

УДК 658.562.6

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ

Мигулина Антонина Олеговна

*Студентка 6 курса,  
кафедра «Технологии сварки и диагностики»  
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Б.Г. Маслов,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварки и  
диагностики»*

Радиографический контроль сварных швов и литья является основным методом контроля качества изделий. Это связано в первую очередь с тем, что метод не требует никакой подготовки зоны контроля, а информация о размерах и пространственном положении дефектов при использовании современных методов цифровой радиографии, может быть получена, практически, в режиме реального времени.

Преимущества радиографического метода:

- обладает высокой пространственной разрешающей способностью;
- имеет место наличие документа контроля;
- позволяет контролировать практически любые материалы и широкий диапазон толщин;
- обеспечивает необходимую чувствительность.

Однако этот вид контроля является одним из самых дорогих. Основными составляющими себестоимости (до 90%) являются расходные материалы – рентгеновская пленка, химикаты для ее проявления и рабочее время персонала. Для проявки пленки требуется темная комната. Также существует проблема утилизации химических отходов получаемых в процессе проявления.

Отечественная и зарубежная промышленность в течение ряда лет активно работали над уменьшением себестоимости радиографического контроля. Появились рентгенотелевизионные системы, которые позволяли получать внутреннее изображение сварного шва непосредственно на экране компьютера, минуя рентгеновскую пленку. К сожалению, рентгенотелевизоры большие и тяжелые, что затрудняет их использование. Качество изображения, получаемого на рентгенотелевизионных системах, также уступает качеству рентгеновской пленки.

Современный уровень развития цифровых систем привел к появлению принципиально новой технологии, в которой удалось совместить легкость, гибкость, качество и удобство использования рентгеновской пленки с

высокой экономичностью рентгенотелевизионных систем. Эта технология получила научное название CR.

CR (Компьютерная Радиография) – это техника, позволяющая получать рентгеновское изображение на запоминающих люминофорных гибких пластинах (далее фосфорных). Затем информацию считывают с пластины с помощью сканера для её последующей визуализации и анализа.

Схема контроля строится точно так же, как и в традиционной радиографии, исключая проявку рентгеновской плёнки. Фосфорная пластина прикрепляется к сварному шву или другому объекту. Гибкость позволяет согнуть ее по форме объекта. Можно использовать существующие свинцовые экраны и кассеты. Затем производится экспонирование с помощью любого источника рентгеновского или гамма-излучения. Возможно применение рентгеновских аппаратов постоянного потенциала, импульсных и полупериодных аппаратов, а также гамма-изотопов селена, иридия, цезия, кобальта и других. Пластины совместимы с любыми источниками радиации с энергиями от 10 кэВ до 25 МэВ.



Рис. 1. Схема контроля с использованием фосфорных пластин

Фосфорные пластины это:

- гибкость;
- четкость изображения;
- широкий выбор форматов;
- портативность оборудования;
- универсальность (возможность работы с гибкими или жесткими кассетами);
- эффективность: достаточно высокая чувствительность и производительность.

Пластины могут изгибаться, повторяя рельеф объекта контроля, а также могут быть нарезаны в нужный размер. Минимально допустимый размер пластины составляет 100x180 мм. В кристаллах фосфорной пластины за время экспозиции накапливается радиационное изображение, которое формируется под действием рентгеновского или гамма-излучения. Фосфорная пластина используется многократно, путём стирания ранее полученных радиационных изображений. Радиографические снимки, полученные с фосфорных пластин сканированием, переводятся в цифровой формат для последующей расшифровки снимков и их архивирования. В качестве выходного экрана преобразователя радиационного изображения используется экран монитора, входящего в состав комплекса цифровой радиографии.

Свинцовые усиливающие экраны оказывают на фосфорные пластины такой же эффект, как и на радиографическую пленку - являются усилителями рентгеновского излучения и фильтруют рассеянное излучение. Флуоресцентные экраны не повышают чувствительность фосфорных пластин, т.к. пластины слабо чувствительны к видимой области спектра.

Динамический диапазон. Динамический диапазон по стали показывает разницу минимальной и максимальной толщины исследуемого объекта, которые одновременно видны на одном результирующем снимке. Чем этот диапазон больше, тем выше перепад толщин, на которых можно обеспечить одинаковое качество на одном снимке. Особенно это актуально при просвечивании объектов с большими перепадами толщин, например, запорная арматура или турбинные лопатки. Динамический диапазон самой фосфорной пластины очень велик и предъявляет высокие требования к электронике сканера. Динамический диапазон всей системы является общей оценкой всех устройств, входящих в систему.

Кстати, то, что в цифровой технике обычно называется динамическим диапазоном, правильно называть фотографической шириной. Именно так называется аналогичный параметр у рентгеновских пленок.

На рисунках 2 и 3 представлены снимки, сделанные на рентгеновскую плёнку и фосфорную пластину, показывающие высокое значение динамического диапазона фосфорной пластины, позволяющее делать одну экспозицию для разнотолщинных деталей.

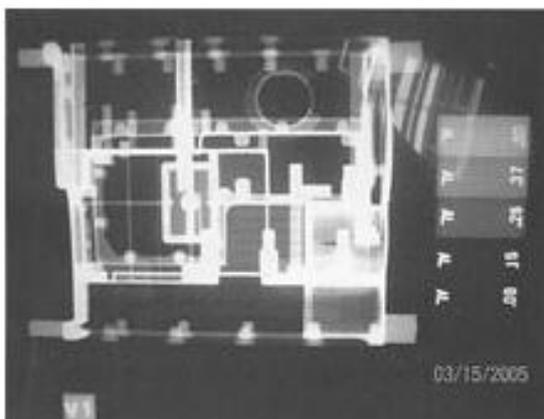


Рис. 2. Рентгеновская пленка  
63 кВ 10 мА 60 сек

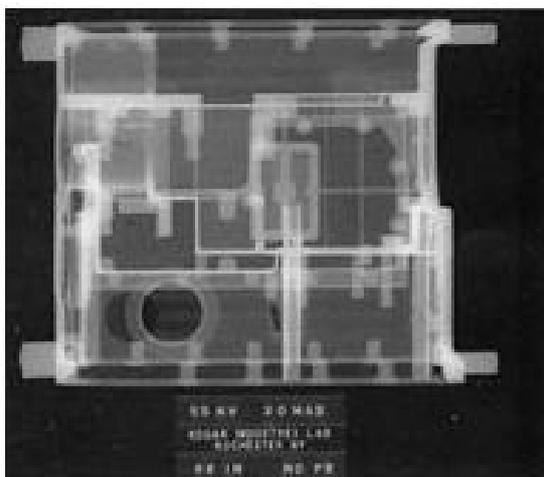


Рис. 3. Фосфорная пластина  
55кВ 1 мА 30 сек

Поскольку чувствительность фосфорной пластины выше, чем у рентгеновской пленки, время экспозиции можно уменьшить в 5-10 раз, что экономит ресурс дорогостоящей рентгеновской трубки и существенно уменьшает дозовую нагрузку на персонал. На рисунках 4 и 5 представлены снимки трубы диаметром 133 мм, толщиной стенки 5 мм на рентгеновский аппарат "Арина 5". Время экспозиции на фосфорную пластину в 2 раза меньше, чем на рентгеновскую плёнку, а качество не хуже.



Рис. 4. Рентгеновская плёнка. Время экспозиции 20 с

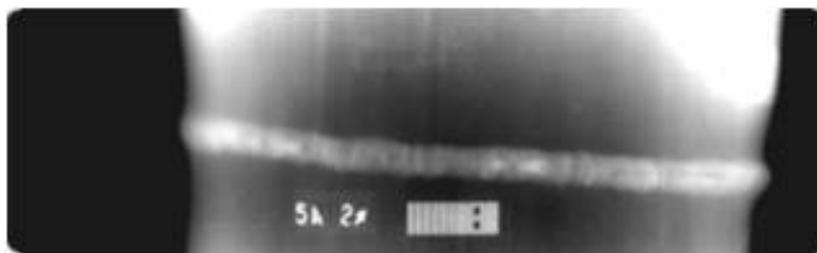


Рис. 5. Фосфорная пластина. Время экспозиции 10 с

Анализ результатов эксперимента для оценки чувствительности и производительности контроля.

Перед внедрением многоразовых запоминающих пластин в производство было проведено множество испытаний.

Результаты испытаний радиографической плёнки типа D4, D5, D7 и экранов «Фосфоматик» - Flex HR при использовании рентгеновского излучения; уровень серого  $\approx 20\%$ ; свинцовый усиливающий экран толщиной  $\delta = 0,027\text{мм}$ , фокусное расстояние (источник-кассета)  $F = 800\text{мм}$  представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Результаты испытаний**

Просвечиваемая толщина стали, $\delta$ , мм	Радиографическая плёнка									Фосфоматик-40			Требования ГОСТ 7512-82 к чувствительности контроля, $\phi_{\min}$			
	$U_{\text{р.т.}}$ , кВ	D4			D5			D7			Flex HR			Класс 1	Класс 2	Класс 3
		$I_t$ , $\text{мА} \times \text{мин}$	D, ед. опт.плот	$\phi_{\min}$ , мм	$I_t$ , $\text{мА} \times \text{мин}$	D, ед. опт.плот	$\phi_{\min}$ , мм	$I_t$ , $\text{мА} \times \text{мин}$	D, ед. опт.плот	$\phi_{\min}$ , мм	$U_{\text{р.т.}}$ , кВ	$I_t$ , $\text{мА} \times \text{мин}$	$\phi_{\min}$ , мм			
2	90	16	1,6	0,05	10,7	1,4	0,063	5,3	1,3	0,08	70	12	0,06	0,10	0,10	0,20
											80	5,4	0,08			
											90	0,7	0,10			
4,5	110	14	1,5	0,08	9,3	1,7	0,10	4,7	1,2	0,10	80	12	0,08	0,10	0,10	0,20
											90	5,4	0,10			
											100	1,0	0,10			
12	150	36	1,5	0,16	24	1,5	0,20	12	1,3	0,20	120	12	0,16	0,20	0,30	0,40
											150	1,7	0,20			
21	215	16	1,5	0,20	10,7	1,5	0,25	5,3	1,5	0,32	160	12	0,25	0,40	0,50	0,63
											180	5,4	0,32			
											200	1,0	0,32			
30	280	8	1,4	0,32	5	1,6	0,32	2,5	1,5	0,40	220	12	0,32	0,40	0,50	0,63
											240	2,7	0,40			
											280	1,2	0,40			
40	400	3,7	1,4	0,40	2,5	1,5	0,50	1,25	1,3	0,50	280	12	0,40	0,50	0,63	0,80
											300	2,0	0,50			
											310	1,25	0,50			
55	400	15	1,5	0,50	10	1,4	0,63	5,0	1,3	0,63	300	12	0,50	0,80	1,00	1,25
											330	5,4	0,63			
											350	2,5	0,80			
75	400	72	1,6	0,63	32	1,4	0,80	24	1,3	0,80	350	20	0,80	1,00	1,25	1,60
											400	6,5	1,00			
100*	400	-	-	-	-	-	-	300	1,3	1,0	400	64	1,00	1,00	1,25	1,60

\* Фокусное расстояние уменьшено с  $F = 800\text{мм}$  до  $F = 700\text{мм}$

На рисунках 6 и 7 графически представлены результаты проведения испытаний по сравнению времени экспозиции и чувствительности фосфорной пластины и рентгеновской плёнки.

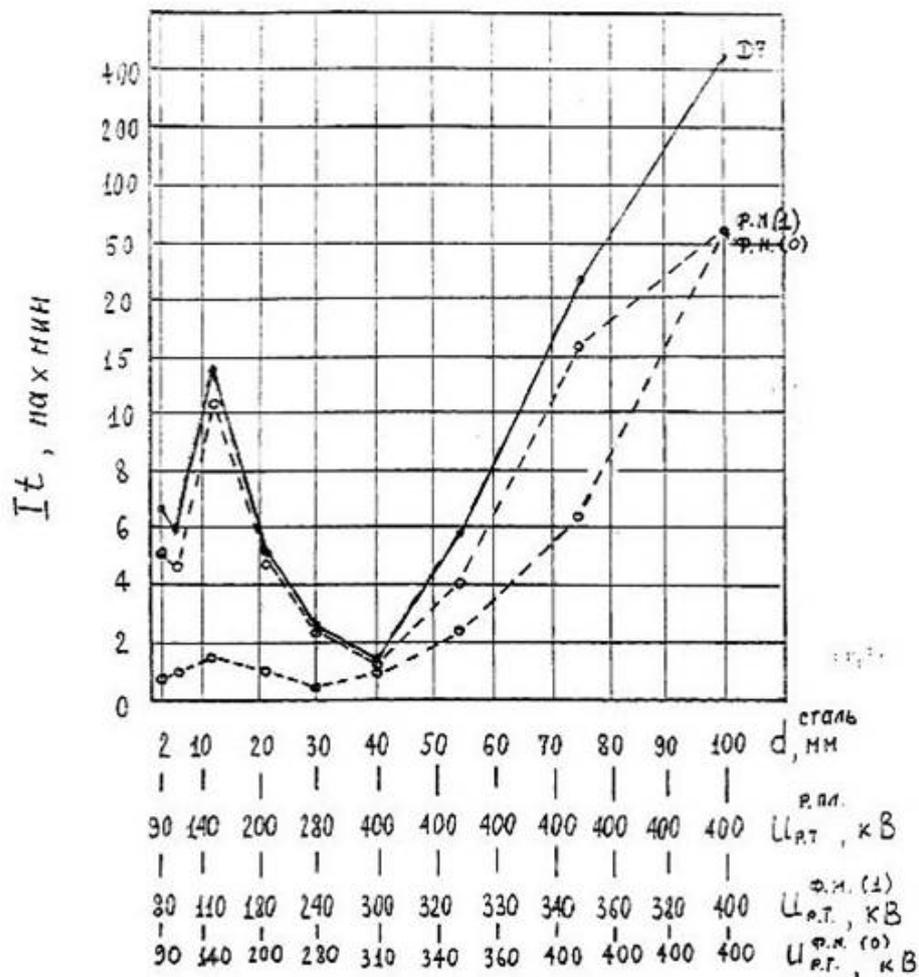


Рис. 6. Номограммы экспозиций рентгенопросвечивания.  
 Фокусное расстояние (источник-кассета)  $F=800$ мм.  
 – радиографическая плёнка D7 (оптич. плотн.  $D=1,5$ );  
 - - фосфорная пластина Flex HR (уровень  $\approx 20\%$ ).  
 Свинцовый усиливающий экран толщиной  $\delta=0,027$  мм  
 (для фосфорной пластины при  $d \geq 75$ мм -  $\delta=0,1$ мм).  
 $d^{\text{стали}} \leq 21$ мм - РУП-150/300;  $d^{\text{стали}} \geq 30$ мм - MG-420.

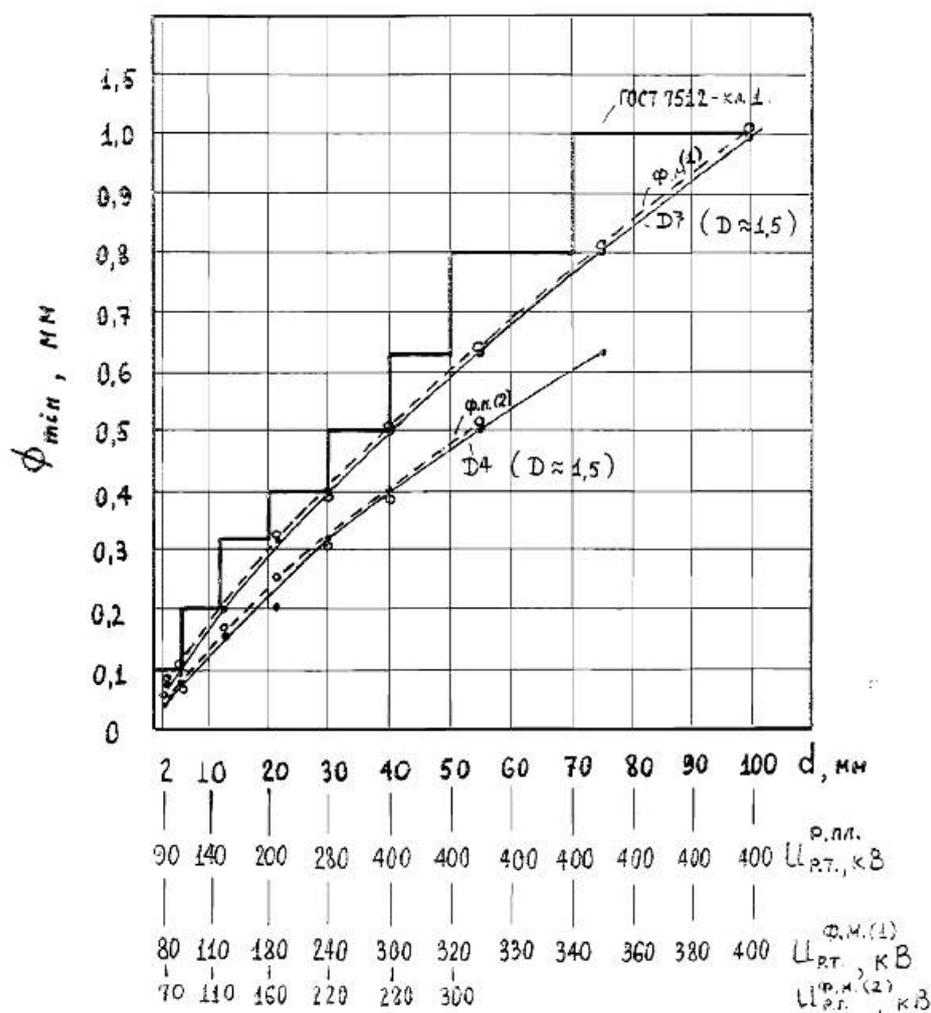


Рис.2. Чувствительность контроля (проволочный эталон) в зависимости от просвечиваемой толщины стали при соответствующем напряжении на рентгеновской трубке (значения  $U$  соответствует ГОСТ 20426-82):  
 – радиографическая плёнка;  
 - - фосфорная пластина Flex HR (уровень серого 20%).  
 Ступенчатая кривая отражает требования к  $\phi_{min}$  для I класса чувствительности по ГОСТ 7512-82

Согласно полученным экспериментальным данным при использовании многоразовых запоминающих пластин вместо промышленных рентгеновских плёнок чувствительность контроля увеличивается, а время экспозиции уменьшается, а, как следствие, повышается производительность и уменьшается дозовая нагрузка на персонал.

Способы сканирования фосфорных пластин. Некоторые из ключевых особенностей комплекса цифровой радиографии с неизбежностью вытекают уже из выбранного способа сканирования фосфорных пластин.

Например, если в процессе сканирования пластина трется своим чувствительным слоем по неподвижной поверхности, как показано на рисунке 8.3, то на рентгеновских изображениях следует ожидать проявления царапин уже после нескольких экспозиций.

Рулонную пластину через такое устройство вряд ли будет возможно пропустить без изломов, вследствие необходимости изгиба вокруг продольной оси.

Сканер с вращающимся барабаном (рисунок 8.2) является компактным и легким, и одновременно исключает даже касание чувствительного слоя пластины при считывании, что многократно увеличивает срок службы пластин. Его недостатком, как и у упомянутой выше модели, является ограничение на размеры сканируемых пластин.

Сканер с вертикальной роликовой протяжкой пластин (рисунок 8.1) позволяет обрабатывать без ограничений пластины любых производимых в настоящее время размеров. Ролики не трутся по поверхности пластины, а катятся по ней, так что повреждения пластин при сканировании случаются крайне редко.

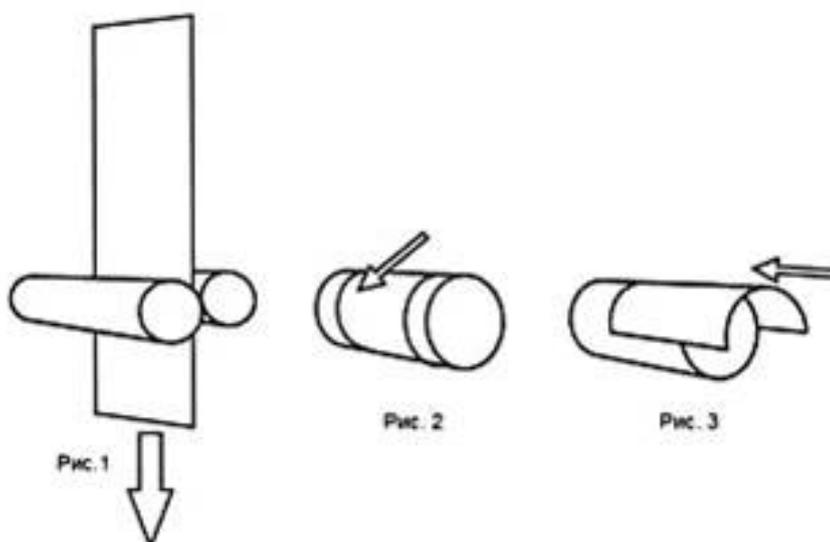


Рис. 8. Способы сканирования

Меры предосторожности.

Для обеспечения высокого качества контроля и долговременной работы комплекса следует придерживаться следующих рекомендаций:

- избегать контакта пластин с любыми источниками влаги;
- избегать механических повреждений поверхности пластин;
- при работе с пластинами, вынутыми из защитных конвертов или кассет, пользоваться хлопчатобумажными перчатками.

Для получения качественных изображений, на поверхности пластин должны отсутствовать загрязнения (пятна, пыль), препятствующие прохождению сканирующего и вторичного излучений.

Основные преимущества системы компьютерной радиографии:

- Исключение затрат на дорогостоящие расходные материалы - радиографическая пленка и химикаты;
- Исключение затрат на процесс химико-фотографической обработки;

- Исключение возможности брака за счет обработки и дефекта рентгеновской пленки;
- Сокращение продолжительности экспонирования и дозовой нагрузки на персонал;
- Расширение возможности радиографического контроля на изделия сложной формы и с большим перепадом толщин;
- Сокращение общей продолжительности контроля;
- Возможность архивирования изображений;
- Возможность передачи изображений на большие расстояния.

Сравнение затрат на расходные материалы при использовании компьютерной и пленочной радиографии представлено в таблицах 2 и 3.

**Таблица 2. Из расчёта на 3 000 экспозиций**

Компьютерная радиография	Средняя цена, руб.	Радиография на плёнку	Средняя цена, руб.
Цена одной многоцветной пластины IP формата 30x40	35 000	Цена 3 000 листов плёнки AGFA NDT D7 NIF формата 30x40	299 880
Дополнительные расходные материалы	0	Дополнительные расходные материалы (из расчёта на обработку 3 000 листов плёнки) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 7,2 комплекта проявителя G135</li> <li>• 10,8 комплекта фиксажа</li> </ul>	19 500 16 800
Итого затрат на 3 000 экспозиций	35 000	Итого затрат на 3 000 экспозиций	336 180

**Таблица 3. Из расчёта на 10 000 экспозиций на одну пластину (гарантированный производителем срок службы многоразовой пластины IP)**

Компьютерная радиография	Средняя цена, руб.	Радиография на плёнку	Средняя цена, руб.
Цена одной многоразовой пластины IP формата 30x40	35 000	Цена 10 000 листов плёнки AGFA NDT D7 NIF формата 30x40	999 600
Дополнительные расходные материалы	0	Дополнительные расходные материалы (из расчёта на обработку 10 000 листов плёнки) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 комплекта проявителя G135</li> <li>• 36 комплекта фиксажа</li> </ul>	65 000 56 000
Итого затрат на 10 000 экспозиций	35 000	Итого затрат на 10 000 экспозиций	1 120 500

### Итоги

Технология цифровой радиографии с применением многоразовых "фосфорных" пластин позволяет:

- исключить «мокрые» процессы фотообработки;
- повысить производительность радиографии в 3 – 7 раз;
- использовать все преимущества компьютерных технологий (цифровую обработку изображений, измерение размеров дефектов, хранение и архивирование результатов).

При этом:

- требования ГОСТ 7512-82 к качеству снимка выполняются в полном объеме;
- дорогая одноразовая серебросодержащая рентгеновская пленка не требуется.