



OCENA DOKŁADNOŚCI ODWZOROWANIA UBYTKÓW GRUBOŚCI METODAMI KOMPUTEROWEJ ANALIZY RENTGENOGRAMÓW

JERZY WAWSZCZAK*, ADAM WOCIAL**

*Politechnika Warszawska – Płock, **Instytut Gamma - Świerk

W referacie przedstawiono analizę dokładności odwzorowania lokalnych profili powierzchni blachy ze sztucznie wykonanymi ubytkami o znanej geometrii i wymiarach. Oszacowano błąd metody i określono jego źródła oraz przedstawiono dyskusję przydatności tej metody w badaniach poligonowych dla dwóch rodzajów nośnika: standardowej błony używanej w badaniach radiologicznych oraz specjalnych gatunków papieru radiograficznego.

1. WPROWADZENIE

Impulsem do rozpoczęcia pracy nad zastosowaniem metod komputerowych do analizy rentgenogramów było duże zainteresowanie tą tematyką wśród uczestników V. Seminarium naukowo-technicznego nt.: „Badania materiałowe na potrzeby elektrowni i przemysłu energetycznego” [1], wnioski z dyskusji jak i wcześniejsze badania nad podobnymi zagadnieniami [2]. Tradycyjne badania radiologiczne zbiorników i rurociągów mają charakter badań jakościowych, potwierdzających bądź wykluczających wystąpienie ubytków korozyjnych lub kawitacyjnych od strony medium. Obowiązujący w metodach radiograficznych system wzorców i badań kontrolnych w sposób dostateczny zapewnia warunki poprawnego wnioskowania dopuszczającego (lub nie) dalszą eksploatację badanych urządzeń lub aparatów. Powszechność i dostępność tych badań w rewizji rurociągów i urządzeń ciśnieniowych w połączeniu z ultradźwiękowymi badaniami grubości, przy dużej precyzji pomiaru, w większości wyczerpuje oczekiwania służb eksploatacyjnych. Badania te zawodzą jedynie w przypadkach korozji wżerowej lub skumulowanych lokalnie (wskutek wad struktury materiału) ubytków wywołanych kawitacją. Prawdopodobieństwo zdarzenia, polegającego na trafieniu podczas losowego wyboru punktów pomiarowych, że ultradźwiękowy próbnik pokryje się z wżerem korozyjnym o średnicy często mniejszej od jego głębokości rzadko przekracza 1%. Badania radiograficzne, w swej tradycyjnej formie, informując o rozkładzie ubytków lub nieciągłości na grubości badanego wycinka blachy lub rurociągu nie dostarczają informacji o ich przestrzennej geometrii. Zastąpienie błon radiologicznych w badaniach, specjalnym gatunkiem papieru o dużej czułości i liniowej zależności stopnia zaczernienia (w dużym zakresie ekspozycji) od czasu, stworzyły możliwość wykorzystania w badaniach radiogramów, komputerowych metod analizy obrazu, w których poziom szarości (zaczernienia) wykorzystywany jest jako zmienna głębokości (położenia) wad wewnętrznych badanych obiektów [3].

2. ZAŁOŻENIA I PRZYGOTOWANIE OBIEKTÓW BADAŃ

Ustalenie faktu, że pasmem wrażliwości dla ludzkiego oka jest 256 poziomów szarości, sprawiło, że wszystkie urządzenia wykorzystujące algorytmy przeliczania odniesione są do tej skali. Zakładając zatem, że poziom zaczernienia opisany wzorami (1, 2 i 3) jest pochodną właściwości materiału światłoczułego i wartości padającego na materiał światłoczuły promieniowania, zaś natężenie promieniowania po przejściu przez przedmiot o grubości g jest zależne tak od rodzaju pierwiastka z jakiego w większości składa się badany obiekt (4) jak i warunków ekspozycji, istnieje możliwość wyboru parametrów umożliwiających wykorzystanie tej metody do przekształcenia obrazu kliszy do postaci pliku graficznego.

Kwestią do rozstrzygnięcia jest opracowanie formuły służącej przekształceniu nieliniowego zazwyczaj rozkładu poziomów szarości (luminacji) na wymiar głębokości wady czy grubości materiału. Wykorzystanie do tego celu tradycyjnych wzorców wymaga bowiem znacznie obszerniejszej liczby danych dla poprawienia dokładności odwzorowania, co zostanie wykazane w pracy.

$$S = \lg \frac{J_0}{J}, \quad (1)$$

$$S = cJt^p \quad (2)$$

$$S = \gamma \lg \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \quad (3)$$

$$J = J_0 e^{-\mu g} \quad (4)$$

Gdzie: S – zaczernienie filmu,
 J_0 – natężenie promieniowania padającego,
 J – natężenie promieniowania przechodzącego,
 c – stała,
 t – czas,
 p – wykładnik Schwarzhielda ($0,980 \div 1,022$) $\approx 1,0$,
 $\lg \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}$ – logarytm z ekspozycji,
 μ – liniowy współczynnik osłabienia promieniowania,
 g – grubość materiału.

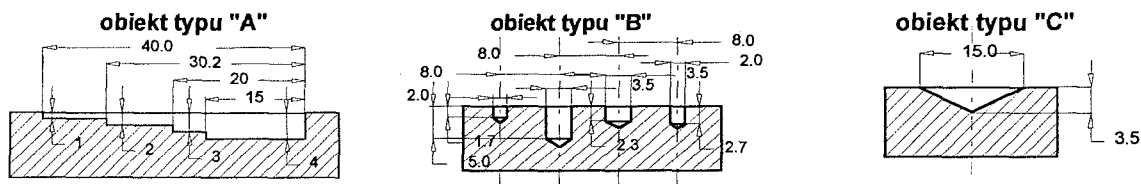
Jeśli zatem zaczernienie jest zależne logarytmicznie od natężenia promieniowania a natężenie promieniowania zależy wykładniczo od grubości to, przy ustalonych warunkach ekspozycji, stopień zaczernienia określony jako poziom szarości lub luminację L , można zapisać w postaci funkcji grubości (5).

$$L=f(g) \quad (5)$$

Dla wykazania tych związków, wykonano próbkę w postaci stalowej płyty o grubości 10 mm w której następnie wykonano szereg sztucznych ubytków o zadanej geometrii, symulujących wżery lub uskoki o zmiennej grubości materiału. Płytę następnie prześwietlono uzyskując szereg ekspozycji różniących się poziomem zaczernienia tła podstawowego (dla grubości wyjściowej 10 mm). Dla prezentowanych dalej wyników wybrano ekspozycje o maksymalnej rozpiętości luminacji tła względem badanych obiektów w postaci folii (błony radiograficznej) i papieru radiograficznego.

Ze względu na odmienną technikę skanowania (transmisyjną – folia i odbiciową – papier) dla przekształcenia obrazu w pliki graficzne użyto w pierwszym wypadku profesjonalnego skanera dla materiałów transparentnych o dużej rozdzielczości (500 pikseli na cal), w drugim przypadku skanera standardowego przy rozdzielczości 75 pikseli na cal). Ze względu na ograniczenia sprzętowe (moc obliczeniową komputera) oraz ograniczenia wynikające z używanego oprogramowania, dla pierwszego pliku o rozdzielczości 500 pikseli na cal i objętości 19MB zastosowano algorytm redukcji dwu sześciennej będący na wyposażeniu programu PhotoShop 4 zmieniający rozdzielczość do poziomu 75 pikseli na cal. Zabieg ten zredukował rozmiar plików do wielkości porównywalnych dla drugiego wariantu oraz wyraźnie zmniejszył poziom szumu i gęstość defektów pikselowych. W procedurze tej nie udało się jedynie wyrównać skali obrazów dla wymiarów liniowych w układzie [x, y], tak że między folią a papierem radiograficznym występuje stały błąd skali równy $\sim 16\%$.

Dla potrzeb niniejszej pracy użyto obiektów symulujących radiograficzny wzorek schodkowy, sekwencje wżerów korozyjnych o różnej średnicy i głębokości oraz wgłębienie stożkowe dla określenia dokładności wymiaru liniowego w płaszczyźnie kliszy. Wszystkie zwymiarowane schematy obiektów przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Szkic wycinków przekroju płyty dla pokazania wymiarów badanych obiektów

3. PROCEDURA I WYNIKI BADAŃ

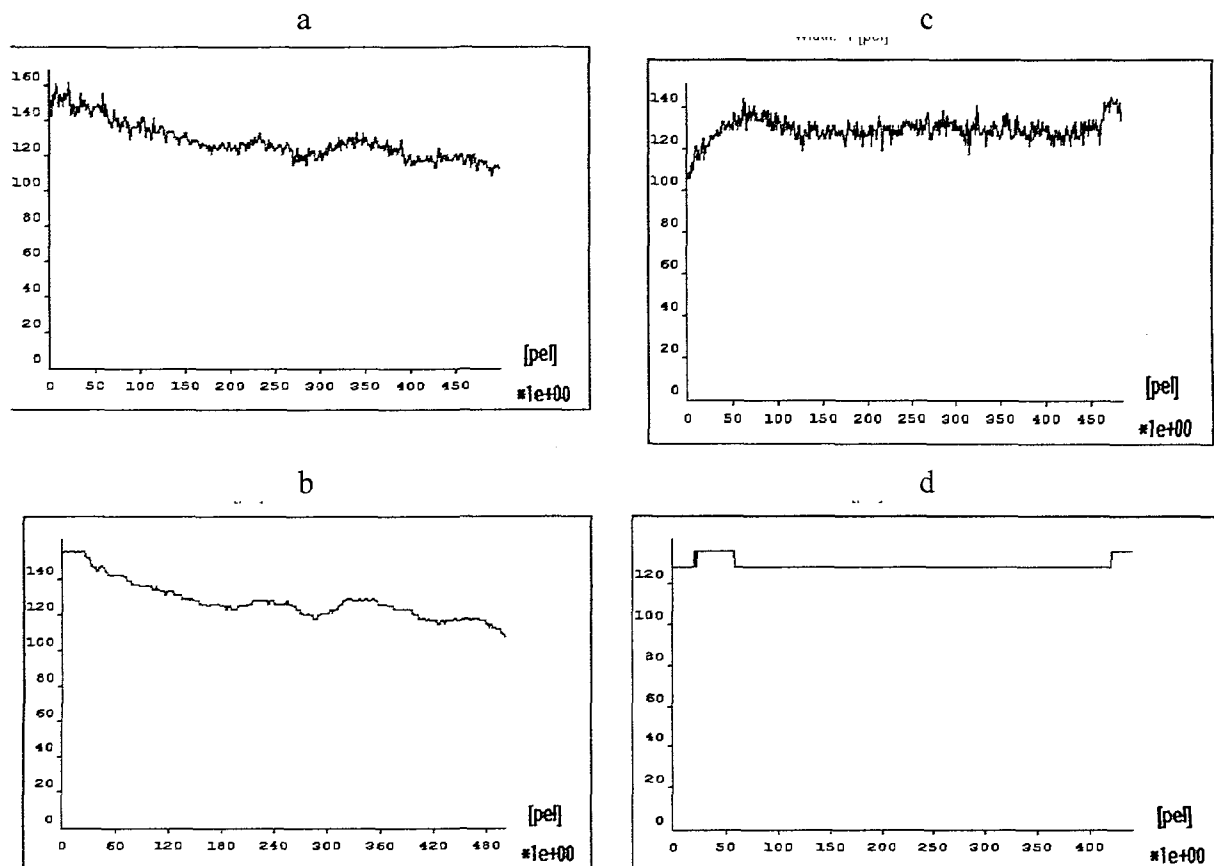
Przygotowując pliki graficzne otrzymane ze skanera do dalszej obróbki należy sobie zdawać sprawę z ich licznych niedoskonałości wyrażających się dużym poziomem szumu termicznego, pochodnymi błędów obróbki fotochemicznej i parametrów naświetlania. Zwykle pierwszą operacją jest obcięcie niewykorzystanego pasma luminacji zarówno po stronie wysokich jak i niskich luminacji. Zabieg ten powoduje rozciągnięcie wąskiego nieraz pasma luminacji na cały przedział 256 odcieni szarości. Odzyskany w ten sposób kontrast ma jednak tą niedogodność, że maleje dokładność odwzorowania luminacji. Kolejną operacją jest filtracja [4] zmniejszająca wymienione wcześniej ułomności obrazu. Jednakże zbyt głęboka filtracja jak pokazano na rysunku 2 zmniejsza wyraźnie dokładność odwzorowania. Konieczny jest zatem kompromis między jakością i dokładnością z naciskiem na tą drugą cechę.

Rysunek 2 pokazuje także istotne różnice w jakości obrazu, związane z rodzajem nośnika z wyraźną tutaj preferencją dla papieru.

Wszystkie badania metodami analizy obrazu wykonano z zastosowaniem pakietu MicroScan który dla potrzeb tej pracy wyposażono w moduł zapisu rozkładu luminacji w układzie [x, y] w postaci pliku tekstowego. Po konwersji plików do formatu Excel 2000 możliwa zatem była ich dalsza obróbka. Wytypowane obiekty badano w stanie nie filtrowanym i po filtracji filtrem medianowym o wymiarze 5x5 pikseli. W procesie filtracji wykorzystano algorytm uśredniania luminacji w obrębie każdego 5 sąsiadujących ze sobą pikseli (w kwadracie 5x5 pikseli). Wyniki w postaci graficznej pokazano na rysunkach 3÷8. Poziom luminacji przeliczano na wymiar liniowy stosując zależność (6):

$$g_{(i)} = g - g_{(max)} \left(\frac{L_{(max)} - L_{(i)}}{L_{(max)} - L_{(min)}} \right), \quad (6)$$

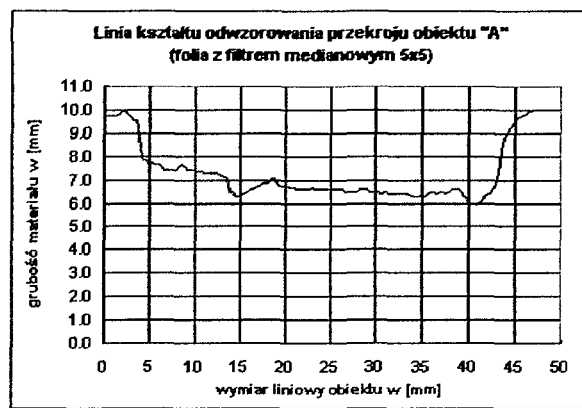
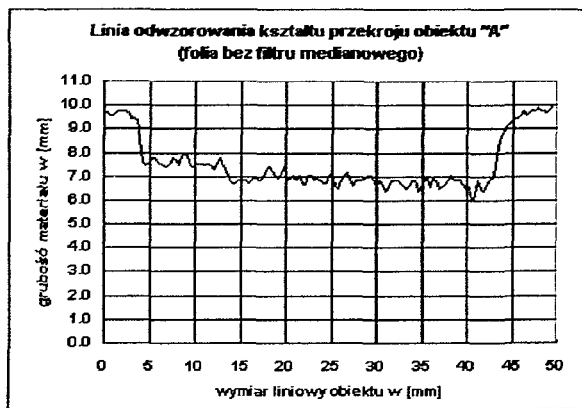
- gdzie: $g_{(i)}$ – głębokość położenia bieżącego punktu w [mm],
 g – grubość całkowita badanego obiektu w [mm],
 $g_{(max)}$ – oszacowana lub zmierzona największa głębokość wady obiektu w [mm],
 $L_{(max)}$ – maksymalny poziom luminacji w obszarze obiektu,
 $L_{(min)}$ – minimalny poziom luminacji w obszarze obiektu,
 $L_{(i)}$ – poziom luminacji bieżącego punktu.



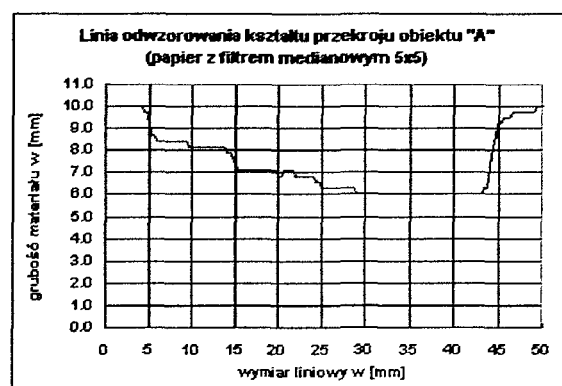
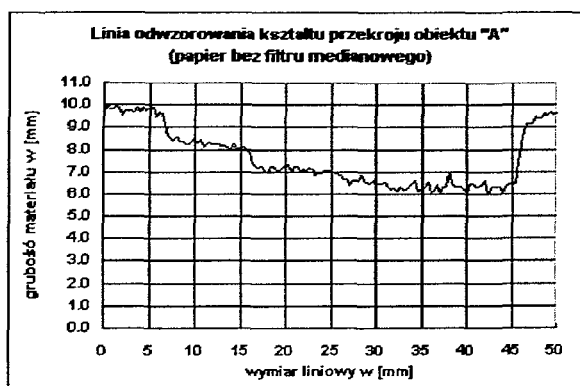
Rys.2. Rozkłady luminacji pikseli wzdłuż przekątnej folii (a, b) i papieru (c, d) przed procesem filtracji (a, c) i po procesie filtracji filtrem medianowym 9x9 pikseli

W trakcie badań wielkością krytyczną dla otrzymanych wyników była wielkość $g_{(max)}$, którą należało oszacować lub zmierzyć w inny sposób np. ultradźwiękowo.

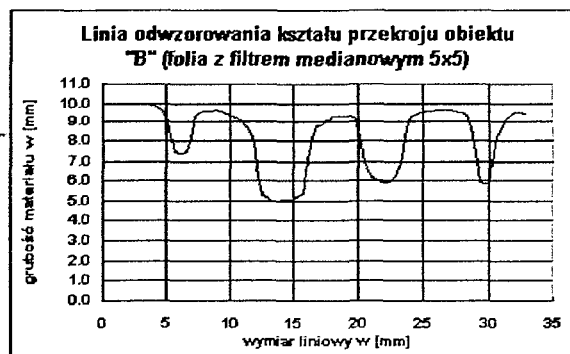
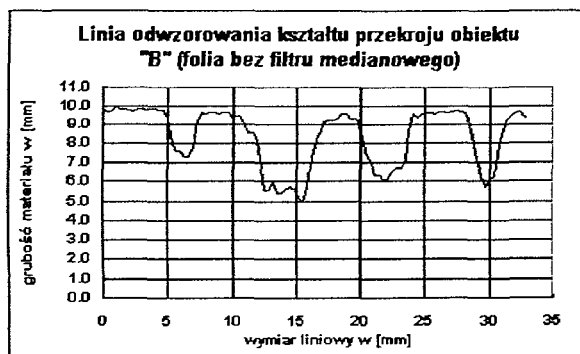
Zastosowanie wzorców schodkowych znacznie rozszerza przedział luminacji, zwiększa czułość metody ale uwypukla nieliniowy charakter funkcji zaczernienia materiału światłoczułego względem warunków ekspozycji $\varepsilon = Jt$. Niemniej dla wybranych grubości blach lub rurociągów stalowych w trybie wielokrotnych ekspozycji i pomiarów luminacji możliwe jest opracowanie metod komputerowej analizy danych istotnie poprawiających dokładność metody przy dotychczasowych systemach wzorcowania radiogramów.



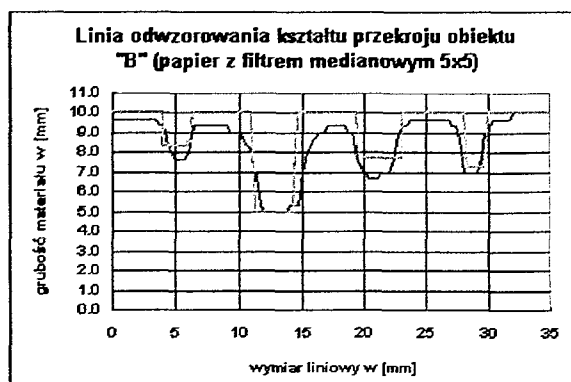
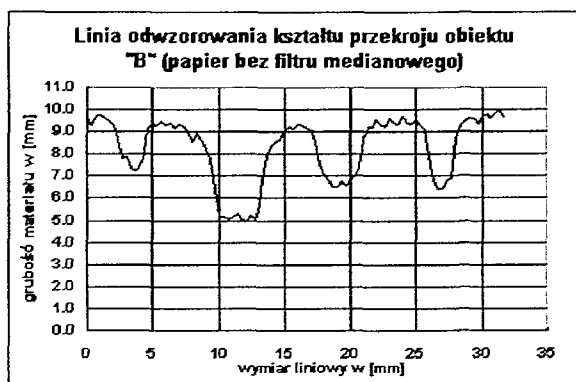
Rys.3. Linie odwzorowania kształtu przekroju, dla folii, obiektu „A” bez filtracji (na lewo) i z zastosowaniem filtracji filtrem medianowym o wymiarze 5x5 (na prawo)



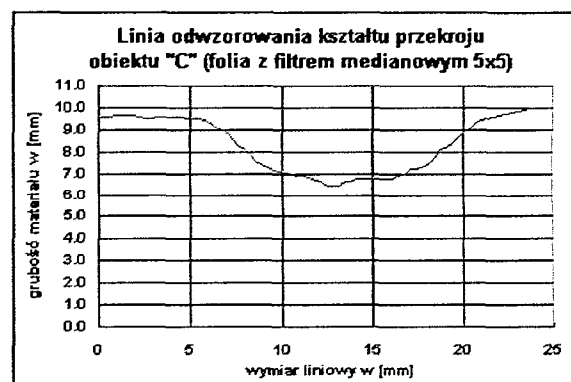
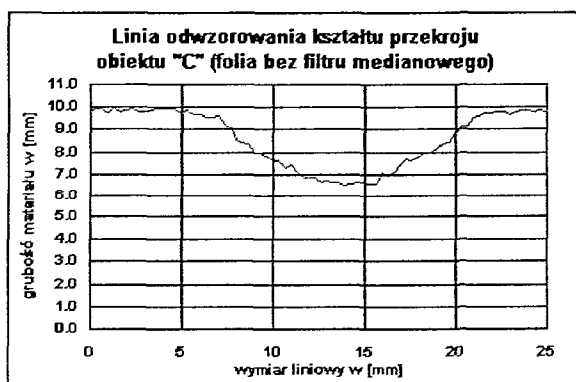
Rys.4. Linie odwzorowania kształtu przekroju, dla papieru, obiektu „A” bez filtracji (na lewo) i z zastosowaniem filtracji filtrem medianowym o wymiarze 5x5 (na prawo)



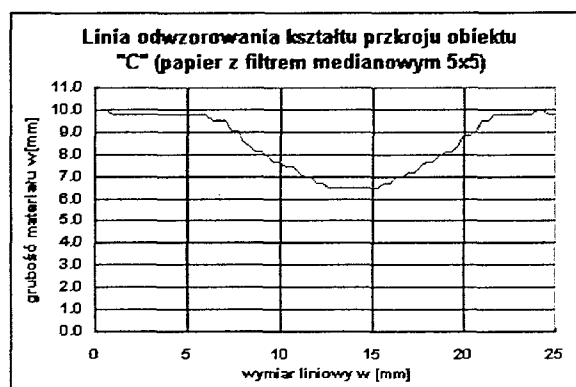
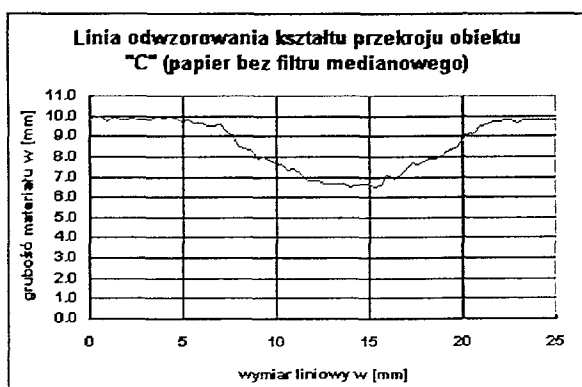
Rys.5. Linie odwzorowania kształtu przekroju, dla folii, obiektu „B” bez filtracji (na lewo) i z zastosowaniem filtracji filtrem medianowym o wymiarze 5x5 (na prawo)



Rys.6. Linie odwzorowania kształtu przekroju, dla papieru, obiektu „B” bez filtracji (na lewo) i z zastosowaniem filtracji filtrem medianowym o wymiarze 5x5 (na prawo), gdzie na obrysie kształtu naniesiono kontur obiektu w rzeczywistym wymiarze i położeniu

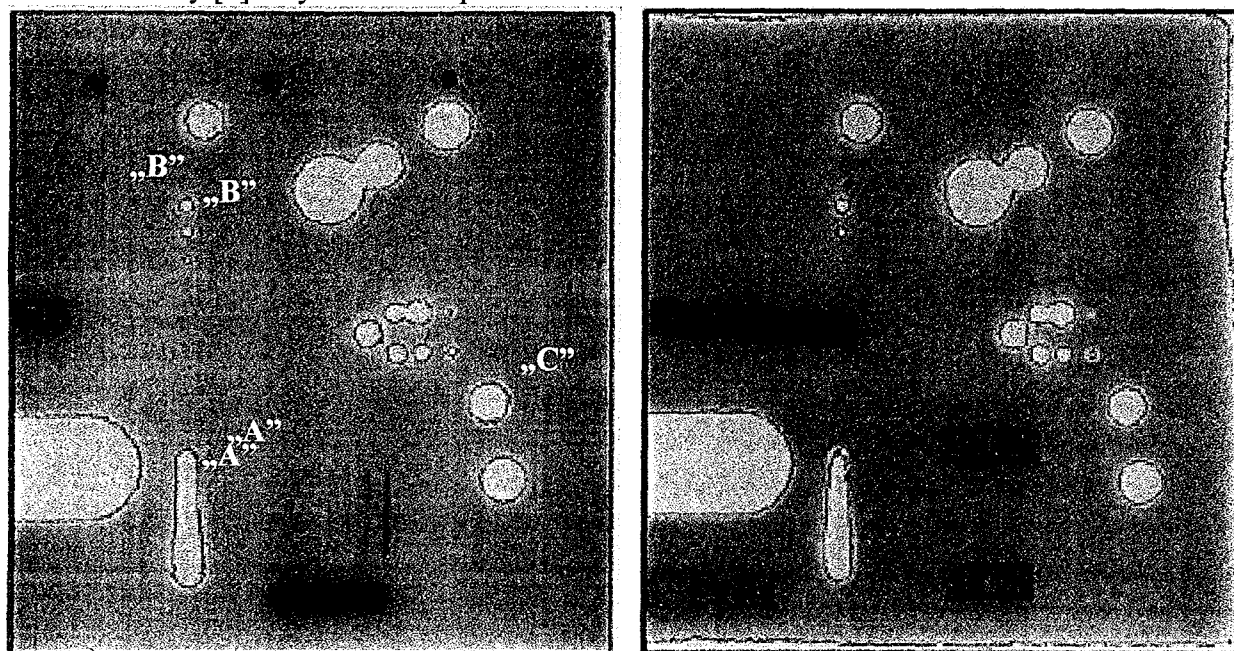


Rys.7. Linie odwzorowania kształtu przekroju, dla folii, obiektu „C” bez filtracji (na lewo) i z zastosowaniem filtracji filtrem medianowym o wymiarze 5x5 (na prawo)



Rys.8. Linie odwzorowania kształtu przekroju, dla papieru, obiektu „C” bez filtracji (na lewo) i z zastosowaniem filtracji filtrem medianowym o wymiarze 5x5 (na prawo)

Do wyznaczenia geometrii obiektów w płaszczyźnie [x, y] wykorzystano algorytmy pakietu MicroScan opracowane dla procedur analizy wielkości stereologicznych mikrostruktury [5]. Wyniki badań przedstawiono w tabelach 1 i 2.



Rys.9. Obraz pliku zapisanego z folii (po stronie lewej) i papieru (po stronie prawej) z zaznaczonymi pseudokolorami obiektami „A”, „B”, „C”. Ze względu na możliwości edycji tylko w postaci odcieni szarości, wyraźnemu obniżeniu uległ kontrast i dokładność odwzorowania obiektów

Wymiary obiektów „B” i „C” otrzymane z folii podano w tabeli 1, zaś wymiary tych obiektów otrzymane ze skanowania papierowej radiografii podano w tabeli 2.

Tabela 1. Podstawowe wskaźniki geometrii obiektów B i C w badaniach folii

wskaźniki obiektu	B 1	wz B1	B 2	wz B2	B 3	wz B3	B 4	wz B4	C	wz C
Wydłużenie	1,24	1,0	1,03	1,0	1,04	1,0	1,0	1,0	1,08	1,0
Powierzchnia [mm ²]	2,2	3,1	15,5	9,6	9,4	9,6	3,8	3,1	99,3	177
Obwód [mm]	4,8	6,3	13,8	11	10,3	11	6,4	6,3	44,2	47
Średnica [mm]	1,7	2,0	4,5	3,5	3,5	3,5	2,2	2	11,2	15

Tabela 2. Podstawowe wskaźniki geometrii obiektów B i C w badaniach papieru

wskaźniki obiektu	B 1	wz B1	B 2	wz B2	B 3	wz B3	B 4	wz B4	C	wz C
Wydłużenie	1,0	1,0	1,04	1,0	1,08	1,0	1,1	1,0	1,08	1,0
Powierzchnia [mm ²]	2,1	3,1	15,8	9,6	8,6	9,6	3,2	3,1	107,9	177
Obwód [mm]	4,5	6,3	14,4	11	10,2	11	5,7	6,3	46,4	47
Średnica [mm]	1,6	2,0	4,5	3,5	3,3	3,5	2	2	11,7	15

Pokazane w tabelach 1, 2 wyniki mogą budzić kontrowersje, jako że proste przeliczenie np. średnicy na powierzchnię okręgu lub jego obwód nie odzwierciedlają tych najbardziej elementarnych związków. Przyczyną tego stanu rzeczy jest fakt, iż algorytmy wykonujące obliczenia liczą piksele a nie obwód lub powierzchnie, zatem nie dotyczą figury idealnej ale rzeczywistej, nawet jeśli wskaźnik „eliptyczności” figury wyrażony wydłużeniem jest równy 1,0 to nie znaczy by krzywa opisująca obwód tej figury była krzywą gładką w sensie matematycznym. Przyjmując wszakże dokładność w granicach $\pm 10\%$ jako dopuszczalną możemy te algorytmy użyć dla przyspieszenia toku obliczeń.

W tabeli 3 zestawiono wyniki badań głębokości obiektów A, B, C wyznaczone na podstawie pomiarów luminacji. Jako miarę głębokości przyjęto maksymalną głębokość obiektu lub jego części względem wymiaru bazowego 10 mm odpowiadającego zawsze maksymalnemu poziomowi luminacji. We wzorcu schodka o postępującej głębokości podobnie jak i serii otworów symulujących wżery korozyjne kolejne fragmenty obiektu oznaczono cyfrowo np. A1 lub B3. Dla porównania dokładności metody, w ostatnim wierszu wstawiono rzeczywiste wymiary. W tabeli 4 wyniki przedstawiono nie względem maksymalnej luminacji lecz z wykorzystaniem lokalnego maksimum. W sytuacji gdy krawędzie obiektu z powierzchnią płyty wzorcowej różniły się wielkością luminacji wówczas do obliczeń przyjmowano wartość niższą.

Tabela 3. Głębokość obiektów określona metodą pomiaru luminacji po przeliczeniu wg wzoru [6] względem wymiaru bazowego płyty wzorcowej = 10 mm

Oznaczenie obiektów	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C
Wymiar	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Folia (bez filtracji)	2,7	3,3	3,5	4,0	2,7	5,0	4,0	4,2	3,5
Folia (z filtrem medianowym 5x5)	2,9	3,7	3,5	4,0	2,5	5,0	4,0	4,1	3,5
Papier (bez filtracji)	2,0	3,4	3,8	4,0	2,8	5,0	3,5	3,5	3,5
Papier (z filtrem medianowym 5x5)	1,9	3,0	3,8	4,0	2,2	5,0	3,3	3,0	3,5
Wymiar rzeczywisty wzorca	1,0	2,0	3,0	4,0	1,7	5,0	2,3	2,7	3,5

Tabela 4. Głębokość obiektów określona metodą pomiaru luminacji po przeliczeniu wg wzoru [6] względem lokalnego maksimum luminacji

Oznaczenie obiektów	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C
Wymiar	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Folia (bez filtracji)	2,5	3,1	3,3	3,8	2,5	4,2	3,2	3,6	3,5
Folia (z filtrem medianowym 5x5)	2,9	3,7	3,5	4,0	2,2	4,1	3,3	3,5	3,5
Papier (bez filtracji)	1,2	2,6	3,0	3,2	2,1	4,0	2,6	3,0	3,5
Papier (z filtrem medianowym 5x5)	1,6	2,7	3,5	3,7	1,6	4,0	2,3	2,3	3,5
Wymiar rzeczywisty wzorca	1,0	2,0	3,0	4,0	1,7	5,0	2,3	2,7	3,5

4. PODSUMOWANIE

Wykonane w pracy badania mają charakter sygnałny i stanowią jedynie wstępne rozpoznanie znacznie obszerniejszego zagadnienia, które dla porównania z metodami diagnostyki rentgenowskiej w medycynie można by nazwać „tomografią komputerową” aparatów i urządzeń.

Podobnie jak w medycynie zarówno urządzenia jak i oprogramowanie są niebywale kosztowne i trudno wyobrazić sobie okoliczności, w których badania te okazały się rentowne podczas rutynowych rewizji i badań.

Proponowane w pracy rozwiązania traktować należy jako doraźny środek zastępczy, gdyż dla metod komputerowej rejestracji i przetwarzania sygnałów wizyjnych nie ma alternatywy niezależnie od rodzaju sygnału i jego natury fizycznej. Opracowanie to nie jest także kontestacją dotychczasowych, głównie jakościowych, badań radiologicznych, bowiem metodą tą już dzisiaj można, w niektórych szczególnych przypadkach, uzupełnić lub rozszerzyć badania podstawowe. Jak wykazano w pracy, dokładność odwzorowania dzięki zastosowaniu techniki komputerowej analizy obrazu nie zwiększyła się a charakterystyczne dla promieniowania rentgenowskiego i promieniowania gamma trudności w uzyskaniu kontrastu pozostały takie same. Jednakże największą zaletą tych wyników jest ich matematyczny obiektywizm, możliwość uniknięcia pomyłki w przypadku mniej wprawnego lub nieuważnego operatora. Ważnym argumentem jest zmiana nośnika informacji (klisza, papier) na nośnik magnetyczny łatwy do rejestracji, archiwizacji i przetwarzania (także automatycznego). Dyskusja danych szczegółowych dla odosobnionego przypadku nie jest zbyt interesująca. Można łatwo potwierdzić fakt silnego wpływu warunków ekspozycji i techniki obróbki negatywów na wynik końcowy. Należałoby to jednak doświadczalnie sprawdzić i statystycznie udowodnić na obszerniejszym materiale. Kryje się za tym problem znacznych kosztów takich pogłębionych badań. Autorzy uważają, że warto je podjąć i rozwijać.

Literatura:

1. A.Wocial, J.Ginalski, M.Rusiniak, D.Dudek: *Nieniszczące badania diagnostyczne rurociągów derywacyjnych w elektrowni szczytowo pompowej w Dychowie*, V. Seminarium naukowo-techniczne nt.: *Badania materiałowe na potrzeby elektrowni i przemysłu energetycznego*, Zakopane, czerwiec 1998
2. A.Wocial: *Kompleksowe badania korozji zbiorników i rurociągów*, Materiały konferencyjne GAMMATEST'94
3. J.Wawszczak: *Determination of the fractal dimension surface of the fracture from SEM images with assistance of the computer image quantitative analysis system*, X. Conference on electron microscopy of solids, Warsaw-Serock, September 1999
4. C.D.Watkins, A.Sadun, S.Marenka: *Nowoczesne metody przetwarzania obrazu*, WNT Warszawa, 1995
5. J.Bielanik, J.Wawszczak: *Współczesne możliwości wykorzystania metalografii i fraktografii ilościowej w badaniach materiałowych*, VI. Seminarium naukowo-techniczne nt.: *Badania materiałowe na potrzeby elektrowni i przemysłu energetycznego*, Zakopane, czerwiec 1999