

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСИЛИВАЮЩИХ ЭКРАНОВ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И КОНТРАСТНОСТЬ РЕНТГЕНОВСКИХ ПЛЕНОК

В. И. ГОРБУНОВ

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

Излучение, имеющее максимальную энергию квантов в спектре $25\div 30$ Мэв, является наиболее проникающим в случае просвечивания стального изделия. При большой толщине контролируемого изделия время просвечивания становится весьма значительным. Это объясняется в первую очередь особенностью воздействия жесткого рентгеновского излучения на фотографическую эмульсию рентгеновской пленки.

Известно [1, 2], что скрытое изображение при большой жесткости лучей создается главным образом вследствие действия электронов, которые образуются в окружающей среде, так как поглощение жестких рентгеновских лучей в самом фотослое ничтожно мало.

Кривая удельной чувствительности фотопленки в зависимости от жесткости рентгеновского излучения (рис. 1) наглядно иллюстрирует это положение. Максимум кривой при жесткости лучей порядка $80\div 100$ кэ объясняется тем, что при малой жесткости лучей их поглощение фото-

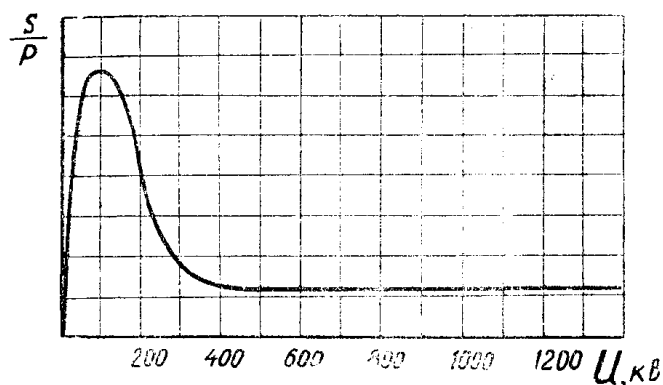


Рис. 1

слоем весьма значительно, другими словами, скрытое изображение в фотоземлюсии образуется в основном благодаря электронам, освобожденным в самом фотослое.

Постоянство удельной чувствительности фотопленки к действию более жесткого излучения объясняется малым поглощением жестких рентгеновых лучей самим фотослоем.

В рентгено- и γ -дефектоскопии получили широкое применение усиливающие экраны, которые увеличивают чувствительность пленки к излучению. Обычно применяют два типа усиливающих экранов: металлические фольги и флуоресцирующие экраны.

Металлические усиливающие экраны

Из предыдущего следует, что в случае жесткого рентгеновского излучения скрытое изображение в фотоэмульсии пленки образуется вследствие действия электронов, освобожденных рентгеновскими лучами в среде, окружающей пленку. Следовательно, помещая рядом с пленкой вещество с большим атомным номером, тем самым можно значительно увеличить количество электронов, попадающих на пленку в единицу времени, другими словами, увеличить почернение пленки.

Известно, что усиливающее действие металлических фольг зависит от материала фольги, ее толщины и длины волны излучения.

В литературе имеются обширные сведения по выбору металлических усиливающих экранов для просвечивания металлических изделий излучением с жесткостью до 2 Мэв [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Для более жесткого излучения (20÷30) Мэв никаких определенных рекомендаций по выбору металлических усиливающих экранов не имеется, хотя опубликован ряд статей, в которых рассматривается данный вопрос [7, 8].

Основываясь на теории взаимодействия излучения с веществом, нами был проделан ряд экспериментов по выбору металлических усиливающих экранов при работе с рентгеновским излучением с максимальной энергией 25 Мэв. Эксперименты велись в двух направлениях: в направлении выбора оптимальной толщины усиливающих экранов с учетом их максимального усиливающего действия и с точки зрения наибольшей выявляемости дефектов.

Кроме того, нами был рассмотрен вопрос по выбору материала усиливающих экранов. Прежде всего остановимся на этом вопросе.

Как уже отмечалось, для увеличения чувствительности пленки необходимо применять экраны из тяжелых металлов, так как число вторичных электронов, а следовательно, и степень усиления, возрастает с возрастанием порядкового номера материала экрана.

Практически применяются свинцовые усиливающие экраны, которые имеют значительный удельный вес.

Однако при выборе экрана необходимо учитывать, что от материала усиливающего экрана зависит не только эффект усиления, но и выявляемость дефектов, так как вследствие рассеяния вторичных электронов в самом экране контуры изображения размываются. Размеры размытого изображения растут пропорционально среднему углу рассеяния электронов, а также с ростом толщины экрана.

Известно [9], что угол рассеяния возрастает с увеличением порядкового номера материала экрана, тогда как необходимая толщина экрана убывает с ростом удельного веса.

Отсюда можно сделать важный практический вывод, что для получения высокого качества изображения с большим коэффициентом усиления необходимо брать материал для экрана с небольшим порядковым номером при возможно высоком удельном весе.

Следовательно, свинец не является лучшим материалом для экранов, так как тантал, золото, платина обладают почти вдвое большей плотностью

при меньшем порядковом номере. Это значит, что в случае применения этих металлов в качестве материалов для экранов мы сможем получить наряду с высоким коэффициентом усиления высокое качество изображения.

К сожалению, в своих опытах мы не располагали вышеуказанными материалами, поэтому все последующие опыты велись с помощью свинцовых экранов. Применение оловянных экранов является менее эффективным, так как свинцовые экраны обладают значительным преимуществом по сравнению с ними, вследствие освобождения большого числа электронов.

Во всех опытах по выбору оптимальной толщины свинцовых экранов использовались двойные экраны: передний и задний. Передний экран должен выполнять две задачи. Первая из них—наибольший фотографический эффект на эмульсию за счет усиливающего действия экрана. Вторая, не менее важная задача,—поглощение рассеиваемых электронов, образующихся в испытываемом образце с тем, чтобы они не смогли достичь пленки и затемнить изображение.

Задний экран также применяется для увеличения фотографического эффекта за счет обратного рассеивания и, кроме того, он в незначительной степени улучшает качество изображения. Исходя из всего вышеизложенного, нами был проведен ряд экспериментов по выбору наиболее эффективных комбинаций свинцовых усиливающих экранов.

Были изготовлены два свинцовых экрана сложной формы (рис. 2, 3). Передний экран (рис. 2) имеет вид квадрата размерами 130×130 мм, внутри которого находятся 8 секторов с различной толщиной от 0 до 5,8 мм.

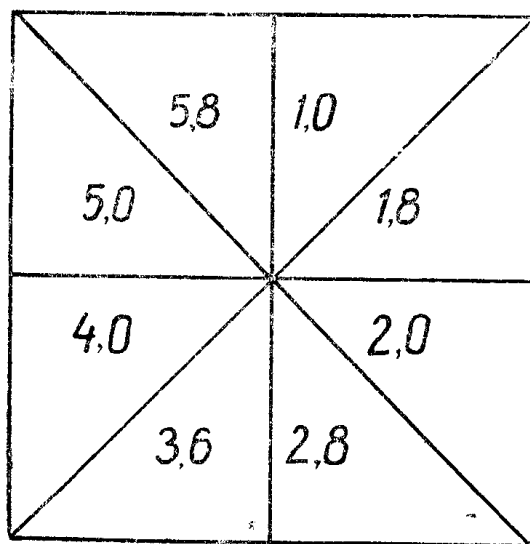


Рис. 2

Сверху свинцовых секторов с помощью клея БФ-2 приклеивался набор подобных же секторов из плексигласа, благодаря чему был получен наборный секториальный экран, позволяющий за одну экспозицию получать 8 значений почернений в зависимости от толщины экрана.

Кроме того, секториальная форма экрана дает возможность полностью устранить влияние распределения интенсивности в пучке, что в значительной степени повышает точность эксперимента.

Задний свинцовый экран (рис. 3) также имеет форму квадратной пластины (130×130 мм), внутри которой имеется 4 концентрических вы-

ступя высотой 1,1; 2; 2,9 и 4,5 мм. Как и в случае переднего экрана, сверху приклеивались плексигласовые диски.

Задний экран позволял получать одновременно четыре значения почернения в зависимости от толщины концентрических колец. Распределение интенсивности в пучке учитывалось с помощью засвечивания рент-

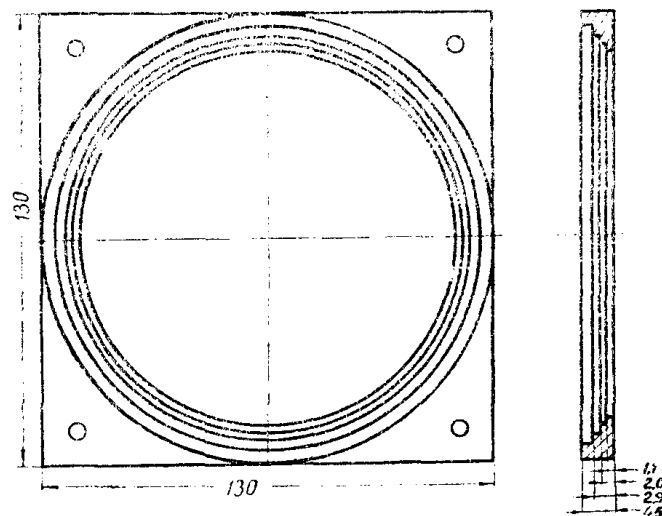


Рис. 3

геновской пленки, которая затем фотометрировалась в точках, отстоящих от центра пучка на расстояниях, равных средним радиусам концентрических свинцовых колец. Свинцовая поверхность как переднего, так и заднего экранов тщательно обрабатывалась с тем, чтобы обеспечить наилучший контакт с поверхностью рентгеновской пленки.

Исследование влияния усиливающего действия свинцовых экранов проводилось для двух случаев—без поглотителя и с поглощающим стальным телом. Снимки без поглотителя были сделаны при расстоянии от мишени до пленки в 250 см. Экспонировалось несколько сортов рентгеновской пленки: „Рентген XX“, „Рентген X“, и Agfa-Duro“.

В процессе исследования было установлено, что между испытываемыми сортами пленок нет принципиального различия с точки зрения действия на них свинцовых усиливающих экранов.

При исследовании усиливающего действия свинцовых экранов в случае отсутствия поглотителя все сорта рентгеновской пленки показывают возрастающее почернение с ростом толщины экрана. Самое сильное почернение имели поля с передним экраном, толщиной 1,5—2,5 мм и задним экраном толщиной 2,5—3 мм.

В случае испытаний свинцовых экранов позади стального поглотителя наблюдалась отличная картина: более тонкий экран (толщиной 0,5 мм) дает более отчетливое усиление по сравнению с полями без передних экранов.

На рис. 4, 5 представлены результаты измерений $D=f(d)$ для трех снимков наборных свинцовых экранов: рис. 4 без поглотителя и рис. 5 со стальным поглотителем толщиной 100 мм. Каждая кривая показывает ход почернения при возрастающей толщине переднего экрана для соответствующей толщины заднего экрана. Сопоставление кривых дает значение усиливающего действия различных задних экранов.

Из рис. 4 видно, что за 2,5 мм свинцовым экраном практически сохраняется равновесие излучения, т. е. достигается максимальное усиление. Дальнейшее увеличение толщины переднего экрана не приводит к увеличению в почернении, а из-за поглощения первичного излучения приводит к его постоянному уменьшению.

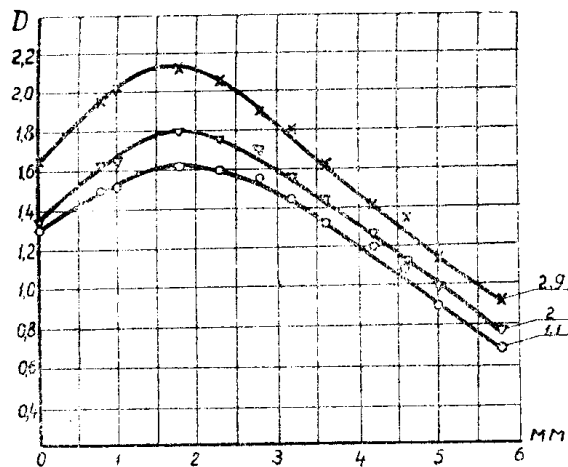


Рис. 4

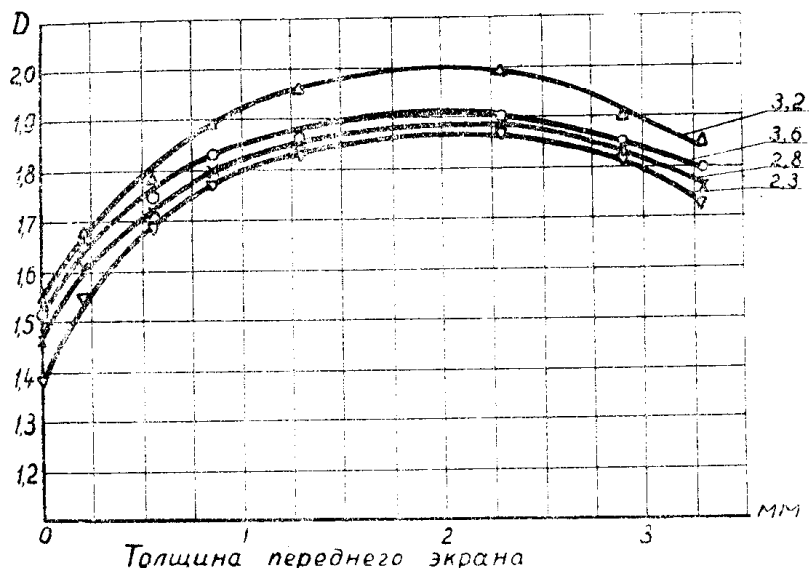


Рис. 5

Кривые почернения рис. 5 дают заметный в начале подъем, который можно объяснить нарушением равновесия излучения фильтрацией освобожденных в испытываемом теле вторичных электронов передней алюминиевой стенкой кассеты, которая перехватывает больше электронов, чем освобождает. Свинцового экрана толщиной 0,3—0,5 мм в этом случае бывает достаточно, чтобы восстановить равновесие излучения и усилить соответственно почернение. Дальнейший, более пологий ход почернения, говорит о том, что при толщинах переднего экрана более чем 0,5 мм поглощение и освобождение вторичных электронов примерно одинаковы.

Наблюдаемое уменьшение почернения при толщинах переднего экрана от 2 до 3,3 мм свинца (рис. 5) можно объяснить фильтрацией комптоновских электронов, освобожденных в испытываемом теле и обладающих большей энергией.

После исследования влияния толщины свинцового экрана на степень почернения пленки были проведены эксперименты по определению зависимости качества изображения от толщины экрана.

Следовательно, при меньшей толщине экрана резкость изображения дефектов растет. Однако толщина экрана не должна быть слишком малой, так как в противном случае рассеянные электроны, образованные в испытываемом образце и низкоатомных стенках кассеты, смогут достичь пленки и затемнить изображение. С этой точки зрения толщина переднего экрана должна приблизительно равняться среднему радиусу пробега электронов.

Однако, как уже указывалось выше, увеличение толщины свинцового экрана свыше определенной величины будет отрицательно сказываться на качестве снимка. Это наглядно подтверждает схематический график изменения интенсивности жестких рентгеновских лучей и вторичных электронов, образовавшихся в поглотителе и свинцовых экранах (рис. 6)

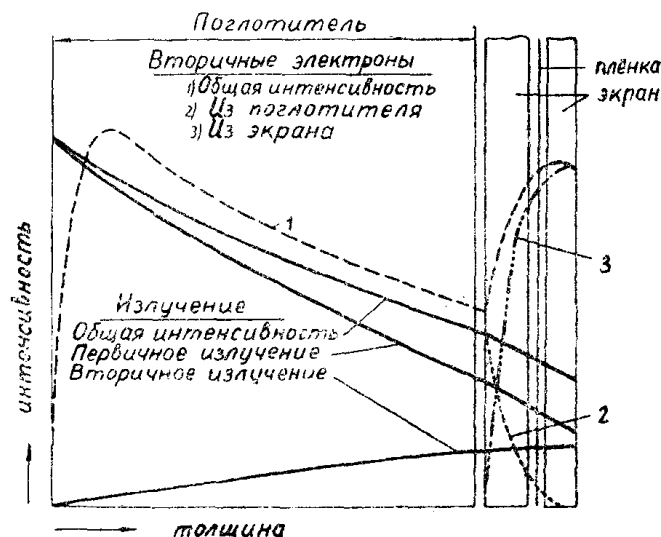


Рис. 6

Из графика следует, что плотность вторичных электронов, образующихся в переднем экране, резко возрастает прежде всего в первой трети среднего радиуса пробега электронов, в то время как подъем в последней трети радиуса практически можно не учитывать (кривая 3). Увеличение в резкости изображения за счет поглощения в последней трети экрана, равного среднему радиусу пробега вторичных электронов, образовавшихся в испытываемом теле и стенках кассеты, так мал (кривая 2), что компенсируется более сильным рассеянием экранных электронов.

Таким образом, качество изображения в зависимости от толщины переднего экрана должно улучшаться только до $2/3$ радиуса пробега электронов, а затем эта зависимость будет незначительной. Для заднего экрана сохраняется указанная зависимость.

Проделанные нами опыты по определению зависимости качества изображения от толщины усиливающего экрана показали хорошее соответствие с теоретическими расчетами.

Все опыты были проведены со стальным поглотителем толщиной 100 мм. Расстояние от фокуса до пленки 1,5 м; пленка в алюминиевой металлической кассете помещалась непосредственно за поглотителем. В качестве переднего экрана применялся уже описанный выше секториальный свинцовый экран. Задний экран менялся каждый раз перед очередным засвечиванием; всего было использовано 7 задних экранов с толщиной от 0 до 4 мм через 0,5 мм. На поверхности стального поглотителя, расположенной ближе к фокусу, размещались стальные проволоочки диаметром 1 мм в виде радиальных линий с таким расчетом, чтобы против каждого сектора переднего экрана находилось по одной проволоочке. Все опыты были проведены для пленки „Рентген XX“.

Результаты исследования приведены на рис. 7. Рис. 7 показывает относительную выявляемость дефекта в зависимости от толщины переднего и заднего экранов. Из графика следует, что наилучшая выявляемость получается для переднего свинцового экрана толщиной 3,0 мм и для заднего — 2,5 мм.

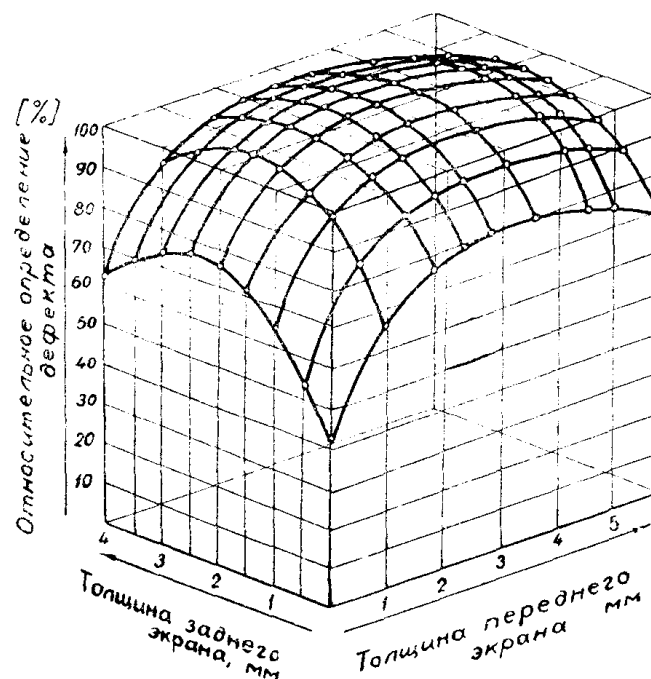


Рис. 7

Сопоставляя результаты измерений по определению зависимости почернения от толщины свинцового экрана с результатами, полученными при определении выявляемости дефекта от толщины экрана, можно выбрать наиболее эффективную толщину свинцовых экранов.

Таковыми толщинами являются, в случае рентгеновских лучей с энергией 25 Мэв, передний свинцовый экран 2 мм и задний свинцовый экран 3 мм.

В дальнейшем во всех опытах, где необходимо было применять свинцовые усиливающие экраны, применялись свинцовые экраны указанной толщины.

Флуоресцирующие усиливающие экраны

Как показали дальнейшие опыты по просвечиванию стальных изделий, экспозиции для стали толщиной более 50 мм с применением свинцовых усиливающих экранов становятся так велики, что потребовалось приме-

нение более эффективных усиливающих экранов. Такими экранами являются флуоресцирующие усиливающие экраны, которые, как показали опыты, можно сравнительно успешно применять в технике просвечивания жесткими рентгеновскими лучами.

Современные флуоресцирующие экраны, выпускаемые отечественной промышленностью, представляют собой картон с нанесенным на него активным слоем. В качестве активного слоя служат кристаллические люминофоры, дающие под воздействием рентгеновских или γ -лучей наибольший выход света люминесценции. Воздействие на пленку дополнительного света флуоресцирующего экрана увеличивает общее почернение пленки.

Возбуждение рентгеновскими лучами флуоресцирующих экранов происходит не за счет самих рентгеновских лучей, а фото-, комптон-и пара-электронами, образующимися в веществе экрана в результате поглощения и рассеяния рентгеновских лучей.

Кроме того, для данного люминесцирующего вещества возбудимость рентгеновскими лучами тем сильнее, чем выше его коэффициент поглощения для рентгеновских лучей. Этот высокий коэффициент поглощения характерен для веществ, содержащих тяжелые атомы (1, 2). С этой точки зрения наиболее приемлемыми люминофорами можно считать щелочно-земельные вольфраматы, например (CaWO_4) , а также урановые соли и двойные соли типа платиносинеродистого бария $[\text{BaPt}(\text{CN})_4\text{H}_2\text{O}]$.

Известно, что вольфраматы имеют малую визуальную яркость свечения, однако их спектральный состав является весьма подходящим для фотоэмульсии рентгеновских пленок [1, 10].

На рис. 8 приведена зависимость энергии в относительных единицах, излучаемой вольфрамом кальция, от длины волны света люминисценции [1]. Из графика следует, что вольфрамат кальция излучает энергию преимущественно в ультрафиолетовой области спектра, захватывая частично фиолетовую и синюю области видимого света.

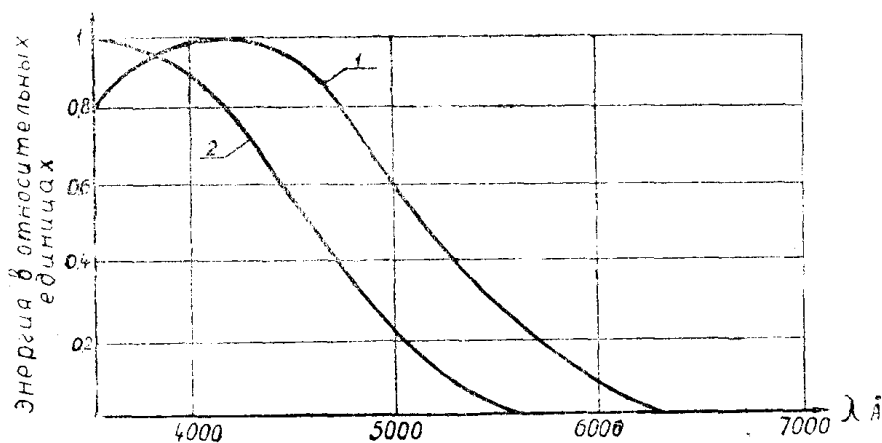


Рис. 8

Относительная чувствительность рентгеновской пленки показана кривой 2 (рис. 8), из хода которой следует, что бромосеребряная соль эмульсии имеет наибольшую чувствительность к длинам волн, расположенных преимущественно в ультрафиолетовой области спектра.

В зависимости от нагрузки светящегося слоя (веса люминофора на единицу поверхности) в настоящее время изготавливаются типы вольфраматных экранов, указанные в табл. 1 [1].

Таблица 1

№ экрана	Нагрузка мг/см^2
1	40
2	80
3	120
4	160

В нашем распоряжении имелись вольфрамовые экраны № 1, 3, 4.

Исследование характеристик вольфрамовых экранов для целей промышленного просвечивания при излучении жесткостью 25 Мэв проводилось для стального поглотителя различной толщины.

Прежде всего были проведены эксперименты по сравнению работы усиливающих экранов с различными нагрузками светящегося слоя (40, 120, 160 мг/см^2). Опыты проводились для отечественной пленки "Рентген Х" при расстоянии от мишени до пленки 150 см. Экраны с различной нагрузкой светящегося слоя нарезались в виде секторов, наклеивались на черную бумагу, после чего помещались в кассету.

После просвечивания стальных пластин толщиной 50 и 100 мм с различным временем экспозиции все пленки проявлялись в одинаковых условиях. В дальнейшем пленки фотометрировались с помощью микрофотометра МФ 4. Результаты исследования в виде кривых приведены на рис. 9. Из рис. 9 следует, что с повышением нагрузки светящегося слоя коэффициент усиления экранов возрастает непропорционально увеличению на-

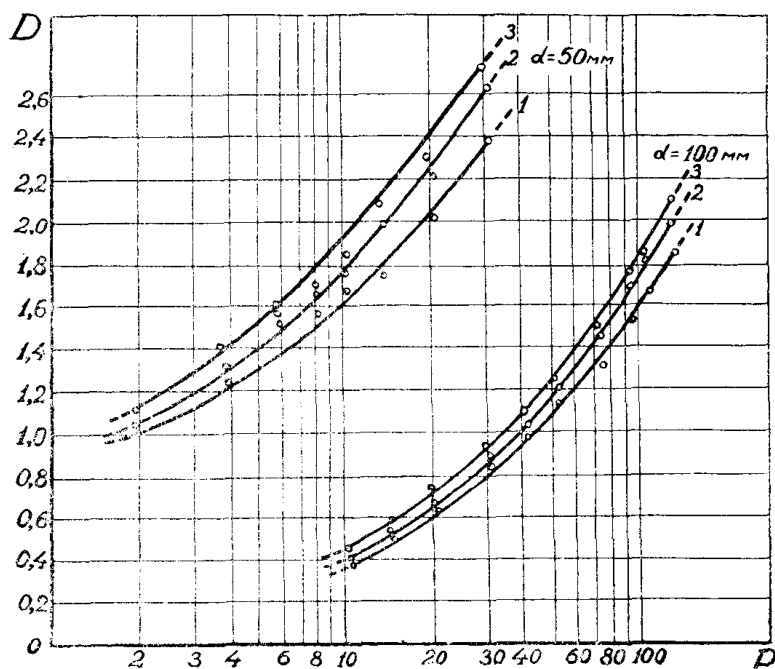


Рис. 9

грузки светящегося слоя. Это можно объяснить поглощением и рассеиванием излучения флуоресценции на пути от места его возникновения до фотоэмульсии.

Кроме того, из рассмотрения кривых также следует, что с ростом поглотителя различие в коэффициенте усиления для экранов с различной

нагрузкой уменьшается. Из этого можно сделать вывод, что при большей толщине стального поглотителя (т. е. как раз в области применения флуоресцирующих экранов) экраны с нагрузкой 120, 160 $\text{мг}/\text{см}^2$ и выше дают примерно одинаковое усиление.

В дальнейшем во всех наших экспериментальных исследованиях применялись экраны с активным слоем из вольфрамата кальция с нагрузкой 120 $\text{мг}/\text{см}^2$ (передний и задний экраны).

При съемке с флуоресцирующими экранами наряду с уменьшением экспозиции также в значительной степени снижается четкость изображения дефектов. Как показали эксперименты, для крупных дефектов такое снижение четкости сказывается весьма незначительно. Однако выявляемость мелких дефектов (трещины, непровары) резко падает по сравнению со снимками, полученными с применением свинцовых усиливающих экранов.

Этот недостаток флуоресцирующих экранов объясняется рассеянием света флуоресценции зернами активного слоя, рассеянием электронов, освобождаемых рентгеновскими лучами на их пути к пленке в объеме флуоресцирующего экрана и просвечиваемого тела, а также неплотностью прилегания флуоресцирующего экрана к пленке.

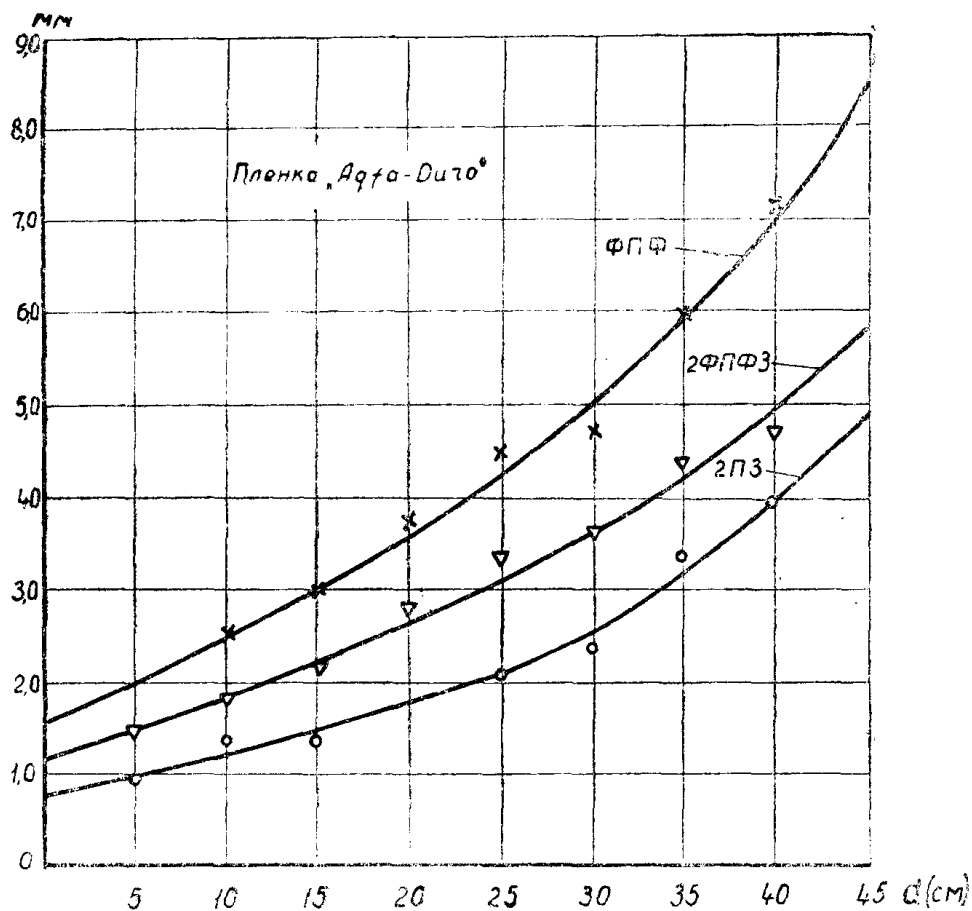


Рис. 10

Все это заставило нас искать возможность увеличения четкости изображения дефектов при съемке с флуоресцирующими экранами. В результате исследования было найдено, что применение составных усиливающих экранов (свинцовых и флуоресцирующих вместе) позволяет

значительно увеличить четкость изображения дефектов, чем в случае с одними флуоресцирующими экранами.

На рис. 10 показана зависимость выявления дефектов от толщины просвечиваемых стальных пластин для трех случаев: свинцовый экран 2 мм—пленка—задний свинцовый экран 3 мм (2ПЗ); флуоресцирующий экран с нагрузкой 120 мг/см²—пленка—задний флуоресцирующий экран с нагрузкой 120 мг/см² (ФПФ), свинец 2 мм—флуоресцирующий экран 120 мг/см²—пленка—флуоресцирующий экран 120 мг/см²—свинец 3 мм (2ФПФЗ). Как следует из графика, распознаваемость дефектов в случае составного экрана (2ФПФЗ) намного выше, чем в случае экранов (ФПФ). Все опыты проводились с пленкой „Agfa Dugo“, которая каждый раз помещалась на расстоянии 1500 мм от мишени.

Для сравнения усиливающего действия различных комбинаций усиливающих экранов было засвечено несколько пленок „Agfa Dugo“ и „Рентген XX“ за стальным поглотителем толщиной 200 мм при фокусном расстоянии 1500 мм. В результате фотометрирования было получено, что применение свинцовых усиливающих экранов (2ПЗ) уменьшает экспозицию по сравнению с экспозицией пленки без экранов в 2—2,5 раза, применение флуоресцирующих экранов (2ФПФЗ) уменьшает экспозицию в 7—11 раз и, наконец, применение составных экранов (ФПФ) уменьшает экспозицию в 10—15 раз.

Выводы

1. Лучшими как по выявляемости дефектов, так и по максимальной чувствительности среди свинцовых экранов являются экраны толщиной 2 мм (передний экран) и 3 мм (задний экран).

2. Флуоресцирующие экраны с активным слоем из вольфрамата кальция с нагрузкой 120, 160 мг/см² почти не отличаются по своему действию при толщине просвечиваемого стального поглотителя от 200 мм и выше.

3. Хотя флуоресцирующие экраны значительно сокращают экспозицию при просвечивании стали (10—15 раз), однако выявляемость дефектов при их применении значительно ниже, чем в случае свинцовых усиливающих экранов.

4. Применение составных усиливающих экранов (2ФПФЗ) позволяет увеличить четкость изображения дефектов при увеличении экспозиции по сравнению с экранами ФПФ (в 1,5 раза).

ЛИТЕРАТУРА

1. Румянцев С. В., Григорович Ю. А. Контроль качества металлов γ -лучами. Металлургиздат, 1954.
2. Таточенко Л. К., Медведев С. В. Промышленная γ -дефектоскопия. Металлургиздат, 1955.
3. Трапезников А. К. Рентгенодефектоскопия. Машгиз, 1948.
4. Сент-Джон Э. Айзенбургер Г. Промышленное просвечивание. Машгиз, 1947.
5. Мальцев М. В. Рентгенография металлов. Металлургиздат, 1952.
6. Уманский Я. С. Рентгенография. Машгиз, 1951.
7. Schittenhelm R. ATM. Januar 1956, s. 1—8.
8. Möller H. Archiv für das Eisenhüttenwesen mai—Juni, 1954.
9. Шпольский Э. В. Атомная физика, т. I, II. Госиздат. техн.-теорет. литературы, 1950.
10. Риль Н. Люминисценция. Издательство иностр. литературы, 1932.