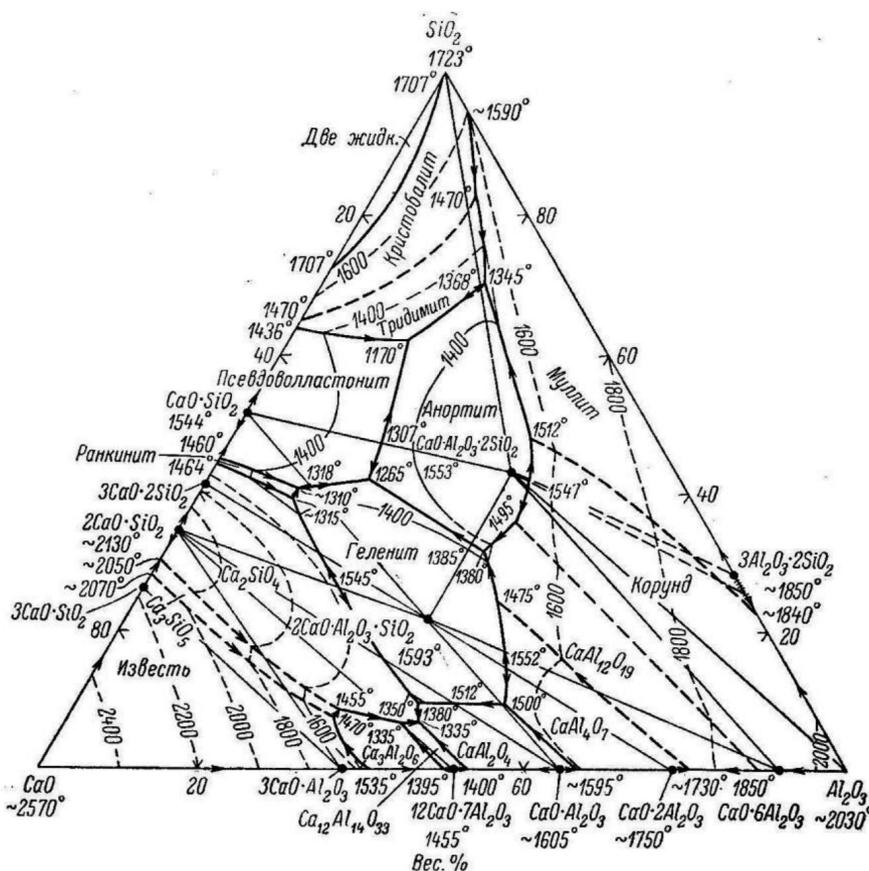


Рис. 10. Диаграмма равновесного состояния системы CaO - Al_2O_3 - SiO_2 [3]

фазу шпинелидного типа и сульфидную фазу на основе сульфида CaS.

3. Идентифицировано изовалентное замещение в шпинели катионов Mg^{2+} и Al^{3+} катионами соответствующих валентностей Cr^{3+} , Ti^{3+} и др. с образованием твердых растворов $(Mg, Fe)O \cdot (Al, Cr, Ti)_2O_3$.

4. Установлено формирование в ходе охлаждения и кристаллизации осевой заготовки сульфидной фазы кальция с изовалентным замещением катионов Ca^{2+} катионами Mn^{2+} с образованием комплексного сульфида $(Ca_{1-x}Mn_x)S$.

5. Полученные в работе результаты исследования природы гетерогенных включений проанализированы с применением двойных и тройных диаграмм фазовых равновесий; установлено, что при формировании включений при охлаждении расплава и кристаллизации непрерывнолитой заготовки с определенными ограничениями достигаются условия образования структуры включений, близких к квазиравновесным.

6. Наряду со шпинелидными и сульфидными составами гетерофазных включений сугубо силикатные включения не выявлены, что свидетельствует о высокой восстановительной среде жидкого металла вследствие применения рациональных режимов раскисления металла полупродукта и внепечного рафинирования осевой стали при обработке на УКП и вакууматоре.

Библиографический список / References

1. Бороненко Ю. П. Основные требования к вагонам и пути повышения осевых нагрузок до 27 тс и выше / Ю. П. Бороненко, Ю. С. Ромен, В. О. Певзнер // Подвижной состав XXI века. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 42–45.

Boronenko Yu. P., Romain Yu. S., Pevzner V. O. *Basic requirements for wagons and ways to increase axial loads up to 27 tf and higher*. Rolling stock of the 21 century. Abstracts of the International Scientific and Technical Conference. St. Petersburg, 2013, pp. 42-45.

2. Гасик М. И. Электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ типов и составов неметаллических включений черновой железнодорожной оси из непрерывнолитой заготовки / М. И. Гасик, М. М. Гасик, Ю. В. Климчик, А. П. Горобец, Ю. С. Пройдак, Ю. Н. Бортников // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2018. – № 4. – С. 30–48.

Gasik M. I., Gasik M. M., Klimchik Yu. V., Gorobets A. P., Proidak Yu. S., Bortnikov Yu. N. *Electron microscopy and X-ray microanalysis of types and compositions of non-metallic inclusions of a draft railway axis from continuously cast billets*. Metallurgical and mining industry, 2018, no. 4, pp. 30-48.

3. Бережной А. С. Многокомпонентные системы оксидов / А. С. Бережной. – К.: Наукова думка, 1970. – 510 с.

Berezhnoy A. S. *Multicomponent oxide systems*. Kyiv, Naukova Dumka, 1970, 510 p.

4. Чуйко Н. М. Теория и технология электроплавки стали / Н. М. Чуйко, А. Н. Чуйко. – К.: Вища школа, 1983. – 248 с.

Chuyko N. M., Chuyko A. N. *Theory and technology of electric steel melting*. Kyiv, Vyshcha School, 1983, 248 p.

5. Зарецкая Г. М. Искусственные абразивные материалы под микроскопом. Фазовый состав и микроструктура / Г. М. Зарецкая, И. В. Лавров, Н. Е. Филоненко. – Л.: Недра, 1968. – 160 с.

Zaretskaya G. M., Lavrov I. V., Filonenko N. E. *Artificial abrasive materials under the microscope. Phase composition and microstructure*. Leningrad, Nedra, 1968, 160 p.

6. Гасик М. И. К вопросу о твердом растворе кислородных соединений титана в электрокорунде / М. И. Гасик // *Металлургия и коксохимия*. – К.: Техніка, 1970. – Вып. 21. – С. 32–38.

Gasik M. I. *On the question of the solid solution of oxygen compounds of titanium in electrocorundum*. Metallurgy and coke chemistry. Kyiv, Tekhnika, 1970, vol. 21, pp. 32-38.

Мета. Дослідження типів і складу неметалевих включень у радіальному перетині чорнової залізничної осі, отриманої після деформаційного переділу з безперервнолітої заготовки.

Методика. Дослідження морфології та елементного складу включень виконані на зразках сталі EA1N із застосуванням електронної мікроскопії та мікро-рентгеноспектрального аналізу.

Результати. Встановлено, що при охолодженні розплаву і кристалізації металу безперервнолітої заготовки формуються включення, близькі за складом до квазірівноважних станів подвійних і потрійних оксидних систем, фазові складові яких визначаються співвідношенням активних концентрацій елементів Ca, Mg і Al. У досліджених зразках осьового металу не ідентифіковані силікатні включення, як у вигляді самостійної фази, так і в складі гетерофазних оксидних включень, що свідчить про переважну участь в реакціях розкислення їх абсолютних складів і, що більш важливо, співвідношення термодинамічних активностей елементів з розкислювальними і десульфуруючими властивостями.

Наукова новизна. Визначено, що включення в осьовій сталі представлені в основному гетерофазною структурою, що включає магнезійно-корундову матрицю шпинелидного типу і периферійну зону сульфідної фази на основі сульфіду CaS. Ідентифіковано изовалентне заміщення в шпинелі катіонів Mg^{2+} і Al^{3+} катіонами відповідних валентностей Cr^{3+} , Ti^{3+} з утворенням твердих розчинів $(Mg, Fe)O \cdot (Al, Cr, Ti)_2O_3$. Встановлено, що в ході охолодження розплаву і кристалізації осьової заготовки формується сульфідна фаза з изовалентним заміщенням катіонів Ca^{2+} ка-

тіонами Mn^{2+} з утворенням сульфїду комплексного складу $(Ca_{1-x}Mnx) S$.

Практична значущість. Результати проведеного дослідження визначають режими розкислення і легування осевого металу при позапічній обробці на установках піч-ківш і камерному вакууматорі.

Ключові слова: залізнична вісь, сталь EA1N, позапічна обробка, безперервнолита заготовка, деформаційний переділ, неметалеві включення, електронна мікроскопія, рентгеноспектральний мікроаналіз, типи і складу включень.

Purpose. The study of the types and composition of non-metallic inclusions in the radial section of the draft railway axis obtained from the deformation redistribution of continuously cast billets.

Methodology. Studies of the morphology and elemental composition of the inclusions were performed on EA1N steel samples using electron microscopy and X-ray microanalysis.

Findings. It was established that during cooling of the melt and crystallization of the metal of a continuously cast billet, inclusions close in composition to quasi-equilibrium states of binary and ternary oxide systems are formed, the phase components of which are determined by the ratio of active concentrations of Ca, Mg and Al elements. In the studied samples of the axial metal, silicate inclusions were not identified either as an independent phase or as part of heterophase oxide inclusions, which indicates the predominant participation in deoxidation reactions as their absolute contents and, more importantly, the ratio of the

thermodynamic activities of the elements with deoxidizing and desulfurizing properties.

Originality. It was determined that the inclusions in axial steel are represented mainly by a heterophase structure comprising a spinel type magnesia-corundum matrix and a peripheral zone of a sulfide phase based on CaS sulfide. Isovalent substitution in the spinel of the Mg^{2+} and Al^{3+} cations with cations of the corresponding valences Cr^{3+} , Ti^{3+} with the formation of solid solutions $(Mg, Fe)O \cdot (Al, Cr, Ti)_2O_3$ has been identified. It was established that during cooling of the melt and crystallization of the axial billet, a sulfide phase is formed with isovalent substitution of Ca^{2+} cations with Mn^{2+} cations with the formation of sulfide complex composition $(Ca_{1-x}Mnx) S$.

Practical value. The results of the study determine the modes of deoxidation and alloying of the axial metal during out-of-furnace treatment at LF and VD.

Key words: railway axis, EA1N steel, secondary metallurgy, continuously cast billet, deformation redistribution, non-metallic inclusions, electron microscopy, X-ray microanalysis, types and compositions of inclusions.

Рекомендована к публикации
д. т. н. Д. Н. Тогобицкой

Поступила 09.11.2018

