

РАЗРАБОТКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ РАДИОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 0,2 ДО 6,3 Б

© 2019 г. А.В. Колдашов¹, С.Н. Марченко^{1,*}, В.И. Капустин²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), Россия
119361 Москва, ул. Озерная, 46
²ООО «АВКОНТ», Россия 119334 Москва, ул. Косыгина, 9
E-mail: marchenko@vniiofi.ru

Поступила в редакцию 30.08.2018; после доработки 29.10.2018;
принята к публикации 02.11.2018

Представлены результаты разработки метрологического обеспечения измерений оптической плотности радиографического изображения на основе набора мер оптической плотности в диапазоне от 0,2 до 6,3 Б, предназначенного для передачи единицы диффузной оптической плотности денситометрам, используемым для измерения оптической плотности и оценки размеров дефектов на радиографических снимках при контроле объектов атомной энергетики, предприятий нефтегазовой промышленности, железнодорожного транспорта, металлургии, машиностроения и др. Приведены результаты калибровки набора мер оптической плотности на Государственном первичном эталоне единицы оптической плотности ГЭТ 206-2016, разработанном и находящемся в эксплуатации в ВНИИОФИ.

Ключевые слова: оптическая плотность, денситометр, пленочный набор мер оптической плотности, эталонный денситометр, государственный первичный эталон единицы оптической плотности, радиографическое изображение, рентгеновская установка.

DOI:10.1134/S0130308219020064

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для проведения промышленной радиографии сварных соединений и отливок на опасных производственных объектах применяется большое количество средств измерений оптической плотности и эталонов, обеспечивающих единство измерений в области денситометрии.

К средствам измерения оптической плотности снимков при радиографическом контроле относятся денситометры, поверка и калибровка которых проводится с использованием наборов мер оптической плотности (НМОП) [1]. Пленочные наборы мер оптической плотности (ПНМОП) широко используются для радиографического неразрушающего контроля объектов в атомной энергетике, нефтегазовой промышленности, металлургии, машиностроении, медицине, биологии и др.

Для выявления несовершенств в сварных соединениях и отливках сложной конфигурации (типа «непроваров», «трещин», «несплавлений») необходимо использовать снимки с оптической плотностью от 1,5 до 6,5 Б [2]. Основные требования к эталонным пленкам для оценки размеров дефектов (несовершенств), оцифровки и архивации снимков приведены в [1—4].

В [1, 2, 4—7] рассмотрены технические характеристики и параметры ПНМОП на радиографической пленке, в [5] — ПНМОП, изготовленные фирмой Stouffer Industries Incorporated (США) и прошедшие калибровку на эталоне оптической плотности в Национальном институте стандартов и технологий (НИСТ) США. Эти наборы мер имеют диапазон оптической плотности от 0,2 до 4,2 Б, расширенную неопределенность (при коэффициенте охвата $k = 2$), равную 0,004 Б.

В промышленной дефектоскопии для калибровки денситометров применяются ПНМОП на радиографической пленке, изготовленные в Федеральном институте исследования и испытания материалов (ВАМ) (Германия) [6]. Они имеют диапазон оптической плотности от 0,2 до 4,8 Б, неопределенность результатов — от 0,01 до 0,05 Б.

Для калибровки денситометров широко используются имеющие 21 поле ПНМОП на радиографической пленке AGFA (Бельгия) [7]. В [8] описан набор мер на радиографической пленке ВАМ-Х001 (Германия), содержащий 15 полей в диапазоне оптической плотности от 0,25 до 5,00 Б, изготовленный из пленки типа AGFA Structurix D4.

В отечественной нормативной документации [1] сформулированы требования к пленочным наборам мер оптической плотности, в [4] — для оценки гранулярности радиографических пленок, влияющей на обнаружение дефектов малых размеров в направлении просвечивания рентгеновским излучением.

В [3] описан ПНМОП на радиографической пленке, имеющий диапазон оптической плотности от 0,0 до 5,4 Б, при этом погрешность измерений по полю составляет $\pm 0,02$ Б в диапазоне от 0 до

2,0 Б и $\pm 0,05$ Б в диапазоне от 4,0 до 5,4 Б. Набор мер оптической плотности предназначен для визуальной оценки качества радиографических снимков и калибровки денситометров.

В процессе изготовления ПНМОП формирование изображения, как правило, проводится экспонированием пленки световым излучением. Как показано в [2, 4, 9], наборы мер, изготовленные на радиографической пленке с использованием светового и рентгеновского излучения, различаются коэффициентом Каллье, который определяется как отношение регулярной оптической плотности к диффузной. Поэтому ПНМОП, изготовленные на радиографической пленке с использованием светового излучения, не могут применяться для хранения и воспроизведения единицы диффузной оптической плотности радиографических изображений.

В [1, 3, 6—8] недостаточно полно описаны параметры ПНМОП, не приведены способы экспонирования пленок (рентгеновским излучением или световыми квантами), режимы химико-фотографической обработки снимков, тип эталонных денситометров, не рассмотрена прослеживаемость измерений оптической плотности радиографических снимков. Отсутствие указанных выше сведений в [1—4] не позволяет оценить достоверность измерений оптической плотности и прослеживаемость к первичным эталонам. В ПНМОП, описанных в [3, 6—8], погрешность измерения оптической плотности в пределах одной меры в диапазоне оптических плотностей свыше 4,0 Б равна 0,05 Б и более.

В [4] экспериментально показано, что по структурометрическим параметрам изображений меры оптической плотности, полученные посредством облучения рентгеновским излучением, соответствуют рентгеновским снимкам, получаемым при радиографическом контроле. В то же время меры оптической плотности, полученные посредством облучения излучением в световом диапазоне, по структурометрическим параметрам отличаются от рентгеновских снимков, используемых в практике неразрушающего контроля.

Поэтому для обеспечения соответствия структурометрических параметров ПНМОП и рентгеновских снимков наборы мер оптической плотности для поверки и калибровки денситометров следует изготавливать из радиографической мелкозернистой пленки классов 1 и 2 [1] и С1 и С2 [10] или их аналогов, а экспонирование пленок должно проводиться рентгеновским излучением.

В данной статье приведены результаты разработки, изготовления и исследования ПНМОП в диапазоне оптической плотности от 0,2 до 6,3 Б.

МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕР ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТИПА ПНМОП

Изготовление мер оптической плотности проводилось экспонированием рентгеновским излучением пленки AGFA Structurix D4 на рентгеновской установке (рис. 1). Ее особенность заключалась в том, что в качестве источника излучения применялся рентгеновский аппарат с размером фокусного пятна 0,6 мм и напряжением на трубке 80 кВ. На выходе рентгеновского излучения и перед кассетой с пленкой были установлены медные фильтры 9 и 10 толщиной 1,0 и 0,5 мм. Изображения выравнивали по полю с помощью модулятора фильтрации излучения временного фильтра. Модуляцию фильтрации излучения проводили с учетом класса радиографической пленки (гранулярности и чувствительности пленочной системы), ее сенситометрических параметров, для этого использовали специально разработанный контроллер. Параметры скорости модулятора фильтрации выбирали с учетом получения минимальной величины гранулярности изображения поля сенситограммы. Для защиты от рентгеновского излучения персонала группы А установка была изготовлена в боксе с биологической защитой.

Набор мер оптической плотности изготавливали методом временного клина (с использованием последовательности экспозиций, длительность которых изменяется по определенному закону) при напряжении на рентгеновской трубке аппарата от 80 кВ. Радиографическую пленку экспонировали при рассто-

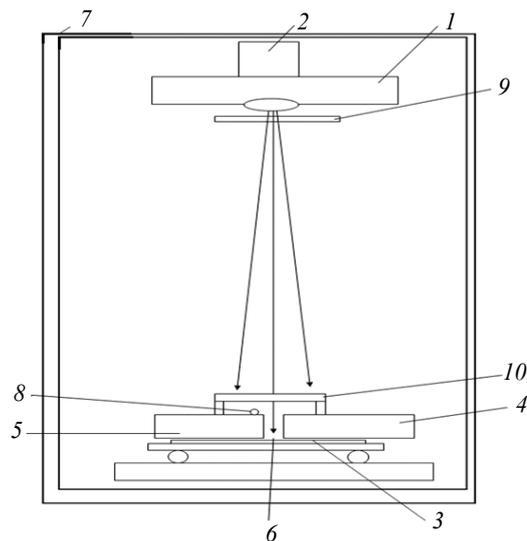


Рис. 1. Схема рентгеновской установки для получения набора мер оптической плотности типа ПНМОП:

1 — рентгеновский аппарат $U = 80$ кВ; 2 — механизм крепления аппарата на корпус биологической защиты; 3 — механизм перемещения кассеты с пленкой; 4, 5 — защитные свинцовые блоки; 6 — поле контроля; 7 — бокс биологической защиты; 8 — дозиметр; 9 — медный фильтр; 10 — медный фильтр.

янии от трубки до пленки 1000 мм, время экспонирования на первом поле сенситограммы составляло 5,0 с. Затем открывали второе поле сенситограммы, при этом время экспонирования увеличивали на 5,0 с. Время экспонирования каждого следующего поля также увеличивали на 5,0 с.

Последнее поле не экспонировали. Химико-фотографическую обработку снимков проводили согласно рекомендациям завода-изготовителя.

Набор мер оптической плотности типа НМОП на радиографической пленке «Структурикс» Д4 фирмы AGFA может быть выполнен в двух модификациях. Он включает в себя 23 меры (поля) в форме прямоугольников со значениями оптической плотности в диапазоне от 0,2 до 4,2 Б и от 0,2 до 6,3 Б, габаритные размеры: длина — от 21,0 до 28,0 см, ширина — 35 мм.

Метрологические характеристики набора мер оптической плотности типа НМОП. Измерение диффузной оптической плотности полей наборов мер типа НМОП проводили в ВНИИОФИ на Государственном первичном эталоне единицы оптической плотности ГЭТ 206-2016 в диапазоне от 0,2 до 6,3 Б.

Результаты измерения диффузной оптической плотности в проходящем свете для набора мер типа НМОП приведены в табл. 1. Расширенная неопределенность при коэффициенте охвата $k = 2$ составляла 0,004 Б.

Таблица 1

Значения диффузной оптической плотности в проходящем свете полей набора мер НМОП

Номер поля	Диффузная оптическая плотность в проходящем свете, Б	
	набор мер оптической плотности НМОП	
Основа	0,18	
1	0,50	
2	0,84	
3	1,19	
4	1,56	
5	1,93	
6	2,27	
7	2,62	
8	2,98	
9	3,32	
10	3,66	
11	3,99	
12	4,25	
13	4,55	
14	4,82	
15	5,08	
16	5,35	
17	5,59	
18	5,81	
19	6,24	
20	6,34	
21	Более 6,34	
22	Более 6,34	
23	Более 6,34	

В табл. 2 представлены результаты оценки расширенной неопределенности воспроизведения единицы диффузной оптической плотности в проходящем свете ГЭТ 206-2016 для различных диапазонов.

Общий вид набора мер типа НМОП представлен на рис. 2. Комплект содержит паспорт, сертификат о калибровке, набор мер оптической плотности НМОП, упакованный в пластиковый пакет, защищающий его от воздействия внешней среды в закрытом помещении и имеющий габариты 297×80 мм.

Результаты исследований Государственного первичного эталона единицы оптической плотности ГЭТ 206-2016.
Диффузная оптическая плотность в проходящем свете

Диапазон значений, Б	Расширенная неопределенность, Б (уровень доверия $p = 0,99$; коэффициент охвата $k = 3$)
0,01—2,00	0,003
2,01—4,00	0,003
4,01—6,00	0,004
6,01—6,30	0,007

Разработанный набор мер оптической плотности НМОП в диапазоне оптических плотностей от 0,2 до 4,2 Б и от 0,2 до 6,3 Б может найти широкое применение в качестве рабочего эталона при поверке и калибровке денситометров.



Рис. 2. Набор мер оптической плотности типа НМОП.

В настоящее время в ВНИИОФИ проводятся испытания набора мер диффузной оптической плотности НМОП в целях утверждения типа.

ВЫВОДЫ

Представлены результаты разработки метрологического обеспечения измерения оптической плотности радиографического изображения.

Проведенные исследования подтвердили возможность создания набора мер оптической плотности НМОП, предназначенного для поверки и калибровки средств измерения диффузной оптической плотности радиографических снимков в проходящем свете в диапазоне от 0,2 до 6,3 Б.

Разработана методика изготовления наборов мер типа НМОП.

Измерения диффузной оптической плотности в проходящем свете для полей набора мер типа НМОП проведены на Государственном первичном эталоне единицы оптической плотности ГЭТ 206-2016.

Представлены результаты исследований Государственного первичного эталона единицы оптической плотности ГЭТ 206-2016 при измерении диффузной оптической плотности радиографических снимков в проходящем свете в диапазоне от 0,01 до 6,30 Б.

Практическая ценность применения набора мер оптической плотности типа НМОП со значениями оптической плотности полей, измеренными на Государственном первичном эталоне единицы оптической плотности ГЭТ 206-2016 в диапазоне от 0,2 до 4,2 Б и от 0,2 до 6,3 Б с расширенной неопределенностью (уровень доверия $p = 0,95$; коэффициент охвата $k = 2$) 0,004 Б, заключается в расширении диапазона диффузной оптической плотности радиографических снимков в проходящем свете до 6,3 Б, в повышении точности метрологического обеспечения измерения оптической плотности радиографического изображения в приборах цифровой радиографии.

Разработанный набор мер оптической плотности НМОП создает предпосылки для дальнейшей разработки и совершенствования средств измерения диффузной оптической плотности в проходящем свете, а также ГЭТ 206-2016, и расширения диапазона измерения диффузной оптической плотности в область от 6,3 до 7,0 Б и выше, что важно для рентгенографического неразрушающего контроля конструкций, сварных соединений сложного оборудования, трубопроводов и др.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники (скр.vniiofi.ru), созданного на базе ВНИИОФИ и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.595.21.0003 от 28.08.2017 (уникальный идентификатор RFMEFI59517X0003).

Авторы выражают благодарность Поезжаевой Любови Викторовне и Митрохину Василию Андреевичу — специалистам АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-

исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ») — за помощь при отработке экспериментальных параметров технологии изготовления наборов мер оптической плотности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СДОС-01-2008 Методические рекомендации о порядке проведения радиационного контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. М.: НТС «Промышленная безопасность», 2008.
2. Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.Л. Справочник по радиационным методам контроля. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
3. Набор мер оптической плотности. <http://www.expertnk.ru/catalog/radiography/xrayinterpretation/lineopticaldensity.html?ta>.
4. Капустин В.И., Зуев В.М., Иванов В.И., Дуб А.В. Радиографический контроль. Информационные аспекты. М.: ООО Изд-во «НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ», 2010. 366 с.
5. Эталонные образцы диффузной визуальной ступенчатой плотности пропускания на фото- и рентгеновской пленке SRM 1001 и SRM 1008. НИСТ. 1998. Специальные публикации. С. 260—135.
6. https://rrr.bam.de/RRR/Content/EN/Downloads/Reference-Procedures/704en.pdf?__blob=publicationFile&v=1; 2016 Measurement of the Optical Density of X-ray Films BAM.
7. Линейка оптической плотности AGFA Certified DENSTEP, AGFA NDT, Бельгия <http://www.a-nk.ru/product/linejka-opticheskoy-plotnosti-agfa-certified-denstep/>
8. Certified Reference Materials Catalogue. Германия. Федеральный институт исследования и испытания материалов (BAM), 2015.
9. Фрезер Х. Фотографическая регистрация информации. Пер. с англ. М.: Мир, 1978.
10. CEN EN 584-1 Non destructive testing — Industrial radiographic film. Part 1. Classification of film systems for industrial radiography. (Европейский комитет по стандартизации. Неразрушающий контроль. Промышленные радиографические пленки. Ч. 1. Классификация пленочных систем для промышленной радиографии).