

УДК 621.791.72

Г. Младенов

Институт электроники Болгарской академии наук, г. София, Болгария

Е. Колева

Химико-технологический и металлургический университет, г. София, Болгария

В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ

Рассмотрена многокритериальная оптимизация процесса электронно-лучевой сварки с использованием экспериментальных данных, полученных при выполнении сварочных проходов на образцах из аустенитной стали. Применение статистического подхода при анализе геометрических характеристик зон проплавления позволяет получить достаточно точные модели процесса сварки, описывающие зависимость геометрии швов на нержавеющей стали от параметров режима сварки. Решен ряд конкретных задач, связанных с повышением качества сварных швов при электронно-лучевой сварке данных сталей. Разработан графический пользовательский интерфейс, позволяющий осуществлять выбор и оптимизацию параметров процесса сварки для получения сварных швов с заданными качественными характеристиками.

Полученные модели применимы в компьютерной экспертной системе, которая может быть разработана для поддержки операторов при выборе сварочных режимов в соответствии с требованиями заказчика и технических стандартов. Такие системы могут быть использованы в образовании и обучении операторов и в прогнозировании и оптимизации технологии электронно-лучевой сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронный пучок, фокусировка пучка, расщепление пучка, моделирование, статистические методы, регрессивные модели, многокритериальная оптимизация, графическая оптимизация.

G. Mladenov

Institute of Electronics of Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

E. Koleva

University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, Bulgaria

V.Y. Belenkiy, D.N. Trushnikov

Perm National Research Polytechnic University

SIMULATION AND OPTIMIZATION ELECTRON BEAM WELDING STEELS

Considered multi-objective optimization process, electron beam welding (EBW) using the experimental data obtained during the execution of welding passes on samples of austenitic steel. The application of statistical approach to the analysis of the geometric characteristics of the zones of penetration provides a fairly accurate model of the process EBW, which describe the dependence of the

geometry of the welds on stainless steel from the parameters of welding. Solved a number of specific tasks related to improving the quality of welds in the EBW data steels. Developed a graphical user interface allowing the selection and optimization of process parameters EBW to obtain welds with specified performance characteristics.

The resulting models are applicable in the computer expert system, which can be developed to support operators in the selection of welding modes in accordance with customer requirements and technical standards. Such systems can be used in education and training of operators and in forecasting and optimization techniques of electron beam welding.

Keywords: electron-beam welding, electron beam, beam focusing, beam splitting, modeling, statistical methods, regression models, multi-objective optimization, graphic optimization.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) со стационарными пучками имеет ограниченные возможности для оптимизации формы поперечного сечения шва: путем изменения тока или фокусировки пучка, скорости сварки и/или расстояния электронной пушки до поверхности свариваемого образца.

Использование сварки с периодическим изменением некоторого параметра пучка, при котором луч перемещается локально в направлении вдоль или поперек стыка, позиция фокуса перемещается вверх и вниз по оси пучка, а также сварки с расщепленным пучком влияет на динамическое распределение мощности вокруг позиции неподвижного луча и на тепловые источники. Однако для последних двух способов рекомендации в выборе параметров периодических изменений или расщепления пучка, даже в случае осцилляции, устарели и носят противоречивый характер.

Сложность процессов взаимодействия интенсивного пучка с жидким металлом в сварочной ванне и с парами обрабатываемого материала препятствует созданию физической или тепловой модели, позволяющей прогнозировать геометрические параметры поперечного сечения сварочного шва, и прежде всего ширину и глубину. Дополнительной и не всегда очевидной причиной неточности модели является пренебрежение положением фокуса пучка по отношению к поверхности образца, также пренебрегают расстоянием от пушки до поверхности образца (т.е. пространственным и угловым распределением мощности пучка).

Наши исследования [1–8] показали, что для определенного материала при достаточном числе опытов можно прогнозировать глубину и ширину шва на основе статистических методов. Такие модели можно использовать в современных компьютерных экспертных системах, для помощи оператору сварочной машины или для автоматического ведения процесса сварки. В этой статье определяются характеристики качества, связанные с полученной формой поперечного се-

чения швов на основе применения статистического подхода и оценки регрессионных моделей.

Оптимизация электронно-лучевой сварки связана с выбором параметров процесса, которые обеспечивают желательные геометрические характеристики шва. Этот выбор связан с правильной формулировкой критериев оптимизации, а также с использованием оптимизационных методов. Рассмотрена многокритериальная оптимизация процесса электронно-лучевой сварки, решено несколько конкретных заданий, связанных с повышением качества сварочных швов. Разработан графический пользовательский интерфейс, позволяющий осуществить выбор и оптимизацию параметров процесса и помогающий оператору при подборе соответствующего режима работы для получения сварных швов с заданными качественными характеристиками.

Эксперимент 1. В эксперименте рассматривается ЭЛС нержавеющей стали. Изучаются геометрические характеристики поперечных сечений 25 сварочных швов, полученных при различных условиях сварки. Сварочный процесс проводили с периодическими отклонениями позиции фокуса пучка – при разных значениях изменения тока фокусировки ($2A$) и частот F периодических изменений позиции фокуса пучка или без таких изменений (амплитуда $2A = 0$ мА, частота $F = 0$ Гц). Скорость сварки v и тока фокусировки I_f также варьировали. Ускоряющее напряжение 60 кВ. Ток пучка был постоянным – 31 мА. Области изменения этих параметров представлены в табл. 1.

Таблица 1

Области изменения параметров ЭЛС, эксперимент 1

Параметр	$2A$, мА	F , Гц	v , мм/с	I_f , мА
Минимум	0	0	5	815
Максимум	20	686	7	854

Эксперимент 2. Процесс сварки был проведен с расщеплением электронного пучка на две части, сварка выполнялась «двумя расплавленными областями». Качество сварки шва является главным преимуществом сварки несколькими расплавленными областями, при этом получают более однородные сварные швы. Пористость и количество корневых пиков значительно снижаются. Расщепление было выполнено путем передачи прямоугольного сигнала к отклоняющим катушкам. Распределение энергии между двумя лучами определяется параметром

$$\gamma = (P_2 - P_1) / (P_1 + P_2),$$

где P_1 и P_2 – мощности первого и второго пучка соответственно.

Если γ имеет положительное значение, то второй электронный пучок более мощный, чем первый. Ток фокусировки поддерживался постоянным: $I_f = 835$ мА. Области изменения параметров ЭЛС для этого эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2

Области изменения параметров ЭЛС, эксперимент 2

Параметр	L , мм	F , кГц	γ	v , мм/с	I_b , мА
Минимум	2	3	-3	5	40
Максимум	6	20	3	15	64,5

Примечание. L – расстояние между двумя лучами (расплавленными областями), F – частота развертки сигнала, I_b – ток пучка.

Рассмотрены следующие геометрические характеристики сварочных швов: H , B и $B_{0,5H}$ – соответственно глубина шва, ширина шва на поверхности и ширина, измеренная на 1/2 от глубины шва, а также поверхность поперечного сечения шва S .

Статистические модели ЭЛС. Регрессионные модели оцениваются по указанным выше геометрическим характеристикам. Оценка моделей для нержавеющей стали представлена в табл. 3.

В этих регрессионных моделях параметры процесса z_i обозначаются как x_i в области $[-1...1]$ и могут быть получены из натуральных значений факторов z_i по уравнению

$$x_i = (2z_i - z_{i,\min} - z_{i,\max}) / (z_{i,\max} - z_{i,\min}).$$

В регрессионных моделях факторы в натуральном z_i и кодированном виде x_i означают следующее:

Эксперимент 1: x_1 (z_1) – изменение амплитуды тока фокусировки $2A$, мА; x_2 (z_2) – частота F периодических отклонений позиции фокуса пучка, Гц; x_3 (z_3) – скорость сварки v , мм/с, и x_4 (z_4) – ток фокусировки I_f , мА.

Эксперимент 2: x_1 (z_1) – параметр L – расстояние между двумя лучами, мм; x_2 (z_2) – частота F , развертки сигнала, кГц; x_3 (z_3) – параметр γ , определяющий распределение энергии между двумя лучами; x_4 (z_4) – скорость сварки v , мм/с; x_5 (z_5) – ток пучка I_b , мА.

В табл. 3, 4 представлены также коэффициенты детерминации R^2 и скорректированный параметр R^2_{adj} – квадраты коэффициентов множественной корреляции, которые являются мерой точности модели (чем ближе к 100 %, тем лучше модель описывает изменение характеристик с изменением параметров процесса ЭЛС).

Таблица 3

Регрессионные модели геометрических характеристик сварных швов, эксперимент 1

Параметр	Регрессионные модели	R^2 , %	R^2_{adj} , %
H	$y = 7,298 - 0,350x_1 - 0,415x_3 - 3,471x_4^2 - 1,009x_4^3 - 1,434x_1x_4 + 0,814x_2x_3x_4 + 1,509x_1x_4^3$	86,82	81,39
B	$y = 4,691 + 0,138x_2 - 0,186x_3 + 0,595x_4 + 0,502x_1x_4^3 - 0,274x_2x_4$	81,67	76,84
$B_{0,5H}$	$y = 1,372 + 0,294x_1 - 0,325x_2 - 0,274x_3 + 1,317x_4^2 + 0,697x_1x_2x_4 - 0,354x_3x_4$	86,33	81,50
S	$y = 13,076 - 2,106x_3 - 1,561x_4^2 - 1,598x_2x_4 - 1,449x_3x_4 + 1,667x_2x_4^2 + 1,666x_3x_4^2$	85,11	79,86

Таблица 4

Регрессионные модели геометрических характеристик сварных швов, эксперимент 2

Параметр	Регрессионные модели	R^2 , %	R^2_{adj} , %
H	$y = 6,024\ 049\ 7 - 1,553\ 813\ 6x_2 - 1,266\ 056\ 6x_4 - 1,273\ 074\ 1x_2^2 - 0,756\ 420\ 13x_3^2 + 0,748\ 118\ 77x_4^2 - 2,232\ 865\ 1x_5^2 + 1,075\ 937\ 1x_1x_3 + 1,526\ 118\ 7x_1x_5$	89,71	83,82
B	$y = 3,128\ 438\ 1 - 0,330\ 677\ 96x_4 + 1,510\ 153\ 1x_2^2 + 0,906\ 661\ 41x_3^2 + 0,966\ 678\ 32x_5^2 + 0,601\ 298\ 91x_1x_2 + 1,934\ 086\ 6x_2x_3 + 0,359\ 176\ 4x_1x_3 - 0,767\ 054\ 67x_1x_4 - 0,805\ 461\ 79x_2x_4 + 0,400\ 008\ 96x_1x_5$	92,87	86,92
$B_{0,5H}$	$y = 2,166\ 797\ 3 + 1,060\ 401\ 7x_2 - 0,485\ 439\ 73x_4 + 0,658\ 864\ 41x_2^2 - 0,214\ 484\ 66x_4^2 - 0,512\ 224\ 93x_1x_3 - 0,325\ 154\ 73x_2x_4 - 0,247\ 172\ 02x_1x_5$	90,67	86,31
S	$y = 9,336\ 364\ 2 - 1,726\ 333\ 1x_2 - 2,391\ 247\ 8x_4 + 0,961\ 173\ 86x_2^2 + 2,060\ 938\ 6x_4^2 + 1,985\ 624\ 9x_1x_2 - 2,963\ 733\ 7x_1x_4 + 3,852\ 549\ 1x_1x_5 + 0,813\ 770\ 72x_1x_3$	91,93	87,32

Оцененные регрессионные модели можно использовать для изучения изменения геометрических характеристик шва в зависимости от параметров процесса ЭЛС. На рис. 1 показано изменение глубины сварочных швов (эксперимент 1) при токе фокусировки 834,5 мА и разных скоростях сварки. Увеличение скорости приводит к уменьшению глубины шва при одинаковых других условиях. В исследованном диапазоне частот изменение колебаний позиции фокуса пучка на глубину шва не влияет.

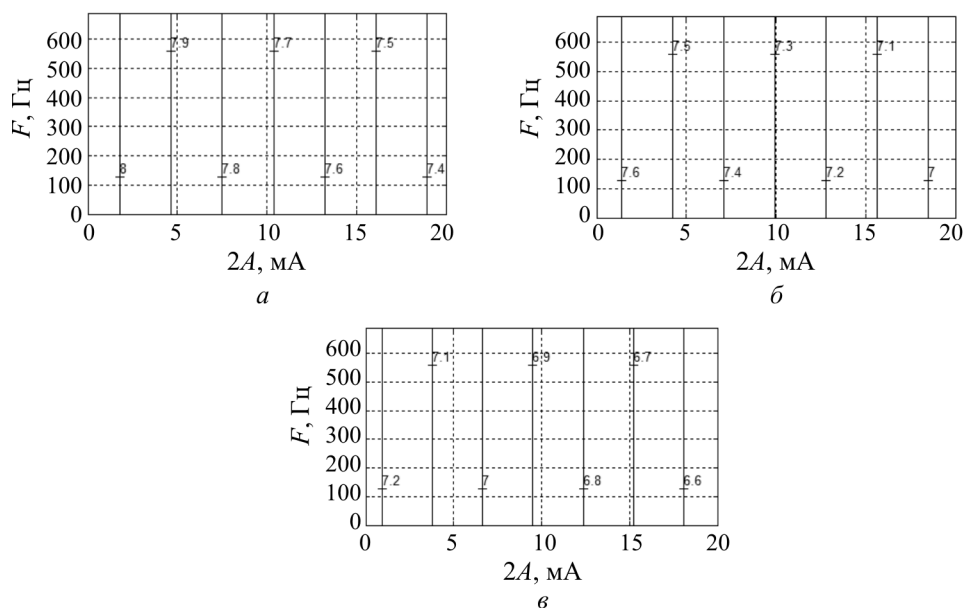


Рис. 1. Изменение глубины сварочных швов в зависимости от амплитуды тока фокусировки и частоты осцилляции позиции фокуса при $I_f = 834,5$ мА и скорости сварки: а – 5 мм/с; б – 6 мм/с; в – 7 мм/с

Изменение глубины и ширины сварных швов в зависимости от тока фокусировки и скорости сварки при отсутствии осцилляции позиции фокуса пучка показано на рис. 2, при периодических изменениях позиции фокуса пучка – на рис. 3. На рис. 4 представлено изменение глубины сварочных швов в зависимости от изменения тока пучка и скорости сварки при изменении расстояния между двумя частями расщепленного пучка.

Оптимизация процесса ЭЛС. Оптимизация электронно-лучевой сварки связана с выбором параметров процесса, которые обеспечивают заданные геометрические характеристики шва. Исходя из правильно

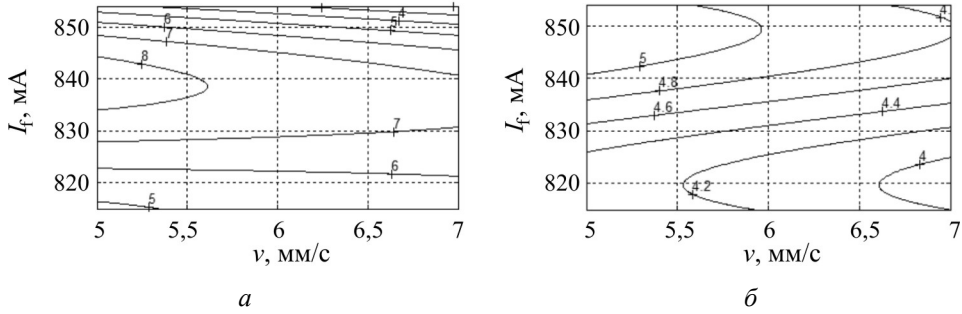


Рис. 2. Изменение глубины (а) и ширины (б) сварочных швов в зависимости от изменения тока фокусировки и скорости сварки при отсутствии осцилляции позиции фокуса пучка, амплитуда $2A = 0$ мА, частота $F = 0$ Гц

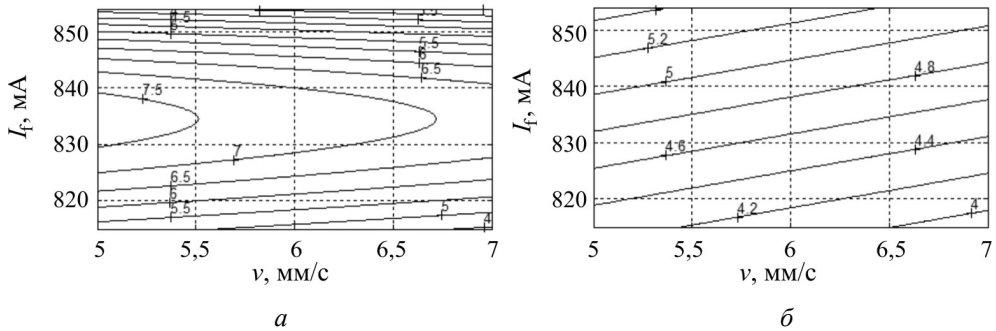


Рис. 3. Изменение глубины (а) и ширины (б) сварочных швов в зависимости от изменения тока фокусировки и скорости сварки v при осцилляции тока фокусировки пучка с амплитудой $2A = 10$ мА и частотой $F = 343$ Гц

подобранных оптимизационных критериев, с помощью оптимизационного метода [1, 4, 5] (многокритериальная оптимизация) ЭЛС применяется для решения нескольких конкретных заданий, связанных с повышением качества изделий.

Обычно требуется получение швов данной глубины H и ширины B . Дополнительные расчетные характеристики для сварки качества геометрии шва могут быть определены следующим образом:

– $\Delta_1 = (B - B_{0,5H})$ – разница между B и $B_{0,5H}$, которая характеризует изменение формы сварного шва, связанное с увеличением сварочной головки;

– $\Delta_2 = (H/B)$ – соотношение глубины и ширины шва. Чем больше этот параметр, тем более глубоки и узки сварные швы.

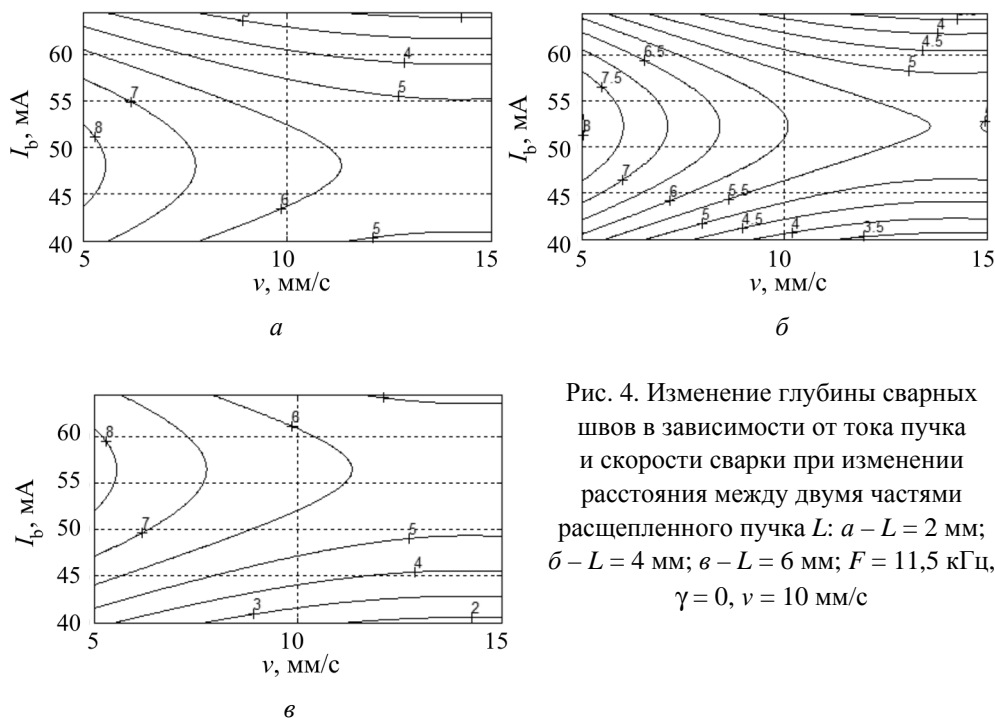


Рис. 4. Изменение глубины сварных швов в зависимости от тока пучка и скорости сварки при изменении расстояния между двумя частями расщепленного пучка L : $a - L = 2$ мм; $б - L = 4$ мм; $в - L = 6$ мм; $F = 11,5$ кГц, $\gamma = 0$, $v = 10$ мм/с

В табл. 5, 6 представлены экстремальные значения глубины (максимум) и ширины сварочных швов, значения дополнительных характеристик качества шва Δ_1 (минимум) и Δ_2 (максимум), а также значения параметров ЭЛС, при которых они получены. Видно, что в эксперименте 1 с периодическим изменением позиции фокуса пучка самые глубокие швы получаются при сварке без осцилляции позиции фокуса, при маленькой скорости сварки, $I_f = 839,33$ мА.

Таблица 5

Экстремальные значения характеристик качества, эксперимент 1

x_1 ($2A - z_1$)	x_2 ($F - z_2$)	x_3 (v)	x_4 ($I_f - z_4$)	H_{\max} , мм	B_{\min} , мм	$\Delta_{1,\min}$, мм	$\Delta_{2,\max}$
-1,000 0 (0 мА)	-1,000 0 (0 Гц)	-1,000 0 (5 мм/с)	0,247 8 (839,33 мА)	8,69	-	-	-
1,000 0 (20 мА)	1,000 0 (686 Гц)	1,000 0 (7 мм/с)	1,000 0 (854 мА)	-	3,62	-	-
1,000 0 (20 мА)	-1,000 0 (0 Гц)	1,000 0 (5 мм/с)	1,000 0 (854 мА)	-	-	0	-
-0,999 9 (0,001 мА)	-0,987 7 (0,1230 Гц)	1,000 0 (7 мм/с)	-0,308 1 (828,49 мА)	-	-	-	1,78

Таблица 6

Экстремальные значения характеристик качества, эксперимент 2

x_1 ($L - z_1$)	x_2 ($F - z_2$)	x_3 (γ)	x_4 ($v - z_4$)	x_5 ($I_b - z_5$)	H_{max} , мм	B_{min} , мм	$\Delta_{1, min}$, мм	$\Delta_{2, max}$
1,000 0 (6 мм)	-0,613 1 (6,29 кГц)	0,716 4 (2,15)	-1,000 0 (5 мм/с)	0,341 7 (56,44 мА)	9,16	-	-	-
1,000 0 (6 мм)	0,614 7 (16,73 кГц)	-0,857 2 (-2,57)	1,000 0 (15 мм/с)	-0,198 0 (49,82 мА)	-	1,77	-	-
1,000 0 (6 мм)	1,000 0 (20 кГц)	-1,000 0 (-3)	1,000 0 (15 мм/с)	-1,000 0 (40 мА)	-	-	0	-
-1,000 0 (2 мм)	-0,432 8 (7,82 кГц)	0,352 6 (1,06)	-1,000 0 (5 мм/с)	0,196 2 (54,65 мА)		-	-	3,56

Соотношение глубины и ширины швов (эксперимент 1) имеет максимальное значение при режимах без периодических изменений позиции фокуса, при высоких скоростях сварки и токе фокусировки 828,49 мА. При экспериментах с расщеплением пучка (эксперимент 2), можно увидеть, что при соотношении 72 % на второй луч и 28 % на первый получаются и самые глубокие сварочные швы, при низких значениях частот (6,29 кГц), большом расстоянии между пучками ($L = 6$ мм), минимальной скорости сварки 5 мм/с и токе луча 56,44 мА. При этом соотношение глубины и ширины швов здесь получается больше – 3,56.

Для применения многокритериальной оптимизации параметров используются три подхода:

- графическая оптимизация – используется, когда получают сварные швы с геометрией, определяемой в пределах допусков приемлемых характеристик;
- функция желательности – применяется, когда определены требования к значениям в пределах некоторой приемлемой области;
- Парето-оптимизация – применяется, когда требуется минимальное или максимальное значение характеристик. Затем получается группа компромиссных решений.

Графическая оптимизация сделана при следующих оптимизационных параметрах:

– эксперимент 1 (рис. 5): глубина сварного шва: $4 \text{ мм} \leq H \leq 7 \text{ мм}$, ширина шва: $4 \text{ мм} \leq B \leq 5 \text{ мм}$, ширина шва на расстоянии $0,5H - B_{0,5H}$: $2 \text{ мм} \leq B_{0,5H} \leq 3 \text{ мм}$.

– эксперимент 2 (рис. 6): глубина сварного шва: $5 \text{ мм} \leq H \leq 6 \text{ мм}$, ширина шва: $3,5 \text{ мм} \leq B \leq 4,5 \text{ мм}$, ширина шва на расстоянии $0,5H - B_{0,5H}$: $2 \text{ мм} \leq B_{0,5H} \leq 3 \text{ мм}$.

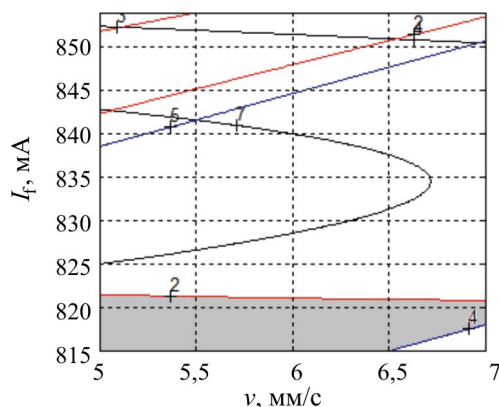


Рис. 5. Графическая оптимизация – эксперимент 1

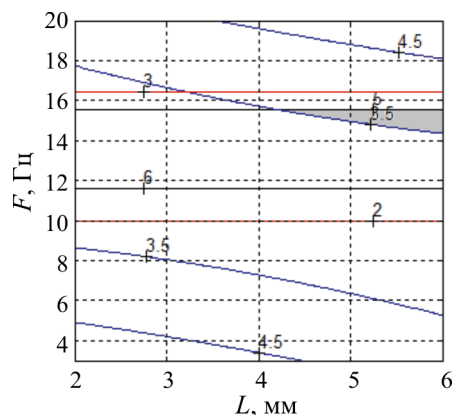


Рис. 6. Графическая оптимизация – эксперимент 2

Оптимизация с применением функции желательности сделана при следующих оптимизационных параметрах:

– эксперимент 1 (рис. 7): заданные значения геометрических характеристик: глубина сварочного шва $H = 5 \text{ мм}$, ширина шва $B = 4 \text{ мм}$, ширина шва на расстоянии $0,5H - B_{0,5H} = 2 \text{ мм}$. Допустимые диапазоны изменения: $4 \text{ мм} \leq H \leq 7 \text{ мм}$, $3 \text{ мм} \leq B \leq 5 \text{ мм}$, ширина шва на расстоянии $0,5H - B_{0,5H}$: $1 \text{ мм} \leq B_{0,5H} \leq 3 \text{ мм}$;

– эксперимент 2 (рис. 8): глубина сварочного шва $H = 6 \text{ мм}$, ширина шва $B = 4 \text{ мм}$, ширина шва на расстоянии $0,5H - B_{0,5H} = 2 \text{ мм}$. Допустимые диапазоны изменения: $3 \text{ мм} \leq H \leq 7 \text{ мм}$: $2 \text{ мм} \leq B \leq 6 \text{ мм}$: $1 \text{ мм} \leq B_{0,5H} \leq 3 \text{ мм}$.

На рис. 7, 8 можно увидеть области, где функция желательности принимает самые высокие значения, а в табл. 7, 8 показаны оптимальные параметры процесса ЭЛС и оптимальные значения функции желательности для двух серий экспериментов.

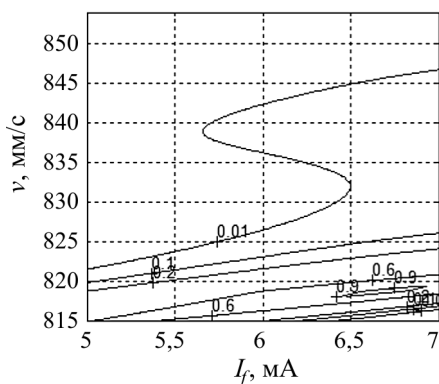


Рис. 7. Функция желательности – эксперимент 1:
 $2A = 20 \text{ мА}, F = 548,8 \text{ Гц}$

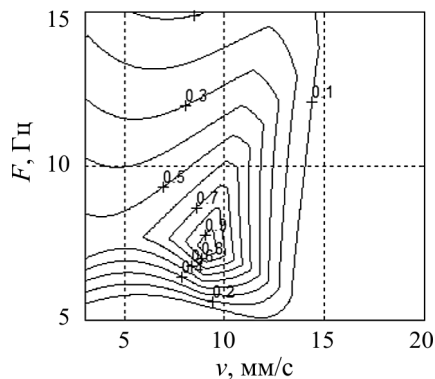


Рис. 8. Функция желательности – эксперимент 2:
 $L = 4,4 \text{ мм}, \gamma = 0, I_b = 46,125 \text{ мА}$

Таблица 7

Оптимальные значения функции желательности и параметры процесса ЭЛС, эксперимент 1

№ п/п	$2A$	F	v	I_f	D
1	20	548,8	6,6	818,90	0,862 9
2	20	617,4	6,1	816,95	0,865 0
3	17	548,8	6,8	818,90	0,867 6
4	20	548,8	6,9	818,90	0,877 2
5	18	548,8	6,7	818,90	0,878 9
6	18	548,8	6,8	818,90	0,891 1
7	19	548,8	6,7	818,90	0,899 0
8	19	548,8	6,8	818,90	0,914 4
9	20	548,8	6,7	818,90	0,918 9
10	20	548,8	6,8	818,90	0,937 7

Таблица 8

Оптимальные стоимости функции желательности и параметры процесса ЭЛС, эксперимент 2

№ п/п	L	F	γ	v	I_b	D
1	4,4	9,8	0	2,5	46,125	0,928 3
2	4,4	9,8	0	3,0	46,125	0,928 3
3	4,4	9,8	0	3,5	46,125	0,928 3
4	4,4	9,8	0	4,0	46,125	0,928 3
5	4,4	9,8	0	4,5	46,125	0,928 3

Окончание табл. 8

№ п/п	L	F	γ	ν	I_b	D
6	4,4	9,8	0	5,0	46,125	0,928 3
7	4,4	9,8	0	5,5	46,125	0,928 3
8	4,4	9,8	0	6,0	46,125	0,928 3
9	4,4	9,8	0	6,5	46,125	0,928 3
10	4,4	9,8	0	7,0	46,125	0,928 3

Парето-оптимизация применена для следующих оптимизационных задач:

– эксперимент 1: одновременно требуется максимальное значение геометрической характеристики «глубина сварочного шва» и максимальное значение качественной характеристики $\Delta_2 = (H/B)$;

– эксперимент 2: одновременно требуется максимальное значение глубины и минимальное значение ширины сварочного шва.

При такой формулировке оптимизационного задания нет одного наилучшего решения. Получено множество компромиссных решений. В каждом из двух решений только один критерий является оптимальным. Эти множества решений называются Парето-фронтами. Они представлены на рис. 9, 10 для обеих серий экспериментов более темными квадратами.

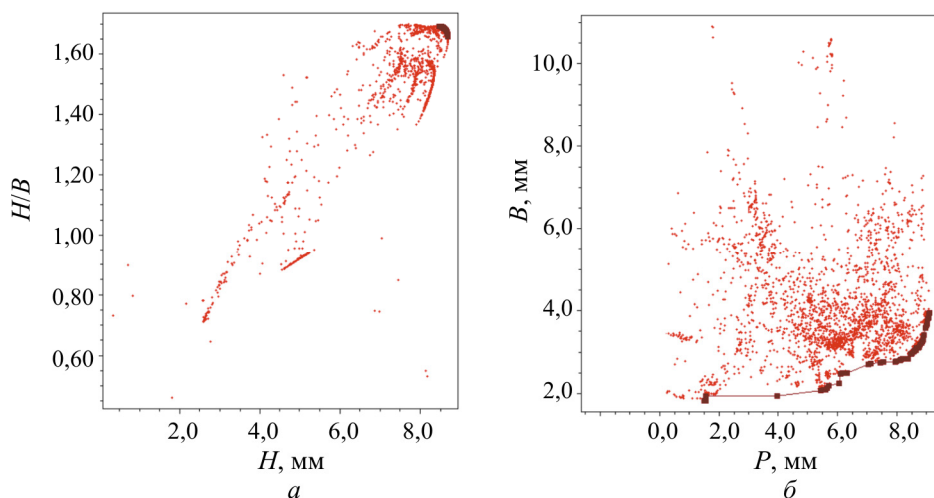


Рис. 9. Парето-фронт: a – эксперимент 1; b – эксперимент 2

Параметры процесса ЭЛС при получении этих оптимальных решений приведены в табл. 9, 10. Выбирать из них можно по другим дополнительными показателями качества или по оценке оператора, которая важнее других характеристик оптимизации. Например, на рис. 9, б видно, что диапазон решений для глубины – 1,6–9,0 мм, для ширины сварных швов – 2,0–3,9 мм. Если выбрать шов максимальной глубины – 9 мм, тогда ширина будет 3,9 мм; если выбрать шов минимальной ширины – 2 мм, тогда глубина сварного шва будет только 1,6 мм. Необходимо оценить, насколько важна каждая из этих характеристик.

Таблица 9

Оптимальные значения: H – максимум, $\Delta_2 = (H/B)$ – максимум и режимы ЭЛС, эксперимент 1

№ п/п	$x_1 (2A)$	$x_2 (F)$	$x_3 (v)$	$x_4 (I_f)$	H	$\Delta_2 = (H/B)$
1	-0,999 8	-1,000 0	-1,000 0	0,201 2	8,673 4	1,666 7
2	-0,999 8	-1,000 0	-1,000 0	0,193 5	8,668 6	1,669 0
3	-1,000 0	-1,000 0	-1,000 0	0,115 2	8,581 7	1,686 0
4	-0,999 9	-1,000 0	-1,000 0	0,214 9	8,680 0	1,662 4
5	-1,000 0	-1,000 0	-1,000 0	0,157 7	8,637 6	1,678 2
6	-1,000 0	-1,000 0	-1,000 0	0,148 7	8,627 5	1,680 1
7	-0,999 9	-1,000 0	-1,000 0	0,135 3	8,610 6	1,682 7
8	-1,000 0	-1,000 0	-1,000 0	0,163 0	8,643 1	1,677 0
9	-1,000 0	-1,000 0	-1,000 0	0,197 8	8,671 4	1,667 7
10	-1,000 0	-0,999 9	-1,000 0	0,223 1	8,682 9	1,659 7

Таблица 10

Оптимальные значения: H – максимум, B – минимум и режимы ЭЛС, эксперимент 2

№ п/п	$x_1 (L)$	$x_2 (F)$	$x_3 (\gamma)$	$x_4 (v)$	$x_5 (I_b)$	H	B
1	-0,882 3	-0,186 2	-0,085 0	-1,000 0	-0,268 5	8,559 2	3,012 0
2	-0,887 7	-0,117 2	-0,134 7	-0,998 0	-0,185 1	8,486 4	2,956 8
3	0,999 9	-0,794 3	0,865 8	-0,998 4	0,259 7	9,075 1	3,890 4
4	-0,874 6	-0,131 3	-0,114 7	-0,998 2	0,115 5	8,129 5	2,828 0
5	-0,868 8	-0,159 2	-0,102 4	-0,998 5	-0,211 8	8,517 7	2,976 6
6	-0,902 5	-0,182 7	-0,142 5	-1,000 0	-0,272 2	8,612 1	3,054 1
8	-0,919 3	-0,196 9	-0,087 7	-0,999 3	-0,295 4	8,593 5	3,025 4
9	-0,999 7	-0,818 5	0,907 5	-1,000 0	0,315 3	6,155 1	2,491 0
10	-0,930 3	-0,289 1	-0,179 8	-0,999 7	-0,227 7	8,743 3	3,125 5

Сделаем следующие выводы. Рассмотренная методология на основе статистических моделей способна установить взаимосвязи, которые трудно установить при анализе исключительно изображений поперечных сечений сварных соединений. Модели применимы в компьютерной экспертной системе, которая может быть полезна операторам при выборе сварочных режимов в соответствии с требованиями заказчика и технических стандартов. Эти системы могут быть использованы в образовании и обучении операторов и в прогнозировании и оптимизации технологии электронно-лучевой сварки.

Для того чтобы улучшить оцененные модели, необходимо проводить большее число экспериментов. Еще один способ достижения точности – это расширение области экспериментов с параметрами, которые не приняты во внимание в рассмотренной серии опытов.

Авторы выражают свою благодарность за финансовую поддержку РФФИ, гранты 13-08-00397, 14-08-96008_а_урал, и Министерству образования Пермского края.

Список литературы

1. Koleva E. Statistical modeling and computer programmes for optimization of the electron beam welding of stainless steel // Vacuum. – 2001. – Vol. 62, no. 2–3. – С. 151–157.
2. Koleva E. EB weld parameters and thermal efficiency improvement // Vacuum. – 2005. – Vol. 77. – С. 413–421.
3. Koleva E., Vuchkov I., Model-based approach for quality improvement of EBW applications in mass production // Vacuum. – 2005. – Vol. 77. – С. 423–428.
4. Koleva E., Mladenov G., Process Parameter Optimization and Quality Improvement at Electron Beam Welding, Welding: Processes, Quality, and applications / ed. by R.J. Klein. – Nova Sci. Publishers, Serial-Mechanical Engineering-Theory and Applications, 2010. – P. 311–324.
5. Младенов Г., Колева Е., Расчет и оптимизация геометрических характеристик шва при электронно-лучевой сварке // Технологии и оборудование ЭЛС – 2011: сб. докладов междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 23–26 мая 2011 г. – СПб., 2011. – С. 116–130.
6. Effect of beam deflection oscillations on the weld geometry / D.N. Trushnikov, E.G. Koleva, G.M. Mladenov, V.Ya. Belenkiy // Journal of Material Proc. Technology. – 2013. – P. 1623–1634.

7. Quality analysis for efficient electron beam welding process / E.G. Koleva, G.M. Mladenov, D.N. Trushnikov, V.Ya. Belen'kiy // *Elektrotechnica & Elektronika – E+E, Sofia*. – 2013. – Vol. 48, no. 5–6. – P. 190–204.

8. Model-based quality optimization of EBW of steel / E. Koleva, D. Trushnikov, V. Belenkiy, G. Mladenov, S. Angelov, D. Todorov // *Elektrotechnica & Elektronika – E+E, Sofia*. – 2014. – No. 5–6. – P. 90–96.

Получено 10.11.2014

Младенов Георги (София, Болгария) – доктор физических наук, профессор, член-корреспондент Болгарской академии наук; e-mail: gmmladenov@abv.bg

Колева Елена (София, Болгария) – доктор наук, Химико-технологический и металлургический университет, Болгария, София; e-mail: eligeorg@abv.bg

Беленький Владимир Яковлевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: vladimir-belenkij@yandex.ru

Трушников Дмитрий Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: trdimitr@yandex.ru

Mladenov Georgi (Sofia, Bulgaria) – Doctor of Physical Sciences, Professor, Corresponding Member of Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences; e-mail: gmmladenov@abv.bg

Koleva Elena (Sofia, Bulgaria) – Doctor of Sciences, University of Chemical Technology and Metallurgy, Bulgaria, Sofia; e-mail: eligeorg@abv.bg

Belenkiy Vladimir (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department "Welding Production and Technology of Structural Materials", Perm National Research Polytechnic University; e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru

Trushnikov Dmitriy (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Department "Welding Production and Technology of Structural Materials", Perm National Research Polytechnic University; e-mail: trdimitr@yandex.ru