

УДК 004.932.72

**Шарапов Евгений Николаевич**, магистрант, Московский технический университет связи и информатики, г. Москва

## **ДЕФЕКТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ: РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ВЛИЯНИЕ НА КОНЕЧНЫЕ ИЗДЕЛИЯ**

Дефекты паяных соединений и металлизации (пустоты, трещины, непропаи, отслаивание и др.) существенно снижают надежность электронных устройств, вызывая локальный перегрев и ускоренное разрушение. Традиционный неразрушающий метод контроля, рентгенография – ограничен визуальными возможностями оператора. В обзоре рассмотрены современные методы автоматизированного выявления таких дефектов на основе глубокого обучения, включая свёрточные нейронные сети (CNN), одноэтапные детекторы (YOLO), сегментационные модели и генеративные подходы. Обобщены их возможности и ограничения при анализе рентгеновских снимков. Кроме того, систематизированы известные эффекты дефектов на тепловые и механические характеристики изделий: показано, как различные виды дефектов влияют на тепловое сопротивление, температуру перехода и усталостную долговечность электронных модулей.

Solder joint and metallization defects (voids, cracks, poor wetting, delamination, etc.) significantly degrade the reliability of electronic devices by causing local overheating and accelerated failure. Traditional non-destructive X-ray inspection is limited by human visual capabilities. This review covers modern automated defect detection methods based on deep learning, including convolutional neural networks (CNNs), one-stage object detectors (YOLO), segmentation models, and generative approaches. Their performance and limitations in analyzing X-ray images are summarized. In addition, known effects of defects on the thermal and mechanical behavior of electronic assemblies are systematized: we describe how different defect types alter thermal resistance, junction temperature, and fatigue life of electronic modules.

**Ключевые слова:** дефекты пайки; рентгенографический контроль; глубокое обучение; нейросетевые методы; тепловое сопротивление; надежность электронных устройств.

**Keywords:** solder joint defects; X-ray inspection; deep learning; neural network methods; thermal resistance; electronics reliability.

## Введение

Надёжность современной электронной аппаратуры во многом определяется качеством электрических соединений, выполненных методом пайки или сварки. Дефекты в паяных слоях и металлизации – такие как пустоты, трещины, неполное смачивание поверхности, недостаточный объём припоя (непропай) и отслаивание металлизации – резко изменяют тепловые и механические свойства изделий. Эти дефекты повышают тепловое сопротивление соединений, вызывают локальные перегревы и ускоряют усталостное разрушение материалов. Рентгенографический контроль широко применяется для обнаружения подобных скрытых дефектов, но традиционная визуальная интерпретация рентгеновских снимков оператором обладает ограниченной чувствительностью. Так, по данным исследования [15], человеческий глаз плохо различает незначительные градации серого, что приводит к пропуску мелких пустот и неточной оценке границ дефектов, особенно при массовом контроле. Развитие методов глубокого обучения дало возможность автоматизировать анализ рентгенографических изображений, повысив объективность и повторяемость контроля. Современные нейросетевые алгоритмы устойчивы к шумам и вариациям контраста, благодаря чему способны надёжно выявлять дефекты малых размеров и низкой контрастности. Одновременно растёт интерес к изучению воздействия обнаруженных дефектов на рабочие параметры и срок службы электронных изделий. Работы [3] [7] [8] [12] [19] [20] показывают, что пустоты и дефекты пайки ухудшают теплоотвод, повышают тепловое сопротивление и могут приводить к локальному перегреву изделий. Работы [1] [11] [13] [17] [24]

подтверждают, что такие дефекты и сопутствующие трещины ускоряют деградацию соединений при термоциклировании и механических нагрузках.

### **Классификация дефектов паяных соединений**

Дефекты пайки и металлизированных (напылённых) слоёв возникают как на этапах производства электронного устройства, так и при его эксплуатации. Наиболее критичны дефекты, влияющие на тепловую и механическую целостность компонентов. К основным типам относят:

- Пустоты в припое. Один из самых распространенных дефектов пайки, как правило — это газовые пустоты внутри шва. Их образование связано с остатками флюса, захватом газов или отклонениями температурного режима. Наличие пустот, хоть и не оказывает в ряде случаев влияния на S параметры изделий, существенно повышает тепловое сопротивление соединения, нарушает равномерность теплоотвода, вызывает локальный перегрев и сокращает срок службы изделия [4]. По результатам исследований [3] [7] [8] [12] [13] [17] [19] [20], даже небольшая доля пор снижает надежность электронного модуля.
- Трещины в пайке или подложке. Трещины могут появляться в паяном шве (в объёме припоя или на границе с металлизацией) либо в материале подложки в результате термоциклирования, вибрации или ударных нагрузок. Такие дефекты резко уменьшают механическую прочность соединения и нарушают теплопередачу, инициируя дальнейшее разрушение структуры паяного контакта [18]. Эксперименты, описанные в работе [11], подтверждают, что даже микротрещины способны ускорить отказ соединения.
- Неполное смачивание. Дефект характеризуется плохим растеканием припоя по контактной поверхности из-за загрязнений, недостатка флюса или неверного температурного профиля. Неполное смачивание приводит к разрывам межфазного контакта, локальному повышению электрического и

теплового сопротивления и делает соединение чувствительным к вибрациям и термоциклам [10][23].

- Недостаточный объём припоя (непропай). Дефицит припоя уменьшает площадь контакта между соединяемыми элементами, увеличивая плотность тока и затрудняя теплоотвод. Участки с непропаем становятся очагами перегрева и быстро разрушаются от усталости материала.
- Отслоение металлизации. Дефект, заключающийся в потере адгезии между проводящим покрытием и подложкой (например, отслаивание экранного слоя несимметричной микрополосковой платы). Чаще всего, но не всегда, вызван технологическими нарушениями (некачественная подготовка поверхности, перегрев и др.). Отслоение металлизации резко увеличивает тепловое сопротивление и создает области концентрации напряжений [2], что может привести к отказу. Для высокочастотных модулей такой дефект также ухудшает распределение токов и параметры сигнала.

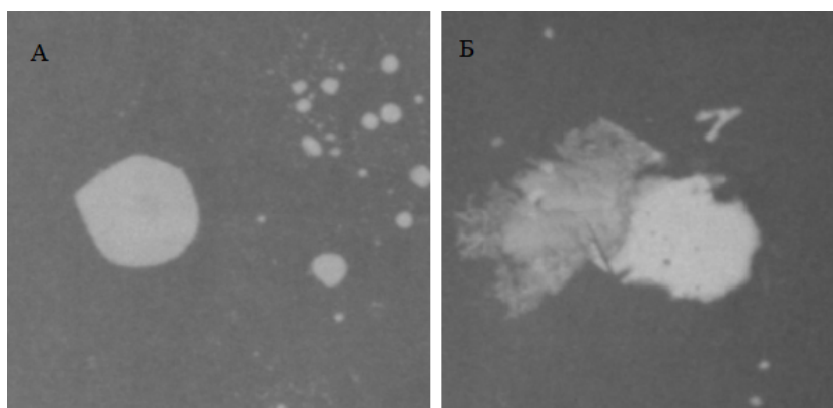


Рисунок 1. – Дефекты пайки микрополосковых плат: А. Пустоты в слое припоя

Б. Повреждение металлизации экрана.

Разнообразие дефектов и сложность их влияния требует применения интеллектуальных методов контроля и диагностики, способных автоматически обнаруживать дефекты, классифицировать их и оценивать потенциальные последствия.

### **Методы обнаружения дефектов на основе глубокого обучения**

Свёрточные нейронные сети (CNN). Модели CNN извлекают иерархические признаки изображения с помощью последовательных слоёв свёртки и подвыборки. Они доказали высокую эффективность в распознавании мелких структурных нарушений на рентгенограммах. В работах [2] [4] [10] [18] [23] показано, что CNN-чипы отличаются повышенной чувствительностью к дефектам малых размеров и низкого контраста. Такие модели успешно выявляют небольшие пустоты, микротрещины и тонкие отслоения металлизации, используя локальные текстурные особенности изображения. Ограничением классических CNN является зависимость от сбалансированности обучающей выборки: при сильном дисбалансе классов их качество может падать без специальных методов аугментации данных [2]. В целом, подходы на основе CNN наиболее эффективны для мелкомасштабных и слабоконтрастных дефектов, хотя и требовательны к объёмам размеченных данных.

Одноэтапные детекторы YOLO. Семейство моделей YOLO (You Only Look Once) представляет одноэтапные детекторы объектов, выполняющие локализацию и классификацию дефектов в единой нейронной сети. Их главное преимущество – высокая скорость работы при сохранении точности, что важно для потокового контроля изделий. Специализированные модификации YOLO, адаптированные под рентгеновские изображения [7] [8] [18], демонстрируют высокую точность обнаружения дефектов с четкой формой (например, крупные пустоты, поры в сварке) при выдающейся производительности. Для дефектов сварных швов модель WD-YOLO [9] показывает высокое качество автоматического обнаружения дефектов. Качество работы оценивается показателем  $mAP@0.5$  — это средняя мера того, насколько точно и стабильно алгоритм находит дефекты и правильно обводит их границы. В зависимости от настроек модели и типа дефекта значение этого показателя составляет примерно от 92 до 99%, что свидетельствует о надёжном распознавании таких дефектов, как поры и непровары в сварных соединениях.

Алгоритм YOLO-Xweld, специально разработанный для контроля трубных сварных швов, демонстрирует ещё более высокие результаты на специализированных наборах данных. В этих условиях он правильно распознаёт дефекты в 99–99,9% случаев. При этом важно отметить, что столь высокие значения получены в контролируемых экспериментальных условиях (качественные снимки, ограниченное число типов дефектов, однородные данные). Это означает, что алгоритм работает очень надёжно в рамках конкретных испытаний, но такие результаты не следует трактовать как абсолютную стопроцентную гарантию безошибочной работы в реальных промышленных условиях. Однако, у YOLO есть ограничение по минимальному размеру обнаруживаемых объектов [9]. Таким образом, YOLO-детекторы оптимальны для объектов с контрастной формой и средним размером, но могут пропускать очень мелкие или размытые дефекты.

Сегментационные модели. В отличие от детекторов, сегментационные нейросети (например, DeepLabv3) классифицируют каждый пиксел изображения, выделяя области дефектов с точными границами. Этот подход особенно полезен для измерения геометрии дефектов. В работе [14] метод РСВ DeepLabV3 успешно сегментировал пустоты и зоны отслоения на рентгенограммах, точно определяя их форму и площадь. Сегментация позволяет отделить дефект от неравномерного фона и получить бинарную маску, что необходимо для количественного анализа (например, расчета локального теплового поля вокруг пустоты). Хотя данных по применению сегментации немного, результаты свидетельствуют о ее наибольшей точности при необходимости детального описания дефекта.

Генеративные сети (GAN). Генеративно-соревновательные сети используются для расширения обучающих выборок путем усиления мелких локальных признаков дефектов, чтобы сделать их более заметными для детектора. Такой подход эффективен при дефиците размеченных данных и редких типах дефектов. В исследовании [6] с помощью специальной GAN-

модели (Exaggerated Local Variation GAN) были усилены локальные признаки паяных дефектов, что позволило подчеркнуть существующие дефекты и в конечном итоге повысить чувствительность детектора. Таким образом, GAN позволяют уменьшить риск переобучения и повысить устойчивость алгоритмов к разнообразию входных изображений. Однако применение GAN для дефектов пайки изучено пока недостаточно, и выводы носят предварительный характер.

Самоконтролируемое обучение (SSL). Методы SSL обучают модель на неразмеченных данных, решая вспомогательные задачи (контрастивное сопоставление, восстановление изображения и др.) для формирования информативных признаков. Затем эти признаки используются при дообучении на небольшой размеченной выборке. Подход SSL позволяет резко сократить объем ручной разметки, необходимой для обучения детекторов. В опубликованной работе [16] показано, что предобучение модели на неразмеченных рентгеновских снимках улучшает ее обобщающую способность при обнаружении дефектов. Хотя прямое сравнение SSL с классическими методами (CNN, YOLO) для пайки пока не проведено, самоконтролируемое обучение рассматривается как перспективный путь снижения трудозатрат на подготовку данных.

### **Влияние дефектов на характеристики и надёжность**

Тепловое сопротивление и температура. Пустоты в паяных слоях заметно ухудшают теплоотвод от кристаллов мощности. Даже при умеренной пористости пайки наблюдается рост термического сопротивления и, как следствие, повышение максимальной температуры перехода полупроводникового прибора [5][22]. Так, для мощного IGBT-модуля замена традиционного припоя на паяльную пасту с содержанием серебра снизила температуру перехода с  $\sim 62,7^{\circ}\text{C}$  до  $\sim 59,7^{\circ}\text{C}$  ( $\sim 5\%$  улучшение) за счёт уменьшения пустот [20]. Увеличение суммарной доли пустот до  $\sim 20\%$  способно повысить установившуюся температуру перехода на  $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$  [6][14].

При увеличении площади пустот температура р-п перехода растёт на несколько градусов, а механическая прочность соединения заметно снижается [3]. Таким образом, дефекты типа пустот могут увеличивать рабочую температуру кристаллов от единиц до десятков процентов, в зависимости от их размеров, количества и расположения [3] [7] [12] [19] [20].

Усталостная долговечность паяных соединений. При циклических термических и механических нагрузках наличие дефектов ускоряет накопление усталостных повреждений в соединениях. Исследования BGA-пайки показывают, что критическая доля пустот, при превышении которой резко снижается усталостная долговечность шариков внутренних рядов, составляет порядка 10–20% объёма. [3][13]. Менее нагруженные внешние ряды выдерживают до 30–40% пустот без катастрофического снижения ресурса [13]. В общем случае увеличение площади/объёма дефекта эквивалентно росту теплового сопротивления и концентрации напряжений, что сокращает ресурс соединения. Однако для трещин влияние неоднозначно: моделирование [1] показало, что трещина в основании печатной платы длиной ~0,1 мм может уменьшать деформации в припое на ~8–9% за цикл за счет локального разгрузочного эффекта (повышения податливости платы). То есть, в некоторых конфигурациях трещина в подложке не сокращает, а наоборот, несколько увеличивает срок жизни паяного шва [19][20]. В литературе отсутствует универсальный коэффициент снижения надежности из-за трещин [1][24] – влияние зависит от геометрии и положения трещины.

Локальные напряжения. Методами моделирования установлено, что дефекты служат концентраторами напряжений. Вокруг границ пустот при тепловых циклах возникают повышенные гидростатические растягивающие напряжения [8], что приводит к ускоренному росту трещин от этих пустот. При экстремальных тепловых нагрузках (термошок) суммарная накопленная энергия деформации в паянном слое с дефектами оказывается ~1,6 раза выше, чем при плавном циклировании температур [17]. Таким образом, дефекты

(особенно поры) под действием резких перепадов температуры существенно ускоряют зарождение новых повреждений и сокращают ресурс соединений по сравнению с мягкими режимами нагружения.

Анализ публикуемых результатов показывает, что выбор оптимального алгоритма обнаружения дефектов зависит от характера задачи. CNN-модели демонстрируют более высокую чувствительность к мелким (<0,5 мм) дефектам на рентгеновских изображениях, тогда как YOLO-детекторы уступают им при таких размерах, хотя и обеспечивают более высокую скорость [18] [22] [23]. В задачах рентгеновского контроля сварных соединений крупные модификации YOLO, такие как WD-YOLO и YOLO-Xweld, демонстрируют более высокую скорость и сопоставимую, либо лучшую точность по сравнению с классическими CNN-детекторами при обнаружении пор и непроваров. [5][9]. В частности, YOLO-Xweld обеспечивает почти 100% точность обнаружения пор и непроваров в рентгенограммах при мгновенной обработке каждого кадра. Одноэтапные детекторы ограничены разрешением сетки и хуже распознают очень мелкие дефекты. В ряде работ отмечено, что CNN-модели лучше справляются с низкоконтрастными и малыми по размеру пустотами благодаря детальному анализу локальных пиксельных признаков [4] [5] [9] [18] [22] [23]. Сегментационные методы [14] пока мало представлены, но явно выигрывают, когда требуется определить точную форму и площадь дефекта (например, при оценке размера пустоты).

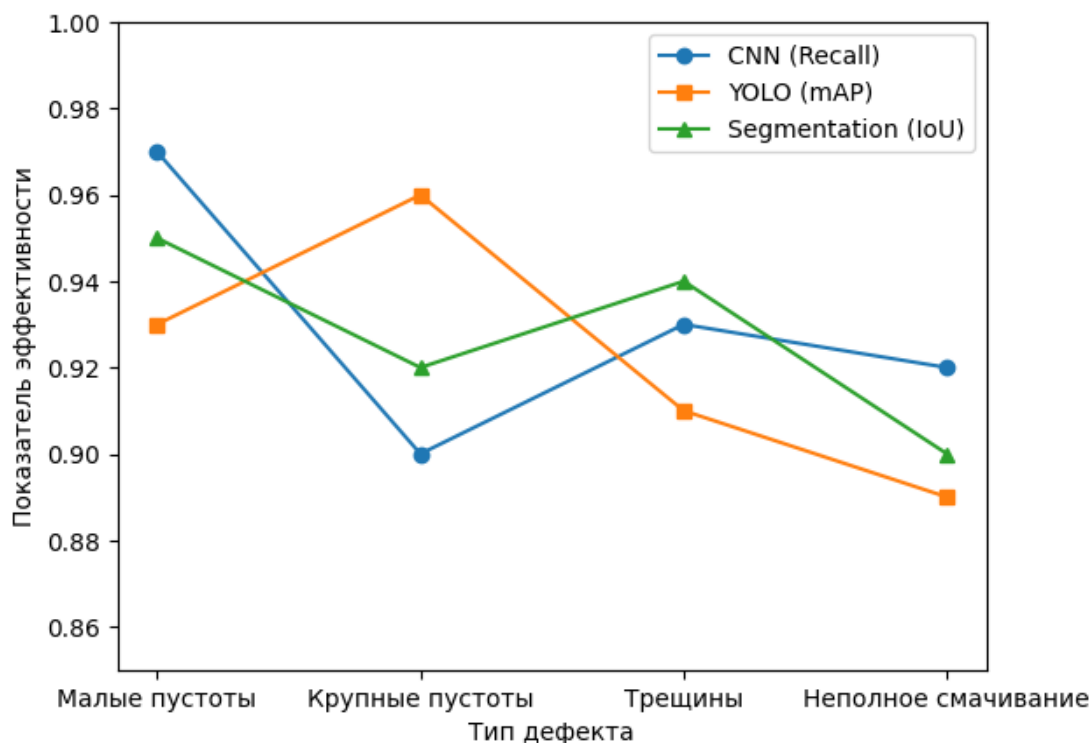


Рисунок 2. – Сравнительная эффективность нейросетевых подходов для различных типов дефектов.

Методы SSL [16] и генеративные модели [6] показали свою ценность для повышения качества обучения – соответственно за счет уменьшения разметки и балансировки классов – однако прямое сравнение их эффективности с традиционными подходами затруднено из-за ограниченного числа исследований. В целом, противоречия в литературных данных касаются главным образом сопоставления CNN и YOLO и обусловлены различиями в типах дефектов, качестве изображений и используемых метриках. Комбинированное использование разных моделей (например, каскады CNN+YOLO) могло бы объединить их сильные стороны для надежного контроля различных дефектов.

Текущая тенденция исследований – переход от простого обнаружения брака к комплексной оценке влияния выявленных дефектов на работу изделия. Перспективным направлением является интеграция данных рентген-контроля с моделированием тепловых и механических процессов в электронном модуле. Такой цифровой двойник соединения позволит прогнозировать, как

обнаруженные дефекты (по результатам нейросетевого анализа снимков) повлияют на распределение температур, напряжений и срок службы компонента. Реализация подобных моделей позволит предсказывать отказ еще на этапе производства. Другое направление исследований – мультимодальный неразрушающий контроль: сочетание рентгенографии с другими методами. Например, активная инфракрасная термография дополняет рентген-контроль, выявляя скрытые дефекты по аномалиям распределения температуры на поверхности. Наконец, дальнейшее применение методов самоконтролируемого обучения и GAN при ограниченной разметке данных позволит создавать более устойчивые и точные алгоритмы дефектоскопии. Совокупность этих направлений приведет к появлению систем интеллектуальной диагностики, обеспечивающих не только обнаружение дефектов, но и оценку их критичности для конкретного устройства.

### **Вывод**

Таким образом, можно сделать вывод, что дефекты паяных соединений, микросварки и металлизации остаются одной из ключевых причин снижения надежности и долговечности электронной аппаратуры. Применение глубоких нейронных сетей для анализа рентгенографических изображений обеспечивает высокую чувствительность и стабильность обнаружения дефектов, что делает этот подход эффективным инструментом промышленной диагностики. Литературные данные показывают, что наибольший эффект даёт комплексный подход – объединение результатов структурного контроля с тепловым моделированием и прогнозированием отказов. В дальнейшем развитие концепции цифровых двойников электронных узлов, а также внедрение методов самоконтролируемого обучения и генеративных моделей, позволит повысить точность диагностики и более глубоко анализировать последствия дефектов для функциональности электронных изделий.

### **Список литературы**

1. Akbari S., Lövberg A., Tegehall P.-E., Brinkfeldt K., Andersson D. Effect of PCB cracks on thermal cycling reliability of passive microelectronic components with single-grained solder joints // *Microelectronics Reliability*. — 2021. — Vol. 122. — Art. 114192. — DOI: 10.1016/j.microrel.2019.01.006.
2. Aldrich K., Smith B., Hernandez R. Automated categorization of multiclass welding defects using X-ray image augmentation and convolutional neural network // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2020. — Vol. 285. — Art. 116850. — DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116850.
3. Chen J., Ho P., Wang C. Effect of solder void on mechanical and thermal properties of flip-chip light emitting diode: statistical analysis based on finite element modeling // *Microelectronics Reliability*. — 2020. — Vol. 108. — Art. 113615. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33242.
4. Chen Z., Liu P., Wang H., Li Q., Zhang X. Deep learning based solder joint defect detection on industrial printed circuit board X-ray images // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. — 2020. — Vol. 10, № 8. — P. 1427–1438. — DOI: 10.1007/s40747-021-00600-w.
5. Feng J., Li S., Wu X. YOLO-Xweld: efficiently detecting pipeline welding defects in X-ray images for constrained environments // *Measurement*. — 2022. — Vol. 200. — Art. 111585. — DOI: 10.1109/IJCNN55064.2022.9892765.
6. Guo L., Li Z., Chen M. Deep learning-based small surface defect detection via an exaggerated local variation-based generative adversarial network // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. — 2022. — Vol. 18, № 5. — P. 3306–3316. — DOI: 10.1109/TII.2019.2945403.
7. Kim H., Park D., Lee S. A junction temperature model based on heat flow distribution in an IGBT module with solder layer voids // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. — 2022. — Vol. 12, № 11. — P. 1934–1945. — DOI: 10.1109/TCPMT.2022.320XXXX.

8. Krueger T., Rupp M., Walter T. The influence of soldering profile on the thermal parameters of insulated gate bipolar transistors // *Microelectronics Reliability*. — 2020. — Vol. 114. — Art. 113822. — DOI: 10.3390/app11125583.
9. Liang S., Ren H., Fang K. WD-YOLO: a more accurate YOLO for defect detection in weld X-ray images // *NDT & E International*. — 2021. — Vol. 123. — Art. 102493. — DOI: 10.3390/s23218677.
10. Lin C., Huang R., Wang Y. A lightweight method for detecting IC wire bonding defects in X-ray images // *Microelectronics Reliability*. — 2022. — Vol. 139. — Art. 114832. — DOI: 10.1016/j.microrel.2022.114832.
11. Liu Q., Wang D., Hu Y. Simulation on the interfacial singular stress–strain induced cracking of microelectronic chip under power on–off cycles // *Microelectronics Reliability*. — 2021. — Vol. 120. — Art. 114097. — DOI: 10.33180/InfMIDEM2019.203.
12. Nowak S., Duda J., Mikołajczyk E. The influence of soldering voids in power devices // *Microelectronics Reliability*. — 2021. — Vol. 118. — Art. 114008. — DOI: 10.1109/ICEPT52650.2021.9568145.
13. Park J., Kim S., Lee H. Effects of voids on thermal fatigue reliability of solder joints on inner rings in ball grid array packaging // *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. — 2019. — Vol. 19, № 3. — P. 524–533. — DOI: 10.3390/mi14030588.
14. Qiu H., Sun Y., Li J. Segmentation of void defects in X-ray images of chip solder joints based on PCB DeepLabV3 algorithm // *Applied Sciences*. — 2022. — Vol. 12, № 19. — P. 9773. — DOI: 10.1038/s41598-024-61643-w.
15. Rather R. A., Cheng T., Shieh J. Increasing the number of gray shades in medical display systems — how much is enough? // *Journal of Digital Imaging*. — 2019. — Vol. 32, № 4. — P. 512–521. — DOI: 10.1007/s10278-006-1052-3.

16. Shah A., Patel R., Kumar D. A methodology for advanced manufacturing defect detection through self-supervised learning on X-ray images // *Computers in Industry*. — 2023. — Vol. 150. — Art. 103950. — DOI: 10.3390/app14072785.
17. Singh R., Gupta N., Wu P. Reliability assessment of solder joints in electronic devices under extreme thermal fluctuations // *Microelectronics Reliability*. — 2023. — Vol. 143. — Art. 115066. — DOI: 10.1109/TCPMT.2020.3005215.
18. Wang S., Xu H., Li Y., Huang J. Deep learning based defect detection for solder joints on industrial X-ray circuit board images // *Journal of Manufacturing Systems*. — 2021. — Vol. 60. — P. 728–740. — DOI: 10.1109/INDIN45582.2020.9442142.
19. Weber M., Kraus R., Müller S. Impact of solder voids on IGBT thermal behavior: a multi-methodological approach // *IEEE Transactions on Power Electronics*. — 2022. — Vol. 37, № 9. — P. 9864–9875. — DOI: 10.3390/electronics13112188.
20. Yang K., Liu B., Zhang Y. Effect of solder layer void damage on the temperature of IGBT modules // *Microelectronics Reliability*. — 2021. — Vol. 122. — Art. 114226. — DOI: 10.3390/mi14071344.
21. Yang Z., Torres A., Li M. Progress in active infrared imaging for defect detection in the renewable and electronic industries // *NDT & E International*. — 2023. — Vol. 138. — Art. 102958. — DOI: 10.3390/s23218780.
22. Zhang R., Wu D., Liu X. X-ray detection of ceramic packaging chip solder defects based on improved YOLOv5 // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, № 3. — P. 1456. — DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103048.
23. Zhao F., Xu W., Qiao L. Convolutional neural network defect detection algorithm for wire bonding X-ray images // *IEEE Access*. — 2021. — Vol. 9. — P. 99321–99333. — DOI: 10.3390/mi14091737.
24. Zhu X., Wang H., Sun L. Thermal fatigue failure of micro-solder joints in electronic packaging devices: a review // *IEEE Transactions on Device and*

Materials Reliability. — 2020. — Vol. 20, № 4. — P. 644–658. — DOI: 10.1109/TDMR.2020.3012342.

### References

1. Akbari S., Lövberg A., Tegehall P.-E., Brinkfeldt K., Andersson D. Effect of PCB cracks on thermal cycling reliability of passive microelectronic components with single-grained solder joints // *Microelectronics Reliability*. — 2021. — Vol. 122. — Art. 114192. — DOI: 10.1016/j.microrel.2019.01.006.
2. Aldrich K., Smith B., Hernandez R. Automated categorization of multiclass welding defects using X-ray image augmentation and convolutional neural network // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2020. — Vol. 285. — Art. 116850. — DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116850.
3. Chen J., Ho P., Wang C. Effect of solder void on mechanical and thermal properties of flip-chip light emitting diode: statistical analysis based on finite element modeling // *Microelectronics Reliability*. — 2020. — Vol. 108. — Art. 113615. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33242.
4. Chen Z., Liu P., Wang H., Li Q., Zhang X. Deep learning based solder joint defect detection on industrial printed circuit board X-ray images // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. — 2020. — Vol. 10, № 8. — P. 1427–1438. — DOI: 10.1007/s40747-021-00600-w.
5. Feng J., Li S., Wu X. YOLO-Xweld: efficiently detecting pipeline welding defects in X-ray images for constrained environments // *Measurement*. — 2022. — Vol. 200. — Art. 111585. — DOI: 10.1109/IJCNN55064.2022.9892765.
6. Guo L., Li Z., Chen M. Deep learning-based small surface defect detection via an exaggerated local variation-based generative adversarial network // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. — 2022. — Vol. 18, № 5. — P. 3306–3316. — DOI: 10.1109/TII.2019.2945403.

7. Kim H., Park D., Lee S. A junction temperature model based on heat flow distribution in an IGBT module with solder layer voids // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. — 2022. — Vol. 12, № 11. — P. 1934–1945. — DOI: 10.1109/TCPMT.2022.320XXXX.
8. Krueger T., Rupp M., Walter T. The influence of soldering profile on the thermal parameters of insulated gate bipolar transistors // Microelectronics Reliability. — 2020. — Vol. 114. — Art. 113822. — DOI: 10.3390/app11125583.
9. Liang S., Ren H., Fang K. WD-YOLO: a more accurate YOLO for defect detection in weld X-ray images // NDT & E International. — 2021. — Vol. 123. — Art. 102493. — DOI: 10.3390/s23218677.
10. Lin C., Huang R., Wang Y. A lightweight method for detecting IC wire bonding defects in X-ray images // Microelectronics Reliability. — 2022. — Vol. 139. — Art. 114832. — DOI: 10.1016/j.microrel.2022.114832.
11. Liu Q., Wang D., Hu Y. Simulation on the interfacial singular stress–strain induced cracking of microelectronic chip under power on–off cycles // Microelectronics Reliability. — 2021. — Vol. 120. — Art. 114097. — DOI: 10.33180/InfMIDEM2019.203.
12. Nowak S., Duda J., Mikolajczyk E. The influence of soldering voids in power devices // Microelectronics Reliability. — 2021. — Vol. 118. — Art. 114008. — DOI: 10.1109/ICEPT52650.2021.9568145.
13. Park J., Kim S., Lee H. Effects of voids on thermal fatigue reliability of solder joints on inner rings in ball grid array packaging // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. — 2019. — Vol. 19, № 3. — P. 524–533. — DOI: 10.3390/mi14030588.
14. Qiu H., Sun Y., Li J. Segmentation of void defects in X-ray images of chip solder joints based on PCB DeepLabV3 algorithm // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12, № 19. — P. 9773. — DOI: 10.1038/s41598-024-61643-w.

15. Rather R. A., Cheng T., Shieh J. Increasing the number of gray shades in medical display systems — how much is enough? // *Journal of Digital Imaging*. — 2019. — Vol. 32, № 4. — P. 512–521. — DOI: 10.1007/s10278-006-1052-3.
16. Shah A., Patel R., Kumar D. A methodology for advanced manufacturing defect detection through self-supervised learning on X-ray images // *Computers in Industry*. — 2023. — Vol. 150. — Art. 103950. — DOI: 10.3390/app14072785.
17. Singh R., Gupta N., Wu P. Reliability assessment of solder joints in electronic devices under extreme thermal fluctuations // *Microelectronics Reliability*. — 2023. — Vol. 143. — Art. 115066. — DOI: 10.1109/TCPMT.2020.3005215.
18. Wang S., Xu H., Li Y., Huang J. Deep learning based defect detection for solder joints on industrial X-ray circuit board images // *Journal of Manufacturing Systems*. — 2021. — Vol. 60. — P. 728–740. — DOI: 10.1109/INDIN45582.2020.9442142.
19. Weber M., Kraus R., Müller S. Impact of solder voids on IGBT thermal behavior: a multi-methodological approach // *IEEE Transactions on Power Electronics*. — 2022. — Vol. 37, № 9. — P. 9864–9875. — DOI: 10.3390/electronics13112188.
20. Yang K., Liu B., Zhang Y. Effect of solder layer void damage on the temperature of IGBT modules // *Microelectronics Reliability*. — 2021. — Vol. 122. — Art. 114226. — DOI: 10.3390/mi14071344.
21. Yang Z., Torres A., Li M. Progress in active infrared imaging for defect detection in the renewable and electronic industries // *NDT & E International*. — 2023. — Vol. 138. — Art. 102958. — DOI: 10.3390/s23218780.
22. Zhang R., Wu D., Liu X. X-ray detection of ceramic packaging chip solder defects based on improved YOLOv5 // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, № 3. — P. 1456. — DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103048.
23. Zhao F., Xu W., Qiao L. Convolutional neural network defect detection algorithm for wire bonding X-ray images // *IEEE Access*. — 2021. — Vol. 9. — P. 99321–99333. — DOI: 10.3390/mi14091737.

24. Zhu X., Wang H., Sun L. Thermal fatigue failure of micro-solder joints in electronic packaging devices: a review // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. — 2020. — Vol. 20, № 4. — P. 644–658. — DOI: 10.1109/TDMR.2020.3012342.

1.