

РАЗРАБОТКА ШИРОКОДИАПАЗОННОГО ТРАНСМИССИОННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ

Чинь Ван Бак

Томский политехнический университет, г. Томск

*Научный руководитель: Осипов С.П., к. т.н., доцент кафедры
физических методов и приборов контроля качества*

В настоящее время Важнейшую роль высокоточные методы измерения толщины играют на стадии испытания нового или реконструированного технологического оборудования, в случае совершенствования технологии изготовления стального проката и расширения номенклатуры изделий. В настоящее время для измерения толщины стального проката применяются измерительные, электромеханические, ультразвуковые, оптические и рентгеновские методы. Использование различных методов измерений толщины стального проката существенно ограничивается условиями испытаний, негативно воздействующими на точность измерительных систем. К упомянутым негативным факторам относятся: высокая температура, высокий уровень вибраций, наличие широкополосных акустических шумов, высокий уровень электромагнитных помех, высокая скорость перемещения прокатанного листа. Указанные факторы существенно ограничивают применение контактных реализаций методов неразрушающих испытаний. Можно сделать вывод о предпочтительности рентгеновских трансмиссионных методов применительно к контролю качества стального проката.

В данной статье приведены зависимости приборных интегральных и дифференциальных массовых коэффициентов ослабления рентгеновского излучения для стали Ст45 от толщины и аналитические выражения для их аппроксимации. Выведено уравнение рентгеновского измерителя толщины.

1. Геометрическая схема рентгеновского измерителя толщины

На рисунке 1 приведена геометрическая схема рентгеновского измерителя толщины стального проката.

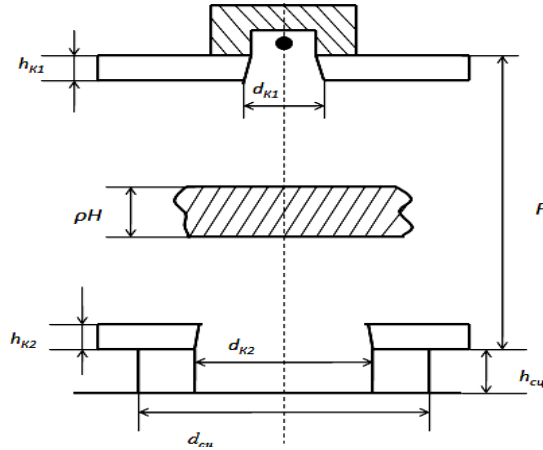


Рис. 1 – Геометрическая схема рентгеновского
измерителя толщины стального проката

К выбираемым параметрам конических коллиматоров источника рентгеновского излучения и радиометрического детектора относятся их толщины h_{K1} , h_{K2} и диаметры выходных окон d_{K1} , d_{K2} . Одним из наиболее распространённых критериев выбора толщин коллиматоров является ограничение на k – кратность ослабления рентгеновского излучения, например, кратность ослабления k не менее 1000.

Для выбора фокусного расстояния – $F=1000$ мм, чувствительный объём радиометрического детектора – сцинтиллятор CsI имеет размеры: диаметр $d_{сц}=25$ мм; толщину $h_{сц}=45$ мм. В результате расчетов получили $h_{K1}=h_{K2}=3,3$ см, $d_{K1}=0,8$ мм, $d_{K2}=23,9$ мм.

2. Расчёт зависимостей приборных интегральных и дифференциальных массовых коэффициентов ослабления рентгеновского излучения от толщины объекта контроля и от максимальной энергии рентгеновского излучения $m_{int}(\rho H, E_{max})$ и $m_{diff}(\rho H, E_{max})$

Параметры, характеризующие процесс ослабления и регистрации рентгеновского излучения, зависят от толщины ослабляющего барьера – ρH , максимальной энергии E_{max} рентгеновского излучения и энергетического спектра – $f(E, E_{max})$, материала сцинтиллятора и его толщины – $h_{сц}$. Приборный интегральный массовый коэффициент ослабления (МКО) рентгеновского излучения вводится следующим образом

$$I(\rho H, E_{max}) = I_0 \frac{\int_{E_{min}}^{E_{max}} E_{ab}(E) f(E, E_{max}) (1 - e^{-\mu_{сц}(E) h_{сц}}) e^{-m(E) \rho H} dE}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} E_{ab}(E) f(E, E_{max}) (1 - e^{-\mu_{сц}(E) h_{сц}}) dE} = I_0 e^{-m_{int}(E) \rho H}, (1)$$

где I_0 – величина поглощенной в детекторе энергии рентгеновского излучения с максимальной энергией в спектре $E_{\max}$ без ОК при той же геометрии; $E_{\text{ab}}(E)$ – среднее значение поглощенной энергии зарегистрированного кванта с энергией E ; $\mu_{\text{cu}}(E)$, $m(E)$ – энергетические зависимости линейного и массового коэффициентов ослабления фотонного излучения материалом сцинтиллятора и ослабляющего материала.

Формула для вычисления приборного интегрального массового коэффициента ослабления рентгеновского излучения $m_{\text{int}}(\rho H, E_{\max})$ выводится из (1)

$$m_{\text{int}}(\rho H, E_{\max}) \approx -\frac{1}{\rho H} \ln \left[\frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E_{\text{ab}}(E) f(E, E_{\max}) (1 - e^{-\mu_{\text{Csl}}(E) h_{\text{Csl}}}) e^{-m(E) \rho H} dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E_{\text{ab}}(E) f(E, E_{\max}) (1 - e^{-\mu_{\text{Csl}}(E) h_{\text{Csl}}}) dE} \right]. \quad (2)$$

Выражение для вычисления приборного дифференциального МКО $m_{\text{diff}}(\rho H, E_{\max})$ имеет вид

$$m_{\text{diff}}(\rho H, E_{\max}) \approx \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} m(E) E_{\text{ab}}(E) f(E, E_{\max}) (1 - e^{-\mu_{\text{Csl}}(E) h_{\text{Csl}}}) e^{-m(E) \rho H} dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E_{\text{ab}}(E) f(E, E_{\max}) (1 - e^{-\mu_{\text{Csl}}(E) h_{\text{Csl}}}) e^{-m(E) \rho H} dE} \quad (3)$$

Следует отметить, что интегральные и дифференциальные линейные коэффициенты ослабления связаны друг с другом. Несложно вывести выражение, связывающее $m_{\text{int}}(\rho H, E_{\max})$ и $m_{\text{diff}}(\rho H, E_{\max})$. Уравнение упомянутой связи имеет вид

$$m_{\text{diff}}(\rho H, E_{\max}) = \mu_{\text{int}}(\rho H, E_{\max}) + \frac{\partial \mu_{\text{int}}(\rho H, E_{\max})}{\partial \rho H} \rho H \quad (4).$$

Была проведена серия расчётов по формулам (2), (3) интегральных $m_{\text{int}}(\rho H, E_{\max})$ и дифференциальных $m_{\text{diff}}(\rho H, E_{\max})$ МКО рентгеновского излучения для стали Ст45 в диапазоне максимальных энергий $E_{\max}$ от 100 до 450 кэВ. Толщины стального проката варьировали от 1 до 20 г/см². Для описания энергетического спектра применяли выражение, близкое к формуле Крамерса, $f(E, E_{\max}) = \frac{E_{\max} - E}{E}$, $E \geq 5$ кэВ. Данные по коэффициентам ослабления гамма-излучения с веществом заимствованы из 127 групповой библиотеки данных [4], по зависимости $E_{\text{ab}}(E)$ – [5]. Расчёты проводились в системе MathCad. Результаты расчётов $m_{\text{int}}(\rho H, E_{\max})$ и $m_{\text{diff}}(\rho H, E_{\max})$ сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Приборные интегральные массовые коэффициенты ослабления рентгеновского излучения – $m_{\text{int}}(\rho H, E_{\text{max}})$

$E_{\text{max}},$ кэВ	$\rho H, \text{г/см}^2$									
	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20
100	0,536	0,518	0,506	0,497	0,49	0,483	0,473	0,465	0,451	0,443
150	0,273	0,258	0,247	0,236	0,227	0,218	0,203	0,19	0,161	0,145
200	0,216	0,208	0,201	0,196	0,191	0,186	0,179	0,172	0,158	0,149
250	0,188	0,182	0,177	0,173	0,17	0,167	0,162	0,157	0,148	0,142
300	0,171	0,166	0,162	0,158	0,156	0,153	0,149	0,146	0,139	0,134
350	0,159	0,154	0,151	0,148	0,145	0,143	0,14	0,137	0,131	0,127
400	0,149	0,145	0,142	0,14	0,137	0,135	0,132	0,129	0,124	0,121
450	0,142	0,138	0,135	0,133	0,131	0,129	0,126	0,124	0,119	0,116

Таблица 2. Приборные дифференциальные массовые коэффициенты ослабления рентгеновского излучения – $m_{\text{diff}}(\rho H, E_{\text{max}})$

$E_{\text{max}},$ кэВ	$\rho H, \text{г/см}^2$									
	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20
100	0,495	0,478	0,466	0,456	0,448	0,442	0,436	0,428	0,411	0,402
150	0,23	0,211	0,194	0,18	0,167	0,156	0,137	0,123	0,1	0,088
200	0,187	0,178	0,171	0,166	0,16	0,156	0,148	0,137	0,129	0,118
250	0,163	0,157	0,153	0,149	0,147	0,144	0,14	0,137	0,13	0,124
300	0,146	0,142	0,139	0,137	0,134	0,133	0,13	0,127	0,123	0,12
350	0,135	0,131	0,129	0,127	0,125	0,124	0,121	0,119	0,116	0,114
400	0,126	0,123	0,121	0,119	0,118	0,116	0,114	0,113	0,11	0,108
450	0,119	0,116	0,114	0,113	0,111	0,11	0,109	0,107	0,105	0,103

Для иллюстрации на рисунке 3 приведены зависимости $m_{\text{int}}(\rho H)$ и $m_{\text{diff}}(\rho H)$ для нескольких уровней энергий E_{max} .

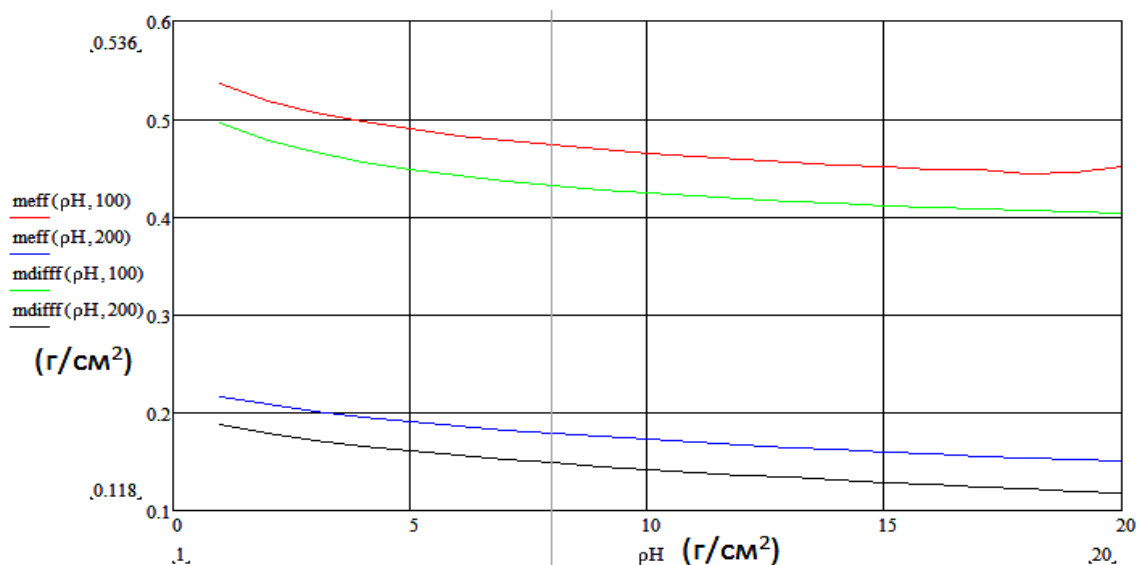


Рис. 3 – Зависимости $m_{\text{int}}(\rho H)$ и $m_{\text{diff}}(\rho H)$

3. Уравнение измерителя толщины

Уравнение измерителя толщины должно связывать оцениваемый параметр объекта контроля – ρH с измеряемой физической величиной – $I(\rho H, E_{\max})$.

$$m_{\text{int}}(\rho H, E_{\max})\rho H = -\ln \frac{I(\rho H, E_{\max})}{I_0}, \quad (5)$$

здесь $I(\rho H, E_{\max})$ – величина поглощенной в детекторе энергии рентгеновского излучения с максимальной энергией в спектре $E_{\max}$ за барьером толщиной ρH при фиксированной геометрии контроля; I_0 – величина поглощенной в детекторе энергии рентгеновского излучения с максимальной энергией в спектре $E_{\max}$ без объекта контроля при той же геометрии. Величины $I(\rho H, E_{\max})$ и I_0 на момент начала этапа оценки толщины являются известными, поэтому (7) может быть переписано в следующем виде

$$m_{\text{int}}(\rho H, E_{\max})\rho H = y(E_{\max}). \quad (6)$$

Уравнение (6) является нелинейным относительно неизвестной ρH .

В качестве аппроксимации $m_{\text{int}}(\rho H)$ при фиксированном значении $E_{\max}$ было решено использовать функцию, зависящую от четырёх параметров. Указанная функция является естественным усовершенствованием и выглядит следующим образом

$$m_{\text{int}}(\rho H, E_{\max}) \approx \frac{1}{a(\rho H)^2 + b\rho H + c} + d. \quad (7)$$

В качестве аппроксимации $m_{\text{int}}(\rho H)$ при фиксированном значении $E_{\max}$ было решено использовать функцию, зависящую от четырёх параметров. Указанная функция является естественным усовершенствованием [17] и выглядит следующим образом

$$m_{\text{int}}(\rho H, E_{\max}) \approx \frac{1}{a(\rho H)^2 + b\rho H + c} + d. \quad (8)$$

Подставим (8) в уравнение (6)

$$\left(\frac{1}{a(\rho H)^2 + b\rho H + c} + d \right) \rho H = y. \quad (9)$$

Уравнение (9) и может быть интерпретировано как уравнение рентгеновского измерителя толщины. Коэффициенты a , b , c , d определяются на стадии калибровки для конкретной максимальной энергии рентгеновского излучения $E_{\max}$ и конкретного материала объекта контроля

Список информационных источников

- 1.Артемов, Б.В., Шубочкин, А.Е. Рентгеновская толщинометрия // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 2. – С. 24–31.
- 2.Артемов, Б.В. Рентгеновские толщиномеры // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 4. – С. 22–25.
- 3.Артемов, Б.В., Маслов, А.И., Потапов, В.Н., Ведерников, М.Б. Использование рентгеновских толщиномеров в производстве проката цветных металлов // Дефектоскопия. – 2003. – № 6. – С. 55–62.
4. <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/groupkon.php> – 127 групповая библиотека данных о взаимодействии гамма- квантов с веществом.
- 5.Будаи, Б.Т., Касаткин, Н.В. Измерение параметров листового горячего проката // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87. – № 1. – С. 225–228.

РАЗРАБОТКА МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА ФЕРРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Тойчбай Эрканат

Томский политехнический университет, г. Томск

*Научный руководитель: Суржиков А.П., д. ф.-м.н., профессор кафедры
физических методов и приборов контроля качества*

В настоящее время различные методы контроля позволяет нам оценить техническое состояние объектов и увеличить работоспособность, а так же срок службы оборудования.

В современных радиотехнических и электронных устройств одним из ключевых элементов являются ферриты.

Ферриты (оксиферы) – химические соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов, обладающие особыми магнитными (ферримагнетики) свойствами, сочетающие высокую намагниченность и полупроводниковые или диэлектрические свойства, благодаря чему они получили широкое применение как магнитные материалы в радиотехнике, радиоэлектронике, вычислительной технике.

Феррошпинели – ферриты с кристаллической структурой минерала шпинели и общей формулой $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, где М - двухвалентный металл, например Ni, Zn, Co, Mn.