

The results of statistic analysis on estimation of influence of technological factors of the rolled wire production on defect of type «rolled blister» are presented. It is determined that on intensity of defect of type «rolled blister», formed in the rolled wire, carbon concentration and $Sekv/C$ correlation influence to the utmost.

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, В. В. ПИВЦАЕВ, РУП «БМЗ»,
О. А. САЧЕК, А. А. ЧИЧКО, В. А. ГАНЖА, БНТУ

УДК 669.27:519

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ФАКТОРАМИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ И ДЕФЕКТАМИ КАТАНКИ

Известно, что методы статистического анализа являются мощнейшим инструментом при анализе взаимосвязей между факторами технологического процесса и характеристиками качества получаемой продукции [1, 2]. Однако применение этих методов для конкретного технологического процесса может вызывать определенные трудности, связанные с постановкой задач, а также анализом полученных результатов.

Известно, что дефект типа «раскатанный пузырь» является одной из причин ухудшения качества катанки в металлургическом производстве РУП «БМЗ». Однако до сих пор нет однозначного ответа на вопрос: какие факторы химического состава и технологии оказывают решающее влияние на образование в катанке дефекта «раскатанный пузырь»? Основной трудностью исследования взаимосвязей между параметрами дефекта «раскатанный пузырь» и характеристиками химического состава и технологии является то, что данные промышленных испытаний трудно «фильтровать», исключая при этом «случайные наблюдения». Следует отметить, что при изучении корреляционных связей данные обрабатываемой выборки желательно «фильтровать», но не обязательно, так как это можно делать по результатам статистического анализа, который «визуализирует» аномальные отклонения по выходной характеристике статистической модели.

Цель настоящей работы – статистическое моделирование взаимосвязей между характеристиками химического состава сталей и глубиной дефекта «раскатанный пузырь», который образуется в катанке радиусом 5,5 и 6,5 мм.

На рис. 1 показана модель черного ящика статистической модели, которая была использована в данной работе. В качестве выходной характеристики модели использовали глубину h дефек-

та «раскатанный пузырь», формирующегося в процессе технологической цепочки РУП «БМЗ» в катанке радиусом 5,5 и 6,5 мм. В качестве независимых факторов использовали основные и дополнительные характеристики химического состава, приведенные в табл. 1. При исследовании корреляционных взаимосвязей в настоящей работе использовали характеристики химического состава низкокремнистых сталей марок Ст1пс, Ст1сп, Ст3сп.

Задача исследования взаимосвязей между факторами химического состава и глубиной раскатанного пузыря заключалась в построении на основе исходных данных промышленных испытаний линейной регрессионной модели типа: $Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_k X_k$, где $B_0, B_1, B_2, \dots, B_k$ – коэффициенты регрессионной модели; Y – значение глубины дефекта «раскатанный пузырь»; X_i – значение i -фактора химического состава. Обработку данных производили с помощью статистического пакета STATISTICA 6.0 и Microsoft

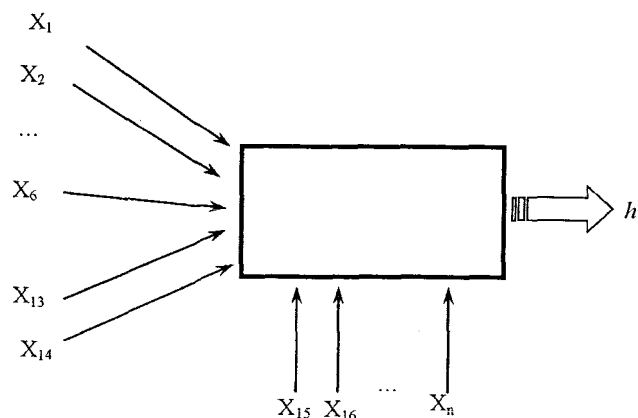


Рис. 1. Модель черного ящика, использованная в исследовании: $X_1 - X_{14}$ – основные и дополнительные факторы химического состава; $X_{15} - X_n$ – неконтролируемые факторы технологии; h – глубина дефекта «раскатанный пузырь»

Таблица 1. Основные и дополнительные факторы химического состава технологического процесса

	Обозначение и описание фактора
Основные факторы	C – содержание углерода, %
	Mn – содержание марганца, %
	Si – содержание углерода, %
	Al – содержание алюминия, %
	Ca – содержание кальция, %
	C _{экв} – содержание эквивалентного углерода, %, вычисляемое по формуле: C _{экв} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15, где C, Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu – массовые содержания соответствующих элементов в металле, %
Дополнительные факторы	a[O] – равновесная активнос ть кислорода, вычисляемая по формуле : $a[O] = e^{\frac{(1,343 - \lg C_{\text{экв}}) \cdot \ln 10}{0,9169}}$
	Mn/Si
	1/Mn
	1/√Si
	1/2/√Al
	CC _{экв}
	C _{экв} /C
	Ca/Al

Excel. Оценку полученных регрессионных моделей осуществляли в несколько этапов в зависимости от задачи по статистическим критериям [2].

Для оценки степени взаимосвязи между множеством величины глубины дефекта «раскатанный пузырь» и характеристиками химического состава определяли коэффициенты корреляции R и детерминации – R². Величина коэффициента детерминации показывает, какая часть вариации зависимой переменной обусловлена вариацией независимых переменных, т.е. сколько процентов точек описывается уравнением регрессии (0 ≤ R² ≤ 1). Для оценки значения коэффициента R использовали шкалу Чеддока: 1 – слабая линейная связь (R=0,1–0,3); 2 – умеренная линейная связь (R=0,3–0,5); 3 – средняя линейная связь (R=0,5–0,7); 4 – высокая линейная связь (R=0,7–0,9); 5 – весьма высокая линейная связь (R=0,9–0,99).

Для оценки адекватности регрессионной модели использовали критерий Фишера (F), вычисляемый по формуле:

$F = \frac{\sigma_0^2}{\sigma^2}$, где σ – общая дисперсия, показывающая степень влияния основных и остаточных факторов:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}$$

где Y_i – значение зависимого параметра, \bar{Y} – среднее значение по всем наблюдениям зависимого параметра; n – число наблюдений; σ₀ – остаточная дисперсия, показывающая степень влияния остаточных факторов:

$$\sigma_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - (k + 1)}$$

где k – число независимых переменных; \hat{Y}_i – значение зависимого параметра, полученное с помощью регрессионной модели.

Для определения статистической значимости найденных коэффициентов регрессионной модели использовали:

• значения t-статистики для каждого коэффициента B_i, которые вычисляли по формулам:

$$t_{B_i} = \frac{B_i}{S_{B_i}}$$

где S_{B_i} – стандартная ошибка коэффициента B_i:

$$S_{B_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(n - k - 1) \sum (X_i - \bar{X})^2}}$$

t_{кр} – критическая точка распределения Стьюдента; t_{кр} = t(α, n - k - 1), α = 0,05 – уровень значимости.

Если |t_{B_i}| > t_{кр}, то коэффициент B_i считался статистически значимым.

Если |t_{B_i}| ≤ t_{кр}, то коэффициент B_i считался статистически незначимым. Это означает, что фактор X_i линейно не связан с зависимой переменной Y.

Для исследования взаимосвязей между параметрами технологии и величиной «раскатанного пузыря» применяли следующую алгоритмическую схему регрессионного анализа (рис. 2).

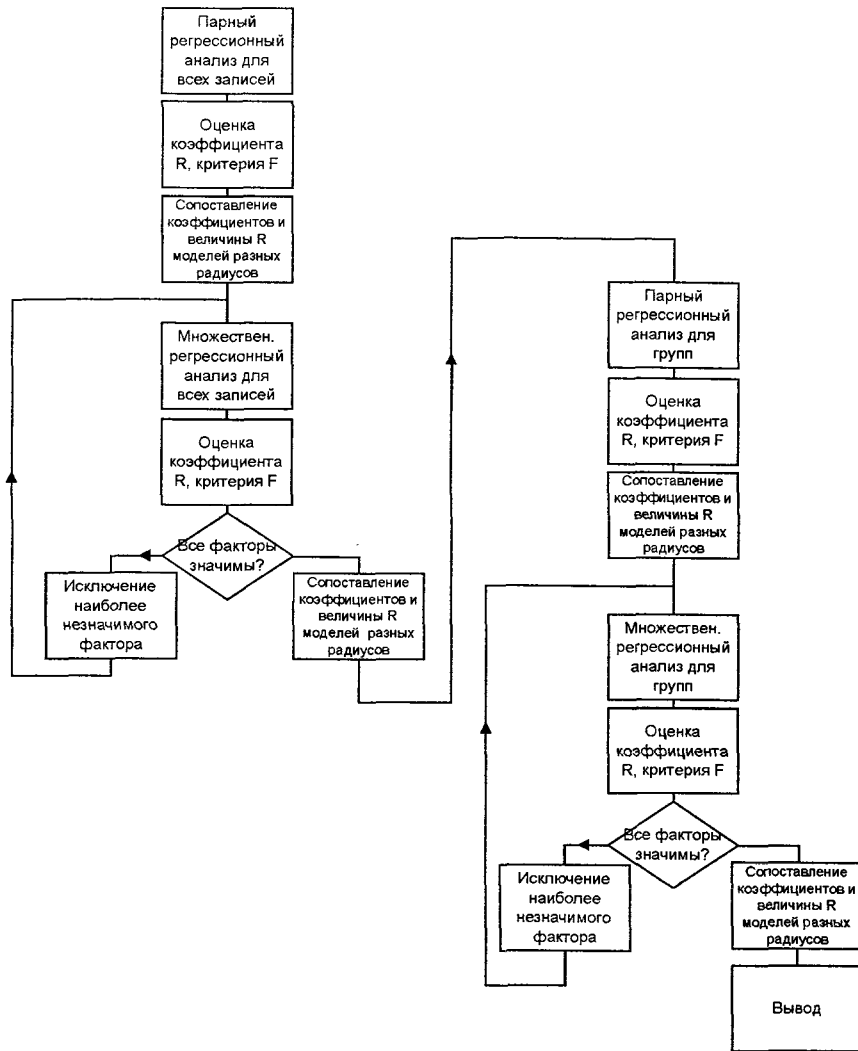


Рис. 2. Алгоритмическая схема применения регрессионного анализа для статистической обработки данных

Блок 1. Парный регрессионный анализ между независимыми параметрами и зависимым параметром – получение одномерных зависимостей (построение модели $Y=B_0+B_1X$). Оценивая значение коэффициента R , делали вывод о степени линейной связи для каждого независимого параметра. Оценивая значение критерия Фишера, делали вывод об адекватности полученных регрессионных моделей. Путем сопоставления коэффициентов моделей, знака и величины R для катунок различных радиусов делали вывод об универсальности полученных моделей.

Блок 2. Множественный регрессионный анализ для всех исходных данных таблицы – получение многомерных зависимостей (построение модели $Y=B_0+B_1X_1+...+B_kX_k$, где k – число значимых факторов). Параметр, у которого минимальное значение t -статистики ($\leq t_{кр}$) и максимальное P -значение ($\geq 0,05$) исключали из анализа, затем снова проводили анализ множественной регрессии. Если коэффициент корреляции R не изменялся или изменялся незначительно и нормированный коэффициент R^2 увеличился или остался преж-

ним, значит, исключенный параметр был незначимым. Аналогично блоку 1 производили оценку R , F для различных радиусов катушки.

Блок 3. Разбиение выборки на группы по определенному критерию с последующим проведением:

а) парного регрессионного анализа для каждой группы аналогично блоку 1;

б) множественного регрессионного анализа для каждой группы аналогично блоку 2.

При формировании выборки для статистической обработки данных использовали данные РУП «БМЗ» по химическому составу и дефектам сталей объемом 500 наблюдений (катушка радиусом 6,5 мм) и 364 наблюдения (катушка радиусом 5,5 мм). В результате первичного расчетного анализа было установлено, что максимальные абсолютные значения коэффициента корреляции между глубиной раскатанного пузыря и факторами химического состава составляют $R=0,314$ для катушки радиусом 6,5 мм (факторы 8 и 10) и $R=0,461$ для катушки радиусом 5,5 мм (фактор 10). В этом случае корреляционная связь между рассматриваемыми факторами химического состава и величиной дефекта «раскатанный пузырь» не является ярко выраженной. В то же время из рис. 3 видно, что чем больше кремния в стали, тем меньше глубина раскатанного пузыря. Чем выше величина дополнительных факторов Mn/Si, 1/Mn, тем больше глубина раскатанного пузыря.

На следующем этапе была поставлена задача провести сортировку исходной выборки, чтобы детально оценить корреляцию между глубиной дефекта «раскатанный пузырь» и факторами химического состава. Для дальнейшего проведения исследований исходная выборка из 500 наблюдений разбивалась на пять групп (табл. 2), что обеспечивало более узкий интервал по химическому составу, т.е. предполагалось, что в условиях одной выборки колебания химического состава являлись минимальными. В качестве критерия сортировки использовали величину $h_{CC}=hCC$, где h – глубина дефекта «раскатанный пузырь»; C – концентрация углерода. Характеристики сформированных выборок приведены в табл. 2.

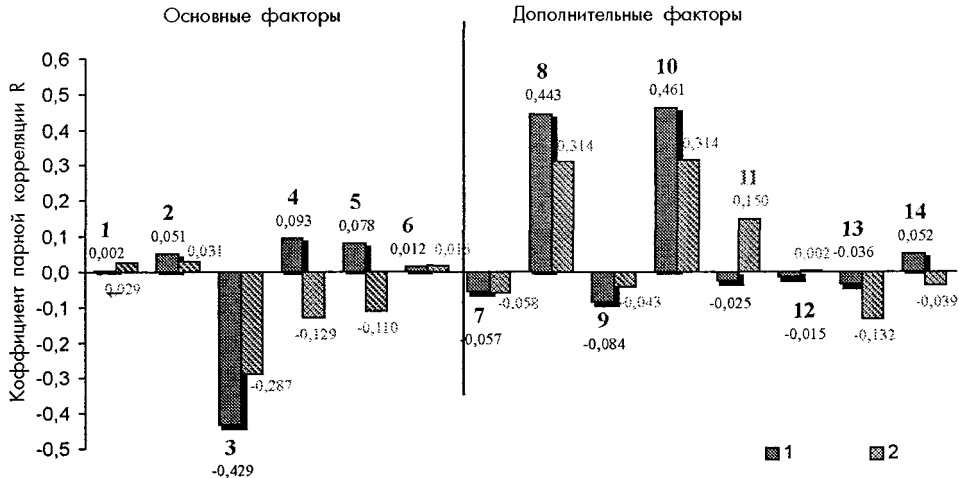


Рис. 3. Гистограмма распределения величин корреляций R независимых факторов для парной регрессии: 1 – для катанки радиусом 5,5 мм; 2 – для катанки радиусом 6,5 мм

Таблица 2. Характеристики выборок данных, участвующих в исследовании

Номер выборки	Радиус катанки, мм	Интервал значений h_{cc} , мм·% ³	Объем выборки
1	5,5	0,000817 – 0,002	15
	6,5	0,0008 – 0,0027	32
2	5,5	0,0004 – 0,00078	26
	6,5	0,000397 – 0,0008	67
3	5,5	0,00021 – 0,000387	41
	6,5	0,000208 – 0,000397	101
4	5,5	0,0001127 – 0,000206	58
	6,5	0,0001125 – 0,000208	101
5	5,5	0,0000509 – 0,000112	78
	6,5	0,000051 – 0,0001125	71

Для каждой выборки были вычислены коэффициенты парной корреляции между факторами химического состава и глубиной дефекта «раскатанный пузырь» (табл. 3, 4). Подобное разбиение позволило добиться намного более высоких значений коэффициента корреляции. Как видно из таблиц, для каждой из выборок (кроме 5-й) наблюдается

высокая линейная связь между глубиной дефекта «раскатанный пузырь» и факторами химического состава C , $C_{экр}/C$. Для данных по обоим радиусам катанки (5,5 и 6,5 мм) характеры взаимосвязи для всех групп совпадают. В частности, параметр $C_{экр}/C$ характеризуется прямой, а параметр C – обратной связью с исследуемой величиной h .

Таблица 3. Наиболее информативные параметры по пяти выборкам для катанки радиусом 5,5 мм

Характеристика технологии	Значения коэффициента корреляции R по выборкам				
	выборка 1	выборка 2	выборка 3	выборка 4	выборка 5
$C_{экр}/C$	0,883	0,920	0,833	0,854	0,665
$a[O]$	0,865	0,824	0,868	-0,729	-0,655
C	-0,830	-0,879	-0,818	-	-
$C_{экр}$	-0,821	-0,819	-0,816	-	-
$CC_{экр}$	-0,802	-0,850	-0,783	-	-
$1/\sqrt{Si}$	0,756	0,823	-	-	-
Si	-0,750	-0,829	-	-	-
$1/Mn$	0,736	-	0,741	-	-
Mn	-0,701	-	-0,752	-	-
Mn/Si	-	0,748	-	-	-

Таблица 4. Наиболее информативные параметры по пяти выборкам для катанки радиусом 6,5 мм

Характеристика технологии	Значения коэффициента корреляции R по выборкам				
	выборка 1	выборка 2	выборка 3	выборка 4	выборка 5
$C_{экр}/C$	0,918	0,734	0,783	0,627	0,738
$a[O]$	0,864	0,790	0,764	0,715	–
C	–0,878	–0,767	–0,741	–0,752	–0,775
$C_{экр}$	–0,850	–0,763	–0,721	–0,706	–0,739
$CC_{экр}$	–0,855	–0,744	0,695	–0,747	–
$1/\sqrt{Si}$	0,827	–	–	–	–
Si	–0,839	–	–	–	–
1/Mn	–0,734	–	–	–	–
Mn	0,718	–	–	–	–
Mn/Si	0,785	–	–	–	–

Таким образом, из представленных данных видно, что наиболее значимыми параметрами являются:

для 1-й выборки: $C_{экр}/C$, $a[O]$, C , $C_{экр}$, $CC_{экр}$, $1/\sqrt{Si}$, Si, 1/Mn, Mn;

для 2-й выборки: $C_{экр}/C$, $a[O]$, C , $C_{экр}$, $CC_{экр}$;

для 3-й выборки: $C_{экр}/C$, $a[O]$, C , $C_{экр}$, $CC_{экр}$;

для 4-й выборки: $C_{экр}/C$, $a[O]$;

для 5-й выборки: $C_{экр}/C$.

При этом можно заметить, что при высоких значениях h_{CC} наиболее значимыми параметрами являются $a[O]$ и $C_{экр}/C$, а при уменьшении наблюдается повышение значимости содержания углерода. По всей видимости, это связано с тем, что при более высоких концентрациях углерода данный элемент находится в металле в избытке

по отношению к кислороду, при этом количество выделившегося CO, от которого зависит формирование подобных дефектов, будет пропорционально активности кислорода. Влияние $C_{экр}/C$ на величину дефекта «раскатанный пузырь» может быть связано с влиянием изменения физических свойств металла на выделение CO при повышении содержания марганца и других легирующих элементов. При низких же значениях концентрации углерода он будет находиться в дефиците по отношению к равновесному кислороду и поэтому будет в большей степени определять формирование пузырей.

В табл. 5, 6 приведены одно- и двумерные зависимости, описывающие взаимосвязь между глубиной дефекта «раскатанный пузырь» и выделенными характеристиками химического состава сталей.

Таблица 5. Одномерные регрессионные уравнения для глубины дефекта «раскатанный пузырь»

Регрессионное уравнение	Номер выборки	R	F
Для катанки радиусом 5,5 мм			
$h = -0,247 + 0,166(C_{экр}/C)$	1	0,883	0,237
$h = 0,224 - 1,041C$		–0,830	0,336
$h = -0,147 + 0,095(C_{экр}/C)$	2	0,920	0,161
$h = 0,147 - 0,754C$		–0,879	0,237
$h = -0,077 + 0,051(C_{экр}/C)$	3	0,833	0,314
$h = 0,087 - 0,446C$		–0,818	0,339
$h = -0,066 + 0,038(C_{экр}/C)$	4	0,854	0,275
$h = 0,071 - 0,514C$		–0,729	0,476
$h = -0,023 + 0,015(C_{экр}/C)$	5	0,665	0,566
$h = 0,047 - 0,432C$		–0,655	0,578
Для катанки радиусом 6,5 мм			
$h = -0,318 + 0,198(C_{экр}/C)$	1	0,918	0,163
$h = 0,220 - 0,938C$		–0,878	0,237
$h = -0,120 + 0,084(C_{экр}/C)$	2	0,734	0,468
$h = 0,137 - 0,669C$		–0,767	0,417
$h = -0,089 + 0,056(C_{экр}/C)$	3	0,783	0,390
$h = 0,087 - 0,463C$		–0,741	0,456
$h = -0,043 + 0,028(C_{экр}/C)$	4	0,627	0,612
$h = 0,078 - 0,653C$		–0,752	0,439
$h = -0,050 + 0,026(C_{экр}/C)$	5	0,738	0,462
$h = 0,057 - 0,545C$		–0,775	0,406

Таблица 6. Двумерные регрессионные уравнения для глубины дефекта «раскатанный пузырь»

Регрессионное уравнение	Номер выборки	R	F
Для катанки радиусом 5,5 мм			
$h = -0,145 + 0,077(C_{\text{эжв}}/C) + 0,0003a[O]$	2	0,928	0,151
$h = -0,198 + 0,419C + 0,032(C_{\text{эжв}}/C) + 0,0007a[O]$	3	0,904	0,197
$h = -0,071 + 0,032(C_{\text{эжв}}/C) + 0,0001$	4	0,864	0,263
$h = -0,003 + 0,011(C_{\text{эжв}}/C) - 0,674(CC_{\text{эжв}})$	5	0,690	0,537
Для катанки радиусом 6,5 мм			
$h = -0,108 + 0,033(C_{\text{эжв}}/C) + 0,0006a[O]$	2	0,809	0,356
$h = -0,266 + 0,540C + 0,059(C_{\text{эжв}}/C) + 0,0007a[O]$	3	0,853	0,280
$h = -0,065 + 0,016(C_{\text{эжв}}/C) + 0,0003a[O]$	4	0,775	0,408
$h = -0,006 + 0,014(C_{\text{эжв}}/C) - 1,011(CC_{\text{эжв}})$	5	0,775	0,411

Как видно из таблиц, коэффициенты регрессионных моделей как для катанки радиусом 5,5 мм, так и для катанки радиусом 6,5 мм сопоставимы, а коэффициенты для факторов химического состава C , $C_{\text{эжв}}/C$ уменьшаются по модулю при снижении

значения критерия $h_{\text{СС}}$. На рис. 4, 5 приведены двумерные и трехмерные зависимости исходных и рассчитанных значений глубины дефекта «раскатанный пузырь» от наиболее значимых факторов $C_{\text{эжв}}/C$ и $a[O]$ для второй выборки для катанки радиусами 5,5 и 6,5 мм.

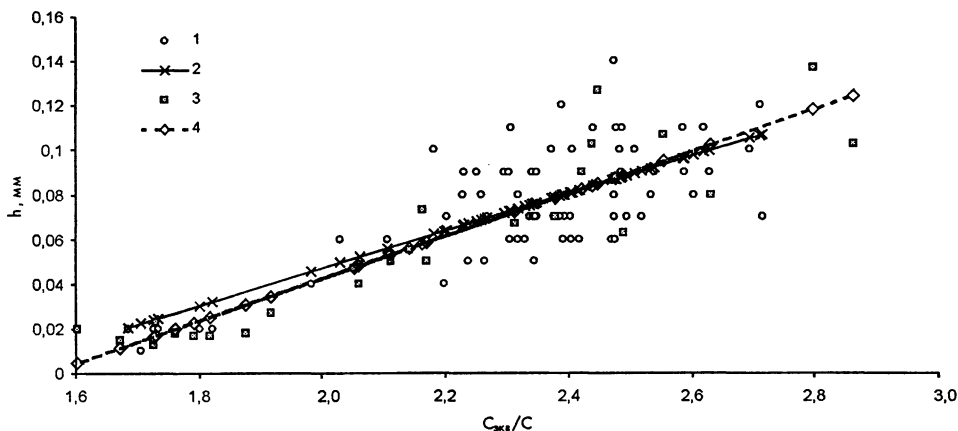


Рис. 4. Зависимость исходных и расчетных значений глубины дефекта «раскатанный пузырь» от $C_{\text{эжв}}/C$ для второй выборки: 1 – экспериментальные значения для катанки радиусом 6,5 мм; 2 – расчетные значения для катанки радиусом 6,5 мм; 3 – экспериментальные значения для катанки радиусом 5,5 мм; 4 – расчетные значения для катанки радиусом 5,5 мм

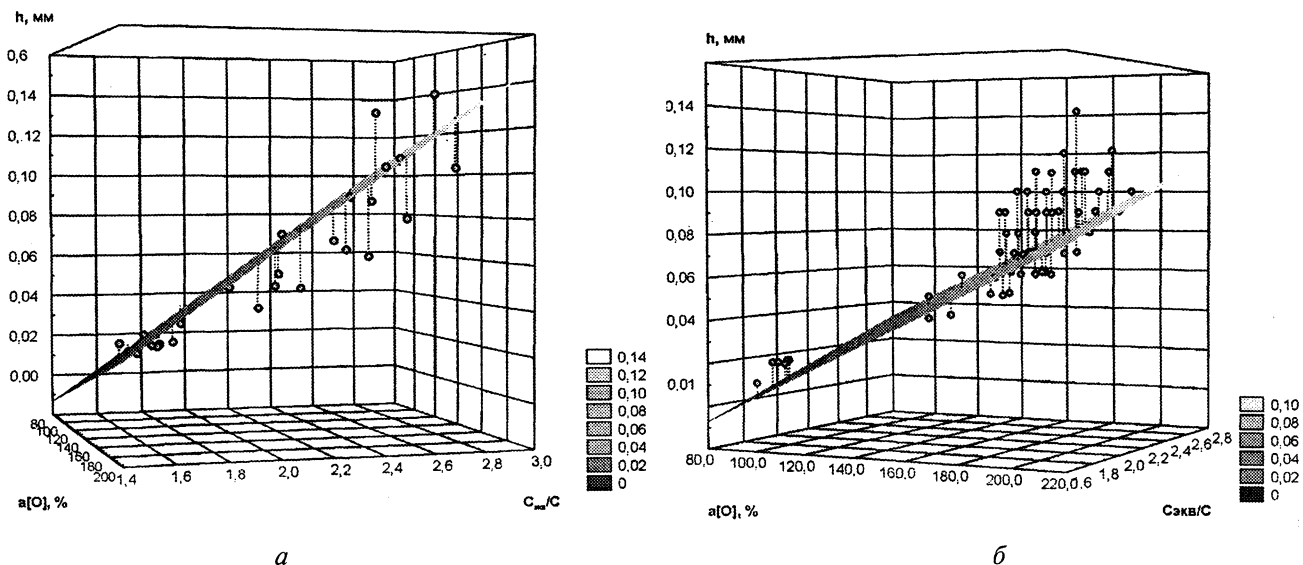


Рис. 5. Трехмерная зависимость экспериментальных и расчетных значений глубины дефекта «раскатанный пузырь» от значений $C_{\text{эжв}}/C$ и $a[O]$ для второй выборки: а – катанка радиусом 5,5 мм; б – катанка радиусом 6,5 мм

Как видно из рисунков, полученные регрессионные модели достаточно хорошо аппроксимируют исходные данные, а прямые и плоскости имеют схожие характеры.

Таким образом, проведенный статистический анализ взаимосвязей между глубиной дефекта «раскатанный пузырь» и факторами химического состава позволил установить, что в области низких значений параметра h_{cc} глубина дефектов в большей степени определяется concentra-

цией углерода, а в области более высоких значений – активностью кислорода и соотношением $C_{экв}/C$.

Литература

1. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Чичко О.И. Статистические методы регулирования качества продукции в литейном производстве (учебное пособие). Мн.: БНТУ, 2006.
2. Чичко А.Н. Математическое моделирование технологических процессов (учебное пособие). Мн.: БГПА, 2001.