



NDT World, 2020, v. 23, no. 4, pp. 42–45
DOI: 10.12737/1609-3178-2021-42-45

Соляризация в радиографии. Размышления практика

В статье рассматривается явление соляризации на рентгеновских изображениях, которое может привести к пропуску даже очень радиационно-контрастных дефектов. Соляризация для плёнки F8 AGFA NDT начинает сильно проявлять себя сразу за оптической плотностью 3,0. Для экранной плёнки есть смысл рекомендовать работать с плотностями до 2,5 и в любом случае не допускать плотности выше 3,0. Рекомендуется применение только проволоочных эталонов, что позволит чутко замечать отклонения от нужных параметров радиографического контроля.

Submitted 28.10.20
Accepted 15.12.20

A. V. Makarov¹

Solarization in Radiography: Reflections Practice

The article discusses the phenomenon of solarization in X-ray images, which can lead to the passage of even very radiation-contrast defects. Solarization for film F8 AGFA NDT begins to strongly manifest itself immediately after optical density 3.0. For screen film, it makes sense to recommend working with densities up to 2.5 and in any case not to allow densities above 3.0. It is recommended to use only wire standards, which will make it possible to sensitively notice deviations from the required radiographic inspection parameters.

Keywords: X-ray inspection, X-ray films, exposure, solarization

В былые восьмидесятые, когда я работал в Центральной лаборатории неразрушающих методов контроля ПО «Ижорский завод», забрёл как-то в Исследовательскую группу — была такая. Там с изумлением увидел, как женщины старательно бритвенным лезвием счищают, предварительно размочив, одну сторону полностью засвеченной и фотообработанной рентгеновской плёнки. На мой любопытный вопрос: «Что вы делаете?» — мне ответили, что изучают «насыщение».

Оказалось, что их начальник захотел выяснить, когда наступает «насыщение», другими словами захотел узнать, когда дальнейшая экспозиция уже не несёт дополнительной полезной информации, исчерпав ресурсы плёнки. Он условно представил эмульсионный слой плёнки как коробку с засыпанными туда белыми бильярдными шарами, которыми моделируются незасвеченные кристаллы AgBr. Засвеченные кристаллы AgBr — те, у которых появились центры проявления — при проявке почернеют целиком, поэтому их воспринимают как чёрные шары в коробке. Идея была такова: излучение, несущее информацию о фоне и полезную информацию о дефектах, вначале «имеет дело» с коробкой белых шаров, которые, соответственно превращаясь в чёрные, поначалу полностью без потерь «транс-

лируют» эту информацию. По мере увеличения числа чёрных шаров излучение всё чаще «натыкается» на уже чёрные шары, не принося пользы (не увеличивая оптическую плотность). В какой-то момент должно наступить «насыщение»: с увеличением длительности экспозиции почернение проявленной плёнки не нарастает. Что же оказалось на деле?

Исследовательская группа располагала очень хорошим импортным денситометром с пределом измеряемой оптической плотности $D \approx 5,5$. Полностью засвеченную плёнку он «пробить» не мог, отсюда попытка соскоблить эмульсионный слой с одной стороны. Но и одна сторона «захлёбывала» денситометр. Отсюда я сделал тогда вывод: радиографическая плёнка легко набирает плотность, как минимум, до $D \approx 10 \div 11$. Большинство радиографических снимков имеют плотность до 3. Мы на практике используем максимум нижнюю четверть потенциальных возможностей плёнки по плотности.

При таком потенциальном запасе искать «насыщение», конечно, не имеет никакого смысла. Плёнка, имеющая плотность выше обычного практического потолка $3 \div 3,5$, ещё долго с ростом экспозиции не только набирает плотность, но и увеличивает свой контраст и, соответственно, увеличивает контраст изображения дефектов, повышается и чув-

МАКАРОВ
Алексей Владимирович

Генеральный директор
ООО «ЛЕНТЕСТ»,
Санкт-Петербург.
Специалист III уровня
по радиационному
контролю



ствительность контроля. С ростом плотности выявляемость дефектов должна только улучшаться. Большинство нормативных методических документов из этих соображений сегодня не ограничивает верхний предел плотности. Тем более что современные светодиодные негатоскопы позволяют уже просматривать плёнки с плотностью более 4,0. Хотя относительно новый ГОСТ 50.05.07 [1] оставил требования предшественника ПНАЭГ-7-017-89 [2] по плотности для швов без перепада толщин $1,5 \div 3,5$ неизменными.

Однажды при сдаче снимков изделий для АЭС иностранному инспектору мне не удалось доказать, что замеренная им в околосшовной зоне плотность 3,6 по всем последствиям лучше максимально разрешённой 3,5. Снимки пришлось переделать. Не разумней было бы написать в [1] «рекомендуемая максимальная плотность 3,5»?

Но не всегда изложенные рассуждения работают. Существует и, к сожалению, слишком активно в нашей стране используется так называемая «экранная плёнка», предназначенная для использования с флуоресцентными усиливающими экранами. Считаю слово «экранная» весьма неудачным, так как остальная радиографическая плёнка в подавляющем большинстве случаев используется также с экранами, только

¹ Lentest LLC SPb, St. Petersburg, Russia; lentest@mail.ru

со свинцовыми. Приходится делить плёнки на «экранные» и «безэкранные».

Экранная плёнка сенсibilизирована к сине-зелёной части видимого спектра и подразумевает использование флуоресцентных экранов. Кристаллы бромистого серебра для видимого света дают за собой тень. Поэтому нет никакого смысла делать толстый эмульсионный слой с большим наносом серебра. Экранные плёнки имеют более тонкие эмульсионные слои по сравнению с безэкранными, поэтому быстрее проявляются и фиксируются. Так, нанос серебра для плёнок D4 AGFA NDT и F8 AGFA NDT в $\approx 1,5$ и ≈ 2 раза ниже, чем для плёнки D7 AGFA NDT.

Микрокристалл галогенида серебра начинает избирательно проявляться, когда на его поверхности появляется центр проявления из 4–5 нейтральных атомов серебра [3]. Другими словами, для избирательного проявления каждый микрокристалл должен примерно 4–5 раз «поймать» фотоэлектрон или квант видимого света или «затормозить» рентгеновское излучение. На графике характеристической кривой (рис. 1, [4]) хорошо виден горизонтальный участок, когда увеличение экспозиции ещё не приводит к увеличению плотности, будущие центры проявления еще не набрали необходимое количество нейтральных атомов серебра.

Находились «предприимчивые» дефектоскописты, которые в тепличных лабораторных условиях давали маленькую равномерную засветку кассет с плёнкой в пределах горизонтального участка графика, чтобы в суровых полевых условиях давать меньшую по вре-

мени экспозицию. Процесс засветки плёнки до или после рабочей экспозиции производится такими малыми дозами, которые сами по себе не приводят к заметному росту вуали. Но в результате такой засветки происходит доращивание центров скрытого изображения — латенсификация.

Латенсификация (лат. *Latens* — скрытый и *Facio* — делаю) — усиление существующего скрытого изображения в фотографическом материале, применяемое для повышения фотографической чувствительности.

Надо отметить, что в количественном плане латенсификация стабильностью не отличается и не может быть рекомендована для практического использования.

Казалось бы, если микрокристалл галогенида серебра с уже имеющимся центром проявления получит дополнительную экспозицию, он только надёжней проявится при фотообработке. Но при избыточной экспозиции появляется такое интересное явление как соляризация.

Соляризация (лат. *Solaris* — солнечный) — явление желатиносеребряного фото процесса, при котором слишком большая экспозиция приводит не к увеличению, а к снижению получаемой в результате проявления оптической плотности. В итоге переэкспонированные участки оказываются на негативе менее плотными, чем окружающие, получившие нормальную экспозицию.

При соляризации (избыточная экспозиция) происходит окисление центров проявления, которые появились в результате нормальной экспозиции и несут полезную информацию, в результа-

те микрокристалл галогенида серебра может потерять способность к избирательному проявлению. Другими словами, при увеличении экспозиции вместо увеличения плотности мы можем получить её уменьшение, что видно из левой кривой рис. 2 [5].

Можем ли мы столкнуться с соляризацией в практической радиографии?

При использовании безэкранных плёнок о соляризации можно забыть, она недостижима на практике даже по причине невозможности просмотра на негатоскопе. С ионизирующим излучением могут взаимодействовать все слои галогенида серебра, фотоэлектроны из свинцовой фольги тоже способны преодолеть какое-то расстояние в эмульсионном слое, большой нанос серебра даёт, как уже отмечалось, большой запас по плотности.

Иное дело с экранными плёнками: нанос серебра меньше, видимый свет от экрана затеняется первыми на пути света микрокристаллами. Верхние слои эмульсионного слоя, таким образом, могут первыми достигнуть при экспонировании уровня соляризации с последующей, после фотообработки, потерей плотности. Более крупные микрокристаллы AgBr — это более лёгкая «мишень», и они тоже быстрее могут достичь соляризации. Можно ожидать борьбу процессов «осветления» и «потемнения», которая будет занимать какой-то интервал значений экспозиции, пока «осветление» не победит. Плавность падения плотности хорошо видна на рис. 2. Надо отметить, что склонность сенсibilизированной экранной плёнки к соляризации

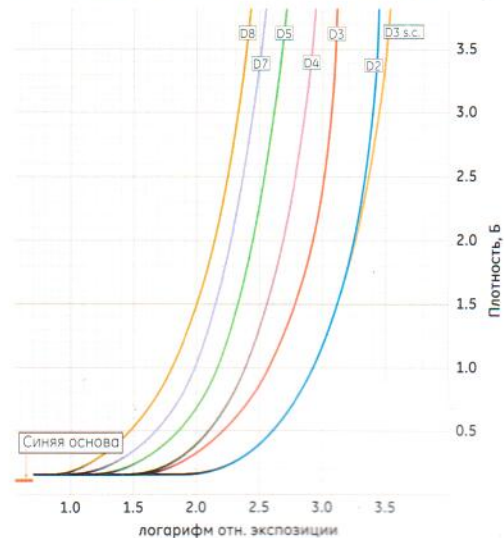


Рис. 1. Сенсометрические кривые для плёнок STRUCTURIX D2, D3 S.C, D3, D4, D5, D7, D8 при 200 кВ с экранами Pb при 28 °С

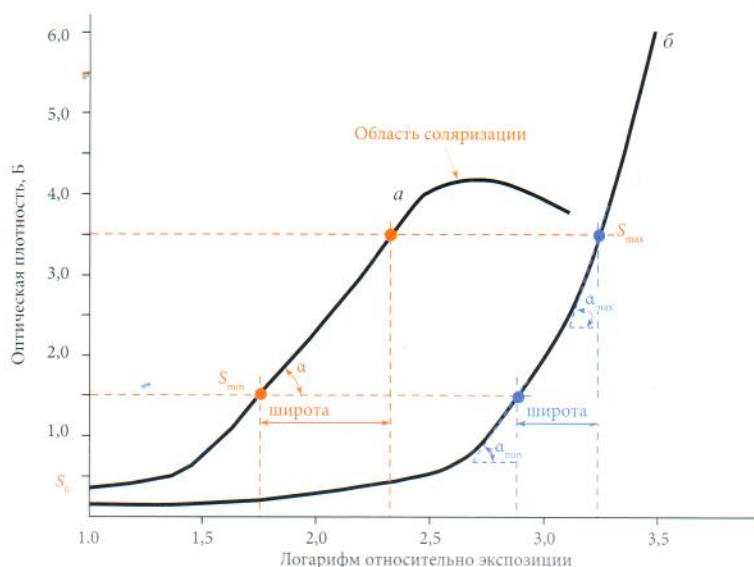


Рис. 2. Характеристические кривые экранной (а) и безэкранный (б) радиографических плёнок



Рис. 3. Схема продольного шва обечайки

проявляется не только с флуоресцентными экранами. Просто использование такой плёнки без флуоресцентных экранов практического смысла не имеет.

Приведу пример из практики.

Светили мы как-то Заказчику кольцевой шов сварки обечаек. Обечайки ему поставлялись с продольным швом, который подвергался рентгеновскому контролю у изготовителя. И вдруг на продольном шве обнаруживаем непровар 20 мм, чёрный-пречёрный, шириной более 1 мм. Такой дефект на негатоскопе виден с нескольких метров. Как такое можно пропустить?

Продольный шов выглядел забавно: при толщине обечайки 4 мм выгнутость шва была 5–5,5 мм (рис. 3).

Её не зачистили после сварки, такой шов подали на контроль и таким же поставили Заказчику. Согласно требованиям чертежа, зачистка должна быть выполнена заподлицо, считая от разделки под кольцевой шов, на длине 20 мм. Это было сделано после сварки до рентгеновского контроля у изготовителя. На претензию после обнаружения непровара приехали представители лаборатории, выполнившей контроль, со снимками продольного шва. Плёнка оказалась экранная F8 AGFA NDT. Получить на одной плёнке и шов и околошовную зону при таком перепаде толщин затруднительно. Тем не менее, снимок был сделан на одной плёнке. Шов был довольно тёмным с оптической плотностью около ЗБ. С трудом просматривалась и околошовная зона, что было странно.

Поставлен был канавочный эталон чувствительности, или, как сейчас правильнее говорить, индикатор качества изображения (ИКИ), на котором, как я обычно говорю, трудно не получить требуемую чувствительность контроля. Канавочные ИКИ с их отвесными стенками не имитируют, в отличие от проволочных ИКИ, округлую форму распространённых дефектов типа

поры и шлака и всегда завышают чувствительность (показывают более мелкую канавку) по сравнению с проволочными ИКИ. Чтобы канавочный ИКИ оказался не в темноте на готовом снимке, под ИКИ положили пластинку, чтобы суммарная просвечиваемая толщина в зоне ИКИ была близка к толщине сварного шва, что, в общем, правильно, но не для случая запредельной выпуклости. В результате требуемая даже для радиационной толщины 4+2=6 мм чувствительность 0,20 была не очень уверенно, но видна. Никакого непровара не было видно, как ни всматривайся.

Здесь приехавшая лаборатория, которая контролировала продольный шов, пошла в атаку: чувствительность есть, значит, снимок сделан, как положено по ГОСТ 7512–82. Непровара нет — какие могут быть рекламации? Пришлось задать встречный вопрос: идёт шов с очень большой выпуклостью — 5 мм, далее зачистка участка 20 мм заподлицо, должен ли шов в месте зачистки быть темнее остального шва на снимке. Ответ «да». Смотрим снимок и видим, что место зачистки не отличается по плотности от шва. Получилось, что ребята, завидев большую выпуклость шва, добавили экспозицию и переборщили. Шов получился темноватым. То, что при этом с трудом можно просмотреть и околовшовку их не насторожило.

Получилось, что для области основного металла снимок оказался в области соляризации, околошовная зона и место зачистки начали осветляться (осветление подразумевается с учётом последующей фотообработки) быстрее шва и ИКИ из-за большей экспозиции.

Чувствительность на канавочном ИКИ сохранилась благодаря пластине и собственной толщине 2 мм — это уменьшило экспозицию в месте ИКИ и, соответственно, соляризацию. Нельзя также забывать о феноменальной способности канавочных ИКИ показывать требуемую чувствительность «до последнего». Проволочный ИКИ мгновенно бы среагировал на потерю чувствительности.

В месте непровара экспозиция была ещё больше, ещё больше соляризация, осветление дефекта пошло быстрее его фона, что привело к выравниванию плотностей. Такая катастрофически полная потеря выявляемости столь явного и контрастного на безэкранной плёнке дефекта меня тогда поразила.

Давайте посмотрим на характеристическую кривую, которую нам предоставляют производители плёнки F8 AGFA NDT [4]. Согласно данным производителя, до плотностей 3,5–4,0 экранная плёнка демонстрирует не только уверенный рост плотности, но и непрерывный рост контраста. Вспоминая историю про пропущенный непровар, начинаешь сомневаться в правдивости характеристической кривой на больших плотностях.

Для того чтобы понять когда соляризация может начать влиять на качество контроля, может ли дефект с большим «лучевым» размером осветлиться до фона или стать светлее фона был проделан простой эксперимент. В образце (стальная пластина толщиной 12 мм) были сделаны засверловки на глубины $h=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ и 9 мм. Со стороны источника положили проволочный ИКИ № 12 и при напряжении 140 кВ на плёнке F8 с экранами RCF при

Табл. 1. Зависимость плотности и чувствительности от экспозиции

№ п/п	Экспозиция Э, с	Плотность фона	Чувствительность на ИКИ № 12, мм	lgЭ
1	20	1,42	0,20	1,30
2	30	1,94	0,16 – слабо	1,48
3	40	2,42	0,16	1,60
4	50	2,73	0,16	1,70
5	60	3,00	0,16	1,78
6	70	3,17	0,20	1,84
7	90	3,43	0,20	1,95
8	120	3,66	0,25	2,08
9	150	3,82	0,25 – слабо	2,18
10	180	3,88	0,25 – очень слабо	2,26
11	210	3,98	0,32	2,32
12	240	4,09	0,32 – очень слабо	2,38
13	300	4,12	0,40	2,48
14	360	4,16	–	2,56
15	675	4,28	–	2,83
16	1350	4,43	–	3,13

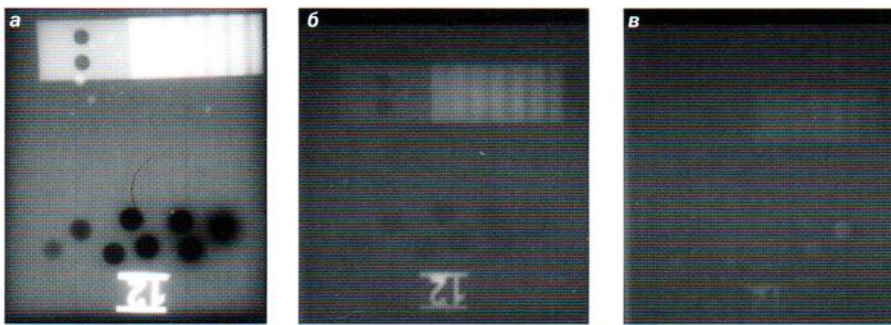


Рис. 4. Рентгеновские снимки образца при разных экспозициях: а — 40 с; б — 300 с; в — 675 с

фокусном расстоянии 450 мм сделали серию экспозиций. Результаты представлены в табл. 1.

Эксперимент не претендует на точность, выполнен не в лабораторных условиях. Принципиально было лишь понять, когда соляризация начинает влиять на чувствительность контроля. На рис. 4а оптимальный снимок при $t = 40$ с, признаков соляризации не видно, в том числе, в отверстии глубиной 9 мм. На рис. 4б экспозиция увеличена до 300 с, снимок переэкспонирован. Отверстие $h = 9$ мм по плотности сравнялось с фоном; дефект с лучевым размером 75% от толщины пластины в 12 мм становится невидимкой! На рис. 4в при $t = 675$ с три самых глубоких отверстия $h = 6, 7$ и 9 мм стали светлее фона.

Нанесём полученные в эксперименте данные (табл. 1) на график стандартной характеристической кривой плёнки F8+RCF (рис. 5). Задачи сравнить кривые по фотографической чувствительности в данном случае нет. Расположение экспериментальной кривой по оси абсцисс носит условный характер. Интерес представляет только форма кривой.

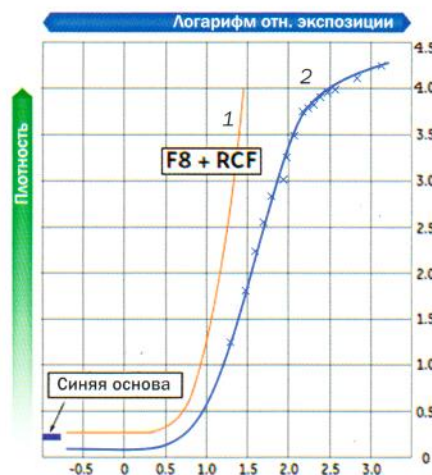


Рис. 5. Характеристическая кривая для плёнки F8 с экранами RCF: 1 — базовая; 2 — полученная в результате эксперимента

Видно, что в интервале плотностей 1,5–3,0 контраст на экспериментальной кривой практически неизменный и отличается от рекламного в меньшую сторону. Далее при $D > 3,5$ контраст начинает падать, особенно сильно после плотности 4,0. Одновременно с началом падения контраста очень быстро начинает падать чувствительность. На плотностях 3,17; 3,66; 3,98 и 4,12 мы теряем по проволочке, потеряв при плотности 4,16 весь проволоочный ИКИ № 12! Заметна большая разница у характеристических кривых в области больших экспозиций.

Выводы

- Соляризация в радиографии есть, но только на экранных плёнках. Соляризация крайне опасна, так как может привести к пропуску даже очень радиационно-контрастных дефектов.
- Про возможность соляризации необходимо помнить при контроле изделий с большим перепадом толщин.
- Соляризация для F8 AGFA NDT начинает сильно проявлять себя сразу за оптической плотностью 3,0. Для экранной плёнки есть смысл рекомендовать работать с плотностями до 2,5 и в любом случае не допускать плотности выше 3,0. Для плёнок других фирм-производителей цифры, возможно, несколько отличаются, но не само явление соляризации.
- Канавочный ИКИ может быть размещён на большей толщине, чем у сварного шва. С учётом этого и собственной толщины он может оказаться в зоне меньших экспозиций, где меньше или ещё отсутствует эффект соляризации. Канавочный ИКИ и так всегда завышает чувствительность минимум на одну канавку по сравнению с проволоочным. «Стоя в стороне», он может «не заметить» соляризацию и показать требуемую чувствительность. Считаю целесообразным запретить использование канавочных

эталонов, хотя бы для экранной плёнки. Считаю целесообразным использовать проволоочные эталоны с длиной проволоочек 50 мм и наблюдать чувствительность по всей ширине контрольной зоны, которая может иметь разную просвечиваемую толщину.

- Соляризация осветляет снимок. Современные негатоскопы могут просмотреть экранную плёнку, получившую в 30 раз большую экспозицию, чем оптимальная. В отдельных случаях, например, при контроле глубоких выборок на предмет удаления дефектов, когда нет возможности поставить ИКИ, доверять просмотру опасно.

В настоящее время идет процесс актуализации ГОСТ 7512–82, в котором я принимаю участие в ПК-5 ТК-371. В этом процессе происходит смена политики от очень высоких требований к чувствительности контроля до возврата к 1982 г. Каков будет итог дискуссии ещё не понятно, но канавочные ИКИ пока остаются. Хотя такой удобный момент «попрощаться» с канавочным ИКИ, и я постарался здесь привести дополнительную причину это сделать. Только применение проволоочных эталонов позволит чутко замечать отклонения от нужных параметров радиографического контроля. В проект нового ГОСТ по радиографии внесено ограничение на максимальную плотность для экранных плёнок во избежание потери чувствительности контроля.

Литература

1. ГОСТ Р 50.05.07–2018. Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Радиографический контроль. — М.: Стандартинформ, 2018. — 31 с.
2. ПНАЭ Г-7-017-89. Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Радиографический контроль. — М.: Госатомнадзор России, 1990. — 43 с.
3. Шаблов С.В., Белобородов Н.В., Иваненко Л.А. Природа происхождения артефактов на радиографических снимках с галогенидосеребряными эмульсиями. — В мире НК. 2020. Т. 23. № 2. С. 52–67.
4. X-Ray Radiographic Film Systems GE Sensing & Inspection Technologies. — https://pdf.directindustry.com/pdf/inspection-technologies/x-ray-radiographic-film-systems/9257-138832_12.html.
5. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Степанов А.В. Радиационные методы неразрушающего контроля/Курс лекций. — СПб.: СВЕН, 2019. — 288 с.

Статья получена 28 октября 2020 г.,
в окончательной редакции — 15 декабря.