

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСТИ КОНСТРУКЦИОННОГО ЧУГУНА ДЛЯ ОТЛИВОК АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗА УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ В ФАКТОРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ «УГЛЕРОД (C) – УГЛЕРОДНЫЙ ЭКВИВАЛЕНТ ($C_{ЭКВ}$)»

Дёмин Д. А.

1. Введение

В технологиях литейного производства приоритетными являются вопросы управления качеством получаемых отливок. Учитывая то обстоятельство, что качество отливок формируется двумя составляющими технологических процессов – металлургической составляющей и технологией литейной формы – принципиально существует два основных подхода к исследованиям. Первый из них базируется на всестороннем изучении вопросов проектирования и изготовления технологии литейной формы, второй – на исследовании процессов плавки и внепечной обработки [1–3]. Среди рассматриваемых критериев качества могут быть выделены чистота поверхности, наличие поверхностных дефектов, соответствие размерной и геометрической точности заданным в конструкторской документации, механические и специальные свойства. И если первые формируются технологическими составляющими процесса – технологией литейной формы, то последний формируется металлургической составляющей, зависящей от плавки и внепечной обработки. Именно механические свойства – предел прочности на растяжение и твердость – регламентируются государственными стандартами. При этом следует отметить, что при сравнении образцов конструкционных чугунов общего машиностроительного назначения предпочтение следует отдавать тем, у которых предел прочности максимальный, а твердость минимальная. В отношении твердости необходимо учитывать, что нижний её уровень должен обеспечивать заданные эксплуатационные свойства в том случае, если поверхность является контактирующей. Верхний уровень твердости должен обеспечивать возможность качественной механической обработки и не вызывать снижения показателей надежности металлообрабатывающего инструмента. Важно также учитывать, что скачкообразное увеличение твердости свидетельствует об изменениях в микроструктуре и образовании карбидов. В частности, речь может идти о наиболее опасном для конструкционного чугуна карбиде углерода – Fe_3C . Таким образом, твердость как регламентируемый показатель качества конструкционного чугуна является важным и с технологической точки зрения, и с информационной – как косвенный показатель, свидетельствующий о нежелательных изменениях в микроструктуре. Поэтому актуальными являются направления исследований, посвященные изучению влияния на твердость конструкционного чугуна физико-химических, технологических, конструктивных факторов.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования являлся конструкционный чугун серийных плавов для отливок автомобилестроения, в котором углеродный эквивалент ($C_{э\text{кв}}$) находится в диапазоне (4,2–4,4) %, а содержание углерода (C) в диапазоне (3,42–3,57) %. Проведенные ранее исследования, посвященные изучению влияния углерода и углеродного эквивалента на предел прочности на растяжение [4], потребовали дополнительного изучения твердости. Такая производственная необходимость вызвана важностью оценки влияния C на $C_{э\text{кв}}$ на твердость, с целью изучения возможностей ее уменьшения для свободных поверхностей отливок без отрицательного влияния на прочностные показатели. Такое уменьшение твердости конструкционного чугуна в допустимых пределах может способствовать также улучшению процессов механической обработки для обрабатываемых поверхностей. Наконец, наличие обоснованных технологических решений, базирующихся на адекватном аналитическом описании влияния C на $C_{э\text{кв}}$ на твердость, может способствовать снижению затрат при выплавке конструкционного чугуна. Это обеспечивается за счет их минимизации на основе выбора оптимального по минимуму затрат состава шихты.

C точки зрения теоретических результатов, интерес представляет исследование совместного влияния углерода и углеродного эквивалента на твердость как косвенный показатель для последующего изучения механизмов формирования микроструктуры конструкционного чугуна.

Технологический аудит проводился в условиях литейного цеха ОАО «Кременчугский завод дорожных машин» (г. Кременчуг, Украина). Технологический аудит имел целью выявление реальных количественных характеристик твердости (НВ) в указанном диапазоне C– $C_{э\text{кв}}$ при реализации базового технологического процесса индукционной плавки синтетического чугуна марки СЧ20 ГОСТ1412-85. Плавка осуществлялась в индукционной тигельной печи с кислой футеровкой ИСТ1/0.8-М5. В качестве модификатора использовался ферросилиций ФС75. Подробно технологические режимы процесса описаны в работе [4].

В соответствии с действующими на предприятии технологическими инструкциями, проводился отбор проб на химический анализ, и заливались клиновые образцы для определения твердости чугуна в соответствии с ГОСТ 1412-85.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – описание распределения величины твердости конструкционного чугуна серийных плавов для отливок автомобилестроения в факторном пространстве C– $C_{э\text{кв}}$ в диапазонах C=(3,42–3,57) % и $C_{э\text{кв}}$ =(4,2–4,4) %, при фиксированных в узких интервалах значениях содержания Cr–Ni–Cu–Ti легирующего комплекса. Это дало бы возможность выбрать оптимальные по выбранным критериям значения C и $C_{э\text{кв}}$ для последующей оценки возможности минимизации затрат при выплавке чугуна.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач.

1. Построение работоспособного аналитического описания влияния выбранных входных переменных на твердость чугуна.

2. Исследование поверхности отклика на наличие оптимальных или субоптимальных значений входных переменных.

4. Исследование существующих решений проблемы

Твердость, как один из показателей качества конструкционного чугуна, зависит от множества технологических факторов, но с другой стороны, ее величина связана с макро- и микроструктурой. Теоретически любое воздействие в технологическом процессе способно повлиять на изменение твердости, именно как одного из показателей качества. Поэтому исследователи, как правило, подходят к решению вопросов комплексно. Так, в работе [5] предложен метод оценки микроструктурных неоднородностей: графита, литейных дефектов, структуры металлической матрицы. Последняя, как известно, является определяющей для формирования твердости конструкционного чугуна. Предложенный метод позволяет, по мнению авторов, предсказывать оценку выходной характеристики на основании информации о микроструктурных неоднородностях и условиях нагружения.

Исследования, описанные в работе [6], позволили установить качественное влияние нового модификатора, содержащего SiC, в сочетании с ферросилицием FeSi75, на морфологию графита, матричную структуру и механические свойства чугуна. Установлено, что существует возможность формирования большого количества микрон с высоким содержанием углерода и концентрацией кремния, способствующих благоприятному протеканию процесса графитизации. Однако 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 [7]. В этой работе авторы говорят о возможности управления свойствами посредством эффективного модифицирования. При этом эффективность рассматривается в смысле заданного целенаправленного воздействия на микроструктуру сплава. Однако проблема исследуется преимущественно на основе материаловедческого, а не технологического подхода.

В ряде работ, например [8, 9], отмечена возможность использования методов регрессионного анализа или модифицированных уравнений Гриффитса и Холла-Петча для исследования процессов формирования металлической матрицы. Здесь необходимо отметить в очередной раз, что если предел прочности чугуна зависит в основном от количества, формы, размера и распределения графита, то твердость определяется главным образом металлической матрицей.

Влияние параметров легирования, совместно с регулированием соотношения C/Si в чугуне, на микроструктуру и механические свойства чугуна описано в работе [10]. В этой работе установлена существенность влияния на данные выходные характеристики чугуна модификатора в сочетании с сурьмой (Sb). Однако результаты, описанные в данной работе, относятся к высокопрочным чугунам и возможность распространения полученных в ней выводов на чугуны с пластинчатым графитом требуют дополнительных исследований. Вопросу образования шаровидного графита при

модифицировании чугуна магнием уделено внимание в работе [11], а выбору типа модификатора и разработке технологии модифицирования, как технологических факторов управления механическими свойствами, посвящены работы [12–14]. Среди наиболее представляемых на рынке модификаторов могут быть отмечены, например, модификаторы Superseed® Extra Inoculant [12], Reseed® Inoculant [13] и SMZ® Inoculant [14]. Модификатор Superseed® Extra Inoculant максимально снижает отбел в отливках из серого чугуна, способствует формированию равномерно распределенного графита, нейтрализует вредное воздействие азота, способствует образованию мелких включений графита, уменьшая выкрашивание графита в процессе механической обработки. Такой эффект модификатора объясняется авторами наличием в его составе циркония и стронция, улучшающих зародышеобразование при минимальной степени переохлаждения и снижающих риск формирования переохлажденного графита и феррита. Модификатор Reseed® Inoculant предназначен для высокопрочных и серых чугунов с низким содержанием серы и способствует, в частности, формированию глобулярного графита с хорошей степенью шаровидности в толстых сечениях отливок из высокопрочного чугуна. Также этот модификатор способствует предотвращению образования микроусадочной пористости в отливках. Такой эффект обеспечивается наличием в составе модификатора сбалансированного количества активных элементов – кальция и церия. Очевидно, что за счет указанных эффектов следует ожидать повышения твердости чугуна. Модификатор SMZ® Inoculant может быть использован для графитизирующего модифицирования серого чугуна и чугуна с вермикулярным графитом и подходит для позднего модифицирования в струе металла (MSI процесс). Это обеспечивает стабилизацию отклонений по химическому составу и регулирование содержания азота в чугуне. Такой эффект, как отмечают авторы работы [12], может быть объяснен тщательно сбалансированным количеством кальция и алюминия, обеспечивающим максимальный контроль за отбелом. Несмотря на качественную оценку ожидаемых эффектов модифицирования, отсутствие количественных оценок, которые могут быть сделаны только на основании аналитического описания, не позволяют принимать обоснованные технологические решения. В частности, речь может идти о подборе химического состава, обеспечивающего заданные свойства, и допускающего возможность оптимизации шихты по критерию минимума затрат. Определенные исключения при рассмотрении проблемы именно с этой точки зрения составляю работы [15, 16], в которых акцент сделан именно на способы количественной оценки. Авторами данных работ исследованы вопросы применения методов построения моделей «состав – свойства» в условиях неопределенности, причем в качестве выходной переменной выбрана именно твердость.

Описанные работы позволяют сделать вывод о том, что готовых решений относительно обоснованного выбора состава чугуна с точки зрения обеспечения заданной твердости, не приведено. Что же касается вопросов влияния химического состава чугуна в конкретном диапазоне варьирования

входных переменных $C-C_{\text{экв}}$ на твердость конструкционного чугуна, соответствующих работ не обнаружено. Поэтому для решения возникающих практических вопросов по выбору химического состава чугуна, обеспечивающего заданные значения его твердости и позволяющего в дальнейшем минимизировать затраты на его изготовление, необходимо проведение специальных исследований.

5. Методы исследования

По результатам промышленных испытаний, подробно описанных в работе [4], формировалась выборка входных и выходной переменных. Данная выборка включала результаты 200 серийных плавок, из которых были выбраны те данные, которые попадали в диапазон $C=(3,42-3,57)\%$ и $C_{\text{экв}}=(4,2-4,4)\%$. Данные предварительно фильтровались и нормировались по стандартной процедуре [4], входная переменная «содержание углерода (C)» обозначалось через x_1 , входная переменная «углеродный эквивалент ($C_{\text{экв}}$)» обозначалось через x_2 . На рис. 1 представлены значения твердости 12 образцов, отобранных для дальнейшего исследования.



Рис. 1. Значения твердости 12 образцов, отобранных для дальнейшего исследования

Исследовалась возможность построения работоспособной математической модели в виде уравнения регрессии:

$$y_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3(x_1)^2 + a_4(x_2)^2 + a_5x_1x_2, \quad (1)$$

где a_i – оцениваемые коэффициенты.

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

наименьших квадратов (МНК):

$$A = (F'F)^{-1} F'Y = CF'Y, \quad (2)$$

минимизирующий функционал наименьших квадратов вида:

$$J = (FA - Y)^T (FA - Y), \quad (3)$$

где F – матрица плана эксперимента, имеющая вид:

$$F = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{11}x_{12} & x_{11}^2 & x_{12}^2 \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{21}x_{22} & x_{21}^2 & x_{22}^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & x_{n1}x_{n2} & x_{n1}^2 & x_{n2}^2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

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

6. Результаты исследований

С помощью МНК по формуле (2) рассчитаны значения оценок коэффициентов уравнений регрессии вида (1):

$$A = \begin{pmatrix} 216,934 \\ -11,7595 \\ 1,057318 \\ 2,341327 \\ 4,389574 \\ -37,0113 \end{pmatrix}.$$

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. 2).

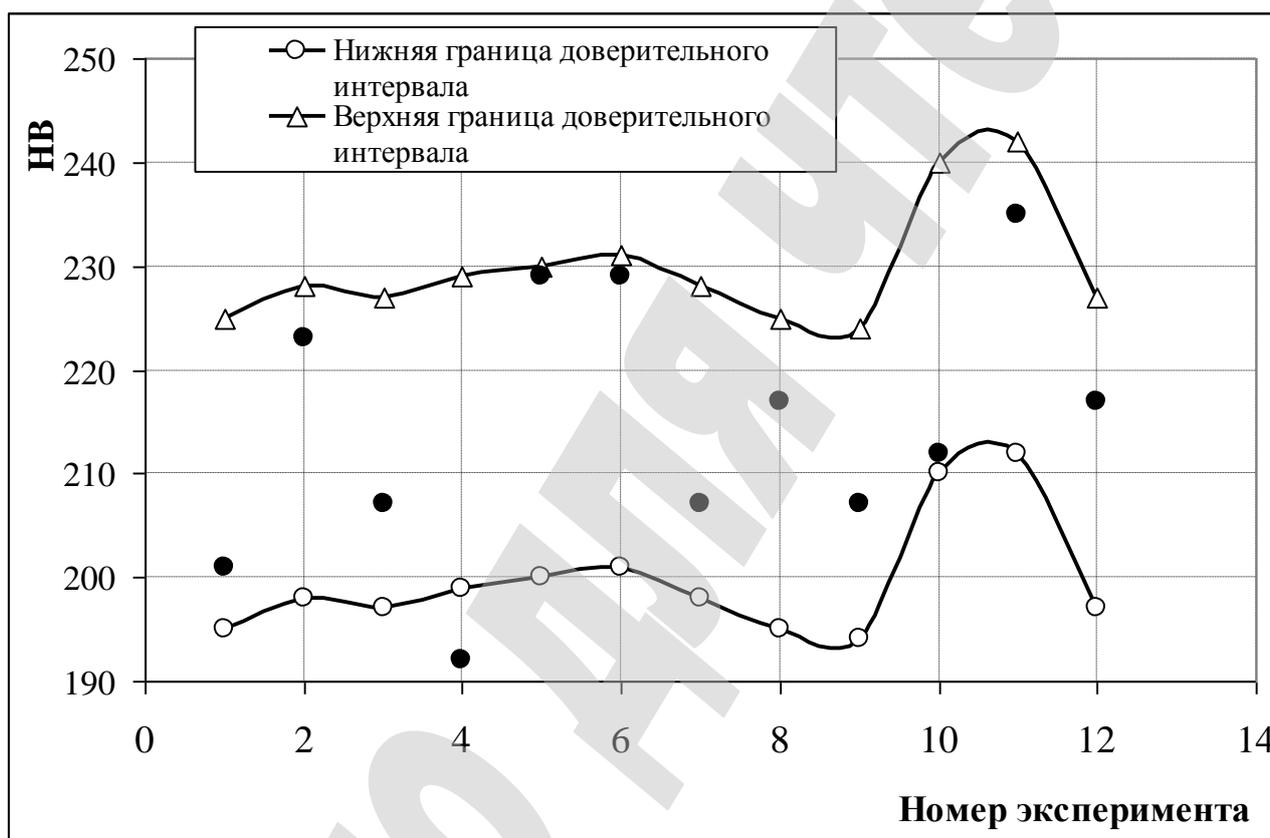


Рис. 2. Результаты проверки работоспособности модели на основании полиномиального уравнения регрессии

Из рис. 2 следует, что в доверительный интервал попало 11 тестовых точек (92 %). Поэтому есть основания считать, что уравнение регрессии вида (1) является работоспособным для дальнейшего анализа.

Так как наибольший интерес представляет выявление стационарных точек и описание в их окрестности вида поверхности отклика, выполнено каноническое преобразование поверхности отклика, аналогично процедуре, описанной в [4]:

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

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

2. Вычисление значения целевой величины в стационарной точке:

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

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

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

4. Запись уравнения поверхности отклика в канонической форме:

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

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

$$x = x^* + B\xi, \tag{5}$$

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

$$y(\xi) - y^* = \xi' L \xi. \tag{6}$$

Реализацией процедуры 1–4 получены следующие значения: $\lambda_1 = -15,1685$, $\lambda_2 = 21,89937$. Это означает, что уравнение, описывающее поверхность отклика в канонической форме, имеет вид:

$$y - y^* = -15,1685 \xi_1^2 + 21,89937 \xi_2^2, \tag{7}$$

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, так же, как и в случае с описанием предела прочности на растяжение [4], представляет собой гиперболический параболоид. Однако в нем положение седловой точки не столь ярко выражено (рис. 3).

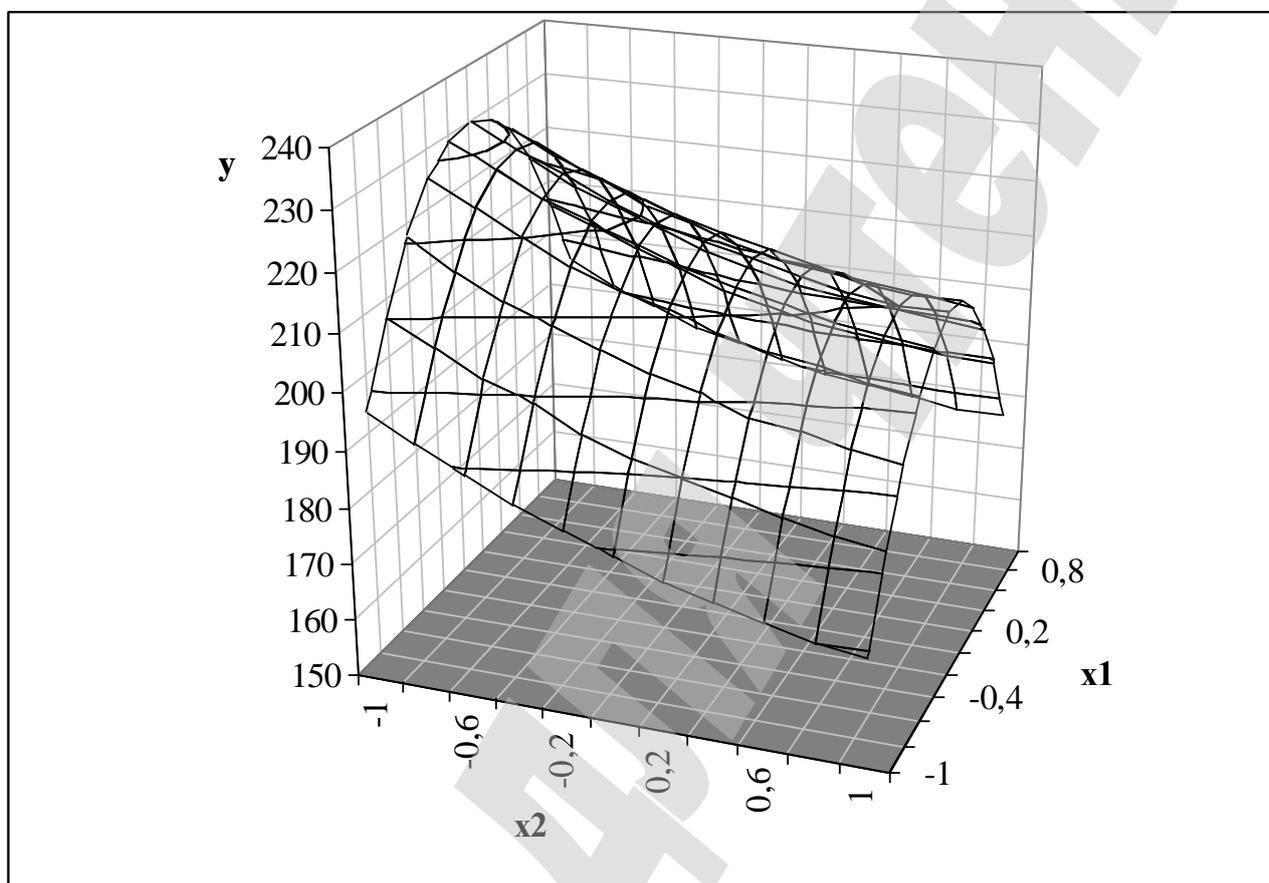


Рис. 3. Поверхность отклика, описывающая распределение значений твердости конструкционного чугуна в факторном пространстве $C-C_{э\text{кв}}$ (входные переменные заданы в нормированном виде)

На рис. 4 представлен вид сверху поверхности отклика, из которой видно, что с увеличением углеродного эквивалента твердость чугуна уменьшается. Влияние же содержания углерода на твердость является более сложным – оно описывается параболической зависимостью. Это означает, что максимум твердости достигается примерно на среднем уровне содержания углерода (3,495 %). До этого значения с ростом содержания углерода твердость растет, после – падает. Иными словами, с точки зрения использования углерода как фактора понижения твердости чугуна его допустимый диапазон ограничен интервалом (3,42–3,495) %. Более существенным фактором с этой точки зрения является углеродный эквивалент, который нужно увеличивать. Это означает, что для снижения величины твердости необходимо увеличивать ширину интервала $C-C_{э\text{кв}}$ на диаграмме состояния Fe–C.

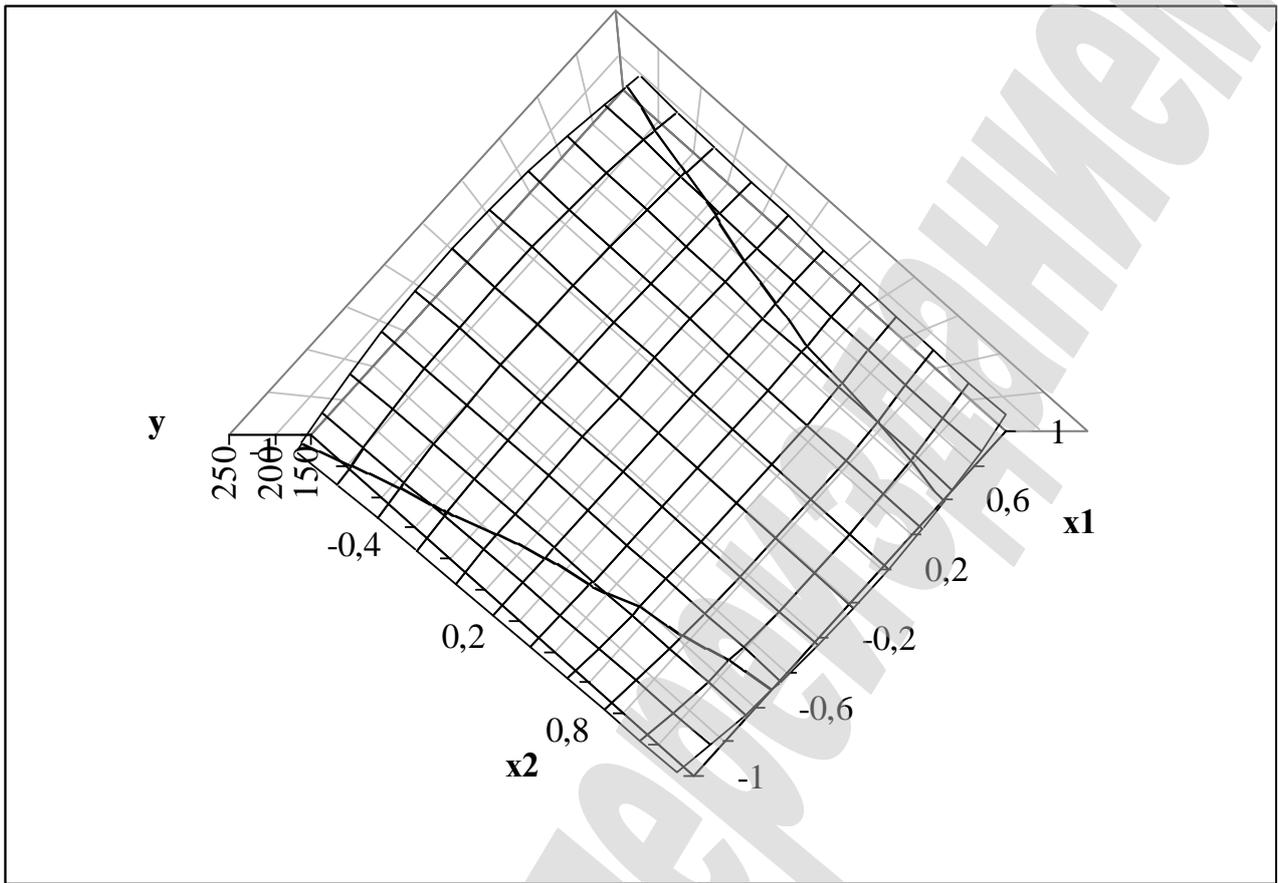


Рис. 4. Поверхность отклика $HB=HB(C, C_{экв})$, вид сверху, (входные переменные заданы в нормированном виде)

Для нахождения субоптимальных точек целесообразно воспользоваться гребневым анализом полученной поверхности отклика [17]. Для этого необходимо получить параметрическое описание вида:

$$\begin{cases} x^*(\lambda) = (\lambda I - A)^{-1} a, \\ r(\lambda) = \sqrt{x^{*'} x^*}, \\ y^*(\lambda) = a_0 + 2a' x^* + x^{*'} A x^*, \end{cases} \quad (8)$$

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 (C и $C_{экв}$);

$y^* = a_0 + \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{2\lambda}$ – субоптимальные значения выходной переменной (HB).

На рис. 5–7 представлено графическое решение задачи гребневого анализа полученной поверхности отклика $HV=HV(C, C_{экв})$ (рис. 3), аналитически описываемого уравнением регрессии вида (1).

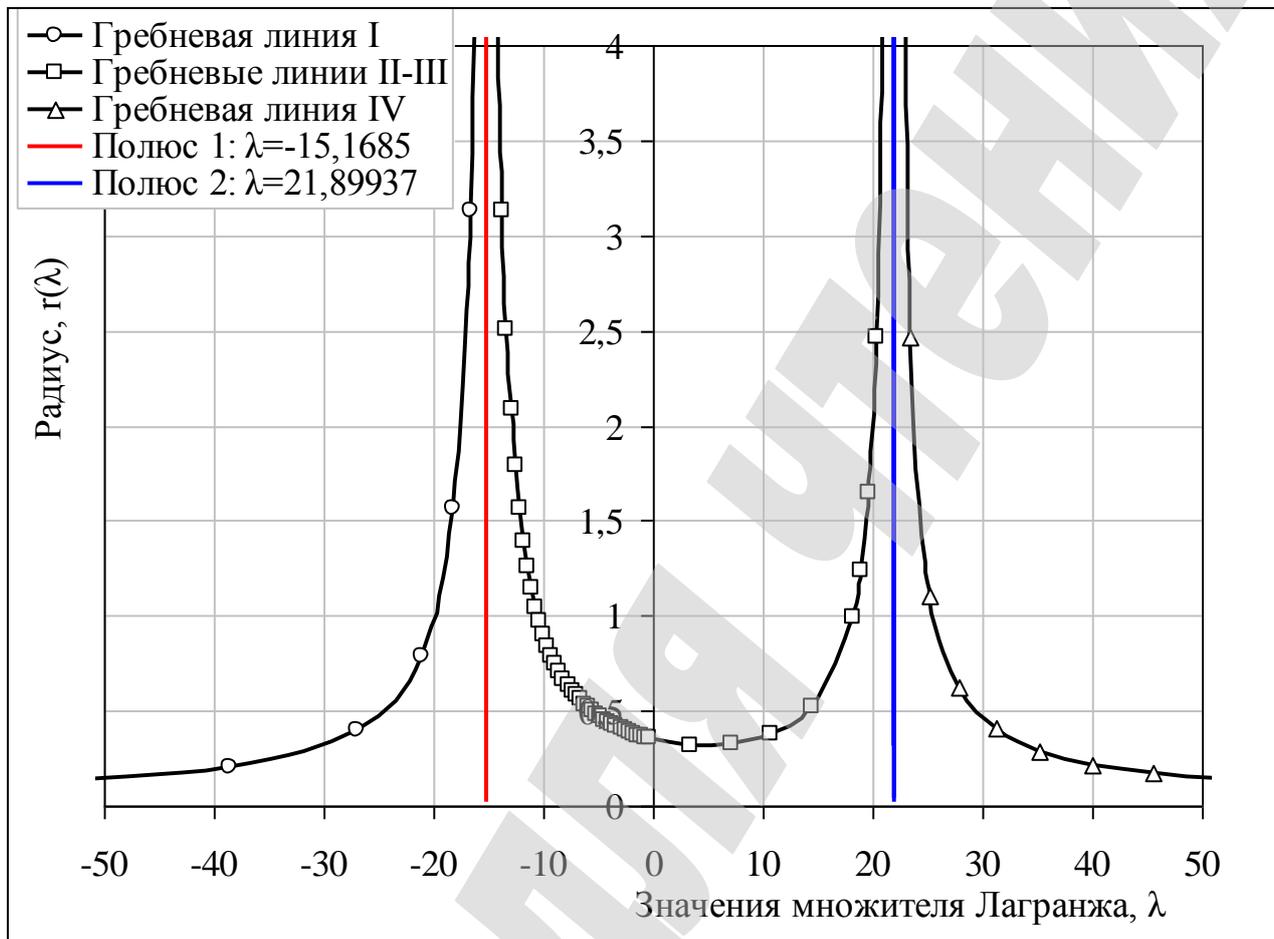


Рис. 5. Зависимость $r=r(\lambda)$

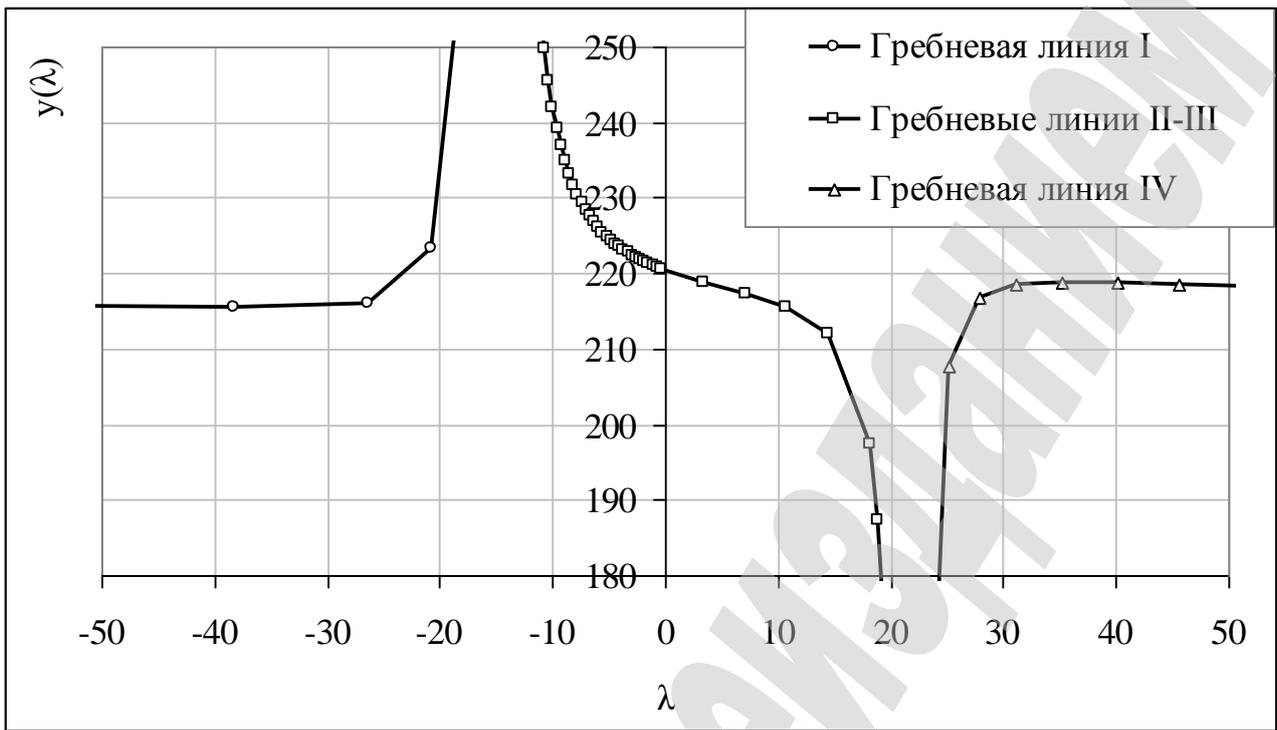


Рис. 6. Зависимость $y=y(\lambda)$

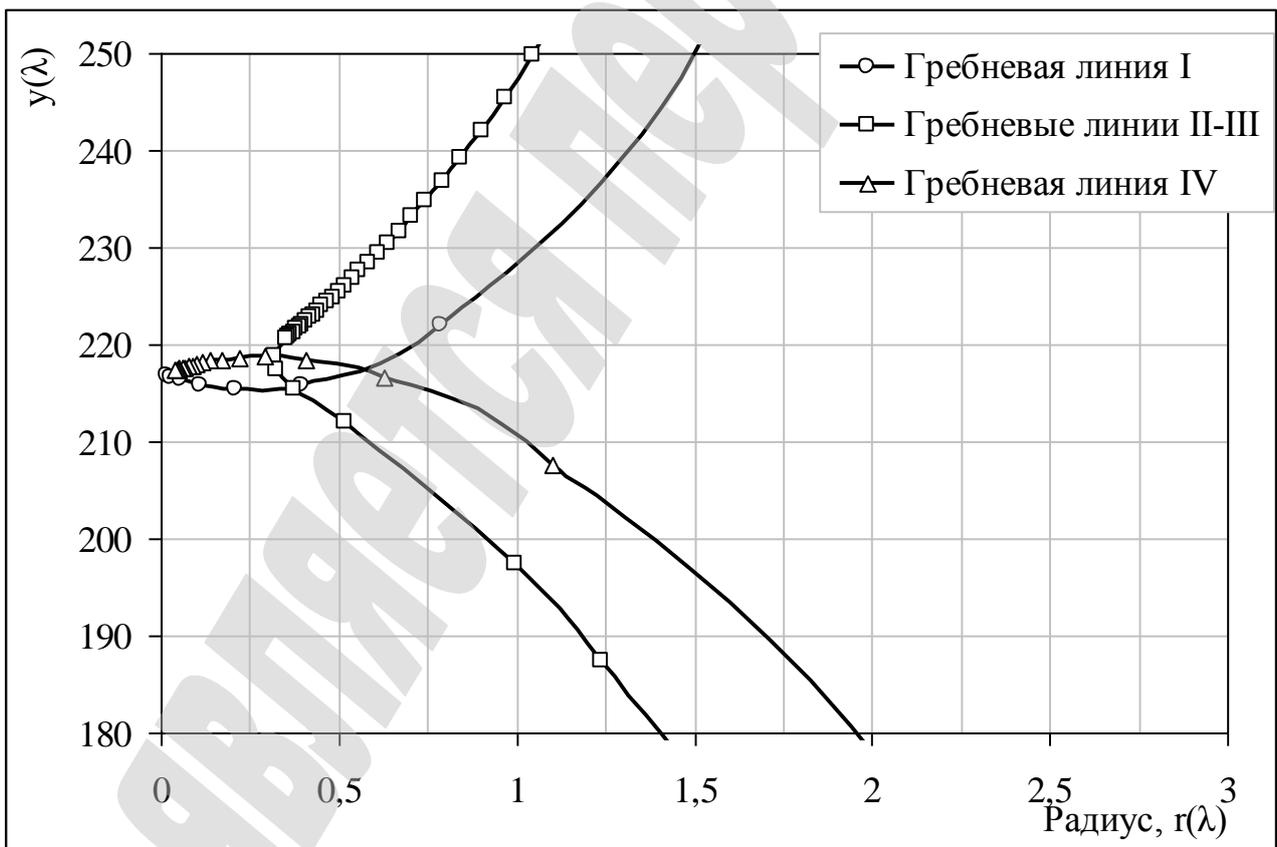


Рис. 7. Зависимость $y=y(r)$

Если в качестве накладываемого ограничения выбрать диапазон области планирования $C=(3,42-3,57)\%$ и $C_{э\text{кв}}=(4,2-4,4)\%$ (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 $r=1,414$. При этом задачи минимизации твердости не ставятся и диапазон $HB=180-250$ удовлетворяет требованиям к качеству, заданным условиями производства. Если же приоритетом является минимизация твердости, то субоптимальное решение находится как точка пересечения ограничения $r=1,414$ и нижней ветви гребневой линии II–III. Следовательно, полученные итоговые результаты в виде рис. 7 позволяют сделать ряд важных с практической точки зрения выводов, касающихся удовлетворению разным требованиям к твердости. 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 (8). Для случая, когда требования $HB=180-250$ являются достаточными, такие решения приведены на рис. 8.

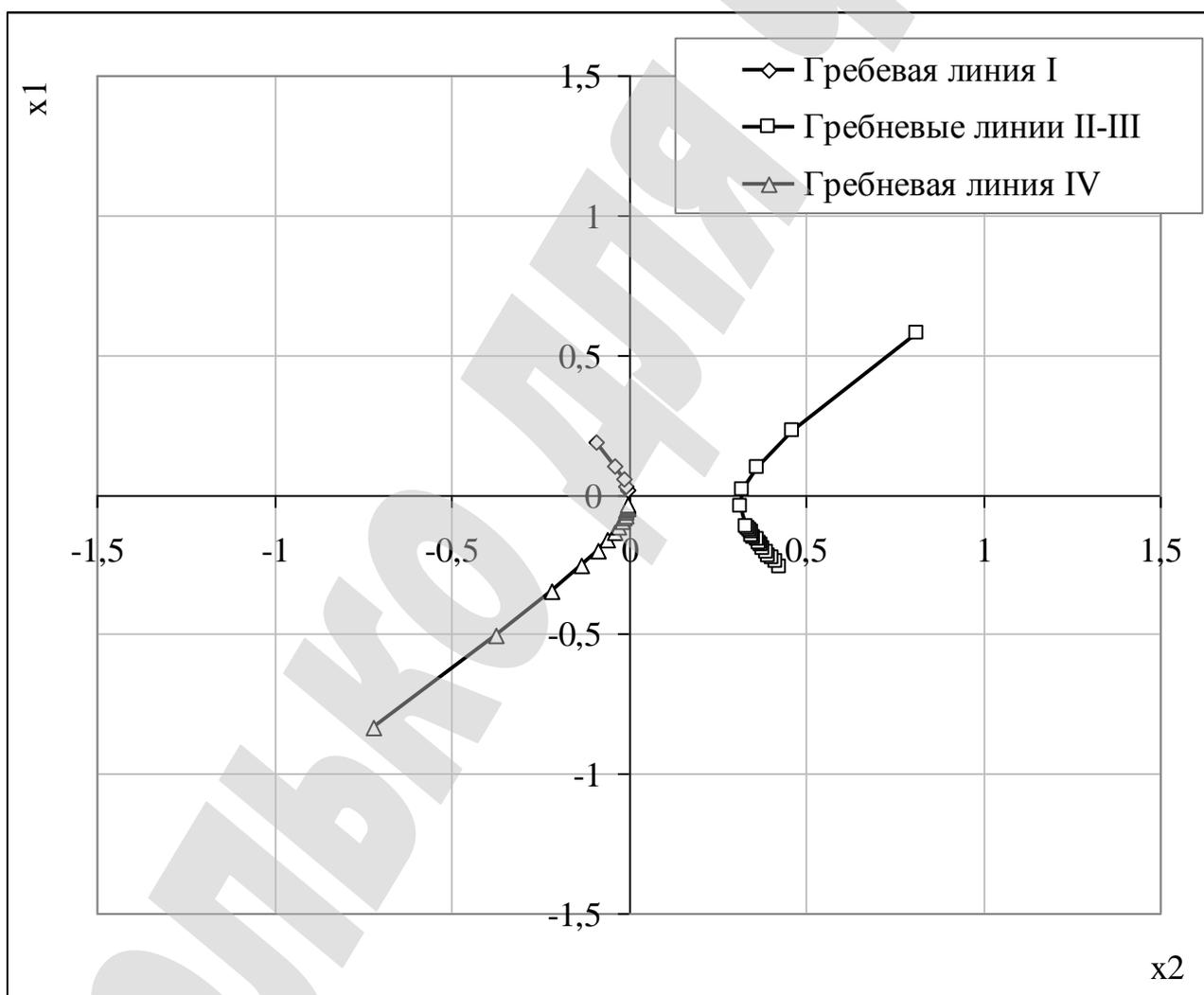


Рис. 8. Множество субоптимальных решений по определению значений входных переменных, удовлетворяющих требованиям $HB=180-250$ (входные переменные заданы в нормированном виде)

С практической точки зрения представляет особый интерес преобразование полученных решений в нормированном виде к натуральному виду – полученное таким образом описание представляет собой номограмму. Номограмма, как известно, является удобным инструментом в руках технолога [18–20], и позволяет выбирать рациональные режимы технологического процесса. На рис. 9 приведена такая номограмма для исследованной области значений входных переменных.

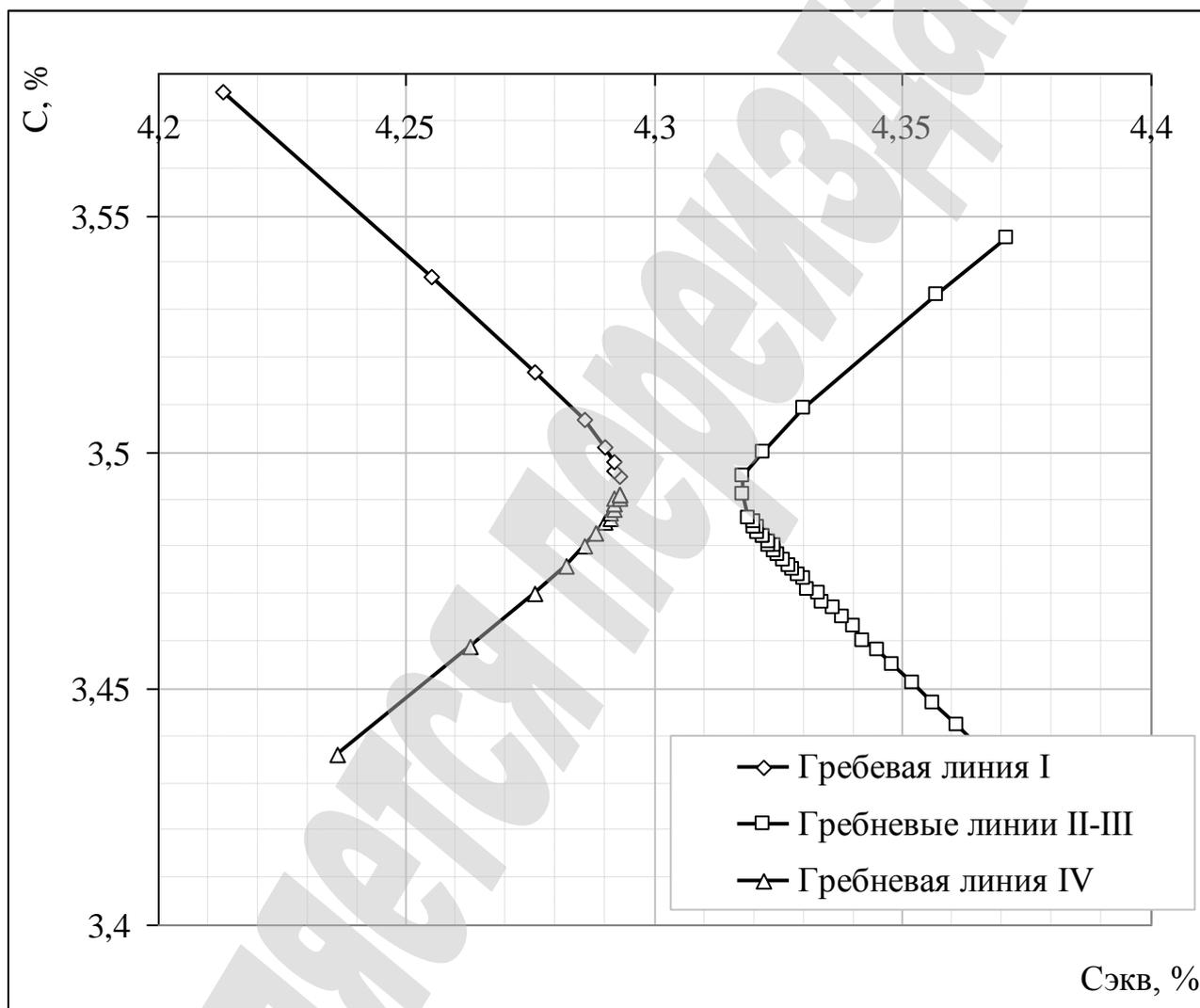


Рис. 8. Номограмма, описывающая множество субоптимальных решений для исследованной области значений входных переменных, удовлетворяющих требованиям $NB=180-250$

Как следует из приведенного описания, для выбора необходимой величины корректировки содержания углерода или углеродного эквивалента, можно оценить расстояние между точкой факторного пространства, соответствующей фактическим значениям C и $S_{экв}$, 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 $C_{экв}$) до соответствующей кривой будет минимальным.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Среди сильных сторон данного исследования необходимо отметить возможность использования полученного уравнения регрессии для решения двух ключевых задач:

- прогнозирования твердости по фактическому химическому составу, получаемую по ходу плавки;
- выбора состава, обеспечивающего заданный уровень твердости. В первом случае становится возможным уменьшить количество лабораторных испытаний твердости, уменьшив соответствующие затраты. Во втором случае открывается перспектива минимизации затрат на шихту, т.е. снижение себестоимости 1 тонны годного литья. Следует отметить также принципиальную возможность косвенной оценки появления нежелательных в микроструктуре карбидов, в частности цементита. Это может способствовать выбору более рациональных решений относительно технологических режимов внепечной обработки. Наконец, целенаправленный выбор химического состава, обеспечивающий минимальные, но приемлемые с точки зрения прочности, значения твердости конструкционного чугуна должен способствовать повышению показателей надежности режущего инструмента.

Weaknesses. Слабые стороны данного исследования связаны с тем, что уравнение регрессии строилась на основе произвольной области планирования эксперимента. Это значит, что полученные оценки коэффициентов далеки от оптимальных и существует принципиальная возможность повышения точности. Это возможно, например, за счет оптимизации плана эксперимента. Однако такое стремление к повышению качества потребует необходимости дополнительных плавок, что связано со значительными дополнительными затратами.

Opportunities. Дополнительные возможности при использовании приведенных результатов в промышленных условиях связаны с оптимизацией химического состава чугуна или оптимизацией состава шихты. В последнем случае исходными данными могут быть полученные субоптимальные решения. Дополнительные возможности открываются также в процессе внепечной обработки – благодаря использованию полученных номограмм задача рационального выбора корректирующих присадок упрощается. При этом существует принципиальная возможность минимизировать затраты именно за счет наиболее приемлемого варианта выбора.

Threats. Очевидные риски при использовании полученных результатов связаны с тем, что потребители литья предпочитают приобретать отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом или высококачественного серого чугуна с вермикулярным графитом. Это 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 нежесткими, типовыми, нет необходимости тратить лишние средства в погоне за повышением механических свойств. И если затраты производителя являются для него одним из критериев минимизации, то потребителя они не интересуют. С точки зрения использования полученных решений в производстве, существует риск управленческого характера –

изменение состава шихты требует пересмотра норм расхода, а, возможно, и поставщиков шихтовых материалов. Это, в свою очередь, требует наличия прогрессивного менеджмента и особенно соответствующего уровня ТОП-менеджеров производства.

8. Выводы

1. Показано, что для получения работоспособного аналитического описания влияния углерода (C) и углеродного эквивалента ($C_{экв}$) на величину твердости может быть использовано полиномиальное уравнение регрессии. Полученные решения при построении уравнения регрессии вида $HB=HB(C, C_{экв})$ относятся к области диапазонов значений входных переменных $C=(3,42-3,57)\%$ и $C_{экв}=(4,2-4,4)\%$. Такая структура уравнения и полученные методом наименьших квадратов соответствующие оценки коэффициентов обеспечивают высокую точность прогноза. Даже на малой выборке данных такая точность составила 92 %.

2. На основе канонического преобразования полученной поверхности отклика выявлено наличие седловой точки, которая, однако, не является столь выраженной, как для поверхности отклика, описывающей в таком же диапазоне значений входных переменных величину предела прочности на растяжение. Гребневой анализ описанной поверхности отклика показал, что существует принципиальная возможность удовлетворения разным требованиям к твердости. Так, если в качестве накладываемого ограничения выбрать диапазон области планирования $C=(3,42-3,57)\%$ и $C_{экв}=(4,2-4,4)\%$, то возможно существование нескольких субоптимальных решений. Это происходит в том случае, если задача минимизации твердости не ставится и диапазон $HB=180-250$ удовлетворяет требованиям к качеству, заданным условиями производства. Если же приоритетом является минимизация твердости, то субоптимальное решение одно. Таким образом, имеет место множество субоптимальных решений, в зависимости от требований производства. Показано, что такие решения, по сути, представляют собой номограмму, позволяющую выбирать рациональным образом технологические режимы внепечной обработки в части, касающейся корректировки химического состава сплава.

Литература

1. Lysenko T. V., Stanovskii A. L. Adaptivnoe avtomatizirovannoe sinhroniziruiushchee proektirovanie sistemy «otlivka-peschanaia forma» NTI // Zbirnyk naukovykh prats Odeskoi natsionalnoi morskoi akademii. 2008. Vol. 13. P. 82–88.
2. Hrychikov V. E., Koteshev N. P. Vliianie kombinirovannoi kokil'no-peschanoi liteinoi formy na zatverdevanie i formirovanie makrostruktury v krupnih otlivkah iz vysokoprochnogo chuguna // Liteinoe proizvodstvo. 1994. No. 12. P. 12.
3. Povyshenie germetichnosti otlivok iz serogo chuguna / Ivanova L. A. et al. // Puti povysheniia kachestva i ekonomichnosti liteinykh protsessov. Odessa, 1995. P. 11–13.
4. Demin, D. Strength analysis of lamellar graphite cast iron in the «carbon (C) – carbon equivalent (C_{eq})» factor space in the range of $C=(3.425-3.563)\%$ and $C_{eq}=(4.214-4.372)\%$ // Technology audit and production reserves. 2017. Vol. 1, No. 1 (33). P. 24–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.93178>
5. Endo M., Yanase K. Effects of small defects, matrix structures and loading conditions on the fatigue strength of ductile cast irons // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2014. Vol. 69. P. 34–43. doi: <http://doi.org/10.1016/j.tafmec.2013.12.005>

6. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete / Cheng Y. et al. // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 118. P. 164–170. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.020>
7. Effect of in-mould inoculant composition on microstructure and fatigue behaviour of heavy section ductile iron castings / Borsato T. et al. // *Procedia Structural Integrity*. 2016. Vol. 2. P. 3150–3157. doi: <http://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.393>
8. Fourlakidis V., Dioszegi A. A generic model to predict the ultimate tensile strength in pearlitic lamellar graphite iron // *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 618. P. 161–167. doi: <http://doi.org/10.1016/j.msea.2014.08.061>
9. Manasbekov N. M. Vliianiia sodержaniia sery na svoistva sinteticheskogo chuguna // *Molodiozh' i nauka: Sbornik materialov VIII Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodyh uchionyh, posviashchennoi 155-letiiu so dnia rozhdeniia K. E. Tsiolkovskogo*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2012. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section37.html>
10. Chemical Compositions, Microstructure and Mechanical Properties of Roll Core used Ductile Iron in Centrifugal Casting Composite Rolls / Bai Y. et al. // *Journal of Materials Science & Technology*. 2012. Vol. 28, No. 9. P. 853–858. doi: [http://doi.org/10.1016/s1005-0302\(12\)60142-x](http://doi.org/10.1016/s1005-0302(12)60142-x)
11. Hrychikov V. E. K voprosu obrazovaniia sharovidnogo grafita pri modifitsirovani chuguna magniem // *Liteinoe proizvodstvo*. 1997. No. 2. P. 5–7.
12. Elkem ASA Research. Modifikator Superseed®Extra Inoculant // ITB «Litio Ukrainy». 2003. No. 12 (40).
13. Elkem ASA Research. Modifikator Reseed®Inoculant // ITB «Litio Ukrainy». 2004. No. 7 (47).
14. Elkem ASA Research. Modifikator SMZ®Inoculant // ITB «Litio Ukrainy». 2004. No. 5 (45).
15. Bondarchuk A. A., Matveev M. G., Polianskii Yu. A. Modeli upravleniia tverdost'iu metalla v usloviiah stohasticheskoi i nechetkoi neopredelennosti // *Sistemy upravleniia i informatsionnye tehnologii*. 2007. No. 4.1. P. 124–128.
16. Bondarchuk A. A., Matveev M. G. Modeli vybora sostava v sisteme «sostav-svoistvo» // *Materialy XX mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Matematicheskie metody v tehnike i tehnologiiiah»*. Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University, 2007. Vol. 2. P. 139–140.
17. Demin D. Synthesis of optimal control of technological processes based on a multialternative parametric description of the final state // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3, No. 4 (87). P. 51–63. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.105294>
18. Demin D. A., Pelikh V. F., Ponomarenko O. I. Optimization of the method of adjustment of chemical composition of flake graphite iron // *Litejnoe Proizvodstvo*. 1995. No. 7–8. P. 42–43.
19. Demin D. A., Pelikh V. F., Ponomarenko O. I. Complex alloying of grey cast iron // *Litejnoe Proizvodstvo*. 1998. No. 10. P. 18–19.
20. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding / Mohanad M. K. et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2, No. 5 (80). P. 45–49. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65454>