ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 280 1975

РЕНТГЕНОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ю. А. ЕГОРЕНКО, Ю. А. МОСКАЛЕВ, Д. И. СВИРЯКИН

В последние годы, наряду с широким внедрением систем телевизионного, радиационного контроля материалов и изделий, продолжают совершенствоваться методика и аппаратура пленочной радиографии. Интерес к пленочной радиографии связан с рядом достоинств пленочных преобразователей радиационного излучения. Эти достоинства сводятся к следующему:

1. Пленочные преобразователи позволяют получить документальную визуальную информацию о внутренних неоднородностях контролируемого объекта; установить их форму и размеры.

2. Благодаря малым габаритам пленочных преобразователей, а также возможности изменения их площади и способности к деформации по контуру объекта контроля, пленочные преобразователи часто становятся незаменимыми при контроле труднодоступных мест в изделиях сложной конфигурации.

Недостатком радиографии с помощью рентгеновской пленки является необходимость проведения дополнительных операций проявления, фиксирования и ее сушки. Применение с целью повышения производительности контроля, автоматической системы фотообработки пленки является целесообразным при большом объеме работ (более 5 м^2 пленки в смену), кроме того, при этом необходимо использовать специальные термостойкие пленки. Большой объем работ, связанных с подготовкой и обработкой рентгеновской пленки, значительный расход фотообрабатывающих материалов и самой пленки делают этот метод контроля трудоемким и дорогостоящим.

В некоторых случаях технологические недостатки рентгеновской пленки можно исключить, применяя для целей промышленной дефектоскопии экраны и пленки на основе люминесцентных светосоставов, обладающих способностью накапливать светосумму при возбуждении и высвечивать ее после прекращения действия радиации под влиянием оптимизирующего фактора, например, нагревания.

Физической основой этого метода преобразования теневого радиационного изображения в оптически видимое является проявление специфических свойств ряда кристаллофосфоров накапливать поглощенную энергию ионизирующего излучения путем локализации образованных носителей зарядов, электронов и дырок в центрах захвата — ловушках.

Запасенная энергия при дополнительном возбуждении освобождается в виде световой энергии.

Дополнительное возбуждение может быть вызвано либо нагревом (термолюминесценция), либо освещением люминофора (фотолюминесценция).

В последние годы такие кристаллофосфоры успешно применяются в люминесцентных методах дозиметрии. Сюда относятся фтористый кальций, фтористый литий, сульфат кальция, активированный марганцем, сульфат кальция, активированный самарием.

Преобразователи радиационного излучения, изготовленные из этих светосоставов в виде экранов и пленок, могут быть использованы для целей радиационного дефектоскопического контроля.

Методика процесса контроля сводится к следующему.

Термолюминесцентный преобразователь устанавливают по месту просвечивания контролируемого изделия аналогично рентгеновской пленке. После окончания экспозиции вызывают стимулированное излучение запасенной светосуммы путем нагрева. Режим нагрева выбирается таким, чтобы обеспечить наилучшие условия наблюдения на термолюминесцентном преобразователе.

По окончании просмотра изображения оператором преобразователь прогревают до полного тушения люминесценции, охлаждают, после чего он вновь готов к экспозиции. Подготовительное время всего процесса контроля занимает 8÷10 мин. что в 4÷5 раз меньше подготовительного времени для контроля с рентгеновской пленкой [1].

Выбор светосостава для термолюминесцентной рентгенографии определяется выполнением следующих основных требований:

а) максимальная чувствительность фосфора к ионизирующему излучению;

б) высокий выход люминесценции;

в) отсутствие затухания люминесценции в широком диапазоне температур;

г) совпадение спектра люминесценции со спектральной чувствительностью глаза или другого регистрирующего прибора;

д) низкая стоимость контроля.

Если технологический цикл контроля таков, что промежуток времени с момента окончания экспозиции до начала просмотра изображения мал, то кроме перечисленных выше светосоставов для целей радиационной дефектоскопии может быть использован широкий класс светосоставов временного действия.

Ввиду наличия «мелких ловушек» такие светосоставы не сохраняют накопленной светосуммы, а длительно ее высвечивают в течение всего промежутка времени после окончания экспозиции. Длительность их высвечивания колеблется от нескольких минут до 8÷10 часов [2].

Сюда в первую очередь следует отнести светосоставы: $Sr \cdot Bi$, Cu; $ZnS \cdot Cu$, Co; $ZnS \cdot Cu$.

У этих светосоставов выход люминесценции является также функцией температуры, поэтому длительность сохранения накопленной светосуммы можно увеличить путем предварительного охлаждения преобразователя, а регулируя режим нагрева, произвести быстрое тушение люминесценции после окончания просмотра сформированного на преобразователе изображения и таким образом подготовить его к следующей экспозиции.

В таблице приведены основные радиационные и светотехнические характеристики светосоставов с накоплением светосуммы. Как видно из таблицы, максимум спектра свечения большинства светосоставов хоро-

Таблица

№ п.п.	Люминофор	Длина волны максимума спектра люминесценции, нм	Квантовый выход термолюминесценции, квант/кулон	Длительность сохранения информации при $t = 20^\circ C$
1	$ZnS \cdot Cu$	520	—	30÷60 мин
2	$ZnS \cdot Bi, Cu$	520	—	2,5÷5 час
3	$ZnS \cdot Cu, Co$	500	—	8÷10 час
4	$CaSO_4 \cdot Mn$	500	$1{,}2 \times 10^{18}$	10÷12 час
5	$CaSO_4 \cdot Sm$	$\lambda_1 = 560$	$0{,}8 \times 10^{18}$	
		$\lambda_2 = 590$		1,5÷2,5 мес.
		$\lambda_3 = 620$		
6	$CaF_2 \cdot Mn$	470÷550	$0{,}4 \times 10^{18}$	

* квант/кулон — квантовый выход термолюминесценции при экспозиционной дозе, создающей заряд в 1 кулон в 1 кг воздуха при нормальных условиях.

шо согласуется с кривой видности для нормального зрения, имеющей максимум спектральной чувствительности в области 555 нм.

Радиационный контроль изделий с использованием термолюминесцентных преобразователей объединяет в себе положительные стороны метода пленочной рентгенографии, например, эффект накопления информации, разделение во времени процессов просвечивания и анализа результатов, что исключает радиационную опасность для оператора и метода флуороскопии — быстрое получение визуальной информации после окончания просвечивания, многократное использование одного преобразователя, надежность в работе.

По данным работ [3, 4], рассматриваемый метод позволяет за счет накопления обеспечить возможность работы при более низкой плотности входного потока. Контрастная чувствительность при получении изображений на тепловых нейтронах достигает 10%. Разрешающая способность преобразователей на основе термолюминофоров зависит от размера зерен светосостава и толщины люминесцентного слоя и может быть не хуже разрешающей способности флуороскопических систем контроля, т. е. 2÷4 лин/мм.

Несмотря на то, что качество флуороскопического изображения ниже изображений, получаемых пленочной рентгенографией, все же качество контроля может быть достаточно удовлетворительным для многих случаев дефектоскопии.

Область применения термолюминесцентных преобразователей целесообразно оценить по производительности контроля, т. е. по затратам времени, необходимого на получение информации о дефектности изделия.

Суммарные затраты времени T_Σ можно записать в виде

$$T_\Sigma = t_{под} + t_{эк}, \qquad (1)$$

где

$t_{под}$ — подготовительное время, включая время просмотра изображения оператором;

$t_{эк}$ — время экспозиции преобразователя.

Для создания фоновой яркости свечения экрана $B_ф$, необходимо, чтобы преобразователь был облучен дозой D_0, величина которой определится соотношением

$$D_0 = P_0 t_{эк} F \cdot \exp(-\mu d). \quad (2)$$

Здесь

P_0 — мощность дозы на поверхности изделия со стороны источника;
F — дозовый фактор накопления;
μ — коэффициент ослабления дозы;
d — толщина контролируемого изделия.

Так как заполнение ловушек кристаллофосфора электронами есть процесс статистический, то число ловушек, заполняемых в единицу времени, пропорционально числу свободных ловушек и мощности дозы облучения и, как показано в работе [5],

$$n_з = n_0[1 - \exp(-\beta P t_{эк})], \quad (3)$$

где

$n_з$ — число заполненных ловушек к моменту времени облучения $t_{эк}$;
n_0 — максимальное количество ловушек для данного типа фосфора;
P — мощность дозы облучения;
β — есть постоянная величина, равная относительному числу пустых ловушек, заполняемых при воздействии единичной дозы.

Яркость высвечивания B является функцией температурного режима нагрева преобразователя, но ее абсолютное значение в соответствующие моменты времени при постоянном режиме нагрева пропорционально числу заполненных ловушек.

Поэтому выражение (3) можно записать в виде

$$B = B_{max}[1 - \exp(-\beta P t_{эк})]. \quad (4)$$

B_{max} — есть функция максимальной яркости высвечивания при заполнении всех ловушек фосфора и выбранном режиме нагрева.

Считая, что $Pt_{эк} = D_0$, равенство (4) с учетом (2) запишется в следующем виде:

$$B_ф = B_{max}\{1 - \exp[-\beta P_0 t_{эк} \cdot F \cdot \exp(-\mu d)]\} \quad (5)$$

Откуда определяем

$$t_{эк} = \frac{\ln \dfrac{B_{max}}{B_{max} - B_ф}}{\beta \cdot P_0 \cdot F} \exp(\mu d). \quad (6)$$

Величину фактора накопления F для рентгеновского излучения с максимальной энергией спектра до 100 Кэв с достаточной для практических целей точностью можно положить равной 1.

Таким образом, отношение $\dfrac{\ln \dfrac{B_{max}}{B_{max} - B_ф}}{\beta P_0}$ есть величина, численно равная времени экспозиции, необходимой для достижения фоновой яркости $B_ф$ термолюминесцентного преобразователя в отсутствии поглотителя, т. е. при $d = 0$ для выбранного режима воздействия стимулирующего фактора. Приведенные выше рассуждения справедливы для светосоставов с глубокими уровнями ловушек, например, $CaSO_4 \cdot Mn$, LiF.

За яркость $B_ф$ принимается уверенно различимая яркость, например, глазом оператора, в течение всего времени анализа изображения.

При использовании в качестве источника излучения рентгеновского аппарата РУП-120-5-1 с напряжением на трубке $U_a = 100$ кВ, токе анода 1 мА и фокусном расстоянии 0,75 м средняя величина времени экспозиции для создания визуально различимой яркости термолюминесцентного преобразователя из светосостава $CaSO_4 \cdot Mn$ в течение времени

просмотра изображения ~3 мин и скорости нагрева 15 град/мин составила 1,2 мин.

Таким образом, время экспозиции, выраженное в минутах, для преобразователя $CaSO_4 \cdot Mn$ в зависимости от толщины просвечиваемого изделия можно определить выражением

$$t_{эк} = 1{,}2 \cdot \exp(\mu d) \qquad (7)$$

и суммарные затраты времени на контроль можно записать в виде

$$T_{\Sigma} = t_{под} + 1{,}2 \cdot \exp(\mu d) . \qquad (8)$$

Результаты определения суммарных затрат времени для выбранного режима просвечивания от толщины контролируемого изделия при постоянной яркости $B_ф$ термолюминесцентного преобразователя представлены на рис. 1, где кривая *1* рассчитана для алюминия, а кривая *2* — для магниевых сплавов.

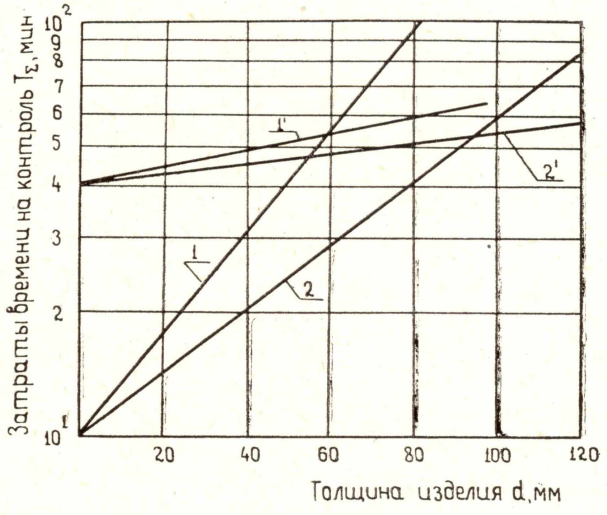

Рис. 1. Зависимость затрат времени от толщины поглотителя (*1*,*1*^{1} — алюминий, *2*,*2*^{1} — магний) при рентгенографировании на термолюминесцентный преобразователь (*1*, *2*) и рентгеновскую пленку РТ-1 (*1*^{1}, *2*^{1})

Для сравнения построены зависимости суммарных затрат времени с применением рентгеновской пленки РТ-1 [1], кривые *1′* и *2′* — соответственно для алюминия и магниевых сплавов.

Как видно из графиков рис. 1, ввиду того, что затраты подготовительного времени для рентгеновской пленки значительно больше, чем для термолюминесцентного преобразователя, имеется область толщин для различных материалов, в которой суммарные затраты времени для термолюминесцентной рентгенографии меньше затрат времени с использованием рентгеновской пленки.

Пенетрационная чувствительность преобразователей на основе светосостава $CaSO_4 \cdot Mn$ для толщин 5 и 10 мм алюминия равна соответственно 4,2 и 3,4%, что согласуется с требованиями ГОСТ для систем рентгенографического контроля.

Следует заметить, что никаких специальных мер по повышению чувствительности при этом не применялось. Поэтому следует ожидать, что выбор оптимальных режимов просвечивания и подбор светосоставов позволят повысить дефектоскопическую чувствительность.

Выводы

1. Рентгенография с применением термолюминесцентных экранов и пленок в целом ряде случаев выгодно отличается от рентгенографии на рентгеновскую пленку простотой обработки, наблюдений и многократностью применения.

2. При контроле толщин до 20 мм по алюминию и магнию затраты времени на получение информации о дефектности изделия сокращаются в 4÷5 раз по сравнению с рентгеновской пленкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Румянцев, А. С. Штань, Ю. Ф. Попов. Справочник рентгено- и гамма-дефектоскописта. М., Атомиздат, 1969.

2. Л. Я. Морковский и др. Люминофоры. М., «Химия», 1966.

3. Kostner J., Berger H., Kraska I. R., A. Termoluminescent Image Detection Method for Neutron Radiagraphy, Nucl. Applic., 2, 252, 1966.

4. Berger H., Recent Progress in Neutron Imaging, Br. J. Non-Dest. Test., 10, 26, 1968.

5. К. К. Шварц и др. Термолюминесцентная дозиметрия. Рига, «Зинанте», 1968.