

Компьютерная радиография и радиографический контроль на плёнку. Сопоставление выявляемости искусственных дефектов. Практические рекомендации по эксплуатации техники

К.А. Багаев

к.ф.м.н., специалист III уровня по РК, технический директор¹
kb@newcom-ndt.ru

А.Б. Спирков

специалист III уровня по РК и УК, ведущий инженер²
spirkoff@mail.ru

¹ООО «Ньюком НДТ», Санкт-Петербург, Россия
²ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена описанию экспериментальной работы по сравнению качества радиографических снимков, сделанных с использованием рентгеновских плёнок и систем компьютерной радиографии (КР) Duerr. Вкратце описана часть экспериментальных исследований, проведенных ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» и ОАО «НИИРПИ». Приведены результаты проведенных исследований. Основной акцент работы сделан на сравнении выявляемости дефектов при радиографическом контроле на плёнку и с помощью систем КР. Также в статье приводятся практические рекомендации по выбору систем КР и их эксплуатации. Описаны тесты, которые нужно проводить для периодической проверки работоспособности систем КР. Сделаны выводы о применимости технологии компьютерной радиографии в промышленности.

Материалы и методы

В качестве материала исследования были взяты: система компьютерной радиографии Duerr HD-CR 35 NDT, запоминающие пластины Duerr HD-IP Plus, ПО X-Vizor, рентгеновские плёнки AGFA NDT D4, D5 и PT-K, а также набор образцов различных толщин и эталоны чувствительности.

Ключевые слова

компьютерная радиография, запоминающие пластины, радиографическая плёнка, стандарт ISO/FDIS 17636-2, ГОСТ 7512-82

Введение

Компьютерная радиография (КР) с использованием запоминающих пластин — это альтернатива стандартной радиографии с использованием радиографической плёнки. В России системы компьютерной радиографии начали активно внедряться с середины двухтысячных годов. По нашим оценкам за это время продано несколько сотен систем. КР находят своё применение во многих отраслях промышленности, в том числе всё чаще используются территориальными подразделениями Газпрома и Транснефти.

Применение КР имеет целый ряд преимуществ перед использованием плёнки [1]. Однако до сих пор рентгеновская плёнка применяется в России намного чаще, чем системы КР (тоже самое относится и к системам цифровой радиографии (DR), но это тема для отдельной статьи). Это происходит по нескольким причинам. Во-первых, в России нет соответствующего стандарта по применению цифровой радиографии. Во-вторых, у многих потребителей нет уверенности, что цифровые технологии могут обеспечить то же качество контроля, что и плёнка. В-третьих, у ряда потребителей недостаточно знаний, чтобы правильно применять цифровую технику, у них не получается воспользоваться всеми преимуществами, которые данные технологии могут предоставить.

Целью данной статьи является сравнение выявляемости искусственных дефектов на радиографических снимках для системы компьютерной радиографии Duerr и плёночной радиографии. Помимо этого мы хотим дать ряд практических советов по подбору и эксплуатации техники КР.

Выявляемость дефектов.

Начиная с декабря 2012 года в рамках совместных работ ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» и ОАО «НИИРПИ» по внедрению систем КР на заводах судостроительной отрасли были проведены экспериментальные

исследования по оценке возможности замены существующей технологии с использованием радиографической плёнки на технологию компьютерной радиографии. Данные исследования проводились на заводе «Северная Верфь» в Санкт-Петербурге.

При проведении исследований нами была использована система компьютерной радиографии Duerr. Мы использовали запоминающие пластины Duerr HD-IP Plus, сканер Duerr HD-CR 35 NDT и программное обеспечение для цифровой и компьютерной радиографии X-Vizor (разработка ООО «Ньюком-НДТ»).

Данная система была выбрана потому, что системы Duerr являются одними из лучших в мире. Они обеспечивают наивысший — 1-ый класс — по стандарту ISO 16371[2] при базовом пространственном разрешении 40 мкм и минимальной поглощённой дозе 5,3 мГр. Это подтверждается соответствующим сертификатом немецкого института BAM. Разрешение в 40 мкм является наилучшим (минимальным) среди всех систем КР, представленных на рынке.

Исследования проводились с целью определения возможных областей применения компьютерной радиографии на основе запоминающих пластин и оценки возможности замены существующей технологии с использованием радиографической плёнки.

Основной задачей проведенного исследования являлось сопоставление полученных значений выявляемости малоконтрастных искусственных дефектов для мелкозернистых радиографических плёнок (импортных AGFA NDT D4, D5 и отечественной PT-K) и запоминающих пластин системы КР при просвечивании балластных толщин в диапазоне от 1 до 20 мм.

В этом диапазоне толщин при контроле металлоконструкций рентгеновским аппаратом большинством методических документов в различных отраслях промышленности требуется применение мелкозернистых радиографических плёнок. Замена технологии контроля с использованием процесса мокрой фотообработки радиографических плёнок

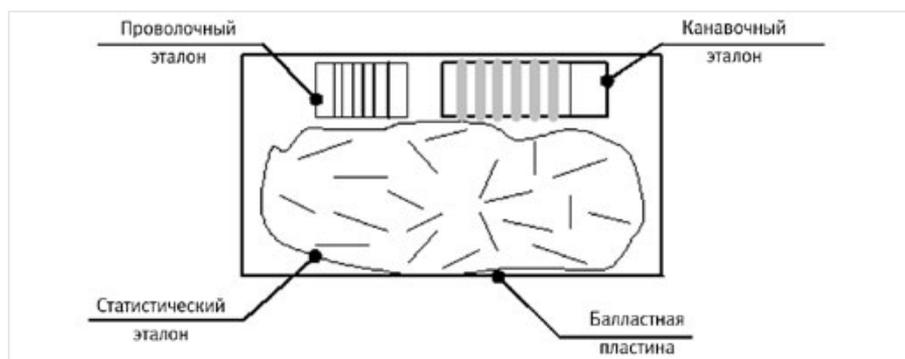


Рис. 1 — Балластная пластина со статистическим эталоном и эталонами чувствительности

на технологию беспленочной радиографии возможна только при условии сохранения качества изображения на радиографических снимках (радиограммах). Наиболее важным критерием при оценке качества изображения на радиографических снимках является выявляемость дефектов.

Выявляемость искусственных дефектов оценивалась по значениям статистической чувствительности, полученным при просвечивании балластных пластин различной толщины со статистическим эталоном и эталонами чувствительности (рис. 1).

В качестве протяженных малоcontrastных неоднородностей использовались проволоочки половинной длины из эталонов чувствительности по ГОСТ 7512[4], произвольным образом распределенные по поверхности пластин. Для каждой экспозиции использовалось 20 таких проволоочек одного диаметра, которые образуют статистический эталон чувствительности.

Статистическая чувствительность определялась как отношение правильно выявленных проволоочек к общему числу проволоочек в статистическом эталоне.

Относительная чувствительность контроля (K) — отношение чувствительности контроля (K), определенной по эталону чувствительности, к радиационной толщине (S), выраженное в процентах [4]:

$$k=K/S \cdot 100$$

Для проведения исследований использовалось следующее дополнительное оборудование:

- набор балластных пластин, изготовленных из листовой стали различной номинальной толщины, позволяющий получить любую балластную толщину в диапазоне от 1 до 120 мм с шагом 1 мм;
- проволоочные и канавочные эталоны чувствительности по ГОСТ 7512;
- статистические эталоны.

Исследования проводились в 2 этапа:

1. определение оптимальных параметров экспонирования и сканирования запоминающих пластин;
2. сопоставление значений статистической чувствительности на радиографических снимках, полученных при оптимальном режиме экранирования и сканирования запоминающих пластин системы КР, и полученных на широко применяемых в промышленности мелкозернистых пленках AGFA NDT D4, AGFA NDT D5 и PT-K.

На первом этапе исследований проведен анализ и определены оптимальные значения следующих параметров:

- напряжение на фотоумножителе;
- размер пикселя сканирования и мощность лазера;
- оптимальный диапазон экспозиций;
- предельное значение напряжения на трубке рентгеновского аппарата;
- рекомендуемая толщина переднего свинцового экрана.

Экспериментальные работы проводились при постоянном расстоянии 700 мм от источника излучения до поверхности контролируемого

участка длиной 200 мм и шириной 100 мм.

При определении оптимального значения исследуемого параметра изменялось его значение при неизменных остальных параметрах и постоянной балластной толщине, строились зависимости статистической и относительной чувствительности от изменения этого параметра. За оптимальные принимали такие значения исследуемого параметра, при которых обеспечивается максимальная статистическая чувствительность при максимальной производительности системы КР.

Экспериментальные зависимости, обосновывающие выбор оптимальных значений (диапазона значений) основных параметров приведены на рис. 2–7.

При рассмотрении представленных на рис. 2–7 зависимостей необходимо учитывать, что некоторые колебания кривых, не принятые во внимание при рассмотрении результатов, связаны с погрешностью оценки и задания различных параметров при получении экспериментальных точек и не несут физического смысла. Часть экспериментальных кривых не приведены ввиду малой наглядности эксперимента.

Для пластин высокого разрешения HD-IP Plus, использование которых обеспечивает наилучшее качество цифровых радиографических изображений при размере пикселя сканирования 25 мкм, выбраны следующие оптимальные значения основных параметров:

- напряжение на фотоумножителе 600 В —

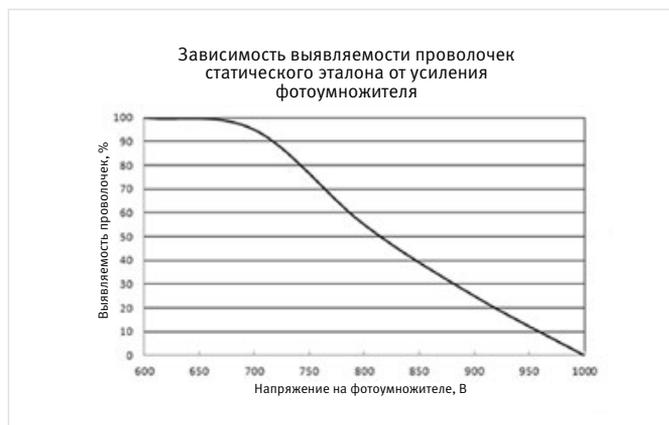


Рис. 2 — Зависимость выявляемости проволоочек статистического эталона от усиления фотоумножителя. Балластная толщина 6 мм, диаметр проволоочек статистического эталона 0,1 мм

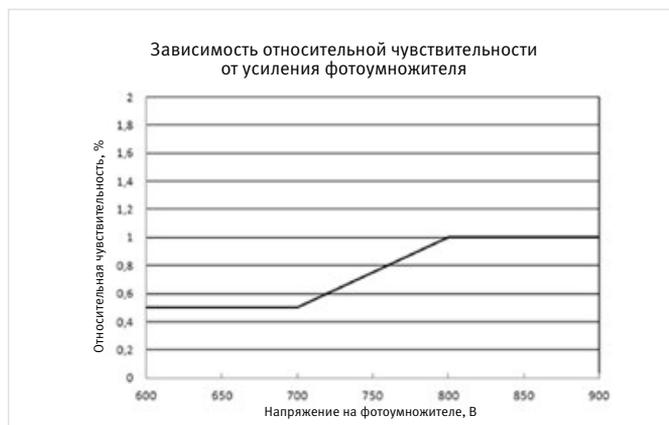


Рис. 3 — Зависимость относительной чувствительности от усиления фотоумножителя. Балластная толщина 20 мм

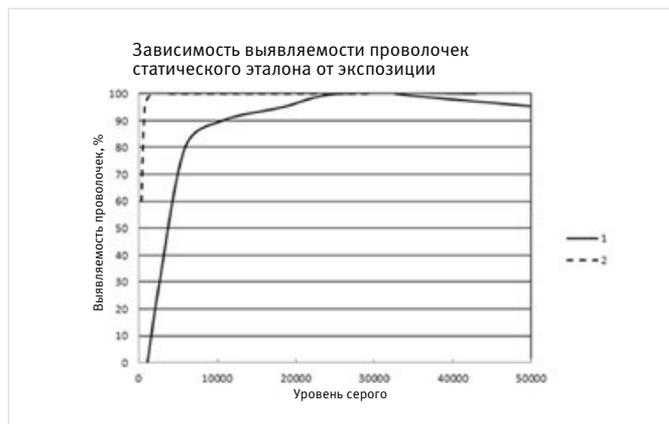


Рис. 4 — Зависимость выявляемости проволоочек статистического эталона от экспозиции. 1 — балластная толщина 6 мм, диаметр проволоочек статистического эталона 0,1 мм; 2 — балластная толщина 20 мм, диаметр проволоочек статистического эталона 0,4 мм

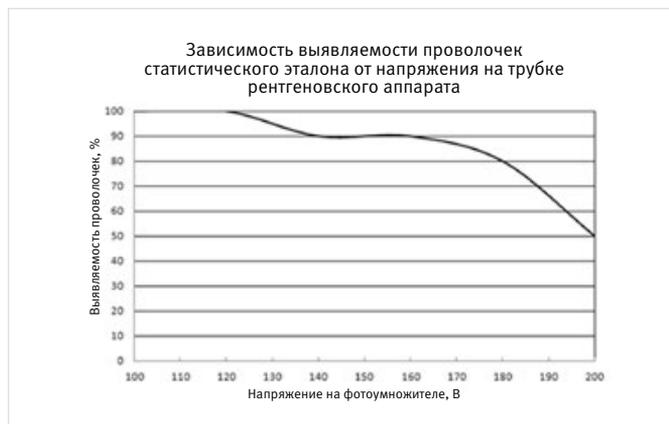


Рис. 5 — Зависимость выявляемости проволоочек статистического эталона от напряжения на трубке рентгеновского аппарата. Балластная толщина 10 мм, диаметр проволоочек статистического эталона 0,1 мм

- рекомендуемый диапазон от 500 до 700 В;
- мощность лазера 6 мВт — рекомендуемое значение 6 мВт;
- экспозиция должна обеспечивать получение среднего уровня серого на радиограмме — не менее 25 000 для диапазона 16 бит (оптимальным выбрано значение 30 000);
- напряжение на трубке рентгеновского аппарата должно быть меньше на 20–30% предельно допустимых значений по ГОСТ 20426;
- без свинцового экрана в диапазоне толщин до 20 мм.

Среднее значение уровня серого полученных изображений определялось автоматически программным обеспечением X-Vizor, как средняя интенсивность точек рабочей области изображения.

На втором этапе исследований проведено сопоставление статистической чувствительности на снимках, для радиографических пленок AGFA NDT D4, D5 и PT-K и запоминающих пластин системы КР.

На рис. 8 и 9 показаны зависимости выявляемости проволочек статистического эталона от толщины балластных пластин. На рис. 8 для статистического эталона с диаметром проволочек 0,1 мм, на рис. 9 для статистического эталона с диаметром проволочек 0,2 мм.

Из представленных зависимостей видно, что выявляемость проволочек статистического эталона при использовании запоминающих пластин системы КР сопоставима с выявляемостью при использовании пленки AGFA NDT D4 в диапазоне балластных толщин до 20 мм. При

этом имеет место уменьшение времени экспозиции в 1,5–3 раза. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что информативность получаемых данной системой КР снимков (радиограмм) не уступает получаемым по штатной технологии на радиографическую пленку.

При просмотре полученных системой КР цифровых радиографических снимков на экране компьютера наблюдается существенное уменьшение контрастности, связанное с аппаратным ограничением монитора в отображении числа градаций яркости. Полученное со сканера теневое изображение передается программой обработки в 16 битном формате, что соответствует отображаемому диапазону градаций от 0 до 65535 (216-1). Используемый монитор (8 бит) способен отобразить диапазон градаций от 0 до 255, таким образом, большая часть градаций отображается одним оттенком. Эффекта уменьшения контрастности радиограммы можно избежать, разбив рабочий диапазон градаций яркости на части и отображая на экране монитора весь диапазон градаций частями (по слоям).

Пример просмотра дефектограммы частями приведен на рис. 10.

Рис. 10 показывает, что изменение диапазона яркости позволяет чётко просмотреть все детали снимка и увидеть эталоны чувствительности.

Альтернативные варианты улучшения чёткости деталей изображения — использование цифровых фильтров, применение инструмента автоподстройки яркости по заданной

области снимка, либо использование профессиональных 10-битных мониторов.

Практические рекомендации по выбору и эксплуатации техники

Рабочие параметры и сертификат

Зарубежные стандарты предполагают два варианта проверки характеристик систем КР: тест у производителя и периодическая проверка у потребителя. Эти тесты, их периодичность описаны в [2]. Этот подход заслуживает внимания, возможно, его стоит использовать в России.

Наиболее комплексная проверка оборудования и определение его характеристик проводятся на производстве.

Помимо этого производители систем КР стремятся получить сертификат из независимого экспертного органа, доверие к которому выше, чем к любому из производителей. В области НК в Европе таким органом является институт BAM.

В сертификатах на системы компьютерной радиографии указывается класс системы согласно ISO 16371. После номера класса указывается минимальное пространственное разрешение и поглощённая доза на пластину, которую необходимо набрать для достижения данного класса и пространственного разрешения. Всего стандарт [2] вводит 6 классов: от 1 до 6. Наилучшим является 1-ый класс. При этом если система удовлетворяет, скажем, 1-ому классу при заданной дозе, то при меньшей набранной дозе система может удовлетворять

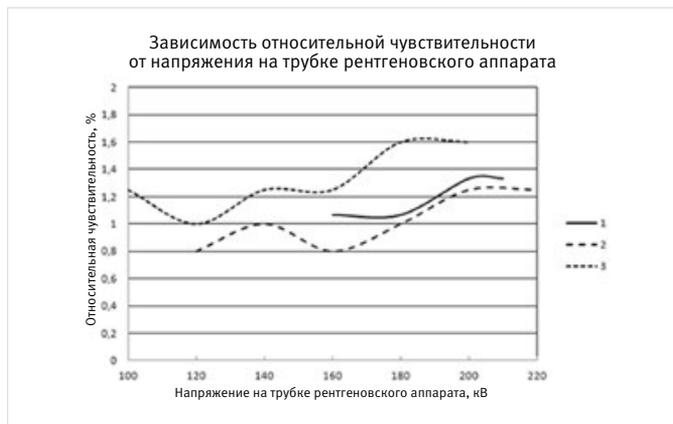


Рис. 6 — Зависимость относительной чувствительности от напряжения на трубке рентгеновского аппарата. 1 — балластная толщина 30 мм; 2 — балластная толщина 20 мм; 3 — балластная толщина 10 мм

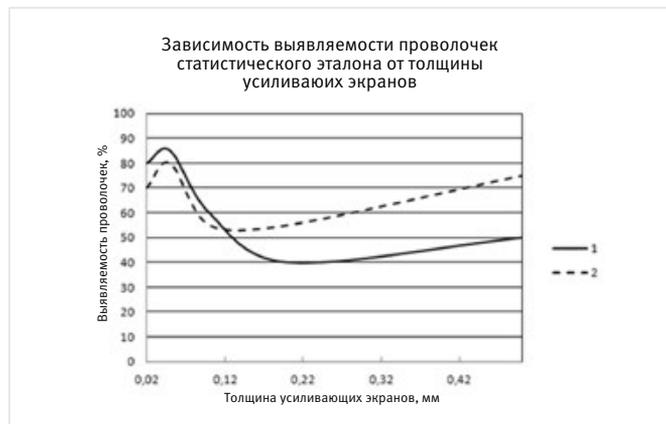


Рис. 7 — Зависимость выявляемости проволочек статистического эталона от толщины усиливающих экранов. 1 — балластная толщина 12 мм, диаметр проволочек статистического эталона 0,2 мм; 2 — балластная толщина 6 мм, диаметр проволочек статистического эталона 0,1 мм

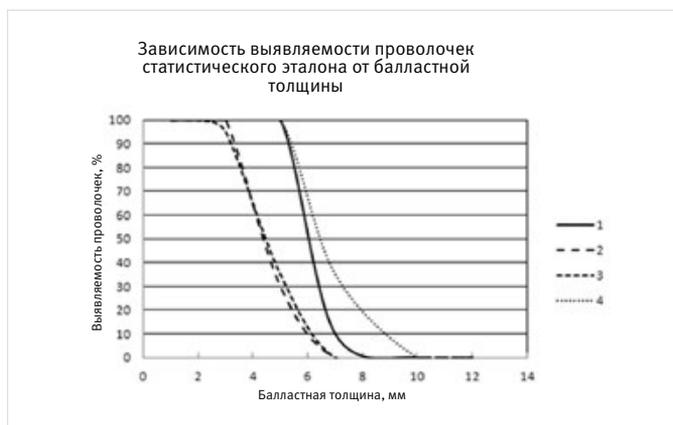


Рис. 8 — Зависимость выявляемости проволочек статистического эталона от балластной толщины. 1 — AGFA NDT D4; 2 — AGFA NDT D5; 3 — PT-K; 4 — запоминающая пластина Duerr HD-IP Plus

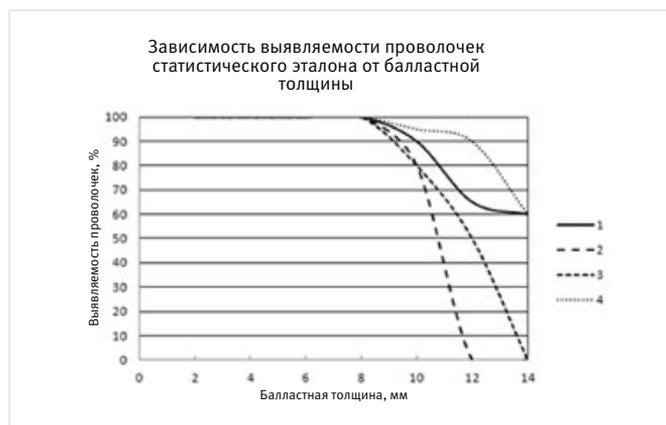


Рис. 9 — Зависимость выявляемости проволочек статистического эталона от балластной толщины. 1 — D4; 2 — D5; 3 — PT-K; 4 — запоминающая пластина Duerr HD-IP Plus.

другим классам, с худшим качеством снимков.

При выборе системы КР особое внимание — помимо класса системы и пространственного разрешения — рекомендуем обращать на указанную поглощённую дозу. Значение этого параметра у разных производителей может отличаться в разы. Соответственно, время экспонирования с использованием таких систем будет отличаться во столько же раз, во сколько отличается доза.

Отметим, что отсутствие у производителя сертификата независимого экспертного органа может свидетельствовать о том, что предлагаемое оборудование не отвечает характеристикам, заявленным производителем.

Мобильное применение

Одним из важных моментов для сканеров КР является возможность их мобильного применения [3]. Для этого сканер запоминающих пластин должен обладать минимальными габаритами и весом. Оптимально также применение специального транспортировочного кейса, который бы защищал сканер во время транспортировки. Для работы в полевых условиях конструкция сканера должна быть пылезащищённой.

Ещё одним важным параметром системы КР является её энергопотребление. В полевых условиях не всегда возможно обеспечить оборудование электропитанием. В связи с этим желательно, чтобы в комплект поставки оборудования входил аккумулятор.

Правильная эксплуатация

Существует несколько аспектов, которые необходимо учитывать при использовании запоминающих пластин.

• Бережное обращение с пластинами.

Срок службы пластины во многом определяется аккуратностью обращения с ней. При правильной эксплуатации, пластину можно использовать несколько тысяч раз. Это определяется типом пластины и типом сканера. Например, при использовании сканера Duerg HD-CR 43 NDT и пластин в защитных кассетах можно гарантированно эксплуатировать пластину 25 000 циклов.

Если же пластина эксплуатируется без защитной кассеты, то её рекомендуется использовать совместно с защитными чехлами из мягкого материала. Это помогает предотвращать появление царапин. Важно, чтобы пластины не соприкасались с абразивными веществами, песком, тальком. Пластины нельзя сильно скручивать, резко перегибать. Нужно правильно подбирать размер пластин под конкретную задачу. Не рекомендуется использовать очень длинные пластины, так как они больше подвержены механической деформации.

• Правильный подбор источника рентгеновского излучения. Чувствительность запоминающих пластин превосходит чувствительность рентгеновской плёнки в области низких энергий излучения — до 200 кэВ и уступает при высоких энергиях — порядка 1 МэВ. В связи с этим при контроле на запоминающие пластины рекомендуется в качестве источника излучения использовать рентгеновские аппараты, а не источники — радионуклиды.

• Правильное расположение пластин.

При установке пластин на объекте контроля желательно избегать прямой засветки рентгеновским излучением, т.к. прямое попадание излучения может оставлять на пластинах области с максимальной интенсивностью

засветки. Для стирания этих областей требуется пропустить пластину через устройство очистки несколько раз, что замедляет процесс работы. К тому же периодическое переэкспонирование отдельных областей пластины приводит к её выгоранию и сокращению срока службы.

Данное неудобство отсутствует при контроле сварных швов трубопроводов. Его также можно минимизировать правильным подбором размера пластины, установкой защитных масок или специальных тонких фильтров рентгеновского излучения (свинцовых или медных).

• Правильный учёт внешнего освещения.

Запоминающие пластины можно использовать при обычном освещении. Однако яркий солнечный свет содержит компоненты спектра, которые стирают изображение с пластины. В связи с этим её нельзя вынимать из защитного чехла до оцифровки, саму оцифровку нужно производить в помещении, куда не попадает солнечный свет и отсутствует очень яркое освещение.

• Правильный подбор времени экспозиции пластин и режима усиления сканера.

Для того, чтобы добиться максимальной чувствительности контроля в зависимости от толщины объекта контроля, необходимо подобрать напряжение на рентгеновской трубке, выбрать пространственное разрешение и тип пластины, установить величину усиления в считывающем сканере таким образом, чтобы время экспозиции было минимальным. Эти величины подбираются либо экспериментальным способом, либо с помощью компьютерного моделирования. В дальнейшем они должны быть вписаны в методику или технологическую карту контроля.

Периодическое обслуживание и тестирование оборудования

После того, как оборудование поступило к заказчику, необходимо с некоторой периодичностью осуществлять проверку его характеристик. Для систем КР необходимо проверять как характеристики пластин, так и сканера.

Пластины

Царапины на пластинах являются критическими повреждениями, так как они могут попасть на область изображения дефекта и маскировать дефект. В связи с этим, необходимо регулярно проверять состояние пластин как визуально, так и с помощью анализа цифрового снимка.

Помимо бережного обращения, для сохранности пластин важно регулярно прочищать рабочую поверхность сканера, вдоль которой движется пластина при сканировании. Для чистки сканера удобно использовать баллончики со сжатым воздухом.

Весьма полезно периодически заменять детали сканера, вступающие в контакт с пластиной. В частности, щётки, защищающие оптику сканера от внешнего света.

Если на пластине всё же образовались царапины, то её нужно либо вывести из эксплуатации, либо разрезать на части, убрав области, где есть царапины.

Пластины должны регулярно проверяться на наличие артефактов, выгорания отдельных областей, особенно если при использовании пластины не применялись защитные экраны.

Сканер

Помимо пластин необходимо с некоторой периодичностью осуществлять проверку работоспособности сканера.

Система протяжки пластин через сканер не должна допускать скручивания и наклона пластин, их проскальзывания. Это может привести к геометрической дисторсии снимков. Для проверки системы протяжки необходимо использовать меры длины, которые должны располагаться при экспонировании пластины как вдоль, так и поперёк. Логично применять шаблоны, используемые в CR-фантоме, согласно [2].

Вторым важным аспектом, который необходимо контролировать является чёткость изображения, отсутствие расплывания в областях, где имеет место большой перепад плотности контролируемого объекта. Места таких перепадов могут оставлять

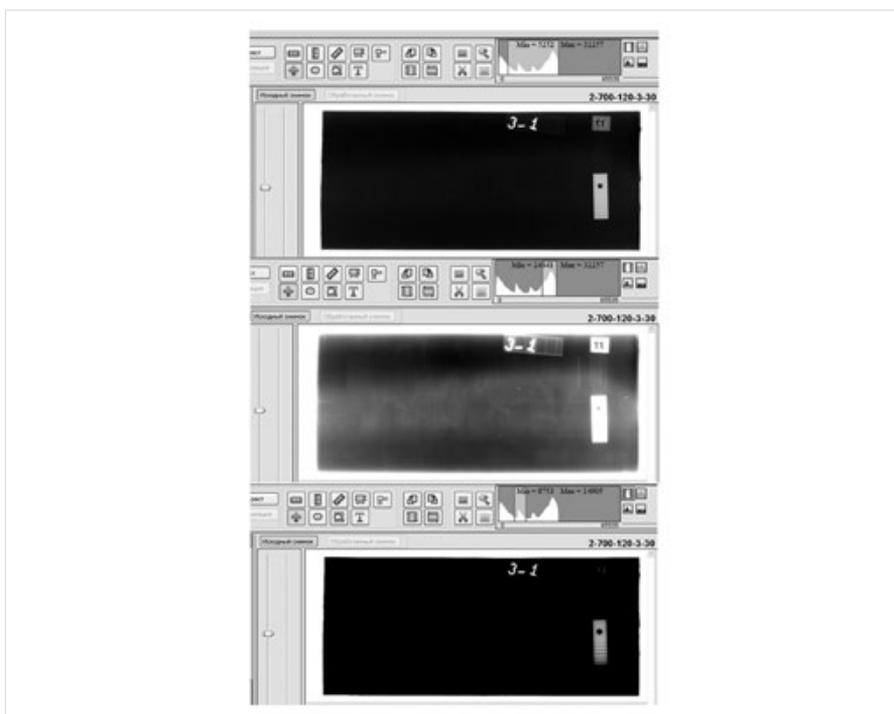


Рис. 10 — Цифровое изображение при различных значениях минимального и максимального уровня серого

на изображении фантомные изображения – блики, полоски. Для контроля данного аспекта работы сканера в стандарте ISO 16371 рекомендуется изготовить образец в форме буквы «Т». Его делают из латуни толщиной 5 мм и длиной 114 мм по каждой координате. Также подобный шаблон используют для проверки отсутствия дрожания лазера.

Третий параметр, который необходимо контролировать в процессе эксплуатации — это равномерность свечения лазера вдоль линии сканирования. Для этих целей необходимо равномерно проэкспонировать пластину, отнеся источник излучения как можно дальше от неё. Для теста производителя рекомендуется выбирать это расстояние больше 5 м, для теста потребителя — больше 1 м. После этого пластина сканируется, а равномерность интенсивности снимка проверяется с помощью программного обеспечения. При расстоянии источник — пластина порядка 1 м, уменьшение интенсивности сигнала на краях пластины может достигать 8% по естественным причинам (из-за конечного размера источника и непараллельности пучка). В связи с этим при тесте потребителя допускается перепад интенсивностей в пределах пластины $\pm 15\%$.

Помимо этого необходимо периодически проверять качество работы устройства

стирания пластин. В большинстве случаев фантомные изображения не стираются полностью с пластины. Однако если их интенсивность меньше 1% от максимального значения интенсивности, ими можно пренебречь. Данный тест также несложно осуществить с помощью программного обеспечения.

Итоги

Сделаны выводы о применимости технологии компьютерной радиологии в промышленности в качестве альтернативы радиографической плёнки.

Выводы

1. Информативность цифровых радиографических изображений, получаемых системой КР Duerr, не уступает получаемым по штатной технологии на радиографическую пленку AGFA NDT D4.
2. В целом ряде областей применения использование компьютерной радиологии может привести к существенному сокращению времени контроля.
3. Применение систем КР в различных отраслях промышленности взамен пленочной радиологии возможно при четком регламентировании параметров экспонирования и сканирования запоминающих пластин, при которых обеспечивается

требуемое качество снимков.

4. Для получения качественных снимков необходимо соблюдать требования производителей систем КР и периодически осуществлять проверку состояния запоминающих пластин и сканирующего устройства.
5. Параметры экспонирования и сканирования запоминающих пластин, а также процедура проверки состояния оборудования должна быть отражена в методической документации или производственно-технической документации на контроль.

Список используемой литературы

1. Багаев К.А., Варламов А.Н. Применение компьютерной радиологии на основе запоминающих пластин для контроля сварных соединений нефте- и газопроводов // Экспозиция Нефть Газ, 2012, № 2 (20), С. 69–71.
2. Международный стандарт ISO 16371–1,2. Non-destructive testing – Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates.
3. Багаев К.А., Мельканович Г.А. Компьютерная радиология: оборудование и стандарты // Экспозиция Нефть Газ, 2013, №4 (29), С. 54–58
4. ГОСТ 7512-82, Контроль неразрушающий, соединения сварные, радиографический метод.

ENGLISH

INDUSTRIAL SAFETY

Computed radiography and radiographic testing with X-Ray films. The comparison of artificial flaws detection.

UDC 539.1.621.3

The practical recommendations for CR technique applications and equipment maintenance

Authors:

Kirill A. Bagaev — PhD in physics and mathematics, the III level expert in radiography, technical director¹; kb@newcom-ndt.ru

Anatoly B. Spirkov — III level expert in radiography and ultrasonic, chief engineer²; spirkoff@mail.ru

¹Newcom-NDT LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

²CRISM "PROMETEY", Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

The paper describes the experimental work for quality of radiographic images taken using X-ray film and computed radiography systems (CR) determination. The experimental studies were briefly described. The results of the research were provided. The main emphasis is made on the comparison of the flaw detection in radiographic inspection with films and with the CR systems. The article also provides the practical guide for the CR systems selection and their applications. There is also a short overview of periodical user tests that should be performed to verify CR system performance. The article ends with conclusions about the applicability of Computed Radiography technology in the industry.

Materials and methods

The computed radiography system Duerr

HD-CR 35 NDT, imaging plates Duerr HD-IP Plus, the X-Vizor software, Agfa NDT D4, D5 and RT-K X-ray films, the set of samples of various thicknesses and image quality indicators.

Results

The article provides conclusions about the applicability of Computed Radiography technology in the industry as an alternative to radiographic films.

Conclusions

1. The information content of digital radiographic images from Duerr CR system, is not worse than standard technology using radiographic film AGFA NDT D4.
2. The use of computed radiography may lead to a significant reduction in the

time control in many applications.

3. The CR systems application to replace film radiography is possible, with clear parameters regulating the exposure and imaging plates, which should provide the sufficient image quality.
4. To obtain high-quality images, users should comply with the CR manufacturers' recommendations and make periodic tests of the storage plates and a scanning device.
5. The exposure conditions and settings of imaging plates read-out device should be listed in the documentation for inspection.

Keywords

computed Radiography, imaging plates, X-Ray films, the standard ISO 16371-1,2, GOST 7512-82

References

1. Bagaev K.A., Varlamov A.N. *Primenenie komp'yuternoy radiografii na osnove zapominayushchikh plastin dlya kontrolya svarynykh soedineniy nefte- i gazoprovodov* [The application of Computed Radiography for welded joints non-destructive testing of

oil and gas pipelines]. *Exposition Oil Gas*, 2012, issue 2 (20), pp. 69–71.

2. The international standard ISO 16371–1,2. Non-destructive testing — Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates.
3. Bagaev K.A., Melkanovich G.A.

Komp'yuternaya radiografiya: oborudovanie i standarty [Computed radiography: equipment and standards] *Exposition Oil Gas*, 2013, issue 4 (29), pp. 54–58.

4. GOST 7512-82, Non-destructive testing, welded joints, radiographic method.