

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
osa18@yandex.ru, amosovasg@yandex.ru

Иочков И.О.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет
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. Интеллектуализация автоматизированных рабочих мест позволит обнаружить и классифицировать

дефекты заклепочных соединений на этапах производства и приемо-сдаточных испытаний сборочных единиц.

Для контроля, диагностики и управления при производстве сборочных единиц авиационной техники в мировой науке 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

Современный самолет, как гражданского, так и военного назначения имеет большое количество заклепочных соединений, вмещающих от 10 до 30 тысяч заклепок. Заклепочная сборка является важным производственным процессом для авиастроительных заводов. Его качество тесно связано с безопасностью полетов. Ручная проверка заклепочных соединений не только утомительна, но и требует много времени и затрат. Это сложные задачи для человека, особенно при работе с мелкими дефектами, когда данные несоответствия едва, или вообще не видны невооруженным глазом.

Автоматизированная система контроля для проверки качества заклепочных соединений позволит не только контролировать качество в режиме реального времени, но и значительно уменьшить неточность визуального осмотра, снизит стоимость инспекции, снизит риск возникновения человеческих ошибок и повысит показатели надежности самого самолета.

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. Операции контроля качества присутствуют в технологическом процессе дважды: 1) контроль отверстий и гнезд; 2) контроль заклепочных соединений.

В таблице 1 и 2 приведем основные дефекты отверстий и гнезд, закладных и замыкающих головок заклепок возможных при производстве [6].

Таблица 1. Дефекты отверстий и гнезд под заклепку

Наименование дефекта 1	Эскиз 2	Причина дефекта 3
1. Радиальные трещины на кромках отверстий, видимые невооруженным глазом или выявляемые при изгибе контрольного образца.		Недостаточны: усилие на прижиме нижнего инструмента; температура нагрева инструмента; длительность нагрева деформируемой зоны. Перекося ось отверстия. Занижен диаметр отверстия. Наличие заусенцев на кромках отверстий.
2. Трещины по окружности основания гнезда, видимые невооруженным глазом или выявляемые при изгибе контрольного образца.		Недостаточны: температура нагрева инструмента; длительность нагрева деформируемой зоны. Диаметр и (или) угол конической части пуансона меньше диаметра и (или) угла конической части матрицы.

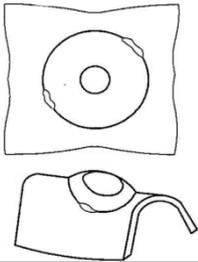
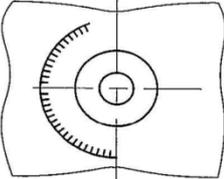
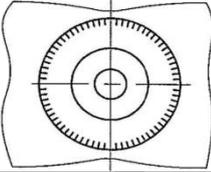
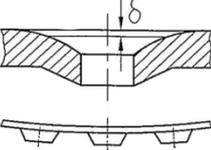
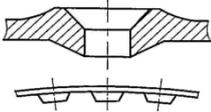
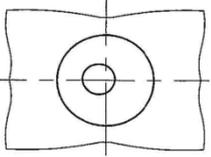
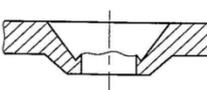
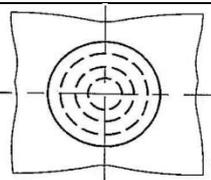
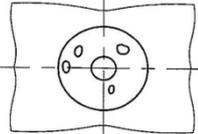
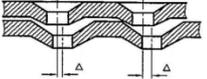
Наименование дефекта	Эскиз	Причина дефекта
1	2	3
3. Периферические кольцевые трещины сдвига, видимые невооруженным глазом или выявляемые при изгибе контрольного образца.		Недостаточная температура нагрева деформируемой зоны. Отсутствие закруглений на матрице. Велика толщина обрабатываемой детали. Диаметр конической части пуансона больше диаметра конической части матрицы.
4. Вмятины на поверхности детали от рабочих частей инструмента.		Перекося ось отверстия. Несоосная установка пуансона и матрицы.
5. Кольцевые вмятины на поверхности детали от рабочих частей инструмента.		Велико усилие штампования. Угол ϕ пуансона больше угла ϕ матрицы
6. Утяжки материала вокруг гнезда (δ), вызывающие коробление детали.		Недостаточно усилие штампования. Недостаточно велик угол ϕ пуансона и матрицы. Угол ϕ пуансона меньше угла ϕ матрицы.
7. Выпучивание материала вокруг гнезда, вызывающее коробление детали.		Велико усилие штампования. Велики углы ϕ пуансона и матрицы.
8. Эксцентricность гнезда относительно оси отверстия.		Ось отверстия неперпендикулярна к поверхности детали. Несоосная установка пуансона и матрицы. Завышен диаметр направляющего отверстия.
9. Образование облоя на кромках отверстий.		Велико усилие на прижиме нижнего штампа при завышенном зазоре между ловителем прижима и отверстием в пуансоне.
10. Мелкие риски на поверхности гнезда.		Наличие следов механической обработки на конической части пуансона или матрицы.
11. Вмятины на поверхности гнезда.		Загрязнение поверхности рабочих частей штампа.
12. Несовпадение осей гнезда после раздельного штампования.		Неперпендикулярность осей отверстий под ловитель матрицы.

Таблица 2. Дефекты закладных и замыкающих головок заклепок

Наименование дефекта	Эскиз	Причина дефекта	Способ устранения дефекта
1	2	3	4
1. Утопание (Δ) потайных закладных головок заклепок относительно поверхности детали.		Завышена глубина гнезд вследствие: перезенковки; увеличенного диаметра конической части пуансона.	Замена заклепкой ближайшего большего диаметра.
2. Выступление потайных головок заклепок (Δ) над поверхностью детали более допустимого.		Занижена глубина гнезд вследствие: недозенковки; недостаточного усилия штамповки; уменьшенного диаметра конической части пуансона по сравнению с диаметром конической части матрицы.	Замена заклепки.
3. Неплотное прилегание закладных головок заклепок к поверхности детали.		Завышена глубина гнезд. Несоответствие углов конуса гнезда и головки заклепки. Несогласованность действия клепальщика и подручного. Несоответствие углов конуса гнезда и головки заклепки из-за большего или недостаточного усилия штамповки и заниженного или завышенного угла развала пуансона и матрицы.	Замена заклепкой ближайшего большего диаметра. Замена заклепки. Замена заклепкой ближайшего большего диаметра.
4. Одностороннее неприлегание закладной выступающей головки к пакету или одностороннее выступание потайной головки заклепки над поверхностью детали, превышающее допустимое.		Неперпендикулярность оси отверстия поверхности детали.	Замена заклепкой ближайшего большего диаметра.
5. Заниженный диаметр замыкающей головки заклепки: - при высоте головки, не превышающей минимальную допустимую; - при высоте головки, превышающей минимальную.		Недостаточная длина заклепки. Завышен диаметр отверстия. Неправильная настройка пресса. Недостаточно время клепки пневмомолотком.	Замена заклепки. Замена заклепкой ближайшего большего диаметра. Дополнительное осаживание головки заклепки.

Наименование дефекта	Эскиз	Причина дефекта	Способ устранения дефекта
1	2	3	4
6. Завышенный диаметр замыкающей головки заклепки: - при допускаемой высоте головки; - при высоте головки меньше минимально допустимой.		Завышена длина заклепки. Неправильная настройка прессы. Завышена мощность пневмомолотка или время ударной заклепки.	Замена заклепки.
7. Неправильная форма замыкающей головки заклепки.		Недостаточная мощность клепального пневмомолотка или масса поддержки. Неправильное расположение обжимки и поддержки относительно оси заклепки.	Замена заклепки.
8. Трещина на головках заклепок.		Отклонение механических свойств материала заклепки от ТУ.	Замена заклепки.
9. Зарубки и подсечки на головках заклепок.		Неправильная установка обжимки, поддержки или штампа. Несоответствие форм рабочей поверхности инструмента и головки заклепки.	Замена заклепки.
10. Подсечки и риски на поверхности детали, превышающие допустимые по ТУ на изделие.		Применение инструмента с некачественными опорными и рабочими поверхностями. Неправильная установка обжимки и поддержки.	Замена детали.
11. Зазор между замыкающей потайной головкой заклепки и кромкой гнезда.		Недостаточная степень осадки. Недостаточная длина заклепки. Завышена глубина гнезда, превышен диаметр отверстия.	Дополнительное осаживание головки заклепки. Замена заклепки. Замена заклепкой ближайшего большего диаметра.
12. Односторонний зазор между замыкающей потайной головкой заклепки и кромкой гнезда.		Завышена длина заклепки, неправильная установка обжимки, поддержки или штампа. Неперпендикулярность оси отверстия поверхности пакета.	Замена заклепки. Замена заклепкой ближайшего большего диаметра.
13. Завышена величина выступания (Δ) замыкающей потайной		Попадание стружки под упор-ограничитель инструмента для снятия	Дополнительное фрезерование. Замена заклепки.

Наименование дефекта	Эскиз	Причина дефекта	Способ устранения дефекта
1	2	3	4
головки заклепки после зачистки.		выступающей части головки заклепки.	

Все перечисленные в таблицах 1-2 дефекты, контролируются визуально с применением мерительных инструментов и специальных шаблонов.

Проведенный причинно-следственный анализ (рис. 1), подтверждает наличие проблем по выявлению, контролю и диагностики дефектов заклепочных соединений.

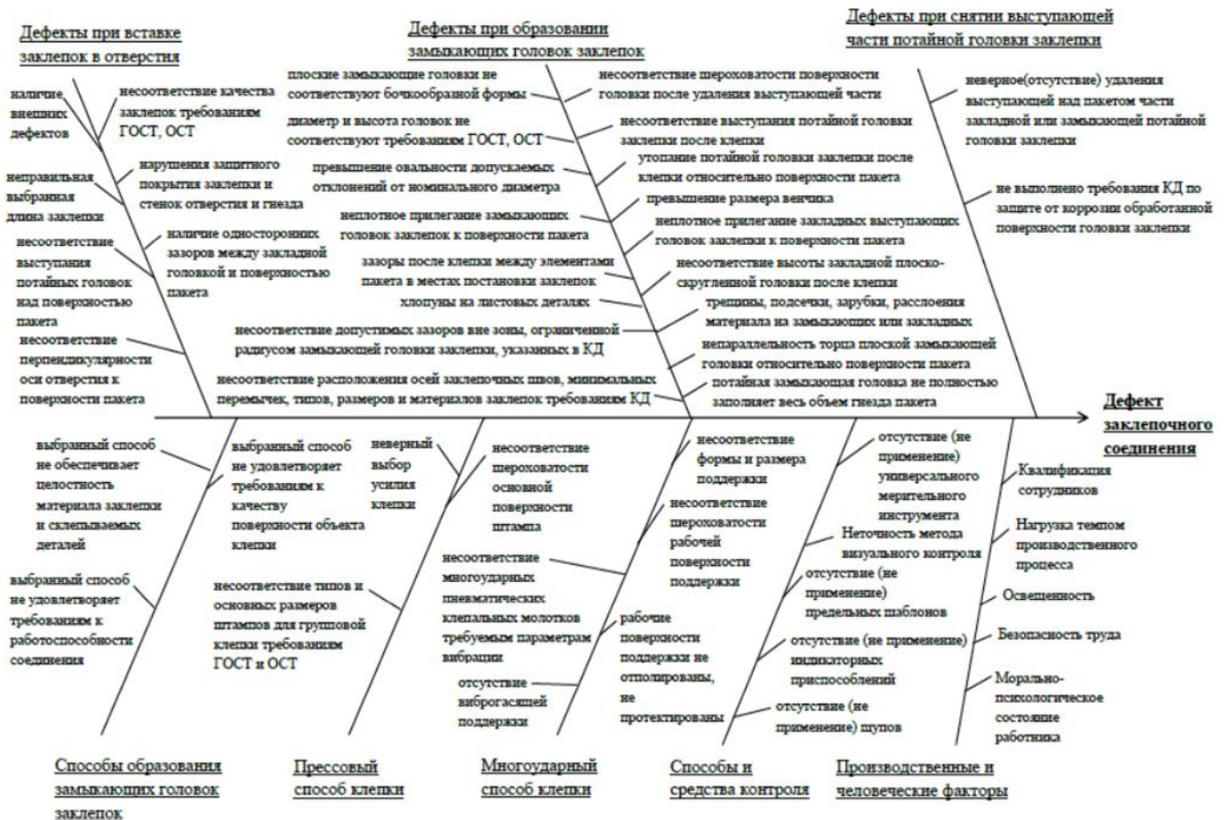


Рис. 1. Графическая диаграмма причинно-следственного анализа

Изготовление самолетов производится по технологической документации, разработанной на основании требований чертежей, ТУ, директивных технологий. Задача службы технического контроля авиационного предприятия обнаружить дефекты составных частей собственного производства на ранних этапах, в цехах агрегатно-сборочного производства, или же в цехе окончательной сборки, до момента передачи собранного самолета на летно-испытательную станцию. 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. Такая ручная проверка не только утомительна, но и требует много времени и затрат, она является сложной задачей для человека, особенно при работе с мелкими дефектами, едва или вообще невидимыми невооруженным глазом. К преимуществам органолептического метода контроля можно отнести доступность и быстроту определения значений показателей качества, а к недостаткам-субъективизм оценки, каждый испытатель по-разному видит и оценивает недостатки. Наибольшее влияние на это оказывает человеческий фактор.

Поэтому в статье ставится цель разработать вычислительный метод распознавания дефектов по видеозображениям с использованием глубоких нейронных сетей.

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 ω представлена векторными описаниями $\Phi(\omega) = (\chi_1(\omega), \dots, \chi_n(\omega)) = \mathbf{x}$; множество классов $\mathbf{V} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_c\}$; 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 ω 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:

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

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 движется 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 (рис. 2). 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 предобработки 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 $J(\mathbf{f}_4) = \max_{\mathbf{p}_{\tilde{\mathbf{x}}}} J(\mathbf{f}_4)$. Если $J(\mathbf{f}_4) \geq \varepsilon$, где ε – 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 \mathbf{G}_t определяется отсутствие или наличие дефекта.

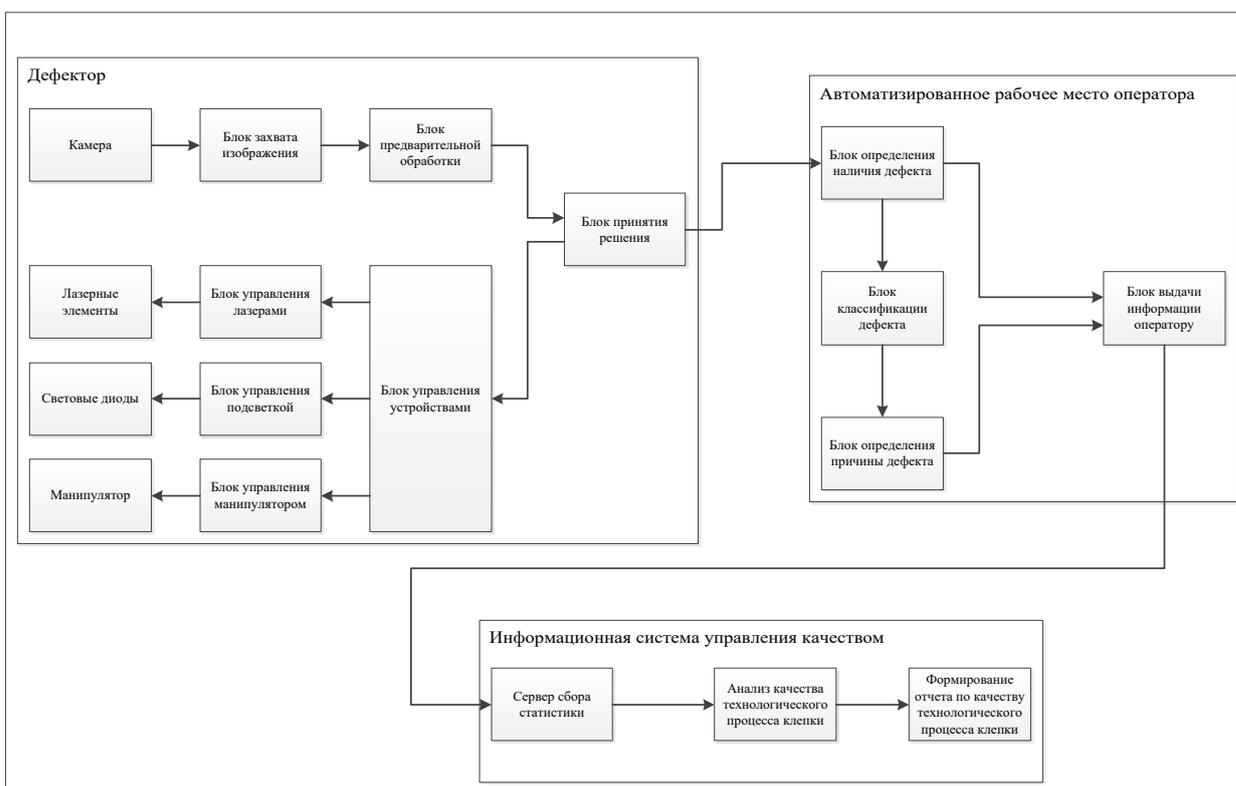


Рис. 2. Система распознавания дефектов заклепочных соединений

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 3.

Таблица 3. 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 с использованием 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.
6. Производственная инструкция. Клепка металлических конструкций. ПИ 249-2000 // https://standartgost.ru/g/pkey-14293746054/ПИ_249-2000.