

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 669-194.2

DOI 10.21685/2072-3059–2017-1-10

С. Б. Гаманюк, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, М. В. Кириличев

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ КРУПНЫХ СЛИТКОВ МАССОЙ 24,2 ТОННЫ СТАЛИ 38ХНЗМФА¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Образование неметаллических включений неразрывно связано с процессом кристаллизации расплава, и в зависимости от этой связи происходит формирование величины зерна, структуры, и, соответственно, формируется поле упругой и пластической деформации, определяющее свойства и обрабатываемость получаемого изделия. Целью данной работы являлось проведение исследований по изучению влияния изменения геометрических параметров крупного слитка на загрязненность металла неметаллическими включениями по высоте и сечению.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись два слитка спокойной стали 38ХНЗМФА массой 24,2 т (слиток обычной геометрии) и 22,5 т (слиток с вогнутой донной частью). Идентификация неметаллических включений проводилась металлографическим методом. Оценку загрязненности стали неметаллическими включениями производили под микроскопом МЕТАМ-РВ-23 на нетравленных шлифах с использованием метода Л (ГОСТ 1778–70).

Результаты и выводы. Результаты исследований показали, что общей закономерностью распределения сульфидов и оксисульфидов является наличие определенной взаимосвязи между индексами загрязненности сульфидов и оксисульфидов по высоте слитка. Неметаллические включения представляют собой сложные оксидные включения марганца, кремния, ванадия, хрома, алюминия, а также сульфидные и оксисульфидные включения. Применение «выпуклого» поддона обеспечивает ускорение кристаллизационных процессов в нижней части слитка и способствует равномерному распределению неметаллических включений по высоте и сечению слитка, уменьшению среднего размера включений, снижению индекса загрязненности, что оказывает положительное влияние на технологические свойства стали.

Ключевые слова: неметаллические включения, прочностные и пластические свойства, крупный слиток, кристаллизация, оксиды, сульфиды, оксисульфиды.

S. B. Gamanyuk, D. V. Rutskiy, N. A. Zyuban, M. V. Kirilichev

A RESEARCH OF IMPURITY WITH NONMETALLIC INCLUSIONS IN LARGE INGOTS OF 38ХНЗМФА STEEL WEIGHING 24,2 TONS

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60007 мол_а_дк.

Abstract.

Background. Formation of nonmetallic inclusions is directly connected with melt crystallization. This connection influences formation of grain sizes and structure. Correspondingly, there is formed a field of elastic and plastic deformation that determines features and processability of manufactured products. The goal of the present work is to study the influence of changes in geometric parameters of a large ingot on the metal impurity with nonmetallic inclusions by height and section.

Materials and methods. The research objects were two ingots of 38ХНЗМФА killed steel weighing 24,2 tons (an ingot of regular geometry) and 22,5 tons (an ingot with concave bottom). Nonmetallic inclusions were identified by the metallographic method. The degree of impurity with nonmetallic inclusions was estimated under a METAM-PB-23 microscope on neutral sections using the L method (State Standard 1778-70).

Results and conclusions. The research results show that the general distribution regularity of sulfides and oxysulfides is the presence of a certain interconnection between the indices of impurity with sulfides and oxysulfides by ingot's height. Nonmetallic inclusions are complex oxide inclusions of manganese, chromium, aluminum, as well as sulfide and oxysulfide inclusions. The use of a concave bottom plate intensifies crystallization processes in the ingot's bottom part and promotes uniform distribution of nonmetallic inclusions by ingot's height and section, decrease of the average size of inclusions, which positively influences technological properties of steel.

Key words: nonmetallic inclusions, strength and plastic properties, large ingot, crystallization, sulfides, oxysulfides.

Введение

Получение крупных поковок с равномерным химическим составом для изделий энергетического машиностроения является важной, актуальной задачей в связи с необходимостью получения стабильных свойств по объему крупногабаритных изделий агрегатов большой единичной мощности.

Образование неметаллических включений неразрывно связано с процессом кристаллизации расплава, и в зависимости от этой связи происходит формирование величины зерна, структуры, и, соответственно, формируется поле упругой и пластической деформации, определяющее свойства и обрабатываемость получаемого изделия.

Преимущественное влияние на механические свойства стальных изделий оказывает сера. Это связано с тем, что выделяющаяся из металла сульфидная фаза нарушает сплошность металлической матрицы [1, 2]. Степень проявления негативного воздействия серы в первую очередь зависит от вида и формы неметаллических включений, образующихся с ее участием. Как известно, эти включения могут быть представлены как сульфидами, так и окисульфидами в зависимости от физико-химических особенностей состояния расплава в момент образования включений.

Особенности образования оксидных, сульфидных и окисульфидных включений находятся между собой в тесной взаимосвязи, и в зависимости от их количественного соотношения уровень пластических характеристик в различных частях готового изделия может существенно изменяться. Поэтому исследование морфологии и распределения включений в объеме слитка представляет собой важную задачу, решение которой позволяет управлять формообразованием сульфидов и окисульфидов и гарантировать необходимый за-

пас надежности в процессе эксплуатации получаемых из слитков ответственных изделий.

1. Методика и материалы исследования

Объектами исследования являлись два слитка спокойной стали 38ХНЗМФА массой 24,2 т (слиток обычной геометрии) и 22,5 т (слиток с вогнутой донной частью), отлитые на ПО «Баррикады». Сталь для отливки слитков выплавлялась в основных электродуговых печах ДСП-12 по стандартной технологии двухшлаковым процессом с окончательным раскислением силикокальцием в ковше [3].

Химический состав плавок и некоторые параметры отливки слитков приведены в табл. 1 [3]. По данным этой таблицы видно, что режимы отливки обычного слитка и слитка с выпуклым поддоном практически одинаковы.

Таблица 1

Химический состав ковшовой пробы
стали 38ХНЗМФА и параметры отливки слитков

Вес слитка, т	Содержание элемента, %									Температура, °С		Время отливки, мин	
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	V	перед раскислением	перед выпуском	тела	прибыли
24,2	0,39	0,39	0,30	0,012	0,014	1,30	3,13	0,40	0,12	1680	1650	6,3	4,0
22,5	0,38	0,38	0,34	0,015	0,015	1,28	3,12	0,37	0,16	1650	1630	6,0	5,2

Шлифы отбирали по высоте и сечению на шести горизонтах слитка обычной геометрии и четырех горизонтах слитка с вогнутой донной частью.

Схема отбора образцов (шлифов) по высоте и сечению с различных горизонтов исследуемых слитков представлена на рис. 1.

Идентификация неметаллических включений проводилась металлографическим методом [4]. Оценку загрязненности стали неметаллическими включениями производили под микроскопом МЕТАМ-РВ-23 на нетравленных шлифах с использованием метода Л (ГОСТ 1778–70).

Оценивали общее количество включений, отдельно встречающиеся виды включений, их форму, цвет, взаимное расположение (группами, цепочкой, изолированно). Загрязненность шлифов оценивали отдельно по кислородным, сульфидным и окисульфидным включениям на поверхности слитка, в середине его радиуса и в осевой зоне. Предельная ошибка при определении загрязненности включениями составляет $0,75 \cdot 10^{-3}$.

2. Результаты исследования и их обсуждение

По результатам проведенных исследований были выявлены следующие типы сложных оксидных включений: FeO·MnO; 2FeO·SiO₂; 2MnO·SiO₂;

$MnO \cdot SiO_2$; $nFeO \cdot mMnO \cdot pSiO_2$; $FeO \cdot V_2O_5$; $FeO \cdot Cr_2O_3$; $(FeO \cdot MnO_2) \cdot Cr_2O_3$; $FeO \cdot Al_2O_3$. Из перечисленных типов включений наибольшее количество приходится на твердый раствор оксидов железа и марганца $FeO \cdot MnO$, его содержание в общем объеме включений составило около 26 %.

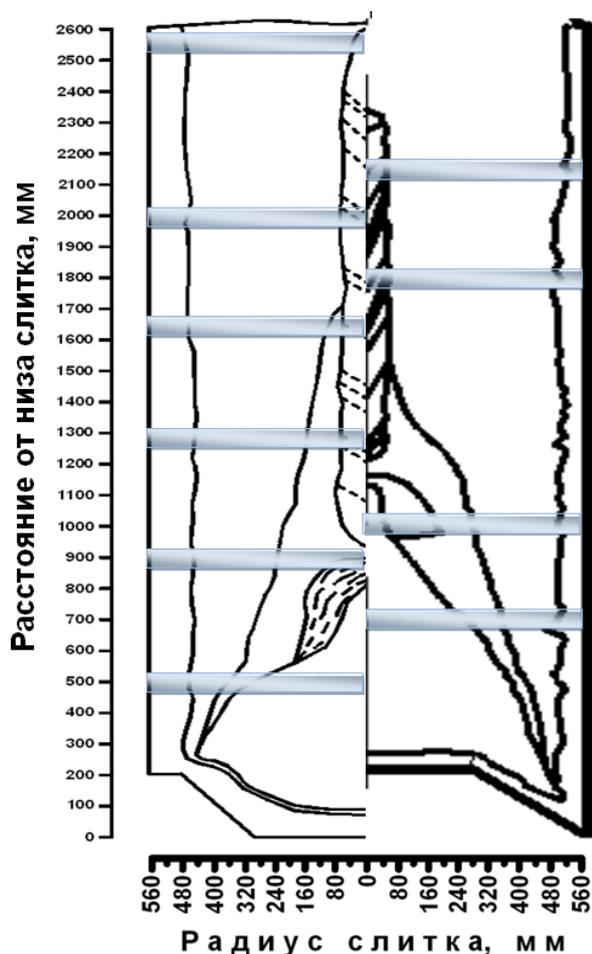
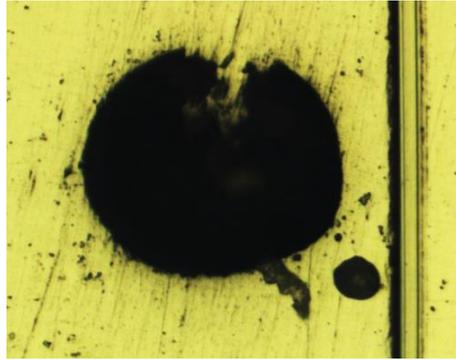


Рис. 1. Схема отбора образцов

Оксидные включения при наблюдении в светлом поле зрения имели темный цвет, неправильную форму и располагались чаще всего по одному (рис. 2). В темном поле зрения эти включения прозрачны, а в поляризованном свете – изотропны.

Этот сложный оксид характеризуется большим содержанием FeO, что обусловлено относительно низким содержанием марганца в стали данной марки (не более 0,55 %) [5]. Расположение случайное, наблюдались группы из 3–5 включений.

Признаки включений и химический состав стали указывают на то, что в ней также имеются стекловидные шарообразные включения силикатов. Включения файялита – силиката железа ($2FeO \cdot SiO_2$) – содержатся в количестве до 20 %.

Рис. 2. Оксидные включения в светлом поле зрения, $\times 200$

Следующий, наиболее часто встречающийся тип оксидных включений в слитке представлен силикатами марганца: $2\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ – тефроит и $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ – роданит, – содержащимися в слитке в количестве соответственно 21 и 15 %. Включения имеют глобулярную форму. Расположение силикатных включений случайное.

В слитке встречаются сложные силикаты железа и марганца ($n\text{FeO}\cdot m\text{MnO}\cdot p\text{SiO}_2$), содержание которых составляет 10 %. Включения имеют случайное расположение. При идентификации были выявлены также ванадаты $\text{FeO}\cdot\text{V}_2\text{O}_3$ в количестве около 1,5 %.

Предположительно, судя по химическому составу слитка, в нем могут присутствовать в небольшом количестве (3 %) оксиды хрома Cr_2O_3 .

Наряду с хромитами были идентифицированы сложные включения, состоящие из хромитов, внедренных в массу твердого раствора $\text{FeO}\cdot\text{MnO}$, их содержание примерно 3 %.

Также в слитке содержатся алюминаты $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ в количестве 0,5 %. Количество различных оксидных включений в слитке представлено в сводной табл. 2.

Таблица 2

Содержание различных оксидов в слитке

Содержание оксидов	Количество оксидов, объемный %
$\text{FeO}\cdot\text{MnO}$	26
$2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$	20
$2\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$	21
$\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$	15
$n\text{FeO}\cdot m\text{MnO}\cdot p\text{SiO}_2$	10
Cr_2O_3	3
$\text{Cr}_2\text{O}_3\cdot\text{FeO}\cdot\text{MnO}$	3
$\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	0,5
$\text{FeO}\cdot\text{V}_2\text{O}_3$	1,5

Сульфидная фаза в слитке представлена в виде твердого раствора сульфида железа и марганца. Сульфидные включения при наблюдении в светлом

поле зрения имеют серо-голубой цвет, округлую, угловую, вытянутую или неправильную форму и располагаются отдельно (рис. 3). Их расположение имело хаотичный характер, по своей форме они приближались к 1 и 3 типу сульфидов по классификации Симса – Даля. Такие включения встречались по всем направлениям в слитках. При наблюдении в темном поле зрения эти включения непрозрачны, а в поляризованном свете – изотропны и непрозрачны. Согласно этим признакам эти включения представляют собой сульфид железа и марганца FeS-MnS (твердый раствор).

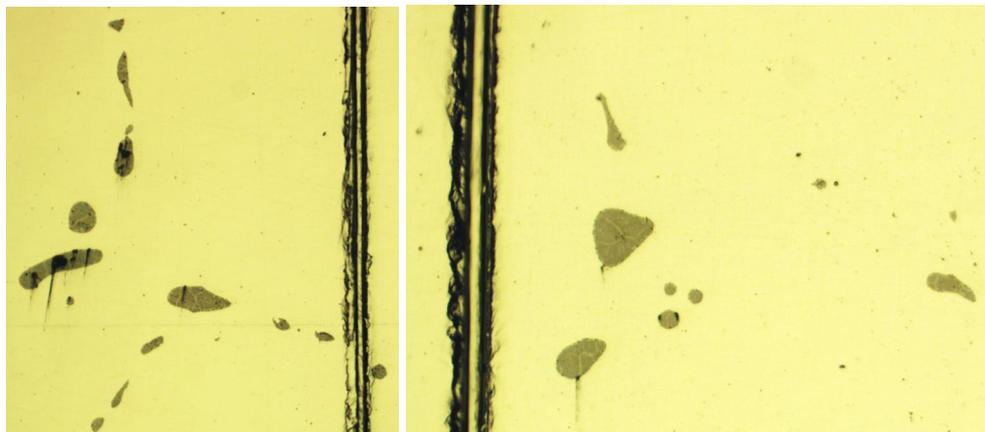


Рис. 3. Сульфидные включения в светлом поле зрения, $\times 200$

Включения твердого раствора FeS-MnS менее хрупки и более тугоплавки, чем включения сульфида железа. Они пластичны и легко деформируются при пластической деформации и тем легче, чем больше содержание в них сульфида марганца [4].

Также встречались и более сложные включения, состоящие из оксидов и сульфидов. Дело в том, что выделение новой фазы на готовых поверхностях раздела требует меньших затрат энергии, чем зарождение ее в гомогенном расплаве. Поэтому часто в процессе кристаллизации сульфиды выделяются на поверхности оксидных включений. Пример таких включений приведен на рис. 4.

Окисульфидная фаза в слитке представлена сложными сульфидами марганца, содержащими оксиды (FeO, MnO, SiO₂) и FeS. Окисульфидные включения имеют глобулярную форму, расположены неравномерно, встречались цепочки. По размерам эти включения намного превосходят оксиды и сульфиды.

Таким образом, идентификация неметаллических включений показала, что все включения имеют сложный состав, в основном глобулярную форму, случайное расположение, что оказывает положительное влияние на технологические свойства стали.

Однако в соответствии с современными представлениями о роли серы в формировании качества металла в работах [6–11], показано, что отрицательное влияние сульфидных включений проявляется не столько в их количестве, сколько в особенностях их формообразования, расположения и влияния окисленности расплава на этот процесс. То есть возможность формирования

сульфидов благоприятной глобулярной формы будет зависеть от баланса количества связанных между собой оксидов, сульфидов и оксисульфидов.

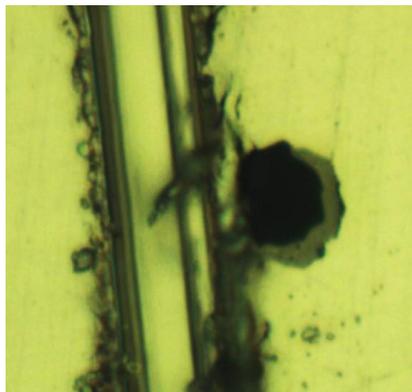


Рис. 4. Оксисульфидное включение в светлом поле зрения, $\times 200$

Поэтому в работе также исследовали выявление возможной связи между индексом загрязненности оксидов, сульфидов и оксисульфидов по высоте и сечению слитков, а также особенности их распределения в каждой структурной зоне (рис. 5 и 6).

Из представленных графиков (рис. 5) видно, что общей закономерностью распределения сульфидов и оксисульфидов является наличие определенной взаимосвязи между индексами загрязненности сульфидов и оксисульфидов по высоте слитка. Кроме верхней подприбыльной части, где за счет более длительного теплового воздействия значения индекса этих включений и динамика их изменения практически совпадают, на средних и нижних горизонтах в зоне столбчатых и крупноориентированных кристаллов между ними прослеживается достаточно четкая обратно пропорциональная связь.

Полученные данные подтверждают изложенные в работах [12, 13] положения об особенностях формообразования сульфидов и гарантированного формирования оксисульфидов с целью достижения минимального содержания сульфидной фазы по границам зерна.

В зоне столбчатых кристаллов с увеличением высоты слитка загрязненность оксидами стремится к нулю, а загрязненность сульфидными и оксисульфидными включениями с каждым горизонтом возрастает.

В зоне крупных различно ориентированных кристаллов наибольшая загрязненность оксидными включениями наблюдается на нижнем горизонте слитка и превышает в 12 раз загрязненность этими же включениями среднего горизонта и в 4 раза верхнего. Это можно объяснить тем, что оксиды, как тугоплавкие частички, попавшие в литейную оснастку из сталеплавильного агрегата, являются затравками для гетерогенного образования зародышей кристаллов, которые впоследствии опускаются на дно слитка. Загрязненность сульфидными и оксисульфидными включениями по высоте слитка практически не изменяется. Для зоны мелких различно ориентированных кристаллов характерно то, что с увеличением высоты слитка загрязненность всеми видами включений увеличивается, но наибольшая загрязненность (в 4 раза) наблюдается по сульфидным включениям.

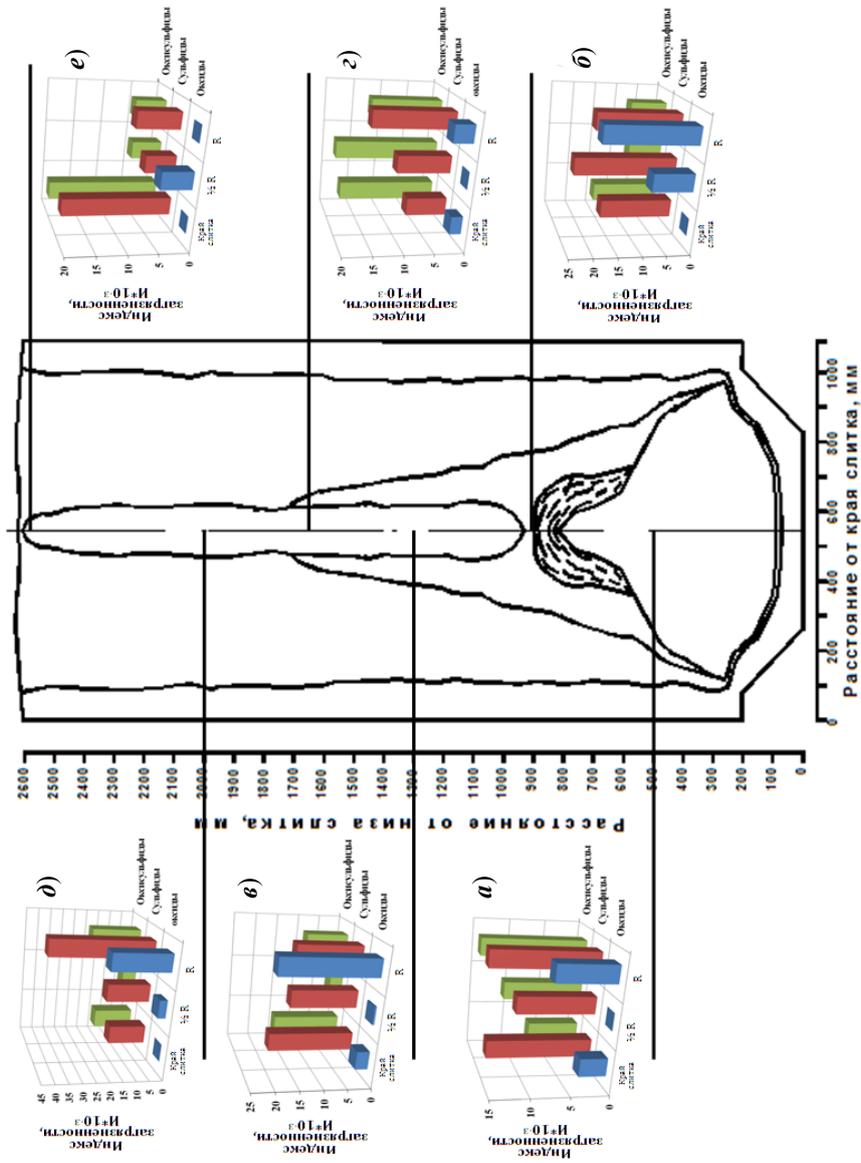


Рис. 5. Распределение индекса загрязненности неметаллическими включениями на различной высоте слитка массой 24,2 т стали 38ХНЗМФА: *а* – высота слитка 900 мм; *б* – высота слитка 1300 мм; *е* – высота слитка 2600 мм; *д* – высота слитка 1650 мм; *з* – высота слитка 2000 мм; *е* – высота слитка 2600 мм

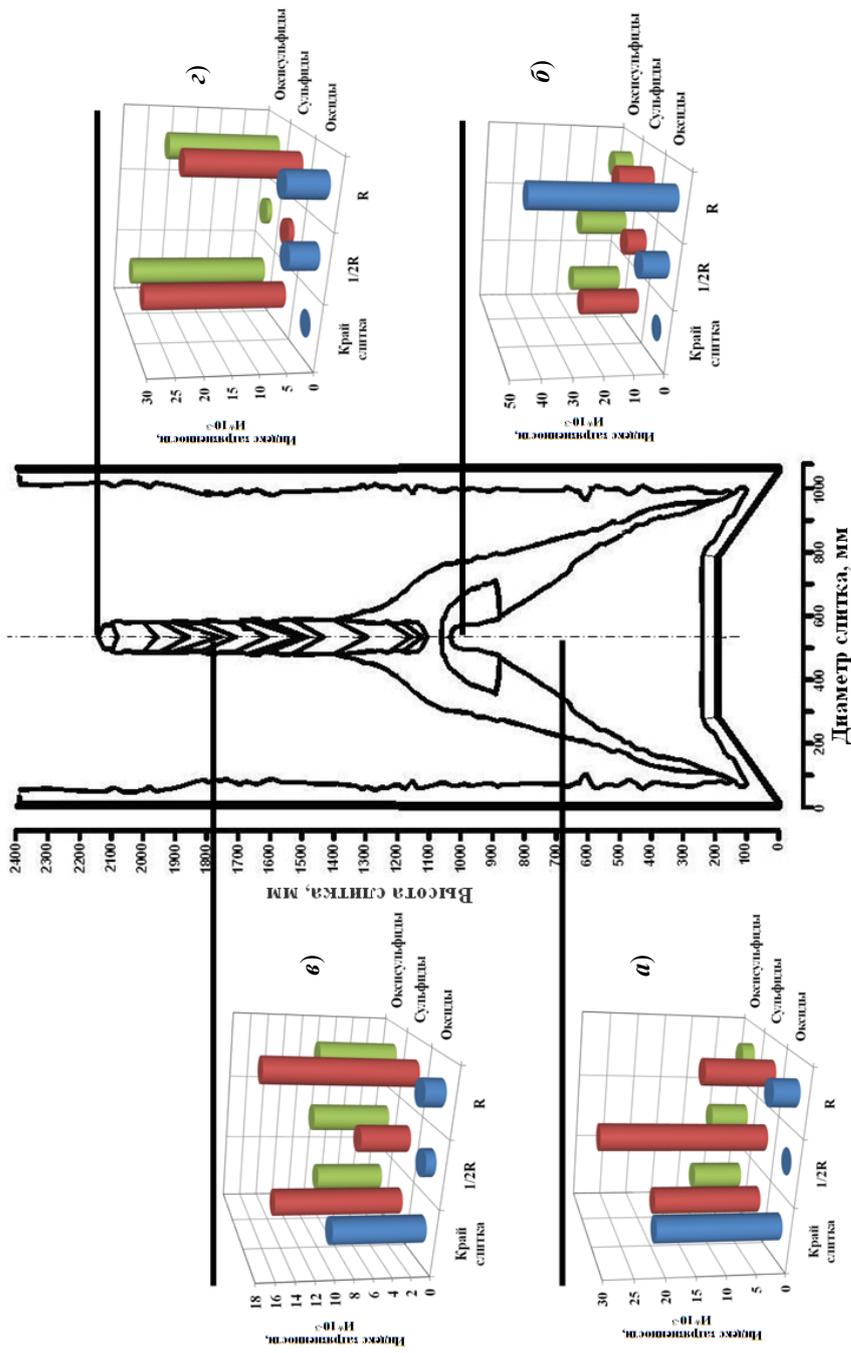


Рис. 6. Распределение индекса загрязненности неметаллическими включениями по высоте и сечению слитка с вогнутой донной частью: **а** – высота слитка 700 мм; **б** – высота слитка 1000 мм; **в** – высота слитка 1800 мм; **з** – высота слитка 2100 мм

Легкоплавкие неметаллические включения в процессе опускания твердых кристаллов (оксидов), образовавшихся при более высоких температурах, оттесняются в верхние горизонты слитка.

Увеличение загрязненности сульфидными включениями с приближением к осевой зоне слитка (см. рис. 5), объясняется замедлением скорости затвердевания, при котором создаются благоприятные условия для ликвации элементов из твердой в жидкую фазу и, как следствие, обогащение легкоплавкими включениями.

Определение индекса загрязненности неметаллическими включениями по сечению слитка с вогнутой донной частью представлено на рис. 6.

Для нижнего горизонта слитка (см. рис. 6,*a*) характерно снижение индекса загрязненности оксидными и оксисульфидными включениями от периферии к центру слитка при одновременном росте сульфидов более чем в 3 раза.

Наибольший индекс загрязненности наблюдается на расстоянии R слитка на высоте слитка 1000 мм, что соответствует зоне дугообразных трещин, которые обрамляют вершину конуса осаждения.

В слитке с вогнутой донной частью индекс загрязненности оксидами у поверхности слитка в 7 раз больше, на расстоянии $1/2 R$ слитка – в 1,5 раза, чем в слитке обычной геометрии (см. рис. 5 и 6).

Индекс загрязненности сульфидными включениями у поверхности обоих слитков практически не изменяется.

Индекс загрязненности сульфидами в осевой зоне слитка обычной геометрии в 1,5 раза больше, чем в слитке с вогнутой донной частью (см. рис. 5 и 6).

В обоих слитках наблюдается большая загрязненность сульфидными и оксисульфидными включениями, чем оксидными (см. рис. 5 и 6).

В результате исследования загрязненности стали неметаллическими включениями (см. рис. 5 и 6) определено, что характер их распределения по высоте и сечению слитков различный.

На среднем и верхнем горизонте с приближением к осевой зоне слитка (см. рис. 5 и 6) индекс загрязненности сульфидными включениями возрастает, причиной этого является замедление скорости затвердевания, при этом создаются благоприятные условия для ликвации элементов из твердой в жидкую фазу и, как следствие, обогащение легкоплавкими включениями.

Заключение

На основании проведенных исследований были получены следующие результаты: идентификация неметаллических включений показала, что все включения имеют сложный состав, в основном глобулярную форму, случайное расположение, что окажет положительное влияние на технологические свойства стали; распределение неметаллических включений по высоте и сечению слитков представляет собой сложные оксидные включения марганца, кремния, ванадия, хрома, алюминия, а также сульфидные и оксисульфидные включения. Наибольшая доля оксидных включений приходится на твердый раствор оксидов железа и марганца $FeO \cdot MnO$, содержание которого в общем количестве включений доходит до 26 %. В результате исследования загрязненности стали неметаллическими включениями определено, что характер их

распределения по высоте и сечению слитков различный; в обоих слитках наблюдается большая загрязненность сульфидными и оксисульфидными включениями, чем оксидными; размер включений в обоих слитках с приближением к центру стремится к увеличению. Это говорит о том, что диаметр включений больше там, где затвердевание металла идет наиболее медленно; на верхних горизонтах слитка обычной геометрии средний размер оксидов выше в 3,5 раза, чем в слитке с вогнутой донной частью; индекс загрязненности сульфидами в осевой зоне слитка обычной геометрии в 1,5 раза больше, чем в слитке с вогнутой донной частью.

Особенности расположения оксидов и сульфидов в слитках указывают на обратную связь между содержанием этих включений на средних и нижних горизонтах слитка. Это свидетельствует о ведущей роли оксисульфидов на процесс образования сульфидов, располагающихся, как правило, на границах зерна, что приводит к снижению пластических характеристик металла [2, 12]. Особенно это важно для вакуумированного металла, где дефицит растворенного кислорода способствует уменьшению количества оксисульфидов и выделению сульфидов неблагоприятной формы.

Применение «выпуклого» поддона обеспечивает ускорение кристаллизационных процессов в нижней части слитка и способствует равномерному распределению неметаллических включений по высоте и сечению слитка, уменьшению среднего размера включений, снижению индекса загрязненности, что оказывает положительное влияние на технологические свойства стали.

Библиографический список

1. **Малиночка, Я. Н.** Механизм образования оgranенных сульфидов марганца / Я. Н. Малиночка, Л. Н. Багнюк, С. А. Здоровец // Академия наук СССР. Известия. Сер.: Металлы. – 1989. – № 1. – С. 76–84.
2. Detection of Non-metallic Inclusions in Centrifugal Continuous Casting Steel Billets / Q. Wang, L. Zhang, S. Seetharaman, S. Yang, W. Yang, Y. Wang // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. 2016. – Vol. 47, Issue 3. – P. 1594–1612.
3. **Гаманюк, С. Б.** Исследование крупного кузнечного стального слитка измененной геометрии с целью повышения качества металла поковок : дис. ... канд. техн. наук / Гаманюк С. Б. – Волгоград, 2012. – 162 с.
4. **Червяков, А. Н.** Металлографическое определение включений в стали / А. Н. Червяков, С. А. Киселев. – М. : Металлургиздат, 1962. – 201 с.
5. **Виноград, М. И.** Включения в стали и ее свойства / М. И. Виноград. – М. : Металлургиздат, 1963. – 252 с.
6. **Krewerth, D.** Influence of non-metallic inclusions on fatigue life in the very high cycle fatigue regime / D. Krewerth, T. Lippmann, A. Weidner, H. Biermann // International Journal of Fatigue. – 2016. – Vol. 84. – P. 40–52.
7. **Zhao, W. L.** Mechanism for development of faults originating from compound inclusions in the forging process of 30Cr2Ni4MoV heavy ingots / W. L. Zhao, Q. X. Ma, S. L. Zha // Materials Transactions. – 2014. – Vol. 55, Issue 8. – P. 1324–1331.
8. Development and production of monoblock low-pressure turbine rotor shaft made from 670 ton ingot (Conference Paper) / T. Yamauchi, H. Kudo, Y. Kishi, S. Ueda, H. Yoshida, K. Kimura, K. Kajikawa, S. Suzuki // Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants – Proceedings from the 7th International Conference. – Waikoloa, HI; United States, 2014. – P. 333–343.

9. **Шевцова, О. А.** Aspects of the formation of sulfide inclusions and their effect on the quality of low-alloy structural steels / О. А. Шевцова, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий // *Metallurgist*. – 2011. – Vol. 54, Issue 11–12. – С. 839–844.
10. Особенности образования сульфидных включений и их расположение внутри зерна в зависимости от условий раскисления стали 20 / О. А. Шевцова, Н. А. Зюбан, С. А. Пегишева, Д. В. Руцкий, К. Е. Титов, Н. В. Клячина // *Металлург*. – 2014. – № 5. – С. 60–63.
11. **Лунев, В. В.** О природе и диагностике неметаллических включений в стали / В. В. Лунев, В. П. Пирожкова // *Электротехнология*. – 2011. – № 7. – С. 26–30.
12. **Шевцова, О. А.** Исследование особенностей формирования типа и вида сульфидных включений в зависимости от степени окисленности металла и их влияние на свойства низколегированных конструкционных сталей / О. А. Шевцова, Н. А. Зюбан, М. Н. Летников, Д. В. Руцкий // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. – 2010. – № 2. – С. 56–60.
13. **Зюбан, Н. А.** Влияние вакуумирования на особенности формирования сульфидных включений и свойства изделий из низколегированных конструкционных сталей / Н. А. Зюбан, О. Б. Крючков // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2008. – № 5. – С. 15–18.

References

1. Malinochka Ya. N., Bagnyuk L. N., Zdorovets S. A. *Akademiya nauk SSSR. Izvestiya. Ser.: Metally* [The Academy of Sciences of USSR. Proceedings. Series: Metals]. 1989, no. 1, pp. 76–84.
2. Wang Q., Zhang L., Seetharaman S., Yang S., Yang W., Wang Y. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2016, vol. 47, iss. 3, pp. 1594–1612.
3. Gamanuyk S. B. *Issledovanie krupnogo kuznechnogo stal'nogo slitka izmenennoy geometrii s tsel'yu povysheniya kachestva metalla pokovok: dis. kand. tekhn. nauk* [A research of a large forging steel ingot of altered geometry for metal forging quality improvement purposes: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Volgograd, 2012, 162 p.
4. Chervyakov A. N., Kiselev S. A. *Metallograficheskoe opredelenie vklyucheniy v stali* [Metallographic determination of steel inclusions]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 201 p.
5. Vinograd M. I. *Vklyucheniya v stali i ee svoystva* [Steel inclusions and its properties]. Moscow: Metallurgizdat, 1963, 252 p.
6. Krewerth D., Lippmann T., Weidner A., Biermann H. *International Journal of Fatigue*. 2016, vol. 84, pp. 40–52.
7. Zhao W. L., Ma Q. X., Zha S. L. *Materials Transactions*. 2014, vol. 55, iss. 8, pp. 1324–1331.
8. Yamauchi T., Kudo H., Kishi Y., Ueda S., Yoshida H., Kimura K., Kajikawa K., Suzuki S. *Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants – Proceedings from the 7th International Conference*. Waikoloa, HI; United States, 2014, pp. 333–343.
9. Shevtsova O. A., Zyuban N. A., Rutskiy D. V. *Metallurgist*. 2011, vol. 54, iss. 11–12, pp. 839–844.
10. Shevtsova O. A., Zyuban N. A., Pegisheva S. A., Rutskiy D. V., Titov K. E., Klyachina N. V. *Metallurg* [Metallurgist]. 2014, no. 5, pp. 60–63.
11. Lunev V. V., Pirozhkova V. P. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2011, no. 7, pp. 26–30.
12. Shevtsova O. A., Zyuban N. A., Letnikov M. N., Rutskiy D. V. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya* [Problems of ferrous metallurgy and materials science]. 2010, no. 2, pp. 56–60.

13. Zyuban N. A., Kryuchkov O. B. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [University proceedings. Ferrous metallurgy]. 2008, no. 5, pp. 15–18.

Гаманюк Сергей Борисович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, кафедра технологии материалов, Волгоградский государственный технический университет (Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, 28)

E-mail: gamanuk@mail.ru

Gamanuk Sergey Borisovich

Candidate of engineering sciences, senior staff scientist, sub-department of materials technology, Volgograd State Technical University (28 Lenina avenue, Volgograd, Russia)

Руцкий Дмитрий Владимирович

кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии материалов, Волгоградский государственный технический университет (Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, 28)

E-mail: tecmat@vstu.ru

Rutskiy Dmitriy Vladimirovich

Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of materials technology, Volgograd State Technical University (28 Lenina avenue, Volgograd, Russia)

Зюбан Николай Александрович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии материалов, Волгоградский государственный технический университет (Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, 28)

E-mail: tecmat49@vstu.ru

Zyuban Nikolay Aleksandrovich

Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of materials technology, Volgograd State Technical University (28 Lenina avenue, Volgograd, Russia)

Кириличев Михаил Владимирович

аспирант, Волгоградский государственный технический университет (Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, 28)

E-mail: tecmat@vstu.ru

Kirilichev Mikhail Vladimirovich

Postgraduate student, Volgograd State Technical University (28 Lenina avenue, Volgograd, Russia)

УДК 669-194.2

Гаманюк, С. Б.

Исследования загрязненности неметаллическими включениями крупных слитков массой 24,2 тонны стали 38ХНЗМФА / С. Б. Гаманюк, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, М. В. Кириличев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 1 (41). – С. 115–127. DOI 10.21685/2072-3059–2017-1-10