

Агарков А.Ю., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Бабин Г.В., Кириличев М.В., Морозов В.В.

## ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИРОДЫ ОБРАЗУЮЩИХСЯ «НАРОСТОВ» НА ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКЕ РАЗЛИВОЧНОГО СТАКАНА ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ МАРКИ С45Е

**Аннотация.** *Предъявление особых требований по обрабатываемости резанием сталей на металлорежущих станках обуславливает потребность в получении сталей с нормируемым содержанием серы. Непрерывная разливка таких сталей приводит к ухудшению разливаемости, что снижает производительность и ухудшает качество металла из-за загрязнённости неметаллическими включениями. В работе на примере получения стали марки С45Е проведены исследования особенностей строения «нароста», извлеченного из внутренней полости погружного стакана. Исследованием методами оптической (Leica 8 C) и электронной (FEI Versa 3d) микроскопии, а также рентгеноструктурным анализом (Диффрактометр BrukerD8 Advance) установлено, что «нарост» имеет неоднородное строение. Поверхностные слои «нароста» содержат в составе тугоплавкие отложения корунда  $Al_2O_3$  толщиной от 2 до 8 мкм. Промежуточный слой, примыкающий к поверхностному, содержит отложения включений алюмомагнезильной шпинели  $MgO \cdot Al_2O_3$  и включений сульфида кальция  $CaS$ , толщина слоя от 0,8 до 10 мкм. Отложения по толщине «нароста» располагаются послойно, чередуясь с металлом. Внутренний слой представляет собой коралловые слои отложений из сульфида кальция  $CaS$ , легкоплавких и тугоплавких алюминатов кальция типа  $3CaO \cdot Al_2O_3$  ( $T_{пл} = 1535$  °С) и  $CaO \cdot 2Al_2O_3$  ( $T_{пл} = 1745$  °С). Исследованием установлено, что основной причиной затягивания сталеразливочных каналов при разливке стали марки С45Е является образование отложений  $CaS$  и  $MgO \cdot Al_2O_3$  на внутренних слоях «нароста».*

**Ключевые слова:** непрерывнолитая заготовка, разливка, нормированное содержание серы, погружной стакан, нарост, разливаемость.

### Введение

Повышение спроса на стали с нормируемым содержанием серы для нужд машиностроения обуславливает необходимость в получении сталей с особыми требованиями по обработке на металлорежущих станках, при одновременном сохранении высоких свойств металлопродукции, обеспечивающихся чистотой стали по неметаллическим включениям, химической, физической и структурной однородностью металла. В условиях ЭСПЦ АО «ВТЗ» получают сталь марки С45Е, которая производится согласно требованиям стандарта EN10083-2:2006. Для улучшения процесса образования короткой и ломкой стружки содержание серы в данной марке по стандарту EN10083-2:2006 должно составлять 0,020–0,035%, алюминия 0,015–0,050%. При выплавке и непрерывной разливке сталей с нормируемым содержанием серы образуются тугоплавкие неметаллические включения сложного химического состава, которые, откладываясь на внутренней поверхности стенок погружного стакана, приводят к частичному или полному закупориванию струи металла, что значительно ухудшает разливаемость стали на МНЛЗ. Исследованиями в работах [1-3] показано, что причинами зарастания полости погружного стакана являются отложения крупных комплексных неметаллических включений сложного химического состава, содержащих тугоплавкие алюминаты кальция типа ( $mCaO \cdot nAl_2O_3$ ), включения корунда ( $Al_2O_3$ ), шпинели и др. Зарастание погружного стакана вызывает преждевременное прекращение процесса разливки. Кроме того, затягивание дозаторов и неравномерная подача металла в кристаллизатор приводят к повышенной отбраковке непрерывнолитой заготовки по дефектам наружной поверхности и макроструктуры.

Исследованиями, проведенными в работах [4-6], показано, что основными причинами зарастания внутренней полости погружных стаканов являются:

- загрязненность стали твердыми тугоплавкими неметаллическими включениями;
- вторичное окисление стали в канале погружного стакана;
- затягивание неметаллических включений из шлака сталеразливочного ковша;
- размытие и быстрый износ огнеупорных материалов.

Перечисленные причины зарастания стаканов приводятся в большинстве своем для низкоуглеродистых сталей, в настоящее время разработано достаточно много эффективных способов, позволяющих увеличить их разливаемость. Однако при непрерывной разливке стали марки С45Е проблема повышения разливаемости сталей в настоящее время является актуальной.

Целью настоящей работы являлось выявление природы и причин образования наростов при непрерывной разливке стали марки С45Е с нормируемым содержанием серы.

### Материал и методика проведения исследований

Технология производства стали марки С45Е в условиях АО «ВТЗ» состоит из следующих этапов: получение полупродукта в ДСП с заданным содержанием углерода и фосфора, легирование и десульфурация стали (содержание серы после внепечной обработки должно быть в пределах 0,017–0,028%); вакуумирование и обработка металла кальцийсодержащей проволокой, присадка серосодержащей проволоки для доведения концентрации серы до марочного состава; непрерывная разливка стали в квадратную заготовку 360 x 360 мм. Для теплоизоляции в промежуточный ковш добавляли теплоизолирующую смесь марки ECOSIV SAC10 производства ф.«DEREF». Непрерывная разливка осуществлялась закрытой струей на 4-ручьевого МНЛЗ.

Характеристики МНЛЗ:

- тип установки – криволинейная, с переменным радиусом кривизны;
  - расстояние между ручьями – 1900 мм;
  - количество ручьев на установку – 4;
  - базовый радиус – 14 м;
  - количество точек разгиба слитка – 3 ( $K=14\ 000$  мм,  $K=19\ 000$  мм,  $K=34\ 000$  мм);
  - масса разливаемой плавки – 0 150 т;
  - кристаллизаторы конструкции ITALIMPIANTI, длина плит – 700 мм
  - скорость извлечения заготовки квадратного сечения  $360 \times 360$  мм – 0,45 м/мин;
  - машины газокислородной резки производства ф. «Gega»;
  - длина ходовых рельс – 3,5м;
  - $T_L+(18-30\ ^\circ\text{C})$ .
- Вес погонного метра заготовок, принятый для расчета расхода воды на ЗВО, составляет 1018 кг/м.  
Расход воды в кристаллизатор –  $3000 \pm 60$  л/мин.

Технологическое давление ТПК: №1 –  $10\ \text{кг/см}^2$ ; №2 –  $15\ \text{кг/см}^2$ ; №3 –  $20\ \text{кг/см}^2$ ; №4 –  $22\ \text{кг/см}^2$ ; №5 –  $23\ \text{кг/см}^2$ . Допускается корректировка технологического давления.

При использовании указанной технологии во время непрерывной разливки стали марки С45Е с нормируемым содержанием серы происходит затягивание полости погружного стакана, при этом максимальное количество разлитых плавков в серию составляет не более трех. Полное зарастание погружного стакана приводит к прекращению плавки и ее возврату на повторную внепечную обработку, что вызывает нерегламентированные простои и повышение энерго- и трудозатрат.

Для установления причин затягивания погружных стаканов проведено исследование состава нароста (рис. 1), извлеченного из верхней части стакана, после проведения серии из трех плавков стали марки С45Е.

Окончательный плавочный состав приведен в табл. 1.

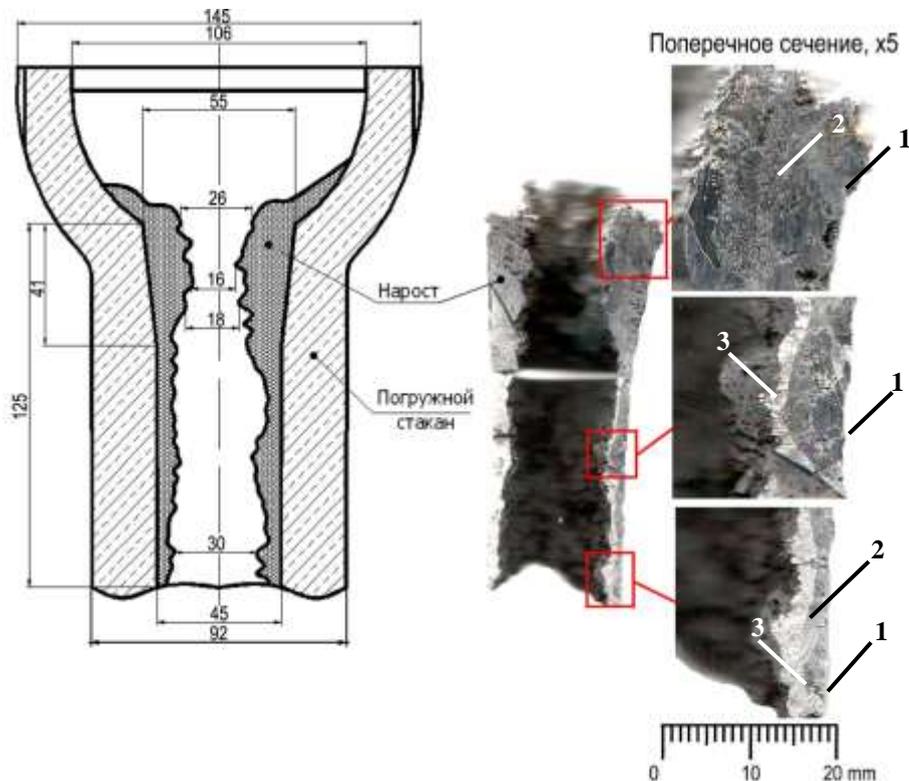


Рис. 1. Макротемплет нароста с внутренней поверхности погружного стакана

Таблица 1

Окончательный плавочный состав стали марки С45Е

Содержание элементов, %														
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Sn	Ca	Al	Nb
Плавка № 291938														
0,46	0,29	0,75	0,014	0,0232	0,14	0,09	0,013	0,20	0,016	0,018	0,009	0,0021	0,0225	0,0016
Плавка № 291937														
0,48	0,28	0,74	0,010	0,0257	0,12	0,10	0,016	0,12	0,002	0,018	0,008	0,0022	0,0271	0,0015
Плавка № 291936														
0,47	0,28	0,73	0,009	0,0242	0,13	0,11	0,013	0,17	0,0014	0,018	0,095	0,0020	0,0220	0,0012

Элементный химический состав структурных составляющих определяли методом EDS анализа в режиме вторичных электронов с помощью электронного микроскопа FEI Versa 3D при увеличениях от 150 до 10000 крат.

Качественный и количественный рентгенофазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре «BrukerD8 Advance» в излучении медного анода.

Анализ дифрактограмм и расшифровка фазового состава проводили с помощью программного обеспечения к дифрактометру Diffrac.EVA (version 4.2.1) с использованием лицензионной базы данных Powder-DiffractionFile-2 (The International Center for Diffraction Data).

### Результаты исследования

Исследование макроструктуры продольного темплетта показало, что «нарост» имеет неоднородное

строение. По толщине «нароста» выявлены три характерных слоя:

1 – наружный слой, прилегающий к внутренней полости стакана (рис. 1, поз. 1);

2 – промежуточный слой (рис. 1, поз. 2);

3 – внутренний слой серого матового цвета имеющий вид коралловых отложений (рис. 1, поз. 3).

Исследование особенностей строения наружного слоя (см. рис. 1, поз. 1) показало, что поверхностный слой содержит отложения включений корунда  $Al_2O_3$ , при этом расположение включений носит послойный характер, чередуясь с металлом (рис. 2, а, табл. 2).

Промежуточный слой «нароста» (рис. 1, поз. 2) содержит отложения включений алюмомагнезиальной шпинели  $MgO \cdot Al_2O_3$  и включений сульфида кальция (CaS). Отложения в «наросте» имеют слоевое расположение, чередуясь с металлом (рис. 2, б, табл. 2).

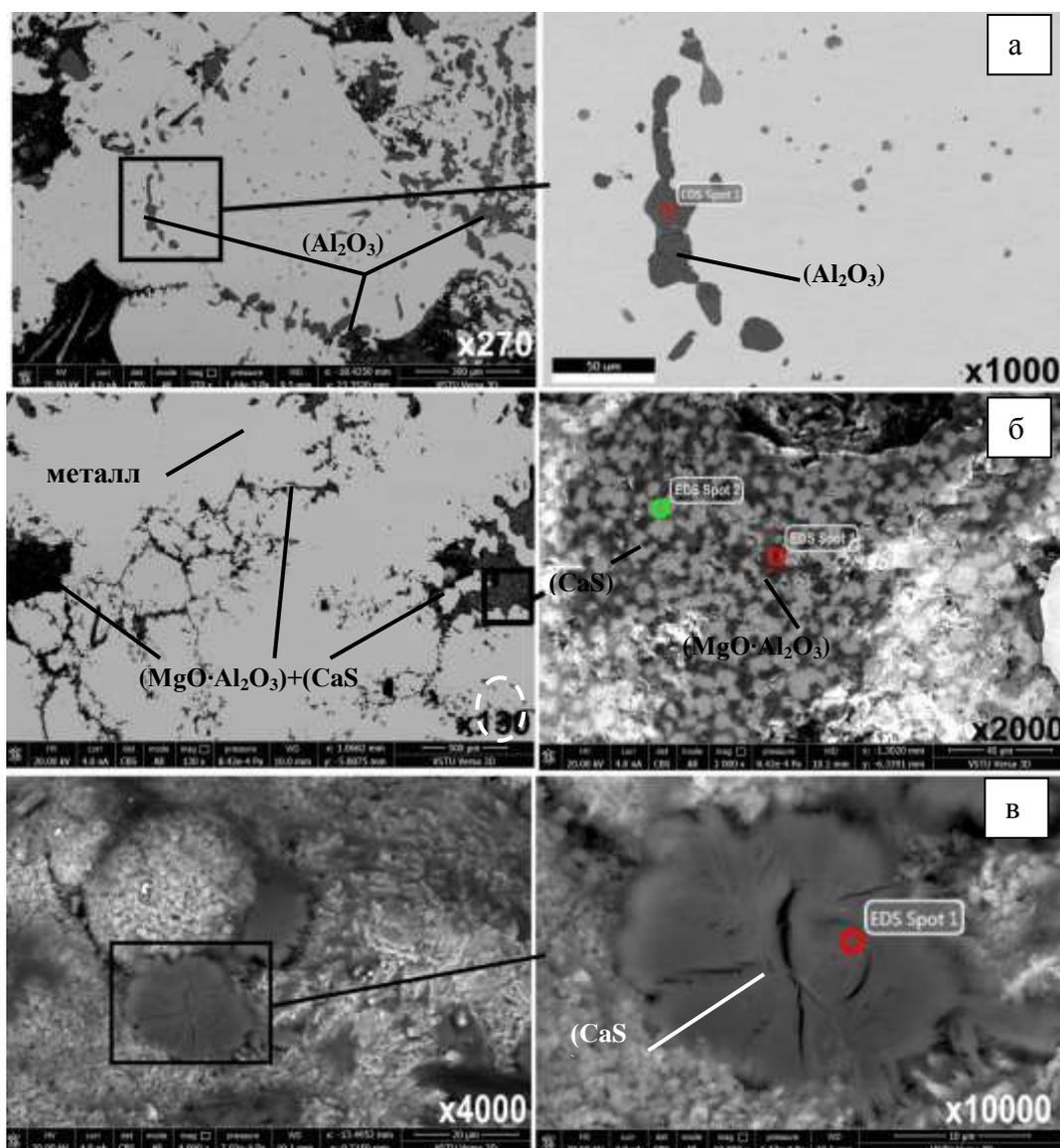


Рис. 2. Особенности строения нароста: а – наружный слой; б – переходный слой; в – внутренний слой

Химический состав составляющих нароста

Точка замера	Al	Mg	O	Ca	S	Fe
% вес.						
Spot 1 (см. рис. 2, а)	31,29	1,54	20,67	-	-	25,89
Spot 1 (см. рис. 2, б)	34,10	15,1	47,36	2,83	0,61	-
Spot 2 (см. рис. 2, б)	-	-	-	56,16	43,84	-
Spot 1 (см. рис. 2, в)			33,97	36,98	24,01	5,05

Внутренний слой нароста (рис. 1, поз. 3) имеет коралловые отложения, состоящие из сульфида кальция (CaS) и алюминатов кальция типа  $nAl_2O_3 \cdot mCaO$  (см. табл. 2).

Качественный и количественный рентгеноструктурный анализ (РСА) внутреннего слоя нароста показал, что он состоит из следующих составляющих (рис. 3):

- сульфид кальция CaS – олдамит в количестве 30%;
- алюминат кальция типа  $(3CaO \cdot Al_2O_3)$  в количестве 15%;
- алюминат кальция типа  $(CaO \cdot 2Al_2O_3)$  в количестве 8%;
- магнетит  $Fe_3O_4$  в количестве 47%.

Наличие магнетита связано с окислением внутренних стенок «нароста» во время контакта с атмосферой во время его извлечения из погружного стакана, а также во время пробоподготовки для проведения исследований.

В результате определения толщины слоев, а также идентификации структурных составляющих по высоте и сечению «нароста» получены данные об особенностях развития различных слоев на внутренней поверхности погружного стакана (рис. 4).

Толщина «нароста» на внутренней поверхности погружного стакана по его высоте изменяется неравномерно. Максимальная толщина слоя отложений находится в верхней части полости погружного стакана, общая толщина слоя достигает 20 мм, по мере продвижения к нижней части стакана толщина слоя «нароста» уменьшается до 7,5–3,0 мм. Наружный слой нароста, состоящий преимущественно из отложений корунда (см. рис. 2, а), имеет максимальное развитие в верхней части полости погружного стакана (рис. 4, а), в которой протяженность этого слоя составляет ~ 8,0 мм. В нижней части стакана протяженность слоя с отложениями корунда уменьшается в среднем до 3,5 мм, при этом его максимальная толщина не превышает 5 мм.

К поверхностному слою, состоящему из отложений корунда  $Al_2O_3$ , примыкает промежуточный слой, содержащий отложения алюмомагнезиальной шпинели  $MgO \cdot Al_2O_3$  и включений сульфида кальция CaS (рис. 2, б). Толщина промежуточного слоя по высоте и сечению «нароста» изменяется аналогично поверхностному слою (рис. 4, а). Максимальная толщина в верхней части «нароста» (до 10 мм) в нижней части уменьшается до 2,0 мм. В среднем толщина промежуточного слоя «нароста», содержащего отложения  $MgO \cdot Al_2O_3 + CaS$ , составляет 4,5 мм.

Внутренний слой «нароста» находится на поверхности полости заросшего канала, состоит из отложений сульфида кальция CaS, а также алюминатов кальция типа  $3CaO \cdot Al_2O_3$  и  $CaO \cdot 2Al_2O_3$  (рис. 2, в, табл. 2). Внутренний слой имеет небольшую протяженность по сравнению с поверхностным и промежуточными слоями. Толщина в верхней части «нароста» минимальная 0,5 мм в нижней части увеличивается до 5 мм. В среднем толщина промежуточного слоя «нароста», содержащего отложения  $CaS + mCaO \cdot nAl_2O_3$ , составляет 4,5–5,0 мм (рис. 4, а). Уменьшение толщины внутреннего слоя в его верхней части связано с его размыванием поступающими порциями металлического расплава во время непрерывной разливки и как следствие попаданием отложений, содержащих сульфиды типа (CaS), алюминатов ( $mCaO \cdot nAl_2O_3$ ), алюмомагнезиальной шпинели ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ) в затвердевающую непрерывнолитую заготовку, что также подтверждается работами [7, 8].

Относительная величина развития слоев «нароста» составляет (рис. 4, б):

- 36% с отложениями ( $Al_2O_3$ ) – поверхностный слой;
- 50% с отложениями (CaS) и  $(MgO \cdot Al_2O_3)$  – промежуточный слой;
- 14% с отложениями (CaS) и алюминатов кальция типа  $3CaO \cdot Al_2O_3$  ( $T_{пл}=1535$  °C) и  $CaO \cdot 2Al_2O_3$  ( $T_{пл}=1745$  °C) – внутренний слой.

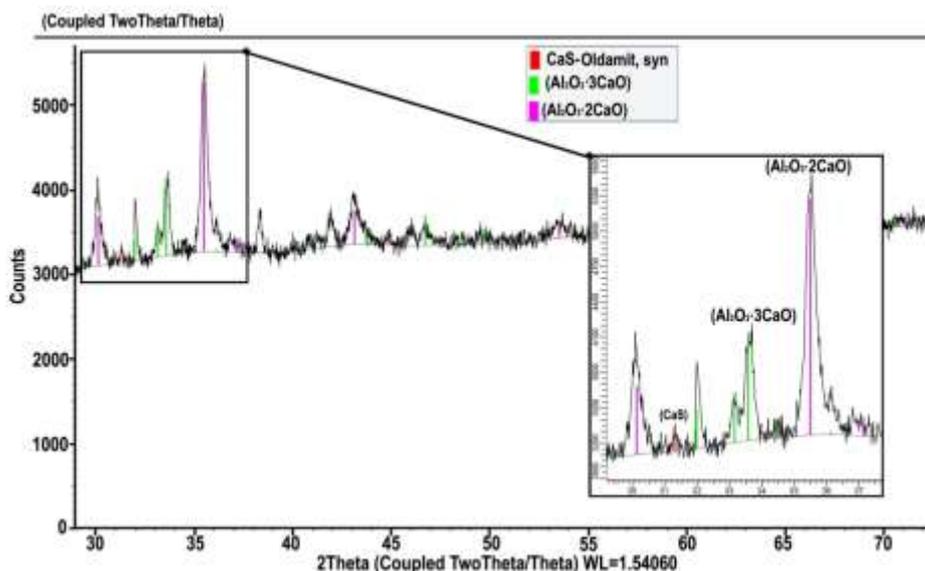


Рис. 3. Результаты рентгеноструктурного анализа внутреннего слоя

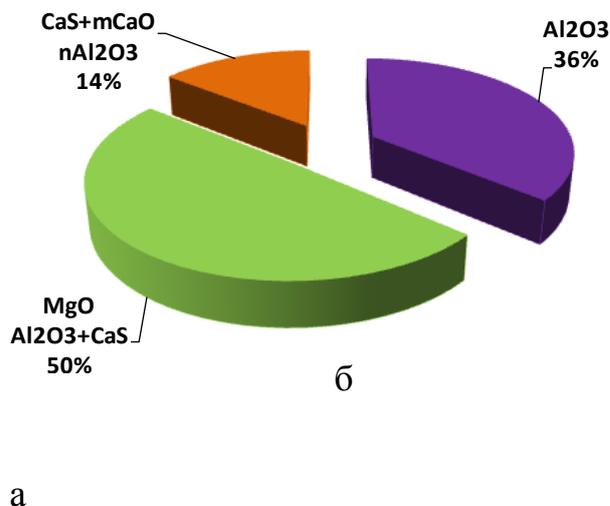
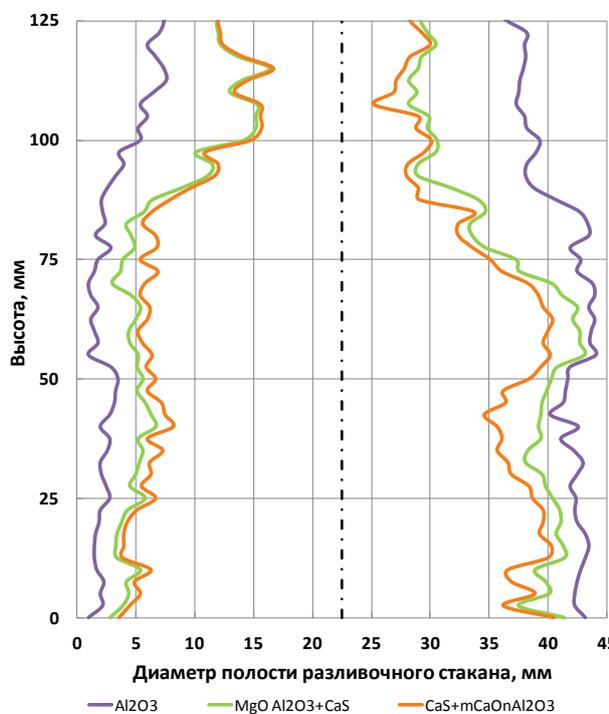


Рис. 4. Развитие структурных зон в «наросте»: а – изменение толщины слоев в «наросте» по высоте и сечению внутренней полости разливочного канала; б – относительное развитие слоев «нароста»

### Заключение

Исследование особенностей строения нароста, извлеченного из погружного стакана, показало, что основной причиной затягивания внутренней полости канала стакана является образование отложений CaS и MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на поверхностных слоях «нароста», образовавшихся за счет налипания частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на внутренние стенки погружного стакана. Кроме частиц CaS причиной зарастания полости погружного стакана является отложение тугоплавких алюминатов кальция типа CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, являющихся продуктом

модифицирования неметаллических включений корунда Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при обработке металлического расплава SiCa и Al.

### Список литературы

1. Information on [http://steelcast.ru/metal\\_quality\\_and\\_castability](http://steelcast.ru/metal_quality_and_castability)
2. Луковая М.С. Анализ процесса затягивания погружных стаканов при непрерывной разливке стали // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». Вып. 7. 2006. №10. С. 69–83.

3. Предоотращение зарастания каналов сталеразливочных ковшей / С.А. Горобовский, С.В. Казаков, С.В. Ефимов и др. // Сталь. 2003. №12. С. 16-18
4. Влияние некоторых технологических факторов на разливаемость раскисленной алюминием стали на сортовой МНЛЗ / А.А. Алексеенко, Е.В. Байбекова, С.Н. Кузнецов и др. // Электрометаллургия. 2007. №2. С. 16-20.
5. Механизм зарастания погружных стаканов при непрерывной разливке стали / Л.М. Аксельрод, В.М. Паршин, Е.Ф. Мазуров // Сталь. 2007. №4. С. 30-33.
6. Применение стаканов-дозаторов с продувкой аргоном для повышения уровня разливаемости сталей / А.Н. Божесков, В.В. Казаков, А.А. Коростелев и др. // Сталь. 2015. №7. С. 3-15.
7. Formation mechanism of oxide-sulfide complex inclusions in high-sulfur-containing steel melts / Jae Hong and Joo Hyun Park // Metallurgical and materials transaction B. 2018. Vol. 49B. P. 311-324.
8. Металлургический эффект, достигаемый при обработке кальцием стали на МНЛЗ/ Г.К. Тенсхоф, В.Кестнер, Р. Шнайт // Черные металлы. 2007. №8. С. 28-35.

#### Сведения об авторах

**Агарков Артем Юрьевич** – аспирант кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Руцкий Дмитрий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Зюбан Николай Александрович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: [tecmat49@vstu.ru](mailto:tecmat49@vstu.ru)

**Бабин Георгий Викторович** – аспирант кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: [babingv@mail.ru](mailto:babingv@mail.ru)

**Кириличев Михаил Владимирович** – аспирант кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: [misha\\_1992@mail.ru](mailto:misha_1992@mail.ru)

**Морозов Вадим Валерьевич** – начальник лаборатории выплавки и разливки стали ЦЗЛ АО «ВТЗ», Волжский, Россия. E-mail: [MorozovVV@vtz.ru](mailto:MorozovVV@vtz.ru)

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### IDENTIFICATION OF THE NATURE OF THE FORMED "GROWTHS" ON THE INNER WALL OF THE POURING CUP DURING CONTINUOUS CASTING OF C45E STEEL

**Artem Yu. Agarkov** – Postgraduate, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Dmitry V. Rutsikii** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Nikolay A. Zyuban** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief of department «Technology of Materials», Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: [tecmat49@vstu.ru](mailto:tecmat49@vstu.ru)

**Gorgiy V. Babin** – Postgraduate, Volgograd State Technical University Volgograd, Russia. E-mail: [babingv@mail.ru](mailto:babingv@mail.ru)

**Michail V. Kirilichev** – Postgraduate, Volgograd State Technical University Volgograd, Russia. E-mail: [misha\\_1992@mail.ru](mailto:misha_1992@mail.ru)

**Vadim V. Morozov** – Head of the laboratory of smelting and casting of steel, JSC "VTZ", Volzhsky, Russia. E-mail: [MorozovVV@vtz.ru](mailto:MorozovVV@vtz.ru)

**Abstract.** Presentation of special requirements for the machinability of cutting steels on metal-cutting machines causes the need to obtain steels with a normalized sulfur content. Continuous casting of such steels leads to a deterioration in spillability, which leads to a decrease in productivity and deterioration of the quality of the metal, due to contamination with non-metallic inclusions. In this paper, using THE example of obtaining C45E steel, the study of the structural features of the "build-up" extracted from the inner cavity of the immersion Cup was carried out. The study of optical (Leica 8C) and electronic (FEI Versa 3d) microscopy methods, as well as x-ray diffraction analysis (brukerd8 Advance diffractometer) found that the "growth" has a non-uniform structure. The study of the features of the structure of the "growths" on the inner cavity of the pouring cup found that the "growths" has a non-uniform structure. The surface layers of the "growths" contain refractory corundum deposits  $Al_2O_3$  with a thickness of 2 to 8 mm. the Intermediate layer adjacent to the surface contains deposits of inclusions of alumomagnesian spinel  $MgO \cdot Al_2O_3$  and inclusions of calcium sulfide CaS, the thickness of the layer is from 0.8 to 10 mm, respectively. The location of the secretions in the surface and intermediate layers is layered, alternating with metal. The inner layer is coral layers of calcium sulfide CaS deposits, fusible and refractory calcium aluminates of type  $3CaO \cdot Al_2O_3$  ( $T_L=1535^\circ C$ ) and  $CaO \cdot 2Al_2O_3$  ( $T_L = 1745^\circ C$ ). The main reason for the tightening of steel channels during casting of steel C45E is the formation of deposits CaS and  $MgO \cdot Al_2O_3$  on the inner layers of the "growths»

**Keywords:** continuously cast billet, casting, regulated sulfur content, macrostructure, surface, growth, castability.

---

Ссылка на статью:

Агарков А.Ю., Рудкий Д.В., Зюбан Н.А., Бабин Г.В., Кириличев М.В., Морозов В.В. Выявление природы образующихся «наростов» на внутренней стенке разливочного стакана при непрерывной разливке стали марки C45E // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1(32). С. 11-17.

Agarkov A.Yu., Rutskii D.V., Zuyban N.A., Babin G.V., Kirilichev M.V., Morozov V.V. Identification of the nature of the formed "growths" on the inner wall of the pouring cup during continuous casting of C45E steel. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp. 11-17.