



Дёмин Д. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЧУГУНА С ПЛАСТИНЧАТЫМ ГРАФИТОМ В ФАКТОРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ «УГЛЕРОД (C) – УГЛЕРОДНЫЙ ЭКВИВАЛЕНТ (C_{ЭКВ})» В ДИАПАЗОНАХ C=(3,425–3,563) % И C_{ЭКВ}=(4,214–4,372) %

Для области факторного пространства «углеродный эквивалент (C_{ЭКВ}) – содержание углерода (C)» построено работоспособное аналитическое описание влияния выбранных входных переменных на предел прочности чугуна и исследована полученная поверхность отклика. Отмечена принципиальная возможность получения более точного описания поверхности отклика. Полученный результат может способствовать снижению материалоемкости отливок и снижению затрат на выплавку чугуна.

Ключевые слова: чугун с пластинчатым графитом, индукционная тигельная печь, уравнение регрессии, каноническое преобразование поверхности отклика.

1. Введение

Конструкционные чугуны являются уникальными черными сплавами, благодаря хорошему сочетанию эксплуатационных и технологических свойств которых спектр их применения охватывает большинство отраслей экономики. Особой и преобладающей областью использования конструкционного чугуна является машиностроение, подавляющая часть корпусных отливок для которого изготавливается именно из этого сплава. Более того, технологичность чугуна допускает возможности управления свойствами за счет эффективного регулирования процессов структурообразования на этапе плавки и последующей термовременной обработки. Это обеспечивает возможность повышения механических свойств или придания особых свойств для конкретных условий эксплуатации: износостойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости, особых магнитных характеристик. Немаловажен и экономический аспект при выборе в качестве конструкционного материала именно чугуна, ведь его получение сопряжено с меньшими затратами на реализацию технологического процесса по сравнению со сталью. Конечно, необходимо при этом подчеркнуть, что прочностные характеристики или специальные свойства должны быть достаточными для конкретных условий эксплуатации.

Однако, несмотря на перечисленные преимущества, специалистам хорошо известны реальные проблемы, связанные с управлением свойствами. Они связаны с многофакторностью влияния на процессы структурообразования, а также с неопределенностью на этапе установления качественных зависимостей в цепочке «химический состав – структура – свойства». Решение этих задач открывает также возможность выявления механизмов формирования структуры и свойств, физико-химических закономерностей протекающих процессов формирования структуры. Полученный результат, конечно, не может быть

перенесен без изменений из одних промышленных условий в другие, однако может быть использован при определенной адаптации под конкретные промышленные условия.

Все эти соображения позволяют говорить об актуальности тематики исследований, связанных с получением адекватных моделей типа «химический состав – свойства». На основании таких моделей могут прогнозироваться эксплуатационные свойства чугуна или разрабатываться оптимальные по выбранным критериям технологические режимы его получения.

Наличие таких моделей, представляющих собой аналитическое описание, должно также предполагать возможность обоснования полученного результата на основе исследований микроструктуры чугуна и связанных с ними возможностей выявления механизмов формирования свойств. При этом сам процесс получения результатов может быть реализован только в конкретных производственных условиях.

Особенно следует отметить актуальность исследования влияния химического состава на механические свойства чугуна из следующих соображений. В условиях, когда требованиями эксплуатации не предусмотрены повышенные нагрузки и достаточным с точки зрения прочностных характеристик является получение типовых марок чугуна, на первое место выходит задача минимизации затрат на его изготовление. При этом определяющей является необходимость решения задачи синтеза состава сплава, который обеспечивает приемлемые прочностные характеристики, но приоритетным при его изготовлении является снижение затрат на технологический процесс плавки.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования являлся конструкционный чугун с пластинчатым графитом, в котором углеродный

Таблица 1

Основные технические характеристики индукционной печи ИСТ1/0.8-М5 для выплавки чугуна синтетического

№ п/п	Технические характеристики	Нормы
1	Мощность преобразователя частоты, кВт	800
2	Мощность номинальная, кВт	823 (+20)
3	Мощность средней частоты, кВт	785
4	Номинальное напряжение, В	6000
5	Номинальная частота тока, Гц – питающей сети – контурной цепи	50 1000
6	Число фаз – питающей сети – контурной цепи	3 1
7	Номинальная температура перегрева металла, °С	1600
8	Емкость электропечи, т	1
9	Скорость расплавления и перегрева, т/ч	1,3
10	Удельный расход электроэнергии на плавку и перегрев, кВт·ч/т	633
11	Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	14,4

эквивалент ($C_{\text{ЭКВ}}$) находится в диапазоне (4,214–4,372) %, а содержание углерода (С) в диапазоне (3,425–3,563) %.

Выбор таких диапазонов обусловлен тем, что с точки зрения создания более благоприятных условий для протекания процесса графитизации желательнее обеспечивать в чугуне повышенное содержание углерода. Оптимальное соотношение при этом С/Si сводит к минимуму вероятность образования отбела, стимулируя протекание процесса кристаллизации по стабильной, а не метастабильной схеме, приводящей к формированию в структуре цементита Fe_3C . Однако повышенное содержание углерода приводит к снижению предела прочности на растяжение чугуна, поэтому потенциальная потеря прочности вследствие повышенного содержания углерода может нивелироваться введением минимальных количеств легирующих элементов, повышающих этот показатель качества чугуна. Следует отметить, что введение ферросплавов в этом случае не играет особой роли в повышении вероятных затрат на производство, так как с другой стороны открывается возможность минимизации металлоемкости за счет утонения стенок отливок. Последнее становится обоснованным при повышении предела прочности чугуна. Формирование же микроструктуры вследствие протекания процессов кристаллизации со скоростями охлаждения, присущими данному технологическому процессу в данных производственных условиях, зависит также от положения эвтектической точки на диаграмме состояния Fe-C, т. е. от величины $C_{\text{ЭКВ}}$. Исследование же совместного влияния этих двух входных переменных представляется важным для изучения механизмов формирования микроструктуры и механических свойств чугуна.

Технологический аудит проводился в условиях литейного цеха ОАО «Кременчугский завод дорожных машин» (г. Кременчуг, Украина). Цель его состояла в выявлении реальных значений предела прочности на растяжение ($\sigma_{\text{в}}$, МПа) в указанном диапазоне С– $C_{\text{ЭКВ}}$ при реализации базового технологического процесса индукционной плавки. В качестве исследуемого чугуна выбирался синтетический чугун марки СЧ20 ГОСТ 1412-85.

Плавка осуществлялась в индукционной тигельной печи с кислой футеровкой ИСТ1/0.8-М5. Основные технические характеристики печи приведены в табл. 1.

В качестве шихтовых материалов применялись: возврат собственного производства, бой графитовых электродов, стальной лом 1А (СтЗ). Размеры крупных кусков стального лома не выпадали за пределы: максимальный габаритный размер – 350 мм, толщина – 3,9 мм, минимальная масса – 15–18 кг. Фракция боя графитовых электродов находилась в пределах 1–10 мм.

Чугун легировался минимальным количеством элементов – хромом (Cr) и никелем (Ni) в соотношении Cr:Ni = 2:1 таким образом, чтобы содержание хрома в готовом чугуне находилось в диапазоне (0,25–0,54) %. В качестве ферросплавов для легирования использовались ферромарганец ФМн-70, феррохром ФХ100, ФХ200, ферроникель Фн-70, в соответствии с нормами расхода шихтовых материалов, принятыми на предприятии. При необходимости легирования медью (Cu) и титаном (Ti) использовались титано-медистые чугуны из расчета, чтобы в готовом чугуне содержание меди находилось в диапазоне (0,1–0,5) %, и поддерживалось соотношение Cu:Ti = 4:1. В качестве модификатора использовался ферросилиций ФС75.

Загрузка шихты осуществлялась в соответствии с утвержденной на предприятии технологической инструкцией на плавку серого чугуна в индукционных печах ИСТ1/0.8-М5. Контроль правильности ведения процесса плавки, состояния тигля и изоляции индуктора осуществлялся по показаниям приборов щита управления. Подгрузка предварительно подогретых шихтовых материалов осуществлялась только после осаживания шихты в тигле. При этом реальное время начала расплавления шихты в нижней части составляло 7–10 мин с момента начала плавки. При интенсивном перемешивании расплава, сопровождаемым выбросом брызг металла, напряжение на индукторе уменьшалось.

Для наведения шлака присаживался сухой песок, для получения жидкоподвижного шлака – известь или известняк фракцией до 30 мм. Доводка расплава до заданного химического состава и температуры осуществлялась после полного расплавления путем подогрева расплава в течение 5 минут и отключения печи с выдержкой с целью более полного протекания окислительно-восстановительных процессов в расплаве. Температура чугуна перед модифицированием находилась в диапазоне 1400–1450 °С. Обработка расплава модификатором фракцией 1–10 мм в количестве 0,3 % от массы жидкого металла (3 кг на 1 т) осуществлялась в ковше после заполнения ковша на 100–150 мм.

Принципиальная схема базового процесса получения конструкционного чугуна в индукционной печи ИСТ1/0.8-М5 представлена на рис. 1.

В соответствии с действующими на предприятии технологическими инструкциями, проводился отбор проб на химический анализ, и заливались образцы для определения предела прочности на растяжение чугуна в соответствии с ГОСТ 27208-87.



Рис. 1. Принципиальная схема процесса получения конструкционного чугуна в индукционной печи ИСТ1/0.8-М5: 1 – стальной лом, 2 – бой графитовых электродов, 3 – возврат собственного производства (литники), 4 – печь индукционная ИСТ1/0.8-М5, 5 – ковш

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования состояла в описании распределения величины предела прочности на растяжение чугуна серийных плавов в факторном пространстве $C-C_{э\text{кв}}$ в диапазонах $C = (3,425-3,563) \%$ и $C_{э\text{кв}} = (4,214-4,372) \%$. При этом значения содержания $Cr-Ni-Cu-Ti$ легирующего комплекса находились в узких интервалах. При достижении такой цели исследования открываются возможности прогнозирования предела прочности на растяжение чугуна для описанной области $C-C_{э\text{кв}}$, расчета оптимального состава шихты и выявления механизмов формирования свойств для описанного диапазона химического состава.

Для достижения поставленной цели необходимо решение сформулированных ниже задач.

1. Построение работоспособного аналитического описания влияния выбранных входных переменных на предел прочности на растяжение чугуна.

2. Исследование поверхности отклика и выявление наиболее информативных точек факторного пространства для дальнейшего детального исследования микроструктуры в этих точках.

4. Исследование существующих решений проблемы

Исследования свойств чугуна как конструкционного материала традиционно проводятся в разных направлениях, среди которых можно выделить:

- изучение микроструктуры чугуна и ее влияние на определенные эксплуатационные характеристики [1–4];
- изучение влияния модификаторов на формирование микроструктуры чугуна [5, 6];
- изучение влияния химического состава и процессов затвердевания на микроструктуру и свойства чугуна [7–9].

В работах [1–3] исследуется влияние размеров и геометрии графита на формирование герметичности чугуна, который по требованиям эксплуатации помимо достаточных характеристик прочности должен обладать повышенной герметичностью. Учитывая, что ключевым

в формировании данного свойства чугуна, является, по мнению авторов данных работ, расстояние между пластинками графита, а также их размер, можно говорить об определенной корреляции герметичности и прочности. Однако такие корреляции не приведены, а количественные описания касаются влияния рассматриваемых входных переменных, относящихся лишь к показателям герметичности. Тем не менее, полученные результаты достаточно ценные, т. к. позволяют развить данное исследование в область расширения выходных переменных – свойств чугуна.

В работе [4] исследовано влияние на усталостную прочность чугуна микроструктурных неоднородностей: графита, литейных дефектов, структуры металлической матрицы. Акцент в исследовании сделан на выявление и возможность прогнозирования нижней границы разброса усталостной прочности, имеющей особо важное значение с практической точки зрения. Представленный в данном исследовании метод позволяет, по мнению авторов [4], предсказывать оценку данной выходной характеристики на основании информации о микроструктурных неоднородностях и условиях нагружения.

Исследования, описанные в работе [5], позволили установить качественное влияние нового модификатора, содержащего SiC , в сочетании с ферросилицием $FeSi75$, на морфологию графита, матричную структуру и механические свойства чугуна. При этом констатирован факт улучшения свойств расплава чугуна по сравнению с первоначальным неинициализированным состоянием. Авторами данного исследования особо отмечается возможность формирования большого количества микрон с высоким содержанием углерода и концентрацией кремния, что способствует благоприятному протеканию процесса графитизации. Однако такая оценка выполнена лишь на качественном уровне. Исследование влияния композиции модификатора в пресс-форме на микроструктуру и усталостную прочность отливок из чугуна EN GJS 700-2 описано в работе [6], в которой авторы делают вывод об эффективности модифицирования по влиянию на микроструктуру сплава. Вопрос рассматривался преимущественно в плоскости материаловедческого подхода.

Таблица 2

Фрагмент таблицы исходных данных для моделирования влияния химического состава конструкционного чугуна с пластинчатым графитом на предел прочности при растяжении

№ п/п	Входные переменные				Выходная переменная
	C, %	C _{экв} , %	Cr, %	Cu, %	σ _B , МПа
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	y ₁
1	3,63	4,387	0,32	0,19	190
2	3,57	4,282	0,3	0,15	190
3	3,58	4,323	0,42	0,21	190
4	3,57	4,284	0,32	0,12	180
5	3,7	4,531	0,26	0,19	190
6	3,68	4,468	0,4	0,19	185
7	3,64	4,395	0,38	0,1	155
8	3,63	4,394	0,4	0,1	170
9	3,59	4,333	0,26	0,1	195
10	3,59	4,364	0,27	0,17	185
11	3,45	4,243	0,31	0,11	200
12	3,62	4,381	0,32	0,09	200
13	3,55	4,29	0,3	0,14	200
.
64	3,56	4,224	0,29	0,18	200
65	3,68	4,447	0,37	0,18	200
66	3,48	4,183	0,42	0,11	210
67	3,53	4,231	0,31	0,11	210
68	3,6	4,408	0,33	0,11	220
69	3,54	4,292	0,36	0,12	220
70	3,39	4,089	0,54	0,09	220
71	3,43	4,265	0,42	0,27	220
72	3,41	4,241	0,45	0,2	220
73	3,41	4,132	0,48	0,25	220
.
200	3,15	3,896	0,33	0,3	300

Предел прочности на разрыв (UTS) в зависимости от содержания углерода, химического состава и скорости затвердевания исследован в работе [7]. Особо следует отметить системность авторского подхода, рассматривающего проблематику с разных точек зрения – из соображений аналитического описания влияния названных технологических параметров на UTS и материаловедческого подхода. В первом случае отмечена приоритетность подходов к исследованиям, основанным на использовании методов регрессионного анализа или модифицированных уравнений Гриффитса и Холла-Петча. Во втором случае речь идет о превращении аустенита в процессе охлаждения и формировании металлической матрицы. Авторами отмечено, в частности, что доминирующим параметром, который может быть использован для определения предела прочности на разрыв, является характерное расстояние между перлитными зернами. Полученные результаты могут быть распространены на весь спектр содержания углерода от эвтектики до доэвтектических композиций, затвердевающих при различных скоростях охлаждения, характерных как для тонкостенных, так и толстостенных сложных фасонных отливок.

Влияние параметров легирования, совместно с регулированием соотношения C/Si в чугуне, на микроструктуру и механические свойства чугуна описано в работе [9]. В ней описана существенность влияния на данные выходные характеристики чугуна модификатора в сочетании с сурьмой (Sb). При этом подчеркнута, что Sb играет важную роль в контроле морфологии графита. Однако результаты, описанные в данной работе, относятся к высокопрочным чугунам. Что же касается возможности распространения полученных в ней выводов на чугуны с пластинчатым графитом, то здесь требуются дополнительные исследования.

Попытки получения аналитических описаний влияния химического состава на свойства сплава описаны в работах [10–13]. При этом в работах [10–11] описаны результаты построения регрессионных уравнений влияния углерода, углеродного эквивалента, легирующих комплексов Cr–Ni и Cr–Ni–Cu на предел прочности при растяжении (σ_B) и твердость (HB). В работах же [12–13] исследованы вопросы применения методов построения моделей «состав – свойства» в условиях неопределенности.

Описанные работы позволяют сделать вывод о фрагментарности исследований, проявляющейся в попытках разных исследователей рассматривать проблему лишь с одной из сторон, привлекая «узкие» методы исследований. Что же касается вопросов влияния химического состава чугуна в конкретном диапазоне варьирования входных переменных C–C_{экв} на предел прочности при растяжении, соответствующих работ не обнаружено. Поэтому для решения возникающих практических вопросов по выбору рационального химического состава чугуна как конструкционного материала, позволяющего в дальнейшем минимизировать затраты на его изготовление, необходимо проведение специальных промышленных исследований.

5. Методы исследования

По результатам промышленных испытаний формировалась таблица входных и выходной переменных, фрагмент которой представлен в табл. 2. Исходная выборка включала результаты 200 серийных плавок.

На основании сформированной таблицы исходных данных (табл. 2) в выборку для построения математической модели: $\sigma_B = f(C, C_{\text{экв}})$ отбирались лишь те строки, для которых выполнялись условия $C = (3,425–3,563) \%$ и $C_{\text{экв}} = (4,214–4,372) \%$. Нормирование значений входных переменных осуществлялось по формуле:

$$x_{i\text{norm}} = \frac{x_i^* - \bar{x}_i}{I_i}, \quad (1)$$

где $x_{i\text{norm}}$ – нормированное значение входных переменных, индексы i принимают значения $i = 1$ для C, $i = 2$ для C_{экв}, x_i^* – натуральные значения входных переменных, \bar{x}_i – средние значения входных переменных, I_i – интервалы варьирования входных переменных, $I_i = x_i^{\text{max}} - \bar{x}_i = \bar{x}_i - x_i^{\text{min}}$.

Распределение содержания легирующих элементов в чугуне выявлялось построением гистограмм и установлением закона распределения, позволяющего выявить границы применимости полученной математической модели $\sigma_B = f(C, C_{\text{экв}})$ и численных результатов моделирования. Иными словами, ставилась задача определения тех диапазонов содержания элементов Cr–Ni–Cu–Ti легирующего комплекса, для которых полученная мо-

дель $\sigma_B = f(C, C_{\text{эКВ}})$ может считаться работоспособной с точки зрения прогнозирования предела прочности на растяжение или выбора на ее основе рациональных технологических режимов плавки. Последнее предполагает также возможность оптимизации состава шихты по критерию минимизации затрат:

$$J = \sum_{i=1}^n C_i U_i \rightarrow \min_{\{U_i\}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где C_i – стоимость i -го шихтового материала, U_i – количество i -го шихтового материала. При этом с каждым шихтовым материалом в готовый чугун вносится $f_{ij}U_i$ количество j -го элемента химического состава. Общее же количество j -го элемента химического состава в готовом чугуне составляет:

$$\sum_{i=1}^n f_{ij}U_i,$$

где f_j – заданное общее количество j -го элемента химического состава в готовом чугуне.

Минимизация функционала (2) осуществляется при ограничениях вида [14]:

$$\sum_{i=1}^n U_i = U^*, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n f_{ij}U_i = f_j, \quad (4)$$

методами линейного программирования [15].

Исследовалась возможность построения работоспособной математической модели в виде двух альтернативных, с точки зрения точности описания, вариантов уравнения регрессии:

$$y_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2, \quad (5)$$

$$y_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3(x_1)^2 + a_4(x_2)^2 + a_5x_1x_2, \quad (6)$$

где a_i – оцениваемые коэффициенты.

Для оценки векторов:

$$A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix},$$

использовался метод наименьших квадратов (МНК):

$$A = (F'F)^{-1}F'Y = CF'Y, \quad (7)$$

а вектор A минимизирует функционал наименьших квадратов вида:

$$J = (FA - Y)^T(FA - Y), \quad (8)$$

где F – матрица, имеющая вид для получения уравнений (5) и (6) соответственно:

$$F = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{11}x_{12} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{21}x_{22} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & x_{n1}x_{n2} \end{pmatrix}$$

и

$$F = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{11}x_{12} & x_{11}^2 & x_{12}^2 \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{21}x_{22} & x_{21}^2 & x_{22}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & x_{n1}x_{n2} & x_{n1}^2 & x_{n2}^2 \end{pmatrix},$$

матрица экспериментальных значений предела прочности на растяжение, σ_B , МПа:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}.$$

На первом этапе построения моделей необходимо было проведение фильтрации экспериментальных данных, имеющей целью проверку возможности включения в матрицу F строк, различающихся по значениям $C_{\text{Г}}$ и $C_{\text{С}}$. Такая фильтрация представляется обязательной, т. к. хорошо известно, что данные химические элементы существенно влияют на предел прочности. Исключению соответствующих строк обеспечивает возможность построения работоспособного уравнения регрессии вида (5) или (6) в факторном пространстве C – $C_{\text{эКВ}}$ при фиксированном уровне содержания в чугуне $C_{\text{Г}}$ и $C_{\text{С}}$. Последний, более строго, представляет собой описание вида:

$$C_{\text{Г}} \pm \frac{\varepsilon S}{\sqrt{n}} \quad \text{и} \quad C_{\text{С}} \pm \frac{\varepsilon S}{\sqrt{n}},$$

в котором S – среднеквадратическое отклонение содержания $C_{\text{Г}}$ и $C_{\text{С}}$ соответственно, полученное на основании статистической обработки экспериментальных данных. Т. е. за «фиксированные» значения приняты доверительные интервалы.

6. Результаты исследований

На рис. 2, 3 представлены гистограммы и кривые плотности распределения содержания в чугуне хрома и меди, полученные на основе статистической обработки выборки $n = 50$, полученной после отбора из исходной таблицы данных (табл. 2) строк, для которых удовлетворяются условия:

$$x_1 \in [3,425; 3,563] \quad \text{и} \quad x_2 \in [4,214; 4,372].$$

На основании экспертных оценок, из выборки была удалена часть строк, содержащих значения x_3 и x_4 , предположительно влияющие на формирование отклонения закона распределения от нормального. В результате этого получены гистограммы и кривые плотности распределения, приведенные на рис. 4, 5.

На основании полученных результатов, в качестве «фиксированных» значений входных переменных $C_{\text{Г}}$ и $C_{\text{С}}$ приняты $C_{\text{Г}} \pm 0,032 \%$, $C_{\text{С}} \pm 0,026 \%$.

С помощью МНК по формуле (7) рассчитаны значения оценок коэффициентов уравнений регрессии вида (5) и (6), которые составили, соответственно:

$$A = \begin{pmatrix} 209,3051 \\ -6,14398 \\ 1,069837 \\ -15,5749 \end{pmatrix} \text{ и } A = \begin{pmatrix} 206,7276 \\ -3,87669 \\ 6,37602 \\ -16,3141 \\ 20,44989 \\ -19,2311 \end{pmatrix}$$

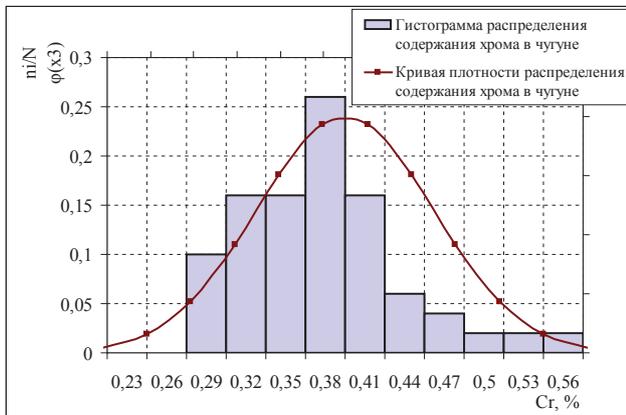


Рис. 2. Гистограмма и кривые плотности распределения содержания в чугуна хрома (x_3)

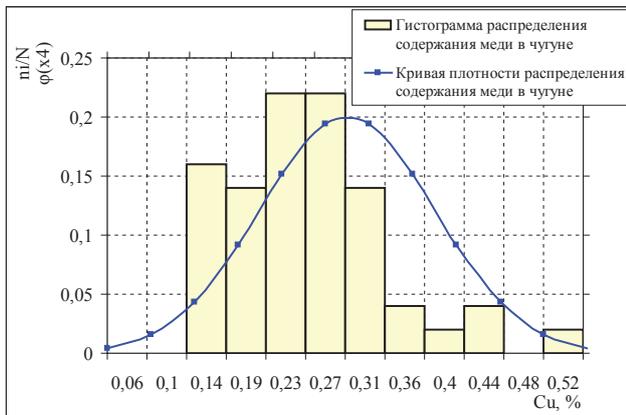


Рис. 3. Гистограмма и кривые плотности распределения содержания в чугуна меди (x_4)

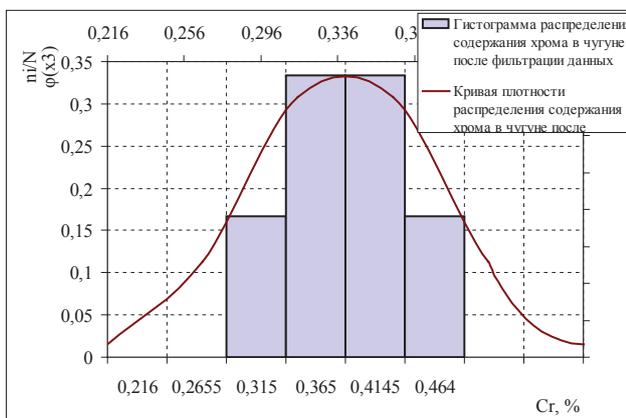


Рис. 4. Гистограмма и кривые плотности распределения содержания в чугуна хрома (x_3) после фильтрации данных

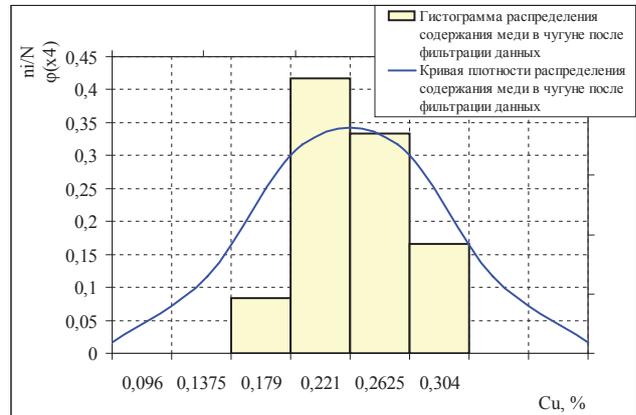


Рис. 5. Гистограмма и кривые плотности распределения содержания в чугуна меди (x_4) после фильтрации данных

Учитывая то обстоятельство, что коэффициенты уравнений регрессии оценивались на основании пассивного эксперимента, не дающего возможности проведения параллельных измерений выходной переменной в каждой точке плана, возможность проверки однородности плана эксперимента отсутствовала. Проверка адекватности модели, основанная на использовании F-критерия Фишера, или проверки гипотезы о равенстве дисперсий ошибок эксперимента и неадекватности модели, в силу этого не представлялась возможной. Поэтому потенциальная работоспособность модели оценивалась на основании проверки количества экспериментальных точек, попавших в заданный доверительный интервал (рис. 6, 7).



Рис. 6. Результаты проверки работоспособности модели на основании линейного уравнения регрессии с учетом парного влияния факторов



Рис. 7. Результаты проверки работоспособности модели на основании полиномиального уравнения регрессии

Из рис. 6, 7 следует, что лучшие показатели обеспечивает уравнение вида (6) – если при использовании линейного уравнения с учетом парного влияния факторов в доверительный интервал попало 9 тестовых точек (75 %), то при использовании полиномиального уравнения регрессии в доверительный интервал попало 11 тестовых точек (92 %). Поэтому в качестве более работоспособного аналитического описания принято уравнение регрессии вида (6).

Так как наибольший интерес представляет выявление стационарных точек и описание в их окрестности вида поверхности отклика, выполнено каноническое преобразование поверхности отклика по известной процедуре [16]:

1. Определение координат стационарной точки x^* путем решения системы линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^* \\ \vdots \\ x_n^* \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}.$$

2. Вычисление значения целевой величины в стационарной точке:

$$y^* = a_0 + 2a'x^* + x^{*'}Ax^*.$$

3. Определение n собственных значений $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$:

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \ddots & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = (-\lambda)^n + P_1\lambda^{n-1} + \dots + P_n = 0.$$

4. Запись уравнения поверхности отклика в канонической форме:

$$y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2.$$

Таким образом, в результате переноса и поворота осей и перехода от системы координат $(x_1; x_2)$ в систему координат $(\xi_1; \xi_2)$ обеспечивается преобразование исходного уравнения поверхности отклика:

$$y(x) = a_0 + 2a'x + x'Ax,$$

к каноническому виду $y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2$:

$$x = x^* + B\xi, \tag{9}$$

где B – матрица поворота, $B'B = I$, а разность между значениями выходной переменной в произвольной и стационарной точках описывается уравнением:

$$y(\xi) - y^* = \xi'L\xi, \tag{10}$$

Реализацией процедуры 1–4 получены следующие результаты:

$$\lambda_1 = -16,3141, \lambda_2 = 20,45, \quad x^* = \begin{pmatrix} -0,021 \\ -0,166 \end{pmatrix},$$

$$y^* = 203,5 \text{ МПа}.$$

Такие нормированные значения входных переменных в стационарной точке соответствуют действительным: $C = 3,492\%$, $C_{\text{экр}} = 4,28\%$.

Следовательно, уравнение, описывающее поверхность отклика в канонической форме, имеет вид:

$$y - y^* = -16,3141\xi_1^2 + 20,45\xi_2^2. \tag{11}$$

Так как соотношение собственных чисел по величине и знаку определяют вид поверхности отклика, и $|\lambda_1| \neq |\lambda_2|$, $\lambda_1 < 0, \lambda_2 > 0$, поверхность отклика представляет собой гиперболический параболоид. Это можно видеть из результатов визуализации, полученных численным расчетом непосредственно на основе уравнения (6) подстановкой оценок коэффициентов и значений входных переменных в исследуемой области факторного пространства: $C = (3,425-3,563)\%$ и $C_{\text{экр}} = (4,214-4,372)\%$ (рис. 8). Результаты на рис. 8 приведены для нормированных значений входных переменных, полученных на основе формулы (1).

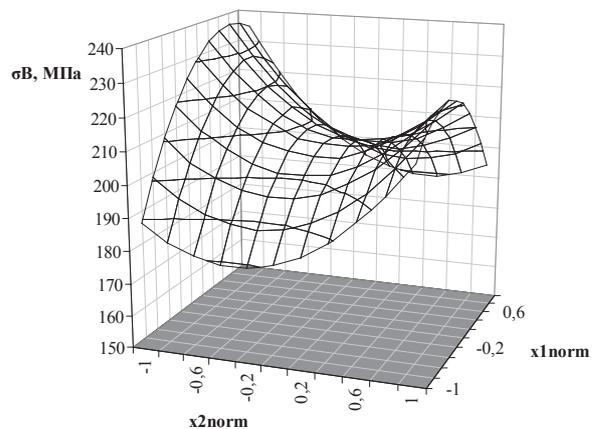


Рис. 8. Поверхность отклика, описывающая распределение значений предела прочности на растяжение чугуна в факторном пространстве $C = (3,425-3,563)\%$ и $C_{\text{экр}} = (4,214-4,372)\%$ (входные переменные заданы в нормированном виде)

Наличие седловой точки является информативным показателем, позволяющим предположить, что соответствующие значения входных переменных $C = 3,492\%$, $C_{\text{экр}} = 4,28\%$ при содержании легирующих элементов $Cr \pm 0,032\%$, $Cu \pm 0,026\%$ формируют микроструктуру, гарантирующую значение предела прочности чугуна $\sigma_b = 203 \text{ МПа}$. С учетом полученного доверительного интервала, это значение с вероятностью 95 % находится в диапазоне $\sigma_b = (193-213) \text{ МПа}$. Очевидно, что получение такой микроструктуры не может считаться желательной в том случае, если техническое задание на получение чугуна предусматривает получение марки СЧ20 ГОСТ 1412-85, для которой значение предела прочности должно находиться в диапазоне $\sigma_b = (200-250) \text{ МПа}$. Металлографическое описание микроструктуры в седловой точке представляется важным и может быть развитием полученного результата моделирования.

На рис. 9 представлен вид сверху поверхности отклика с нанесенной на нее стационарной областью и координатами точки, в которой проводилось металлографическое исследование формы, размеров, распределения и количества графита.

Как следует из полученного металлографического анализа, в исследуемой точке факторного пространства форма включений графита соответствует ПГф1, ПГф2, распределение графита ПГр1, ПГр9, размер ПГд45,

ПГд90, количество графита ПГ6. На рис. 10 представлена соответствующая микроструктура, описанная на основе сравнения с эталонными по ГОСТ 3443-87, и соответствующие показатели оценки формы, размеров, распределения и количества графита.

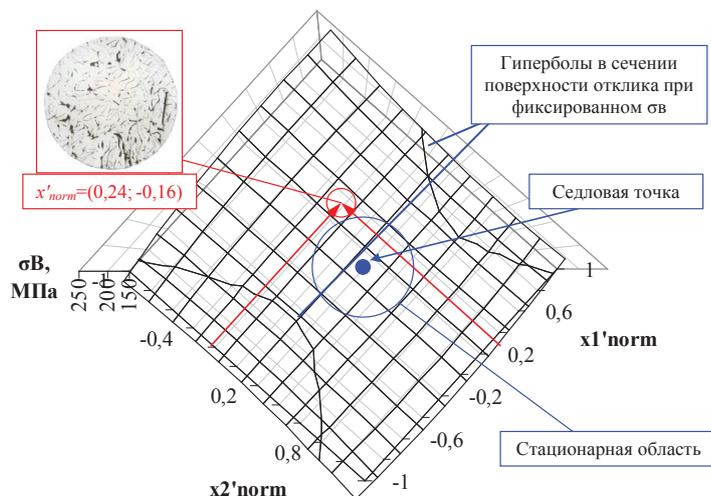


Рис. 9. Поверхность отклика $\sigma_b = f(C, C_{эвб})$ (вид сверху) с описанием стационарной области и результатов определения микроструктуры в точке факторного пространства с координатами $x'_{norm} = (0,24; -0,16)$

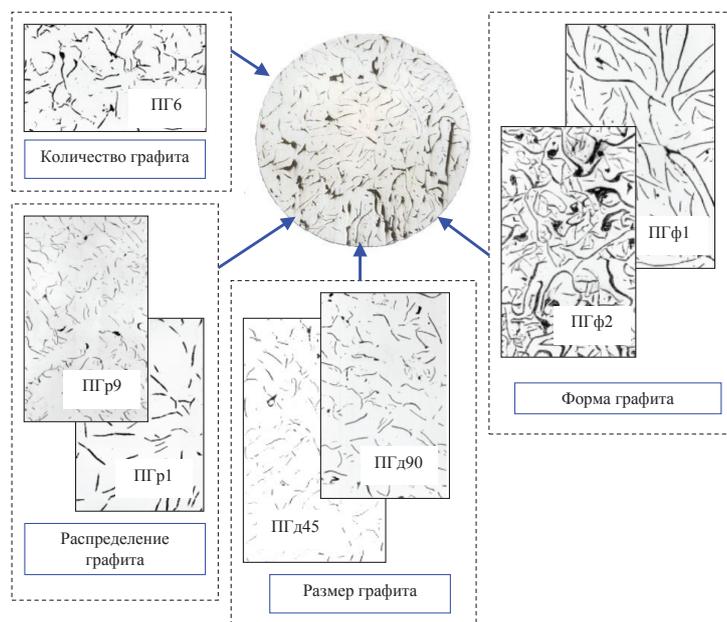


Рис. 10. Описание микроструктуры чугуна по показателям формы, размеров, распределения и количества графита

Развитием полученного результата может считаться описание микроструктуры в окрестности стационарной точки, в частности в седловой точке. Наличие выборки данных с таким описанием является обязательным в том случае, если задачей дальнейших исследований является установление качественного и количественного влияния параметров микроструктуры (формы, размеров, распределения и количества графита) на механические или специальные свойства. При этом следует иметь в виду, что в силу специфики оценивания параметров микроструктуры на основе сравнения с эталоном, ре-

комендуемом стандартом, значения входных переменных – параметры графита – могут считаться нечеткими числами. При таком рассмотрении, они могут быть описаны соответствующими функциями принадлежности, например ($L-R$) типа [17–19]:

$$\mu(F_{jp}) = \begin{cases} L\left(\frac{\bar{F}_{jp} - F_{jp}}{\alpha_{jp}}\right), & F_{jp} \leq \bar{F}_{jp}, \\ R\left(\frac{F_{jp} - \bar{F}_{jp}}{\beta_{jp}}\right), & F_{jp} > \bar{F}_{jp}, \end{cases} \quad (11)$$

где \bar{F}_{jp} – определенное по ГОСТ 3443-87 значение p -го параметра микроструктуры в j -м металлографическом исследовании, являющееся модальным для нечеткого числа F_{jp} , $j = 1, 2, \dots, n$, $p = 1, 2, \dots, m$, α_{jp} , β_{jp} – левые и правые коэффициенты нечеткости в описании (11).

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Среди сильных сторон данного исследования необходимо отметить возможность использования полученной математической модели для решения двух ключевых задач: прогнозирования предела прочности на растяжение по фактическому химическому составу, получаемому по ходу плавки, и выбора состава, обеспечивающего заданный уровень предела прочности на растяжение. В первом случае становится возможным уменьшить количество лабораторных испытаний прочности, уменьшив соответствующие затраты. Во втором случае открывается перспектива минимизации затрат на шихту, т. е. снижение себестоимости 1 тонны годного литья.

Weaknesses. Слабые стороны данного исследования связаны с тем, что математическая модель строилась на основе произвольной области планирования эксперимента. Это значит, что полученные оценки коэффициентов далеки от оптимальных и существует принципиальная возможность повышения точности – за счет численного построения D-оптимального плана, минимизирующего объем эллипсоида рассеивания оценок коэффициентов. Альтернативой может быть искусственная ортогонализация плана полного факторного эксперимента, находящегося внутри рассмотренного в данной работе. При этом возможно получение соответствующих значений предела прочности в точках сформированного центрального ортогонального композиционного плана эксперимента и более точное описание поверхности отклика. Однако проведение при необходимости дополнительных плавки может быть сопряжено со значительными дополнительными затратами на исследование. И хотя в данном случае возможна реализация центрального ортогонального композиционного плана внутри уже существующего описания, т. е. по приведенной в работе работоспособной модели, дополнительные эксперименты могут оказаться полезными для преодоления очень важной

проблемы – отсутствия возможности проверки однородности эксперимента.

Opportunities. Дополнительные возможности при использовании приведенных результатов в промышленных условиях связаны с очевидным снижением металлоемкости отливок. Это достигается благодаря гарантированному обеспечению заданной прочности в области повышенных содержаний углерода в составе чугуна. Благодаря этому, с одной стороны, обеспечивается приемлемая величина прочности, а с другой – качественное протекание процесса графитизации и снижение к минимуму вероятности образования цементита.

Threats. Очевидные риски при использовании полученных результатов связаны со следующим обстоятельством. Потребители литья предпочитают приобретать отливки из высококачественного серого чугуна с вермикулярным графитом или из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Такое стремление вполне обосновано, т. к. механические или специальные свойства таких чугунов гораздо выше. С точки же зрения производителя чугуна для отливок, если условия эксплуатации чугунных деталей являются жесткими, типовыми, нет необходимости тратить лишние средства для повышения механических свойств. И если затраты производителя являются для него одним из критериев минимизации, то потребителя они не интересуют.

Таким образом, SWOT-анализ результатов исследования позволяет говорить о том, что полученные результаты моделирования обеспечивают потенциальную возможность решения двух задач: снижение металлоемкости литых деталей и снижение себестоимости 1 тонн годного литья. Однако существуют резервы повышения качества полученных результатов. Они связаны с возможностью более точного определения параметров математической модели и получением более точного описания распределения величины предела прочности в заданной области факторного пространства. При этом следует отметить, что при получении такого описания становится возможным использование результата определения предела прочности в точке факторного пространства, которая является одной из вершин гиперпространства для построения искусственного ортогонального плана в более широкой области факторного пространства.

8. Выводы

1. Показано, что для получения работоспособного аналитического описания влияния углерода (C) и углеродного эквивалента ($C_{эКВ}$) на величину предела прочности на растяжение чугуна лучшие показатели обеспечивает полиномиальное уравнение регрессии. Такая структура уравнения и полученные методом наименьших квадратов соответствующие оценки коэффициентов обеспечивают точность прогноза, превышающую точность при использовании линейного уравнения регрессии в 1,23 раза.

На основе канонического преобразования полученной поверхности отклика выявлено наличие седловой точки, являющейся информативным показателем, позволяющим предположить, что соответствующие значения входных переменных $C = 3,492\%$, $C_{эКВ} = 4,28\%$ при содержании легирующих элементов $Cr \pm 0,032\%$, $Cu \pm 0,026\%$ формируют микроструктуру, гарантирующую значение предела прочности чугуна $\sigma_B = 203$ МПа.

С учетом полученного доверительного интервала, это значение с вероятностью 95 % находится в диапазоне $\sigma_B = (193-213)$ МПа. Металлографическое описание микроструктуры в седловой точке представляется важным и может быть развито с помощью полученного результата моделирования.

2. Отмечено, что полученные оценки коэффициентов далеки от оптимальных и существует принципиальная возможность повышения точности – за счет численного построения D-оптимального плана, минимизирующего объем эллипсоида рассеивания оценок коэффициентов. Альтернативой может быть искусственная ортогонализация плана полного факторного эксперимента, находящегося внутри рассмотренного в данной работе, получение соответствующих значений предела прочности в точках полученного центрального ортогонального композиционного плана и более точное описание поверхности отклика.

Литература

1. Иванова, Л. А. Повышение герметичности отливок из серого чугуна [Текст] / Л. А. Иванова, П. В. Доценко, И. В. Прокопович, П. В. Каспревич // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. – 1995. – С. 11–13.
2. Иванова, Л. А. Причины потери герметичности отливок из серого чугуна [Текст] / Л. А. Иванова, И. В. Прокопович, П. В. Каспревич // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – 1996. – С. 25–28.
3. Иванова, Л. А. Зависимость герметичности серого чугуна от длины графитовых включений [Текст] / Л. А. Иванова, И. В. Прокопович // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – 1996. – С. 28–32.
4. Endo, M. Effects of small defects, matrix structures and loading conditions on the fatigue strength of ductile cast irons [Text] / M. Endo, K. Yanase // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2014. – Vol. 69. – P. 34–43. doi:10.1016/j.tafmec.2013.12.005
5. Cheng, Y. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete [Text] / Y. Cheng, F. Huang, W. Li, R. Liu, G. Li, J. Wei // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 118. – P. 164–170. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.020
6. Borsato, T. Effect of in-mould inoculant composition on microstructure and fatigue behaviour of heavy section ductile iron castings [Text] / T. Borsato, F. Berto, P. Ferro, C. Carollo // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – P. 3150–3157. doi:10.1016/j.prostr.2016.06.393
7. Fourlakidis, V. A generic model to predict the ultimate tensile strength in pearlitic lamellar graphite iron [Text] / V. Fourlakidis, A. Dioszegi // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 618. – P. 161–167. doi:10.1016/j.msea.2014.08.061
8. Манасбеков, Н. М. Влияния содержания серы на свойства синтетического чугуна [Электронный ресурс] / Н. М. Манасбеков // Молодёжь и наука: Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К. Э. Циолковского. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012. – Режим доступа: \www/URL: http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section37.html
9. Bai, Y. Chemical Compositions, Microstructure and Mechanical Properties of Roll Core used Ductile Iron in Centrifugal Casting Composite Rolls [Text] / Y. Bai, Y. Luan, N. Song, X. Kang, D. Li, Y. Li // Journal of Materials Science & Technology. – 2012. – Vol. 28, № 9. – P. 853–858. doi:10.1016/s1005-0302(12)60142-x
10. Demin, D. A. Optimization of the method of adjustment of chemical composition of flake graphite iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo. – 1995. – № 7-8. – P. 42–43.
11. Demin, D. A. Complex alloying of grey cast iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo. – 1998. – № 10. – P. 18–19.

12. Бондарчук, А. А. Модели управления твердостью металла в условиях стохастической и нечеткой неопределенности [Текст] / А. А. Бондарчук, М. Г. Матвеев, Ю. А. Полянский // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 4.1. – С. 124–128.
13. Бондарчук, А. А. Модели выбора состава в системе «состав-свойство» [Текст] / А. А. Бондарчук, М. Г. Матвеев // Материалы XX международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». Ярославль: Яросл. гос. тех. ун-т, 2007. – Т. 2. – С. 139–140.
14. Глинков, Г. М. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов [Текст] / Г. М. Глинков, В. А. Маковский, С. Л. Лотман, М. Р. Шапировский. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.
15. Дёмин, Д. А. Ресурсосберегающие технологии в литейном производстве [Текст]: справ. пособие / Д. А. Дёмин, Е. Б. Дёмина, О. В. Акимов и др.; под общ. ред. Д. А. Дёмина. – Х.: Технологический Центр, 2012. – 320 с.
16. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман и др. – М.: Мир, 1977. – 542 с.
17. Раскин, Л. Г. Нечеткая математика [Текст]: моногр. / Л. Г. Раскин, О. В. Серая. – Харьков: Парус, 2008. – 352 с.
18. Seraya, O. V. Linear Regression Analysis of a Small Sample of Fuzzy Input Data [Text] / O. V. Seraya, D. A. Demin // Journal of Automation and Information Sciences. – 2012. – Vol. 44, № 7. – P. 34–48. doi:10.1615/jautomatinfscien.v44.i7.40
19. Дёмин, Д. А. Нечеткая кластеризация в задаче построения моделей «состав – свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределённости [Текст] / Д. А. Дёмин // Проблемы машиностроения. – 2013. – Т. 16, № 6. – С. 15–23. – Режим доступа: \www/URL: http://journals.uran.ua/jme/article/view/21309

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ЧАВУНУ З ПЛАСТИНЧАСТИМ ГРАФІТОМ В ФАКТОРНОМУ ПРОСТОРІ «ВУГЛЕЦЬ (C) – ВУГЛЕЦЕВИЙ ЕКВІВАЛЕНТ (C_{ЕКВ})» В ДІАПАЗОНАХ C = (3,425–3,563) % И C_{ЕКВ} = (4,214–4,372) %

Для області факторного простору «вуглецевий еквівалент (C_{ЕКВ}) – вміст вуглецю (C)» побудовано працездатний аналітичний опис впливу обраних вхідних змінних на межу міцності чавуну і досліджена отримана поверхня відгуку. Відзначено принципову можливість отримання більш точного опису поверхні відгуку. Отриманий результат може сприяти зниженню матеріаломісткості виливків і зниженню витрат на виплавку чавуну.

Ключові слова: чавун з пластинчастим графітом, індукційна тигельна піч, рівняння регресії, канонічне перетворення поверхні відгуку.

Дёмин Дмитрий Александрович, доктор технических наук, профессор, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7946-3651