

УДК 621.791.927.5

**В. И. Савуляк, д. т. н., проф.; С. А. Заболотный, к. т. н.; Д. В. Бакалец****МИНИМИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИЙ И ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ПРИВАРИВАНИИ НАКЛАДОК ДЛЯ УСИЛЕНИЯ**

*Проблемой восстановления зон рамы с появившимися трещинами методами сварки является высокая вероятность повреждения основного металла за счет фазово-структурных преобразований. В работе с использованием планирования многофакторного эксперимента исследованы возможности уменьшения температурных перепадов и деформаций, которые создают основную угрозу появления микротрещин.*

**Ключевые слова:** микротрещины, ремонтная сварка, усиления, деформации, регрессионный анализ.

**Введение**

Рамные конструкции транспортных и технологических машин в процессе эксплуатации поддаются статическим и динамическим нагрузкам, в результате которых на определенных участках возникают трещины и другие повреждения [1].

Проблемой усиления опасных зон путем установки дополнительных элементов, а также ремонт таких зон с появившимися трещинами является высокая вероятность повреждения основного металла рамы за счет негативных процессов, которые могут иметь место при сварке. К таким процессам относят мощные тепловые потоки от сварочной дуги, напряжения и деформации, возникающие при этом [2 – 3]. Качество и прочность сварного шва (соединения) зависит от многих факторов, а его форма и размеры в большинстве случаев становятся определяющими для оценки этих показателей [4 – 5]. Однако в литературе не хватает четких рекомендаций по технологии выполнения сварных соединений с целью минимизации деформаций и напряжений.

**Целью работы** является поиск возможности управления тепловыми потоками и деформациями в материале свариваемых деталей, изменением параметров процесса. В работах [2 – 4] показано, что на формирование полей напряжений и деформаций оказывают влияние неоднородность и мощность тепловых потоков от процесса сварки. Одним из факторов влияния на перераспределение тепловых потоков между материалом конструкции и окружающей средой является пространственное положение электрода относительно свариваемых поверхностей.

В работе [6] показано, что угол наклона электрода влияет на распределение тепловой энергии по объему детали и соотношение между количеством поглощенного и рассеянного тепла. Эти факторы влияют на форму, глубину и ширину шва при сварке и, в первую очередь, на изменение величины деформаций конструкции. Разработка рекомендаций по выбору рационального положения электрода по критерию минимизации деформации в процессе сварки является основной задачей работы.

**Модель сварки внахлест и основные факторы влияния на этот процесс**

На температуру конструкции при сварке и на деформации, возникающие при этом, влияет совокупность параметров процесса [7 – 9]. Однако одни и те же температуры  $t$  в заданной точке на определенном расстоянии  $l$  от сварного шва, могут возникнуть при различных совокупностях значений параметров сварки, а деформации  $\Delta$  (рис. 1), которые являются их следствием, меняются в зависимости от времени действия дуги и изменения теплового баланса системы. При этом будет меняться общая геометрия сварного шва, в частности глубина проплавления, катет и коэффициент формы провара.

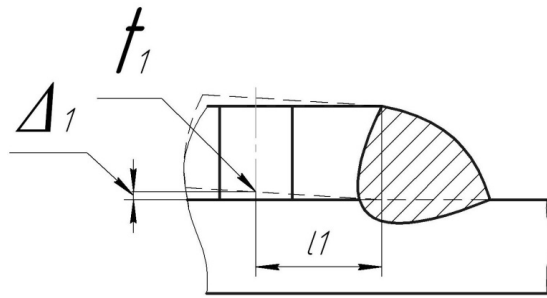


Рис. 1. Основные расчетные параметры

Рассмотрим параметры, которые больше всего влияют на температурные поля и деформации в процессе приваривания элементов усиления внахлест. С увеличением толщины металла этих элементов мы вынуждены пропорционально уменьшать скорость сварки. Увеличение диаметра электродной проволоки прямопропорционально увеличивает скорость сварки, что было установлено предыдущими исследованиями. Примем как вариативные такие параметры: скорость сварки  $V_{св}$ , ток  $I$ , и пространственное положение электрода относительно детали, которое определяется углом к оси шва  $\beta$  и углом в плоскости, перпендикулярной оси шва  $\alpha$  (рис. 2).

Следует отметить, что угол к оси шва  $\beta$  в процессе сварки практически не меняется. Изменение угла  $\alpha$  при сварке внахлест (рис. 2) в наибольшей степени влияет на форму поперечного сечения сварного шва (рис. 3) и соответственно на объем металла, который необходимо ввести в него, что и определяет скорость сварки.

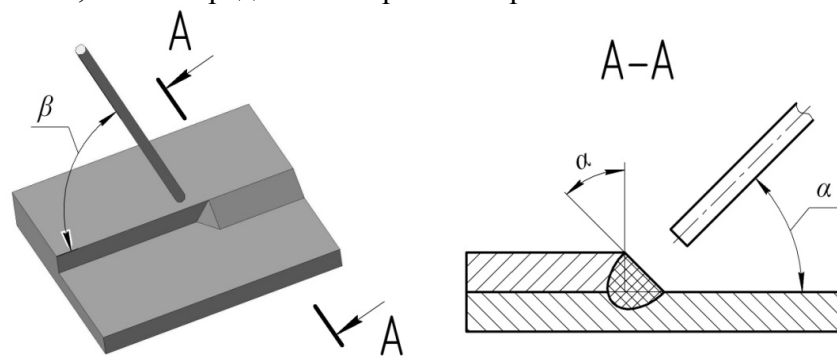


Рис. 2. Углы, определяющие положение электрода в пространстве

Значение угла  $\alpha$ , по [10], могут колебаться в пределах  $30 - 60^\circ$ . Толщины ремонтных накладок  $h$  в большинстве случаев не превышают 10 мм. В таблице 1 приведены рекомендуемые значения скорости сварки для различных толщин накладок и угла  $\alpha$ .

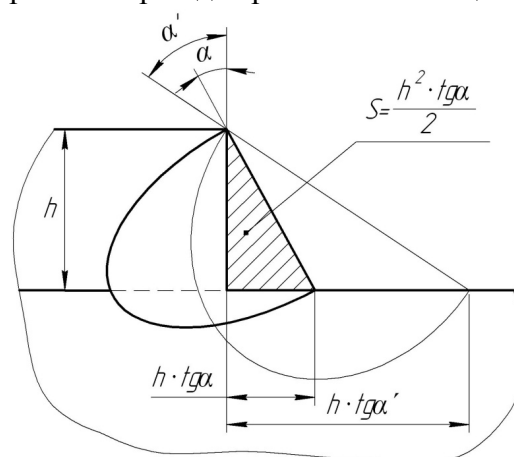


Рис. 3. Поперечное сечение сварного шва

Таблица 1

## Рекомендуемая скорость сварки, м / ч

Угол $\alpha$ °	Толщина накладки $h$ , м					
	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008	0,010
30°	39,48	22,21	14,20	9,87	5,55	3,55
35°	32,55	18,31	11,72	8,14	4,58	2,93
40°	27,16	15,28	9,78	6,79	3,82	2,44
45°	22,79	12,82	8,21	5,70	3,21	2,05
50°	19,12	10,76	6,88	4,78	2,69	1,72
55°	15,96	8,98	5,75	3,99	2,24	1,44
60°	13,16	7,40	4,80	3,29	1,85	1,18

### Расчет параметров приваривания элементов усиления с использованием регрессионного анализа

Для решения поставленной задачи разработана математическая модель, которая описывает влияние определенных параметров ( $V_{св}$ ,  $I$ ,  $\alpha$ ) на температуру и деформации ( $T$ ,  $\Delta$ ). Целесообразно использовать метод планирования и постановки полнофакторного эксперимента с проведением регрессионного анализа.

Методика проведения регрессионного анализа подробно описана в [11], поэтому далее описываем только результаты его использования.

Эксперименты проведены с использованием инверторного сварочного источника питания, стенда для измерения температур и деформаций. Сварку образцов из стали 09Г2С проводили электродом  $\varnothing$  3мм.

Предварительно полученная линейная модель свидетельствует о её неадекватности. Поэтому целесообразно использовать аппроксимацию функции отзывает  $y_T$  и  $y_\Delta$  полиномом второго порядка вида:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

Интервалы варьирования и уровни факторов приведены в таблице 2.

Для каждого эксперимента был изготовлен комплект заготовок, из которых в процессе сварки снимали данные температур и деформаций. Измерения проводили с помощью термопар, данные из которых передавались на самописец, и индикатора с ценой деления шкалы 0,01 мм, данные из которого фиксировали видеокамерой.

Таблица 2

### Интервалы варьирования и уровни факторов влияния на состояние детали при сварке

Факторы	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
		основн. 0	верхн. +1	нижн. -1
$x_1$ – ток, А	20	120	140	100
$x_2$ – скорость сварки, м / ч	4,7	9,5	14,2	4,8
$x_3$ – угол наклона электрода, $\alpha$ °	15	45	60	30

По методике, изложенной в работе [11], определены коэффициенты уравнения регрессии для функций  $y_T = f(I, V_{св}, \alpha)$  и  $y_{\Delta} = F(I, V_{св}, \alpha)$  и их дисперсия. По результатам расчетов и с учетом значимости коэффициентов уравнения регрессии имеют вид:

$$y_T = -12,104 + 98,596 \cdot x_2 + 23,523 \cdot x_3 + 13,884 \cdot x_1 \cdot x_3 + 28,643 \cdot x_2 \cdot x_3 + 90,02 \cdot x_3^2. \quad (2)$$

$$y_{\Delta} = -0,537 + 0,095 \cdot x_1 + 0,017 \cdot x_3 + 0,075 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,199 \cdot x_3^2. \quad (3)$$

Адекватность полученных моделей проверяли по критерию Фишера. При 5%-м уровне значимости табличное значение критерия составляет  $F_T = 4,7$ . Расчетные значения критериев составили  $F_{Tp} = 3,85$  и  $F_{\Delta p} = 4,4$ . Так как расчетные величины меньше табличного значения, модели считают адекватными.

Путем использования полученных уравнений регрессии (2, 3) можно решать ряд задач, возникающих при проектировании технологических процессов, в которых используют дуговую сварку. Среди них чаще всего возникают задачи минимизации напряжений и деформаций при сварке, а также задача минимизации тепловложения с целью предотвращения нежелательных структурных преобразований в зоне температурного воздействия.

На рисунках 4 а – в для точки, находящейся на расстоянии 5 мм от зоны сварки, показаны поверхности отзвов, отражающих влияние силы тока, скорости сварки, угла наклона электрода на ее температуру и смещения из исходного положения.

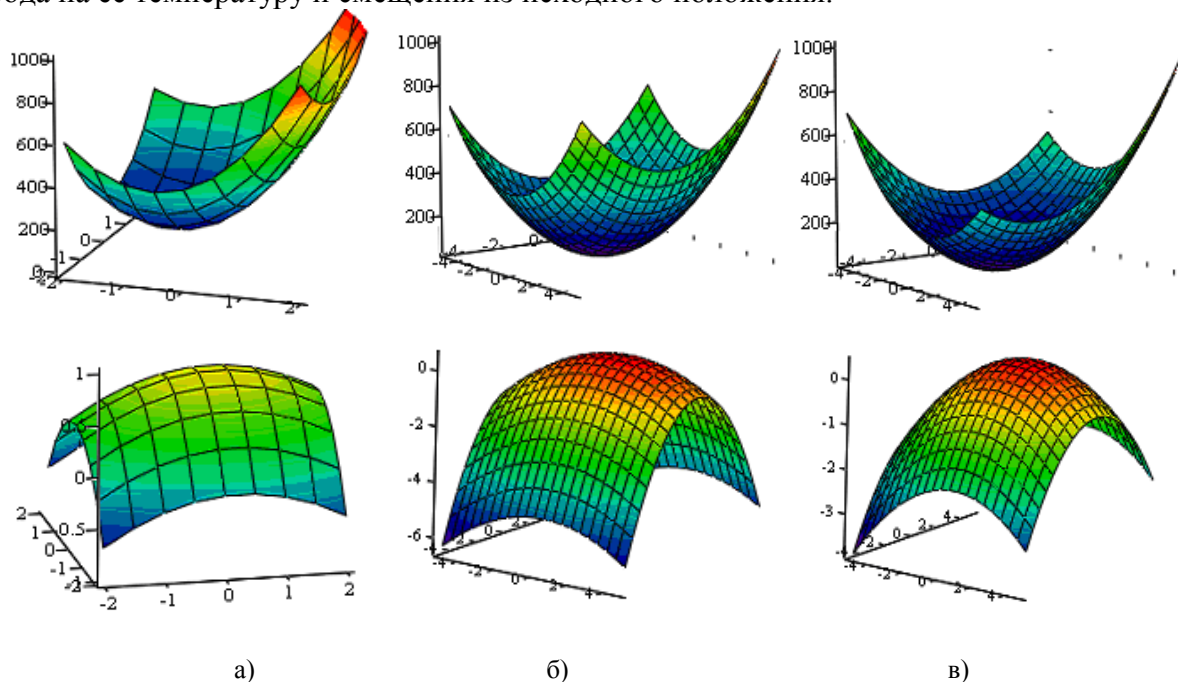


Рис. 4. Поверхности отзвов функций: а)  $y_T$  и  $y_{\Delta}$  при  $I_{max}$ ; б)  $y_T$  и  $y_{\Delta}$  при  $V_{max}$ ; в)  $y_T$  и  $y_{\Delta}$  при  $\alpha_{max}$

Все поверхности отзвов (рис. 4) показали наличие экстремумов, наименьших и наибольших значений функций в области вариации параметров. Поэтому целесообразно для реальных технологических процессов поставленные задачи решать с использованием графоаналитического метода или методами линейного программирования по алгоритму, приведенному ниже.

По полученным моделям (уравнениям регрессии), при фиксированном значении одного из параметров процесса приваривания элементов усиления, строят изолинии, которые показывают влияние других значений параметров на температурные поля и деформации, вызванные горением сварочной дуги. Например, задавая минимальное и максимальное значения угла  $\alpha$  (рис. 4 а, б) получим изолинии, характеризующие влияние скорости сварки

и силы тока на температуры и деформации в соответствующих точках.

Использование таких методик позволяет определять необходимые режимы сварки. Таким образом, можно определить режимы, обеспечивающие минимальное значение деформаций в зоне температурного воздействия. При этом необходимо учитывать необходимые соотношения угла наклона электрода со скоростью сварки. Их рекомендуемые значения приведены в таблице 1.

Задача решена графическим методом. Для определения деформаций при фиксированном значении угла  $\alpha$  (выбрано  $60^\circ$ ) на графике поверхности отклика  $y_{(d)}$  (рис. 5а) построена прямая скорости сварки, что соответствует координате (-1), и получены точки пересечения с изолиниями деформаций. Минимальными деформации будут при силе тока  $I$ , что соответствует координате -0,95 по оси  $I$ , максимальными – в области 1 и составят 0,228 мм. На графике (рис. 5 б) изображены поверхности отзвов угла  $\alpha = 30^\circ$ , причем скорость сварки будет максимальной и пройдет через координату 1 оси  $V$ . Минимальные и максимальные деформации составляют соответственно 0,147 и 0,362 мм.

Путем наложения изотерм графика  $y_{(T)}$  (рис. 5в) на изолинии деформаций  $y_{(d)}$  (рис. 5 а) получим точки пересечения, позволяющие определить температуру и деформации для любой точки из области значений (рис. 5 г). Так, например, для того, чтобы в точке с координатами (-0,2; 0,8) получить температуру в  $300^\circ\text{C}$  и деформации 0,27 мм, необходимо установить следующие режимы:  $I = 116\text{ А}$ ,  $V_{св} = 11,36\text{ м / ч}$ ,  $\alpha = 60^\circ$ .

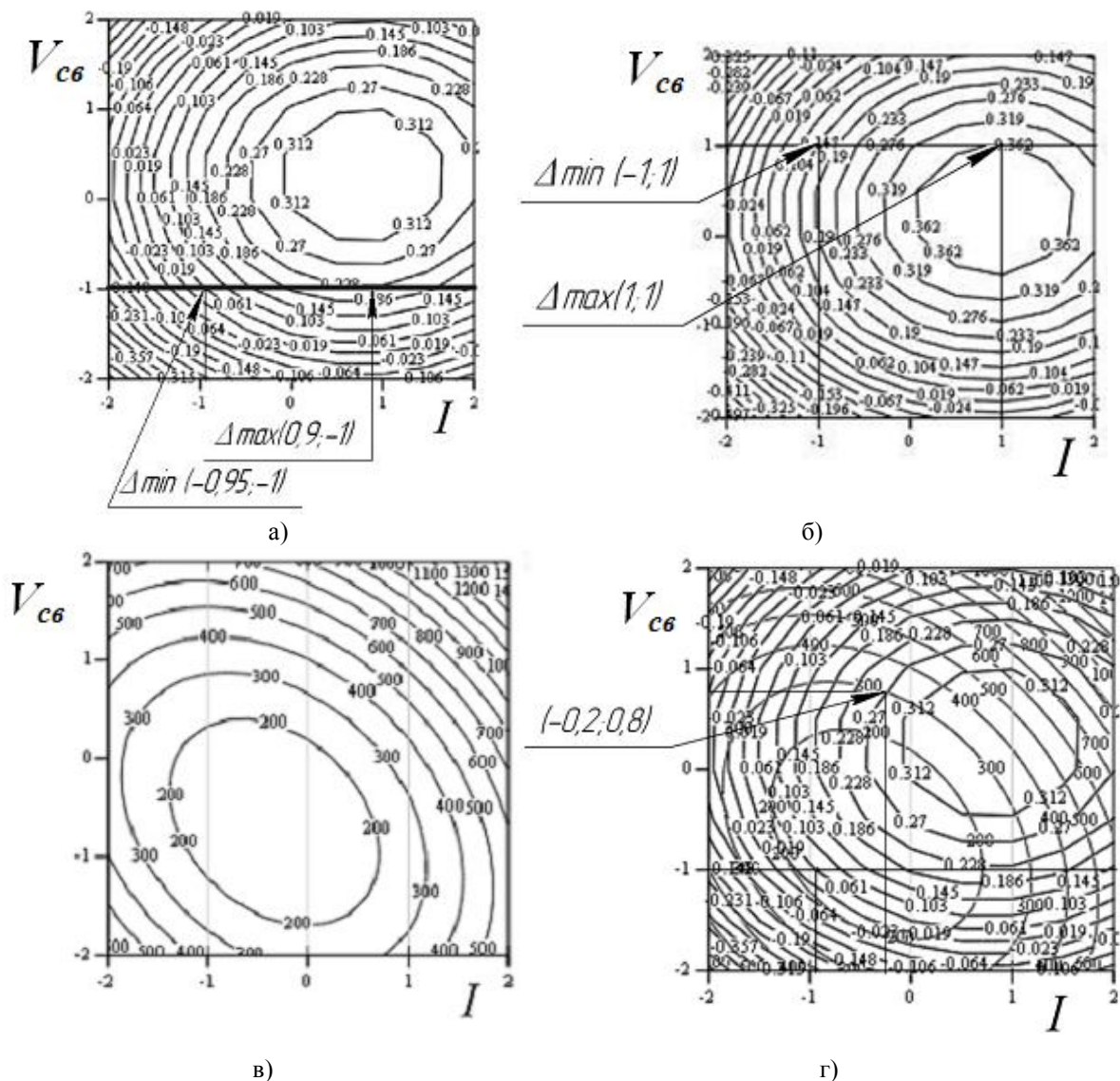


Рис. 5. Графическое решение задачи оптимизации режимов сварки

## Выводы

Определение рациональных параметров, обеспечивающих минимальные температурные воздействия и деформации в процессе приваривания элементов усиления внахлест, целесообразно вести с использованием приведенных уравнений регрессии. Проведенные исследования с использованием планирования многофакторного эксперимента показали возможность уменьшения деформаций, вызывающих угрозу появления микротрещин, путем изменения угла наклона электрода в процессе сварки.

Использование методики минимизации деформаций на этапах разработки технологического процесса ремонтной сварки с приваркой накладок для усиления обеспечило снижение деформаций в пределах 10 – 12% и позволило корректно рассчитывать температурные поля для прогнозирования фазовых превращений в зоне температурного воздействия сварочной дуги.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Циклические деформации и усталость металлов. Т. 2. Долговечность металлов с учетом эксплуатационных и технологических факторов / [В. Т. Трощенко, Л. А. Хамаза, В. В. Покровский и др.]. – К. : Наук. думка, 1985. – 222 с.
2. Василик А. В. Теплові розрахунки при зварюванні / А. В. Василик, Я. А. Дрогомирецький, Я. А. Криль. – Івано-Франківськ : Факел, 2004. – 209 с.
3. Кархин В. А. Тепловые основы сварки / В. А. Кархин. – Л. : Изд-во Ленинград. гос. ин-та, 1990. – 100 с.
4. Осадчук В. А. Визначення тривісного розподілу залишкових напружень в зварних з'єднаннях елементів конструкцій прямолінійними швами і оцінка їх впливу на міцність з'єднань за наявності дефектів типу тріщин / В. А. Осадчук, Л. І. Цимбалюк, А. Р. Дзюбик // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2011. – 54, № 1. – С. 121 – 129.
5. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – Киев: Наук. думка, 2006. – 620 с.
6. Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов / [И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Миличенко и др.] ; под ред. И. К. Походни. – АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. – К.: Наукова думка, 1990. – 224 с.
7. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. — М. : Машиностроение, 1951. — 296 с.
8. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник / Н. И. Пригоровский. – М. : Машиностроение, 1983. – 248 с.
9. Палаш Р. В. Визначення раціональних факторів впливу на залишкові напруження в зварних з'єднаннях конструкцій із високоміцних сталей / Р. В. Палаш // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн. праць. – Львів : УкрДЛТУ. – 2006. – № 16.6. – С. 87 – 89.
10. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т. / Редкол.: Г. А. Николаев (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1 / Под ред. Н. А. Ольшанского. 1978. – 504 с.
11. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

**Савуляк Валерий Иванович** – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой технологии повышения износостойкости.

**Заболотный Сергей Антонович** – к. т. н., доцент кафедры технологии повышения износостойкости.

**Бакалец Дмитрий Витальевич** – аспирант кафедры технологии повышения износостойкости. Винницкий национальный технический университет.