

## Література

1. Jones, K. E. Global trends in emerging infectious diseases [Text] / K. E. Jones, N. G. Patel, M. A. Levy, A. Storeygard, D. Balk, J. L. Gittleman, P. Daszak // Nature. – 2008. – Vol. 451, Issue 7181. – P. 990–993. doi: 10.1038/nature06536
2. Vob, E. Evaluation of bacterial growth on various materials [Text]: the 20th International Enameller Congress / E. Vob, C. Storch. – Istanbul, 2005. – P. 194–210.
3. Pelgrift, R. Y. Nanotechnology as a therapeutic tool to combat microbial resistance [Text] / R. Y. Pelgrift, A. J. Friedman // Advanced Drug Delivery Reviews. – 2013. – Vol. 65, Issue 13-14. – P. 1803–1815. doi: 10.1016/j.addr.2013.07.011
4. Kobasa, I. Nanosized titanium dioxide as an antibacterial admixture for the food packaging materials [Text] / I. Kobasa, M. Vorobets, L. Arsenieva // Journal Food and Environment Safety. – 2016. – Vol. 15, Issue 4. – P. 306–311.
5. Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності [Текст]: мат. III Міжнар. спец. наук.-пр. конф. – К.: НУХТ, 2014. – 161 с.
6. Mazurkevich, Ya. S. TiO<sub>2</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materials [Text] / Ya. S. Mazurkevich, I. M. Kobasa // Inorganic Materials. – 2002. – Vol. 38, Issue 5. – P. 522–526. doi: 10.1023/a:1015487425528
7. Крюков, А. І. Нано-фотокаталіз [Текст] / А. І. Крюков, О. Л. Стрюк, С. Я. Кучмий, В. Д. Походенко. – К.: Академперіодика, 2013. – 618 с.
8. Бесага, Х. С. Особливості технології порошоків S-TiO<sub>2</sub> для фотокаталізу [Текст] / Х. С. Бесага, І. В. Луцюк, Я. І. Вахула // Вісник національного університету “Львівська політехніка”. – 2015. – № 812. – С. 106–110.
9. Pat. No. 2008/0146441 US. Highly photosensitive titanium dioxide and process for forming the same [Text]. – Kobasa I. M., Strus W., Kovbasa M. A.
10. Вахула, Я. І. Закономірності формування поверхні наночастинок Титан(IV) оксиду, допованих сіркою [Текст] / Я. І. Вахула, Х. С. Бесага, М. В. Добротворська // Вісник національного університету “Львівська політехніка”. – 2011. – № 700. – С. 329–333.

Дата надходження рукопису 14.06.2017

**Воробець Марія Михайлівна**, кандидат хімічних наук, доцент, кафедра хімічного аналізу, експертизи та безпеки харчової продукції, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012  
E-mail: m.vorobets@chnu.edu.ua

**Кобаса Ігор Михайлович**, доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри, кафедра хімічного аналізу, експертизи та безпеки харчової продукції, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012  
E-mail: I.Kobasa@chnu.edu.ua

**Панімарчук Оксана Іванівна**, кандидат хімічних наук, асистент, кафедра медичної та фармацевтичної хімії, Буковинський державний медичний університет, пл. Театральна, 2, м. Чернівці, Україна, 58002  
E-mail: imk-11@hotmail.com

УДК 519.681

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.109175

## СИНТЕЗ НОМОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СУБОПТИМАЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОНСТРУКЦИОННОГО ЧУГУНА НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ

© Д. А. Дёмин

*На основе математической модели, описывающей влияние углерода (C) и углеродного эквивалента (Сэкв) на предел прочности на растяжение ( $\sigma_B$ ) конструкционного чугуна, выполнено параметрическое описание поверхности отклика  $\sigma_B = \sigma_B(C, Сэкв)$ . Показано, что для рассмотренной модели в виде уравнения регрессии применение ридж-анализа позволяет найти множество субоптимальных значений входных переменных (C, Сэкв), обеспечивающих получение заданных марок конструкционного чугуна. Графическое представление таких множеств формирует номограмму для расчета субоптимального химического состава конструкционного чугуна*

**Ключевые слова:** конструкционный чугун, субоптимальный химический состав, уравнение регрессии, стационарная область, ридж-анализ, номограмма

### 1. Введение

В качестве конструкционного чугуна в современных условиях литейного производства зачастую используют высокопрочный чугун или чугун с вермикулярным графитом. Использование таких типов чугуна оправдывается с точки зрения получения

сплава с повышенными механическими свойствами. Это обеспечивает возможность снижения металлоемкости готовых отливок и, как следствие, их массогарбитных характеристик, за счет уменьшения толщины стенок отливок. При этом прочностные свойства не ухудшаются. Перспектива использования таких

технических и соответствующих технологических решений очевидна. Однако использование соответствующих технологий и материалов сопряжено с повышенными затратами на производство, что в случае применения отливок для деталей не особо ответственного назначения, необоснованно. К таким деталям относится широкая номенклатура деталей общего машиностроения, поэтому в условиях серийного производства представляет интерес использование менее дорогостоящих чугунов с пластинчатым графитом стандартных марок. Это предполагает необходимость использования технологических решений, обеспечивающих заданную величину механических свойств чугуна при минимальных затратах на его производство. В данном случае резервом снижения затрат является оптимизация по критерию минимума стоимости шихтовых материалов, закладываемых расчетными нормами для обеспечения заданного химического состава чугуна. Если химический состав является оптимальным с точки зрения обеспечения заданных механических свойств, то оптимизация шихты выполняется применением традиционной процедуры линейного программирования [1]:

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

где  $C_i$  – стоимость  $i$ -го шихтового материала,  $U_i$  – количество  $i$ -го шихтового материала.

Для минимизации функционала (1) используются ограничения:

$$\sum_{i=1}^n U_i = U^* \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n f_{ij} U_i = f_j \quad (3)$$

где  $f_j$  – заданное общее количество  $j$ -го элемента химического состава в готовом чугуне,  $f_{ij} U_i$  – количество  $j$ -го элемента химического состава, вносимое с каждым шихтовым материалом,  $\sum_{i=1}^n f_{ij} U_i$  – общее количество  $j$ -го элемента химического состава в готовом чугуне.

Таким образом, выбор технологических решений, оптимальных по затратам, базируется на выборе химического состава конструкционного чугуна, оптимального по заданному уровню механических свойств. Так как в реальных производственных условиях диапазоны содержания элементов химического состава чугуна ограничены, имеет смысл говорить об ограничениях, накладываемых на химический состав. При этом содержание элементов химического состава в сплаве формируют множество входных переменных процесса, а термин «оптимальный» следует понимать с точки зрения его локальности. Очевидно, что такие локально оптимальные значения, называемые субоптимальными, формируются множеством (точками,

линиями, поверхностями) пересечения поверхности отклика, описывающей влияние химического состава на исследуемые свойства чугуна, и поверхностей, описывающих ограничения. Следовательно, актуальным является решение задач, связанных с построением адекватных математических моделей, традиционно для задач синтеза сплавов с заданным комплексом свойств имеющих вид уравнений регрессии, и исследованием этих моделей [2–4]. При этом под исследованием необходимо понимать описание поверхности отклика и исследование стационарной области при ее выявлении. Если в качестве основных требований к конструкционному чугуну выдвигается требование максимальной прочности, то выходной переменной при построении уравнения регрессии выбирается предел прочности на растяжение  $\sigma_b$ . Итогом решения технологических задач в этом случае является выбор таких параметров и соответствующих технологических режимов, которые обеспечивают максимум  $\sigma_b$ .

## 2. Литературный обзор

Вопросы управления свойствами сплавов зачастую пытаются решать на этапе проектирования технологии [5, 6] и на этапе отработки технологического процесса непосредственно при изготовлении отливок [7, 8]. В последнем случае рассматриваются разные варианты воздействия на технологический объект – и путем выбора рационального решения по технологии литейной формы, и путем воздействия на сплав в процессе плавки и выпечной обработки. Итогом таких решений применительно к сплаву является получение заданной микроструктуры, обеспечивающей требуемую механическую или эксплуатационную характеристику [10–12]. В этой связи необходимо особо отметить, что отдельная часть исследований посвящена оптимизации технологий модифицирования чугуна как способа целенаправленного воздействия на формирование его микроструктуры [13, 14].

Связь параметров микроструктуры со свойствами особо отмечено в работах [15–17]. Так, в работе [15] исследовано влияние на усталостную прочность чугуна микроструктурных неоднородностей: графита, литейных дефектов, структуры металлической матрицы. Описанный в данной работе метод позволяет предсказывать оценку данной выходной характеристики на основании информации о микроструктурных неоднородностях и условиях нагружения. Исследования, описанные в работе [16], позволили установить качественное влияние модификатора, содержащего SiC, в сочетании с ферросилицием FeSi75, на морфологию графита, матричную структуру и механические свойства чугуна. Особо при этом отмечается возможность формирования большого количества микрозон с высоким содержанием углерода и концентрацией кремния, что способствует благоприятному протеканию процесса графитизации. Исследование влияния композиции модификатора в пресс-форме на микроструктуру и усталостную прочность отливок из чугуна EN GJS 700-2 описано в работе [17], в которой авторы делают вывод об эф-

фективности модифицирования по влиянию на микроструктуру сплава.

В рассмотренных трудах акценты делаются на технологические способы регулирования свойств, поэтому интерес представляют также работы, посвященные вопросам использования принципов формализации для исследования связи технологических параметров и выходных характеристик сплава [18, 19]. В частности, описано использование методов регрессионного анализа или модифицированных уравнений Гриффитса и Холла-Петча. Очевидно, что такой подход является перспективным, так как позволяет количественно оценивать влияние технологических параметров на выходные характеристики, решая тем самым задачу прогноза свойств. Более того, возможно решение обратной задачи – задаваясь требуемыми свойствами, выбирать рациональные или оптимальные значения технологических параметров. Если речь идет о приоритете предела прочности чугуна как его основной характеристике, то такие исследования должны дать возможность построения уравнений регрессии вида  $\sigma_b = \sigma_b(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , в которых  $x_i$  – содержание элементов химического состава чугуна.

### 3. Цель и задачи исследования

Цель исследования состояла в построении номограммы для расчета субоптимального химического состава конструкционного чугуна по входным переменным «углерод (С) – углеродный эквивалент (Сэкв)».

Для достижения данной цели ставились следующие задачи:

1. Исследование стационарной области поверхности отклика вида  $\sigma_b = \sigma_b(C, Сэкв)$ .

2. Определение множества субоптимальных значений входных переменных с учетом ограничений на диапазон содержания углерода и положения эвтектической точки на диаграмме состояния Fe–C.

### 4. Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования была выбрана математическая модель в виде уравнения регрессии

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3(x_1)^2 + a_4(x_2)^2 + a_5x_1x_2, \quad (4)$$

где  $a_i$  – оцениваемые коэффициенты,  $x_1$  – содержание углерода в конструкционном чугуне, %, =;  $x_2$  – величина углеродного эквивалента чугуна, Сэкв, %;  $y$  – предел прочности на растяжение,  $\sigma_b$ , МПа.

Таблица экспериментальных данных для построения модели формировалась на основе результатов химического анализа конструкционного чугуна индукционной плавки и данных заводской лаборатории о величине предела прочности на растяжение.

Загрузка шихты для плавки осуществлялась в соответствии с технологической инструкцией (ТИ) на плавку серого чугуна в индукционных печах ИСТ1/0.8-М5 (табл. 1).

Таблица 1

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

№ 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 <sup>3</sup> /ч	14.4

Контроль технологического процесса плавки, состояния тигля и изоляции индуктора осуществлялось по показаниям приборов щита управления. После осаживания шихты в тигле в процессе расплавления осуществлялась подгрузка предварительно подогретых шихтовых материалов в соответствии с ТИ. Напряжение на индукторе регулировалось в зависимости от интенсивности перемешивания расплава.

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. Компоненты шихты:

- 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. Подробно описание технологического процесса плавки может быть найдено в работе [20].

Для оценки векторов  $A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix}$  использовался

метод наименьших квадратов (МНК)

$$A = (F'F)^{-1} F'Y = CF'Y, \quad (5)$$

минимизирующий функционал наименьших квадратов вида

$$J = (FA - Y)'(FA - Y), \quad (6)$$

где F – матрица плана пассивного эксперимента, формирование которой описано в работе [20],

$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ y_n \end{pmatrix}$  – матрица экспериментальных значений

предела прочности на растяжение,  $\sigma_b$ , МПа.

Рассчитанная матрица оценок коэффициентов

$$\text{имеет вид } A = \begin{pmatrix} 206,7276 \\ -3,87669 \\ 6,37602 \\ -16,3141 \\ 20,44989 \\ -19,2311 \end{pmatrix} [20].$$

Диапазон входных переменных был ограничен  $C=(3,425-3,563)$  %,  $S_{эkv}=(4,214-4,372)$  %, функция плотности распределения содержания легирующих элементов описывалась следующим образом:

$$\varphi([Cr]) = \frac{1}{0,1243} \exp\left(-\frac{([Cr]_i - 0,34)^2}{0,00492}\right), \quad (7)$$

$$\varphi([Cu]) = \frac{1}{0,1045} \exp\left(-\frac{([Cu]_i - 0,2)^2}{0,00348}\right), \quad (8)$$

где  $[Cr]_i$ ,  $[Cu]_i$  – содержание хрома и меди в чугуна, соответственно

Соотношение хрома и никеля поддерживалось в диапазоне Cr:Ni=2:1, соотношение меди и титана поддерживалось в диапазоне Cu:Ti=4:1.

Гистограммы распределения содержания хрома и меди и кривые плотности распределения, описываемые аналитически выражениями (7) и (8), приведены на рис. 1, 2 соответственно.

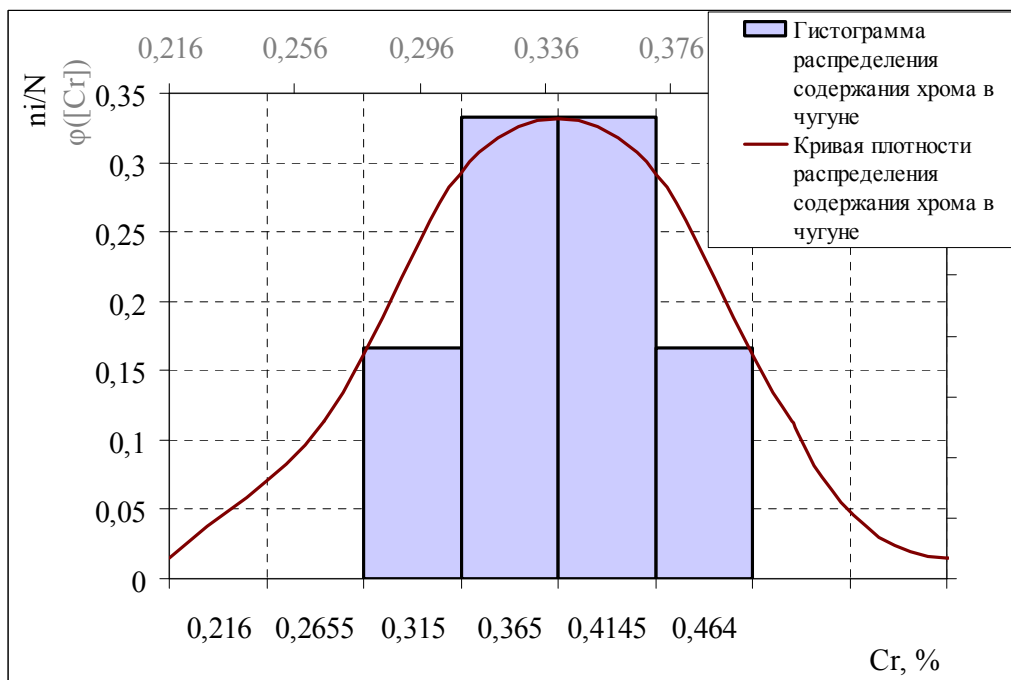


Рис. 1. Гистограмма распределения содержания хрома и кривая плотности распределения, описываемая аналитически выражением (7)

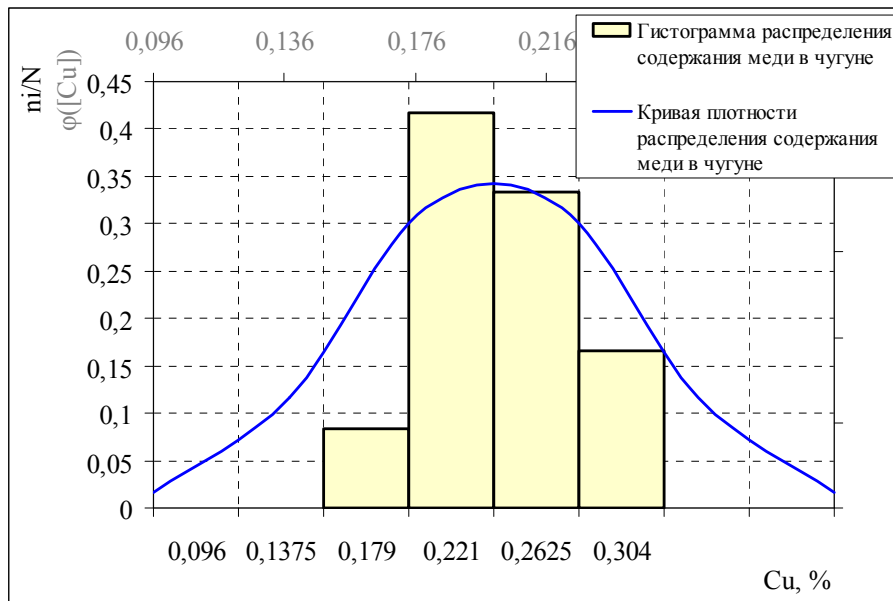


Рис. 2. Гистограмма распределения содержания меди и кривая плотности распределения, описываемая аналитически выражением (8)

Исследование поверхности отклика выполнялось ридж-анализом, позволяющем определять субоптимальные решения на основе параметрического описания вида:

$$\begin{cases} x^*(\lambda) = (\lambda I - A)^{-1} a, \\ r(\lambda) = \sqrt{x^{*T} x^*}, \\ y^*(\lambda) = a_0 + 2a^T x^* + x^{*T} A x^*, \end{cases} \quad (9)$$

где  $a_0, a, A$  – оценки коэффициентов в уравнении регрессии (1),  $x_i^* = \frac{a_i}{2\lambda}$  – субоптимальные значения

входных переменных,  $r = \sqrt{r^2}$ ,  $r^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i}{2\lambda}\right)^2$  – ограничения, накладываемые на значения входных переменных в факторном пространстве (С и СэКВ),  $y^* = a_0 + \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{2\lambda}$  – субоптимальные значения выходной переменной ( $\sigma_B$ ).

**5. Результаты исследования и их обсуждение**

На рис. 3–5 представлено графическое решение задачи ридж-анализа полученной поверхности отклика  $\sigma_B = \sigma_B(C, C_{ЭКВ})$ , аналитически описываемого уравнением регрессии вида (1).

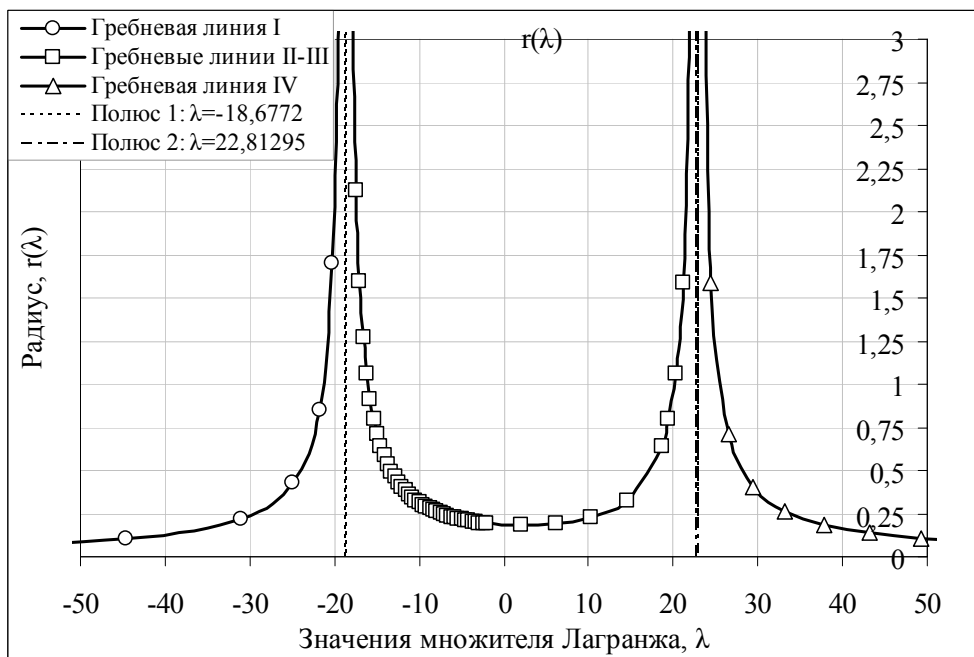
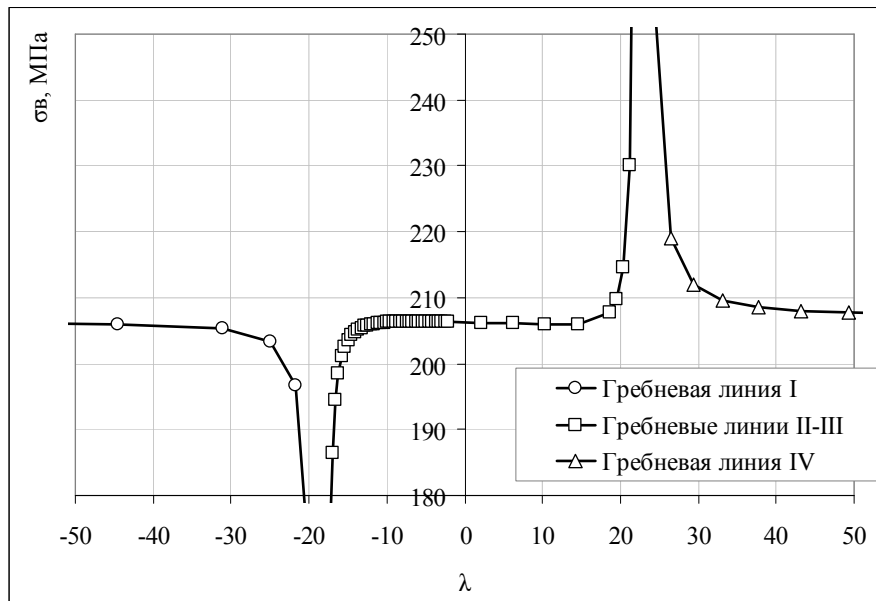
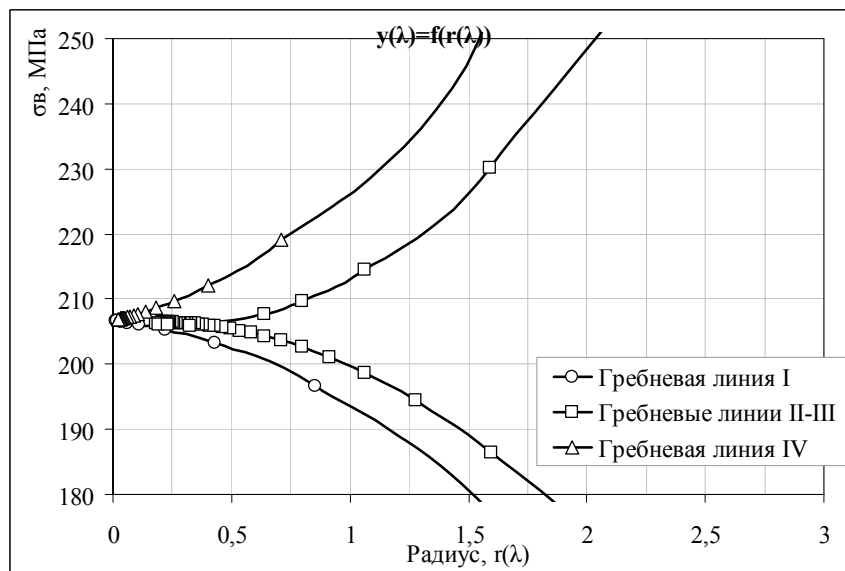


Рис. 3. Зависимость  $r = r(\lambda)$

Рис. 4. Зависимость  $\sigma_b = \sigma_b(\lambda)$ Рис. 5. Зависимость  $\sigma_b = \sigma_b(r)$ 

Из рис. 3 видно, что имеется два полюса:  $\lambda_1 = -18,6772$  и  $\lambda_2 = 22,81295$ . Решение существуют в четырех областях:

- гребневая линия I:  $\lambda = ]-\infty; -18,6772[$ ,
- гребневая линия II–III:  $\lambda = ]-18,6772; 22,81295[$ ,
- гребневая линия IV:  $\lambda = ] 22,81295; +\infty[$ .

Это позволяет проанализировать поведение выходной переменной во всей области значений  $\lambda$ .

Как следует из рис. 4, в области значений  $\lambda = ]-\infty; -25]$  величина предела прочности практически не меняется и  $\sigma_b \approx 205$  МПа. Дальнейшее увеличение значений  $\lambda$  в пределах гребневой линии I приводит к резкому падению величины  $\sigma_b$ .

Гребневые линии II–III демонстрируют наличие трех характерных зон поведения величины  $\sigma_b$  (рис. 4):

– в диапазоне  $\lambda < -15$  предел прочности резко возрастает, достигая своего стационарного значения  $\approx 208$  МПа,

– в диапазоне  $\lambda = [-15; +15]$  значение предела прочности не изменяется,

– в диапазоне  $\lambda > 15$  предел прочности начинает резко возрастать.

Гребневая линия IV демонстрирует падение величины предела прочности на растяжение.

Зависимость  $\sigma_b(\lambda)$  от радиуса  $r(\lambda)$ , описывающего ограничения, накладываемые на диапазон значений входных переменных, имеет вид, представленный на рис. 5. Он позволяет оценить области существования чугунов различных марок. Так, из рис. 5 следует, что чугун марки СЧ18 ГОСТ1412-85, для которого должно выполняться условие  $\sigma_b = 180-200$  МПа, может быть получен, если химический состав удовлетворяет значениям  $r(\lambda)$  для гребневой линии I и частично II–III.

Чугун марки СЧ20 ГОСТ1412-85, для которого должно выполняться условие  $\sigma_b = 200-250$  МПа, может быть получен, если химический состав удовлетворяет значениям  $r(\lambda)$  для гребневых линий II–III, IV и частично I (рис. 5).

Видно также, что существует теоретическая возможность повышения марки чугуна до СЧ25 ГОСТ1412-85, для которого должно выполняться условие  $\sigma_b=250-300$  МПа – если химический состав удовлетворяет значениям  $r(\lambda)$  для гребневой линии IV и частично II–III. Однако к этому выводу следует относиться осторожно, так как он требует подтверждения в виде исследования микроструктуры получаемого чугуна.

Если в качестве накладываемого ограничения выбрать диапазон области планирования  $C=(3,42-3,57)$  % и  $C_{эkv}=(4,2-4,4)$  % (в нормированном виде  $[-1;1]$ ), что соответствует значению  $r = \sqrt{2} = 1,414$ , то возможно существование нескольких субоптимальных решений. Они определяются как точки пересечения гребневых линий и ограничения  $r=1,414$ .

Если требованиям качества чугуна удовлетворяет только  $\sigma_b=200-250$  МПа, то субоптимальное решение находится как точка пересечения ограничения  $r=1,414$  и верхней ветви гребневой линии II–III, а также гребневой линии IV.

Следовательно, полученные итоговые результаты в виде рис. 5 позволяют сделать ряд важных с практической точки зрения выводов, касающихся удовлетворению разным требованиям к прочности чугуна. Это свидетельствует о многовариантности получаемых решений, выбор наиболее предпочтительного из которых определяется требованиями условий производства.

Очевидно, что имеет место множество субоптимальных решений, задаваемых первым уравнением системы (9). Для случая, когда требования  $\sigma_b=180-240$  МПа являются достаточными, такие решения приведены на рис. 6.

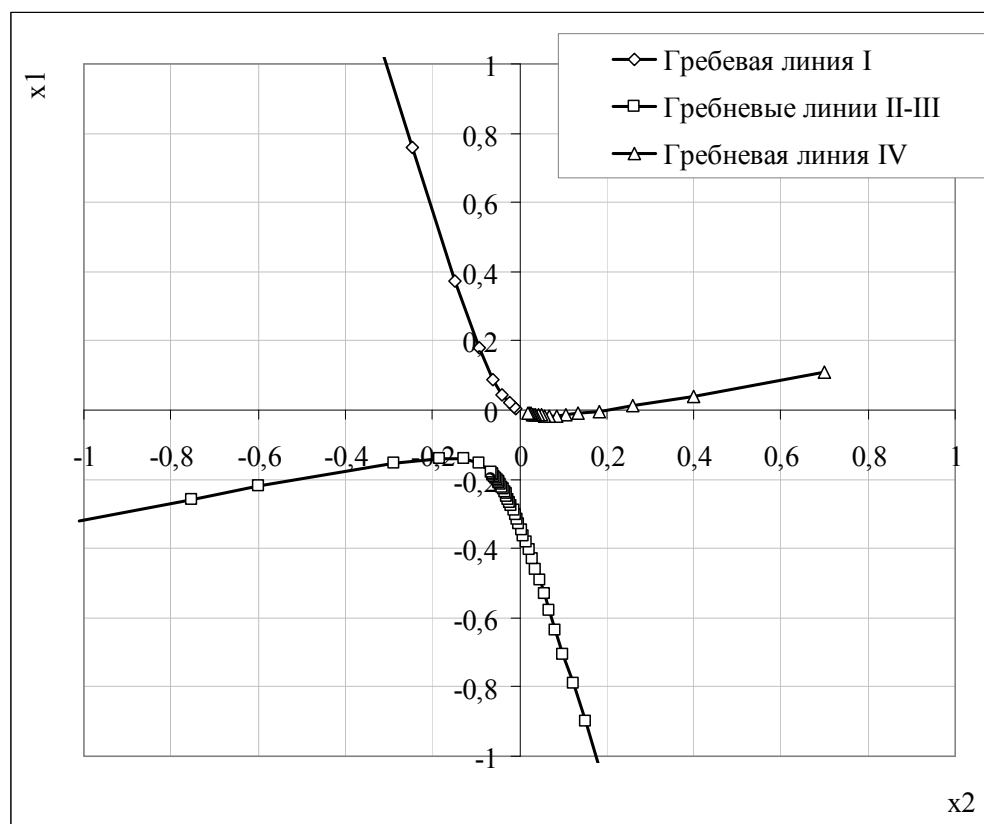


Рис. 6. Множество субоптимальных решений по определению значений входных переменных, удовлетворяющих требованиям  $\sigma_b=180-240$  МПа (входные переменные заданы в нормированном виде)

С практической точки зрения представляет особый интерес преобразование полученных решений в нормированном виде к натуральному виду – полученное таким образом описание представляет собой номограмму, которая позволяет рассчитывать субоптимальный химический состав чугуна. На рис. 7 приведена такая номограмма для исследованной области значений входных переменных.

Как следует из приведенного описания, для выбора необходимой величины корректировки со-

держания углерода или углеродного эквивалента, можно оценить расстояние между точкой факторного пространства, соответствующей фактическим значениям  $C$  и  $C_{эkv}$ , и ближайшей из двух кривых. Очевидно, что лучшим будет выбор, обеспечивающий минимальный расход корректирующих присадок, т. е. тот, для которого расстояние от текущей точки (соответствующей фактическим значениям  $C$  и  $C_{эkv}$ ) до соответствующей кривой будет минимальным.

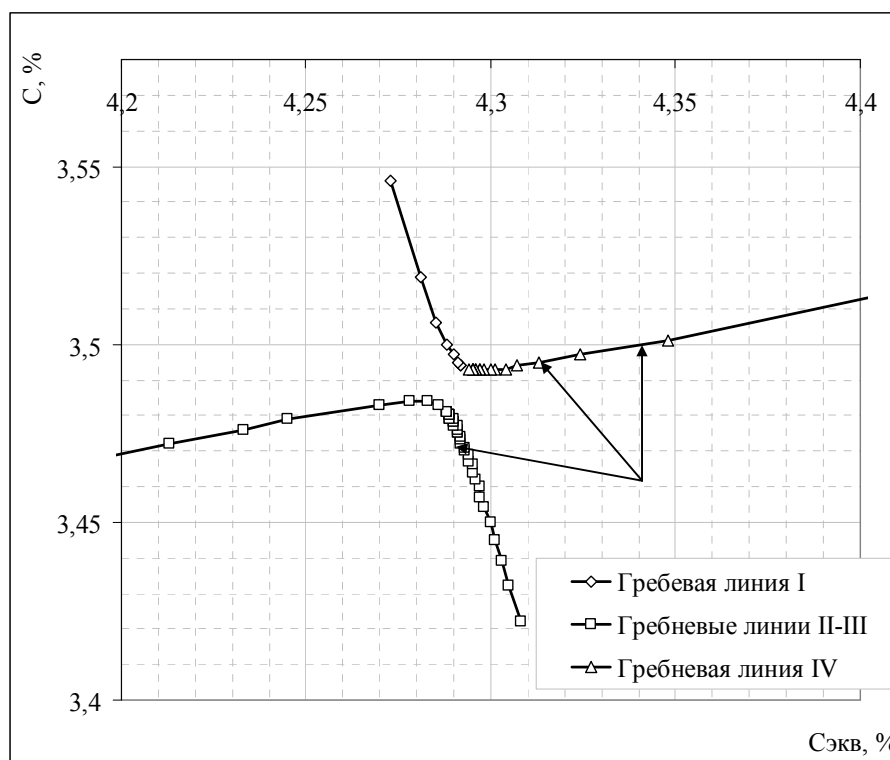


Рис. 7. Номограмма, описывающая множество субоптимальных решений для исследованной области значений входных переменных, удовлетворяющих требованиям  $\sigma_b=180-240$  МПа. Стрелками для примера показаны несколько альтернативных варианта выбора оптимальных значений С и Сэкв, имея фактический состав, соответствующий точке (С; Сэкв)=(3,462; 4,34)

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, рекомендуемом стандартом (ГОСТ3443-87), значения входных переменных – параметры графита – могут считаться нечеткими числами и быть описаны соответствующими функциями принадлежности, например (L – R) типа [21, 22]:

$$\mu(F_{jp}) = \begin{cases} L\left(\frac{\bar{F}_{jp} - F_{jp}}{\alpha_{jp}}\right), & F_{jp} \leq \bar{F}_{jp}, \\ R\left(\frac{F_{jp} - \bar{F}_{jp}}{\beta_{jp}}\right), & F_{jp} > \bar{F}_{jp}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\bar{F}_{jp}$  – определенное по ГОСТ3443-87 значение  $p$ -го параметра микроструктуры в  $j$ -м металлографическом исследовании, являющееся модальным для нечеткого числа  $F_{jp}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ ,  $p = 1, 2, \dots, m$ ;  $\alpha_{jp}$ ,  $\beta_{jp}$  – левые и правые коэффициенты нечеткости в описании (10).

Полученные результаты позволяют говорить об определенных преимуществах данного исследования, связанного с возможностью использования полученного математического и графического описания для решения двух ключевых задач.

Первая из них связана с прогнозированием предела прочности на растяжение на основе данных о фактическом химическом составе, получаемом по ходу плавки. При этом становится возможным уменьшение количества лабораторных испытаний прочности и уменьшение за счет этого соответствующих затрат.

Вторая – с выбором состава, обеспечивающего заданный уровень предела прочности на растяжение. В этом случае открывается перспектива минимизации затрат на шихту.

Нельзя не отметить, однако, слабые стороны данного исследования. Они, в частности, связаны с получением субоптимальных решений на основе математической модели, построенной на произвольной области пассивного планирования эксперимента. Это значит, что полученные оценки коэффициентов отличаются от оптимальных и существует принципиальная возможность повышения точности. Это может быть достигнуто, в частности, за счет численного построения D-оптимального плана. Альтернативой может быть искусственная ортогонализация плана полного факторного эксперимента, в результате которой становится возможным получение соответствующих значений предела прочности в точках центрального ортогонального композиционного плана эксперимента и более точное описание поверхности отклика.



Использование приведенных результатов в промышленных условиях открывает дополнительные возможности, связанные с возможностью снижения металлоемкости отливок. Как следствие, достигается снижение массогабаритных характеристик деталей машин, изготавливаемых из таких отливок. Это достигается благодаря гарантированному обеспечению заданной прочности в области повышенных содержания 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.

Следует отметить и определенные риски, связанные с использованием полученных решений. В частности, нельзя не отметить, что потребители литья предпочитают приобретать отливки из высококачественного 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 конструкционного чугуна, если условия эксплуатации чугунных деталей являются нежесткими, типовыми, нет необходимости тратить лишние средства в погоне за повышением механических свойств. В этом случае полученная номограмма может быть использована для определения субоптимального химического состава чугуна. Беря такой состав за базовый, становится возможной минимизация затрат на шихту, выполняемая на основе решения оптимизационной задачи линейного программирования (1)–(3).

## 6. Выводы

На основе проведения ридж-анализа исследована стационарная область поверхности отклика  $\sigma_b = \sigma_b(C, C_{ЭКВ})$ . Показано, что для рассмотренной математической модели в виде уравнения регрессии применение ридж-анализа позволяет найти множество субоптимальных значений входных переменных

( $C, C_{ЭКВ}$ ), обеспечивающих получение заданных марок конструкционного чугуна. Установлено, что имеется два полюса:  $\lambda_1 = -18,6772$  и  $\lambda_2 = 22,81295$ , разделяющих 4 гребневые линии, и это позволяет проанализировать поведение выходной характеристики во всей области значений  $\lambda$ .

Установлено, что в области значений  $\lambda = ]-\infty; -25]$  величина предела прочности практически не меняется и  $\sigma_b \approx 205$  МПа. Дальнейшее увеличение значений  $\lambda$  в пределах гребневой линии I приводит к резкому падению величины  $\sigma_b$ . На гребневых линиях II–III существует три характерные зоны поведения величины  $\sigma_b$ :

– в диапазоне  $\lambda < -15$  предел прочности резко возрастает, достигая своего стационарного значения  $\approx 208$  МПа,

– в диапазоне  $\lambda = [-15; +15]$  значение предела прочности не изменяется,

– в диапазоне  $\lambda > 15$  предел прочности начинает резко возрастать.

Падение величины предела прочности на растяжение характерно для гребневой линии IV.

Установлено, что чугун марки СЧ18 ГОСТ1412-85 может быть получен, если химический состав удовлетворяет значениям  $r(\lambda)$  для гребневой линии I и частично II–III. Чугун марки СЧ20 ГОСТ1412-85 может быть получен, если химический состав удовлетворяет значениям  $r(\lambda)$  для гребневых линий II–III, IV и частично I. Показано, что существует теоретическая возможность повышения марки чугуна до СЧ25 ГОСТ1412-85, условием чего является удовлетворение химического состава значениям  $r(\lambda)$  для гребневой линии IV и частично II–III.

Если требованиям качества чугуна удовлетворяет только  $\sigma_b = 200–250$  МПа, то субоптимальное решение находится как точка пересечения ограничения  $r = 1,414$  и верхней ветви гребневой линии II–III, а гребневой линии IV. Это свидетельствует о многовариантности получаемых решений, выбор наиболее предпочтительного из которых определяется требованиями условий производства.

## Литература

1. Глишков, Г. М. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов [Текст] / Г. М. Глишков, В. А. Маковский, С. Л. Лотман, М. Р. Шапировский. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.
2. 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. – Vol. 7-8. – P. 42–43.
3. Demin, D. A. Complex alloying of grey cast iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo. – 1998. – Vol. 10. – P. 18–19.
4. Mohanad, M. K. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding [Text] / M. K. Mohanad, V. Kostyk, D. Demin, K. Kostyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 2, Issue 5 (80). – P. 45–49. doi: 10.15587/1729-4061.2016.65454
5. Носенко, Т. И. Адаптивное автоматизированное синхронизирующее проектирование системы "отливка-песчаная форма" НТИ [Текст] / Т. И. Носенко, Т. В. Лысенко, А. Л. Становский // Збірник наукових праць Одеської національної морської академії. – 2008. – № 13. – С. 82–88.
6. Кострова, Г. В. Методы самосинхронизации динамических процессов САПР литейного производства КГВ [Текст] / Г. В. Кострова, Т. В. Лысенко, А. А. Бондарь // Труды Одесского политехнического университета. – 2009. – № 2 (32). – С. 7–10.
7. Хрычиков, В. Е. Влияние комбинированной кокильно-песчаной литейной формы на затвердевание и формирование макроструктуры в крупных отливках из высокопрочного чугуна [Текст] / В. Е. Хрычиков, Н. П. Котешов // Литейное производство. – 1994. – № 12. – С. 12.
8. Хрычиков, В. Е. К вопросу образования шаровидного графита при модифицировании чугуна магнием [Текст] / В. Е. Хрычиков // Литейное производство. – 1997. – № 2. – С. 5–7.
9. Косячков, В. А. Перспективы производства биметаллических отливок модифицированием чугуна в литейной форме [Текст] / В. А. Косячков, М. А. Фесенко, Д. В. Денисенко // Процессы литья. – 2004. – № 4. – С. 80–84.

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Фесенко, М. А. Внутриформенное модифицирование для получения чугуновых отливок с дифференцированной структурой и свойствами [Текст] / М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко, В. А. Косячков // Литейное производство. – 2010. – № 1. – С. 7–13.
14. Фесенко, М. А. Исследование процессов внутриформенной обработки чугуна методами физического моделирования [Текст] / М. А. Фесенко, В. А. Косячков, А. Н. Фесенко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2006. – № 3 (5). – С. 7–14.
15. 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
16. 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
17. 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
18. Fourlakidis, V. A generic model to predict the ultimate tensile strength in pearlitic lamellar graphite iron [Text] / V. Fourlakidis, A. Diószegi // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 618. – P. 161–167. doi: 10.1016/j.msea.2014.08.061
19. 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, Issue 9. – P. 853–858. doi: 10.1016/s1005-0302(12)60142-x
20. Demin, D. Strength analysis of lamellar graphite cast iron in the «carbon (C) – carbon equivalent (Ceq)» factor space in the range of C=(3,425-3,563) % and Ceq=(4,214-4,372) % [Text] / D. Demin // Technology Audit and Production Reserves. – 2017. – Vol. 1, Issue 1 (33). – P. 24–32. doi: 10.15587/2312-8372.2017.93178
21. 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, Issue 7. – P. 34–48. doi: 10.1615/jautomatinfscien.v44.i7.40
22. Демин, Д. А. Нечеткая кластеризация в задаче построения моделей «состав – свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределённости [Текст] / Д. А. Демин // Проблемы машиностроения. – 2013. – № 6. – С. 15–23.

*Дата надходження рукопису 20.06.2017*

**Демин Дмитрий Александрович**, доктор технических наук, профессор, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002  
E-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua