

Селиверстова Т.В., Селиверстов В.Ю., Гуда А.И.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
СУЛЬФИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ОТЛИВКЕ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ
ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА РАСПЛАВ,
ЗАТВЕРДЕВАЮЩИЙ В КОКИЛЕ**

Аннотация. Приведены результаты анализа цифровых изображений серных отпечатков темплетов отливок из стали 35Л, полученных литьем в кокиль по традиционной технологии и с применением газодинамического воздействия. Предложена математическая модель для оценки влияния технологических режимов на количество и размеры сульфидных включений.

Ключевые слова: сульфиды, дефекты, математическая модель, сталь, 35 Л, сечение отливки, режимы, газо-динамическое воздействие.

Введение. Процесс затвердевания характеризуется развитием химической неоднородности, формированием различных видов дефектов, количество и распределение которых определяет качество отливок. Это в полной мере относится к сульфидным включениям в стали. Поэтому особое внимание привлекают новые способы снижения негативного влияния данных включений, основанные на использовании, в том числе, внешних физических воздействий на процесс затвердевания. К их числу относится технология газодинамического воздействия на расплав в литейной форме.

Анализ предыдущих публикаций и постановка задачи. Известно, что растворимость серы в аустените и феррите при комнатной температуре очень мала. При этом практически вся сера в сталях находится в виде сульфидов. Свойства стали зависят не только от количества сульфидов (содержания серы), но и от их размеров, формы и распределения. В литой среднеуглеродистой стали при изменении концентрации серы от 0,02 до 0,06 % относительное сужение уменьшается с 53-62 до 20-

47 %, а ударная вязкость при испытании образцов типа Шарпи – с 0,8-1,1 до 0,4-0,5 МДж/м² [1]. Увеличение содержания серы в литой стали с 0,24% S, 1,07 % Mn, 1,29 % Si и 0,0048 % P от 0,020 до 0,054% по данным [2, 3] снижает ударную вязкость более чем в два раза. В стали 30ХНМЛ с увеличением содержания серы от 0,016 до 0,12 % количество сульфидов возрастает, увеличивается и их средний размер [1]. С увеличением загрязненности стали сульфидами, растет количество возникающих микротрещин, их слияние облегчается из-за уменьшения расстояния между включениями. Это и обуславливает снижение работы распространения трещины [1].

Авторами [1] установлена существенная зависимость пластичности и ударной вязкости от типа и характера распределения сульфидов. Наиболее отрицательно на механические свойства влияют эвтектические сульфиды, которые распределяются по границам дендритных ветвей, при этом, сульфидная фаза эвтектики представляет собой разветвленный скелет. Суммарная длина включений может значительно изменяться при одинаковом количестве. Наиболее благоприятной формой сульфидных включений можно считать глобулярную: ей соответствует минимальный индекс загрязненности и максимальные значения свойств стали [1]. В работе [2] отмечается, что с точки зрения плотности и механических свойств, оптимальными являются дезориентированные неправильной формы включения, образующиеся в стали при наличии в ней остаточного алюминия (>0,020%). На размер включений и их распределение существенным образом влияют процессы раскисления и модифицирования ферроцерием и другими сплавами с редкоземельными элементами. В результате отмечается повышение механических свойств стали [1, 2, 3]. Кроме того, одним из эффективных методов воздействия на затвердевающий расплав является давление, которое способствует равномерному распределению неметаллических включений в отливке. Их количество и размер в тепловом центре отливки из углеродистой стали, например, при пуансонном и поршневым прессовании уменьшаются соответственно в 3,5 и 1,5 раза по сравнению с отливками, полученными обычными способами литья [4]. Результаты исследований механических

свойств отливок из стали 35Л, полученных по традиционной технологии литья в кокиль и с применением газодинамического воздействия, также показали благотворное действие давления на размеры и характер распределения сульфидных включений [5]. При реализации данной технологии возможно оказывать влияние на процесс затвердевания за счет создания регулируемого газового давления в системе отливка-устройство для ввода газа [6, 7]. Поэтому проведение исследований, направленных на определение закономерностей распределения сульфидных включений, их количества и размеров в литой стали при различных режимах газодинамического воздействия, является актуальной задачей.

Целью работы является проведение количественного анализа цифровых изображений серных отпечатков темплетов отливок из стали 35Л, заливаемых в неохлаждаемый кокиль, получение на его основе математической модели зависимостей размеров и количества сульфидных включений для различных зон сечения отливки и параметров газодинамического воздействия.

Результаты исследований. Заливку стали марки 35Л (ГОСТ 977-88) осуществляли в стальной вытряхной кокиль со средней толщиной стенки 100 мм, высотой рабочей полости 550 мм и средним диаметром 240 мм. Температура выпуска из печи составляла $1640 \pm 5^\circ\text{C}$. Газодинамическое воздействие проводили с различной скоростью повышения давления аргона в системе отливка-устройство подачи газа (V_p) и показателями максимального давления (P) по режимам: плавка № 2 – $V_p = 0,04$ МПа/с, $P = 1$ МПа; плавка № 3 – $V_p = 0,08$ МПа/с, $P = 2$ МПа; плавка № 4 – $V_p = 0,12$ МПа/с, $P = 3$ МПа. Из полученных по традиционной технологии (плавка № 1) и с применением газодинамического воздействия (плавки №№ 2-4) цилиндрических отливок высотой 370 ± 5 мм и массой – 160 ± 3 кг на расстоянии 180 мм от нижнего торца вырезали темплеты для изготовления серных отпечатков в виде диска толщиной 30 мм [5]. Диаметр дисков – 240 ± 3 мм.

Химический состав стали плавов №№ 1 – 4 представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали

№ плавки	Содержание химических элементов, масс. %					
	C	Mn	Si	P	S	Fe
1	0,35	0,60	0,40	0,048	0,045	ост.
2	0,36	0,50	0,45	0,040	0,043	ост.
3	0,38	0,55	0,41	0,045	0,040	ост.
4	0,36	0,45	0,35	0,036	0,038	ост.

Анализ полученных серных отпечатков проводили в соответствии с условным разделением площади отпечатка на осевую, радиальную и периферическую зоны, основываясь на результатах термографических исследований процесса затвердевания данной отливки [8]. При этом ширина осевой зоны по радиусу отливки составила 40 мм, радиальной зоны – 60 мм, периферической – 20 мм.

Цифровые изображения серных отпечатков обрабатывали с помощью компьютерной программы «ASImprints», предназначенной для количественного анализа изображений серных отпечатков [9]. К специфическим особенностям цифровых изображений серных отпечатков можно отнести: цветовую градацию изображения (оттенки серого); нерегулярную форму областей пониженной яркости, соответствующих сульфидным включениям; случайный характер проявления областей с пониженной яркостью; случайный размер областей с пониженной яркостью; неограниченный размер изображения [10]. Кроме того, при изготовлении серных отпечатков нередко часть полученного изображения оказывается дефектной, что требует ее исключения при последующем количественном анализе. Поэтому необходимо убедиться в однородности распределения сульфидных включений в пределах выбранных зон на монохромных цифровых изображениях, т.е. может ли отдельный фрагмент, вырезанный из зоны, адекватно характеризовать количественные параметры всей рассматриваемой зоны.

В ходе исследования из каждой зоны серного отпечатка было выделено по 10 фрагментов размером 10 × 10 мм и для каждого фрагмента получен массив значений, содержащий информацию о размерах включений и их количестве, построены графики зависимости количества включений от их размера. Зависимость представляет собой убывающую функцию, которая может быть аппроксимирована либо степенной, либо

экспоненциальной зависимостью. Установлено, что степенная аппроксимация более точно описывает распределение сульфидных включений для фрагментов изображений серных отпечатков темплетов отливок, полученных как по традиционной технологии (рис 1), так и с применением газодинамического воздействия (рис 2).

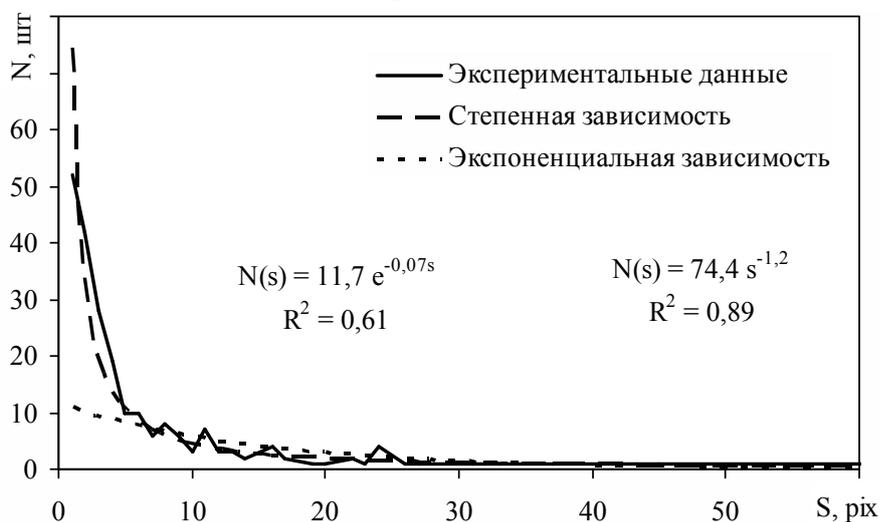


Рисунок 1 - Распределение сульфидных включений во фрагменте изображения серного отпечатка осевой зоны темплета отливки, полученной по традиционной технологии

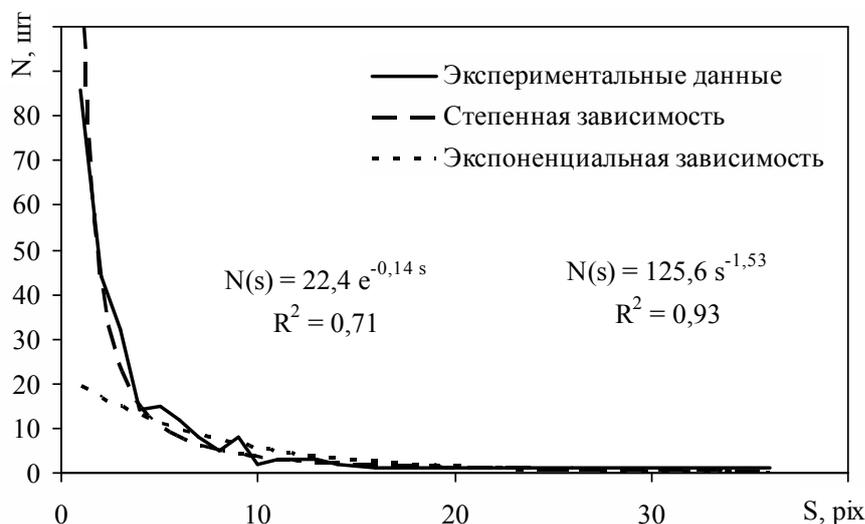


Рисунок 2 - Распределение сульфидных включений во фрагменте изображения серного отпечатка радиальной зоны темплета отливки, полученной с применением газодинамического воздействия:

$$V_p = 0,12 \text{ МПа/с}, P = 3 \text{ МПа}$$

Для каждого из рассматриваемых фрагментов получена функция плотности вероятности степенного распределения

$$N(s) = As^\lambda \text{ при } s \geq 0 \quad (1)$$

где A – масштабный коэффициент, обратно пропорциональный площади фрагмента, λ – параметр формы степенного распределения.

Для значений A и λ функции плотности вероятности степенного распределения провели усреднение и рассчитали среднеквадратическую погрешность в пределах выборки изображений каждой из зон, характеризующую размер возможного отклонения средних величин рассматриваемых параметров от их среднего значения (табл. 2).

Таблица 2

Среднеквадратическая погрешность параметров степенного распределения

Зона	Среднеквадратическая погрешность, %	
	A	λ
Осевая	12	5
Радиальная	8	7
Периферическая	6	3

Среднеквадратическая погрешность A и λ для фрагментов каждой из рассматриваемых зон не превысила 15%, что свидетельствует о статистической однородности фрагментов, принадлежащих одной зоне, и возможности проведения количественного анализа зоны цифрового изображения серного отпечатка по ее фрагменту. Кроме того, проведенный корреляционный анализ между массивами значений размеров и количества включений, соответствующими каждому из 10-ти фрагментов изображений, и усредненной аналитической зависимостью, их аппроксимирующей (табл. 3), подтвердил данный вывод.

Таблица 3

Результаты корреляционного анализа

Зона	Коэффициент корреляции									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Осевая	0,88	0,97	0,94	0,84	0,91	0,96	0,95	0,96	0,89	0,95
Радиальная	0,98	0,99	0,99	0,97	0,96	0,95	0,99	0,99	0,97	0,97
Периферическая	0,97	0,98	0,97	0,93	0,97	0,97	0,97	0,99	0,99	0,98

Для получения математической модели зависимостей параметров газодинамического воздействия, размеров и количества сульфидных

включений для различных зон сечения отливки выбирали по одному фрагменту из каждой зоны изображения серного отпечатка. Форма фрагмента для каждой из зон – квадрат со стороной размером не более ширины периферической (самой узкой) зоны, которая составляет 20 мм. Выбранный размер фрагмента – 15x15 мм.

С использованием компьютерной программы «ASImprints» для цифровых изображений фрагментов серных отпечатков темплетов отливок, полученных при различных режимах газодинамического воздействия, были сформированы массивы значений площади включений и соответствующего им количества включений для каждой из выбранных зон. Для каждого из полученных массивов данных определили параметры функции плотности вероятности степенного распределения, которое, как было показано выше, достаточно точно описывает зависимость количества включений от их размера и, в том числе, подтверждается соответствующими значениями R^2 (табл. 4).

Таблица 4

Параметры функций взаимосвязи количества включений и их размера (плотности вероятности степенного распределения) и достоверность аппроксимации

№ плавки	Зоны сечения отливки								
	осевая			радиальная			периферическая		
	A	λ	R^2	A	λ	R^2	A	λ	R^2
1	59.2	-0.89	0.79	60.1	-0.91	0.83	288.0	-1.43	0.94
2	77.7	-0.96	0.82	148.2	-1.37	0.91	175.3	-2.03	0.88
3	127.6	-1.21	0.88	178.3	-1.39	0.88	337.0	-2.06	0.96
4	287.6	-1.54	0.91	335.2	-1.82	0.94	351.9	-2.20	0.97

На рис. 3 и 4 приведены графики зависимости масштабного коэффициента A и параметра формы степенного распределения λ от режима осуществления газодинамического воздействия (прежде всего, давления P , МПа), где сплошным линиям с маркерами соответствуют зависимости, полученные в результате обработки фрагментов изображений, а пунктирным пронумерованным линиям – зависимости, аппроксимирующие их линейной функцией вида $y(x) = ax + b$:

$$1 - \text{периферическая } A(P) = 23,58 P + 282,12 \quad R^2 = 0,93, \quad (2)$$

$$2 - \text{радиальная } A(P) = 85,54 P + 52,13 \quad R^2 = 0,93, \quad (3)$$

3 – осевая зона $A(P) = 73,52 P + 27,73 R^2 = 0,84;$ (4)

1 – периферическая $\lambda(P) = -0,25 P - 1,51 R^2 = 0,93,$ (5)

2 – радиальная $\lambda(P) = -0,28 P - 0,96 R^2 = 0,91,$ (6)

3 – осевая зона $\lambda(P) = -0,22 P - 0,82 R^2 = 0,93.$ (7)

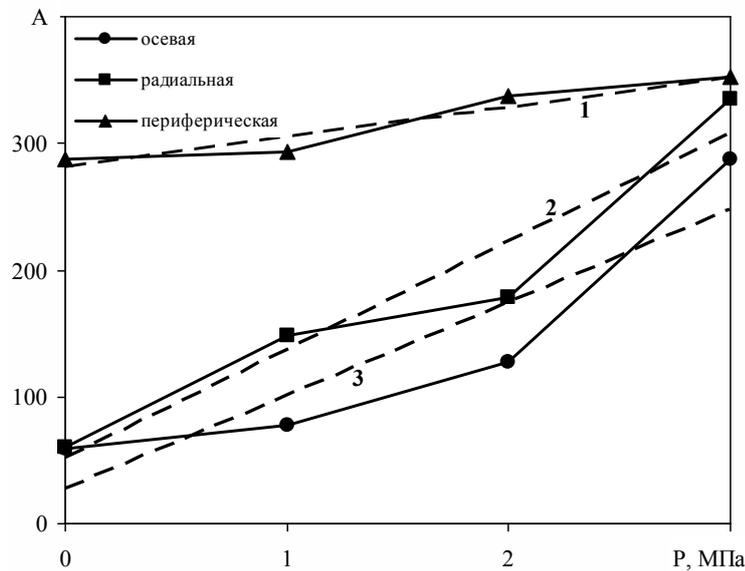


Рисунок 3 - График зависимости масштабного коэффициента степенного распределения от давления при осуществлении газодинамического воздействия

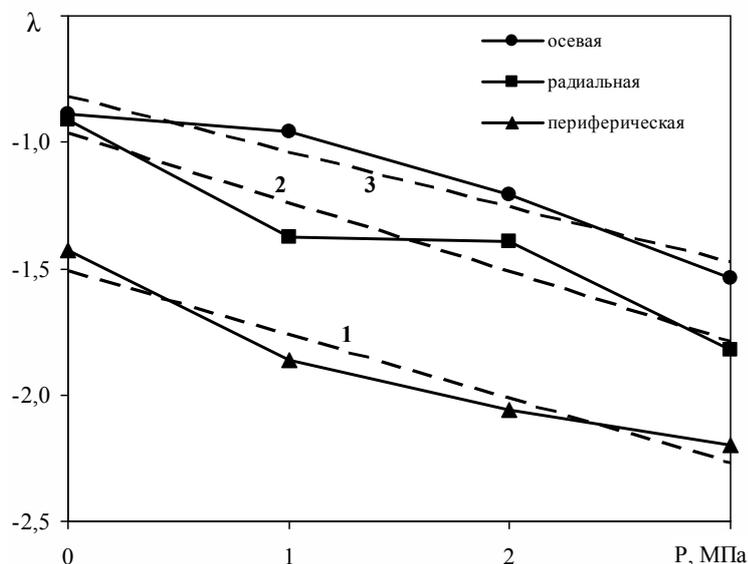


Рисунок 4 - График зависимости параметра формы степенного распределения от давления при осуществлении газодинамического воздействия

Полученные математические модели (2 – 7) позволяют интерполировать значения параметров степенного распределения и тем самым

составить прогноз распределения сульфидных включений в выбранных зонах поперечного сечения данной цилиндрической отливки, затвердевающей в нехлаждаемом кокиле, при заданном режиме газодинамического воздействия. В таблице 5 представлены сравнительные результаты расчета удельного количества включений ($K_N, шт/мм^2$) в осевой (О), радиальной (Р) и периферической (П) зонах изображения серных отпечатков (8).

$$K_N = \frac{N_{B\Phi}}{S_\Phi}, \quad (8)$$

где $N_{B\Phi}$ – количество включений во фрагменте, шт; S_Φ – площадь фрагмента, $мм^2$.

Таблица 5

№ плавки	Удельное количество включений, шт/мм ²								
	эксперимент			расчет			отклонение, %		
	зоны сечения отливки								
	О	Р	П	О	Р	П	О	Р	П
1	2,08	1,77	0,96	2,28	2,09	1,16	10	18	21
2	1,96	1,59	0,96	2,24	1,84	1,11	14	16	16
3	2,10	1,98	1,58	2,48	2,03	1,85	18	3	17
4	2,35	2,15	1,78	2,79	2,52	2,13	19	17	20

Выводы

1. Проведен анализ цифровых изображений серных отпечатков темплетов отливок из стали 35Л, полученных по традиционной технологии литья в кокиль, и при различных режимах газодинамического воздействия: максимальном давлении в системе отливка-устройство для ввода газа на уровне 1, 2, 3 МПа и скорости повышения давления аргона – 0,04, 0,08, 0,12 МПа/с соответственно. Цифровые изображения серных отпечатков обрабатывали с помощью разработанного программного модуля компьютерной программы «ASImprints».

2. Установлено, что распределение сульфидных включений для фрагментов изображений серных отпечатков темплетов отливок, полученных как по традиционной технологии, так и с применением газодинамического воздействия наиболее точно описывается степенной функцией. При этом достоверность аппроксимации (R^2) находится на уровне 0,89 – 0,95.

3. Проведенный корреляционный анализ функции плотности вероятности степенного распределения, полученной для каждого из рассматриваемых фрагментов выбранных зон сечения отливки, показал статистическую однородность фрагментов, принадлежащих одной зоне и возможность проведения количественного анализа зоны цифрового изображения серного отпечатка по ее фрагменту.

4. Получены математические модели, позволяющие интерполировать значения параметров степенного распределения и, тем самым, составить прогноз распределения сульфидных включений в выбранных зонах поперечного сечения данной цилиндрической отливки, затвердевающей в нехлаждаемом кокиле, при заданном режиме газодинамического воздействия.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Сульфиды в сталях и чугунах / Малиночка Я.Н., Ковальчук Г.З. М.: Металлургия, 1988. - 248 с.
2. Шульте Ю.А. Неметаллические включения в электростали. – М.: Металлургия, 1964. – 207с.
3. Лунев В.В., Аверин В.В. Сера и фосфор в сталях. М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
4. Штамповка жидкого металла (Литье с кристаллизацией под давлением) / А.И. Батышев, Е.М. Базилевский, В.И. Бобров и др.; Под ред. А.И. Батышева. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 45.
5. Селівьорстов В.Ю. Дослідження газодинамічного впливу на властивості литої вуглецевої сталі // Теория и практика металлургии. – 2007. - № 4-5. – С. 22-25.
6. Деклараційний патент, Україна МПК (2006) B22D 18/00 Спосіб отримання виливків/ Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. № 28858 заявл. 03.08.2007, опубл. 25.12.2007 Бюл. № 21.
7. Деклараційний патент, Україна МПК (2006) B22D 18/00 Пристрій для отримання виливків/ Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. № 28859 заявл. 03.08.2007, опубл. 25.12.2007 Бюл. № 21.
8. Селиверстов В.Ю., Хричиков В.Е., Доценко Ю.В. Экспериментальное термографическое исследование затвердевания отливки из стали 35Л в кокиле // Теория и практика металлургии. – 2006. – № 6. – С. 29 – 32.
9. Комп'ютерна програма "ASImprints – Аналіз сірчаних відбитків" Селівьорстов В.Ю., Михайловська Т.В. // Свідоцтво на твір № 37478 від 23.05.2009 р.

10. Логунова О.С., Макарычев П.П. Алгоритмы и программное обеспечение распознавания низкоконтрастных изображений при оценке качества стали // Программные продукты и системы. – № 3. – 2008. – С. 79–81.

REFERENCES

1. Sulphides in steels and cast irons / Malinochka Ya.N., Kovalchuk GZ M. : Metallurgy, 1988. -- 248 p.
2. Schulte, Yu.A. Non-metallic inclusions in electric steel. - M.: Metallurgy, 1964. -- 207s.
3. Lunev VV, Averin VV Sulfur and phosphorus in steel. M. : Metallurgy, 1988. -- 256 p.
4. Stamping of liquid metal (Casting with crystallization under pressure) / A.I. Batyshev, E.M. Bazilevsky, V.I. Beavers and others; Ed. A.I. Batysheva. - M.: Mechanical Engineering, 1979. - S. 45.
5. Selioviorstov V.Yu. Investigation of the gas-dynamic influence on the properties of cast carbon steel // Theory and Practice of Metallurgy. - 2007. - № 4-5. - P. 22-25.
6. Declaration patent, Ukraine IPC (2006) B22D 18/00 Method of production of castings / Selivyorstov VY, Khrychikov VE, Dotsenko YV No. 28858 03.08.2007, published 12/25/2007 Bul. № 21.
7. Declaration Patent, Ukraine IPC (2006) B22D 18/00 Device for receiving castings / Seliviorstov V.Yu., Khrychikov V.Ye., Dotsenko Yu.V. No. 28859 03.08.2007, published 12/25/2007 Bul. № 21.
8. Seliverstov V.Yu., Khrychikov V.E., Dotsenko Yu.V. An experimental thermographic study of the solidification of a 35L steel casting in a chill mold // Theory and Practice of Metallurgy. - 2006. - No. 6. - S. 29 - 32.
9. Computer Program "ASImprints - Analysis of Sulfur Imprints" Seliviorstov V.Yu. // Certificate for the work № 37478 from 23.05.2009.
10. Logunova O.S., Makarychev P.P. Algorithms and software for the recognition of low-contrast images in assessing the quality of steel // Software products and systems. - No. 3. - 2008. - S. 79–81.

Received 22.11.2019.

Accepted 25.11.2019.

Математична модель залежності розподілу сульфідних включень у вилівку вуглецевої сталі при газодинамічному впливі на розплав, що твердіє в кокілі

Наведено результати аналізу цифрових зображень сірчаних відбитків темплетов вилівоків зі сталі 35Л, отриманих литтям у кокілі за традиційною технологією і з застосуванням газодинамічного впливу. Запропоновано математичну модель для оцінки впливу технологічних режимів на кількість і розміри сульфідних включень.

Mathematical model of sulfide inclusions distribution in carbon steel casting under gas-dynamic influence on a melt hardening in a chill mold

The results of digital images analysis of sulfur prints of templates of steel castings 35L obtained by chill casting according to traditional technology and using gas dynamic effects are

presented. A mathematical model is proposed to assess the influence of technological regimes on the number and size of sulfide inclusions.

The analysis of digital images of sulfur prints of templates of steel castings 35L, obtained by the traditional technology of casting in a chill mold, and under various modes of gas-dynamic influence: the maximum pressure in the casting-device for gas input at the level of 1, 2, 3 MPa and increase speed argon pressure - 0.04, 0.08, 0.12 MPa/s, respectively. Digital images of sulfur prints were processed using the developed software module of the computer program "ASImprints".

It has been established that the distribution of sulfide inclusions for fragments of images of sulfuric prints of the templates of castings obtained both by traditional technology and by applying gas-dynamic effects is most accurately described by a power function. In this case, the reliability of the approximation (R^2) is at the level of 0.89 - 0.95.

The correlation analysis of the probability density function of the power-law distribution obtained for each of the considered fragments of the selected casting cross-section zones showed the statistical homogeneity of the fragments belonging to one zone and the possibility of conducting a quantitative analysis of the area of the digital image of the sulfur print in its fragment.

Mathematical models have been obtained that make it possible to interpolate the values of the power-law distribution parameters and, thereby, make a forecast of the distribution of sulfide inclusions in selected zones of the cross section of this cylindrical casting that hardens in an uncooled chill mold under a given regime of gas-dynamic impact.

Селиверстова Татяна Витальевна - к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій та систем, Національна металургічна академія України.

Селиверстов Вадим Юркович - д.т.н., професор, кафедра литейного виробництва, Національна металургічна академія України.

Гуда Антон Ігорович - д.т.н., професор кафедри інформаційних технологій та систем, Національна металургічна академія України.

Селівьорстова Тетяна Віталіївна - к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій та систем, Національна металургічна академія України.

Селівьорстов Вадим Юрійович - д.т.н., професор, кафедра ливарного виробництва, Національна металургічна академія України.

Гуда Антон Ігорович - д.т.н., професор кафедри інформаційних технологій та систем, Національна металургічна академія України.

Selivyorstova Tatjana - candidate of technical science, Department of information technology and systems, National Metallurgical Academy of Ukraine.

Selivyorstov Vadim - doctor of engineering's sciences, professor, Department of casting production, National Metallurgical Academy of Ukraine.

Guda Anton - doctor of technical sciences, professor, professor of the department of information technologies and systems, National Metallurgical Academy of Ukraine.