

2. Годжаев З. А., Лавров В. А. Горгодзе А. Р. Система машин как главный аспект сельхозмашиностроения Союзного государства. Сборник «Механизация и электрификация сельского хозяйства» (РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства») №57, с.254, – Минск, РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2024.

3. Доклад ФГУП «Северо-Кавказская МИС». - г. Минеральные Воды, 2024.

УДК 621.431.7

Тарасенко В.Е., кандидат технических наук, доцент;

Мухля О.О., аспирант

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНЫХ ИНЖЕКТОРОВ

Аннотация. Исследованы возможности компьютерной томографии при оценке состояния ответственных поверхностей современных топливных инжекторов. Экспериментально установлены факторы и их составляющие, оказывающие решающее значение на процесс получения снимков требуемого качества. Выполнен анализ физических и методических причин невозможности точного определения линейных размеров рассматриваемых компонентов топливной аппаратуры, приведены рекомендации по корректировке методики измерений.

Abstract. The potential of computed tomography for assessing the condition of critical surfaces of modern fuel injectors was investigated. Factors and their components that are crucial for obtaining images of the required quality were experimentally identified. An analysis of the physical and methodological reasons for the impossibility of accurately determining the linear dimensions of the fuel system components under consideration was performed, and recommendations for adjusting the measurement methodology were provided.

Ключевые слова. Инжектор, износ, томограф, контроль, размер, излучение, сканирование, измерение.

Keywords. Injector, wear, tomograph, control, size, radiation, scanning, measurement.

Оценка фактического состояния ответственных поверхностей прецизионных пар топливной аппаратуры является сложной инженерной задачей. Зазор между иглой и направляющей поверхностью корпуса распылителя составляет 0,002-0,004 мм (2-4 мкм). Производственные допуски при этом равны 0,001 мм (1 мкм). К примеру, человеческий волос в 30 раз толще (0,06 мм) [1]. Внутренние полости топливной форсунки имеют сложную геометрию [1-6]. Сопловые отверстия в распылителе выполняются в процессе электроэрозионной обработки. Этот процесс эродирует (выплавляет) металл путем испарения, вызванного высокой температурой, создаваемой искровым разрядом между электродом и рабочим материалом. Исключительно точные сопловые отверстия диаметром 0,12 мм могут быть

выполнены с использованием высокоточных электродов и точно подобранных режимных параметров. Это означает, что наименьший диаметр соплового отверстия только в два раза толще человеческого волоса [1].

Обеспечение минимальных допусков требует использования специального высокоточного измерительного оборудования, как например: оптический 3D-координатный измерительный станок для измерения сопловых отверстий; лазерные интерферометры для проверки гладкости уплотнительных поверхностей распылителя.

Известные методы (проверка на стенде, метод оценки обратного слива инжектора) позволяют в целом оценить работоспособность, но не дают информации о характере и величине износа наиболее ответственных поверхностей. Существуют данные [7], согласно которым компьютерная томография (КТ) позволяет обнаруживать и измерять трехмерные микроскопические низкоконтрастные дефекты: трещины, поры и раковины, контролировать геометрические параметры изделий, такие как линейные и угловые размеры, а также проводить полный анализ отклонений формы от эталонной модели. Поэтому компьютерная томография рассматривается как перспективный метод неразрушающего контроля, однако ее реальные метрологические возможности при работе с объектами топливной аппаратуры требуют тщательной проверки.

Целью данной работы, выполненной в лаборатории неразрушающего контроля ЦИСЛ ОМСИ ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод», являлась экспериментальная оценка возможности применения промышленного томографа v/tome/x c450 для определения линейных размеров и степени износа ответственных поверхностей элементов инжекторов Common Rail.

В качестве объекта исследования выступил современный инжектор Common Rail, а именно Delphi DFI21 (42060314) серии F3P (рисунок 1), имеющий признаки эксплуатационного износа ответственных поверхностей. Основным интерес представляли величина зазора в прецизионной паре «игла-корпус», геометрия и состояние кромок сопловых отверстий; наличие микротрещин и зон кавитационной эрозии.



Рисунок 1 – Современный инжектор Delphi DFI21 (42060314) серии F3P с покрытием DLC

Для выполнения работ использовался промышленный компьютерный томограф v/tome/x c450 (рисунок 2) производства General Electric (GE) Sensing & Inspection Technologies (Phoenix X-ray).



Рисунок 2 – Промышленный компьютерный томограф v/tome/x c450 (измерительный комплекс)

Рассматриваемый измерительный комплекс оснащен микрофокусной рентгеновской трубкой, позволяющей получать изображения с высоким разрешением; оборудован вращающимся манипулятором для съемки объекта под разными углами с последующей 3D-реконструкцией. А также позволяет работать с объектами из плотных материалов (сталь) благодаря высокой проникающей способности (максимальное напряжение 450 кВ).

Сканирование, настройка оборудования и обработка полученных данных выполнялись при участии опытных инженеров-исследователей лаборатории неразрушающего контроля.

В ходе сканирования топливной форсунки Delphi DFI21 осуществили изменение ряда ключевых параметров комплекса, а именно:

- напряжение на трубке (для оптимизации проникающей способности);
- ток трубки и время экспозиции (для улучшения контраста и отношения сигнал/шум);
- количество проекций при томографической съемке (для повышения детализации 3D-модели);
- применение фильтров для подавления рассеянного излучения.

Несмотря на использование оборудования высокого класса и варьирование режимов съемки, получить снимки (а также построенные на их основе 3D-модели) с качеством, достаточным для точных линейных измерений микронных зазоров (следов изнашивания), на данном этапе исследований не удалось.

Установлены и приведены на рисунке 3 основные факторы и их составляющие, зафиксированные в ходе эксперимента и усложняющие процесс получения снимков требуемого качества. Итоговая сводная рентгенограмма инжектора DELPHI F3E представлена на рисунке 4.

1. НЕДОСТАТОЧНАЯ ЧЕТКОСТЬ ГРАНИЦ

• На полученных томографических срезах граница между иглой и корпусом распылителя оказалась «размытой». Переход от металла к воздушному зазору занимал несколько пикселей, что делает невозможным определение истинной величины зазора с погрешностью менее 5-10 мкм. Для прецизионных пар такая погрешность является недопустимой.

2. ПОТЕРЯ КОНТРАСТА НА ТОНКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

• Кромки распыливающих отверстий (особенно со стороны внутренней полости) на снимках визуализировались нечетко, что не позволяет оценить их износ или геометрическую форму с требуемой точностью.

3. АРТЕФАКТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ

• При построении 3D-моделей наблюдались характерные артефакты (полосы, затемнения), связанные с высокой плотностью материала и сложной формой объекта, что дополнительно снижало точность потенциальных измерений.

Рисунок 3 – Основные факторы, зафиксированные в ходе эксперимента и оказывающие решающее значение на процесс получения снимков требуемого качества

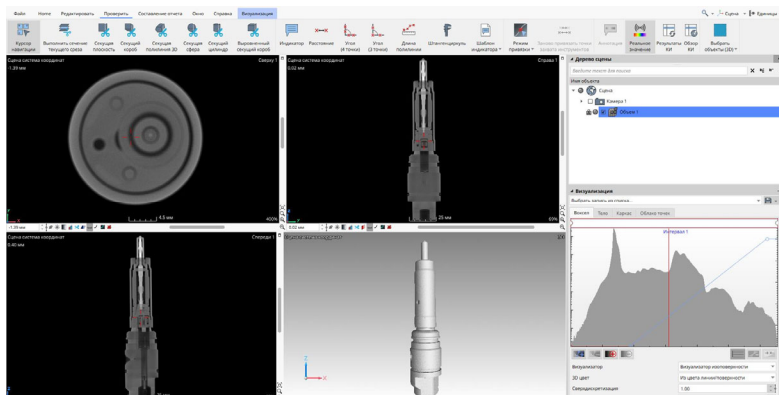


Рисунок 4 – Сводная рентгенограмма инжектора DELPHI F3E

Полученный результат, заключающийся в невозможности точного определения линейных размеров (следов изнашивания), имеет под собой объективные физические и методические причины, которые сформулированы далее.

Физическое ограничение. Разрешающая способность даже микрофокусного томографа имеет предел. При просвечивании массивной стальной детали (распылитель) контрастность на границе раздела «сталь-воздух» в микронном зазоре падает из-за накопления статистических шумов и рассеянного излучения. Эффективный размер вокселя (3D-пикселя) оказывается сопоставимым с измеряемым зазором.

Геометрия объекта. Зазор в прецизионной паре – это не просто щель, а сложная криволинейная поверхность. Для его точного измерения необходимо,

чтобы плоскость виртуального среза была строго перпендикулярна стенкам зазора. Малейшее отклонение при построении виртуального сечения вносит погрешность, сопоставимую с измеряемой величиной.

Критерии оценки. Изначально поставленная задача (определить линейные размеры и степень износа) подразумевала количественную метрологию. Полученные данные позволили провести лишь качественный анализ (визуально оценить наличие крупных дефектов), но не дали необходимой точности для цифровых значений износа.

Несмотря на невозможность решения основной метрологической задачи, выполненную исследовательскую работу и ее результаты следует считать промежуточными. В ходе исследования был получен ценный опыт:

- отработаны режимы сканирования для данного класса деталей;
- выявлены границы применимости метода томографии для прецизионных пар;
- получены качественные изображения, позволяющие выявлять крупные дефекты (трещины, сколы, зоны сильной коррозии), что само по себе полезно для дефектоскопии.

Выполненные этапы исследования показали, что промышленный компьютерный томограф v/tome/x c450 при всех его достоинствах не позволяет с требуемой точностью определять линейные размеры и степень износа прецизионных пар топливных инжекторов Common Rail. Погрешность метода оказывается сопоставимой с измеряемыми величинами (единицы микрон). Рентгеновская томография на данном оборудовании эффективна для задач качественного контроля – поиска грубых дефектов, анализа внутренней структуры, выявления посторонних включений. Для задач количественной метрологии микронных зазоров необходимы либо специализированные методики (например, синхротронное излучение), либо комбинация методов (томография для поиска зоны интереса в сочетании с металлографией с разрушением для точных замеров). Полученный опыт позволяет более точно формулировать технические задания на диагностику и углубленное понимание границ применимости имеющегося оборудования. Полученные данные будут в дальнейшем использованы при разработке внутренних методик контроля и при выборе методов исследования для различных классов деталей.

В ходе выполнения исследовательской работы была предпринята попытка оценить состояние инжекторов Common Rail методом промышленной компьютерной томографии на оборудовании v/tome/x c450. Задача определения линейных размеров и степени износа с требуемой точностью не была решена в силу объективных физических ограничений метода при работе с микронными зазорами в массивных стальных деталях.

Экспериментальная оценка подтвердила важность критической оценки возможностей любого диагностического метода. Полученный результат является вкладом в область инженерных знаний лаборатории и позволяет

избежать неверных интерпретаций в будущих исследованиях. Дальнейшие работы в этом направлении будут сосредоточены на поиске методов с более высоким разрешением, а также на разработке косвенных методик оценки изнашивания ответственных поверхностей, верифицированных с помощью томографии.

Список использованной литературы

1. Дизельные аккумуляторные топливные системы Common Rail. Перевод с английского. Учебное пособие. – М.: ЗАО «Легион-Автодата», 2010. – 94 с.
2. Huber, B. Simulation and validation of a common rail diesel injector / B. Huber, H. Ulrich // Technical University of Munich. – URL: <https://portal.fis.tum.de/en/publications/simulation-and-validation-of-a-common-rail-diesel-injector> (дата доступа: 17.03.2026).
3. Stoeck, T. Method for testing modern common rail piezoelectric fuel injectors / T. Stoeck // Combustion Engines. – 2021. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Method-for-testing-modern-common-rail-piezoelectric-Stoeck/240f63f98a69e7933d5ead3d572d97ca02f82edb> (дата доступа: 17.03.2026).
4. Osipowicz, T. The analysis of technical condition common rail fuel system components / T. Osipowicz, K.F. Abramek, Z. Matuszak [et al] // 2018 XI International Science-Technical Conference Automotive Safety. – 2018. – P. 1-8.
5. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с.
6. Якубович, А.И. Экономия топлива на тракторах: монография / А.И. Якубович, Г.М. Кухаренок, В.Е. Тарасенко. – Минск: БНТУ, 2009. – 229 с.
7. Ритм машиностроения. применение компьютерной томографии в промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ritm-magazine.com/ru/public/primenenie-kompyuternoy-tomografii-v-promyshlennosti>. – Дата доступа: 31.03.2026.

Summary. During the research, an attempt was made to assess the condition of Common Rail injectors using industrial computed tomography on a v/tome/x c450. The task of determining linear dimensions and wear with the required accuracy was not solved due to the objective physical limitations of the method when working with micron-sized gaps in massive steel components.

УДК 631.173.2:656.13.065

Тарасенко В.Е., кандидат технических наук, доцент,

Баргашевич А.Л., аспирант

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь

АНАЛИЗ СРЕДСТВ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ СЕРВИСНЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

Аннотация. Представлен краткий анализ современных средств удаленного мониторинга и управления сервисным обслуживанием ряда ведущих