

УДК 621.791.042.4

Волков Д. А., Власов А. Ф., Шевцов С. А.

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СВАРКИ ЭЛЕКТРОДАМИ С ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСЬЮ В ПОКРЫТИИ

Сварка является одним из основных технологических процессов современного производства, который используется в подавляющем большинстве отраслей промышленности. В некоторых секторах машиностроения доля работ по сварке доходит до 65–70% от общего времени производства [1, 2]. В последнее время, наряду с повышенным объемом применения механизированных способов сварки, ручная дуговая сварка занимает (из-за своей простоты и универсальности) значительный объем (по трудоемкости) выпускаемой продукции и составляет на некоторых предприятиях до 50% объема сварочных работ [3].

Повышение производительности процессов и изыскание новых видов сырья для их изготовления является одной из главных задач, состоящих перед разработчиками сварочных и наплавочных материалов [3, 4]. Одним из наиболее эффективных методов повышения производительности ручной сварки электродами является введение значительного количества железного порошка в покрытие при одновременном увеличении его толщины. В покрытии может содержаться 5–60% железного порошка, что не всегда положительно влияет как на технологию изготовления, так и на сварочно-технологические свойства данных электродов [4]. Для улучшения сварочно-технологических свойств электродов, положительного влияния на металлургические процессы, происходящие при сварке, на характер проплавления свариваемого металла авторы работ [5–7] предложили использовать эффект экзотермических реакций. В состав используемых материалов покрытий электродов вводится экзотермическая смесь в виде соответствующих окислителей (окалины, гематита, марганцевой руды и др.) и раскислителей (ферротитана, ферросилиция, алюминиевого порошка и др.), при нагреве и плавлении которых протекает экзотермический процесс. Однако, основные параметры режима сварки: сила сварочного тока ( $I_{св}$ ), напряжение холостого хода источника питания ( $U_{х.х.}$ ), коэффициент массы покрытия ( $K_{п}$ ) и отношение содержания в покрытии окислителя и раскислителя ( $\alpha$ ) также существенно влияют на термодинамические характеристики нагрева и плавления электродов с экзотермической смесью в покрытии, что в свою очередь влияет на характер переноса электродного металла, нагрев изделия и глубину проплавления при сварке.

Целью данной работы является определение оптимальных параметров режима ручной дуговой сварки, обеспечивающих получение максимального значения коэффициента наплавки при минимальных потерях электродного металла, а также установление функциональной взаимосвязи между ними с использованием аппарата математической статистики.

Для решения поставленной задачи производили экспериментальное исследование влияния основных параметров режима ручной дуговой сварки: силы сварочного тока ( $I_{св}$ ), напряжения холостого хода источника питания ( $U_{х.х.}$ ), коэффициента массы покрытия ( $K_{п}$ ) и отношения содержаний в покрытии окислителя и раскислителя (в данном случае окалины и алюминиевого порошка) ( $\alpha$ ) на характеристики плавления электродов с экзотермической смесью в покрытии (коэффициент наплавки  $\alpha_{н}$ , коэффициент расплавления электродного стержня  $\alpha_{р.ст.}$ , коэффициент потерь  $\psi$ , коэффициент разбрызгивания электродного металла  $\psi_{р.м.}$ , коэффициент выхода годного  $K_{г}$ ). Исследованию подвергались электроды типа Э-50 с основным типом покрытия, диаметром стержня 5 мм и толщиной покрытия, мм: 1,15...1,25; 1,75...1,85; 2,35...2,45, что соответствовало коэффициенту массы покрытия ( $K_{п}$ ), соответственно – 0,4; 0,7 и 1,0. В качестве связующего использовалось натриевое жидкое стекло с модулем 2,85 и плотностью 1,5 г/см<sup>3</sup> в количестве 20% к массе сухой шихты. Наплавка вали-

ков производилась на пластины из стали Ст3<sub>кп</sub> (размером 14×120×250 мм) на постоянном токе обратной полярности от источника питания ВДУ-506 с балластными реостатами РБ-300. Сила сварочного тока определялась самопишущим амперметром, время плавления электродов фиксировалось секундомером. Пластины до и после наплавки, брызги расплавленного металла взвешивались на электронных весах модели AR 3130 (OHAUS, США) с точностью измерения 0,001 г. Для полного улавливания брызг по краям пластины, на которую производилась наплавка, устанавливались медные отражатели. По результатам средних значений трех-пяти замеров определялись показатели расплавления исследуемых электродов по методике [6, 7].

В связи с тем, что в покрытии исследуемых электродов содержатся металлические присадки, переходящие в шов, а также происходит восстановление железа из его оксидов, то определение истинных потерь электродного металла в процессе сварки производилось с учётом данных присадок. При этом, к металлическим составляющим покрытия электродов относили ферросплавы, алюминиевый порошок и железо, содержащееся в окалине (70% от массы окалины).

С целью сокращения числа опытов был выбран неполный план типа  $3^k$ , построенный путём комбинирования неполноблочного плана (ВЛВ-схемы) с планом типа  $2^K - (k < K)$  [8] (где  $k$  – параметр блок-схемы,  $K$  – число факторов), при котором каждая переменная варьировалась только на 3-х уровнях.

С помощью выбранного типа планирования строилась квадратичная модель (1), где  $K = 4$ . Расчёт коэффициентов регрессии и их статистический анализ производился по соответствующим известным формулам, приведенным в [8] в программной среде Statistica V6.0.437.0 (StatSoft. Inc. 2001) [9].

Зависимость функции отклика (результаты эксперимента) от независимых переменных  $x_i$  (факторов) искалась в виде полинома 2-го порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=0}^K b_i x_i + \sum_{i < j}^K b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^K b_{ii} x_i^2. \quad (1)$$

План-матрица эксперимента и ее реализация приведены в табл. 1.

Для оценки всех коэффициентов квадратичной модели необходим план, в котором каждая переменная варьируется хотя бы на трёх разных уровнях, соответствующая матрица нормальных уравнений которого не вырождена. Для подобных задач оптимальным принято считать планы, удовлетворяющие критерию ортогональности или рототабельности.

В результате статистической обработки данных моделей с доверительным интервалом на уровне 95% было установлено, что модели адекватны.

Величина достоверной аппроксимации полученных моделей соответственно составляет:  $Y_1(R - sqr) = 0,9923$ ;  $Y_2(R - sqr) = 0,99767$ ;  $Y_3(R - sqr) = 0,99947$ ;  $Y_4(R - sqr) = 0,95843$ ;  $Y_3(R - sqr) = 0,99984$ .

Данный показатель свидетельствует о хорошем общем качестве полученных моделей.

Коэффициенты регрессии, рассчитанные по экспериментальным данным, приведены в табл. 2.

После исключения незначимых коэффициентов проводилась проверка адекватности полученных квадратичных моделей по известным формулам [8]. Адекватность модели проверялась по критерию Фишера:

$$F_{fag;fy}^{расч} = \frac{S_{ag}^2}{S_y^2} < F_{\alpha;(fag;fy)}^{табл}. \quad (2)$$

Таблица 1

План-матрица эксперимента и ее реализация

Параметр	Факторы								Отклики				
	Кодированное обозначение				Натуральные величины				Натуральные величины				
	I <sub>св</sub>	U <sub>х.х.</sub>	K <sub>п</sub>	α	I <sub>св</sub>	U <sub>х.х.</sub>	K <sub>п</sub>	α	α <sub>р.ст.</sub>	α <sub>ч</sub>	ψ	ψ <sub>р.м.</sub>	K <sub>г</sub>
Размерность	A	B	-	-	A	B	-	-	г/(А·ч)	г/(А·ч)	%	%	-
Нижний уровень	-1				200	60	0,4	3:1	Экспериментальные значения				
Нулевой уровень	0				250	67	0,7	4:1					
Верхний уровень	+1				300	74	1,0	5:1					
Интервал варьирования	50	7	-	-	50	7	-	-					
Кодированное обозначение	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>
1	-1	-1	0	0	200,0	60,0	0,7	4,0	10,62	11,57	15,12	6,19	62,87
2	1	-1	0	0	300,0	60,0	0,7	4,0	11,94	13,08	13,34	4,71	65,32
3	-1	1	0	0	200,0	74,0	0,7	4,0	11,02	11,88	15,6	7,29	62,47
4	1	1	0	0	300,0	74,0	0,7	4,0	11,54	11,5	20,85	5,81	60,02
5	0	0	-1	-1	250,0	67,0	0,4	3,0	10,73	10,22	16,85	6,66	68,56
6	0	0	1	-1	250,0	67,0	1,0	3,0	10,78	11,9	17,29	6,66	55,5
7	0	0	-1	1	250,0	67,0	0,4	5,0	10,98	9,89	17,6	5,72	66,14
8	0	0	1	1	250,0	67,0	1,0	5,0	9,43	9,99	23,14	5,72	53,08
9	0	0	0	0	250,0	67,0	0,7	4,0	11,28	12,01	16,23	5,27	62,67
10	-1	0	0	-1	200,0	67,0	0,7	3,0	9,98	10,45	19,05	8,71	59,88
11	1	0	0	-1	300,0	67,0	0,7	3,0	10,9	11,66	15,09	6,07	64,18
12	-1	0	0	1	200,0	67,0	0,7	5,0	9,46	9,98	16,65	6,62	61,76
13	1	0	0	1	300,0	67,0	0,7	5,0	10,38	9,89	24,09	6,29	57,46
14	0	-1	-1	0	250,0	60,0	0,4	4,0	12,15	11,67	16,83	5,27	67,45
15	0	1	-1	0	250,0	74,0	0,4	4,0	11,75	11,45	12,65	5,27	70,95
16	0	-1	1	0	250,0	60,0	1,0	4,0	11,38	13,29	12,11	5,27	60,34
17	0	1	1	0	250,0	74,0	1,0	4,0	10,98	11,62	23,33	5,3	51,94
18	0	0	0	0	250,0	67,0	0,7	4,0	11,28	12,01	16,23	5,27	62,67
19	-1	0	-1	0	200,0	67,0	0,4	4,0	11,8	11,28	13,87	6,74	69,2
20	1	0	-1	0	300,0	67,0	0,4	4,0	12,1	11,84	15,6	5,26	69,2
21	-1	0	1	0	200,0	67,0	1,0	4,0	10,41	12,18	16,85	6,74	56,14
22	1	0	1	0	300,0	67,0	1,0	4,0	11,95	12,74	18,59	5,26	56,14
23	0	-1	0	-1	250,0	60,0	0,7	3,0	10,24	11,92	12,69	6,66	65,23
24	0	1	0	-1	250,0	74,0	0,7	3,0	10,24	10,2	21,45	6,66	58,83
25	0	-1	0	1	250,0	60,0	0,7	5,0	10,12	10,02	21,24	5,72	58,86
26	0	1	0	1	250,0	74,0	0,7	5,0	9,71	9,85	19,5	5,72	60,36
27	0	0	0	0	250,0	67,0	0,7	4,0	11,28	12,01	16,23	5,27	62,67

Таблица 2

Значения коэффициентов регрессии

b <sub>i</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>
b <sub>0</sub>	-21,236	-34,6027	162,5109	53,938927	-26,942619
b <sub>1</sub>	0,0301	0,1224	-0,54685	-0,206933	0,4065
b <sub>2</sub>	0,28729	0,18134	-0,77505	0,0183503	0,5535714
b <sub>3</sub>	-5,8824	18,3108	-134,89351	-0,263359	73,15
b <sub>4</sub>	10,7152	10,37023	-10,37667	-10,71333	5,436428
b <sub>12</sub>	-0,000571	-0,00135	0,0050214	0,00000	-0,0035
b <sub>13</sub>	0,020666	0,00000	0,0001667	-0,00000	0,00000
b <sub>14</sub>	0,0000	-0,0065	0,057	0,01155	-0,043
b <sub>23</sub>	-0,0000	-0,17262	1,8333	0,0035714	-1,416667
b <sub>24</sub>	-0,01464	0,05536	-0,375	-0,00000	0,282123
b <sub>34</sub>	-1,3333	-1,31667	4,25	0,00000	-0,00000
b <sub>11</sub>	0,00000583	-0,00000067	-0,00000067	0,00029183	-0,00000
b <sub>22</sub>	-0,000748	-0,00003401	-0,0000085	0,00004252	-0,00000
b <sub>33</sub>	3,412037	0,0092559	-0,004629	0,02314815	-0,00000
b <sub>44</sub>	-1,12917	-1,511667	2,49083	0,9195833	-1,85

Все полученные уравнения оказались адекватными при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . После исключения незначимых коэффициентов уравнения регрессии имели вид:

$$Y_1 = -21,24 + 0,03X_1 + 0,28X_2 - 5,88X_3 + 10,72X_4 - 0,0006X_1X_2 + 0,0207X_1X_3 + 0X_1X_4 - 0X_2X_3 - 0,0146X_2X_4 - 1,33X_3X_4 + 0,000006X_1^2 - 0,00075X_2^2 + 3,412X_3^2 - 1,129X_4^2 \quad (3)$$

$$Y_2 = -34,6028 + 0,122X_1 + 0,181X_2 + 18,31X_3 + 10,37X_4 - 0,0014X_1X_2 - 0,0065X_1X_4 - 0,173X_2X_3 + 0,0554X_2X_4 - 1,317X_3X_4 - 0,0000067X_1^2 - 0,00003401X_2^2 + 0,009259X_3^2 - 1,512X_4^2 \quad (4)$$

$$Y_3 = 162,51 - 0,547X_1 - 0,775X_2 - 134,89X_3 - 10,377X_4 + 0,00502X_1X_2 + 0,0001667X_1X_3 + 0,0057X_1X_4 + 1,83X_2X_3 - 0,38X_2X_4 + 4,25X_3X_4 - 0,00000067X_1^2 - 0,0000085X_2^2 - 134,89X_3^2 + 2,49083X_4^2 \quad (5)$$

$$Y_4 = 53,94 - 0,2069X_1 + 0,0184X_2 - 0,2634X_3 - 10,713X_4 + 0,0116X_1X_4 + 0,00357X_2X_3 + 0,00029183X_1^2 - 0,00004252X_2^2 + 0,0231X_3^2 + 0,9196X_4^2 \quad (6)$$

$$Y_5 = -26,943 + 0,4065X_1 + 0,5536X_2 + 73,15X_3 + 5,436X_4 - 0,0035X_1X_2 - 0,043X_1X_4 - 1,4166X_2X_3 + 0,2821X_2X_4 + 5,436X_4^2 \quad (7)$$

Общий вид уравнений (3–7) показывает, что не все факторы в одинаковой степени влияют на параметры оптимизации. Характер влияния исследуемых факторов на показатели плавления электродов определяли на основании канонического анализа данных уравнений, для чего они были приведены к следующему виду [8]:

$$Y - Y_c = \sum_{i=1}^k \theta_i z_i^2 \quad (8)$$

где  $\theta_i$  – корни характеристического уравнения;

$z_i$  – новые координаты экстремальной точки.

Задача приведения квадратичной формы к каноническому виду решается следующим образом:

1. Первоначально необходимо произвести перенос системы координат в точку экстремума функции.

Находим критические точки функции из решения следующей системы:

$$\frac{dy}{dx_i} = 0, \quad i = \overline{1,4}.$$

Находим частные производные:

$$\frac{dy}{dx_1} = b_1 + b_{12}x_2 + b_{13}x_3 + b_{14}x_4 + 2b_{11}x_1$$

$$\frac{dy}{dx_2} = b_2 + b_{12}x_1 + b_{23}x_3 + b_{24}x_4 + 2b_{22}x_2$$

$$\frac{dy}{dx_3} = b_3 + b_{13}x_1 + b_{23}x_2 + b_{34}x_4 + 2b_{33}x_3$$

$$\frac{dy}{dx_4} = b_4 + b_{14}x_1 + b_{24}x_2 + b_{34}x_3 + 2b_{44}x_4$$

Получим систему:

$$\begin{aligned} b_1 + b_{12}x_2 + b_{13}x_3 + b_{14}x_4 + 2b_{11}x_1 &= 0 \\ b_2 + b_{12}x_1 + b_{23}x_3 + b_{24}x_4 + 2b_{22}x_2 &= 0 \\ b_3 + b_{13}x_1 + b_{23}x_2 + b_{34}x_4 + 2b_{33}x_3 &= 0 \\ b_4 + b_{14}x_1 + b_{24}x_2 + b_{34}x_3 + 2b_{44}x_4 &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Решаем полученную систему уравнений любым способом, например, методом Гауса. Получаем решение в виде:

$$x_{1c}; x_{2c}; x_{3c}; x_{4c}, \quad (10)$$

можно показать, что это точка экстремума функции.

Подставив в уравнение регрессии (3–7) значения (10), получим  $Y_c$ .

Тогда экстремальная точка  $C(x_{1c}; x_{2c}; x_{3c}; x_{4c}; y_c)$ .

2. Уравнения (3–7) в канонической форме имеют вид:

$$y - y_c = \theta_1 z_1 + \theta_2 z_2 + \theta_3 z_3 + \theta_4 z_4 \tag{11}$$

где  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  – корни характеристического уравнения (12).

$$\theta^4 + \alpha\theta^3 + \beta\theta^2 + \gamma\theta + \eta = 0 \tag{12}$$

$$\begin{aligned} z_1 &= l_1 x_1 - x_{1c} + m_1 x_2 - x_{2c} + n_1 x_3 - x_{3c} + k_1 x_4 - x_{4c} \\ z_2 &= l_2 x_1 - x_{1c} + m_2 x_2 - x_{2c} + n_2 x_3 - x_{3c} + k_2 x_4 - x_{4c} \\ z_3 &= l_3 x_1 - x_{1c} + m_3 x_2 - x_{2c} + n_3 x_3 - x_{3c} + k_3 x_4 - x_{4c} \\ z_4 &= l_4 x_1 - x_{1c} + m_4 x_2 - x_{2c} + n_4 x_3 - x_{3c} + k_4 x_4 - x_{4c} \end{aligned} \tag{13}$$

где  $l_i, m_i, n_i, k_i$  – направляющие косинусы угла поворота новой системы координат относительно старой системы.

Согласно теории квадратичных форм в матричной алгебре, характеристическое уравнение (13) может быть получено при решении уравнения:

$$\det A - \theta E = 0 \tag{14}$$

где

$$A = \begin{pmatrix} b_{11} & \frac{1}{2} b_{12} & \frac{1}{2} b_{13} & \frac{1}{2} b_{14} \\ \frac{1}{2} b_{12} & b_{22} & \frac{1}{2} b_{23} & \frac{1}{2} b_{24} \\ \frac{1}{2} b_{13} & \frac{1}{2} b_{23} & b_{33} & \frac{1}{2} b_{34} \\ \frac{1}{2} b_{14} & \frac{1}{2} b_{24} & \frac{1}{2} b_{34} & b_{44} \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Раскрыв определитель (14) получим уравнение (12). Последнее решаем приближенными методами и получаем корни  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ . Данные корни называют собственными значениями матрицы  $A$ .

Для каждого из собственных значений  $\theta_i$  составляем и решаем матричное уравнение:

$$A - \theta_i E Y_i = 0, \tag{15}$$

которое сводится к решению однородной линейной системы уравнений.

Предположим, таким решением будет вектор

$$Y_i = \begin{pmatrix} y_{i1} \\ y_{i2} \\ y_{i3} \\ y_{i4} \end{pmatrix}. \tag{16}$$

Тогда направляющие косинусы вектора  $Y_i$  и будут направляющими косинусами  $l_i, m_i, n_i, k_i$ , подставляемые в выражения (13).

При этом старые координаты с новыми будут связаны соотношениями:

$$\begin{aligned} x_1 &= l_1 z_1 + l_2 z_2 + l_3 z_3 + l_4 z_4 + x_{1c} \\ x_2 &= m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_3 z_3 + m_4 z_4 + x_{2c} \\ x_3 &= n_1 z_1 + n_2 z_2 + n_3 z_3 + n_4 z_4 + x_{3c} \\ x_4 &= k_1 z_1 + k_2 z_2 + k_3 z_3 + k_4 z_4 + x_{4c} \end{aligned} \tag{17}$$

Для переменной  $Y_1$ .

Находим частные производные:

$$\frac{dy_1}{dx_1} = 0,0301 - 0,00057x_2 + 0,0207x_3 + 0,000012x_1$$

$$\frac{dy_1}{dx_2} = 0,2873 - 0,00057x_1 - 0,01464x_4 - 0,0015x_2$$

$$\frac{dy_1}{dx_3} = -5,8824 + 0,0207x_1 - 1,3333x_4 + 6,824x_3$$

$$\frac{dy_1}{dx_4} = 10,7152 - 0,01464x_2 - 1,333x_3 - 2,2583x_4$$

Решаем систему  $\frac{dy}{dx_i} = 0$ ,  $i = \overline{1,4}$ , получаем:

$$x_{1c} = 159,4503659; \quad x_{2c} = 98,87675770;$$

$$x_{3c} = 1,060993932; \quad x_{4c} = 3,490311126.$$

Вычисляем  $y_c = 10,65922429$

Тогда экстремальная точка:

$$C(159,450; 98,876; 1,0609 \ 3,4903; 10,659)$$

На основании заданных коэффициентов функции составляем матрицу квадратичной формы:

$$A = \begin{pmatrix} 0,0001 & -0,000285 & 0,010335 & 0 \\ -0,000285 & -0,00075 & 0 & -0,00732 \\ 0,0105 & 0 & 3,41204 & -0,666665 \\ 0 & 0,00732 & -0,666665 & -1,12917 \end{pmatrix}$$

Находим собственные значения и векторы матрицы.

Из уравнения  $\det A - \theta E = 0$  получим характеристическое уравнение 4-го порядка:

$$\theta^4 - 2,28213\theta^3 - 4,2988236\theta^2 - 0,0031176\theta + 0,000003 = 0$$

Решив данное уравнение, получим собственные значения матрицы:

$$\theta_1 = -1,225060419; \quad \theta_2 = -0,0008175639;$$

$$\theta_3 = 0,000092; \quad \theta_4 = 3,50791592.$$

Для каждого их собственных значений составим систему уравнений и решим ее:

При  $\theta_1 = -1,225060419$  получим систему:

$$0,225070419y_{11} - 0,000285y_{12} + 0,010335y_{13} = 0$$

$$-0,000285y_{11} + 1,224310419y_{12} - 0,00732y_{14} = 0$$

$$0,010335y_{11} + 4,637100419y_{13} - 0,666665y_{14} = 0$$

$$-0,00732y_{12} - 0,666665y_{13} + 0,095890419y_{14} = 0$$

Находим любое не нулевое решение данной системы:

$$y_{11} = -1; \quad y_{12} = 4,936150703; \quad y_{13} = 118,7021715; \quad y_{14} = 825,6373955$$

Таким образом, получили собственный вектор  $Y_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 4,93615 \\ 118,702 \\ 825,637 \end{pmatrix}$

Найдем его направляющие косинусы по формулам:

$$l_1 = \frac{y_{11}}{\sqrt{y_{11}^2 + y_{12}^2 + y_{13}^2 + y_{14}^2}} = -0,001198836818; \quad m_1 = \frac{y_{12}}{\sqrt{y_{11}^2 + y_{12}^2 + y_{13}^2 + y_{14}^2}} = 0,005917639202;$$

$$n_1 = \frac{y_{13}}{\sqrt{y_{11}^2 + y_{12}^2 + y_{13}^2 + y_{14}^2}} = 0,1423045336; \quad k_1 = \frac{y_{14}}{\sqrt{y_{11}^2 + y_{12}^2 + y_{13}^2 + y_{14}^2}} = 0,9898045080.$$

Аналогично находим собственные векторы для других собственных значений матрицы, а затем находим направляющие косинусы:

$$\begin{aligned}
 l_2 &= -0,3479576435; & m_2 &= -0,9374953246; \\
 n_2 &= 0,002009774498; & k_2 &= 0,004894410012; \\
 l_3 &= -0,9375049524; & m_3 &= 0,3479474236; \\
 n_3 &= 0,002150955062; & k_3 &= -0,003525259307; \\
 l_4 &= -0,002916191431; & m_4 &= -0,0002966483543; \\
 n_4 &= -0,989818546; & k_4 &= 0,1423047931.
 \end{aligned}$$

Таким образом, получим в новой системе координат заданную функцию в каноническом виде:

$$Y_1 - 10,659 = -1,225z_1^2 - 0,0008176z_2^2 + 0,000092063z_3^2 + 3,508z_4^2. \quad (18)$$

Где формулы перехода к новой системе координат:

$$\begin{aligned}
 z_1 &= -3,98784 - 0,0011988x_1 + 0,005917x_2 + 0,1423x_3 + 0,9898x_4; \\
 z_2 &= 146,2843 - 0,3479x_1 - 0,93749x_2 + 0,0020097x_3 + 0,004894x_4; \\
 z_3 &= 115,787 - 0,9375x_1 + 0,34795x_2 + 0,00215x_3 + 0,003526x_4; \\
 z_4 &= 1,04723 - 0,002916x_1 - 0,0002967x_2 - 0,98982x_3 + 0,1423x_4.
 \end{aligned}$$

Формулы связи новой и старой систем координат:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= -0,001198z_1 - 0,347957z_2 - 0,9375z_3 - 0,002916z_4 + 159,45; \\
 x_2 &= 0,1423045z_1 + 0,0020097z_2 + 0,00215z_3 - 0,98981z_4 + 98,876; \\
 x_3 &= 0,0059176z_1 - 0,93749z_2 + 0,3479z_3 - 0,0002966z_4 + 1,0609; \\
 x_4 &= 0,9898z_1 + 0,00489z_2 - 0,003525z_3 + 0,142304z_4 + 3,4903.
 \end{aligned}$$

Уравнение (18) описывает поверхность типа минимакс. Фактор  $Z_2$  влияет на величину  $Y_1$  линейно. По факторам  $Z_1$  и  $Z_3$  поверхность отклика в точке С имеет максимум, а по  $Z_4$  – минимум. Аналогично были получены канонические формы для уравнений (4–7):

$$Y_2 - 12,9429 = -1,757z_1^2 - 0,0289z_2^2 + 0,0001023z_3^2 + 0,283549z_4^2 \quad (19)$$

$$Y_3 - 15,329 = -1,692347z_1^2 - 0,000154z_2^2 + 0,4472z_3^2 + 3,73148z_4^2 \quad (20)$$

$$Y_4 - 6,5978 = -0,00009705z_1^2 + 0,000253z_2^2 + 0,02328z_3^2 + 0,919616z_4^2 \quad (21)$$

$$Y_5 - 55,285 = 1,862723z_1^2 - 0,699921z_2^2 + 0,000249z_3^2 + 0,712395z_4^2 \quad (22)$$

Уравнения (19–22) описывают поверхности также типа мини-макс, координаты центров которых и значения выходов в центре приведены в таблице 3.

Таблица 3

Координаты экстремальных точек и значения выходов в них

	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$
$X_{1c}$	159,45	31,7159	216,2137	275,1908	-39,5634
$X_{2c}$	98,87	76,659	64,4705	197,967	51,6231
$X_{3c}$	1,0609	2,0217	0,63357	-9,5763	1,64163
$X_{4c}$	3,4903	3,885	3,9216	4,0969	5,8635
$Y_c$	10,66	12,942	15,329	6,59	55,285

Проведя оптимизацию полученных уравнений, находим наилучшие показатели процесса сварки электродами с экзотермической смесью в покрытии, который тем эффективней, чем меньшее количество потерь его сопровождают. Был выбран критерий оптимизации: получение максимального коэффициента наплавки с минимальными общими потерями электрода при его плавлении. По данным уравнениям регрессии были построены контурные кривые равного выхода в области экспериментирования при различных значениях  $X_3$  ( $K_n$ ) (рис. 1–5).

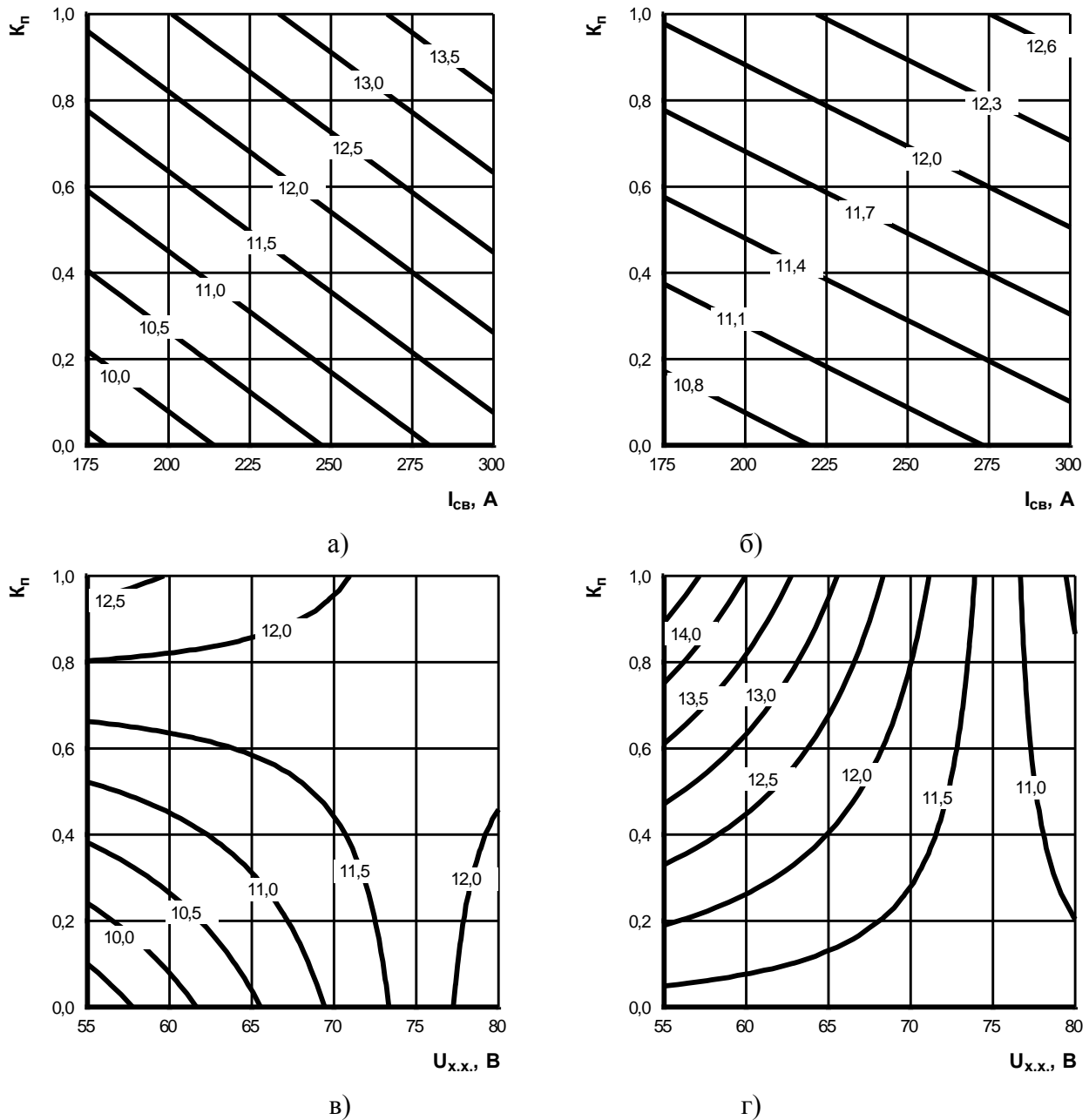


Рис. 1. Контурные кривые равного выхода коэффициента наплавки  $\alpha_n$ , г/(А·ч) в зависимости от величины сварочного тока  $I_{св}$ , коэффициента массы покрытия электродов  $K_p$  и напряжения холостого хода источника питания  $U_{х.х.}$ :

а) –  $U_{х.х.} = 60$  В; б) – 67 В; в) –  $I_{св} = 200$  А; г) –  $I_{св} = 300$  А

Увеличение  $U_{х.х.}$  (рис. 4) приводит к уменьшению  $\psi_{р.м.}$  при малых значениях  $I_{св}$  и к увеличению  $\psi_{р.м.}$  – при больших значениях. Очевидно, происходит это потому, что при  $I_{св} = 200\text{--}240$  А увеличение  $U_{х.х.}$  не приводит к заметному развитию экзотермической реакции, а только улучшает равномерность плавления электродного покрытия. При больших значениях  $I_{св}$  интенсифицируется экзотермическая реакция, увеличение  $U_{х.х.}$  приводит к изменению длины дуги и возрастанию  $\psi_{р.м.}$



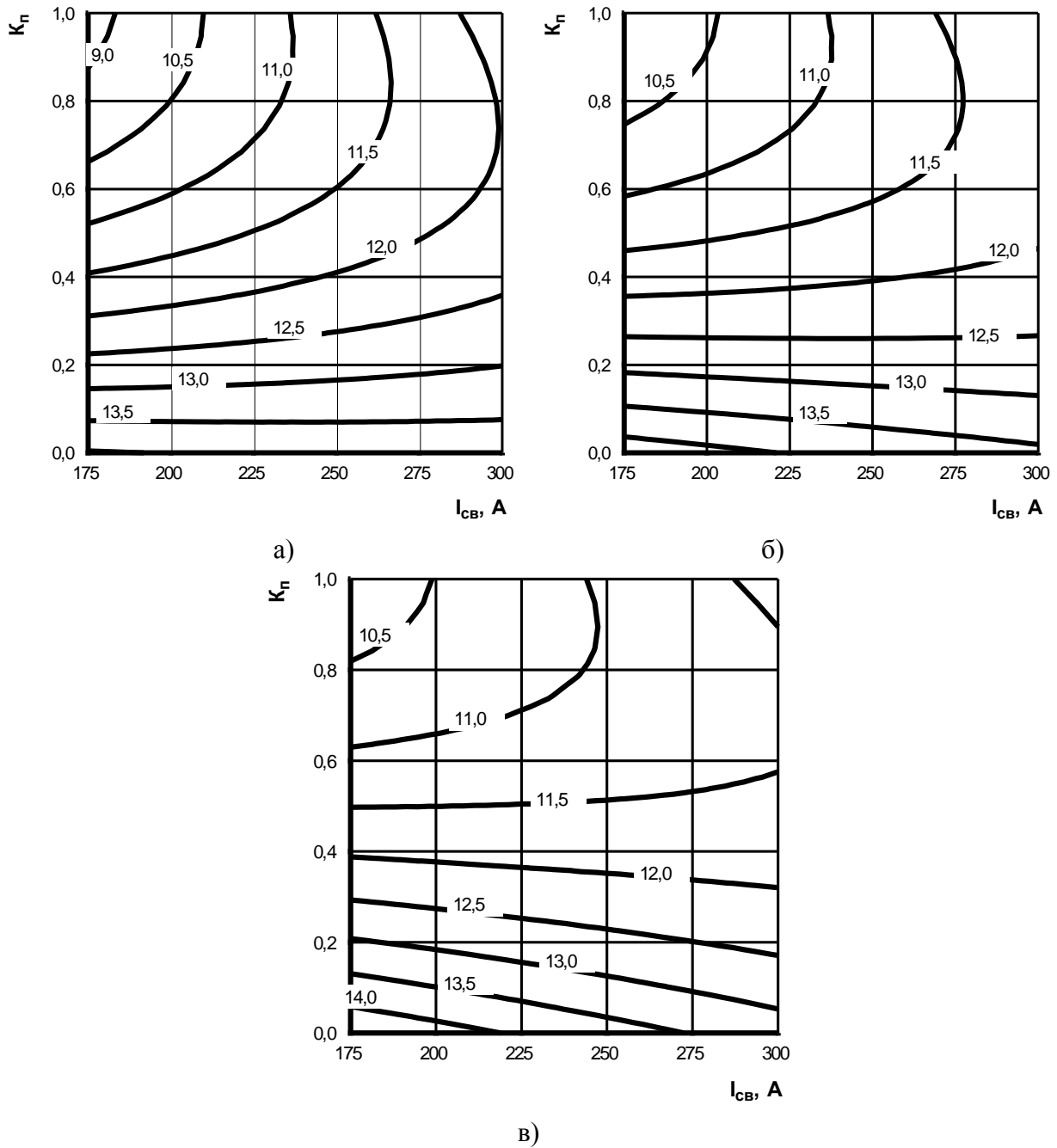


Рис. 2. Контурные кривые равного выхода коэффициента расплавления электродного стержня  $\alpha_{р.ст.}$ , г/(А·ч) в зависимости от величины сварочного тока  $I_{св}$  и коэффициента массы покрытия электродов ( $K_p$ ) при напряжении холостого хода источника питания:

а) –  $U_{х.х.} = 60$  В; б) – 67 В; в) – 74 В

Для исследуемых электродов выбран следующий оптимальный режим сварки:  $I_{св} = 290\text{--}310$  А,  $U_{х.х.} = 60$  В. Для данного режима при  $K_p = 0,7$  и  $d_{ст} = 5$  мм показатели плавления имели следующие значения:  $\alpha_{р.ст.} = 11,9\text{--}12,1$  г/(А·ч),  $\alpha_n = 12,9\text{--}13,2$  г/(А·ч),  $\psi = 13,0\text{--}13,5$  %,  $K_r = 65\text{--}66$  %,  $\psi_{р.м.} = 4,7\text{--}4,8$  %. Проведенные контрольные опыты дали средние значения характеристик плавления в указанных выше пределах.

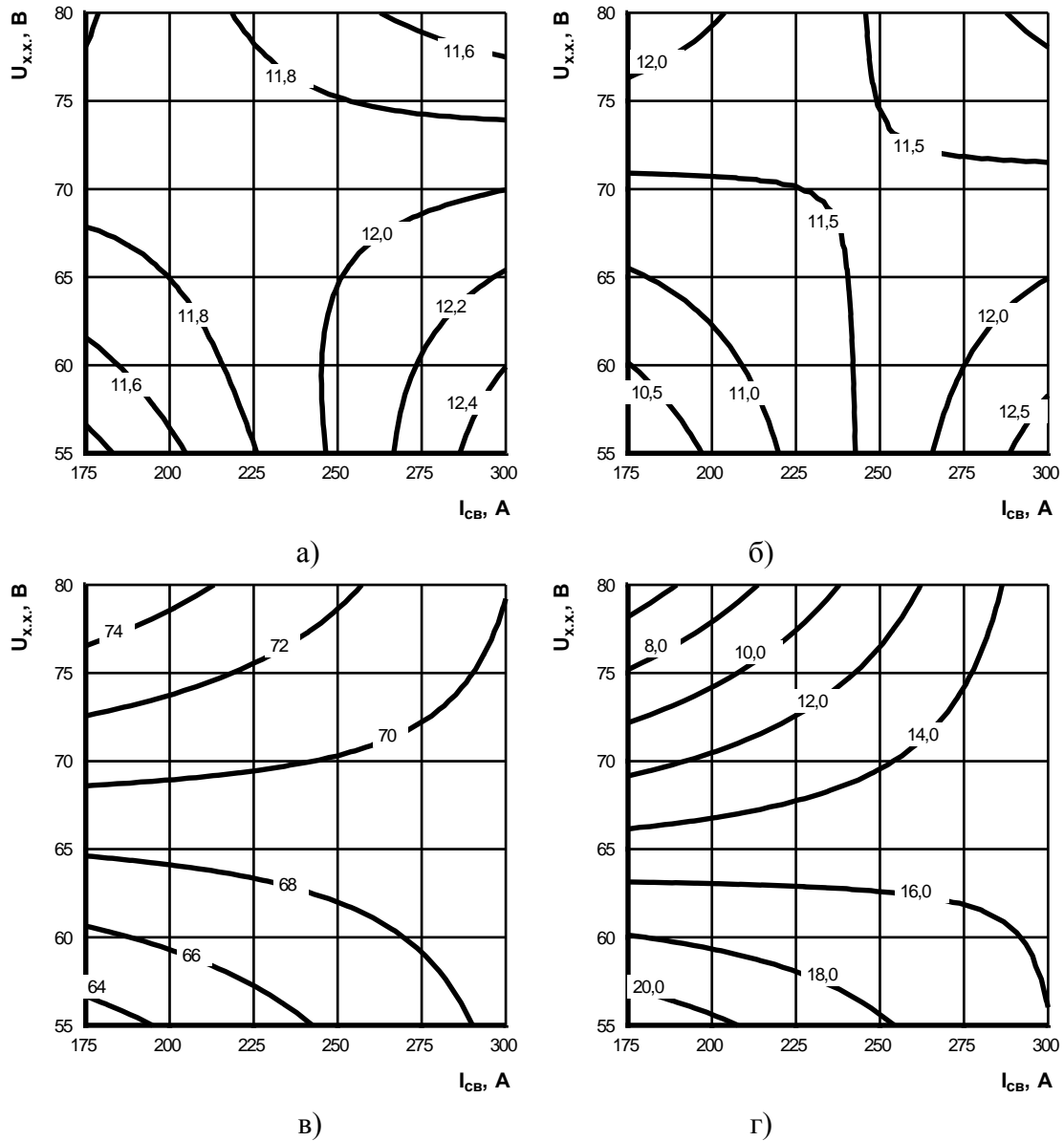


Рис. 3. Контурные кривые равного выхода: коэффициента расплавления электродного стержня  $\alpha_{p.ct}$ , г/(А·ч) – а); коэффициента наплавки  $\alpha_n$ , г/(А·ч) – б); коэффициента выхода годного металла  $K_r$ , % – в); коэффициента потерь  $\psi$ , % – г) в зависимости от величины сварочного тока ( $I_{св}$ ) и напряжения холостого хода источника питания ( $U_{х.х.}$ ) при коэффициенте массы покрытия электродов ( $K_n$ ), равном 0,7

Аналогичные результаты были получены при введении в газшлакообразующую часть покрытия кварцевого песка, перовскитового концентрата, волластонита, вермикулита и рутилового концентрата. При этом, показатели плавления электродов отличались незначительно. Очевидно, это является характерной особенностью электродов с экзотермической смесью в покрытии.

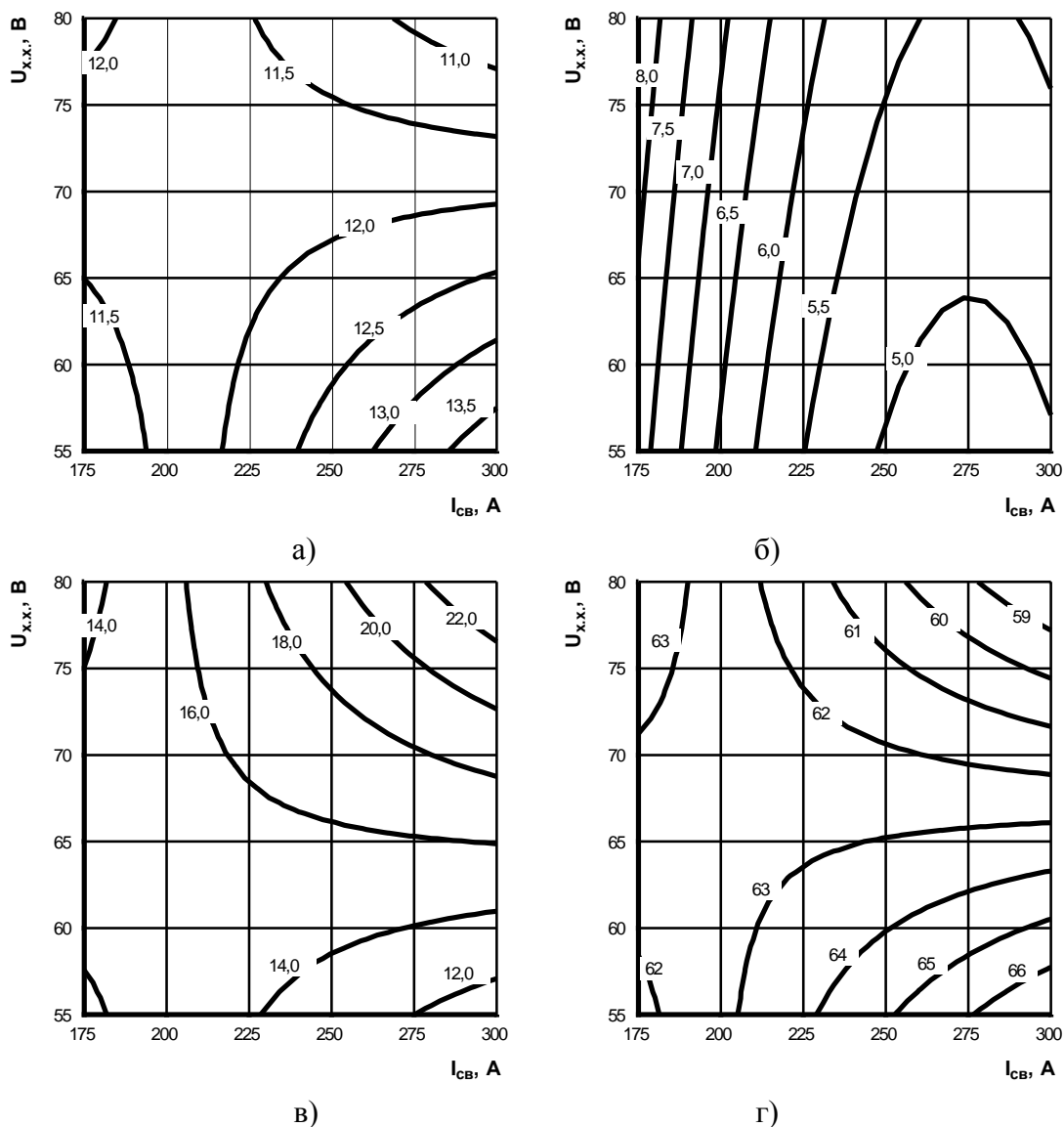


Рис. 4. Контурные кривые равного выхода: коэффициента наплавки  $\alpha_n$ , г/(А·ч) – а); коэффициента потерь электродного металла на разбрызгивание  $\psi_p$ , % – б); коэффициента потерь  $\psi$ , % – в); коэффициента выхода годного металла  $K_g$ , % – г) в зависимости от величины сварочного тока ( $I_{св}$ ) и напряжения холостого хода источника питания ( $U_{х.х.}$ ) при коэффициенте массы покрытия электродов ( $K_n$ ), равном 0,7

### ВЫВОДЫ

1. Определены оптимальные параметры режима ручной дуговой сварки, обеспечивающие получение максимального значения коэффициента наплавки при минимальных потерях электродного металла.
2. Установлена функциональная взаимосвязь между параметрами режима сварки и характеристиками плавления электродов с экзотермической смесью в покрытии при помощи аппарата математической статистики.
3. Разработана математическая модель и построены описывающие ее уравнения регрессии, что позволило установить следующие оптимальные режимы сварки:  $I_{св} = 290\text{--}310$  А,  $U_{х.х.} = 60$  В. Для данного режима при  $K_n = 0,7$  и  $d_{ст} = 5$  мм показатели плавления имели следующие значения:  $\alpha_{p.ст.} = 11,9\text{--}12,1$  г/(А·ч),  $\alpha_n = 12,9\text{--}13,2$  г/(А·ч),  $\psi = 13,0\text{--}13,5$  %,  $K_g = 65\text{--}66$  %,  $\psi_{p.м.} = 4,7\text{--}4,8$  %.

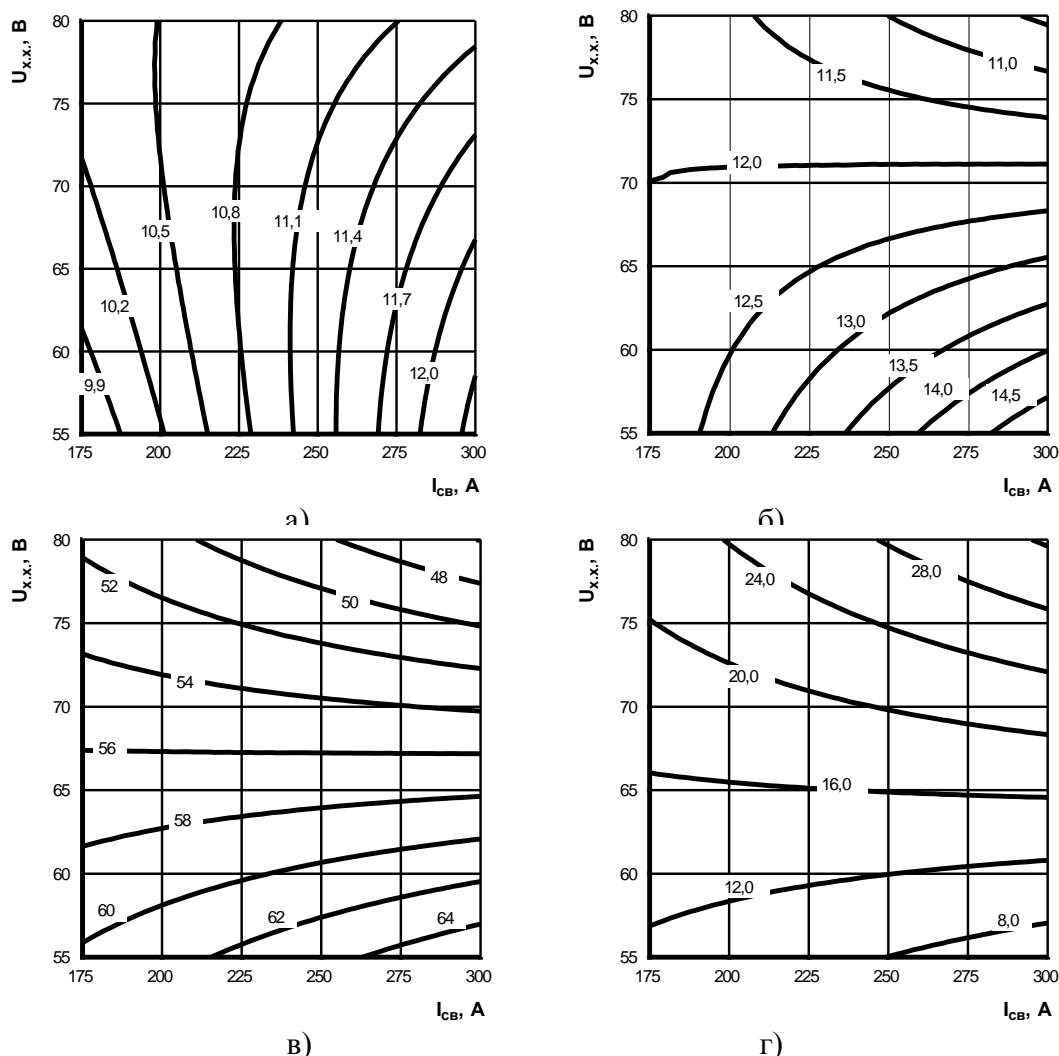


Рис. 5. Контурные кривые равного выхода: коэффициента расплавления электродного стержня  $\alpha_{р.ст.}$ , г/(А·ч) – а); коэффициента наплавки  $\alpha_{н.}$ , г/(А·ч) – б); коэффициента выхода годного металла  $K_{г.}$ , % – в); коэффициента потерь  $\psi$ , % – г) в зависимости от величины сварочного тока ( $I_{св}$ ) и напряжения холодного хода источника питания ( $U_{хх}$ ) при коэффициенте массы покрытия электродов ( $K_{п.}$ ), равном 1,0

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патон Б. Е. Проблемы сварки на рубеже веков / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 1999. – №1. – С. 4–15. – ISSN 0005-111X.
2. Игнатченко П. В. Производство сварочных материалов в странах СНГ в 2001 г. / П. В. Игнатченко // Сварщик. – 2002. – №6. – С. 12–14.
3. Походня И. К. Сварочные материалы: Состояние и тенденции развития / И. К. Походня // Автоматическая сварка. – 2003. – №3. – С. 9–20. – ISSN 0005-111X.
4. Походня И. К. Высокопроизводительные электроды с железным порошком в покрытии / И. К. Походня, А. Е. Марченко, А. М. Бейниш // Автоматическая сварка. – 1961. – №10. – С. 52–68.
5. Карпенко В. М. Показатели плавления сварочных электродов с экзотермической смесью в покрытии / В. М. Карпенко, А. Ф. Власов, Г. Б. Билык // Сварочное производство. – 1980. – № 9. – С. 23–25.
6. Власов А. Ф. Высокопроизводительные электроды на новом связующем для наплавки углеродистых легированных сталей / А. Ф. Власов, В. А. Пресняков, А. М. Куций // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – №1(22). – С. 26–29. – ISSN 1993-8322.
7. Куций А. М. Усовершенствование состава высокопроизводительных электродов для ручной дуговой сварки и наплавки / А. М. Куций // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – №3(28). – С. 177–182. – ISSN 1993-8322.
8. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К. : Техника, 1975. – 167 с.
9. Боровиков В. П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. П. Боровиков. – СПб. : Питер, 2001. – 656 с. : ил. – ISBN 5-272-00078-1.

Статья поступила в редакцию 14.05.2016 г.