



УДК 669.018.8

DOI 10.17073/0368-0797-2025-5-534-542



Оригинальная статья

Original article

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПЛАВОВ СТАЛИ 12Х18Н9ТЛ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ

Д. П. Швецов^{1, 2}, О. А. Чикова¹, В. С. Цепелев¹,
Н. И. Синицин¹, В. В. Вьюхин¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

² ООО «Центр Точного Литья» (Россия, 620078, Екатеринбург, улица Фронтových бригад, 18, корп. 4)

✉ n.i.sinitin@urfu.ru

Аннотация. Авторы изучили поведение шлаковых включений в четырех образцах, отобранных в процессе разливки аустенитной коррозионно-стойкой стали марки 12Х18Н9ТЛ. Образцы для исследования отбирали в производственных условиях после расплавления шихты (1), введения Ti и FeMn, наведения шлака и дозагрузки (2), повторного введения Ti, наведения шлака (3), наведения шлака (4). Элементный состав и температура расплава были определены в производственных условиях. Физико-химические свойства расплавов, полученных из отобранных образцов, такие как поверхностное натяжение и кинематическая вязкость были измерены в лабораторных условиях. Измерения проводились в диапазоне температур от 1370 до 1760 °С в режиме нагрева и последующего охлаждения образца. При наблюдении за образцом во время измерения поверхностного натяжения в режиме нагрева обнаружено выделение шлаковых включений из объема капли. При последующем охлаждении сформированной капли жидкой стали шлаковые частицы натекают из шлаковой ванны под действием силы Марангони. Анализ зависимости скорости всплывания шлаковой частицы от ее размера показал, что в объеме расплава могут остаться только частицы размером до 10 мкм, более крупные частицы успевают всплыть на поверхность жидкой ванны. Обнаружено, что под действием силы Марангони на поверхность образца могут натекают частицы шлака размером до 4 мм. Была определена объемная доля шлаковых включений и установлена корреляция между объемной долей шлаковых включений и элементном составе образца. Авторы сделали вывод о влиянии добавки титана в расплав как причине увеличения объемной доли шлаковых включений в отливке.

Ключевые слова: коррозионно-стойкая сталь, шлаковые включения, объемная доля, кинематическая вязкость, поверхностное натяжение, подготовка расплава, эффект Марангони

Благодарности: Статья выполнена в рамках государственной работы FEUZ-2023-0015.

Для цитирования: Швецов Д.П., Чикова О.А., Цепелев В.С., Синицин Н.И., Вьюхин В.В. Физико-химические исследования расплавов стали 12Х18Н9ТЛ для управления качеством литых изделий. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(5):534–542.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-534-542>

PHYSICO-CHEMICAL ANALYSIS OF 12Kh18N9TL STEEL MELTS FOR QUALITY CONTROL OF CAST PRODUCTS

D. P. Shvetsov^{1, 2}, O. A. Chikova¹, V. S. Tsepelev¹,
N. I. Sinitin¹, V. V. V'yukhin¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

² LLC “Precision Casting Center” (18, bld. 4 Frontovyykh Brigad Str., Yekaterinburg 620078, Russian Federation)

✉ n.i.sinitin@urfu.ru

Abstract. The authors studied the behavior of slag inclusions in four samples taken during casting of austenitic corrosion-resistant steel grade 12Kh18N9TL. The samples for the study were taken under production conditions after melting the charge (1), introducing Ti and FeMn, slag induction and additional

loading (2), re-introducing Ti, slag induction (3), slag induction (4). The elemental composition and temperature of the melt were determined under production conditions. The physicochemical properties of the melts obtained from the selected samples were measured under laboratory conditions: surface tension and kinematic viscosity. The measurements were carried out in the temperature range from 1370 to 1760 °C in the mode of heating and subsequent cooling of the sample. When observing the sample during the measurement of surface tension, the release of slag inclusions from the volume of the drop occurs in the heating mode. During subsequent cooling of the formed drop of liquid steel, slag particles flow from the slag bath under the action of the Marangoni force. Analysis of the dependence of the slag particle ascent rate on its size showed that only particles up to 10 µm in size can remain in the melt volume, while larger particles have time to float to the surface of the liquid bath. It was found that slag particles up to 4 mm in size can flow onto the surface of the sample under the action of the Marangoni force. The volume fraction of slag inclusions was determined, and a correlation was established between it and the element composition of the sample. The authors made a conclusion about the effect of Ti additives in the melt as the cause of increase in the volume fraction of slag inclusions in the casting.

Keywords: corrosion-resistant steel, slag inclusions, volume fraction, kinematic viscosity, surface tension, melt preparation, Marangoni effect

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state work FEUZ-2023-0015.

For citation: Shvetsov D.P., Chikova O.A., Tsepelev V.S., Sinitsin N.I., V'yukhin V.V. Physico-chemical analysis of 12Kh18N9TL steel melts for quality control of cast products. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(5):534–542. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-534-542>

ВВЕДЕНИЕ

Коррозионностойкая сталь аустенитного класса 12X18H9ТЛ обладает высокими механическими характеристиками в сочетании со стойкостью к растворам органических кислот [1]. Производство отливок из стали 12X18H9ТЛ затруднено ее низкими литейными свойствами. Отливки часто характеризуются неоднородностью микроструктуры, склонностью к межкристаллитной коррозии и низкой устойчивостью к образованию трещин. В процессе литейного производства наблюдается повышенное образование плен, пористость слитка, усадочные раковины и высокое содержание неметаллических включений в структуре слитка [2].

Современные требования к качеству литых изделий из коррозионностойких и жаропрочных сталей, таких как 12X18H9ТЛ, обусловлены их широким применением в энергетике, химической промышленности и авиастроении. Опытными работами проводится с целью повышения механических свойств литых изделий путем стабилизации аустенитной структуры посредством легирования и термомеханической обработки [3 – 5]. В работе [6] высказано предположение о благоприятной роли легирования медью, кремнием, титаном и ниобием для обеспечения комплекса высоких коррозионно-электрохимических и механических свойств стали. Обнаружено, что лазерное импульсное модифицирование поверхности нержавеющей стали 12X18H10Т приводит к образованию оксидов железа Fe_3O_4 и хрома Cr_2O_3 с присутствием диоксида титана TiO_2 [7]. Отсутствие нежелательных поверхностных загрязнений, уменьшение их размера и количества, а также увеличение количества остаточного аустенита повышают коррозионную стойкость аустенитных сталей [8]. Установлено, что в образцах аустенитных нержавеющей сталей марок 03X18H10и08X18H10Т вокруг неметаллических включений глобулярного типа с выделением второй фазы расположены скопления нитридов и оксидов титана различной дисперсности [9]. На поверхности холоднокатаного листа из

стали 08X18H10Т обнаружены грубые дефекты в виде отслоений, состоящие из нитридов титана и шлакообразующей смеси. При этом отмечено, что неметаллические включения играют решающую роль в снижении механических характеристик отливок [10].

Непосредственное влияние на получение отливок и слитков с заданными технологическими показателями оказывают литейные свойства стали. Наиболее актуальными для литейного производства являются такие физико-химические свойства расплава как вязкость и поверхностное натяжение. Наведение шлака в процессе плавки обеспечивает снижение угара летучих компонентов и препятствует образованию оксидных соединений. Однако в процессе слива расплава из печи происходит замешивание шлака в расплав и шлаковые включения могут присутствовать в стальных слитках. В экспериментах по измерению поверхностного натяжения жидкой стали 12X18H9ТЛ авторы наблюдали выделение шлака в процессе нагрева образца. Проведение систематических исследований поведения шлаковых включений в стали является целью данной работы.

На предприятии ООО «Центр точного литья» (г. Екатеринбург) выпускаются отливки из стали 12X18H9ТЛ, востребованные в рамках программы импортозамещения, что обуславливает запрос на повышение качества готовой продукции на этапе подготовки расплава. Обнаружено наличие дефектов готовой продукции, связанное с наличием шлаковых включений в отливке. Цель работы – выявить закономерности поведения шлаковых включений в отливках для управления качеством литых изделий из стали 12X18H9ТЛ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор образцов стали 12X18H9ТЛ осуществлялся из индукционной тигельной печи в условиях производства ООО «Центр точного литья» согласно технологической схеме, представленной на рис. 1. Организация производства литых изделий из стали 12X18H9ТЛ имеет следующую специфику. В качестве металлозавалки

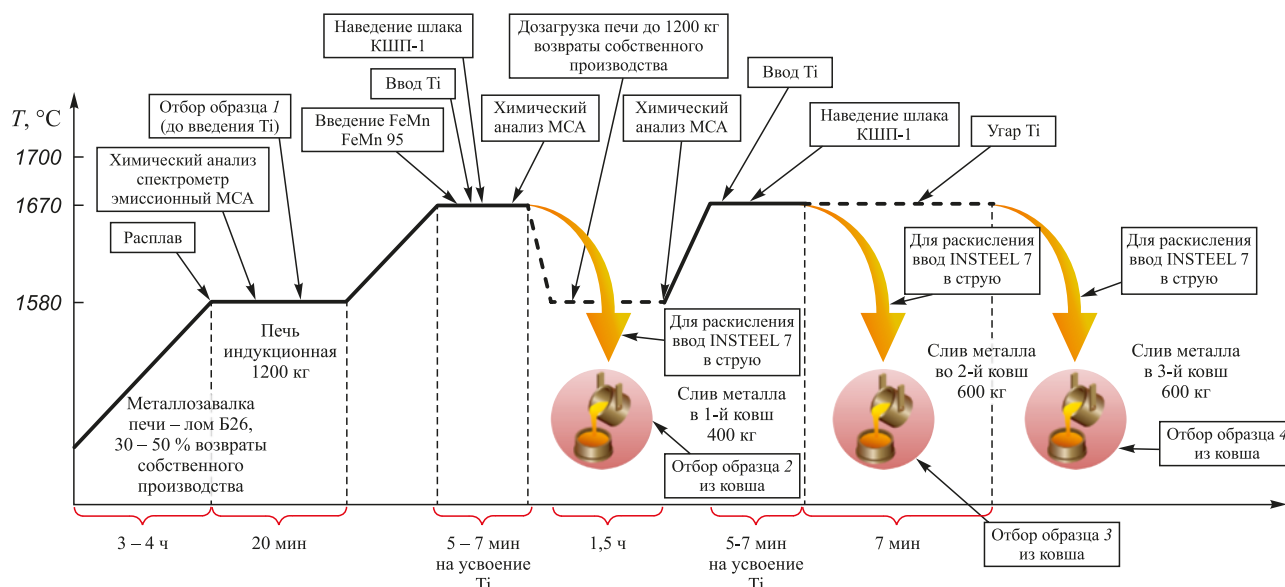


Рис. 1. Технологическая схема выплавки стали 12X18H9ТЛ с указанием отбора образцов для исследования

Fig. 1. Technological scheme of 12Kh18N9TL steel smelting with indication of sampling points for research

используются возвраты собственного производства той же марки, лом Б26. Плавка металлозавалки осуществляется ~3,5 ч с нагревом расплава до температуры 1580 °С, при достижении которой производится отбор пробы на элементный состав. Элементный состав определяется с помощью эмиссионного спектрометра МСА (модель МСА II v5). После ввода титана поверхность расплава покрывается коагулятором шлака перлитовым «КШП-1». Время для усвоения титана расплавом составляет 5 – 7 мин, температура выпуска расплава в ковш 1650 – 1670 °С. Перед выпуском металла в ковш на его дно помещается порция алюминия весом 200 г. В струю расплава вводится модификатор «INSTEEL 7» из расчета 500 г на 400 кг металла. После слива порции расплава из печи в первый ковш остатки расплава в печи догружаются сталью той же марки 12X18H9ТЛ с дальнейшим нагревом до 1580 °С в течении 1,5 ч, при достижении которой производится отбор пробы на элементный состав. Введение титана (8 кг) осуществляется по результатам элементного анализа для доведения до требуемого элементного состава. Перед выпуском расплава во второй и третий ковши производится повторное наведение шлака на поверхности расплава, нагрев расплава до температуры 1650 – 1670 °С. На дно ковша также помещается порция алюминия 300 г. При сливе расплава в ковш в струю вводится модификатора «INSTEEL 7» из расчета 750 г на 600 кг металла.

Таким образом, образцы для исследований были отобраны в производственных условиях согласно технологической схеме, представленной на рис. 1. Образец 1 отобран из печи до введения титана в расплав при температуре расплава 1580 °С. Образец 2 отобран из ковша после введения титана в расплав. Образцы 3 и 4 отбирались из второго и третьего ковшей соответ-

ственно. Результаты химического анализа проб стали 12X18H9ТЛ представлены в табл. 1.

Кинематическую вязкость ν и поверхностное натяжение σ жидкой стали 12X18H9ТЛ измеряли на оборудовании ИЦФМЖ УрФУ ИНМТ. Кинематическую вязкость ν измеряли методом крутильных колебаний тигля с расплавом [11; 12]. Опыты проводили в атмосфере высокочистого гелия под давлением 10⁵ Па. Температуру измеряли с помощью термодатчика ВР-5/20, показания с которой поступали на регулятор Термодат-14Е2. Измерение вязкости проводили с шагом по температуре 30 – 40 °С в режиме нагрева и последующего охлаждения образцов. При каждой температуре производилось не менее 10 последовательных отсчетов. Значения вязкости считались стабилизировавшимися, если их среднеквадратичный разброс не превышал случайной погрешности измерений. При проведении измерений регистрацию параметров колебаний осуществляли оптическим способом. Систематическая погрешность измерения ν составляла 3 %, а случайная погрешность, определяющая разброс точек в ходе одного опыта, при

Таблица 1. Химический состав проб стали 12X18H9ТЛ, мас. %

Table 1. Chemical composition of 12Kh18N9TL steel samples, wt. %

Номер образца	C	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Fe
1	0,059	0,423	1,174	9,373	17,49	0,022	70,31
2	0,060	0,563	1,196	9,298	17,41	0,503	69,80
3	0,065	0,558	1,113	9,549	17,50	0,595	69,48
4	0,064	0,655	1,044	9,430	17,43	0,401	70,31

доверительной вероятности $p = 0,95$ не превышала 1,5 %.

Поверхностное натяжение жидких сплавов стали 12X18N9TL измеряли методом лежащей капли в режиме нагрева до 1750 °С и последующего охлаждением образца. Рабочую камеру предварительно вакуумировали до 0,001 Па. Затем запускали гелий до давления примерно $\sim 10^5$ Па. Образцы выдерживали в камере с инертной средой в течение 5 – 8 мин при температуре плавления, затем производили нагрев до 1750 °С с шагом 30 – 40 °С. Изотермические выдержки в точках отсчета составляли не менее 15 мин. Профиль исследуемой капли снимали цифровой фотокамерой с копированием изображения на компьютер, геометрические размеры профиля капли определяли с помощью программы анализа изображений SIAMS 700 с точностью 0,3 – 0,6°. Признаки испарения расплава и уменьшения объема капли не наблюдались. Погрешность определения значений плотности и поверхностного натяжения не превышала 7 %, а случайная погрешность, определяющая разброс точек в ходе одного опыта, при доверительной вероятности $p = 0,95$ не превышала 1,5 % [13 – 16]. Данный метод измерения плотности и поверхностного натяжения металлических расплавов и установка для его реализации описаны в работах [17 – 19].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе наблюдения за образцом с помощью цифровой камеры в течение опыта по измерению поверх-

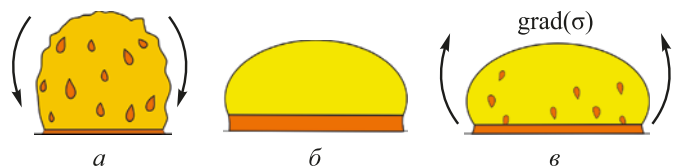


Рис. 2. Формирование и эволюция шлаковых включений на поверхности образца в опытах по измерению поверхностного натяжения жидкой стали 12X18N9TL методом сидящей капли

Fig. 2. Formation and evolution of slag inclusions on the sample surface during experiments on measuring the surface tension of liquid steel 12Kh18N9TL using the sessile-drop method

ностного натяжения обнаружено выделение шлака в процессе нагрева образца (рис. 2, а), что не позволило провести измерения в режиме нагрева. При нагреве до максимальной температуры происходило формирование контура жидкой капли в результате стекания шлака с поверхности капли в шлаковую ванну (рис. 2, б). При последующем охлаждении наблюдалось натекание шлака из образовавшейся шлаковой ванны на поверхность образца (рис. 2, в). Таким образом установлено, что в объеме слитка имеются шлаковые включения.

Определена объемная доля шлака в образце по методике, описанной в работе [20]. На рис. 3 представлены температурные зависимости объемной доли шлаковых включений m (%) в образцах стали 12X18N9TL. Обращает внимание увеличение объемной доли шлаковых включений от образца 1 к образцу 3. Наименьшее зна-

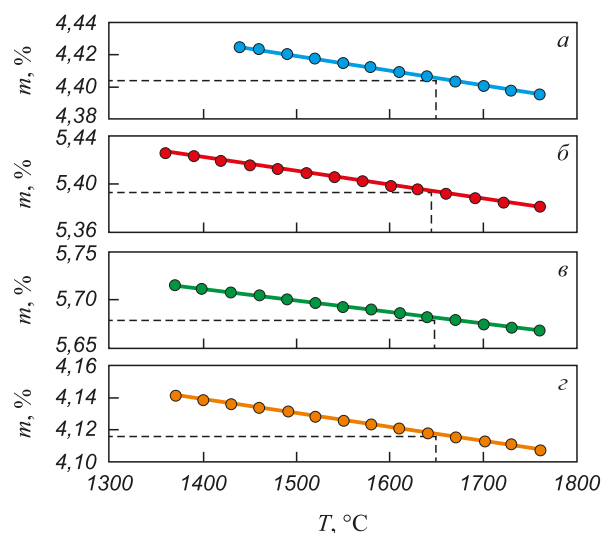


Рис. 3. Температурные зависимости объемной доли шлаковых включений в образцах жидкой стали 12X18N9TL: а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4. Пунктирной линией показано значение объемной доли шлаковых включений при температуре плавки

Fig. 3. Temperature dependences of volume fraction of slag inclusions in the samples of liquid steel 12Kh18N9TL: а – sample 1; б – sample 2; в – sample 3; г – sample 4. The dotted line shows the value of volume fraction of slag inclusions at smelting temperature

Таблица 2. Объемная доля шлаковых включений, поверхностное натяжение и кинематическая вязкость стали 12X18N9TL при температуре плавки 1670 °С

Table 2. Volume fraction of slag inclusions, surface tension and kinematic viscosity of 12Kh18N9TL steel at smelting temperature (1670 °C)

Номер образца	Объемная доля шлаковых включений m , %	Поверхностное натяжение σ , мДж/м ²	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^{-7}$, м ² /с
1	4,41	1930	6,20
2	5,39	1650	5,85
3	5,68	1850	5,67
4	4,12	1980	6,07

чение объемной доли шлаковых включений обнаружено в образце 4. Значения объемной доли шлаковых включений при температуре плавки стали 12Х18Н9ТЛ представлены в табл. 2. Объемная доля шлаковых включений увеличивается от первого образца, взятого из расплава до введения титана, до третьего образца, взятого из второго ковша после дозагрузки печи. В четвертом образце, взятом из третьего ковша согласно технологической схемы (рис. 1), объемная доля шлаковых включений оказалась минимальной.

На шлаковую частицу размером $r_{\text{шл}}$ и плотностью $d_{\text{шл}}$ в объеме расплава (плотность расплава $d_{\text{м}}$, динамическая вязкость μ) действуют сила Архимеда $F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 d_{\text{м}} g$, сила тяжести $F_T = \frac{4}{3}\pi r^3 d_{\text{шл}} g$ и сила

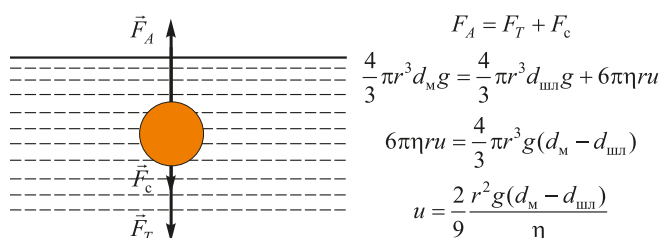


Рис. 4. Иллюстрация процесса всплытия шлаковых частиц в объеме расплава

Fig. 4. Illustration of slag particles floating in the melt volume

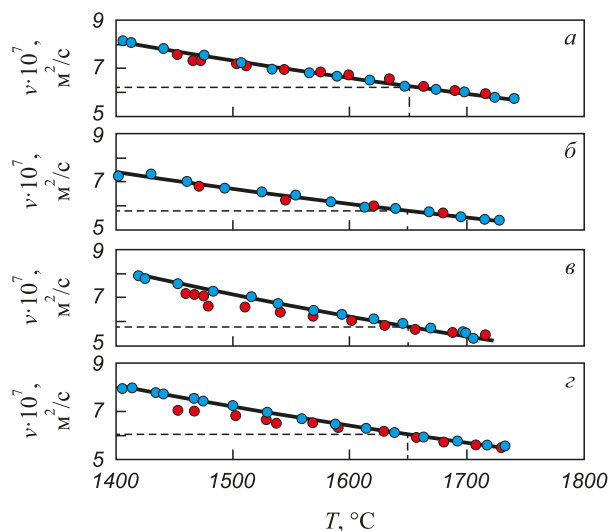


Рис. 5. Температурные зависимости кинематической вязкости жидкой стали 12Х18Н9ТЛ, полученные в режиме нагрева с последующим охлаждением:

а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4

● – нагрев; ● – охлаждение

Пунктирной линией показано значение кинематической вязкости при температуре плавки

Fig. 5. Temperature dependences of kinematic viscosity of liquid steel 12Kh18N9TL obtained in heating mode with subsequent cooling:

а – sample 1; б – sample 2; в – sample 3; г – sample 4

● – heating, ● – cooling

The dotted line shows the value of kinematic viscosity at smelting temperature

Стокса $F_c = 6\pi\eta u$. Под действием этих сил шлаковые частицы вследствие разницы плотностей шлака и жидкого металла всплывают на поверхность (рис. 4). При уравнивании всех трех сил шлаковая частица будет двигаться в объеме расплава с постоянной скоростью u .

Скорость всплытия шлаковой частицы u будет зависеть от ее размера и определяется из выражения

$$u = \frac{2r^2g(d_{\text{м}} - d_{\text{шл}})}{9vd_{\text{м}}}, \quad (1)$$

где r – радиус шлаковой частицы; g – ускорение свободного падения; $d_{\text{м}}$ – плотность жидкого металла; $d_{\text{шл}}$ – плотность шлака; v – кинематическая вязкость жидкого металла.

На рис. 5 представлены температурные зависимости кинематической вязкости, полученные в режиме нагрева с последующим охлаждением. Наблюдается отсутствие гистерезиса ветвей нагрева и охлаждения, что может свидетельствовать об отсутствии необратимых структурных превращений в расплаве и, как следствие, об устойчивости шлаковых частиц в объеме расплава вплоть до температур 1740 °С. Удаление же шлаковых частиц из объема расплава в таком случае возможно только за счет их всплытия на поверхность.

На рис. 6 представлены зависимости скорости шлаковых частиц в жидкой стали 12Х18Н9ТЛ от их размера по выражению (1). Из рис. 6 следует, что крупные частицы достаточно быстро всплывают на поверхность, не успевают всплыть на поверхность в течении процесса плавки частицы размером менее 10 мкм, которые остаются в объеме расплава.

На рис. 7 представлены результаты измерения поверхностного натяжения образцов жидкой стали

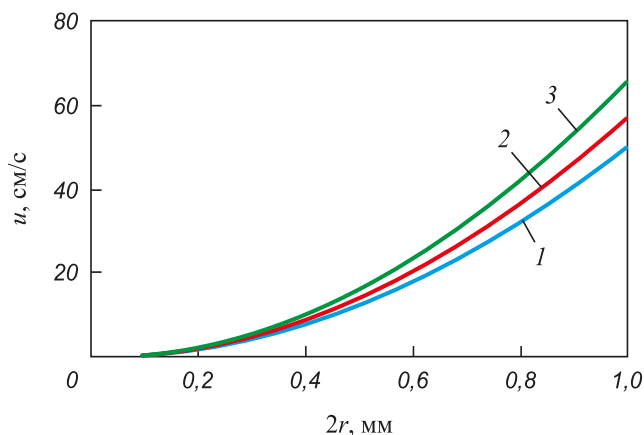


Рис. 6. Зависимость скорости всплытия шлаковых частиц в жидкой стали 12Х18Н9ТЛ от размера при температуре, °С: 1 – 1500; 2 – 1600; 3 – 1700

Fig. 6. Dependence of floating rate of slag particles in liquid steel 12Kh18N9TL on particle size, °С: 1 – 1500; 2 – 1600; 3 – 1700

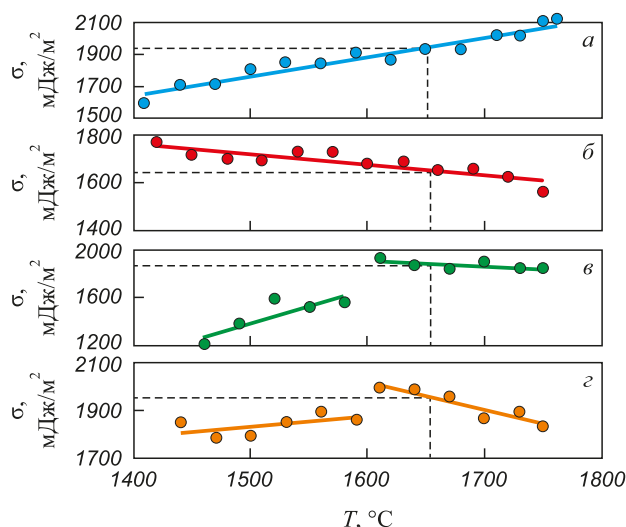


Рис. 7. Температурные зависимости поверхностного натяжения образцов жидкой стали 12Х18Н9ТЛ, полученные в режиме охлаждения:
а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; з – образец 4
Пунктирной линией показано значение поверхностного натяжения при температуре плавки

Fig. 7. Temperature dependences of surface tension of liquid steel 12Kh18N9TL samples obtained in cooling mode:
а – sample 1; б – sample 2; в – sample 3; з – sample 4
The dotted line shows the value of surface tension of slag inclusions at smelting temperature

12Х18Н9ТЛ. На температурных зависимостях для третьего и четвертого образцов обнаружены аномалии при температуре 1600 °С, связанные с эффектом образования на поверхности образца пленки шлака вследствие натекания частиц шлака из шлаковой ванны. Шлаковые частицы и жидкий металл характеризуются различными значениями поверхностного натяжения. Величина поверхностного натяжения характеризует силу стягивания капли к форме эллипса. Наличие градиента поверхностного натяжения $d\sigma/dr$ в вертикальном направлении будет приводить к возникновению силы Марангони, действие которой приводит к движению частиц шлака от основания капли к вершине; действие силы Марангони уравнивается действием силы тяжести (рис. 8). Величину силы Марангони оценивали

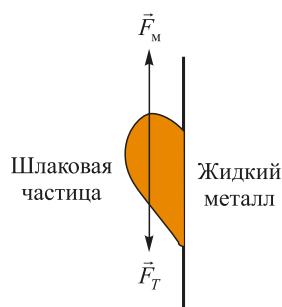


Рис. 8. Эффект Марангони

Fig. 8. The Marangoni effect

по градиенту поверхностного натяжения $d\sigma/dr$ из выражения [21]

$$F_M = 4\pi r^2 \frac{d\sigma}{dT} \frac{\partial T}{\partial r} \Rightarrow F_M = 4\pi r^2 \frac{d\sigma}{dr}. \quad (2)$$

Таким образом, на частицу шлака, расположенную на поверхности капли жидкой стали 12Х18Н9ТЛ, действуют сила тяжести $F_T = \rho_{\text{шл}} g V_{\text{ч}}$ и сила Марангони (2) (рис. 8). Запишем условие равновесия этих сил:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{шл}} g = 4\pi r^2 \frac{d\sigma}{dr},$$

$$\frac{d\sigma}{dr} = \rho_{\text{шл}} g r.$$

Откуда для $\Delta\sigma$ можно получить выражение $\int d\sigma = \int \rho_{\text{шл}} g r dr$,

$$\Delta\sigma = \frac{\rho_{\text{шл}} g r^2}{2}. \quad (3)$$

Показатель $\Delta\sigma$ в выражении (3) представляет собой разницу величин поверхностного натяжения шлака и металла, при которой шлаковая частица будет находиться в равновесии под действием силы тяжести и силы Марангони. На рис. 9 представлена зависимость $\Delta\sigma$ от радиуса частицы шлака на поверхности капли. Если $\Delta\sigma = 200$ мДж/м², подниматься от основания капли к вершине по поверхности капли могут частицы размером более 4 мм. Исходя из наблюдаемого явления натекания шлаковых частиц следует, что в процессе формирования шлаковой ванны у основания капли происходит изменение поверхностного натяжения до величины, при которой силы Марангони становятся преобладающими.

В табл. 3 представлены сведения о химическом составе образцов и объемной доле шлаковых включений. Из анализа данных следует, что объемная доля шлаковых включений увеличивается с увеличением

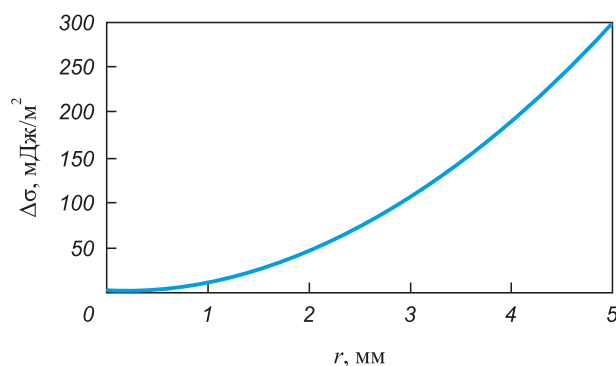


Рис. 9. Зависимость $\Delta\sigma$ от радиуса r шлаковой частицы на поверхности жидкой стали 12Х18Н9ТЛ

Fig. 9. Dependence of $\Delta\sigma$ on the radius r of a slag particle on the surface of liquid steel 12Kh18N9TL

Таблица 3. Химический состав образцов, мас. % и объемная доля включений

Table 3. Chemical composition of the samples, wt. % and volume fraction of inclusions

Номер образца	C	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Fe	Объемная доля шлаковых включений m , %
1	0,059	0,423	1,174	9,373	17,49	0,022	70,31	4,41
2	0,060	0,563	1,196	9,298	17,41	0,503	69,80	5,39
3	0,065	0,558	1,113	9,549	17,50	0,595	69,48	5,68
4	0,064	0,655	1,044	9,430	17,43	0,401	70,31	4,12

содержания титана, на основании чего можно сделать предположение о решающей роли добавок титана в образовании шлаковых включений.

Выводы

Исследовано поведение шлаковых включений в образцах, отобранных в процессе разлива аустенитной коррозионностойкой стали 12X18H9ТЛ. В опытах по измерению поверхностного натяжения жидкой стали методом лежащей капли с помощью цифровой камеры обнаружено выделение шлака из образца при нагреве до 1760 °С. Капли шлака стекали с поверхности образца, формируя у основания капли шлаковую ванну. При последующем охлаждении сформированной капли жидкой стали обнаружено натекание шлаковых частиц из шлаковой ванны под действием силы Марангони. Проведена оценка размерной зависимости скорости всплывания шлаковых включений и величины силы Марангони. Анализ соотношения скорости всплывания шлаковой частицы и ее размера показал, что в объеме расплава могут остаться только частицы размером до 10 мкм, более крупные частицы успевают всплыть на поверхность жидкой ванны. Установлено, что под действием силы Марангони на поверхность образца могут нтекать частицы шлака размером до 4 мм.

Измерены актуальные для практики литейного производства физико-химические свойства жидкой стали 12X18H9ТЛ: поверхностное натяжение и кинематическая вязкость. Замеры проведены в интервале температур от 1370 до 1760 °С. На температурных зависимостях кинематической вязкости не наблюдается гистерезис ветвей нагрева и охлаждения, что свидетельствует об отсутствии необратимых структурных превращений в расплаве. Исходя из этого можно сделать предположение об устойчивости шлаковых частиц в расплаве при нагреве до температур 1760 °С. На температурных зависимостях поверхностного натяжения образцов, отобранных из третьего и четвертого ковша в процессе разлива стали 12X18H9ТЛ, обнаружены аномалии, связанные с резким снижением значения поверхностного натяжения при температуре 1600 °С. Такое аномальное поведение обусловлено натеканием шлаковых частиц из сформировавшейся шлако-

вой ванны на поверхность капли под действием силы Марангони.

Произведена оценка объемной доли шлаковых включений в расплаве. Обнаружено минимальное значение объемной доли шлаковых включений в образце до ввода титана и в образце, отобранном из четвертого ковша. Снижение объемной доли шлаковых включений в четвертом образце, отобранном из последнего ковша, в который сливались остатки жидкого металла из печи, связано со всплыванием шлаковых частиц на поверхность жидкого металла в процессе выплавки стали. Установлена зависимость объемной доли шлаковых включений от содержания титана в образце. Увеличение количества титана сопровождается увеличением объемной доли шлаковых включений в образце. Исходя из этого можно предположить, что титан играет решающую роль в образовании шлаковых включений. Сделано заключение о влиянии добавки титана в расплав как причине увеличения объемной доли шлаковых включений в слитке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ульянин Е.А. Коррозионностойкие стали и сплавы: Справочник. Москва: Металлургия; 1991:256.
2. Рамазанов А.К., Ганеев А.А. Особенности литья корпусных деталей трубопроводной арматуры из коррозионностойкой стали марки 12X18H9ТЛ. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2018;18(2):22–29.
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-22-29>
Ramazanov A.K., Ganeev A.A. Features of casting pipeline valve body parts made of corrosion-resistant steel 12Kh18N9TL. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2018;18(2):22–29. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-22-29>
3. Макаров А.В., Скорынина П.А., Осинцева А.Л., Юровских А.С., Саврай Р.А. Повышение трибологических свойств аустенитной стали 12X18H10Т наноструктурирующей фрикционной обработкой. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2015;69(4):80–92.
<http://dx.doi.org/10.17212/1994-6309-2015-4-80-92>
Makarov A.V., Skorynina P.A., Osintseva A.L., Yurovskikh A.S., Savrai R.A. Improving the tribological properties of austenitic 12Kh18N10T steel by nanostructuring

- frictional treatment. *Metal Working and Material Science*. 2015;69(4):80–92. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.17212/1994-6309-2015-4-80-92>
4. Вороненко Б.И. Современные коррозионно-стойкие аустенитно-ферритные стали (Обзор). *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1997;(10):20–28.
Voronenko B.I. Modern corrosion-resistant austenitic-ferritic steels (Review). *Metal Science and Heat Treatment*. 1997;(10):20–28. (In Russ.).
5. Цуканов В.В., Цыганко Л.К., Шандыба Г.А., Зиза А.И. Влияние легирования и термической обработки на характеристики литейной коррозионно-стойкой азотсодержащей стали аустенитного класса. *Вопросы материаловедения*. 2015;81(1):7–11.
Tsukanov V.V., Tsyganko L.K., Shandyba G.A., Ziza A.I. Alloying and heat treatment effects on the properties of cast corrosion-resistant nitrogenous austenitic steel. *Voprosy materialovedeniya*. 2015;81(1):7–11. (In Russ.).
6. Фельдгандлер Э.Г., Плассеев А.В. Влияние легирования Si и Cu на коррозионно-электрохимические и механические свойства аустенитной стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003;(10):12–21.
Fel'dgandler E.G., Plaskeev A.V. The alloying effect of Si and Cu on the mechanical and corrosive-electrochemical properties of austenite steel. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2003;(10):12–21. (In Russ.).
7. Проскуряков В.И., Родионов И.В. Формирование состава и характеристик поверхности хромоникелевой стали 12X18N10T при лазерном модифицировании в слое экспериментальной легирующей обмазки. *Журнал технической физики*. 2022;92(1):84–91.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2022.01.51856.173-21>
Proskuryakov V.I., Rodionov I.V. Formation of the composition and characteristics of the surface of chromonickel steel 12CR18NI10T during laser modification in a layer of experimental alloying coating. *Technical Physics*. 2022;92(1):84–91. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.01.51856.173-21>
8. Moradi M., Ghorbani D., Moghadam M.K., Kazazi M., Rouzbahani F., Karazi S. Nd:YAG laser hardening of AISI 410 stainless steel: Microstructural evaluation, mechanical properties, and corrosion behavior. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;795:213–222.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.016>
9. Токовой О.К., Шабуров Д.В. Исследование неметаллической фазы в аустенитной нержавеющей стали. *Известия вузов. Черная Metallургия*. 2014;57(12):20–24.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-12-20-24>
Tokovoi O.K., Shaburov D.V. Study of nonmetallic phase in austenitic stainless steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014;57(12):20–24. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-12-20-24>
10. Полонский Я.Я., Бондарева О.П., Гоник И.Л. Фрактографические исследования металла опытных плавок феррито-аустенитной стали 08X18Г8Н2Т. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2011;5(78):142–144.
Polonskii Ya.Ya., Bondareva O.P., Gonik I.L. Fractographic studies of metal from experimental melts of ferritic-austenitic steel 08Kh18G8N2T. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011;5(78):142–144. (In Russ.).
11. Швидковский Е.Г. Некоторые вопросы вязкости расплавленных металлов. Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы; 1955:206.
12. Арсентьев П.П., Яковлев В.В., Крашенинников М.Г. и др. Физико-химические методы исследования металлургических процессов. Москва: Металлургия; 1988:511.
13. Liggieri L., Passerone A. An automatic technique for measuring the surface tension of liquid metals. *High Temperature Technology*. 1989;7(2):82–86.
<https://doi.org/10.1080/02619180.1989.11753417>
14. Egry I., Ricci E., Novakovic R., Ozawa S. Surface tension of liquid metals and alloys – Recent developments. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010;159(2):198–212.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.06.009>
15. Иващенко Ю.Н., Хиля Г.П. Установка для измерения свободной поверхностной энергии, контактного угла и плотности расплавов методом лежащей капли. *Приборы и техника эксперимента*. 1972;(6):208–211.
Ivashchenko Yu.N., Khilya G.P. Installation for measuring the free surface energy, contact angle and density of melts by the sessile drop method. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 1972;(6):208–211. (In Russ.).
16. Lee J., Kiyose A., Nakatsuka S., Nakamoto M., Tanaka T. Improvements in surface tension measurements of liquid metals having low capillary constants by the constrained drop method. *ISIJ International*. 2004;44(11):1793–1799.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1793>
17. Директор Л.Б., Зайченко В.М., Майков И.Л. Усовершенствованный метод лежащей капли для определения поверхностного натяжения жидкостей. *Теплофизика высоких температур*. 2010;48(2):193–197.
Direktor L.B., Zaichenko V.M., Maikov I.L. An improved method of sessile drop for determining the surface tension of liquids. *High Temperature*. 2010;48(2):176–180.
<https://doi.org/10.1134/S0018151X10020069>
18. Prasad L.C., Chatterjee S.K., Jha R.K. Atomic order and interionic pair potentials in Cu-Sn alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2007;441(1-2):43–51.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.09.079>
19. Ricci E., Giuranno D., Grosso I., Lanata T., Amore S., Novakovic R., Arato E. Surface tension of molten Cu-Sn alloys under different oxygen containing atmospheres. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2009;54(6):1660–1665.
<https://doi.org/10.1021/jc800717a>
20. Глузман Л.Д., Эдельман И.И. Лабораторный контроль коксохимического производства. Харьков: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии; 1957:635.
21. Zhao D., Gao J. Liquid phase separation in undercooled Cu–Co alloys under the influence of static magnetic fields. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2019;377:20180207.
<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2018.0207>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Даниил Петрович Швецов, инженер Исследовательского центра физики металлических жидкостей, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; начальник отдела технического контроля, ООО «Центр Точного Литья»
ORCID: 0000-0002-1428-4564
E-mail: shwedmail@gmail.com

Ольга Анатольевна Чикова, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0002-3347-9148
E-mail: chik63@mail.ru

Владимир Степанович Цепелев, д.т.н., профессор, директор Исследовательского центра физики металлических жидкостей, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0003-4195-9042
E-mail: v.s.tsepelev@urfu.ru

Николай Иванович Синицин, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики, старший научный сотрудник Исследовательского центра физики металлических жидкостей, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0002-6264-6523
E-mail: n.i.sinitsin@urfu.ru

Владимир Викторович Вьюхин, научный сотрудник Исследовательского центра физики металлических жидкостей, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0002-0772-8155
E-mail: v.v.vyukhin@urfu.ru

Daniil P. Shvetsov, Engineer of the Research Center of Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; Head of Technical Control Department, LLC "Precision Casting Center"
ORCID: 0000-0002-1428-4564
E-mail: shwedmail@gmail.com

Ol'ga A. Chikova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Chair of Physics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0002-3347-9148
E-mail: chik63@mail.ru

Vladimir S. Tsepelev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Research Center of Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0003-4195-9042
E-mail: v.s.tsepelev@urfu.ru

Nikolai I. Sinitsin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof. of the Chair of Physics, Senior Researcher of the Research Center of Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0002-6264-6523
E-mail: n.i.sinitsin@urfu.ru

Vladimir V. Vyukhin, Research Associate of the Research Center of Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0002-0772-8155
E-mail: v.v.vyukhin@urfu.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Д. П. Швецов – инициатива исследования, подготовка образцов, планирование экспериментов, проведение исследования, работа над текстом.
О. А. Чикова – написание текста, обсуждение результатов, формулировка концепции исследования.
В. С. Цепелев – научное руководство, обсуждение результатов, формулировка концепции исследования.
Н. И. Синицин – написание текста, обсуждение результатов, выполнение расчетов.
В. В. Вьюхин – проведение исследования, обсуждение результатов, оформление графических материалов.

D. P. Shvetsov – research initiative, sample preparation, experiment planning, conducting research, writing the text.
O. A. Chikova – writing the text, discussion of results, conceptualization.
V. S. Tsepelev – scientific guidance, discussion of results, conceptualization.
N. I. Sinitsin – writing the text, discussion of results, performing calculations.
V. V. Vyukhin – conducting research, discussion of results, designing visual materials.

Поступила в редакцию 02.05.2025
 После доработки 11.07.2025
 Принята к публикации 29.09.2025

Received 02.05.2025
 Revised 11.07.2025
 Accepted 29.09.2025