

шовної зони, що зменшує вірогідність утворення тріщин.

Впровадження способу зварювання чавуну в промисловість дасть значний економічний ефект за рахунок використання недефіцитних і відносно дешевих сталевих дрітків і відсутності захисних газів, при високій якості зварних з'єднань.

**Список літератури:** 1. Иванов Б. Г, Журавицкий Ю.И., Левченко В. И. Сварка и резка чугуна. М., «Машиностроение», 1977. стр. 56-65. 2. Авторское свидетельство СССР №531694, кл. В23К33/00, 1976 (аналог). 3. Авторское свидетельство СССР №523770, кл. В23К9/00, 1976 (прототип). 4. Патент України на корисну модель №71145, кл. МПК<sup>7</sup> В23К 33/00, 2012.

*Надійшла до редколегії 20.04.2013*

УДК 621.791

**Спосіб зварювання чавуну/ М. А. Калін, А. О. Емдін // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. - № 26 (999). – С.3 -7. – Бібліогр.: 4 назв.** Розробтан спосіб сварки чугуна електрической дугой, отличающийся тем, что дуга горит между угольным электродом и изделием, а сварочная проволока подается через отверстие в угольном электроде, который питается током прямой полярности.

**Ключевые слова:** дуга, чугун, сварка, угольный электрод, проволока.

A method of welding cast iron electric arc featuring the arc Burns between carbon electrode and the workpiece and electrode wire is fed through a hole in the charcoal electrode that is fed by a current straight polarity.

**Keywords:** arc, pig iron, welding, carbon electrode wire.

УДК 621.791.76:539.4.25

**С. Н. ПОПОВ**, д-р филос. наук, проф., ЗНТУ, Запорожье

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ**

В статье оптимизирован алгоритм получения адекватного количественного математического описания многофакторной технологической системы при рельефной сварке разнородных материалов. Представлено математическое описание новой технологии рельефной сварки титана со сталью, которая обеспечивает достаточно высокую работоспособность (прочность и пластичность) сварных соединений и полное отсутствие несплошностей в сварных точках.

**Ключевые слова:** физико-механические свойства, точечная рельефная сварка, оптимизация, деформация, интерметаллидная фаза, поверхность отклика.

**Введение.** Важной проблемой в машиностроении является задача получения прочных сварных соединений при сварке разнородных материалов, в особенности титана со сталями. Главной мерой это связано с наличием интерметаллидов в сплаве титана с железом, что значительно повышает прочность соединения, но резко снижает его пластичность [1-6], что затрудняет применение сварки плавлением. Высокую работоспособность и характеристики сварного соединения обеспечивает технология рельефной сварки. Однако отсутствие системных данных о механизме комплексного влияния различных факторов на физико-механические свойства сварного соединения приводит к необходимости оптимизации алгоритма получения адекватного математического описания многофакторной технологической системы рельефной сварки титана со сталью.

© С. Н. ПОПОВ, 2013

**Постановка задачи.** В настоящей работе ставилась цель установить параметрическую связь между основными технологическими показателями процесса сварки с определяющим критерием качества сварного соединения – величиной усилия отрыва ( $F_{отр}$ ). При этом автор ставил задачу оптимизировать алгоритм получения адекватного количественного математического описания многофакторной технологической системы рельефной сварки титана со сталью.

**Основная часть исследований.** При анализе технологических показателей контактной сварки было решено использовать математическое планирование исследований на основе активного эксперимента, с созданием численного описания математического ожидания.

Это связано с тем, что многофакторное уравнение регрессии позволяет исследовать механизм комплексного влияния различных факторов на физико-механические свойства сварного соединения.

В отличие от традиционного подхода, связанного с получением оптимальных режимов точечной сварки, при которых внутренний выплеск не допускается, в качестве исходных данных были приняты условия, гарантирующие получение управляемого конечного внутреннего выплеска, поскольку только его наличие может обеспечить создание биметаллического титаностального соединения.

Исходя из этого, при планировании эксперимента в качестве переменных были приняты такие параметры, влияние которых на показатель качества соединения ( $F_{отр}$ ) изучено, и предстояло только установить их оптимальные значения. В качестве основных факторов, влияющих на выходную характеристику ( $F_{отр}$ ), были рассмотрены:

- 1)  $Q$  – энергия, выделяющаяся при образовании сварной точки,  $\text{kA}^2$ ;
- 2)  $T_k$  – время приложения ковочного усилия, с.
- 3)  $F_{сж}$  – усилие сжатия электродов, дан.
- 4)  $\delta$  – толщина свариваемых пластин, мм.

Анализ последнего показывает, что толщина пластин определяет уровни варьирования остальных параметров режимов сварки, что может привести к нарушению ортогональности матрицы плана и появлению корреляции между коэффициентами регрессионного уравнения. Поэтому, чтобы получить статически определённую модель, вводили толщину пластин как постоянную величину, равную  $\delta_1 = 2$  мм (титан),  $\delta_2 = 10$  мм (сталь). Вычисление коэффициентов регрессий проводили по стандартным методам [7] с помощью пакета программ Excel. Для получения более точных результатов целесообразно заложить в машину максимальное число уровней для каждого фактора. Но при этом значительно увеличивается число опытов.

Для уменьшения числа экспериментов в работе предложен метод сокращения эксперимента, основанный на простых понятиях теории групп [8]. Для этого на совокупность чисел  $\{-1; 0; 1\}$  введено новое умножение, при котором она превратилась в группу, где «-1» – образующая. Если взаимодействие факторов вычислять исходя из основных понятий теории групп, то матрица планирования, в которой фактор заменяется взаимодействием других, сохранит все свои свойства, такие как ортогональность и др.

Планирование эксперимента проводили по плану Бокса-Уилсона для трёх независимых факторов ( $Q$ ,  $T_k$ ,  $F_{сж}$ ) на двух уровнях варьирования.

Учитывая, что изменялось небольшое количество переменных, был реализован полный факторный эксперимент  $2^3$ , включающий восемь основных опытов, один

средний и одну звёздную точку.

Интервалы варьирования и основной уровень взяты на основании априорно известной информации [9], когда процесс протекает достаточно хорошо, и получаются положительные результаты. Центр основного уровня выбран в случайных точках. Интервалы варьирования и результаты реализации планирования приведены соответственно в табл. 1 и табл. 2.

Математическую модель задавали в виде функции:

$$F_{omp} = f(Q, T_k, F_{сж}) \quad (1)$$

Таблица 1 - Уровни и интервалы варьирования

Показатель	Факторы		
	Q	T <sub>k</sub>	F <sub>сж</sub>
Основной уровень	8600	0,06	365
Интервал варьирования	3200	0,04	115
Верхний уровень	11800	0,1	400
Нижний уровень	5400	0,02	250
Кодовое обозначение факторов	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>

Так как вид функции  $F_{omp}$  заранее не известен, её задавали в виде полного полинома второго порядка:

$$F_{omp} = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \geq 1}^n B_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

Таблица 2 - Результаты реализации матрицы полнофакторного эксперимента  $2^3$

№ опыта	Факторы			Выходной параметр		
	Q	T <sub>k</sub>	F <sub>сж</sub>	F <sub>отр1</sub>	F <sub>отр2</sub>	F <sub>отр3</sub>
1	11800	0,1	400	319	320	322
2	11800	0,02	250	343	341	340
3	11800	0,1	250	278	280	277
4	11800	0,02	480	200	198	202
5	5400	0,02	250	203	206	205
6	5400	0,1	250	282	285	283
7	5400	0,1	480	287	289	286
8	5400	0,02	480	328	327	330
9	8600	0,06	365	413	415	410
10	8000	0,04	300	409	410	408
11	9000	0,08	450	-	436	-

Вычисление коэффициентов регрессии  $B_i$  и  $B_{ij}$  проводили с использованием прикладного пакета *MathCAD*.

Результатом реализации матрицы планирования полнофакторного эксперимента  $2^3$  после проведения проверки вследствие статического характера зависимостей по критериям Фишера и Кохрена является адекватное уравнение регрессии:

$$F_{omp} = - 1,3 \cdot 10^3 + 0,318Q + 7637,28T_k + 1,92F_{сж} - 0,925QT_k - 2,32 \cdot 10^{-4} QF_{сж} - 20,51 T_k F_{сж} + 2,58 \cdot 10^{-3} QT_k F_{сж} - 1,35 \cdot 10^{-5} Q^2 \quad (3)$$

Анализ полученной математической модели показывает, что выбранные параметры режимов сварки и уровни их варьирования позволяют получать в

зависимости от значений и взаимного сочетания факторов различные физико-механические свойства сварного соединения. Следовательно, в данном факторном пространстве должно существовать такое оптимальное соотношение параметров сварки, при которых обеспечивается максимальное значение показателя качества сварного соединения  $F_{отр}$ . При этом, важное значение имеет и то, что некоторые линейные эффекты меньше эффектов взаимодействия, а это один из признаков попадания в почти стационарную область. Поэтому для подтверждения данного положения воспользуемся движением по направлению градиента функции отклика (метод крутого восхождения). Поверхность отклика и ее пересечения изображены на рис.1 и рис. 2 соответственно.

Составляющие градиента есть частные производные функции отклика, оценками которых являются рассчитанные коэффициенты регрессии.

Изменяя независимые переменные пропорционально величинам коэффициентов уравнения, будем двигаться в направлении градиента функции по самому крутому пути

$$\nabla \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} i + \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} j + \dots + \frac{\partial \varphi}{\partial x_k} k \quad (4)$$

где  $\nabla \varphi$  - обозначение градиента;

$\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}$  - частная производная функции по  $i$ -му фактору;

$i, j, k$  – единичные векторы в направлении координатных осей.

Крутое восхождение может считаться эффективным, если хотя бы один из теоретически реализованных опытов даст лучший результат по сравнению с наилучшим опытом в серии.

Пусть  $Q = 9000 \text{ kA}^2$ ,  $T_k = 0,08 \text{ с}$ ;  $F_{сж} = 450 \text{ дан}$ , тогда  $F_{отр} = 436 \text{ дан}$ . Полученное значение  $F_{отр}$  является лучшим, но не максимальным, так как метод движения по градиенту не решает вопроса о нахождении самой лучшей точки поверхности отклика. Поэтому, чтобы изучить область оптимума, необходимо перейти ко второму этапу оптимизации – исследованию стационарной области.

Многомерная оптимизация заключается в нахождении экстремумов функций многих переменных  $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$ . Из всего многообразия приёмов, применяемых для определения максимума, ограничимся относительно простым методом равномерного поиска. Оптимизация уравнения регрессии проводилась с дифференцированным заданием погрешности вычисления ( $E$ ) и шага ( $\Delta X$ ) по каждой

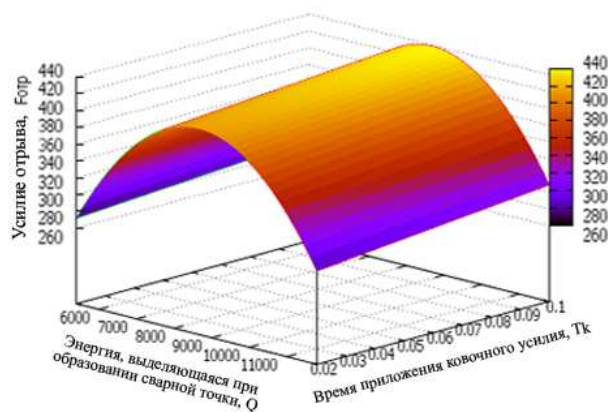


Рис. 1 – Поверхность отклика функции  $F_{отр}$  при  $F_{сж}=365 \text{ дан}$

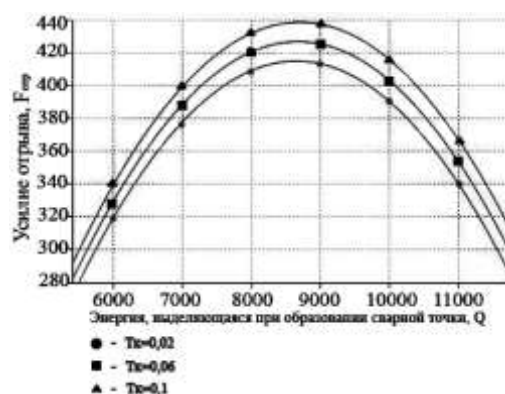


Рис. 2 – Пересечения поверхности отклика функции  $F_{отр}$  при  $F_{сж}=365 \text{ дан}$

переменной при выполнении граничных условий, не позволяющих выйти за пределы реализованного факторного пространства.

Расчёты показали, что оптимальные значения режимов точечной контактной электросварки пластин титана  $\delta_1 = 2$  мм с малоуглеродистой сталью  $\delta_2 = 10$  мм находятся в пределах:

$Q = 9200 \pm 10 \text{ кА}^2$ ,  $T_k = 0,099 \pm 0,01 \text{ с}$ ;  $F_{сж} = 465 \pm 15 \text{ дан}$ , при этом значение показателя качества  $F_{отр}$  с подстановкой средних значений равно 445 дан.

Виды излома биметаллического соединения Fe-Ti полученного рельефной контактной сваркой при экспериментальном и оптимальном режимах показаны на рис.3.

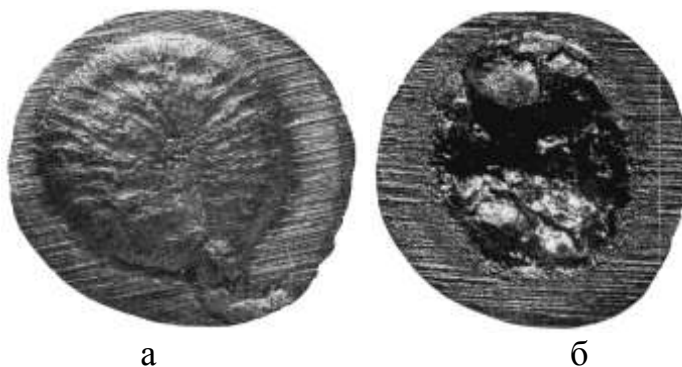


Рис. 3 - Вид излома биметаллического соединения Fe-Ti полученного рельефной контактной сваркой: а – при параметрах режима:  $Q = 11800 \text{ кА}^2$ ;  $T_k = 0,02 \text{ с}$ ;  $F_{сж} = 480 \text{ дан}$ ;  $F_{отр} = 200 \text{ дан}$ ; б – при оптимальных параметрах режима:  $Q = 9200 \text{ кА}^2$ ,  $T_k = 0,099 \text{ с}$ ;  $F_{сж} = 465 \text{ дан}$ ,  $F_{отр} = 445 \text{ дан}$ .

**Выводы.** В данной работе была установлена параметрическая связь между основными технологическими показателями процесса сварки с определяющим критерием качества сварного соединения – величиной усилия отрыва ( $F_{отр}$ ). При этом был оптимизирован алгоритм получения адекватного количественного математического описания многофакторной технологической системы рельефной сварки титана со сталью, на основе построенных поверхностей отклика и их пересечений были получены оптимальные параметры режима сварки.

Испытание сварного соединения, полученного на оптимальных режимах ( $F_{отр.эксп.} = 427 \text{ дан}$ ), показали хорошую сходимость экспериментальных и расчётных значений.

**Список литературы:** 1. American Welding Society (2007), Structural Welding Code, Titanium (AWS D1.9), <https://www.awspubs.com/>. 2. Donachie, Jr., Matthew (2000), Titanium, A Technical Guide, ASM International, <http://asmcommunity.asminternational.org/portal/site/asm/>. 3. Welding Technology Institute of Australia. Welding of stainless steel. / Lidcombe, N.S.W. : Welding Technology Institute of Australia, 2002. 4. Specification for Titanium and Titanium Alloy Welding Electrodes and Rods Edition: 5th American Welding Society / 17-Aug-2007 / 38 p. 5. Recommended Practices for Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Piping and Tubing American Welding Society / 11-Feb-2000 / 29 p. 6. <http://www.weldmyworld.com/blog/2011/02/how-to-weld-titanium.html> 7. Математическая модель влияния технологических параметров контактной сварки на прочность биметаллических конструкций Fe-Ti / [Попов С. Н., Пиньковский И. В., Быковский О. Г., Басов О. В.]. – Сб. трудов «МАТИ – Сварка XXI века» «Технология, оборудование и подготовка кадров в сварочном производстве», М. : «МАТИ» - РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2003. – 352 с. 8. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. – М.: Наука, 1976. – 280 с. 9. Пиньковский И. В. Оптимизация параметров режима рельефной контактной точечной сварки титана с малоуглеродистой сталью / Пиньковский И. В., Быковский О. Г., Попов С. Н. – К., 1989. – 10 с. – Деп. в УкрНИ ИНТИ 24.05.89, №1251-УК89.

Надійшла до редколегії 20.04.2013

УДК 621.791.76:539.4.25

**Численное моделирование влияния технологических параметров контактной сварки на прочность соединения / С. Н. Попов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. – № 26 (999). – С. 7-12. – Бібліогр.:9 назв.**

В статті оптимізовано алгоритм отримання адекватного кількісного математичного опису багатофакторної технологічної системи при рельєфному зварюванні різнойменних матеріалів. Подано математичний опис нової технології рельєфного зварювання титану та сталі, який забезпечує достатньо високу працездатність (міцність і пластичність) зварних з'єднань і повну відсутність несуцільностей в зварних точках.

**Ключові слова:** фізико-механічні властивості, точкова рельєфна зварювання, оптимізація, деформація, інтерметалідна фаза, поверхня відгуку.

The paper is optimized algorithm to obtain adequate quantitative mathematical description of multi-technology system for projection welding of dissimilar materials. A mathematical description of the new technology projection welding of titanium and steel, which ensures a sufficiently high efficiency (strength and ductility) of welded joints and the complete absence of discontinuities in welds.

**Keywords:** physical and mechanical properties, spot projection welding, optimization, strain intermetalid faza, response surface.

УДК 621.883.6(045)

*В. И. РЫНДЯЕВ*, канд. техн. наук, доц., УИПА, Харьков

## КИНЕМАТИКО - СИЛОВОЙ АНАЛИЗ АДАПТИВНОГО ПРИВОДА КОНВЕЙЕРА

Предложена методика кинематико – силового анализа адаптивного привода конвейера, созданного на основе несимметричного дифференциала. Показана возможность использования в качестве критерия адаптации различных соотношений силовых параметров.

**Ключевые слова:** адаптивный привод, передаточное число, барабаны.

**Введение.** Интенсификация процессов транспортирования сырья и материалов в различных отраслях промышленности оказывает существенное влияние на схемные и конструктивные решения систем приводов современного транспортирующего оборудования.

Создание работоспособных систем трансмиссий для приводов конвейеров в условиях интенсивного роста действующих нагрузок превратилось в острую проблему, от решения которой в значительной мере зависят технико - экономические показатели предприятий.

Реализация схемы с использованием несимметричных дифференциалов для приводов конвейеров позволяет повысить надежность конструкции [1,2].

**Цель работы.** Целью работы является исследование системы адаптивного привода конвейера и разработка методики его кинематико – силового анализа.

**Изложение основного материала работы.** Условие отсутствия проскальзывания между барабанами и лентой в двухбарабанном тянущем устройстве конвейера эквивалентно условию обеспечения определенного соотношения моментов на барабанах, определяемого наименьшими гарантированными коэффициентами трения между лентой и барабанами  $\mu$  и углами обхвата  $\alpha$  (рис. 1).

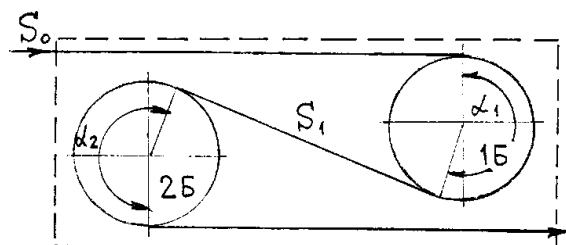


Рис. 1 - Расчетная схема двухбарабанного тянущего устройства конвейера

Совмещение этих условий возможно только в саморегулируемой по скорости системе с передаточным числом между барабанами, соответствующим расчетным