

# ПОСТРОЕНИЕ ДЕРЕВА СОБЫТИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА СВАРКИ В РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

**Фоминых Д.С., Кушников В.А., Богомолов А.С.,**

*Институт проблем точной механики и управления — обособленное структурное подразделение ФГБУН ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», Саратов, Россия  
dm\_fominyh@mail.ru, alexbogomolov@yandex.ru, kushnikoff@yandex.ru*

**Резчиков А.Ф.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
rw4cy@mail.ru*

*Аннотация. В статье предлагается подход к решению задачи повышения качества при сварке в роботизированных технологических комплексах. На основе знаний о наиболее распространенных дефектах, возникающих в процессе сварки, осуществлено построение дерева событий, описывающее инициирующие события и конечные состояния, соответствующие дефектам. Внедрение рассмотренных в статье моделей позволит снизить количество дефектов и повысить качество продукции при сварке в робототехнических технологических комплексах.*

*Ключевые слова: роботизированный технологический комплекс, дерево событий, сварка, качество, причинно-следственные связи.*

## **Введение**

Важной задачей, стоящей перед отечественными машиностроительными предприятиями, является сокращение потерь от выпуска некачественной продукции, обусловленных выполнением сварочных операций. Эффективным способом решения данной задачи является автоматизация производственного процесса за счет внедрения роботизированных технологических комплексов (РТК) дуговой сварки. Процесс сварки в РТК характеризуется большим количеством контролируемых параметров и существенной ролью оперативно-диспетчерского и ремонтного персонала.

Одним из основных аспектов технологического процесса сварки металлоконструкций является обеспечение высокого качества сварных соединений. Появление дефектов ведет к значительным затратам на их исправление, а также влияет на прочностные характеристики металлоконструкции, и, соответственно, несет в себе риски при дальнейшей эксплуатации.

Задача повышения качества при сварке является крайне актуальной, поскольку дефекты, возникающие в процессе сварки, могут привести к серьезным авариям и потерям [1,2], а дефекты могут иметь различные проявления, требующие идентификации [3–13].

## **1. Общий подход к решению задачи**

Согласно [14, 15] дефектом сварного соединения называется несоответствие параметров и характеристик сварного шва требованиям нормативно-технической документации. Их появление может быть связано с физико-химическими процессами, протекающими при формировании и кристаллизации сварочной ванны или остывании сварного соединения, либо с нарушением технологии сварки.

Описание наиболее распространенных дефектов, появляющихся в ходе сварки РТК, приведены на рис. 1, их описание дано в таблице 1.

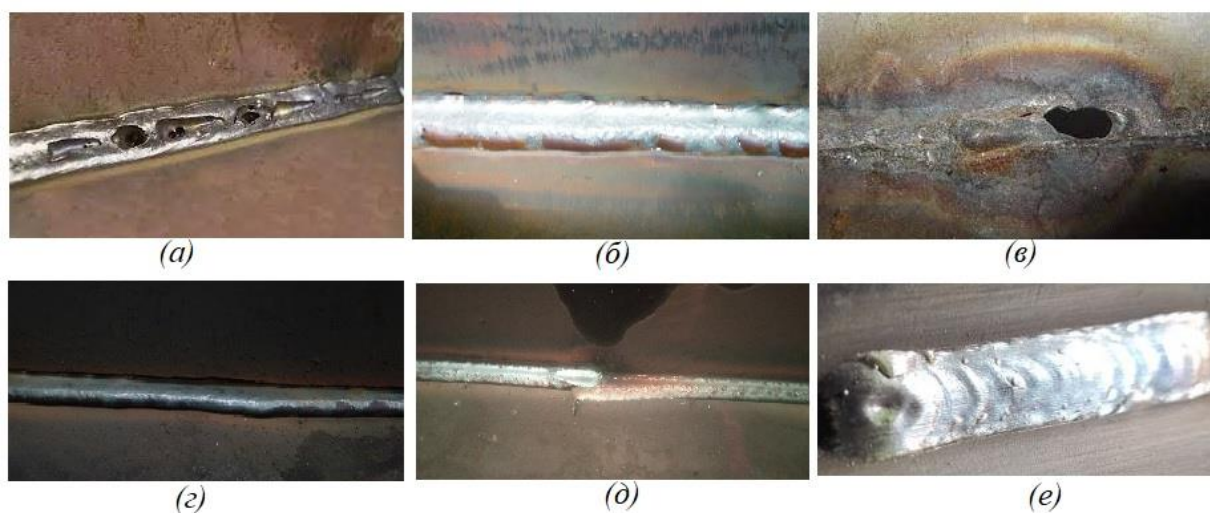


Рис. 1. Основные сварочные дефекты: а – поры, б – подрез, в – прожог, г – наплыв, д – уход шва, е – усадочная раковина

Таблица 1. Описание основных дефектов при сварке в РТК

Название дефекта	Описание
Поры в сварном шве	Образование воздушных пузырьков в зоне сварочной ванны и фиксация их в металле после его остывания и кристаллизации. Снижают прочность стыка и дополнительно опасны тем, что могут провоцировать образование трещин
Подрез сварного шва	Дефект в виде протяженного углубления вдоль линии сплавления основного металла и наружной части шва. Приводит к уменьшению сечения шва и образованию внутреннего напряжения соединения
Прожог	Сквозное отверстие, образовавшееся в результате вытекания сварочной ванны. Образуется при малой скорости сварки или завышенном сварочном токе
Наплыв	Стекание излишков расплавленного металла на холодную кромку, из-за чего появляется ложный валик, не имеющий прочного сплавления с рабочей поверхностью
Уход шва от запрограммированной траектории	Отклонение сварочной горелки от корня шва при движении, неправильное формирование сварочного шва
Усадочная раковина	Дефект в виде воронкообразного углубления, образовавшегося при резком обрыве дуги в конце шва либо в произвольном месте в результате усадки металла при остывании. Дно раковины может иметь дополнительные рыхлые включения, приводящие к появлению трещин

Возникновение дефектов может быть представлено в причинно-следственных структурах, а именно – с помощью дерева событий [14]. Каждая вершина дерева  $G$  связана с определенным событием, и значение этой вершины в конкретный момент времени равно 1, если соответствующее событие происходит и 0 в противном случае. Корневое событие в нашем случае соответствует возникновению некоторого дефекта при сварке, и выражается в определенном конечном состоянии системы  $D_1, D_2 \dots D_n$ , к которым приводят некие иницирующие события  $C_1, C_2 \dots C_k$ .

Дереву событий  $G$  может быть поставлена в соответствие булева функция  $f_G$ , для которой дерево является схемой реализации:

$$f_G = \begin{cases} 1, \text{ корневое событие происходит} \\ 0, \text{ корневое событие не происходит} \end{cases} \quad (1)$$

## 2. Построение дерева событий

На основе анализа причинно-следственных связей между характеристиками процесса сварки и изучения опыта работы персонала, эксплуатирующего РТК Kawasaki был построен граф, учитывающий причины возникновения дефектов при сварке в РТК. Используемое оборудование: манипулятор Kawasaki FA10L, контроллеры C40, источники питания Fronius TPS500, блоки подачи проволоки Fronius VR1500. Материалы: сварочная проволока 08Г2С, защитный газ Ar+CO<sub>2</sub>, сталь 10ХСНД, 09Г2С.

Граф, состоящий из 198 вершин, имеет вид дерева, в котором вершины представляют собой конечные состояния и инициирующие события, а дуги определяют их взаимосвязь и последовательность возникновения. Фрагмент данного графа приведен на рис. 2.

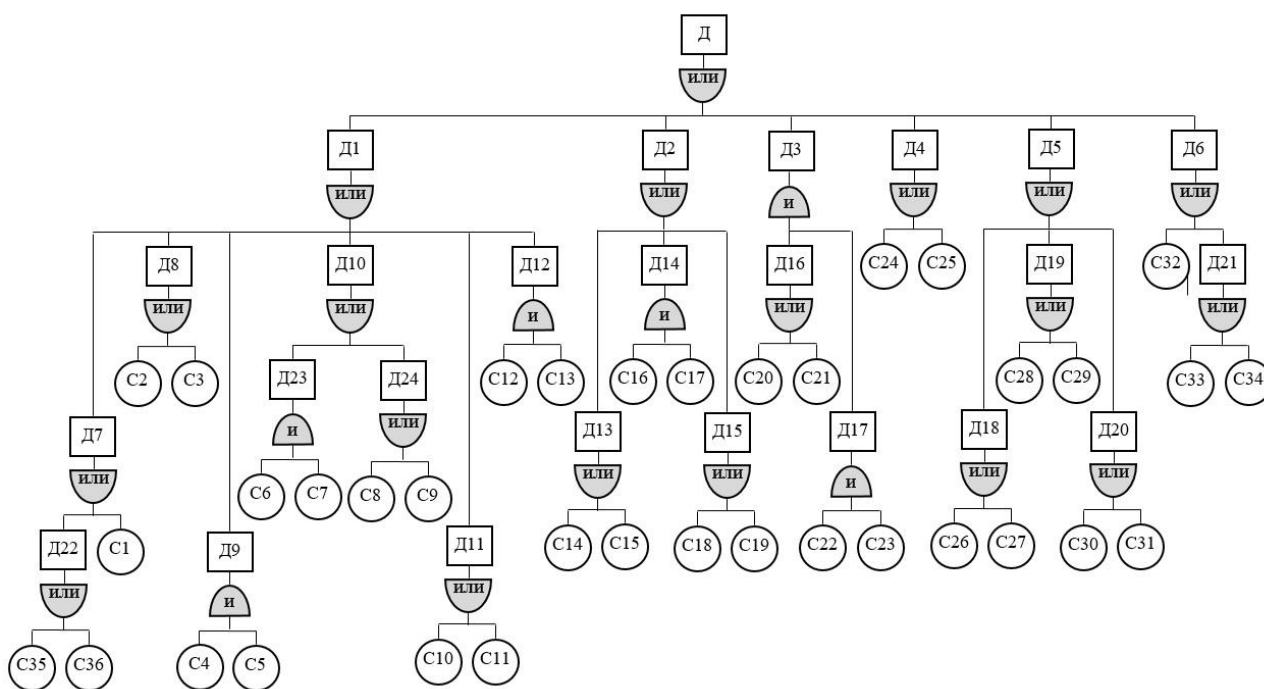


Рис. 2. Дерево событий возникновения дефектов при сварке изделий в РТК

В приведенном дереве событий использованы следующие конечные состояния:

- Д1 – появление пор в сварном шве;
- Д2 – подрез при сварке;
- Д3 – прожог в тавровом соединении;
- Д4 – наплывы в сварном шве;
- Д5 – уход сварного шва от запрограммированной траектории;
- Д6 – усадочная раковина;
- Д7 – недостаточное давление защитного газа;
- Д8 – налипание окалины на поверхность сопла горелки;
- Д9 – негерметичность газового контура;
- Д10 – попадание охлаждающей жидкости в сопло горелки;
- Д11 – наличие жидкости на балке;
- Д12 – превышение расстояния от горелки до корня шва при сварке;
- Д13 – неравномерная подача сварочной проволоки;
- Д14 – превышение концентрации аргона в смеси защитного газа;
- Д15 – прилипание электрода к наконечнику;
- Д16 – превышение зазора между заготовками;
- Д17 – превышение тока сварки;
- Д18 – неверная работа RTPM;
- Д19 – неисправность TSU;
- Д20 – неправильная закладка балки в стенде;

- Д21 – неверные параметры заварки кратера;
- Д22 – ошибочная настройка расхода защитного газа;
- Д23 – негерметичность охлаждающего контура;
- Д24 – течь в сварочной горелке.

Данным состояниям предшествуют следующие иницирующие события:

- С1 – падение давления на газораспределительной станции;
- С2 – неисправность мотора вращения фрезы очистки горелки;
- С3 – низкое давление сжатого воздуха в пневматическом контуре;
- С4 – износ шланга подачи защитного газа;
- С5 – износ диффузора сварочной горелки;
- С6 – износ шланга подачи охлаждающей жидкости;
- С7 – разрыв быстросъёмного соединения;
- С8 – износ резиновых уплотнителей сварочной горелки;
- С9 – неправильная установка сварочной горелки;
- С10 – наличие остатков масла на балке после проведения ультразвукового контроля;
- С11 – попадание воды на балку в результате течи кровли;
- С12 – замыкание электрода на корпус;
- С13 – отсутствие контроля оператора;
- С14 – износ роликов блока подачи проволоки;
- С15 – загрязнение спирали шланг-пакета;
- С16 – низкое качество защитного газа;
- С17 – неисправность газового редуктора;
- С18 – низкое качество наконечника;
- С19 – износ наконечника;
- С20 – ошибка слесаря при сборке балки;
- С21 – отсутствие контроля ОТК при сборке;
- С22 – неисправность платы 1HW;
- С23 – некорректные параметры линейаризации сварочного тока;
- С24 – превышение размера прихватки при сборке;
- С25 – повышенное напряжение сварочной дуги;
- С26 – неисправность платы 1GM;
- С27 – некорректные параметры компенсации отклонения сварочного тока;
- С28 – неисправность контактора блока TSU;
- С29 – нарушение целостности кабеля «массы»;
- С30 – неисправность стендовой оснастки;
- С31 – ошибка слесаря при закладке балки;
- С32 – низкое качество сварочной проволоки;
- С33 – превышение тока заварки кратера;
- С34 – недостаточное время заварки кратера;
- С35 – ошибка оператора при настройке расхода газа;
- С36 – неисправность отсекаателя.

Таким образом, функция (1) примет следующий вид:

$$f_G = Д1 \vee Д2 \vee Д3 \vee Д4 \vee Д5 \vee Д6,$$

где:

$$Д1 = С1 \vee С2 \vee С3 \vee С4 \wedge С5 \vee С35 \vee С36 \vee С6 \wedge С8 \wedge С9 \vee С7 \vee С10 \vee С11 \vee С12 \wedge С13;$$

$$Д2 = С16 \wedge С17 \vee С14 \vee С15 \vee С18 \vee С19;$$

$$Д3 = С20 \wedge С22 \wedge С23 \vee С21;$$

$$Д4 = С24 \vee С25;$$

$$Д5 = С26 \vee С27 \vee С28 \vee С29 \vee С30 \wedge С31;$$

$$Д6 = С32 \vee С33 \vee С34;$$

$$f_G = C1 \vee C2 \vee C3 \vee C4 \wedge C5 \vee C35 \vee C36 \vee C6 \wedge C8 \wedge C9 \vee C7 \vee C10 \vee C11 \vee C12 \wedge C13 \vee C16 \wedge C17 \vee C14 \vee C15 \vee C18 \vee C19 \vee C20 \wedge C22 \wedge C23 \vee C24 \vee C25 \vee C26 \vee C27 \vee C28 \vee C29 \vee C30 \wedge C31 \vee C32 \vee C33 \vee C34;$$

На рис. 3 приведена схема дискретного устройства, построенного по данной булевой функции и применяемого для оперативной проверки возникновения дефекта при сварке в РТК.

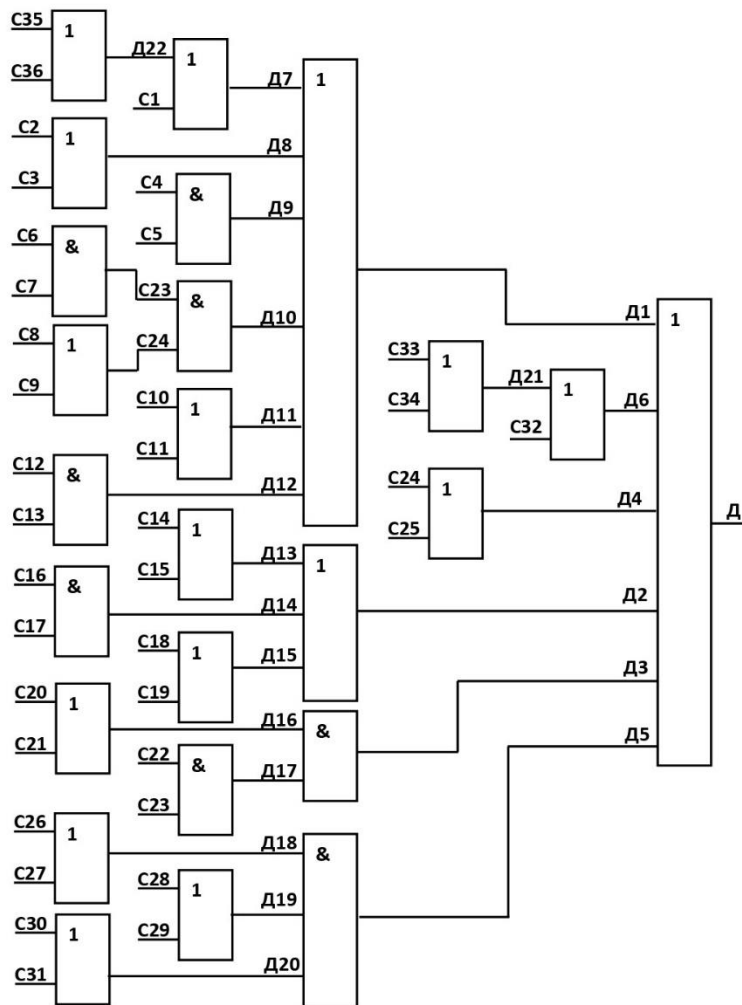


Рис. 3. Схема дискретного устройства для проверки возникновения дефектов при сварке в РСС

Проведение указанной проверки значений параметров РТК с заданной периодичностью позволит своевременно обнаруживать риск возникновения дефектов сварных швов и принимать меры по устранению причин.

### 3. Заключение

Разработанное математическое обеспечение позволяют повысить эффективность управления технологическим процессом сварки в роботизированных комплексах за счет снижения ущерба от некачественной продукции. Особенностью предлагаемого подхода является применение аппарата дерева событий, в котором учитывается причинно-следственная связь между дефектами сварных соединений и событий, приводящих к их возникновению, а также построение на его основе логической функции.

При разработке использовались экспериментальные данные о функционировании РТК Kawasaki со сварочным оборудованием Fronius, однако возможна адаптация модели при решении аналогичных задач для различных моделей РТК.

## Литература

1. *Kim Y. -M., Yoon I. -U., Myung H. and Kim J. -H.* Bi-Directional Convolutional Recurrent Reconstructive Network for Welding Defect Detection // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. P. 135316-135325.
2. *Sekhar R., Sharma D., and. Shah P.* Intelligent classification of TIG welding defects: A transfer learning approach // Frontiers in Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 8. P. 1–18.
3. *Kumar J., Anand R.S. and Srivastava S.P.* Multi-class welding flaws classification using texture feature for radiographic images // Proc. Int. Conf. Adv. Elect. Eng. – 2014. – P. 1-4.
4. *Liu X., Liu J., Wang Z., Wang L and Zhang H.* Basic-Class and Cross-Class Hybrid Feature Learning for Class-Imbalanced Weld Defect Recognition // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2023. – Vol. 19. N 9. P. 9436-9446.
5. *Mery D. and Berti M.A.* Automatic detection of welding defects using texture features // Insight-Non-Destructive Test. Condition Monitor. – 2003. – Vol. 45. N 10. P. 676-681.
6. *Ogedengbe T.S. et al.* Welding Processes and Common Defects: A Comprehensive Overview // 2023 2nd International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS). – Abuja, Nigeria, 2023. – P. 1-6.
7. *Peng P., Fan K., Fan X., Zhou H. and Guo Z.* Real-Time Defect Detection Scheme Based on Deep Learning for Laser Welding System // IEEE Sensors Journal. – 2023. – Vol. 23. N 15. P. 17301-17309.
8. *Sassi P., Tripicchio P. and Avizzano C.A.* A smart monitoring system for automatic welding defect detection // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2019. – Vol. 66. N 12. P. 9641-9650.
9. *Sekhar R., Shaikh S., Akbani I. and Solke N.* Pareto analysis based investigation and reduction of welding-defects in automobile ring gear/flex plate assembly // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10. N 4. P. 9811–9818.
10. *Фоминых Д.С., Кушников В.А., Богомолов А.С., Резчиков А.Ф.* Применение динамических графов при управлении процессом сварки в роботизированных технологических комплексах // Труды 15-й международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2022)». – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 1178– 1183.
11. *Фоминых Д.С., Кушников В.А., Богомолов А.С., Резчиков А.Ф.* Разработка алгоритма поддержки принятия решения при управлении процессом сварки роботизированными комплексами // Труды 15-й международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2022)». – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 1184 – 1189.
12. *Fominykh D., Fuchedzhi N. and Kushnikov O.* The Neural Network Algorithm for Decision Support During Control of the Welding Process by Robotic Complexes // 2022 15th International Conference Management of large-scale system development (MLSD). – 2022. – P. 1-4.
13. *Fominykh D., Baryshnikova E. and Antipin S.* The Algorithm of Searching for Critical Combinations of Events During the Welding Process in Robotic Technological Complexes // 2022 15th International Conference Management of large-scale system development (MLSD). – 2022. –P. 1-4.
14. *Овчинников В.В.* Дефектация сварных швов и контроль качества сварных соединений. – М.: Издательский центр «Академия», 2017. – 224 с.
15. ГОСТ Р 59398-2021ГОСТ Р ИСО 3834-1-2007. Требования к качеству выполнения сварки плавлением металлических материалов. Часть 1. Критерии выбора соответствующего уровня требований.
16. ГОСТ 27.31-95 (МЭК 812-1985). Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.