

# АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ РИСКА ПОЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ В РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСАХ

Д. С. Фоминых<sup>1</sup>, В. А. Кушников<sup>1</sup>, А. С. Богомолов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр  
Российской академии наук», Россия

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия

E-mail: dm\_fominyh@mail.ru, kushnikoff@yandex.ru, alexbogomolov@yandex.ru

Рассмотрена задача по минимизации риска возникновения критических сочетаний событий, приводящих к появлению дефектов при сварке роботизированными технологическими комплексами. Приведена постановка задачи, разработаны модели и алгоритмы ее решения. Решение задачи основано на построении дерева событий с учетом причинно-следственных связей между характеристиками технологического процесса. Внедрение разработанных моделей и алгоритмов позволит повысить качество производимой продукции.

## ALGORITHM FOR ASSESSING THE RISK OF DEFECTS IN THE WELDING PROCESS IN ROBOTIC COMPLEXES

D. S. Fominykh, V. A. Kushnikov, A. S. Bogomolov

The article considers the problem of minimizing the risk of occurrence of critical combinations of events leading to the appearance of defects during welding by robotic technological complexes. The problem statement is given, models and algorithms for its solution are developed. The solution to the problem is based on the construction of an event tree taking into account the cause-and-effect relationships between the characteristics of the technological process. The implementation of the developed models and algorithms will improve the quality of manufactured products.

Обеспечение высокого качества сварки является крайне актуальной задачей, поскольку дефекты, возникающие в процессе сварки, могут приводить к серьезным последствиям. В настоящее время разработано и применяется на практике подходов к управлению роботами, позволяющие повысить качество продукции. Например, за счёт увеличения точности позиционирования манипулятора [1–4], использования систем машинного зрения [5–6]. Также значительное количество работ посвящено проблеме отслеживания траектории робота [7–9]. В то же время отсутствуют подходы, позволяющие оценить вероятность возможного возникновения дефектов из-за критических сочетаний событий.

Сформулируем постановку задачи следующим образом: разработать алгоритм поиска вектора управляющих воздействий на роботизированный сварочный комплекс (РТК)  $\mathbf{v}(t) \in \{\mathbf{V}\}$ , позволяющих при любых допустимых значениях вектора состояний среды  $\mathbf{s}(t) \in \{\mathbf{S}\}$  минимизировать на временном интервале  $[t_1, t_2]$  критерий, характеризующий появление дефектов сварки:

$$= \int_{t_1}^{t_2} P(t, \mathbf{s}, \mathbf{v}) dt,$$

где  $P$  – вероятность возникновения дефекта из-за критических сочетаний событий, каждое из которых в отдельности к дефекту не приводит;  $S, V$  – множества допустимых значений векторов  $s(t)$  и  $v(t)$  соответственно;  $t$  – время.

Возникновение дефектов может быть представлено в причинно-следственных структурах, а именно – с помощью дерева событий, в котором вершины связаны с определенным событием, и значения этих вершин равно 1, если соответствующее событие происходит и 0 в противном случае. Корневая вершина дерева соответствует возникновению дефекта, который выражается в определенном конечном состоянии системы. К конечным состояниям системы приводят некие иницирующие события.

На основе опыта эксплуатации РТК Kawasaki, а также путем анализа причинно-следственных связей между характеристиками процесса сварки и было построено дерево событий, учитывающее причины возникновения дефектов при сварке в РТК (рис.1).

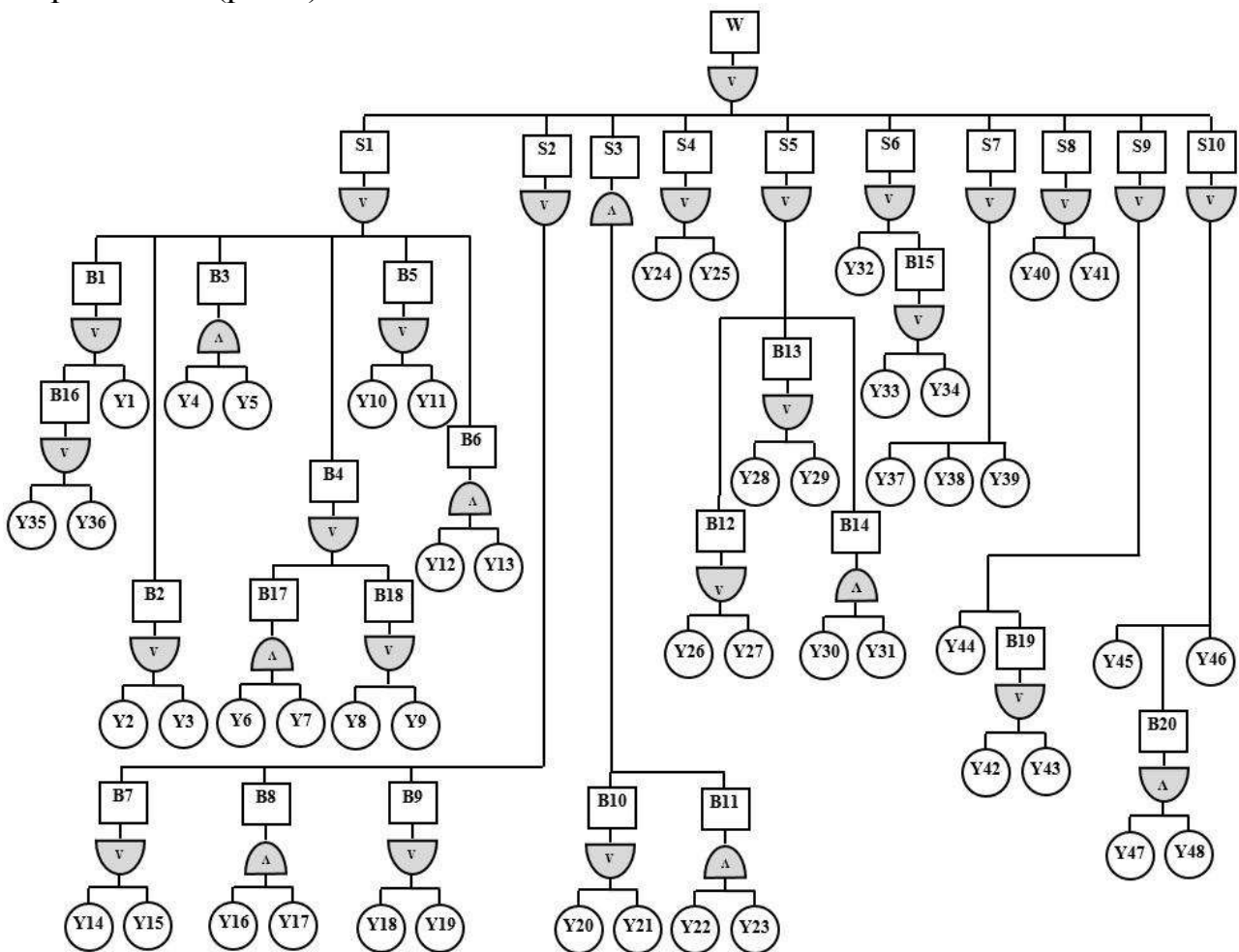


Рис. 1. Дерево событий, описывающее причинно-следственные связи возникновения дефектов при сварке в РТК

Конечные состояния:  $S_1$  – появление пор в сварном шве;  $S_2$  – подрез;  $S_3$  – прожог;  $S_4$  – наплыв в валике сварного шва;  $S_5$  – отклонение сварного шва от запрограммированной траектории;  $S_6$  – усадочная раковина;  $S_7$  – трещина или непровар;  $S_8$  – неравномерная ширина сварного шва;  $S_9$  – след от зажигания дуги;

$S_{10}$  – разбрызгивание.

Промежуточные состояния:  $B_1$  – недостаточное давление защитного газа;  $B_2$  – налипание окалины на поверхность сопла горелки;  $B_3$  – негерметичность газового контура;  $B_4$  – попадание охлаждающей жидкости в сопло горелки;  $B_5$  – наличие жидкости на поверхности балки;  $B_6$  – превышение расстояния от горелки до корня шва при сварке;  $B_7$  – неравномерная подача сварочной проволоки;  $B_8$  – содержание аргона в смеси >18%;  $B_9$  – прилипание электрода к наконечнику горелки;  $B_{10}$  – зазор в тавровом соединении;  $B_{11}$  – превышение сварочного тока;  $B_{12}$  – сбой системы слежения;  $B_{13}$  – неисправность узла тактильного поиска детали;  $B_{14}$  – неправильное размещение балки в стенде;  $B_{15}$  – некорректные параметры заварки кратера;  $B_{16}$  – некорректная настройка расхода защитного газа;  $B_{17}$  – течь в контуре охлаждения;  $B_{18}$  – течь в сварочной горелке;  $B_{19}$  – некорректный поиск детали;  $B_{20}$  – нестабильная сварочная дуга.

Иницирующие события:  $Y_1$  – падение давления на газораспределительной станции;  $Y_2$  – неисправность двигателя вращения фрезы очистки горелки;  $Y_3$  – низкое давление сжатого воздуха в пневмосистеме;  $Y_4$  – износ шланга подачи защитного газа;  $Y_5$  – износ диффузора сварочной горелки;  $Y_6$  – износ шланга подачи охлаждающей жидкости;  $Y_7$  – разрыв быстроразъемного соединения;  $Y_8$  – износ резиновых уплотнителей сварочной горелки;  $Y_9$  – неправильная установка сварочной горелки;  $Y_{10}$  – наличие остатков масла на балке после ультразвукового контроля;  $Y_{11}$  – попадание охлаждающей жидкости на поверхность балки;  $Y_{12}$  – замыкание электрода на корпус;  $Y_{13}$  – отсутствие контроля со стороны оператора;  $Y_{14}$  – износ роликов узла подачи проволоки;  $Y_{15}$  – загрязнение спирали шланг-пакета;  $Y_{16}$  – некачественный защитный газ;  $Y_{17}$  – неисправность газового редуктора;  $Y_{18}$  – некачественный наконечник сварочной горелки;  $Y_{19}$  – износ наконечника;  $Y_{20}$  – ошибка слесаря при сборке балки;  $Y_{21}$  – отсутствие контроля качества при сборке;  $Y_{22}$  – неисправность платы 1HW;  $Y_{23}$  – неправильные параметры линеаризации сварочного тока;  $Y_{24}$  – превышение размера прихватки при сборке;  $Y_{25}$  – повышенное напряжение сварочной дуги;  $Y_{26}$  – неисправность платы 1GM;  $Y_{27}$  – неправильные параметры компенсации отклонения сварочного тока;  $Y_{28}$  – неисправность контактора тактильного поискового узла;  $Y_{29}$  – нарушение целостности заземляющего кабеля;  $Y_{30}$  – неисправность стендовой оснастки;  $Y_{31}$  – ошибка слесаря при закладке балки;  $Y_{32}$  – некачественная сварочная проволока;  $Y_{33}$  – превышение тока при заполнении кратера;  $Y_{34}$  – недостаточное время заполнения кратера;  $Y_{35}$  – ошибка оператора при настройке расхода газа;  $Y_{36}$  – неисправность газового отсекавателя;  $Y_{37}$  – некачественный присадочный материал;  $Y_{38}$  – повышенное содержание углерода и серы в металле;  $Y_{39}$  – загрязнение основного металла;  $Y_{40}$  – резкий перепад температуры;  $Y_{41}$  – неисправность платы RTPM;  $Y_{42}$  – смещение детали в стенде;  $Y_{43}$  – короткое замыкание в цепи блока TSU;  $Y_{44}$  – ошибка оператора при выборе программы;  $Y_{45}$  – повышенное содержание углекислого газа в газовой смеси;  $Y_{46}$  – загрязнение в зоне сварки;  $Y_{47}$  – неисправность стабилизатора напряжения питания;  $Y_{48}$  – скачок напряжения.

Для оценки вероятности появления дефектов определим минимальные се-

чения [10] дерева событий. Элементы этих сечений соответствуют мероприятиям, наступление которых приводит к возникновению дефекта. Минимальные сечения классифицируются по количеству элементов, входящих в их состав, на двух-, трехэлементные и т.д. Полученные минимальные сечения приведены в табл.

**Минимальные сечения дерева событий, приводящих к появлению дефектов при сварке РТК**

Одноэлементные сечения	(Y1), (Y2), (Y3), (Y8), (Y9), (Y10), (Y11), (Y14), (Y15), (Y18), (Y19), (Y24), (Y25), (Y35), (Y36)
Двухэлементные сечения	(Y4-Y5), (Y6-Y7), (Y12-Y13), (Y16-Y17), (Y30-Y31), (Y47-Y48)
Трехэлементные сечения	(Y20-Y22-Y23), (Y21-Y22-Y23)

Далее по методикам [10–13] для каждого сечения строится граф состояний, по которому составляется система дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена. Решением этой системы уравнений будет вероятность возникновения конкретного дефекта.

Проверка адекватности разработанного математического обеспечения проводилась при помощи регрессионного анализа. За основу взяты данные о выявленных дефектах при сварке в РТК Kawasaki на АО «Трансмаш» (г. Энгельс) за 2023 год. Относительная погрешность вычислений не превышает 9%, что говорит об адекватности разработанной модели (рис.2).

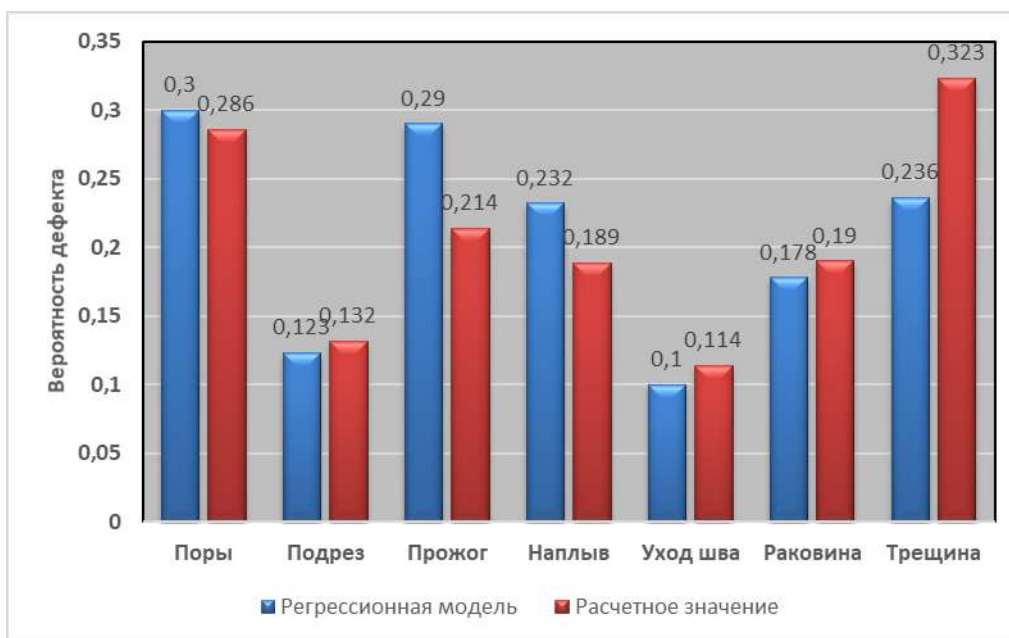


Рис. 2. Сравнение значений вероятности появления дефектов, рассчитанных по разным моделям

Таким образом, внедрение предложенных в статье моделей и алгоритмов позволит осуществить своевременное обнаружение риска возникновения критических сочетаний событий, приводящих к появлению дефектов при сварке в РТК и принять меры по их предотвращению.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cai J., Lei T.* An Autonomous Positioning Method of Tube-to-Tubesheet Welding Robot Based on Coordinate Transformation and Template Matching // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021. Vol. 6. No. 2. P. 787-794.
2. *Jung J., Kong K.* Mechanical Parameter Tuning Based on Iterative Learning Mechatronics Approach // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2018. Vol. 23. No. 2. P. 906-915.
3. *Rout A., Deepak B. B. V. L., Biswal B. B., Mahanta G. B.* Weld Seam Detection, Finding, and Setting of Process Parameters for Varying Weld Gap by the Utilization of Laser and Vision Sensor in Robotic Arc Welding // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022. Vol. 69. No. 1. P. 622-632.
4. *Zhou P., Peng R., Xu M., Wu V., Navarro-Alarcon D.* Path Planning With Automatic Seam Extraction Over Point Cloud Models for Robotic Arc Welding, // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021. Vol. 6. No. 3. P. 5002-5009.
5. *Abdullah-Al-Noman M., Eva A. N., Yeahyea T. B., Khan R.* Computer Vision-based Robotic Arm for Object Color, Shape, and Size Detection // *Journal of Robotics and Control*. 2022. Vol. 3. No. 2. P. 180-186.
6. *Agustian I., Daratha N., Faurina R., Suandi A., Sulistyaningsih S.* Robot Manipulator Control with Inverse Kinematics PD-Pseudoinverse Jacobian and Forward Kinematics Denavit Hartenberg // *J. Elektron. Dan Telekomun*. 2021. Vol. 21. No. 1. P. 8.
7. *Gonçalves F., Ribeiro T., Ribeiro A. F., Lopes G., Flores P.* A recursive algorithm for the forward kinematic analysis of robotic systems using Euler angles // *Robotics*. 2022. Vol. 11. No. 1. P. 1-20.
8. *Parhi D. R., Deepak B. B., Nayak D., Amrit A.* Forward and inverse kinematic models for an articulated robotic manipulator // *International Journal of Artificial Intelligence and Computational Research*. 2012. Vol. 4. No. 2. P. 103-109.
9. *Rijalusalam D., Iswanto I.* Implementation Kinematics Modeling and Odometry of Four Omni Wheel Mobile Robot on The Trajectory Planning and Motion Control Based Microcontroller // *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2021. Vol 2. No 5. P. 448-455.
10. *Клюев В. В., Резчиков А. Ф., Кушников В. А.* Анализ критических ситуаций, вызванных неблагоприятным течением обстоятельств // *Контроль. Диагностика*. 2014. № 7. С. 12-16.
11. *Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Иващенко В. А., Фоминых Д. С., Богомолов А. С., Филимонюк Л. Ю.* Снижение ущерба от критических сочетаний событий при сварке роботизированными технологическими комплексами // *Автоматизация. Современные технологии*. 2019. Т. 73. № 1. С. 22-26
12. *Резчиков А. Ф., Твердохлебов В. А., Кушников В. А., Иващенко В. А., Яндыбаева Н. В., Богомолов А. С., Филимонюк Л. Ю., Цесарский Л. Г., Адамович К. Ю., Шоломов К. И.* Математические методы предотвращения критических сочетаний событий в крупномасштабных системах. С. : Саратовский государственный университет, 2017. 68 с.
13. *Фоминых Д. С., Кушников В. А.* Модели и алгоритмы поиска критических сочетаний событий при сварке роботизированными комплексами // *Математические методы в технике и технологиях*. ММТТ. 2017. Т. 6. С. 18-23.