УДК 621.791.92:519.242

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАПЛАВКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Соловьев Н.И., Иванова П.М.

Калужский филиал, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: nick.solov@yandex.ru

Данная статья посвящена исследованию влияния параметров режимов сварки на геометрию наплавки проволокой российского производства ПроТЭК 60. Режимы проведения наплавки должны обеспечивать минимальное проплавление основного металла и оптимальную форму шва. Действенным методом снижения доли основного металла в наплавленном является уменьшение шага наплавки. Полученные зависимости, представленные в виде математических моделей, позволяют производить подбор оптимальных режимов наплавки для получения необходимой геометрии валика и шага наплавки. Для получения моделей ширины и высоты шва был проведен полный факторный эксперимент автоматической наплавки исследуемой проволоки на пластины из низкоуглеродистой стали в нижнем положении. Были получены уравнения регрессии при проведении планирования эксперимента для двух факторов и был выполнен переход от уравнения регрессии в кодированных переменных к уравнению регрессии в натуральных переменных.

Ключевые слова: сварка (наплавка) в среде защитных газов, геометрические параметры наплавки, режимы наплавки, полный факторный эксперимент

MODELING OF GEOMETRIC PARAMETERS SURFACING MILD STEEL

Solovev N.I., Ivanova P.M.

Kaluga Branch of the Federal State Educational Institution of Higher Education «Moscow State Technical University. N.E. Bauman (National Research University)», Kaluga, e-mail: nick.solov@yandex.ru

This article is devoted to the investigation of the effect of the parameters of welding regimes on the geometry of surfacing with a Russian wire ProTek 60. The surfacing modes should ensure minimum penetration of the base metal. An effective method of reducing the proportion of the base metal in the welded is to reduce the deposition step. The obtained dependences, presented in the form of mathematical models, allow selecting optimal deposition regimes for obtaining the required geometry of the roll of the deposition step. To obtain models of width and height of the seam, a full factor experiment was performed to automatically weld the test wire to low-carbon steel plates in the lower position. Regression equations were obtained during the planning of the experiment for two factors and the transition from the regression equation in the coded variables to the regression equation in natural variables was performed.

Keywords: welding (surfacing) in the environment of protective gases, geometric parameters of surfacing, surfacing modes, full factor experiment

Во многих случаях наплавка является наиболее эффективным способом ремонта изношенных поверхностей и устранения опасных дефектов с сохранением необходимых свойств материала.

В силу большого количества факторов, оказывающих влияние на процесс наплавки, заранее оценить качество наплавленного слоя задача непростая. Метод проб и ошибок – не лучший способ решения проблемы, особенно в тех случаях, когда цена ошибки велика [3].

Математическая модель является универсальным и гибким инструментом [12]. После проверки адекватности модели исходному объекту с ней проводятся разнообразные и подробные опыты, дающие все требуемые качественные и количественные свойства и характеристики объекта [10].

Однако прогнозирование состояния сложных технических процессов затруднено отсутствием необходимого количества математических моделей. В ряде случаев выходом из ситуации является использование закономерностей, получаемых в ходе регрессионного анализа. С их помощью появляется возможность описать любой объект при полном соблюдении алгоритма активного эксперимента. Полный факторный эксперимент является наиболее легко реализуемым среди многочисленных методов активного эксперимента [1].

Наиболее распространенным способом устранения дефектов наружной поверхности трубы при ремонте магистральных газопроводов является наплавка [11]. Известны также работы, показывающие повышение эксплуатационных характеристик [6; 7].

Техника и режимы проведения процесса наплавки должны обеспечивать минимальное проплавление основного металла и перемешивание его с наплавленным;

отсутствие пор, трещин, шлаковых включений, несплавлений и других дефектов в наплавленном слое; минимальную величину внутренних остаточных напряжений и коробления изделия; равномерную высоту и рельеф наплавленного слоя.

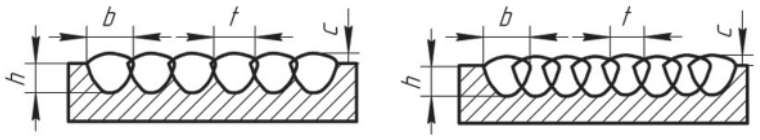
Эффективным методом снижения доли основного металла в наплавленном слое является уменьшение шага наплавки. Наложение валиков при наплавке тел вращения и плоских поверхностей производится таким образом, чтобы каждый последующий валик перекрывал предыдущий в среднем на 1/3 ширины. Тогда шаг наплавки будет равен 2/3 ширины валика. Уменьшение шага способствует снижению глубины проплавления основного металла, получению более гладкой наплавленной поверхности, а также увеличивает толщину наплавленного за один проход слоя (рис. 1). Однако при очень малом шаге (менее 0,5 ширины валика) возможно образование непроваров и несплавлений или заклинивание шлаковой корки и образование шлаковых включений [8].

Целью данной работы является разработка модели процесса автоматической наплавки омедненной сварочной проволокой сплошного сечения марки ПроТЭК 60, выпускаемой в соответствии с требованиями ТУ 1227-001-23083840-2015 «Проволока стальная сварочная сплошного сечения ПроТЭК 60».

Проволока рекомендуется к применению для автоматической наплавки и сварки плавящимся электродом в среде активных газов и смесях всех слоев шва стыковых соединений труб при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте промысловых и магистральных газопроводов. Типовой химический состав наплавки и его механические свойства представлены в табл. 1 и 2.

Данная проволока соответствует требованиям нормативных документов ПАО «Газпром» и является функциональным аналогом таких проволок, как TS-6, K-600, Boehler SG3-P, SUPRAMIG SERIMAX, OK Autrod 12.66, используемых при монтаже и ремонте газопроводов [9]. В частности, при устранении задиров, трещин и других линейно-протяженных дефектов при ремонте магистральных газопроводов. Применение этой проволоки российского производства позволяет отказаться от дорогостоящего иностранного аналога, что снизит затраты при неизменном качестве.

Однако в связи с новизной проволоки требуется определение оптимальных параметров режима наплавки, обеспечивающих получение необходимых геометрических параметров шва (наплавки).



а б

Рис. 1. Образование наплавленного слоя:
а – шаг наплавки менее 2/3 ширины; б – шаг наплавки более 2/3 ширины;
b – ширина валика; t – шаг наплавки; c – толщина наплавленного слоя; h – глубина проплавления

Таблица 1

Типовой химический состав наплавленного металла

Содержание элементов, %							
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ti	Ni
0,04–0,9	1,10–1,70	0,60–1,10	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,10	≤ 0,10	0,7–1,1

Таблица 2

Типовые механические свойства наплавленного металла

Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж/см^2	
			KCV-20	KCV-40
560–620	440–520	≥ 22	≥ 80	≥ 55

В ходе эксперимента исследовалась автоматическая наплавка проволокой ПроТЭК 60 диаметром 1,2 мм. Эксперимент проводился по методике, описанной в работах [1; 4; 5]. Наплавка выполнялась на низкоуглеродистые стальные пластины толщиной 6 мм в смеси Ar+18 % CO_2 в нижнем положении. Сварка выполнялась на установке для автоматической наплавки (рис. 2) с использованием сварочного аппарата ДС400.33М и подающего механизма ПМ 4.33 на режимах, приведенных в табл. 3.

В результате работы получены зависимости между параметрами режима наплавки и геометрическими параметрами наплавляемых валиков. Зависимости представлены в виде математических моделей и графиков.

Для двухуровневого полного факторного эксперимента было проведено четыре опыта, каждый из которых повторялся три раза, для исключения грубых погрешностей. Уровни факторов представляют собой границы исследуемой области по выбранному параметру (минимальное и максимальное значение фактора) [2]. Зная максимальное $z_i^{\max}$ и минимальное $z_i^{\min}$ значения фактора, можно определить координаты центра плана, так называемый основной уровень z_i^0, а также интервал (шаг) варьирования Δz_i:

$$z_i^0 = \frac{z_i^{\max} + z_i^{\min}}{2};$$

$$\Delta z_i = \frac{z_i^{\max} - z_i^{\min}}{2}.$$

Полученные расчеты сведены в табл. 4.

Таблица 3

Параметры режимов сварки

Скорость сварки, см/мин	Скорость подачи проволоки, м/мин	Расход газа, л/мин	Напряжение (U), В	Вылет (l), мм	Сварочный ток, А
330	8	15	22	18	210
			28	28	

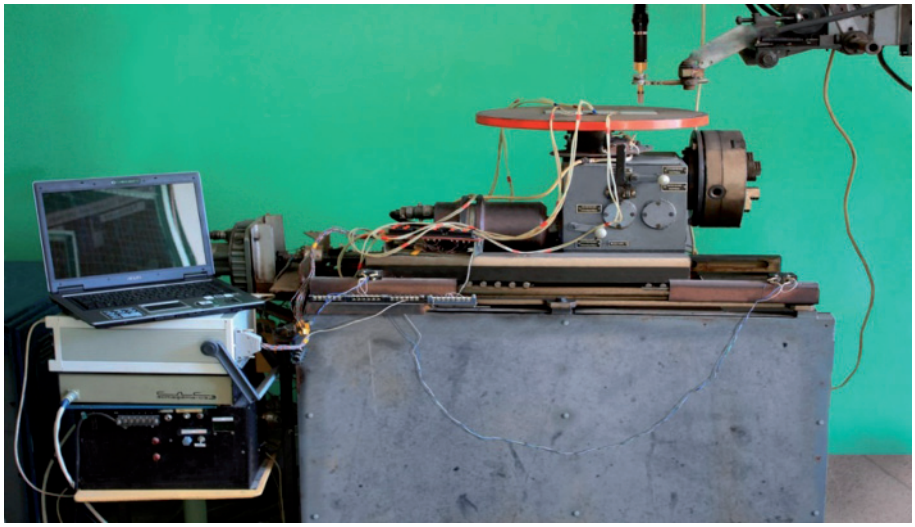


Рис. 2. Установка для наплавки

Таблица 4

Кодирование факторов

Фактор	Верхний уровень $z_i^{\max}$	Нижний уровень $z_i^{\min}$	Центр z_i^0	Шаг варьирования Δz_i	Зависимость кодированной переменной от натуральной
$U_{св}$, В (z_1)	28	22	25	3	$x_1 = \frac{z_1 - 25}{3}$
Вылет, мм (z_2)	28	18	23	5	$x_2 = \frac{z_2 - 23}{5}$

Таблица 5

Матрица планирования для ширины (b) шва

$U_{св}$, В	Вылет, мм	Взаимодействие факторов	b_1, мм	b_2, мм	b_3, мм	$b_{ср}$, мм	S^2	$b_{модель}$	k	
22 (–)	18 (–)	+	8,62	8,74	8,69	8,68	0,065	8,68	k0	11,81
28 (+)	18 (–)	–	15,89	15,65	15,2	15,58		15,58	k1	0,42
22 (–)	28 (+)	–	14,48	13,91	13,88	14,09		14,10	k2	–0,32
28 (+)	28 (+)	+	8,75	9,02	8,85	8,87		8,88	k12	–3,03

Таблица 6

Матрица планирования для высоты (h) шва

$U_{св}$, В	Вылет, мм	Взаимодействие факторов	h_1, мм	h_2, мм	h_3, мм	$h_{ср}$, мм	S^2	$h_{модель}$	k	
22 (–)	18 (–)	+	3,93	4,28	4,52	4,24	0,163	4,49	k0	3,72
28 (+)	18 (–)	–	2,84	2,79	3,02	2,88		3,25	k1	–0,05
22 (–)	28 (+)	–	3,27	3,31	3,29	3,29		3,28	k2	0,16
28 (+)	28 (+)	+	4,92	4,41	4,08	4,47		4,62	k12	0,64

Коэффициенты уравнения регрессии k определялись по методу наименьших квадратов, т.к. экспериментальные данные должны быть однородными и нормально распределенными.

Результаты расчетов представлены в табл. 5 и 6.

Все коэффициенты являются значимыми. Уравнение регрессии в кодированных переменных принимает вид

$$b = 11{,}81 + 0{,}42x_1 - 0{,}32x_2 - 3{,}03x_{12};$$

$$h = 3{,}72 - 0{,}05x_1 + 0{,}16x_2 + 0{,}64x_{12}.$$

В результате анализа полученных данных можно установить, что наибольшее влияние на ширину оказывает взаимодействие факторов x_{12}, затем напряжение x_1 и вылет x_2. Наибольшее влияние на высоту оказывает взаимодействие факторов x_{12}, затем вылет x_2 и напряжение x_1.

Полученные коэффициенты показывают, что с ростом напряжения ширина растет, а высота снижается. При увеличении величины вылета значение ширины падает, а высота валика растет.

Вероятность ошибки задавалась на уровне 1%. Полученные модели для ширины и высоты наплавляемого валика в натуральных переменных имеют вид

$$b = -106{,}368 + 4{,}786 \cdot U + 4{,}986 \cdot l - 0{,}202 \cdot U \cdot l;$$

$$h = 28{,}253 - 0{,}981 \cdot U - 1{,}067 \cdot l + 0{,}043 \cdot U \cdot l.$$

Сравнение рассчитанных с помощью полученных моделей и экспериментальных параметров валиков представлено на рис. 3.

Используя полученную модель ширины шва, были построены номограммы для определения параметров наплавки (рис. 4, 5).

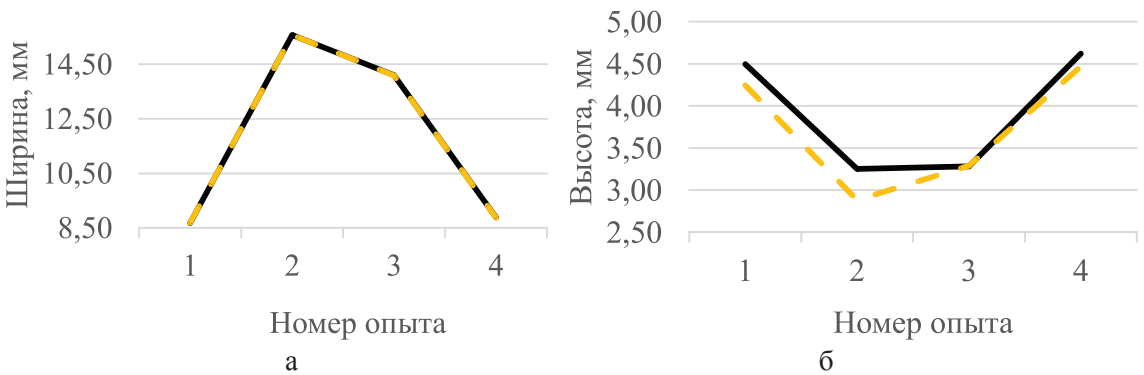


Рис. 3. Сравнение экспериментальных (штриховая линия) и расчетных (сплошная линия) данных: ширина (а) и высота (б) валика

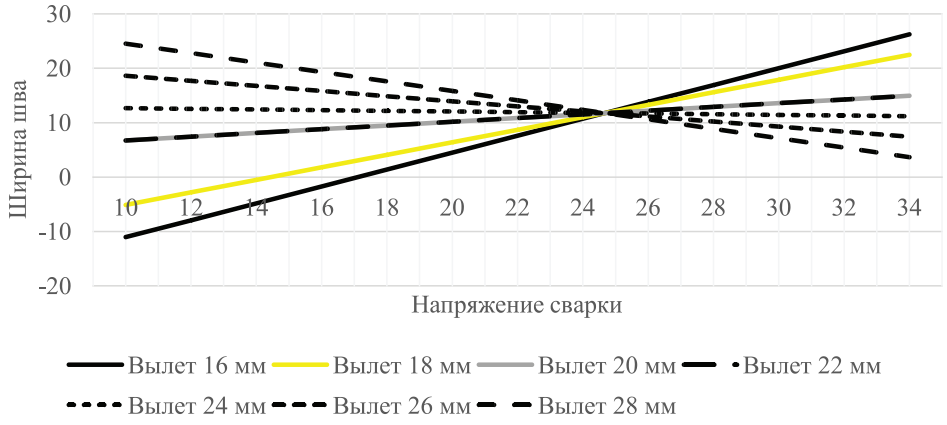


Рис. 4. Номограмма связи параметров наплавки и ширины валика

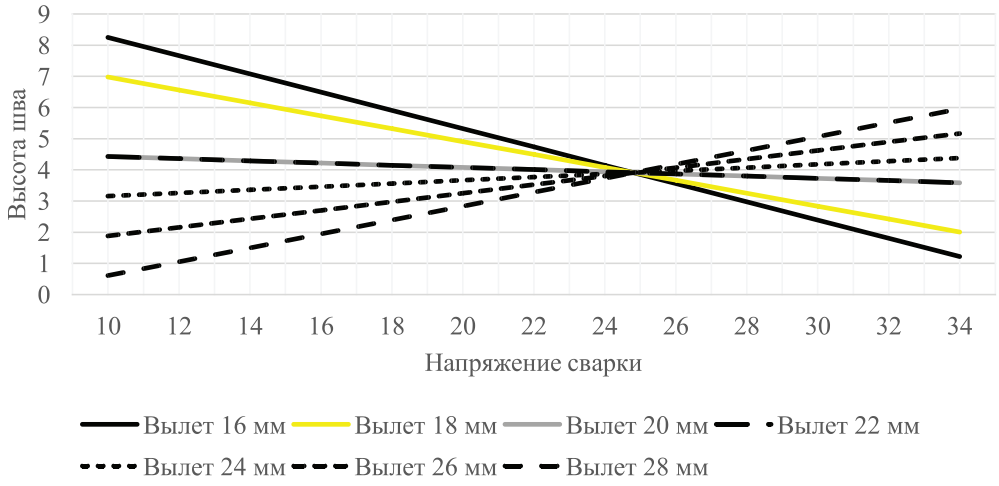


Рис. 5. Номограмма связи параметров наплавки и высоты валика

Полученные в ходе эксперимента модели ширины и высоты наплавки от напряжения и вылета позволяют производить подбор параметров режима сварки для получения оптимальных геометрических характеристик шва. Зависимости ширины и высоты шва от параметров наплавки представлены в виде номограмм.

Список литературы

1. Гайдадин А.Н., Ефремова С.А. Применение полного факторного эксперимента при проведении исследований. – Волгоград: ВолгГТУ, 2008. – С. 3.

2. ГОСТ Р 50.1.040-2002. Статистические методы. Планирование экспериментов. Термины и определения. – М.: Госстандарт России, 2002. – 36 с.

3. Девятов С. Моделирование сварочных процессов с помощью программного обеспечения фирмы ESI Group // CADmaster. – 2010. – № 5. – С. 48.

4. Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В. Определение оптимального количества классов группирования экспериментальных данных при интервальных оценках // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 3 (7). – С. 56–58.

5. Калмыков В.В., Федорова О.С. Основные статистические методы анализа результатов экспериментов // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2016. – № 1 (5). – С. 68–75. – URL: http://nto-journal.ru/uploads/articles/6543bd7766657d524707534f43de3f0f.pdf (дата обращения 25.02.2017).

6. Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Авраменко М.Ю. Технологические предпосылки повышения эксплуатационных характеристик направляющих элементов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 8–1. – С. 55–58.

7. Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Логутенкова Е.В. Краткий обзор отделочных операций, применяемых для повышения эксплуатационных характеристик деталей машин // Научный альманах. – 2015. – № 10–3 (12). – С. 183–186.

8. Попов В.С. Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин: учебное пособие. – Запорожье: Изд-во ЗГТУ, 1999. – С.–311.

9. Свармонтажстрой: [сайт]. – URL: http://www.svarms.ru/ (дата обращения: 25.02.2017).

10. Семичева Л.Г. и др. Моделирование процессов сварки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2010. – № 6. – С. 180.

11. Murugan N., Parmar R.S. Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel // Journal of Materials Processing Technology. – 1994. – Т. 41. – № 4. – С. 381–398.

12. Siva K., Murugan N., Raghupathy V.P. Modelling, analysis and optimisation of weld bead parameters of nickel based overlay deposited by plasma transferred arc surfacing // Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering. – 2009. – Т. 1. – № . 3. – С. 174–182.