

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ПРИСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ ВКС-12 (38ХС3Н4К2МФА)

Высокопрочные стали ВКС-9 и ВКС-12 наряду с требуемыми значениями прочности ($\sigma_s = 1900-2100$ МПа) сохраняют высокие характеристики надежности, малоциклового усталости, которые достигаются за счет технологии выплавки и оптимального легирования. Эффективность применения этих сталей во многом определяется возможностью изготовления из них сварных конструкций и прочностью получаемых сварных соединений.

Металл шва представляет собой сплав основного и электродного металла (присадочной проволоки). Возможность получения качественного сварного соединения с надлежащими свойствами зависит не только от состава свариваемой стали, но и от состава присадочного материала, технологии и условий сварки, толщины свариваемого металла, конструкции свариваемого объекта и др. Одним из главных факторов, определяющих технологическую прочность и эксплуатационные свойства сварных конструкций, является оптимальный химический состав шва, который достигается в среднелегированных высокопрочных сталях многокомпонентным легированием за счет состава присадочного материала, компенсирующего выгорание специальных элементов основного металла, или легированием элементами, не содержащимися в основном металле, при проведении процесса сварки, что способствует упрочнению феррита и повышению прокаливаемости.

Основными легирующими элементами в присадочных материалах для сварки низко- и среднелегированных сталей является кремний, марганец, хром и никель. Поскольку в состав стали ВКС-12 входит значительное количество никеля (4–5%), кремния (около 3%) и кобальта (2–2,5%), представляет интерес исследование влияния основных легирующих элементов, содержащихся в электродном присадочном металле 32ХГ2СНВМ, на свойства сварного шва.

полученного аргонодуговой сваркой стали (ВКС-12) 38ХСЗН4К2МФА. В качестве параметров оптимизации (характеристик свойств) были выбраны: $y_1 = V_{кр}$ (мм/мин) – стойкость против образования горячих трещин; $y_2 = \sigma_n$ (МПа) – прочность сварного шва; y_3 (КСУ) – ударная вязкость с U-образным вырезом, Дж/м²; y_4 (КСV) – ударная вязкость с V-образным вырезом, Дж/м². В качестве факторов – x_1 – компонент присадочного материала ($x_1 = -1$, Si; $x_1 = 0$, Ni; $x_1 = +1$, Co) и x_2 – их содержание (0,5; 1,0 и 1,5%).

На первом этапе исследований осуществлен выбор оптимального состава присадочного материала с целью повышения указанных характеристик. Углерод и все основные легирующие элементы отрицательно влияют на свариваемость. Однако активное ухудшение свариваемости сталей связано с предельным определенным и различным по количеству содержанием в них того или иного легирующего элемента. Углерод – одна из наиболее важных примесей, определяющая прочность, вязкость, и особенно свариваемость стали. Он увеличивает склонность стали к образованию горячих и холодных трещин, повышает ее склонность к образованию неравновесных закалочных структур в зоне термического влияния (ЗТВ). Влияние марганца связано с содержанием углерода в стали – чем выше его содержание в стали, тем отрицательнее влияние марганца на свариваемость. Кремний, улучшая свойства основного металла, оказывает некоторое отрицательное влияние на свариваемость. Он упрочняет феррит и способствует неоднородности в распределении углерода. Кроме того, кремний образует устойчивые оксидные пленки, что также отрицательно влияет на свариваемость. Содержание никеля в присадочном материале от 0,1 до 2,1% благоприятно сказывается на повышении прочности металла шва при неизменных значениях ударной вязкости КСУ [1]. Введение кобальта в высокопрочные стали увеличивает прочность металла шва, поскольку кобальт уменьшает степень закрепления дислокаций атомами внедрения, повышая их подвижность. Кроме того, кобальт повышает положение точек A_{c1} и M_n , способствуя процессу самоотпуска при охлаждении после сварки и снижая склонность к образованию холодных трещин [2].

Для проведения эксперимента с целью разработки математических моделей процесса был выбран двухфакторный план 3×3 [3],

где 3 – три уровня первого фактора (Si, Ni, Co) и три уровня их содержания (0,5; 1,0 и 1,5%). Ошибку воспроизводимости опытов определяли как 5% от среднего значения параметра оптимизации. Во избежание влияния систематических ошибок и источников неоднородностей опытов проводили в случайном порядке. Матрица плана в результате испытаний приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Матрица плана 3×3 и результаты испытаний

№	x_1	x_2	x_1 x_2	x_1^2	x_2^2	$y_1 = V_{кр}$	$y_2 = \sigma_n$	$y_3 = KCU$	$y_4 = KCV$
1	–	–	+	+	+	3,68	1873	680	320
2	–	0	0	+	0	3,00	1880	480	315
3	–	+	–	+	+	2,50	1870	280	240
4	0	–	0	0	+	3,92	1710	800	400
5	0	0	0	0	0	3,70	1800	720	400
6	0	+	0	0	+	3,46	1872	674	340
7	+	–	–	+	+	3,27	1886	600	286
8	+	0	0	+	0	4,00	1880	590	286
9	+	+	+	+	+	5,00	1875	540	257

В этой таблице x_1 и x_2 – кодированные уровни факторов (–1; 0; +1), (для удобства единицы опущены); (1Y), (2Y), (12Y) и т.д. – алгебраические суммы по каждому столбцу, определяемые как сумма произведений столбца $0Y_j$ (j – номер показателя, т.е. $j = 1, 2, 3, 4$) на столбец соответствующего фактора. Например, для $y_1 = V_{кр}$ ($0Y_j$) = 3,68 + 3,00 + 2,50 + 3,92 + 3,70 + 3,46 + 3,27 + 4,00 + 5,00 = 32,53; ($1Y$)₁ = – 3,68 – 3,00 – 2,50 + 3,27 + 4,00 + 5,00 = 3,09 и т. д. Так делаем по каждому параметру оптимизации.

На следующем этапе рассчитываем коэффициенты уравнений по формулам:

$$b_0 = A_0(0Y) - A_{01}(0Y) - A_{02}(0Y); \quad (1)$$

$$b_1 = A_1(1Y); b_2 = A_2(2Y); b_{12} = A_{12}(12Y); \quad (2)$$

$$b_{11} = A_{11}(11Y) - A_{01}(0Y); b_{22} = A_{22}(22Y) - A_{02}(0Y). \quad (3)$$

Значения коэффициентов $A_0, A_{01}, A_{02}, \dots, A_{11}, A_{22}$, берем из таблиц [3]. Для плана 3×3 эти коэффициенты соответственно будут равны: $A_0 = 0,55556$; $A_{01} = A_{02} = 0,33333$; $A_1 = A_2 = 0,16667$; $A_{12} = 0,25$; $A_{11} = A_{22} = 0,50$. Например, для $y_1 = V_{кр}$:

$$b_0 = 0,55556 \times 32,53 - 0,33333(21,45 + 21,83) = 3,64;$$

$$b_1 = 0,16667 \times 3,09 = 0,52;$$

$$b_2 = 0,16667 \times 0,09 = 0,015; b_{12} = 0,25 \times 2,92 = 0,73;$$

$$b_{11} = 0,5 \times 21,45 - 0,33333 \times 32,53 = -0,12; b_{22} = 0,5 \times 21,83 -$$

$$- 0,33333 \times 32,53 = 0,75.$$

Для проверки статистической значимости коэффициентов нужно рассчитать среднюю квадратическую ошибку этих коэффициентов по формулам:

$$S_{b_0} = \sqrt{A_0} \cdot S_y; \quad (4)$$

$$S_{b_i} = \sqrt{A_i} \cdot S_y; \quad (5)$$

$$S_{b_{ij}} = \sqrt{A_{ij}} \cdot S_y; \quad (6)$$

$$S_{b_{ii}} = \sqrt{A_{ii}} \cdot S_y. \quad (7)$$

Например, для $y_1 = V_{кр}$ $S_{b_0} = \sqrt{0,55556} \cdot 0,18 = 0,134$;
 $S_{b_1} = S_{b_2} = \sqrt{0,16667} \cdot 0,12 = 0,07344$; $S_{b_{12}} = \sqrt{0,25} \cdot 0,18 = 0,09$;
 $S_{b_{11}} = S_{b_{22}} = \sqrt{0,50} \cdot 0,13 = 0,127$.

Затем определяем доверительный интервал Δb_i , для всех коэффициентов по формулам:

$$\Delta b_0 = \pm t \cdot S_{b_0}; \quad (8)$$

$$\Delta b_1 = \pm t \cdot S_{b_1}; \quad (9)$$

$$\Delta b_{12} = \pm t \cdot S_{b_{12}}; \quad (10)$$

$$\Delta b_{11} = \Delta b_{22} = \pm t \cdot S_{b_{ii}}. \quad (11)$$

Для $y_1 = V_{\text{кр}} \Delta b_0 = 2,262 \times 0,134 = 0,303$; $\Delta b_1 = \Delta b_2 = 2,262 \times 0,07344 = 0,166$; $\Delta b_{12} = 2,262 \times 0,09 = 0,204$; $\Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 2,262 \times 0,127 = 0,287$.

Значение критерия Стьюдента t берется из таблицы [4] при заданном уровне доверия α и степенях свободы f (в данном случае $f = 9$). Таким образом, коэффициенты b_2 , b_{11} и b_{22} оказались незначимыми, т.к. их абсолютные значения меньше соответствующих $\Delta b_2, \Delta b_{11}$.

Заключительным этапом расчетов является проверка адекватности полученных уравнений:

$$y_1 = V_{\text{кр}} = 3,64 + 0,52x_1 + 0,73x_1x_2; \quad (12)$$

$$y_2 = \sigma_n = 1798; \quad (13)$$

$$y_3 = \text{KCU} = 732 + 48x_1 - 97x_2 + 85x_1x_2 - 203x_1^2; \quad (14)$$

$$y_4 = \text{KCV} = 398 - 28x_2 - 96x_1^2 - 87x_2^2. \quad (15)$$

Для этого находим расчетные значения y_1, y_2, y_3, y_4 . Подставляя в каждой строке кодированные уровни факторов, находим разности между расчетными значениями \hat{Y}_i и экспериментальными ($\Delta y = y_u - y_s$), возводим эту разность в квадрат (Δy_u^2) и суммируем их, т.е. $\sum_{u=1}^N \Delta y_u$, где u – номер строки плана, N – число опытов.

Определяем так называемую дисперсию адекватности $S_{\text{ад}}^2$ по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \Delta y_u^2}{N - m}, \quad (16)$$

где m – число значимых коэффициентов уровня, включая b_0 .

Адекватность модели может быть проверена по критерию Фишера F по формуле:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2},$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия параметра оптимизации ($S_{ад}^2 = S_3^2$).

Если $F_p < F_{кр}$ (табличного) при заданном α и числе степеней свободы $f_1 = N - m$ (для числителя) и $f_2 = N - 1$ (для знаменателя). Табличные значения $F_{кр}$ берутся из таблиц [4].

Например, для $y_3 = KCU = 732 + 48x_1 - 97x_2 + 85x_1x_2 - 203x_1^2$:

	y_3	Δy_u	Δy_u^2	
1	$y_3 = 732 - 48 + 97 + 85 - 203 = 663$	680	-17	289
2	$y_3 = 732 - 4800 - 203 = 481$	480	1	1
3	$y_3 = 732 - 48 - 97 - 85 - 203 = 299$	280	19	361
4	$y_3 = 7320 + 9700 = 829$	800	29	841
5	$y_3 = 7320000 = 732$	720	12	144
6	$y_3 = 7320 - 9700 = 635$	674	-39	1521
7	$y_3 = 732 + 48 + 97 - 85 - 203 = 589$	600	-11	121
8	$y_3 = 732 + 4800 - 203 = 577$	590	-13	169
9	$y_3 = 732 + 48 - 97 + 85 - 203 = 540$	540	25	625

$$\sum_{i=1}^9 \Delta y_u^2 = 4072$$

$$S_{ад}^2 = \frac{4072}{9 - 5} = 1018; \quad F_p = \frac{1018}{30^2} = 1,13 < F_{кр} = 3,8$$

(при $\alpha = 0,05$; $f_1 = 4$, $f_2 = 8$), т. е. модель адекватна. Все остальные модели (12), (13), (15) также адекватны, т. к. для (12): $F_p = 1,2 < F_{кр} = 3,44$; для (13): $F_p = 0,745 < F_{кр} = 1$; для (15): $F_p = 0,91 < F_{кр} = 1$.

Заключительным этапом является интерпретация полученных адекватных моделей. Например, анализ уравнения (12) показывает, что наибольшее влияние на $V_{кр}$ оказывает вид присадки (x_1), влияние присадки (x_2) проявляется только во взаимодействии x_1x_2 , мак-

симальная величина $V_{кр} = 5,0$ мм/мин будет при $x_1 = +1$ и $x_2 = +1$, т. е. при использовании в качестве присадки кобальта, содержание которого должно быть равно 1,5%.

Вторая часть работы посвящена исследованию влияния присадок Si, Ni, Co на свойства сварных швов с помощью двухфакторного плана второго порядка 3×3 , где 3 – три вида присадки (Si, Ni, Co) и три уровня содержания этих присадок (0,5; 1,0 и 1,5%), а также обобщенного (комплексного) параметра оптимизации D .

В результате этих исследований были получены показатели четырех свойств ($V_{кр}$, мм/мин – стойкость против образования горячих трещин; σ_b , МПа – предел прочности шва; KCU, Дж/м² – ударная вязкость с U-образным вырезом и KCV, Дж/м² – ударная вязкость с V-образным вырезом). В таблице 2 приведены условия проведения опытов и результаты испытаний.

В этой таблице x_1 и x_2 – кодированные уровни факторов (виды присадок и уровни содержания этих присадок); D – обобщенный показатель, который был определен позже, после получения данных о $V_{кр}$, σ_b , KCU, KCV; N – число опытов. Первый фактор (x_1) кодировался так: $x_1 = -1$, присадки Si по трем уровням 0,5; 1,0 и 1,5% соответственно; $x_1 = 0$, присадки Ni; $x_1 = +1$, присадки Co.

Второй фактор (x_2 – кодирование уровней содержания присадок) проводили по формуле:

$$x_i = \frac{\bar{x}_i - 0,5(\bar{x}_{i\max} + \bar{x}_{i\min})}{0,5(\bar{x}_{i\max} - \bar{x}_{i\min})}$$

где x_2 – кодированный уровень; x_i , $\bar{x}_{i\max}$ и $\bar{x}_{i\min}$ – натуральные значения текущего, максимального и минимального уровней i -го фактора.

Ввиду некоторой противоречивости полученных данных (например, в опыте № 9 при $x_1 = +1$ (Co) и $x_2 = +1$ (1,5%) высокое значение $V_{кр} = 5$, $\sigma_b = 1875$, но сравнительно низкие значения KCU и KCV, по сравнению с другими присадками, или в опыте № 3 при $x_1 = -1$ (Si) и $x_2 = +1$ (1,5%) получили числовое несоответствие. Значение σ ,

после присадки $x_2 = 0$ (1%) возросло, а затем после $x_2 = +1$ (1,5 %) уменьшилось, и стало ниже значения при $x_2 = -1$ (0,5%), при этом остальные параметры последовательно уменьшаются), было принято решение рассчитать обобщенный (комплексный) параметр оптимизации D [3]. Этот показатель рассчитывается по формуле:

$$D = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n}, \quad (17)$$

где d_1, d_2, \dots, d_n – частные функции желательности для i -го показателя ($i=1, 2, \dots, n$), определяемых, в свою очередь, по формуле:

$$d_i = e^{-e^{-y'_i}} = \exp[-\exp(-y'_i)], \quad (18)$$

где y'_i – кодированное значение i -го показателя, e – основание натурального логарифма. Для нахождения значений y'_i , d_i и D_n (n – номер строки матрицы) строим шкалу желательности для частных показателей.

Таблица 2 – Матрица плана 3×3 и результаты эксперимента

N	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	$y_1=V_{кр}$	$y_2=\sigma_a$	$y_3=KCU$	$y_4=KCV$	D
1	-	-	+	+	+	3,68	1873	680	320	0,686
2	-	0	0	+	0	3,00	1880	480	315	0,496
3	-	+	-	+	+	2,50	1870	280	240	0,220
4	0	-	0	0	+	3,92	1710	800	400	0,594
5	0	0	0	0	0	3,70	1800	720	400	0,714
6	0	+	0	0	+	3,46	1872	674	340	0,529
7	+	-	-	+	+	3,27	1886	600	286	0,531
8	+	0	0	+	0	4,00	1880	590	286	0,643
9	+	+	+	+	+	5,00	1875	540	257	0,614

Таблица 3 – Шкала желательности

d_i	y'_i	$y_1=V_{кр}$	$y_2=\sigma_n$	$y_3=KCU$	$y_4=KCV$
1,00–0,80	3,00	5,00	1900	800	400
0,80–0,63	1,50	4,50	1850	670	360
0,63–0,37	0,85	4,00	1800	540	320
0,37–0,20	0,00	3,50	1750	410	280
0,20–0,00	-0,5	3,00	1700	280	240

$d_i = (1,00-0,80)$ соответствует очень хорошему результату; $d_i = (0,80-0,63)$ соответствует хорошему результату; $d_i = (0,63-0,37)$ – удовлетворительному; $d_i = (0,37-0,20)$ – плохому и $d_i = (0,20-0,00)$ – очень плохому результату.

Вносим в шкалу желаемые уровни показателей. Например, для $V_{кр}$ это 5,0; 4,5; 4,0; 3,5 и 3,0. Так как конкретные значения показателей таблицы 2 лишь частично совпадают со значениями таблицы 3, нужно для данных таблицы 2 определить y'_i и d_i . Для этого строим график функции желательности, где по оси ординат откладываем значения d_i , а по оси абсцисс – y'_i (рис. 1). Кривую строим, пользуясь шкалой желательности. При $y'_i = -0,5$, $d_i = 0,2$; при $y'_i = 0,0$, $d_i = 0,37$; при $y'_i = 0,85$, $d_i = 0,63$; при $y'_i = 1,5$, $d_i = 0,8$; при $y'_i = 3,0$, $d_i \approx 1,0$ (точнее 0,951). Затем проводим четыре прямые параллельно оси Oy' и на них наносим данные таблицы 2. Пользуясь этим графиком, находим значения y'_i для данных таблицы 2.

Например, для $y_1=V_{кр} = 3,68$, $y'_i = 0,306$, т. к. 3,68 лежит на отрезке 3,5–4,0, составляя пропорцию, получим

$$\left| \begin{array}{l} 0,85 - 0,50 \\ y' - 0,18 \end{array} \right| \text{ откуда } y'_i = (0,85 \cdot 0,18) / 0,50 = 0,306.$$

Найдя таким образом значения y'_i для всех данных таблицы 1, по формуле (17) определим величину d_i , а по формуле (1) – величину D . Результаты этих расчетов приведены в таблице 4.

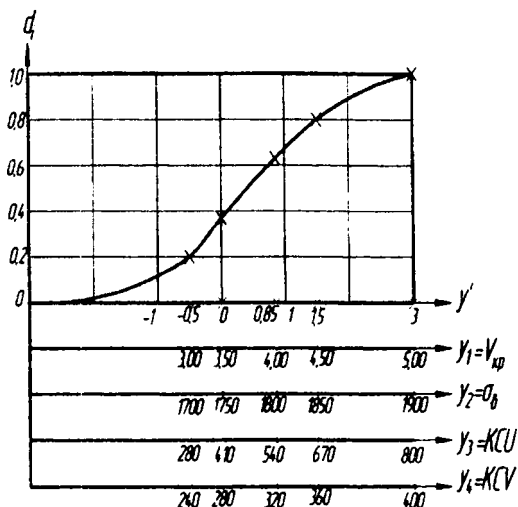


Рисунок 1 – График функции желательности

Значение D также вносим в таблице 2. Из таблиц 2 и 4 видно, что наибольшее значение $D = 0,714$ получено в опыте $N 5$, т. е. при $x_1 = 0$ (Ni) $x_2 = 0$ (1,0%). Действительно, в этом случае $y_1 = V_{кр} = 3,7$ мм/мин, $y_2 = \sigma_b = 1800$ МПа, $y_3 = KCU = 720$ Дж/м², $y_4 = KCV = 400$ Дж/м² (хороший результат).

В опыте $N 1$ $D = 0,686$ (также хороший результат) $x_1 = -1$ (Si) $x_2 = -1$ (0,5%). $y_1 = V_{кр} = 3,68$ мм/мин, $y_2 = \sigma_b = 1873$ МПа, $y_3 = KCU = 680$ Дж/м², $y_4 = KCV = 320$ Дж/м².

В опыте № 8 $D = 0,643$ $x_1 = +1$ (Co) $x_2 = 0$ (1,0%), $y_1 = V_{кр} = 4$ мм/мин, $y_2 = \sigma_b = 1880$ МПа, $y_3 = KCU = 590$ Дж/м², $y_4 = KCV = 280$ Дж/м².

Пользуясь таблицей 2., можно найти уравнение регрессии для D :

$$y_D = D = 0,672 + 0,064 x_1 - 0,075 x_2 + 0,137 x_1 x_2 - 0,081 x_1^2 - 0,089 x_2^2. \quad (19)$$

Максимальное расчетное значение $y_D = 0,672$ будет при $x_1 = 0$ и $y_2 = 0$, т. е. по условиям опыта *N 5*. Преимуществом показателя *D* перед другими является то, что он не «пропустит» слабое значение одного (или нескольких) частных показателей y_i . Подставляя в уравнение (19) кодированные уровни x_1 , получим уравнения для каждой присадки:

при $x_1 = -1$ (Si)

$$y_D = 0,527 - 0,212 x_2 - 0,089 x_2^2, \quad (20)$$

с точкой перегиба $x_{2e} = -\frac{0,212}{2 \cdot 0,089} = -1,19$ (0,4% Si), где

$$y_D = 0,653;$$

при $x_1 = 0$ (Ni)

$$y_D = 0,672 - 0,075 x_2 - 0,089 x_2^2, \quad (21)$$

с точкой перегиба $x_{2e} = -\frac{0,075}{2 \cdot 0,089} = -0,42$ (0,79% Ni), где

$$y_D = 0,688;$$

при $x_1 = +1$ (Co)

$$y_D = 0,655 + 0,062 x_2 - 0,089 x_2^2, \quad (22)$$

с точкой перегиба $x_{2e} = -\frac{0,062}{2 \cdot 0,089} = 0,348$ (0,67% Co), где

$$y_D = 0,666.$$

Таблица 4 – Значения y_i , y'_i , d_i , D_n

N	y_1	y'_1	d_1	y_2	y'_2	d_2	y_3	y'_3	d_3	y_4	y'_4	d_4	D
1	3,68	0,306	0,479	1873	2,19	0,894	680	1,615	0,820	320	0,850	0,630	0,686
2	3,00	-0,50	0,200	1880	2,40	0,913	480	0,458	0,531	315	0,744	0,622	0,496
3	2,50	-1,00	0,066	1870	2,10	0,885	280	-0,50	0,200	240	-0,50	0,200	0,220
4	3,92	0,714	0,613	1710	-0,4	0,225	800	3,00	0,951	400	3,00	0,951	0,594
5	3,70	0,34	0,491	1800	0,85	0,630	720	2,077	0,882	400	3,00	0,951	0,714
6	3,46	-0,04	0,353	1872	2,16	0,891	674	1,546	0,808	340	1,175	0,309	0,529
7	3,27	-0,23	0,284	1886	2,58	0,927	600	1,15	0,729	286	0,128	0,415	0,531
8	4,00	0,85	0,630	1880	2,40	0,913	590	1,10	0,717	286	0,128	0,415	0,643
9	5,00	3,00	0,951	1875	2,25	0,900	540	0,85	0,630	257	-0,288	0,264	0,614

Таким образом, присадки Ni (0,79%) обеспечивают более высокий уровень комплексных свойств шва по сравнению с Si и Co.

Литература

1. **Присадочный материал для сварки высокопрочных конструкционных легированных сталей** / Л. Л. Старова, В. Г. Ковальчук, М. Т. Борисов [и др.] // Сварочное производство. – 2005. – № 9 (850). – С. 3–6.
2. **Мусяиченко, В. Ф.** Влияние кобальта на структуру и свойства высокопрочного металла шва / В. Ф. Мусяиченко, Л. И. Миходуй, В. Г. Васильев // Автоматическая сварка. – 1984. – № 7. – С. 45–48.
3. **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Статистика, 1976. – 279 с.
4. **Вознесенский, В. А.** Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.

УДК 621.746

И.В. РАФАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук,
А.В. АРАБЕЙ,
С.В. КИСЕЛЕВ,
П.С. ГУРЧЕНКО, д-р техн. наук (БНТУ)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ В СИСТЕМАХ ТЕРМИЧЕСКОГО ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА

Термический анализ расплавов является высокочувствительным методом измерения теплофизических характеристик вещества и широко используется как в научных целях, так и для решения практических задач. В научных целях этот метод применяется при