

ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЦВЕТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В. А. БЕРДОНОСОВ, В. И. ГОРБУНОВ, А. А. ПОПОВ

Радиография с использованием черно-белой пленки не позволяет выявить небольшие изменения плотности потемнения эмульсии на рентгенограмме. Установлено, что человеческий глаз в диапазоне оптических плотностей от 0 до 3 может отличить всего несколько сот градаций серого оттенка. Это является существенным недостатком черно-белой радиографии, так как малые изменения плотностей потемнения имеют очень большое значение для определения дефектов в образце.

Обычный черно-белый рентгеновский снимок содержит в себе только один оценочный параметр — яркость серого оттенка (оптическая плотность). Цветное изображение, в отличие от черно-белого, позволяет получить два добавочных параметра при оценке качества контролируемого объекта: цвет и насыщенность, благодаря чему происходит значительное увеличение информационной способности рентгенограммы (человек способен субъективно различать несколько тысяч цветов и оттенков цвета).

Исследование в области цветной радиографии ведутся уже сравнительно давно.

Еще в 1951 году были получены первые в мире цветные рентгенограммы человеческого тела [1]. С этого времени началось успешное развитие цветной радиографии.

В начальный период разработки методов получения цветного рентгеновского изображения работы велись в основном в США и Англии. В последнее время значительные усилия в этом направлении предприняли такие страны, как Япония, ГДР, Франция, Канада, СССР [2].

Не надо думать, что попытки замены черно-белой радиографии на цветную обусловлены экономическими или техническими факторами: разработка методов получения цветных рентгеновских снимков сулит большие перспективы из-за их высокой информационной способности.

Методы цветной радиографии

В настоящее время разработка методов цветной радиографии ведется по двум основным направлениям (косвенные и прямые методы) (рис. 1).

Косвенные методы предполагают использование монохроматической черно-белой рентгенограммы, серую градацию которой затем тем или иным способом превращают в цвета и оттенки цвета.

В прямых методах находят применение цветные фотоматериалы

или специальные цветные радиографические пленки, которые экспонируются рентгеновским или γ -излучением с применением или без применения усиливающих экранов.

Косвенные методы

В работе [2] описан метод преобразования черно-белого рентгеновского изображения в цветное, суть которого заключается в неоднократном хлорировании и бромировании черно-белой рентгеновской пленки в сочетании с повторным проявлением поочередно в специальных окрашивающих растворах. Краски при послойном наложении друг на друга образуют цветное изображение, информативность которого по сравнению с черно-белым существенно повышается.

Значительный интерес представляет монохроматический метод в цветной радиографии. Суть его заключается в следующем. Человеческий глаз наиболее чувствителен к световой энергии зеленой области видимого спектра. Из теории цвета известно, что фуксинные (пурпурные) объекты являются наиболее эффективными поглотителями зеленого оттенка. Это явление может быть с успехом использовано для улучшения информативности рентгеновского изображения. Так, например, авторы работы [3] для получения рентгенограмм фуксинного оттенка выбрали метод металлического тонирования. Фотометрирование в зеленом свете показало значительное увеличение контраста пурпурного изображения по сравнению с обычным черно-белым. После обработки изображение дефекта стало отличаться от фона на 0,09 ед. оптической плотности, в то время как до тонирования разница оптических плотностей составляла всего 0,03 ед. оптической плотности.

Цветное изображение возможно получить не только на самой черно-белой пленке. Например, можно изготовить копию черно-белого негатива на специальной флексихромной пленке, как это описано в работе [2], и затем произвести окрашивание этой пленки красителями различного цвета.

Достаточно распространен копировальный метод получения цветного рентгеновского изображения, при котором на двух диапозитивных пленках изготавливаются негативные копии рентгеновского изображения. Затем диапозитивы (каждый под своим цветным фильтром) проецируются один за другим на цветную фотобумагу или на проекционный экран [2].

Спектр рентгеновского излучения состоит из смеси волн различной энергии, которые соответственно своим физическим качествам проявляют различные фотохимические действия. Однако в обычном черно-белом изображении это не заметно, поскольку в эмульсионном слое фотохимические действия волн различной энергии наслаиваются и взаимно погашаются.

Для получения рентгенограмм, цвет которых зависит не только от интенсивности, но и от энергии излучения, объект, подлежащий контролю, многократно радиографируют рентгеновскими лучами различной жесткости, продолжительности и интенсивности. При этом экспонирование может производиться поочередно для каждой пленки (многократная экспозиция) или одновременно (однократная экспозиция) с употреблением фильтров для селекции рентгеновских лучей. Затем каждую пленку окрашивают в свой цвет [2].

Этот метод можно с успехом применять в тех случаях, когда в контролируемой детали необходимо выявить материалы различной плотности и атомного веса. Был произведен опыт, в котором клин, состоящий с одной стороны из свинца, с другой — из олова просвечивали рентгеновским излучением с максимальной энергией 35 кВ и 125 кВ

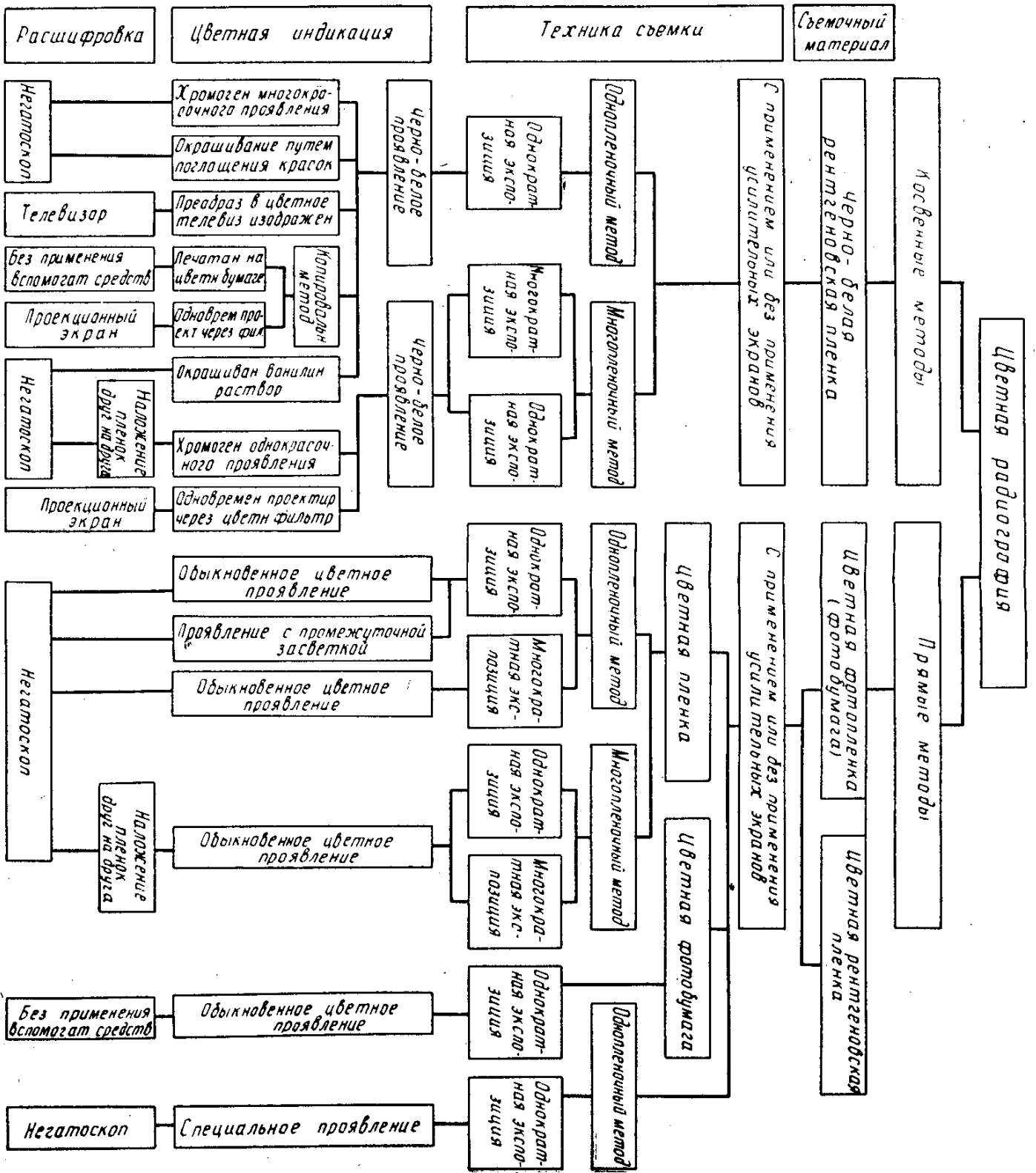


Рис. 1. Схематический обзор методов получения цветового изображения

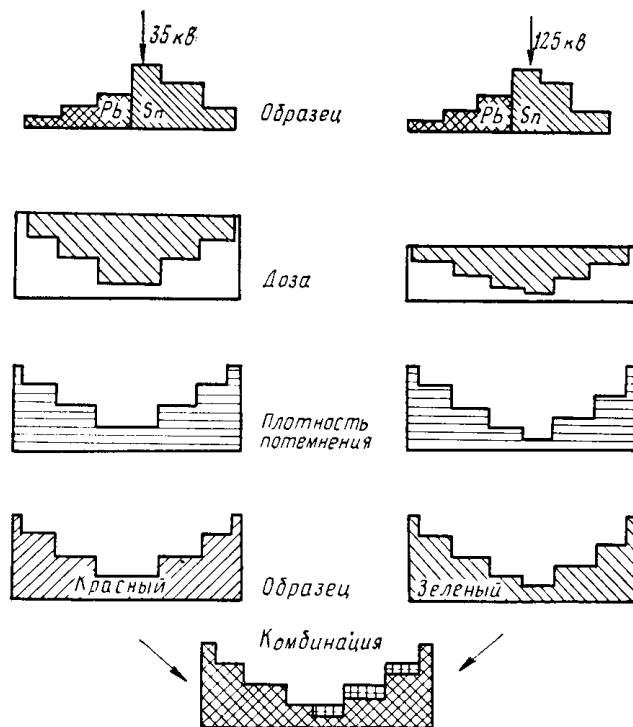


Рис. 2. Метод распознавания материалов.

(рис. 2). Снимок, полученный с помощью энергии 35 кВ, был окрашен в красный цвет, другой — в зеленый.

При этом по причине неодинакового спектрального течения процесса поглощения рентгеновского излучения высоты ступенек Pb и Sn, которые при энергии 35 кВ обладают одинаковыми поглотительными свойствами, при 125 кВ дают различные значения величины поглощения, в результате чего при совмещении снимков возможно отличить свинец от олова.

Следует заметить, однако, что разница в процессе поглощения γ -лучей различной энергии становится заметной только при относительно больших длинах волн. В связи с этим данный эффект едва ли возможно использовать при производственном контроле материалов большой толщины или плотности, где чаще всего должно применяться повышенное напряжение.

Прямые методы

Прямые методы с применением фотоматериалов

Возможность применения фотоматериалов в цветной радиографии основана на различной чувствительности эмульсионных слоев к рентгеновскому или γ -излучению.

Обычно сбалансированная цветная пленка или фотобумага имеют характеристики, приведенные на рис. 3. Если же пленку экспонировать рентгеновскими или γ -лучами, то вследствие различной чувствительности эмульсионных слоев к этому виду излучения пленка окажется разбалансированной как по контрасту, так и по чувствительности, в результате чего появляются различные цветовые оттенки в соответствии с интенсивностью падающего излучения (рис. 4).

Как и в обычной черно-белой радиографии, экспонирование цветной пленки может производиться с применением или без применения усиливающих экранов [4]. Основным недостатком экспонирования без применения усиливающих экранов является недопустимо большое время экспозиции, поскольку используемый фотоматериал малочувстви-

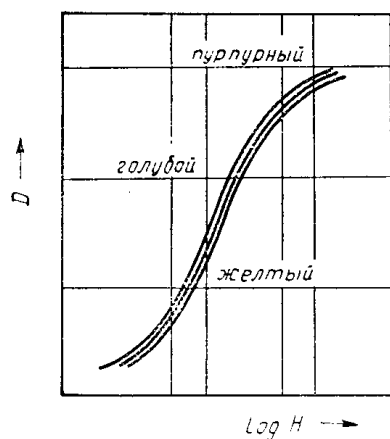


Рис. 3. Характеристические кривые цветного материала, сбалансированного по светочувствительности и контрасту. D — цветовая оптическая плотность; H — интенсивность освещения.

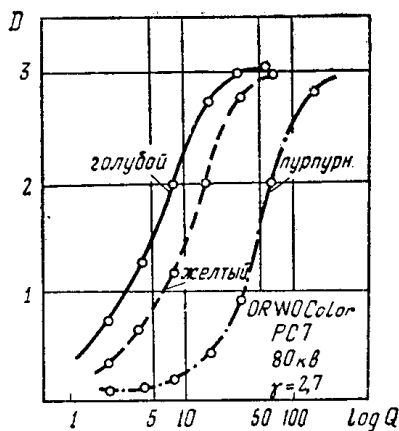


Рис. 4. Характеристические кривые позитивной пленки ORWOcolor PC7 при просвечивании ее x-лучами ($U=80$ кВ). D — цветовая оптическая плотность; Q — интенсивность x-лучей.

гелен к действию ионизирующего излучения. Применение металлических усиливающих экранов сокращает время экспозиции в несколько раз при одновременном улучшении резкости и цветовой контрастности изображения.

Поскольку обычная фотопленка сенсibilизирована к видимому свету, применение флуоресцентных усиливающих экранов влечет за собой еще более существенное уменьшение времени экспозиции. В практике обычно применяется комбинация флуоресцентного и металлического усиливающих экранов.

Авторы работы [4] провели ряд экспериментов по определению наилучшей комбинации усиливающих экранов. Просвечивание алюминия с применением пленок типа ORWOcolor NT17 и ORWOcolor PC7 при различных комбинациях усиливающих экранов ($Pb\ 0,15/Pb\ 0,15$, $M100 (M=CaWO_4)/Pb\ 0,15$; $M200/Pb\ 0,15$; стандарт $/Pb\ 0,15$; $ZnS/Pb\ 0,15$, $ZnCdS/Pb\ 0,15$, $M100/M100$, $ZnCdS/M100$, $M100 (ZnS)$) показали, что комбинация $ZnCdS/Pb\ 0,15$ дает минимальную экспозицию, примерно в три раза меньшую, чем при экранах вида $M100/Pb\ 0,15$.

Следует отметить, что не все типы фотоматериалов пригодны для цветной радиографии.

Исследования показали, что негативные сорта пленок в этом случае использовать нецелесообразно, что можно объяснить практически одинаковым поведением кривых цветовых плотностей эмульсионных слоев пленки (рис. 6). [5].

Позитивная пленка дает несомненно большее количество цветов и оттенков, о чем свидетельствует сравнение рис. 5 с рис. 6.

Значительное место в цветной радиографии с использованием фотоматериалов занимает способ повышения цветовой контрастности [6]. Он заключается в том, что процедура проявления делится на два этапа (этап первоначального проявления и этап последующего проявления), между которыми пленка подвергается «засвечиванию» видимым светом. Необходимо при этом, чтобы освещение пленки производилось зеленым, красным или желтым светом, к которым чувствительны нижние эмульсионные слои. Области, экспонированные рентгеновским излучением, влиянию «засвечивания» не подвергаются, так как имеющееся в верхнем слое серебряное изображение, появляющееся

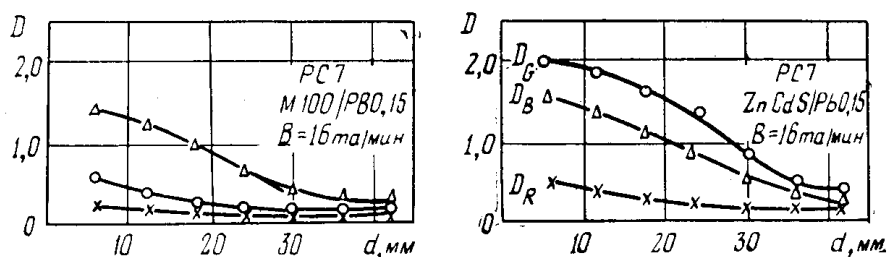
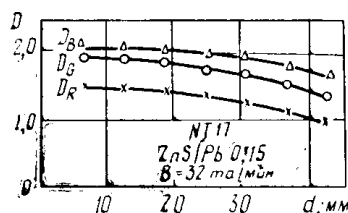


Рис. 5. Частичные плотности цвета пленки ORWO color PC7 при различных комбинациях экранов при просвечивании Al. D_B — цветовая плотность за синим фильтром; D_G — цветовая плотность за зеленым фильтром; D_R — цветовая плотность за красным фильтром.

Рис. 6. Частичные плотности цвета пленки типа ORWO color NT17 при просвечивании Al.

D_B — цветовая плотность за синим фильтром; D_G — цветовая плотность за зеленым фильтром; D_R — цветовая плотность за красным фильтром.



после этапа первоначального проявления, действует на нижние слои как черный фильтр.

Таким образом, засвечивание пленки в процессе проявления увеличивает плотность изображения и контрастность по цвету в тех случаях, когда из-за слишком большой толщины или плотности материала пленка была в значительной степени недоэкспонирована рентгеновскими лучами.

Дифференциация оптических плотностей рентгеновского изображения возникает как результат изменения плотности или атомного веса просвечиваемого объекта. Причем, если изменения оптической плотности, появляющиеся в результате неодинаковой плотности образца, независимы в широком диапазоне длин волн от напряжения на трубке, то различия оптической плотности, вызванные изменением атомного веса, в большей степени зависят от энергии излучения, особенно в диапазоне энергий 40—60 вк.

Для выяснения причины изменения оптической плотности рентгеновского изображения было предложено одновременно экспонировать сразу две пленки, между которыми проложен фильтр, поглощающий мягкие компоненты.

После фотохимической обработки получают одновременно два снимка, а именно: первый в области мягкого излучения, а второй в области более жестких волн. При этом изменения плотности и атомного номера материала передаются в разных тонах и оттенках [2].

В этом методе для верхней пленки рекомендуется применять красный, а для нижней — голубой флуоресцентный экран.

Прямые методы с применением цветных рентгеновских пленок. Простейшая цветная рентгеновская пленка состоит из двух эмульсионных слоев, каждый из которых имеет свой коэффициент контрастности, благодаря чему достигается определенное изменение цвета и яркости изображения при изменении толщины или плотности образца [2].

Подобная пленка была создана в СССР институтами МНИРРИ

и НИИ Химфотопроект. Эта цветная рентгеновская пленка представляет собой двухслойный фотографический материал. Каждый из слоев пленки содержит цветную недифундирующую компоненту, которая при цветном проявлении образует в одном слое пурпурное, а в другом—зеленое изображение. При экспонировании пленки необходимо применять различные рентгеновские усиливающие экраны типа «Стандарт» СБ, УС и др.

Другой разновидностью цветных рентгеновских материалов является пленка, предложенная в работе [7]. Эта пленка состоит из двух эмульсионных слоев, содержащих сенсibilизаторы и цветные компоненты, между которыми располагается абсорбирующий экран (рис. 7).

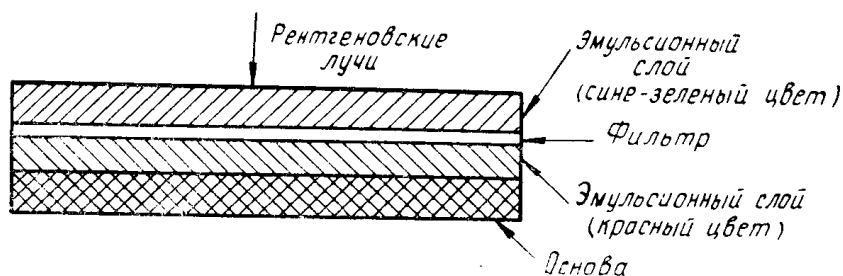


Рис. 7. Строение цветной радиографической пленки.

После экспонирования и фотообработки на пленке появляется цветное изображение, окраска которого зависит не только от интенсивности, но и от длины волны рентгеновского излучения.

При соответствующем выборе толщин и составов эмульсионных и фильтровальных слоев можно достигнуть определенной чувствительности обоих слоев, зависящей от длины волны рентгеновского или γ -излучения.

Из диаграммы цветовой плотности эмульсионных слоев в зависимости от длины волны падающего излучения очевидно, что при длине волны $0,9 \text{ \AA}^\circ$ плотности обоих слоев одинаковы, но при уменьшении или увеличении энергии излучения равенство нарушается соответственно в сторону увеличения плотности сине-зеленого или красного цвета (рис. 8).

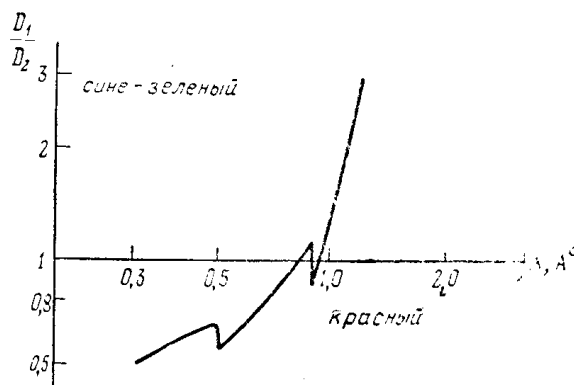


Рис. 8. Зависимость плотности цвета от длины волны падающего излучения.

Количество оттенков рентгеновского изображения можно увеличить, если применить большее количество эмульсионных слоев. Так, например, хорошее многокрасочное изображение дает пленка, состоящая из трех эмульсионных слоев, каждый из которых несет в себе красители определенного цвета субтрактивного цветосинтеза.

Выводы

1. Дифференциация материала по толщине и плотности выявляется на снимке благодаря изменению яркости, а также цвета и насыщенности, что повышает информативность цветного рентгеновского изображения по сравнению с черно-белым.
2. Цветной рентгеновский снимок показывает тенденцию (возрастание или уменьшение) изменения толщины (или плотности) просвечиваемого материала.
3. Изменение цвета допускает качественное определение размеров дефекта в направлении просвечивания.
4. При использовании метода «засвечивания» диапазон оцениваемых толщин больше, чем в черно-белой радиографии.

Перспективы

Нужность и целесообразность цветной радиографии не вызывает сомнения. Вопрос состоит в том, чтобы из всех возможных методов производства, цветного радиографического изображения выбрать наиболее перспективный.

Косвенные методы, очевидно, из-за своей трудоемкости и сложности не получают большого распространения. Хотя разработка этих методов продолжается и до сих пор.

Применение фотоматериалов получило развитие в начальный период разработки методов цветной радиографии, когда было необходимо получить данные о влиянии ионизирующего излучения на многослойные материалы, о принципе получения изображения на многослойных материалах в радиографии.

Вследствие малой чувствительности фотоматериала к ионизирующему излучению, большого и трудоемкого времени обработки цветную фотопленку также вряд ли можно назвать перспективным, подходящим для радиографии материалом.

Накопленные данные о влиянии ионизирующего излучения на многослойные материалы позволят создать специализированную цветную пленку.

Применение специализированной цветной пленки приносит ряд преимуществ по сравнению с другими методами. Это малое время экспозиции и обработки и хорошая чувствительность.

Учитывая, что этот метод находится на начальной стадии развития (например, отечественная пленка РЦ-2 в настоящее время дорабатывается с целью улучшения ее характеристики) и что в МНИРРИ разрабатывается пленка, оценочные параметры изображения на которой (цвет, насыщенность, яркость) будут зависеть не только от интенсивности, но и от длины волны падающего излучения, что резко повышает чувствительность пленки, надо полагать, что метод с применением специализированной цветной пленки наиболее перспективный.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. E. Donovan. Radiography in Colour, The Lancet, 1951, April, 14.
2. H-V. Richter, D. Linke. Grundlagen und Verfahren der Colop-Radiografie, Die Technik, 21 (1966).
3. N. S. Beger, I. E. Starova. Color Radiography in Monochrome, D3, Sixth International Conference of Nondestructive Testing, June 1970, Hannover (Germany).
4. H-V. Richter, D. Linke. Color-Radiografie, ein neues Verfahren der industriellen Werkstoffprüfung, Die Technik, 21, 1966.
5. H-V. Richter, D. Linke. Color-Radiografie, Die Technik, 21, 1966.
6. N. S. Beyer, and I. E. Starova. Research and Development in Color Radiography, Materials evaluation, 1968, vol XXVI, 8.
7. I. Blum. Nouvelles emulsions sensibles an x rayonnements invisibles, Science et industries photographiques, 1958, 29.