

## СЕКЦИЯ 9: УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ И ДРУГИХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД НА ОСНОВЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ЗАКЛЕПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Амосов О.С., Амосова С.Г.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65  
osa18@yandex.ru, amosovasg@yandex.ru,*

Иочков И.О.

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Россия,  
г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27  
[iochkov07@gmail.com](mailto:iochkov07@gmail.com)*

*Аннотация: Разработан вычислительный метод обнаружения и классификации дефектов заклепочных соединений авиационной техники с использованием глубоких нейронных сетей. Проведен причинно-следственный анализ возникновения дефектов отверстий и гнезд, закладных и замыкающих головок заклепок при производстве. Дана постановка задачи обнаружения и классификации дефектов. Приведен пример моделирования.*

Ключевые слова: интеллектуальная производственная технология, глубокая нейронная сеть, компьютерное зрение, распознавание образа, дефект, заклепочное соединение.

#### **Введение**

В настоящее время отмечается необходимость перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям. Поэтому для решения научной проблемы по повышению производительности труда и сокращению времени выполнения контроля, диагностики и управления производственным процессом изготовления сборочных единиц авиационной техники предлагается разработать вычислительный метод на основе технологий искусственного интеллекта. Для контроля, диагностики и управления при производстве сборочных единиц авиационной техники в мировой науке в настоящее время существуют методы неразрушающего контроля для автоматизированного, быстрого и экономичного мониторинга и обслуживания на местах производства и эксплуатации: метод, основанный на вихревых токах [1]; метод ультразвукового контроля импульсного эха [2]; метод, основанный на анализе 3D-данных, собранных с помощью 3D-сканера [3]; метод лазерной сварки [4], а также метод локкинской термографии [5]. Для предварительных и приемо-сдаточных испытаний сборочных единиц распознавание образов в системе компьютерного зрения слабо применяется.

#### **1 Проблема выявления, контроля и диагностики дефектов заклепочных соединений**

Заклепочная сборка является важным производственным процессом для авиастроительных заводов. Для решения проблемы по снижению дефектности заклепочных соединений выделим основные операции процесса выполнения заклепочных соединений: сверление отверстий; цинкование отверстий; снятие заусенцев; образование гнезд под потайные головки заклепок; калибровка отверстий и гнезд; контроль качества отверстий и гнезд; вставка заклепок в отверстия; образование замыкающих головок заклепок; снятие выступающей над поверхностью детали части потайной головки заклепки; контроль качества соединений.

Все проверки сборочных единиц и деталей самолета проводятся специалистами ОТК вручную, методом неразрушающего контроля (визуальный осмотр, технический осмотр, органолептический контроль). Главная цель процесса проверки заключается в выдаче заключения о соответствии изделия конструкторской документации (КД) и обнаружении нежелательных дефектов, таких как вмятины, выступы или трещины, а также качество заклепочных соединений.

Проведенный причинно-следственный анализ, подтверждает наличие проблем по выявлению, контролю и диагностики дефектов заклепочных соединений. Основными причинами возникновения дефектов отверстий и гнезд являются способы и средства сверления, режущий инструмент и режимы

сверления, способы и средства контроля, производственные и человеческие факторы. Причины дефектов заклепочных соединений: способы образования замыкающих головок заклепок, прессовый способ клепки, многоударный способ клепки, способы и средства контроля, производственные и человеческие факторы. Наибольшее влияние на все это оказывает человеческий фактор.

В работе ставится задача сокращения времени обнаружения дефектов за счет объективного контроля и интеллектуализации производства. Поэтому целью статьи является: разработать вычислительный метод распознавания дефектов по видеоизображениям с использованием глубоких нейронных сетей (НС).

## 2 Постановка задачи обнаружения и классификации дефектов

Пусть имеются: множество образов  $\omega \in \Omega$ , заданных признаками  $\chi_i, i = \overline{1, n}$ , совокупность которых для образа  $\omega$  представлена векторными описаниями  $\Phi(\omega) = (\chi_1(\omega), \dots, \chi_n(\omega)) = \mathbf{x}$ ; множество классов  $\mathbf{B} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_c\}$ ;  $c$ -количество классов. Априорная информация представлена обучающим множеством  $\mathbf{D} = \{(\mathbf{x}^j, \beta^j)\}, j = \overline{1, L}$ , заданным таблицей, каждая  $j$ -я строка которой содержит векторное описание образа  $\Phi(\omega)$  и метку класса  $\beta_k, k = \overline{1, c}$ . Заметим, что обучающее множество характеризует неизвестное отображение  $*\mathbf{F}: \Omega \rightarrow \mathbb{B}$ .

Требуется по имеющимся кадрам  $\mathbf{I}_t$  непрерывного видеопотока  $\mathbf{V} = (\mathbf{I}_1, \dots, \mathbf{I}_t, \dots, \mathbf{I}_\tau)$  и априорной информации, заданной обучающим множеством  $\mathbf{D} = \{(\mathbf{x}^j, \beta^j)\}, j = \overline{1, L}$  для глубокого обучения НС с учителем, решить задачу распознавания образов: обнаружить образы  $\omega$  в виде оценки признаков  $\tilde{\mathbf{x}}$  с помощью отображения  $\mathbf{F}_1: \mathbf{I}_t \rightarrow \tilde{\mathbf{X}}$  и классифицировать их с использованием отображения  $\mathbf{F}_2: \tilde{\mathbf{X}} \rightarrow \beta_k, k = \overline{1, c}$  в соответствии с заданным критерием  $\mathbf{P}(\tilde{\mathbf{x}})$  минимизирующим вероятность ошибки.

Таким образом, необходимо найти отображение  $\mathbf{F}: \mathbf{I}_t \rightarrow \beta_k, k = \overline{1, c}$ , при котором  $\mathbf{F}$  является набором функций и алгоритмов  $\mathbf{f}_i, i = \overline{1, N_f}$ .

Для обнаружения и классификации объектов и дефектов предлагается вычислительный метод распознавания образов  $\mathbf{F}: \mathbf{I}_t \rightarrow \beta_k, t = \overline{1, \tau}, k = \overline{1, c}$  с его реализацией на основе глубоких нейронных сетей. Информацию о параметрах каждого из объектов необходимо записать в виде массива  $\mathbf{G}_t$ . Тогда по параметрам  $\mathbf{G}_t$  элемент сравнения (ЭС) проверяет условия из базы знаний  $\mathbf{D}^{normal}$  и определяет отсутствие или наличие дефекта в соответствии с выражением:

$$s = \mathbf{F}_4(\mathbf{G}_t) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mathbf{G}_t \in \mathbf{D}^{normal} \\ 0, & \text{если } \mathbf{G}_t \notin \mathbf{D}^{normal} \end{cases}$$

где  $s = \{0, 1\}$ - отсутствие дефекта или наличие дефекта.

## 3 Вычислительный метод на основе глубоких нейронных сетей

Для контроля качества отверстий и гнезд, а также заклепочных соединений предлагается использовать автоматизированное рабочее место с использованием руки-манипулятора, на которой находятся видеокамеры и лазерные дальномеры. Рука-манипулятор двигается по заданной в конструкторской документации поверхности, видеокамеры фиксируют качество отверстий, гнезд, заклепочных соединений, система распознавания на основе вычислительного метода сравнивает их с имеющейся базой дефектов. При обнаружении дефекта, данное место на поверхности фиксируется и оператору системы контроля передается информация (вид дефекта, рекомендации по устранению).

Вычислительный метод состоит из следующих этапов:

1. Поиск образов на кадре с помощью переобученной под дефекты глубокой нейронной сети YOLO. При необходимости уточнения дополнительных свойств искомого объекта  $o$  выполняется переход к следующему этапу, в противном случае берется следующий кадр. Создается структура массива  $\mathbf{G}_t$ .

2. Выделение области интереса первого уровня.

3. Уточнение области интереса для детализации информации об образе.

4. Выполнение преобработки области интереса.

5. Выделение информативных признаков с помощью глубоких нейронных сетей, обученных на подготовленных датасетах  $\mathbf{D}$  дефектов.

6. Отнесение вектора признаков к одному из классов. Для классификации дефектов используются архитектуры глубоких нейронных сетей. Для усиления классификации используются предложенные нами алгоритмы подкрепления на базе нечеткой логики.

Критерий классификации определяется как  $J(\mathbf{f}_4) = \max_{\mathbf{p}_{\tilde{\mathbf{x}}}} J(\mathbf{f}_4) \geq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – заданный порог, то  $\beta_k = \operatorname{argmax}_{k \in \overline{1, \dots, c}} \mathbf{p}_{\tilde{\mathbf{x}}}$ , в противном случае классификация считается ошибочной.

7. По параметрам образов  $G_t$  определяется отсутствие или наличие дефекта.

#### 4 Реализация метода

Рассмотрим особенности этапов вычислительного метода. В качестве классификатора нами разработана архитектура глубокой НС, построенная различными комбинациями слоев свертки. Сеть начинается с входного слоя последовательности, за которым следует сверточный слой. Чтобы спрогнозировать метки классов, сеть заканчивается полностью связанным слоем, слоем *softmax* и выходным слоем классификации. Архитектура НС обучена на ГПУ Nvidia GeForce 1080Ti с использованием созданного датасета, содержащего изображения дефектов с разных ракурсов и с высоты 30 см.

Рассматривались различные варианты сочетаний объема обучающей и тестовой выборок. Моделирование производилось в системе MATLAB 2018. Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты моделирования

№ эксперимента	Размер обучающей выборки	Размер тестовой выборки	Точность на тестовой выборке, %	Время обучения, с
1	166	124	0,92	0,09
2	46	16	0,86	0,01
3	143	116	0,90	0,08
4	141	114	0,91	0,08
5	230	177	0,97	0,1

Распознавание дефектов обеспечивает точность не ниже 80% со скоростью не более 0,1 с.

#### Заключение

Дана постановка задачи обнаружения и классификации дефектов.

Разработан вычислительный метод обнаружения и классификации дефектов заклепочных соединений авиационной техники с использованием глубоких нейронных сетей.

Проведен причинно-следственный анализ возникновения дефектов отверстий и гнезд, закладных и замыкающих головок заклепок при производстве.

Перспективным направлением исследования является реализация комбинированной системы, сочетающей технологии искусственного интеллекта на базе нечеткой логики и системы компьютерного зрения на базе современных вычислительных методов.

#### Литература

1. Lingvall F., Stepinski T. Automatic Detection of Defects in Riveted Lap-joints using Eddy Current // 7th European Conference on Non-destructive Testing. №9, Vol.3. 1998. – Abstract 7.
2. TWI Company: Robotic Automated Inspection // <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/robotic-automated-inspection> (15.05.2019).
3. Jovančević I., Pham HH., Orteu JJ. et al. 3D Point Cloud Analysis for Detection and Characterization of Defects on Airplane Exterior Surface // Journal of Nondestructive Evaluation. 36:74. 2017.– P.1-17.
4. Ginger Gardiner. Automating NDT for CFRP aerostructures //Composites World Magazine. 2017.
5. Zweschper Th., Wu D., Busse G. Detection of loose rivets in aeroplane components using lockin thermography // QIRT. 1998.