

УДК 62-932.4

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ РОБОТОВ МОДУЛЬНОГО ТИПА

И.Ш. НЕВЛЮДОВ, А.В. ПОНОМАРЕВА, А.А. ФУНКЕНДОРФ, К.Л. ХРУСТАЛЕВ

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

Поступила в редакцию 23 апреля 2018

Аннотация. Приведены зависимости влияния основных технологических параметров процесса получения неразъемных соединений в конструкциях модульного типа ультразвуковой сваркой на качество его конечного результата, определены степени детерминированности вариации критериальных переменных предикторами. Модели, полученные в ходе исследований с применением регрессионного анализа, метода активного планирования и полного факторного эксперимента, позволяют определять необходимые значения основных технологических параметров процесса расчетным методом.

Ключевые слова: модульная конструкция, автоматизация процессов сборки, ультразвуковая сварка, технологические параметры, регрессионный анализ.

Abstract. The dependences of the main technological parameters of the obtaining process for permanent connections production in modular type constructions by ultrasonic welding influence on the quality of its final result are given, the degrees of the criterial variables by the predictors determinism variations are determined. The models obtained during researches using regression analysis, the active planning method and the complete factor experiment, allow to determine the required values of the main technological parameters by the calculation method.

Keywords: modular construction, automation of assembly processes, ultrasonic welding, technological parameters, regression analysis.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 114, No. 4, pp. 51-57

Mathematical model of technological process of permanent joints obtaining in the modular type robots construction

I.Sh. Nevliudov, A.V. Ponomaryova, A.A. Funkendorf, K.L. Khrustalev

Введение

Модульный принцип в конструировании роботов различного назначения приобретает все большее распространение в настоящее время, что обусловлено повышением уровня гибкости и унификации конструкций указанного типа, их надежности и ремонтпригодности, а также экономическими показателями конечных изделий. Реализация технологических процессов сборки роботов с конструкциями модульного типа заключается в обеспечении согласованности структурных элементов в целостной системе устройства за счет получения межмодульных соединений разъемного и неразъемного типов. Указанные сборочные процессы являются наименее автоматизированными в условиях современных производств и в общей структуре трудоемкости изготовления занимают непропорционально большой удельный вес, который в настоящее время достигает 70 % от общего объема производства [1].

Автоматизация технологических операций обеспечения разъемных межмодульных соединений подразумевает использование универсального оборудования (в основном

промышленных роботов-манипуляторов) с высокими показателями точности позиционирования исполнительных элементов. Автоматизация операций получения неразъемных межмодульных соединений является более сложной задачей, подразумевающей использование специализированного исполнительного оборудования с учетом стремления к сохранению максимального уровня гибкости реализации сборочных процессов, а также достижения оптимальных параметров соответствующих технологических режимов для обеспечения максимального качества конечных изделий. Решение данной задачи требует разработки новых подходов, основанных на разработке соответствующего математического и алгоритмического обеспечения для их реализации, что, в свою очередь, требует определения степени детерминированности вариации значений технологических параметров процесса на конечный результат.

Постановка задачи исследования

Получение межмодульных (и в некоторых случаях внутримодульных) неразъемных соединений в конструкциях роботов модульного типа методом ультразвуковой (УЗ) сварки поверхностей позволяет получать неразъемные контактные соединения механического и электрического типов с учетом возможной разнородности материалов, путем воздействия на них УЗ колебаний. УЗ сварка имеет множество преимуществ по сравнению с другими методами и позволяет получать соединения тонких элементов (к примеру, 10 мкм для алюминия), благодаря чему может быть применена при производстве микро- и нанороботов [2, 3]. Одной из наиболее распространенных конструкций для реализации неразъемных соединений указанным методом является установка с продольно-колебательными системами (рис. 1). В конструкциях такого типа важным является расположение свариваемых поверхностей и плоскости опоры к выводу волновода-концентратора, обеспечивающее ортогональность направленности распространения УЗ волн относительно свариваемых поверхностей и соответствующее направлению вектора силы сварочного усилия $F_{св}$. Указанные элементы могут рассматриваться как съемные исполнительные элементы роботов-манипуляторов (волновод и опора), а также могут находиться в их схватах (сварочные поверхности), обеспечивая тем самым максимальную гибкость процессов получения неразъемных соединений методом УЗ сварки.

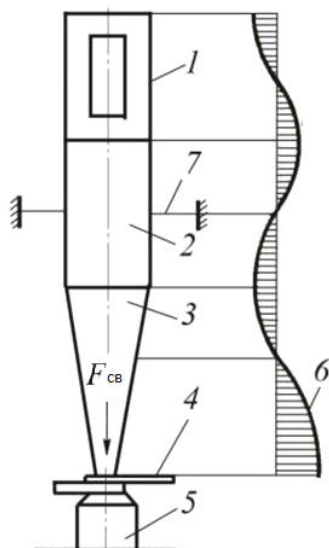


Рис. 1. Схема ультразвуковой сварки с продольной колебательной системой, состоящей из преобразователя (1), волновода-концентратора (2, 3), свариваемых деталей (4), опоры (5), амплитуды колебаний (6) и акустической развязки (7) [4]

Ультразвуковая сварка является достаточно сложным процессом, в ходе реализации которого на конечный результат воздействует ряд параметров, среди которых можно выделить основные технологические параметры, которые непосредственно влияют на количество

механической энергии, подводимой к свариваемым материалам и превращаемой в тепловую энергию. К основным технологическим параметрам указанного процесса относят амплитуду колебаний рабочего торца волновода, частоту колебаний, продолжительность ультразвукового импульса (применимо для точечной сварки) или скорость сварки (применимо для шовной сварки) и сварочное давление или усилие прижима сварочного инструмента к материалу. В некоторых случаях частота и амплитуда являются либо статичными параметрами, характерными для конкретной модели исполнительного оборудования, либо достаточно сложными в наладке. Для таких случаев регулирование этих двух параметров компенсируется регулированием исходной мощности УЗ генератора. К дополнительным параметрам относятся параметры, влияющие на непроизводительные затраты энергии (энергию механических колебаний, безвозвратно теряющуюся в опоре, или теплоту, уходящую из сварочной зоны вследствие теплоотвода в холодные волновод и опору), а именно размеры, форму и материал опоры и волновода, материал подложки, температуру предварительного подогрева волновода и т. д. [5].

Регулирование исходных значений основных технологических параметров УЗ сварки с учетом их взаимосвязи позволяет оптимизировать режим данного процесса, что требует определения степени детерминированности вариаций их значений с учетом влияния на конечное качество полученных соединений.

Проведение эксперимента и результаты исследования

Для реализации дальнейшего исследования принято решение об использовании регрессионного анализа как метода статического эксперимента, позволяющего выявить зависимость влияния основных технологических параметров процесса на качество его конечного результата, реализовать предсказания его значений и определить степени детерминированности вариации критериальных переменных предикторами. Также для определения степени влияния значений технологических параметров процесса УЗ сварки было принято решение об использовании полного факторного эксперимента (ПФЭ) [2], что обусловлено простотой решения системы уравнений оценивания параметров, а также статистической избыточностью количества измерений, которая уменьшает влияние погрешностей отдельных измерений на оценку параметров.

В рамках указанного, модель процесса получения неразъемных соединений УЗ сваркой может быть представлена в виде модели типа «черный ящик» (рис. 2), позволяющей рассматривать данный процесс как целостную систему без учета ее элементов и определять ее реакции на изменяющиеся значения входных параметров с учетом их ограничений.

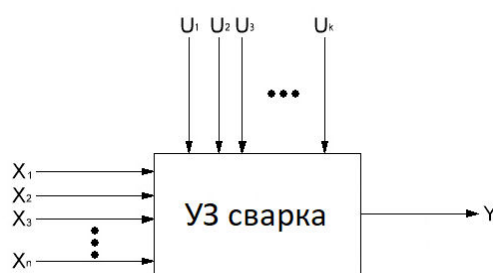


Рис. 2. Модель процесса получения неразъемных соединений методом УЗ сварки

Математическое описание модели состоит из описания границ, которые устанавливаются возможностями системы, ее программного и технического обеспечения. Модели такого типа характеризуются входными сигналами, которые могут быть заданы: программно и рассматриваться как заданные управляющие воздействия (входные значения основных технологических параметров); случайными внешними возмущениями (дополнительными параметрами); результирующими управляющими сигналами, поступающими на исполнительное оборудование и обеспечивающими режимы технологических параметров процесса:

$$M_{\text{УЗС}} = \begin{cases} X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}; \\ U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_k\}; \\ Y, \end{cases} \quad (1)$$

где $M_{\text{УЗС}}$ – модель процесса УЗ сварки, n – количество входных параметров X , воздействующих на процесс (основных технологических параметров), k – количество случайных параметров U , воздействующих на процесс (дополнительных параметров), Y – параметр, по которому оценивается качество полученного соединения.

При этом воздействие основных технологических параметров процесса на конечный результат (без учета воздействия случайных параметров) описывается следующим выражением:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3 \dots X_n). \quad (2)$$

Математическая модель системы может быть получена в результате аппроксимации этой функции какой-либо другой функцией. В случае аппроксимации линейной функции модель процесса УЗ сварки может быть описана выражением:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n, \quad (3)$$

где $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – искомые параметры модели, позволяющие предсказывать значение Y и поведение системы в целом, в определении которых и заключается цель эксперимента.

Важно отметить, что параметр a_0 позволяет учитывать воздействие случайных параметров процесса U на его конечный результат Y .

Использование метода активного планирования позволило не только разбить весь эксперимент на несколько этапов, но и варьировать ряд факторов и получать одновременно количественные оценки всех проявляющихся эффектов. При этом, в отличие от классического регрессионного анализа, избегать корреляции между коэффициентами уравнения регрессии. Таким образом, при статическом подходе математическая модель процесса получения неразъемных соединений методом УЗ сварки может быть представлена в общем виде полиномом n -степени – отрезком ряда Тейлора, в который разлагается неизвестная функция:

$$Y(X_1, X_2, X_3 \dots X_n) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{\substack{i,j,u=1 \\ i \neq j \neq u}}^k b_{iju} X_i X_j X_u + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \dots, \quad (4)$$

где b_0 – свободный член, b_i – линейные эффекты, b_{ij} – эффекты парного взаимодействия, b_{iju} – эффекты тройного взаимодействия, b_{ii} – квадратичные эффекты.

В качестве исходных значений основных технологических параметров в рамках использования продольной колебательной системы точечной УЗ сварки (автоматическая установка FK Delvotec 6400, модернизированная для точечной сварки) были рассмотрены усилие нагрузки сварочного инструмента F_{H} в диапазоне 202,6...147,7 мН, исходная мощность УЗ генератора $P_{\text{УЗ}}$ в диапазоне значений 0,21...0,26 Вт и время сварки $t_{\text{СВ}}$ – 46,65...67,25 мс. Количество экспериментов, в соответствии с планированием ПФЭ, составило 2^n , где n – количество факторов, следовательно – 8. Соответственно, в ходе проведения эксперимента было получено по 15 образцов сварных соединений (алюминиевые проводники толщиной 14 и 20 мкм) для режимов, соответствующих граничным значениям указанных диапазонов значений параметров. Как показатель качества полученных электрических соединений использовалось их переходное сопротивление $R_{\text{П}}$, определение экспериментальных значений которого проводилось методом вольтметра-амперметра [6]. Для граничных значений параметров была проведена их нормировка, вследствие чего

максимальным значениям факторов присвоим нормированное значение +1, минимальным – нормированное значение –1. Результирующие усредненные значения переходного сопротивления, полученные экспериментальным путем для каждой из серий образцов, представлены на рис. 3.

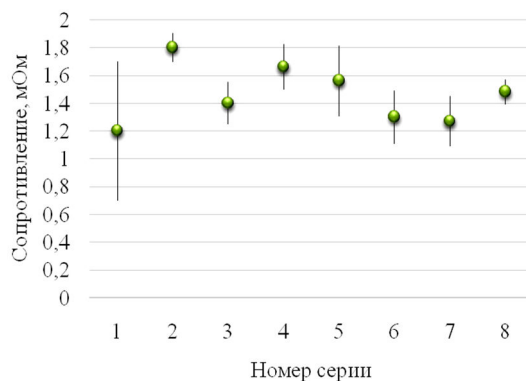


Рис. 3. Результаты серий экспериментов

На основе полученных значений была составлена матрица планирования эксперимента (табл. 1).

Таблица 1. Матрица планирования

| № | X_0 | F_H | $P_{УЗ}$ | $t_{СВ}$ | F_H , мН | $P_{УЗ}$, Вт | $t_{СВ}$, мс | $\Delta R_{П}$, мОм |
|---|-------|-------|----------|----------|------------|---------------|---------------|----------------------|
| | X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | X_1 | X_2 | X_3 | Y |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 202,60 | 0,26 | 67,25 | 1,2±0,5 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | -1 | 202,60 | 0,26 | 46,65 | 1,8±0,1 |
| 3 | 1 | 1 | -1 | 1 | 202,60 | 0,21 | 67,25 | 1,4±0,15 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | -1 | 202,60 | 0,21 | 46,65 | 1,66±0,16 |
| 5 | 1 | -1 | 1 | 1 | 147,70 | 0,26 | 67,25 | 1,56±0,25 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | -1 | 147,70 | 0,26 | 46,65 | 1,3±0,19 |
| 7 | 1 | -1 | -1 | 1 | 147,70 | 0,21 | 67,25 | 1,27±0,18 |
| 8 | 1 | -1 | -1 | -1 | 147,70 | 0,21 | 46,65 | 1,48±0,09 |

Полученная в соответствии с приведенной матрицей математическая модель имеет вид

$$Y = 1,6 + 0,002x_1 + 0,25x_2 - 0,0098x_3. \quad (5)$$

Коэффициент детерминации R^2 , обеспечивающий приведенную модель, принял достаточно малое значение 0,36, что свидетельствует о необходимости изменения структуры модели. Также полученное значение указывает на существование взаимной связи между основными технологическими параметрами процесса либо на их нелинейность. Добавление влияния нелинейности факторов в ходе проведения эксперимента также не привели к повышению соответствующего коэффициента R^2 . Сравнение полученных экспериментальных и модельных данных приведено на рис. 4.

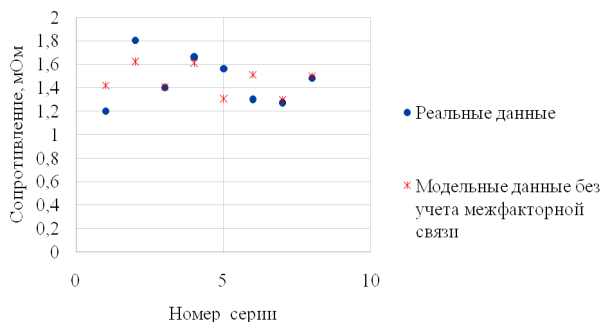


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и модельных данных

Для определения коэффициентов взаимодействия было принято решение о расширении матрицы планирования дополнительными столбцами, учитывающими эффект двойного и тройного взаимодействия факторов (табл. 2).

Таблица 2. Расширенная матрица планирования

| № | X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | $X_1 X_2$ | $X_1 X_3$ | $X_2 X_3$ | $X_1 X_2 X_3$ | Y |
|---|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------------|
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | $1,2 \pm 0,5$ |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | $1,8 \pm 0,1$ |
| 2 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | $1,4 \pm 0,15$ |
| 3 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | $1,66 \pm 0,16$ |
| 4 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | $1,56 \pm 0,25$ |
| 5 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | $1,3 \pm 0,19$ |
| 6 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | $1,27 \pm 0,18$ |
| 7 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | $1,48 \pm 0,09$ |

В соответствии с расширенной матрицей планирования получена математическая модель технологического процесса получения неразъемных соединений в конструкциях роботов модульного типа с использованием УЗ сварки, отражающая взаимосвязи основных технологических параметров процесса и их влияние на конечный результат:

$$Y = 30,73 - 0,159x_1 - 140,8x_2 - 0,54x_3 + 0,78x_1x_2 + 0,0029x_1x_3 + 2,57x_2x_3 - 0,014x_1x_2x_3. \quad (6)$$

Для приведенной модели коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$, что является достаточно высоким показателем. Таким образом, ошибка между экспериментальными и вычисленными в соответствии с расширенной матрицей планирования данными близится к нулю.

Полученная функциональная взаимосвязь между факторами и результирующим показателем качества соединений, полученных методом УЗ сварки, – переходным сопротивлением, с учетом известности требуемых значений данного параметра позволяет определять необходимые значения основных технологических параметров процесса УЗ сварки (например, времени сварки – x_3):

$$X_3 = \frac{Y - 30,73 + 0,159X_1 + 140,8X_2 - 0,78X_1X_2}{-0,54 + 0,0029X_1 + 2,57X_2 - 0,014X_1X_2}. \quad (7)$$

Заключение

Проверка влияния коэффициентов, проведенная по критерию Стьюдента с использованием параллельных опытов, показала значимость всех коэффициентов соответствующего уравнения. Малое значение коэффициента детерминации, полученное в результате первого эксперимента, с последующей неэффективностью добавления влияния нелинейности факторов в модель, указывает на существование взаимной связи между основными технологическими параметрами процесса. Математическая модель технологического процесса получения неразъемных соединений в конструкциях роботов модульного типа с использованием УЗ сварки, отражающая взаимосвязи основных технологических параметров процесса и их влияние на показатель качества сваренных электрических соединений, была получена в соответствии с расширенной матрицей планирования и учетом возможной корреляционной связи между основными технологическими параметрами процесса. Проверка адекватности модели осуществлялась с использованием критерия Фишера. Выявленная в ходе проведения исследования функциональная взаимосвязь между значениями основных технологических параметров процесса УЗ сварки и усредненными значениями переходного сопротивления полученных сварных соединений, позволяет определять необходимые значения основных технологических параметров процесса расчетным методом, что, в свою очередь, способствует дальнейшей реализации контура адаптивного управления процессом получения неразъемных соединений в конструкциях модульного типа указанным методом.

Список литературы

1. Шишмарев В.Ю. Автоматизация технологических процессов. М.: Изд. центр «Академия», 2013. 352 с.
2. Невлюдов І.Ш. Основи виробництва електронних апаратів. Харків: Сміт, 2005. 692 с.
3. Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств. М.: Техносфера, 2007. 256 с.
4. Курс лекций-презентаций по дисциплине «Технология и оборудование сварки давлением» // en.ppt-online.org/ [Электронный ресурс]. – URL: <https://en.ppt-online.org/273479> / (дата обращения: 08.10.2017).
5. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. Л.: Машиностроение, 1988. 224 с.
6. Дивин А.Г. Пономарев С.В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. В 5 ч. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. Ч. 1. 104 с.

References

1. Shishmarev V.Yu. Avtomatizaciya tekhnologicheskikh processov: uchebnyk dlya stud. uchrezhdenij sred. prof. obrazovaniya. 7e izd., ispr. M.: Izd. centr «Akademiya», 2013. 352 s. (in Russ.)
2. Nevludov I.Sh. Osнови virobniцtva elektronnih aparativ. Harkiv: Smit, 2005. 692 s. (in Ukr.)
3. Medvedev A.M. Sbornka i montazh ehlektronnyh ustrojstv. M.: Tekhnosfera, 2007. 256 s. (in Russ.)
4. Kurs lekcij-prezentacij po discipline «Tekhnologiya i oborudovanie svarki davleniem» // en.ppt-online.org/ [Electronic resource]. – URL: <https://en.ppt-online.org/273479> / (access date: 08.10.2017). (in Russ.)
5. Holopov Yu.V. Ul'trazvukovaya svarka plastmass i metallov. L.: Mashinostroenie. Leningr. otd. 1988. 224 s. (in Russ.)
6. Divin A.G. Ponomarev S.V. Metody i sredstva izmerenij, ispytanj i kontrolya : uchebnoe posobie. V 5 ch. Tambov: Izd-vo GOU VPO TGTU, 2011. Ch. 1. 104 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Невлюдов І.Ш., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Пономарева А.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Функендорф А.А., ассистент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Хрусталеv К.Л., к.т.н., старший преподаватель кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Information about the authors

Nevliudov I.Sh., DSci, professor, head of computer-integrated technologies, automation and mechatronics department of Kharkiv national university of radioelectronics.

Ponomaryova A.V., PhD, associate professor, associate professor of computer-integrated technologies, automation and mechatronics department of Kharkiv national university of radioelectronics.

Funkendorf A.A., assistant of computer-integrated technologies, automation and mechatronics department of Kharkiv national university of radioelectronics.

Khrustalev K.L., PhD, senior lecturer of computer-integrated technologies, automation and mechatronics department of Kharkiv national university of radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

61166, Украина,
г. Харьков, пр-т Науки, 14,
Харьковский национальный
университет радиоэлектроники
тел. +38-057-702-14-86;
e-mail: anastasiia.funkendorf@nure.ua
Функендорф Анастасия Александровна

Address for correspondence

61166, Ukraine,
Kharkiv, Science ave., 14,
Kharkiv national
university of radioelectronics
tel. +38-057-702-14-86;
e-mail: anastasiia.funkendorf@nure.ua
Funkendorf Anastasiia Alexandrovna