

Promieniowanie jonizujące w badaniach nieniszczących – Cz. 1 – Rodzaje promieniowania stosowanego do badań radiograficznych – podstawowe właściwości oraz mechanizm rejestracji obrazu

Małgorzata OSTROMEŃKA¹

Streszczenie

Promieniowanie elektromagnetyczne, będące szczególnym przykładem pola elektromagnetycznego jest obecne we wszechświecie od momentu jego powstania. Przykładem promieniowania mogą być fale radiowe, promienie rentgenowskie lub też światło widzialne. W zależności od częstotliwości emitowanej fali elektromagnetycznej, może ono mieć charakter jonizujący lub niejonizujący. Ze względu na swoją zdolność do przenikania przez materię, promieniowanie jonizujące jest często wykorzystywane w wielu dziedzinach życia. W przemyśle jest stosowane m.in. w celach diagnostycznych, np. w radiografii.

Słowa kluczowe: promieniowanie jonizujące, badania nieniszczące, radiografia przemysłowa

1. Wprowadzenie

Promieniowanie elektromagnetyczne, wszechobecne w naszym życiu jest formą propagacji energii, gdzie fotony o właściwościach korpuskularno-falowych poruszają się z prędkością światła. Kwant energii, czyli energię pojedynczego fotonu określa się następującą zależnością:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda,$$

gdzie:

- E – energia fotonu,
- h – stała Plancka,
- ν – częstotliwość fali w Hz,
- c – prędkość fali elektromagnetycznej (światła),
- λ – długość fali.

Z tej zależności wynika, że energia fotonu jest wprost proporcjonalna do częstotliwości fali oraz odwrotnie proporcjonalna do jej długości. Zatem fale o wyższej częstotliwości (niższej długości) mają większą energię. Ma to istotne znaczenie w przypadku oddziaływania promieniowania z materią i z tego powodu dokonuje się podziału promieniowania elektromagnetycznego na niejonizujące i jonizujące. Widmo promieniowania elektromagnetycznego jonizującego

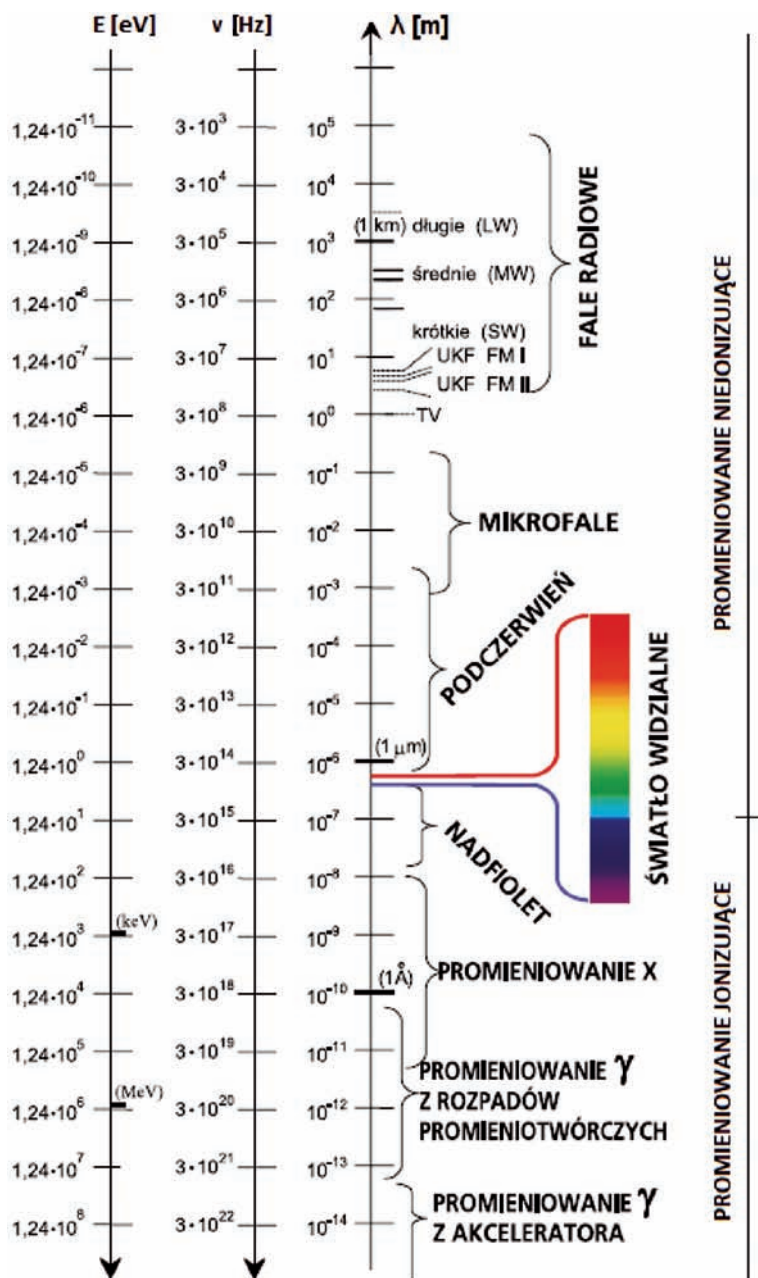
i niejonizującego w zależności od długości, częstotliwości fali i energii fotonu przedstawia rysunek 1.

Promieniowanie jonizujące wystarczającą energię, aby usunąć ściśle związane elektrony z atomu, co prowadzi do powstawania jonów, stąd jego nazwa. Zjawisko to może powodować poważne uszkodzenia w organizmach żywych, mimo to, przy odpowiedniej ochronie można czerpać z niego korzyści w wielu dziedzinach życia. Najbardziej oczywistymi jego zastosowaniami są energetyka jądrowa i medycyna. Jednakże promieniowanie jest wykorzystywane również w przemyśle, w szczególności w diagnostyce. Zastosowanie promieniowania jonizującego w przemyśle przedstawia w szerokim zakresie m.in. opracowanie pod redakcją prof. A. Chmielewskiego i Z. Zimka [2], a w związku ze stałym rozwojem aparatury badawczej ta tematyka jest poruszana w innych publikacjach [3, 6, 11, 12, 13, 14].

Promieniowanie jonizujące może pochodzić z rozpadu promieniotwórczego izotopów naturalnie występujących w przyrodzie lub może być wytwarzane w reaktorach i akceleratorach jądrowych, można je również uzyskać za pomocą lampy rentgenowskiej lub akceleratorów cząstek z pominięciem procesów jądrowych. Promieniowanie można podzielić na:

- promieniowanie korpuskularne, czyli α , β i neutronowe oraz
- elektromagnetyczne, czyli γ i rentgenowskie.

¹ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: mostromecka@ikolej.pl.



Rys. 1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego w zależności od długości, częstotliwości fali i energii fotonu [1]

Promieniowanie γ i rentgenowskie powszechnie jest wykorzystywane w badaniach nieniszczących – radiologicznych (radiograficznych, radioskopowych lub radiometrycznych – w zależności od zastosowanego detektora promieniowania) [3]. Wykorzystanie promieniowania oferuje wiele zalet w diagnostyce przemysłowej gwarantując m.in. dobrą wykrywalność niezgodności wewnętrznych obiektów, stosunkowo łatwą interpretację badań i uzyskanie dokumentu potwierdzającego, który można poddawać wielokrotnej weryfikacji.

2. Właściwości promieniowania stosowanego w radiologii

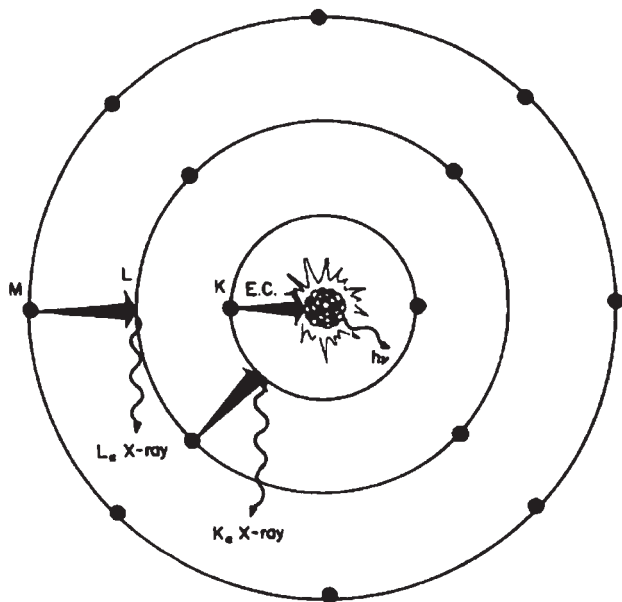
Promieniowanie γ i rentgenowskie stosowane w radiologii ma następujące właściwości:

- przenika przez materię,
- rozchodzi się w przestrzeni prostoliniowo,
- nie odchyła się w polu magnetycznym lub elektrycznym,

- powoduje w materii zjawiska wzbudzenia oraz jonizacji, a w błonie fotograficznej – zjawiska fotochemiczne,
- oddziałuje szkodliwie na organizmy żywe.

Właściwości te umożliwiają wykorzystanie promieniowania na przykład do wykrywania niezgodności w złączach spawanych podczas kontroli radiograficznej, oczywiście po odpowiednim zabezpieczeniu operatora przed szkodliwym wpływem promieniowania.

Zasadniczą różnicą pomiędzy promieniowaniem rentgenowskim i promieniowaniem gamma stosowanym w metodach diagnostycznych nie jest długość fali, lecz źródło jego powstawania (rys. 2). Promienie X są wytwarzane przez szybkie elektrony uderzające w materię stałą, a promienie gamma powstają w obrębie jądra atomowego na skutek procesów jądrowych [4].



Rys. 2. Schemat przedstawiający rozpad promieniotwórczy z wychwytem elektronu i towarzysząca temu emisja kwantu promieniowania gamma ($h\nu$) oraz promieniowania X [5]

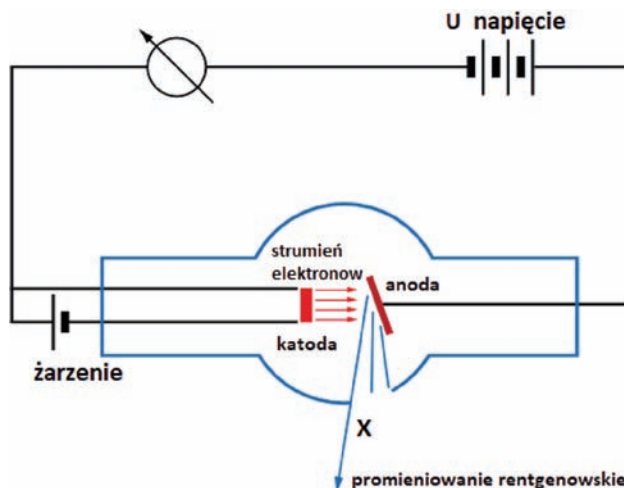
3. Promieniowanie X

Do wytwarzania promieni X stosowane są lampy rentgenowskie (rys. 3) lub w przypadku fotonów wysokoenergetycznych – akceleratory cząstek. Promieniowanie powstające w lampie rentgenowskiej jest wynikiem hamowania na anodzie elektronów emitowanych przez katodę i przyspieszonych w polu elektrycznym. Pole elektryczne wytwarzane jest przez przyłożenie do anody i katody wysokiego napięcia (50–400 kV). Ze wzrostem napięcia wzrasta energia promieniowania X:

$$E_k = \frac{1}{2}m \cdot v^2 = e \cdot U,$$

gdzie:

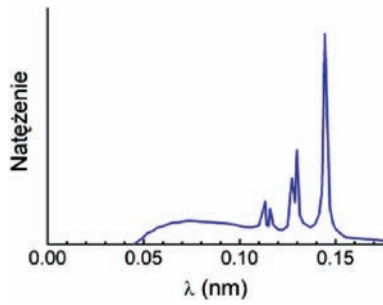
E_k – energia kinetyczna,
 m – masa elektronu,
 v – prędkość elektronów,
 e – ładunek elektronu,
 U – różnica potencjałów.



Rys. 3. Uproszczony schemat działania lampy rentgenowskiej [opracowanie własne]

Promieniowanie rentgenowskie uzyskiwane np. w lampie rentgenowskiej przez wyhamowywanie rozprędzonych elektronów na materiale o liczbie atomowej powyżej 20 ma charakterystykę ciągłą, na której widoczne są również piki pochodzące od promieniowania charakterystycznego anody (rozprędzone elektrony wybijają elektrony z atomów anody). Materiał anody ma wpływ na przebieg tej charakterystyki. Przykładowy rozkład widma dla wolframu przedstawia rysunek 4. Miejsca po wybitych elektronach na dolnych powłokach elektronowych pozostają puste do momentu zapełnienia ich przez elektrony z wyższej powłoki. Elektron przechodzący z wyższego stanu emituje kwant promieniowania rentgenowskiego X. Promieniowanie rentgenowskie może także powstać w wyniku wychwytu elektronu (patrz rys. 2), tzn. gdy jądro przechwytuje elektron znajdujący się na powłoczce K, w wyniku czego powstaje wolne miejsce, na które spadają elektrony z wyższych powłok i następuje emisja kwantu X (np. żelazo ^{55}Fe).

Przenikliwość promieniowania zależy od jego energii, tzn.: im wyższa energia tym większa jego przenikliwość. Ze względu na zdolność promieniowania do przenikania przez materię, wprowadzono kolejny podział na: promieniowanie miękkie o długości fali od 0,1 do 10 nm i twarde do 100 pm. Norma DIN 6809 dotycząca dozymetrii klinicznej [6] odnosi te terminy do wartości napięcia w lampie rentgenowskiej (tabl. 1).



Rys. 4. Widmo rentgenowskie wolframu; natężenie jest wyrażone w postaci amplitudy sygnału (liczby zliczeń na sekundę) [7]

Tablica 1

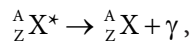
Skala twardości promieniowania w zależności od napięcia przyspieszającego według normy DIN 6809

Określenie	Napięcie przyspieszające [kV]
Bardzo miękkie	Poniżej 20
Miękkie	20–60
Średnio twarde	60–150
Twarde	150–400
Bardzo twarde	400–3000
Ultratwarde	Powyżej 3000

[Opracowanie własne].

4. Promieniowanie gamma

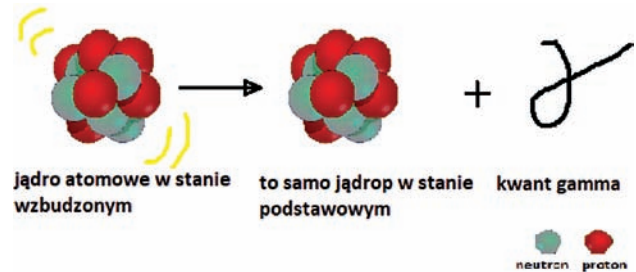
Promieniowanie gamma stosowane w defektoskopii radiograficznej uzyskuje się w wyniku przemian energetycznych jąder atomowych pierwiastków sztucznie pobudzonych do promieniowania, np.: izotopów kobaltu, irydu, iterbu oraz innych. Ogólny zapis przemiany gamma jest następujący:



gdzie:

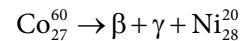
- A – liczba atomowa,
- Z – liczba masowa,
- X* – pierwiastek wzbudzony.

Schemat graficzny przemiany γ przedstawia rysunek 5.



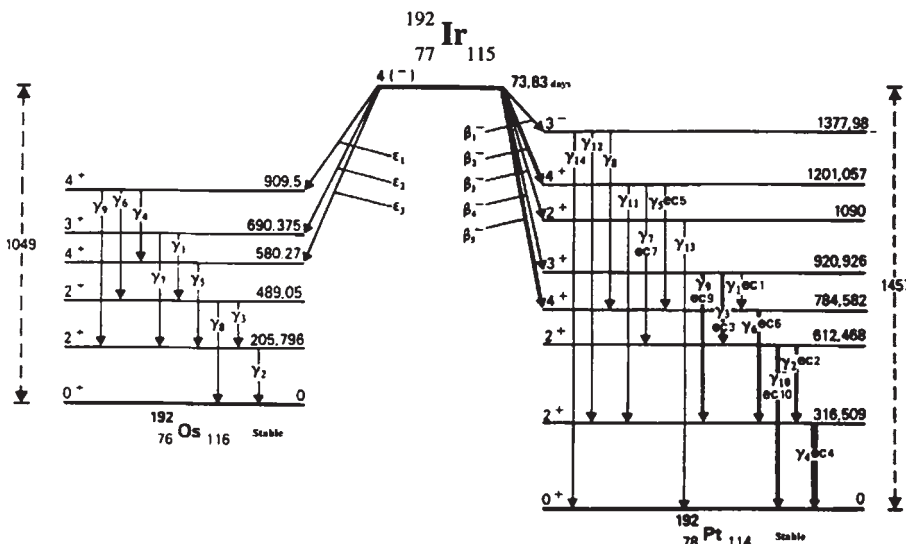
Rys. 5. Schemat graficzny przemiany gamma, zasada ogólna [opracowanie własne]

Procesowi rozpadu źródła promieniotwórczego często może towarzyszyć emisja cząstek promieniowania alfa, beta lub też elektronów, jak przykładowo w zapisie dla kobaltu [10]:



Są to zazwyczaj procesy kilku lub wieloetapowe, co doskonale przedstawia schemat dla Irydu-192 (rys. 6).

Wraz z upływem czasu aktywność radioizotopu spada, co sygnalizuje parametr zwany okresem połowicznego rozpadu. Podstawowe parametry wybranych źródeł promieniotwórczych przedstawiono w tablicy 2.



Rys. 6. Rozpad irydu-192 [8, 9]

Tablica 2

Podstawowe parametry wybranych źródeł promieniotwórczych [3]

Źródło promieniowania	Okres połowicznego rozpadu	Energia promieniowania gamma [MeV]	Stała ekspozycyjna promieniowania		Zakres badanych grubości stali [mm]
			$\frac{R \cdot m^2}{Ci^2 \cdot h}$	$\frac{C^3 \cdot m^2}{kg}$	
Co-60	5,3 lat	1,33;1,17	1,35	$2,615 \cdot 10^{-18}$	30–200
Cs-137	30 lat	0,66	0,31	$6,005 \cdot 10^{-19}$	15–120
Ir-192	74 dni	0,206–0,612	0,46	$8,910 \cdot 10^{-19}$	6–60
Yb-169	31,8 dnia	0,063–0,309	0,123	$2,421 \cdot 10^{-19}$	1,5–15
Tm-170	130 dni	0,052–0,084	0,004	$1,937 \cdot 10^{-21}$	5–40

Urządzenia emitujące promieniowanie gamma, stosowane w kontroli radiograficznej podczas badań nieniszczących materiałów lub obiektów przemysłowych, nazywa się aparatami gammagraficznymi.

5. Otrzymywanie wyniku badania

Wykrywanie niezgodności w badanych materiałach opiera się na analizie zmian natężenia promieniowania X i gamma po przejściu przez badany obiekt zgodnie z zależnością [3, 6]:

$$dI(x) = -\mu \cdot I(x) dx.$$

Natężenie promieniowania po przejściu przez materiał o grubości g wynosi:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu g}$$

gdzie:

- μ – liniowy współczynnik osłabienia,
- g – grubość badanego materiału,
- I_0 – natężenie promieniowania wyjściowe,
- I – natężenie promieniowania po przejściu przez materiał.

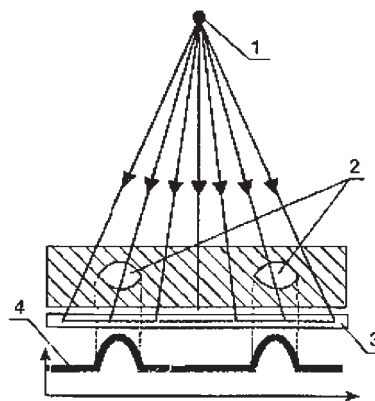
Jako nośnik zapisu wyniku badania, tradycyjna radiografia stosuje błony rentgenowskie ze światłoczułą emulsją naniesioną na podłoże z poliestru lub trójoctanu celulozy. Związki srebra zawarte w emulsji po przejściu promieniowania ulegają rozkładowi tworząc tzw. obraz utajony. Po fotochemicznej obróbce błony obraz ujawnia się w postaci zmian gęstości optycznej zgodnie z zależnością:

$$D = \log(i_0/i),$$

gdzie:

- D – gęstość optyczna radiogramu,
- I_0 – natężenie promieniowania padającego,
- I – natężenie promieniowania przechodzącego przez materiał; gęstość optyczna radiogramu jest wprost proporcjonalna do natężenia promieniowania padającego na błonę.

Wady w badanym obiekcie najczęściej mają mniejszą gęstość niż materiał otaczający wadę i promieniowanie w tych miejscach jest pochłaniane słabiej. Niezgodności są ujawniane w postaci ciemnych plam lub linii (w zależności od geometrii wady). Zasadę rejestracji niezgodności materiałowych w metodzie radiograficznej przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Rejestracja niezgodności materiałowych w metodzie radiograficznej [3]: 1) źródło promieniowania X lub gamma, 2) niezgodności, 3) kasetta z błoną radiograficzną, 4) zmiana gęstości optycznej na radiogramie

² W układzie SI podstawową jednostką aktywności (liczby rozpadów w jednostce czasu) jest bekerel (Bq). W źródle o aktywności jednego bekerela w ciągu jednej sekundy następuje jeden rozpad promieniotwórczy ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$). Historyczną jednostką aktywności jest kiur (Ci). 1 Ci stanowi aktywność $1 \text{ g }^{226}\text{Ra}$ i odpowiada: $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$.

³ Dawniej jednostką promieniowania był rentgen (R), jednak definicja rentgena zmieniła się z biegiem czasu i w 1937 roku ICRU (*International Commission on Radiological Units*) zmodyfikowała definicję rentgena (ICRU, 1938) i definicja ta obowiązuje do dziś. Dawka ekspozycyjna 1 R, za pośrednictwem emisji cząstek wtórnych wywołuje w 1 cm^3 suchego powietrza w warunkach normalnych (w powietrzu o masie 1,293 mg) powstanie tylu par jonów każdego znaku, że ich ładunek jest równy 1 esu ($1 \text{ esu} = 3,336 \cdot 10^{-10} \text{ C}$); $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$.

Obecnie, cyfrowe techniki radiograficzne są coraz bardziej rozpowszechnione. W latach 90. XX w. wdrożono radiografię CR (*computer radiography*), która jako detektor promieniowania wykorzystywała płyty luminoforowe, natomiast w krajach wysoko uprzemysłowionych jako detektory promieniowania stosuje się panele płaskie. Technika ta nazywana jest cyfrową radiografią bezpośrednią i oznaczana skrótem DDR lub DR (*direct digital radiography*)[15].

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono podstawowe informacje na temat promieniowania stosowanego w radiografii. Omówiono metody wytwarzania promieniowania oraz jego podstawowe właściwości, które umożliwiają wykorzystanie promieniowania w badaniach nieniszczących radiograficznych.

Literatura

1. Dobrzyński L. et.al.: *Spotkanie z promieniotwórczością*, Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana, Listopad, 2010.
2. Chmielewski A.G., Zimek Z.: *Wykorzystanie promieniowania jonizującego w przemyśle*, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa, 2017.
3. Czuchryj J., M. Stachurski M.: *Badania nieniszczące w spawalnictwie*, Gliwice, 2005.
4. Karpierz M.: *Podstawy fotoniki*, CSZ Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2010.
5. Michael F. L'Annunziata: *Handbook of Radioactivity Analysis 2e*, Academic Press, 2003.
6. Jeziński G.: *Radiografia przemysłowa*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1993.
7. <https://home.agh.edu.pl/~kakol/efizyka/w36/main36d.html> [dostęp: 21.06.2023].
8. Fonseca K.A., Koskinas M.F., Dias M.S.: *Disintegration rate measurement of a ^{192}Ir solution*, Applied Radiation and Isotopes 54 (2001) 141–145.
9. Lagoutine F., Coursol N., Legrand J.: *Table of radionuclides. Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants*, Bureau National de Metrologie, 1984.
10. Ashrapov U.T. et.al.: *Manufacturing of ionizing radiation source of Iridium – 192 for gamma- defectoscopes of Gammarid-192/120M*, Materials Science, Non-Equilibrium Phase Transformations, Vol. 4 (2018), Issue 2, pg(s) 52–54.
11. Sahoo S., Sahoo S.: *Production and Application of Radioisoto*, Physics Education, April–June 2006.
12. Guizerix J., Markovic V., Airey P.: *Radioisotopes and radiation technology in industry*, IAEA BULLETIN, 2/1987.
13. Pant H.J. et.al.: *Application of radioisotopes and radiation technology in industry: current status and prospects*, Current Science, Vol. 123, No. 3, 10 August 2022.
14. Ramamoorthy N., Haji-Saeid M.: *Industrial applications of radioisotopes and radiation technology and Agency's role*, Conference: 3rd Eurasia Conference on Nuclear Science and its Application, October 2004, Tashkent, Uzbekistan.
15. Mackiewicz S.: *Detektory promieniowania stosowane w cyfrowej radiografii bezpośredniej*, Badania nieniszczące i diagnostyka 1–2 (2017).

Artykuł dotyczy realizacji projektu badawczego „Mobilny system do radiograficznej kontroli szyno-profilu 60E1 lub E2 na liniach kolejowych PKP PLK” o nr BRIK-II/0031/2022 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia BRIK.