

---

**XIV Seminarium**  
**NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW**  
**Zakopane, 4-7 marca 2008**

---

**ZMECHANIZOWANE SYSTEMY ULTRADŹWIĘKOWE  
DO LOKALIZACJI KOROZJI WŻEROWEJ**

Marek Śliwowski, Paweł Perekitko  
NDTEST Warszawa

## **1. Wstęp**

Badania nieniszczące ubytków korozyjnych, a w szczególności zlokalizowanej korozji wżerowej, stanowią ważny element oceny stanu technicznego konstrukcji i urządzeń będących w eksploatacji. Znajduje to odbicie w fakcie, że mają one coraz większy udział w pakiecie usług oferowanych przez czołowe firmy inspekcyjne, w tym w Polsce przez firmę NDTEST. Również w warunkach krajowych, ze względu na znaczną ilość starzejących się obiektów przemysłowych oraz konieczność dostosowania do norm europejskich obserwuje się coraz większe zapotrzebowania na tego rodzaju badania diagnostyczne.

W związku z opisaną tendencją w ostatnich latach rozwinięto i wprowadzono do praktyki przemysłowej szereg nowych metod i technik badania zlokalizowanej korozji wżerowej, dostosowanych do różnych potrzeb i zastosowań. Opracowane rozwiązania poszły w kierunku automatyzacji stosowanej od dawna metody ultradźwiękowej, w szczególności dla obiektów o dużych rozmiarach.

Celem niniejszego referatu jest zaprezentowanie efektywnej techniki zmechanizowanego badania ubytków korozyjnych łącznie z opisem stosowanych rozwiązań aparaturowych. Wyniki tych badań mogą podlegać dalszej obróbce metodami statystycznymi, pozwalającej na ekstrapolację zakresu badania na znacznie większe obszary obiektu, niż wynikałoby to z przeprowadzonego skanowania. Obszerniejsze informacje literaturowe można znaleźć w opracowaniach [2], [1] oraz [3].

## **2. Rodzaje ubytków korozyjnych i możliwości ich badania**

Ze względu na mechanizm zjawiska korozję dzieli się zwykle na korozję chemiczną (reakcje chemiczne w środowisku suchym), korozję elektrochemiczną (procesy elektrochemiczne w obecności elektrolitu) oraz biokorozję powodowaną przez pewne rodzaje bakterii. Podobny charakter mają również uszkodzenia erozyjne spowodowane przepływem mediów płynnych lub gazowych. Z punktu widzenia badań nieniszczących największe znaczenie ma kształt, rozmieszczenie oraz usytuowanie ubytków korozyjnych. Pod tym względem możemy wyróżnić korozję ogólną, wżerową, szczelinową oraz międzykrystaliczną.

Korozja ogólna (także erozja) charakteryzuje się stosunkowo równomiernym rozmieszczeniem ubytków na powierzchni materiału oraz wolnym tempem narastania. Korozję taką można łatwo badać metodą ultradźwiękową pod warunkiem bezpośredniego dostępu do zewnętrznej powierzchni badanego elementu (zbiornika, rurociągu itp.). W przypadku kiedy oceniana konstrukcja musi pozostać zakryta stosuje się na ogół techniki oparte na pomiarze zmian pola elektromagnetycznego lub techniki radiografii tangensowej, umożliwiające pomiar grubości ścianki poprzez warstwę izolacji.

Znacznie trudniejsze zadanie stawia przed badaniami nieniszczącymi korozja wżerowa, zlokalizowana w szczególności od strony niedostępnej bezpośrednim badaniom

wizualnym. Jest to najczęściej korozja typu elektrochemicznego i charakteryzuje się bardzo nierównomiernym i przypadkowym rozmieszczeniem na powierzchni materiału. Szybkość procesu korozyjnego w obrębie wżeru może być przy tym wiele tysięcy razy większa ( $\times 10^3 \div 10^5$ ) niż szybkość korozji ogólnej w przylegających obszarach materiału. Oznacza to, że konwencjonalne punktowe pomiary grubości ścianki mają tutaj bardzo ograniczoną przydatność. Szansa przypadkowego "trafienia" najgłębszych wżerów korozyjnych jest bardzo mała zaś wyniki pomiarów, nawet na siatce o gęstym oczku, odzwierciedlać będą raczej średnią grubość ścianki niż rzeczywisty stan zaawansowania korozji wżerowej. Jednym z możliwych udoskonaleń metody ultradźwiękowej pomiaru na siatce jest w takim przypadku przeprowadzenie pełnego skanowania ultradźwiękowego powierzchni elementu (tzn. 100% pokrycie obszaru badanego) z ewentualną automatyzacją procesu rejestracji danych. Odpowiednie systemy ultradźwiękowe opisano w pkt. 3 i dalszych.

Z uwagi na czasochłonność i wysoki koszt tego rodzaju badań ultradźwiękowych często niemożliwe jest przebadanie całej powierzchni ocenianej konstrukcji, np. zbiornika czy gazociągu. Odpowiedzią na tego rodzaju ograniczenia jest z jednej strony zastosowanie metod statystycznych opartych na rachunku prawdopodobieństwa [1], z drugiej zaś wykorzystanie innych technik specjalistycznych umożliwiających wykrywanie korozji wżerowej na dużych powierzchniach a następnie zastosowanie dokładniejszej techniki ultradźwiękowej jedynie na wybranych fragmentach konstrukcji.

Jedną z najbardziej efektywnych metod umożliwiających wykrywanie korozji wżerowej na dużych powierzchniach jest tzw. technika magnetyczna MFL (Magnetic Flux Leakage). Bazuje ona na wykrywaniu podwyższonych wartości pola indukcji magnetycznej nad powierzchnią materiału ferromagnetycznego w miejscu, w którym znajduje się ubytek korozyjny. Systemy wykorzystujące tę technikę do badania dużych powierzchni dna zbiornika noszą nazwę Floorscannerów lub Wallscannerów w przypadku ścian bocznych [3]. Systemy te zdolne są wykrywać obszary skorodowane o znacznym stopniu zaawansowania a dokładne zwymiarowanie tych ubytków wymaga dodatkowego badania np. technika ultradźwiękową.

Pewną odmianą korozji elektrochemicznej jest tzw. korozja stykowa powstająca w obecności elektrolitu na styku materiałów różniących się potencjałem elektrochemicznym. Wynikiem takiego procesu są np. ubytki korozyjne w postaci wąskich szczelin usytuowanych wzdłuż linii wtopienia spoin znajdujących się w zbiornikach i rurociągach. Bardzo skuteczną metodą badania tego rodzaju korozji jest ultradźwiękowa technika TOFD pozwalająca zarówno na szybkie wykrywanie jak też precyzyjny pomiar głębokości ubytków korozyjnych.

Osobnym zagadnieniem jest badanie korozji międzykrystalicznej. Przydatne mogą być tutaj np. metody ultradźwiękowe i prądów wirowych jednak techniki stosowane do badania tego rodzaju korozji muszą być odmienne i ukierunkowane bardziej na ocenę mikrostruktury materiału niż na wykrywanie wad makroskopowych i wymagają oddzielnego omówienia.

### **3. Techniki ultradźwiękowe**

#### **3.1 Punktowe pomiary grubości ścianki**

Ultradźwiękowe pomiary grubości ścianki w punktach określonej siatki pomiarowej to najszerzej znana i stosowana technika badania ubytków korozyjnych. Z uwagi na znaną zasadę tych pomiarów oraz wykorzystanie standardowego sprzętu ultradźwiękowego warto jedynie dokładniej określić zakres zastosowania oraz ograniczenia tej techniki.

Jest to, przede wszystkim, technika badania korozji ogólnej oraz erozji, które charakteryzują się równomiernym rozmieszczeniem ubytków korozyjnych oraz wolnymi zmianami grubości ścianki wzdłuż powierzchni elementu. Punkty siatki pomiarowej powinny być rozmieszczone dostatecznie gęsto, aby wychwycić miejsca o minimalnej grubości

ścianki. W wyniku pomiarów można określić minimalną, maksymalną oraz średnią grubość ścianki badanego elementu.

Opisane podejście zawodzi w przypadku, gdy w ocenianym elemencie występuje silna korozja wżerowa. O stopniu uszkodzenia konstrukcji i możliwościach jej dalszego użytkowania decyduje w tym przypadku nie tyle uśredniona grubość ścianki, co głębokość poszczególnych wżerów korozyjnych. Najgłębsze wżery mogą znajdować się w przypadkowych miejscach między punktami siatki pomiarowej i jest mało prawdopodobne, aby w takim badaniu zostały wykryte.

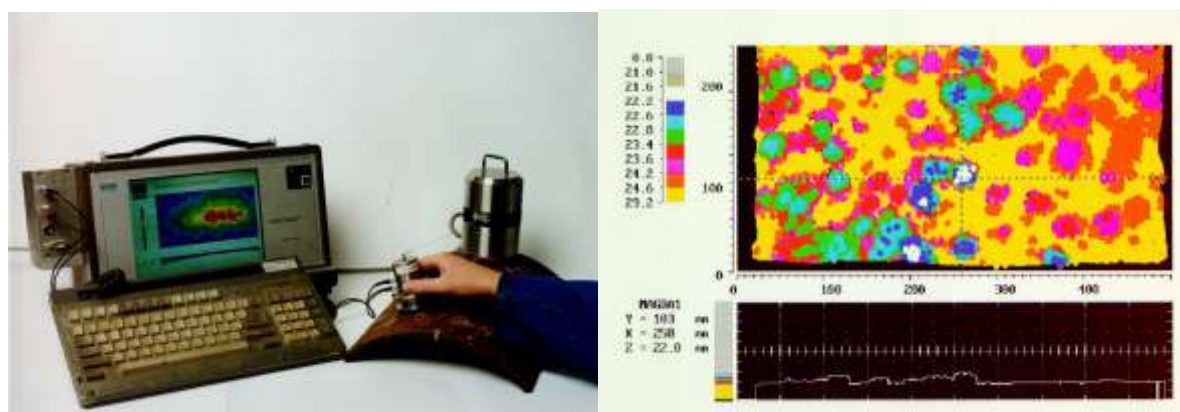
### 3.2 Ultradźwiękowe mapy korozji

Naturalnym rozwiązaniem problemu wykrywania zlokalizowanej korozji wżerowej metodą ultradźwiękową jest zagęszczenie punktów pomiarów ultradźwiękowych aż do pełnego pokrycia badanej powierzchni. Podejście takie prowadzi jednak do ogromnej ilości danych pomiarowych, których zebranie i opracowanie w tradycyjny sposób jest bardzo czasochłonne.

Skutecznym rozwiązaniem okazały się tutaj zautomatyzowane systemy ultradźwiękowe umożliwiające ciągłą, automatyczną rejestrację wyniku pomiaru grubości w powiązaniu ze współrzędnymi punktu pomiarowego. Konieczność zapamiętywania i obróbki dużej ilości danych pomiarowych nie stanowi obecnie problemu, ze względu na zastosowanie cyfrowych urządzeń pomiarowych i oprogramowanie przenośnych systemów komputerowych.

Sam proces przesuwania głowicy ultradźwiękowej po obiekcie może odbywać się ręcznie lub automatycznie w zależności od specyfiki zastosowania. Wynik skanowania ultradźwiękowego obrazowany jest na ekranie monitora w postaci kolorowej mapy badanej powierzchni, na której kolor każdego punktu odpowiada wyznaczonej w tym punkcie grubości ścianki. Jest to tzw. zobrazowanie typu C. Na uzyskanej mapie ubytki korozyjne uwidocznione są w postaci miejsc o odmiennych kolorach. Oprogramowanie tego typu urządzeń umożliwia ponadto uzyskanie różnego rodzaju przekrojów grubości ścianki oraz opracowanie statystyczne wyników (grubość średnia, minimalna, maksymalna, histogram rozkładu grubości itp.).

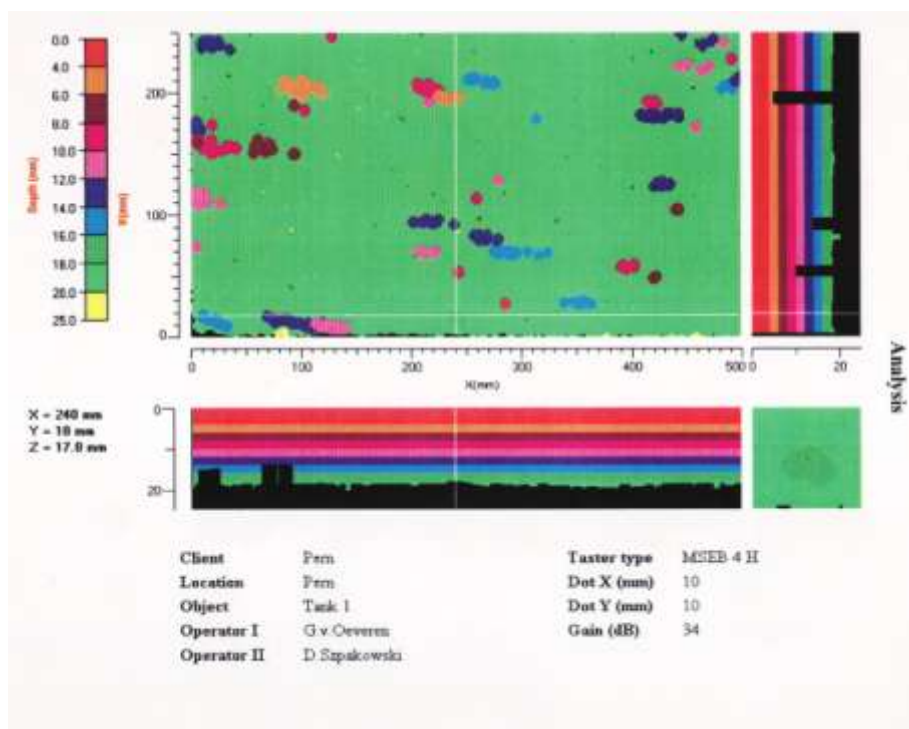
Systemy opracowane przez poszczególne firmy różnią się, między innymi, sposobem uzyskiwania informacji o współrzędnych punktu pomiarowego tj. o aktualnym położeniu głowicy ultradźwiękowej na powierzchni obiektu.



Rys.1. System MAPSCAN do sporządzania ultradźwiękowych map korozji

W systemie MAPSCAN firmy RTD (rys.1) zastosowano mechaniczny dekodery położenia połączony z głowicą ultradźwiękową za pomocą cienkiej nylonowej linki nawiniętej na bęben dekodera. Długość rozwinięcia linki oraz kąt, pod jakim wychodzi ona z dekodera są na bieżąco przeliczane przez komputer na współrzędne prostokątne obszaru

badania. W rezultacie każdy punkt badanej powierzchni może być odwzorowany na obrazie wyświetlanym na ekranie monitora. Urządzenie MAPSCAN pozwala na sporządzenie map ultradźwiękowych grubości ścianki o powierzchni 500 x 250 mm

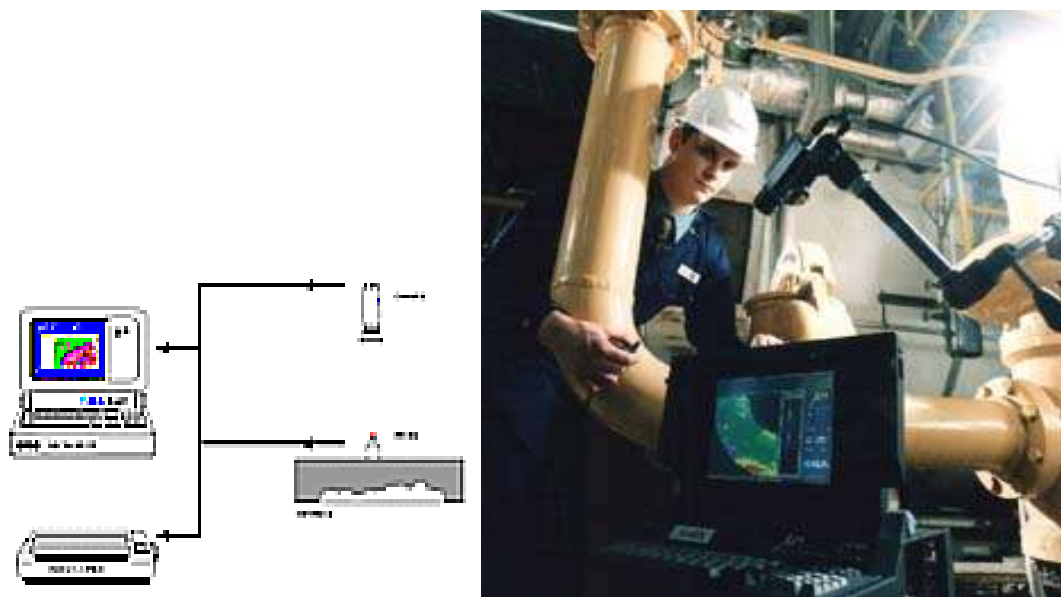


Rys.2. Ultradźwiękowa mapa korozji zbiornika magazynowego badanego w Polsce przez firmę NDTEST za pomocą urządzenia MAPSCAN

Przykładowy wydruk mapy ultradźwiękowej ścianki bocznej napelnionego zbiornika magazynowego, zrealizowany w Polsce przez NDTEST na rzecz PERN, pokazano na rys 2. Czas wykonania badania zależy od wielkości przetwornika stosowanej głowicy ultradźwiękowej (tj rozdzielczości mapy) i wynosi od kilkunastu minut do pół godziny. Pewnym ograniczeniem systemu MAPSCAN jest to, że nadaje się on jedynie do badania powierzchni płaskich lub nieznacznie zakrzywionych takich jak duże zbiorniki i rurociągi o średnicach powyżej DN 1400. System MAPSCAN był dzierżawiony przez NDTEST i jest osiągalny w ramach współpracy z RTD.

Ograniczenie związane z krzywizną badanej powierzchni zostało w znacznym stopniu wyeliminowane w urządzeniu SEESCAN, stanowiącego jedną z opcji większego systemu MICROPLUS brytyjskiej firmy AEA Technology. Takie urządzenie posiada w swoim wyposażeniu firma NDTEST. Do śledzenia położenia głowicy ultradźwiękowej, zastosowano tam zamiast dekodera mechanicznego, miniaturową kamerę telewizyjną (rys.3).

Obraz z kamery obejmuje powierzchnię obiektu oraz głowicy ultradźwiękowej, na której zamontowano diodę emitującą podczerwień. Dzięki temu położenie głowicy jest silnie wyeksponowane na tle obrazu obiektu i może być automatycznie odczytywane przez program komputerowy. W rezultacie ultradźwiękowa mapa grubości sporządzana jest na tle przyciemnionego obrazu rzeczywistego obiektu. Oprócz umożliwienia badania zakrzywionych powierzchni rozwiązanie takie daje dodatkowe korzyści takie jak ułatwienie operowania głowicą przez operatora, możliwość jednorazowego mapowania większych powierzchni obiektu oraz bezpośrednie powiązanie mapy grubości ścianki z wizualnym obrazem obiektu.



Rys.3. System SEESCAN do sporządzania ultradźwiękowych map korozji

Opisane powyżej systemy ultradźwiękowe stanowią bardzo pewne i dokładne narzędzie badania korozji zarówno ogólnej jak i wżerowej. Podstawowym ich ograniczeniem jest jednak wysoki koszt zakupu tych urządzeń oraz stosunkowo długie czasy badania i związane z tym koszty pracy i wykonania usługi polegającej na ocenie stanu technicznego obiektu badanego. Z tego względu konstrukcje techniczne o znacznych wymiarach jak np. zbiorniki magazynowe czy rurociągi mogą być przebadane tymi systemami jedynie w bardzo ograniczonym zakresie.

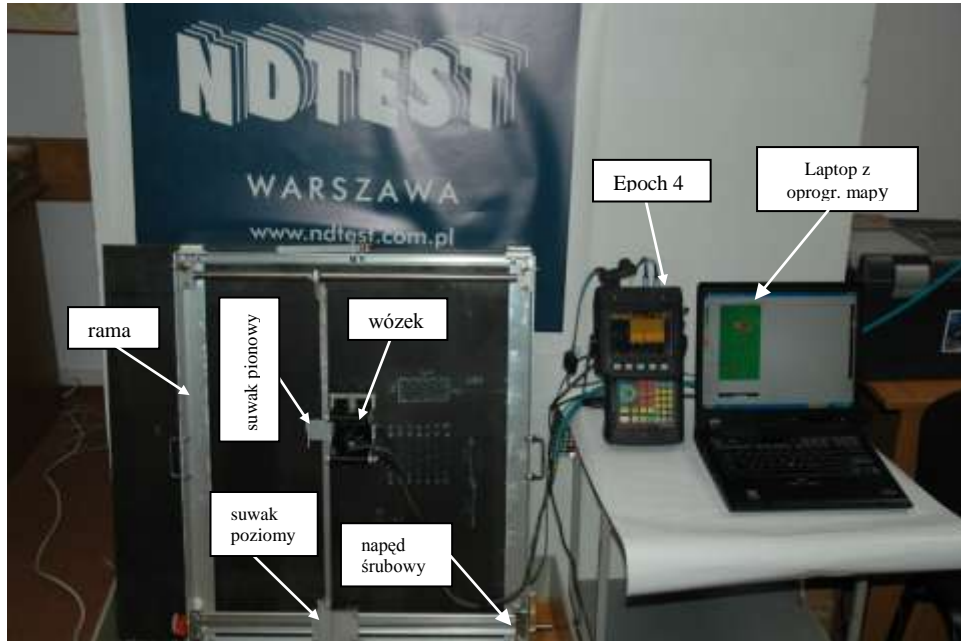
#### 4. Skanery mechaniczne do sporządzania ultradźwiękowych map korozji

Po doświadczeniach badań zaprezentowanymi powyżej systemami do sporządzania map korozji (dierzawionymi wraz z operatorem właściciela systemu) stwierdzono, że na polskim rynku usługa taka jest nieefektywna finansowo zarówno ze względu na koszt dzierżawy/zakupu takiego systemu jak też z uwagi na czas przygotowania mapy korozji o odpowiednim rozmiarze dla dużych obiektów. Dla oceny stanu technicznego eksploatowanych zbiorników magazynowych i długich odcinków rurociągów wymagane jest czasami pobieranie próbek map korozji o rozmiarach 0,5 x 0,5 m do 0,5 x 1 m w rozsądnych przedziałach czasowych. Temu służyła decyzja o zbudowaniu własnych skanerów oraz systemu do sporządzania map w oparciu o możliwie proste środki i rozsądne cenowo wydatki.

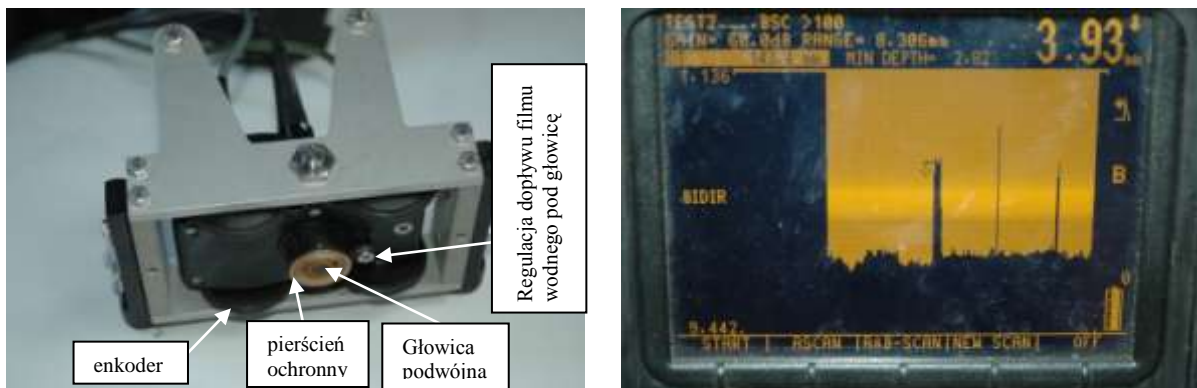
##### 4.1 Skaner do blach płaskich i zbiorników magazynowych o średnicy powyżej 10 m

Na rys. 4 przedstawiono system do sporządzania ultradźwiękowych map korozji na płaskich lub lekko zakrzywionych płatach blach oparty o następujące elementy:

- skaner mechaniczny o efektywnym obszarze skanowania 0,5 x 0,5 m. Składa się on:
  - z ramy mocowanej do blachy przy pomocy magnesów,
  - napędu śrubowego umożliwiającego ręczne przemieszczanie poziome suwaka o zadany skok,
  - suwaka przemieszczającego się ślizgowo kierunku pionowym – swobodnie górę i w dół;



Rys.4. System NDTEST do sporządzania ultradźwiękowych map korozji na płaskich lub lekko zakrzywionych płatach blach

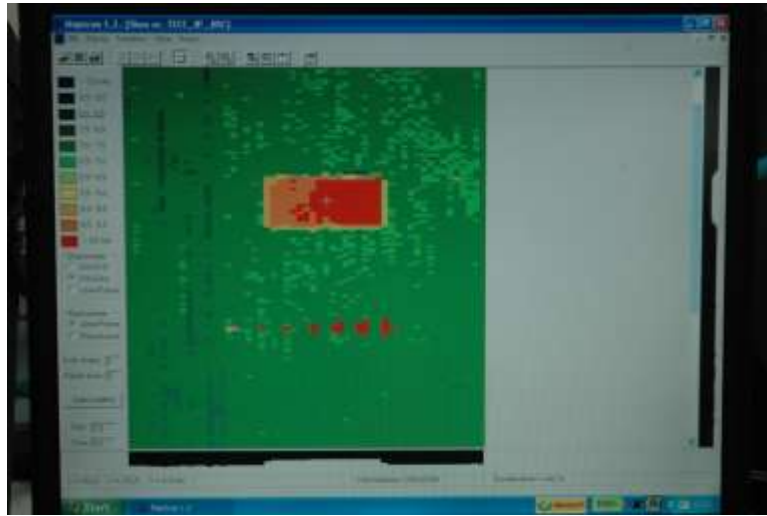


Rys.5. Wózek do zdejmowania profilu grubości oraz przykładowy zapis profilu grubości (B-scan) w aparacie Epoch 4 dla wybranego przekroju grubości blachy

- umieszczony w suwaku pionowym - wózek do zdejmowania profilu grubości (por. rys. 5), wyposażony:
  - w enkoder położenia przy jego ruchu w górę - w dół,
  - głowicę pomiarową grubości ścianki (zabezpieczoną pierścieniem ochronnym i zawieszoną sprężynie w mechanizmie wózka),
  - system regulowanego sprzężenia filmu wodnego zapewniającego stabilność sygnału ultradźwiękowego;
- aparat ultradźwiękowy Epoch 4, z opcją zapisu profilu grubości dla każdego kolejnego przekroju blachy (tzw. zobrazowanie B-scan – por. rys. 5 - prawy);
- laptop z oprogramowaniem Mapscan (autor S. Mackiewicz) przetwarzającym zapamiętane B-scany dla całego obszaru skanowania – w mapę grubości obszaru.

Oprogramowanie Mapscan pozwala uzyskać obraz grubości przeszukanego obszaru jako znanego zobrazowania C-scan w postaci mapy kolorów przyporządkowanych określonym zakresom grubości (por. rys. 6). Umożliwia ponadto uzyskanie różnego rodzaju przekrojów grubości ścianki oraz opracowanie statystyczne wyników dla każdej mapy

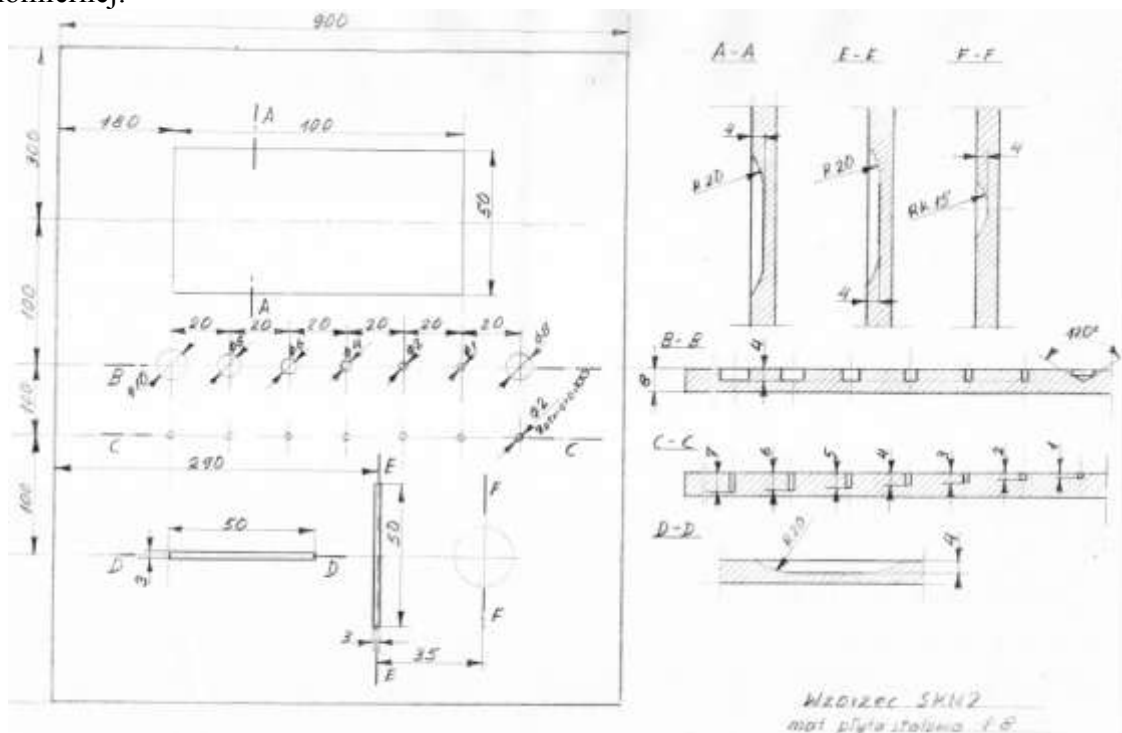
(grubość średnia, minimalna, maksymalna, histogram rozkładu grubości itp.) – podobnie jak to miało miejsce w omawianych poprzednio systemach.



Rys.6. Ultradźwiękowa mapa grubości uzyskana za pomocą systemu firmy NDTTEST

#### 4.2 Badania walidacyjne skanera płaskiego

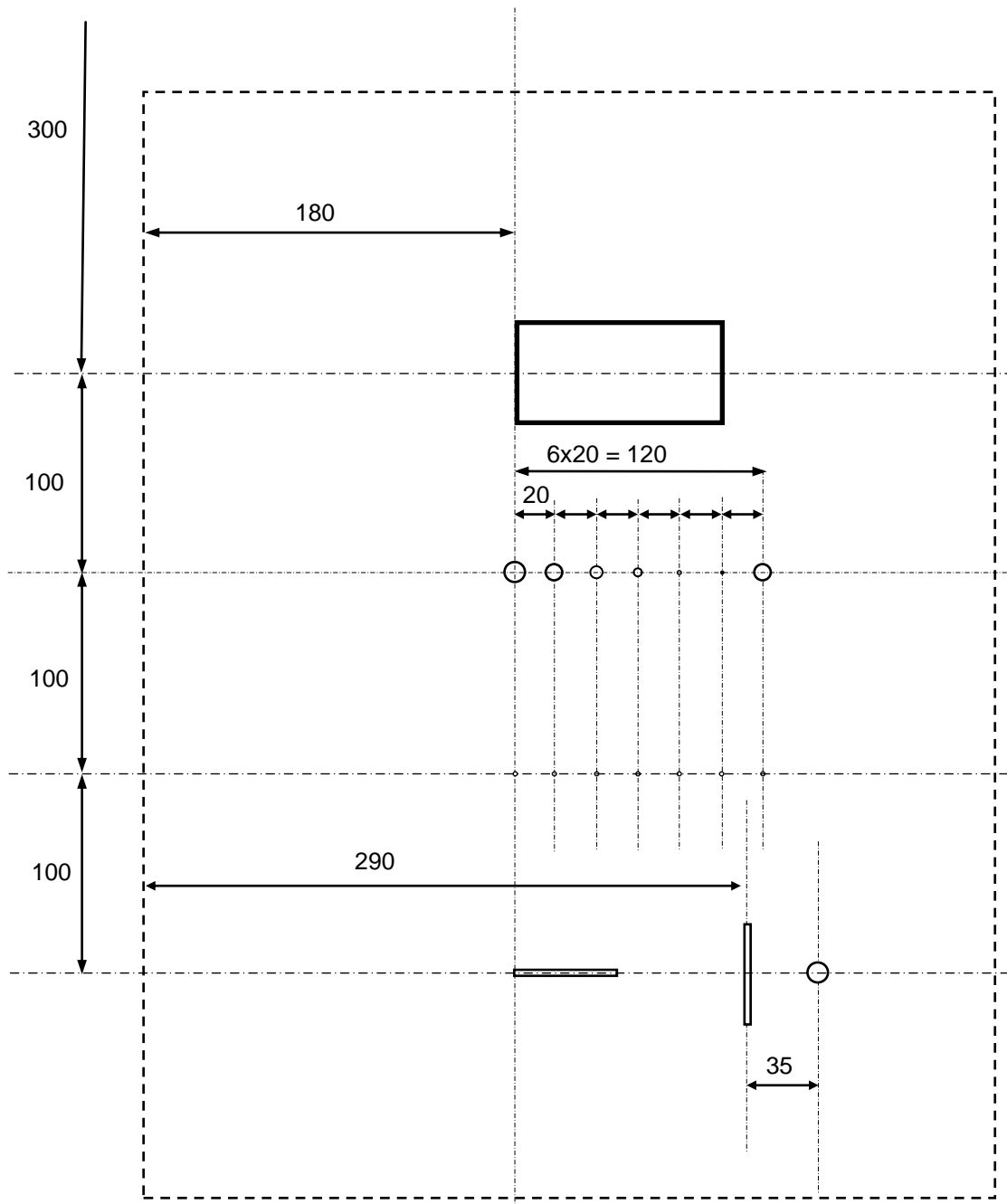
W celu sprawdzenia poprawności działania systemu i określenia jego parametrów pomiarowych zostały przygotowane płyty odniesienia z naniesionymi sztucznie wadami wzorcowymi implementującymi różne wielkości i postaci korozji: zarówno wżerowej jak też równomiernej.



Rys.7. Schemat rozmieszczenia, kształtu i rozmiarów wad na płycie odniesienia (na schemacie nie zachowano proporcji wymiarowych)

Na rys. 7 przedstawiono dla celów informacyjnych (bez zachowania proporcji wymiarowych) szkic i przekroje wykonanych wad, zaprojektowanych również pod kątem określenia odtwarzalności i rozdzielczości systemu pomiarowego oraz określenia czułości systemu na wykrywanie małych wad typu wżerów korozyjnych.

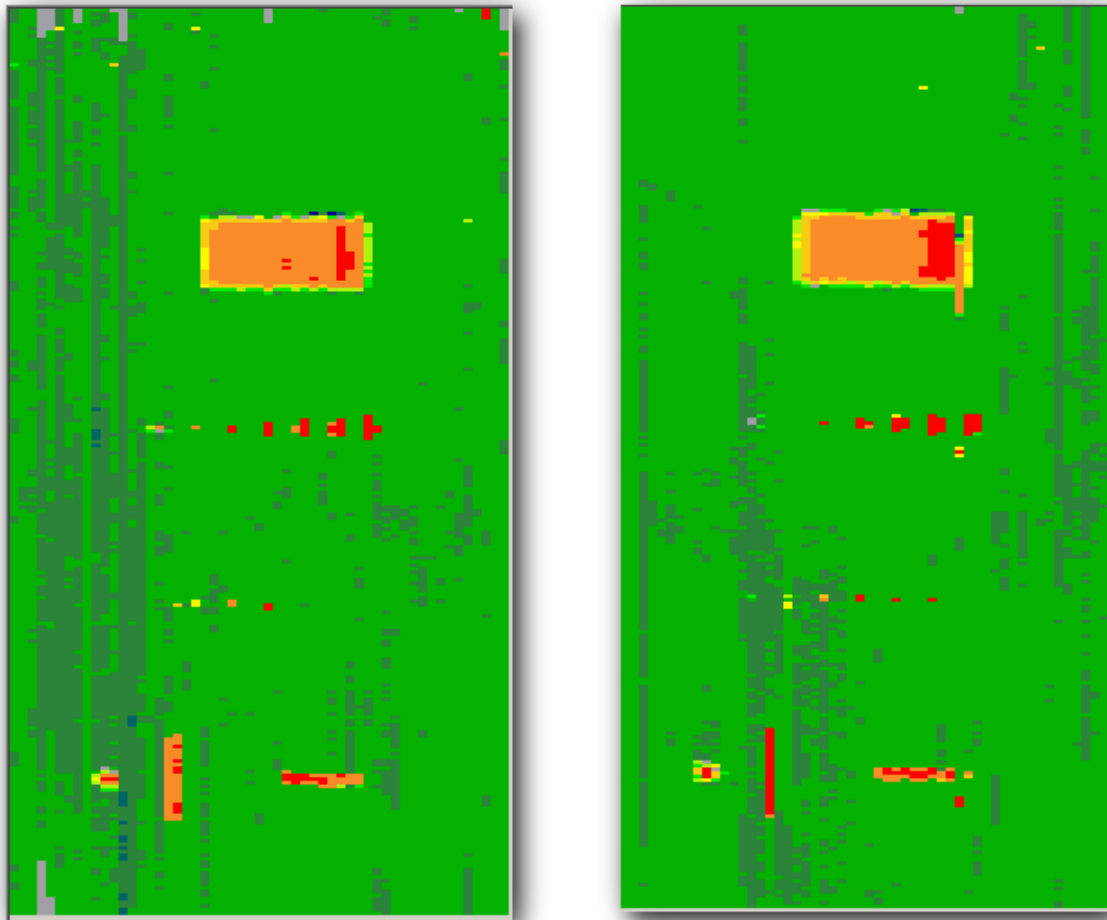
Natomiast na rys. 8 przedstawiono rozmieszczenie i rozmiary wad w rzeczywistych proporcjach wymiarowych w celu porównania ich obrazu na zeskanowanej ultradźwiękowo mapie sporządzonej dla tej płyty odniesienia (por. rys. 9 – przy czym mapa korozji przedstawia obraz odwrócony względem osi pionowej płyty).



Rys.8. Schemat rozmieszczenia i rozmiarów wad na płycie odniesienia (na schemacie zachowano proporcje wymiarowe – widok od strony wad na płycie)

Porównanie obrazu rzeczywistego i ultradźwiękowego pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- system pozwala na uzyskiwanie zadowalającej powtarzalności wyników (obrazy większych wad na obydwu obrazach ultradźwiękowych powtórzyły się);
- system pozwala na uzyskiwanie zadowalającej odtwarzalności wyników (uzyskano bardzo dobrą zgodność ze stanem rzeczywistym dla wad dużych



Rys.9. Ultradźwiękowe mapy grubości dla płyty odniesienia sporządzone dla dwóch różnych skanów tego samego obszaru (mapa korozji przedstawia widok od strony powierzchni skanowania - obraz odwrócony względem osi pionowej płyty na rys. 8)

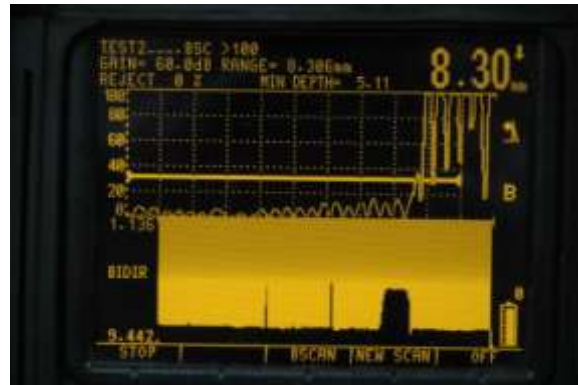
usytuowanych równoległe powierzchni blachy i zadowalającą – dla wad małych usytuowanych równoległe powierzchni blachy bądź wad dużych o powierzchni stożka lub kuli);osiągalna czułość systemu pozwala wykrywać wady typu wżerów korozyjnych (usytuowane w połowie grubości blachy) o średnicy 2 mm, a nawet dla jednego ze skanów o średnicy - 1 mm;

- rozdzielczość odległościowa systemu wymaga jeszcze dopracowania – nie zostały wykryte małe reflektory ( $\Phi 2\text{ mm}$ ) o bardzo małej i dużej głębokości, tzn. znajdujące się w odległości 1 mm od powierzchni naprzeciwległej oraz powierzchni skanowania;

Należy podkreślić również osiągnięcie założonego celu, jeżeli chodzi o prędkość skanowania obszarów płyty odniesienia o wymiarach 0,5 x 0,5 m. Obydwie mapy grubości, o prezentowanej na rys. 9 dokładności wymiarowania, uzyskiwano w czasie około pół godziny, co jest wynikiem zadowalającym zważywszy, że badany obszar jest 2-krotnie większy od map uzyskiwanych systemem MAPSCAN firmy RTD (por. rys. 3).

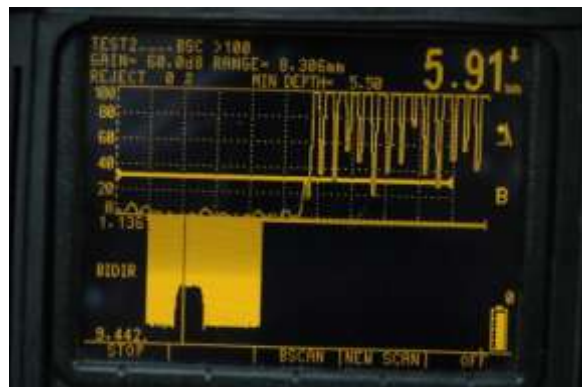
Warto również przyjrzeć się bliżej uzyskiwanym zobrazowaniom wyników na ekranie aparatu ultradźwiękowego Epoch 4, które są podstawą dla uzyskiwanych zobrazowań końcowych w postaci map. Przy wybranej czułości układu poprawny profil grubości ścianki uzyskuje przy dostatecznie stabilnym sygnale (sprężenie w postaci filmu wodnego o laminarnym przepływie) oraz właściwie dobranym stosunku sygnału do szumu – por, A-

scan na rys. 10 oraz rys. 11). W przypadku nie dopełnienia jednego z tych warunków będzie się uzyskiwać zafalszowane zobrazowanie B-scan albo przez kształt zбочza sygnału albo przez szумы.



Rys.10. Przykładowe zobrazowanie ekranu w aparacie Epoch 4 dla wybranego przekroju profilu grubości (A + B-scan)

Powyższe uwagi mają również znaczenie przy określaniu rozmiarów wskazania techniką przesuwu głowicy podwójnej nad wadą. Charakterystyka kierunkowa głowicy podwójnej wykazuje pewien obszar podwyższonej czułości w obszarze tzw. ogniska głowicy i wtedy uzyskuje się poprawne echa określające dobrze zarówno położenie jak też rozmiar wady – jak to przykładowo pokazano na rys. 11 dla reflektorów dużych dna i wady (należy zwrócić uwagę, że w uzyskiwanym profilu sygnału dla głowicy podwójnej rozsądne jest tylko wymiarowanie tzw. techniką zбочza).



Rys.11. Zobrazowanie ekranu w aparacie Epoch 4 dla wybranego położenia echa dna (lewy) oraz echa wady dużej (prawy) profilu grubości (A + B-scan)

Przy określaniu położenia i rozmiarów wskazania techniką przesuwu głowicy podwójnej nad wadami o małych rozmiarach popełnia się znacznie większe błędy zarówno w określaniu położenia (zmiana nachylenia zбочza na skutek zmniejszenia wysokości sygnału wady małej) jak też rozmiaru (często wysokość echa jest niewystarczająca do uzyskania wskazania w bramce). Dlatego w przypadku małych reflektorów (lub dużych o niekorzystnym położeniu względem wiązki ultradźwiękowej) istotna i bardziej wiarygodna jest przede wszystkim informacja o ich położeniu

#### 4.3 Skaner do rur w zakresie średnic od DN 250 do DN 1400

Na rys. 12 przedstawiono przykładowo system do sporządzania ultradźwiękowych map korozji na elementach rurowych o średnicy nominalnej DN 300 oparty o następujące elementy:

- skaner mechaniczny o efektywnym obszarze skanowania 0,5 x 0,5 m. Składa się on:

- z ramy dostosowanej do średnicy rury w postaci dwóch wykrepowanych do krzywizny łuków spiętych pasami na obwodzie ,
- napędu śrubowego umożliwiającego ręczne przemieszczanie suwaka wzdłuż długości rury o zadany skok,
- suwaka obwodowego przemieszczającego się ślizgowo po obwodowym łuku prowadzącym – swobodnie po fragmencie obwodu rury;



Rys.12. System NDTEST do sporządzania ultradźwiękowych map korozji na elemencie rurowym o średnicy nominalnej DN 300

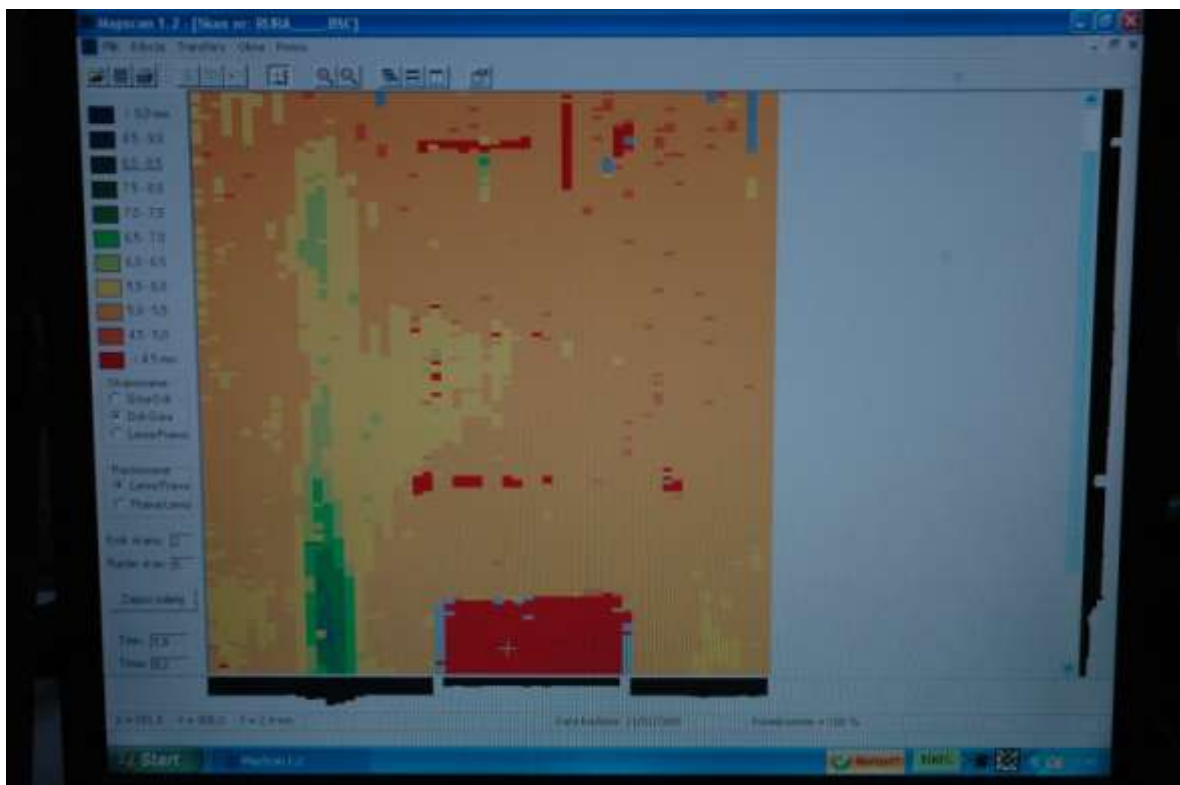


Rys.13. Przykładowy zapis profilu grubości (B-scan) w aparacie Epoch 4 dla wybranego przekroju grubości blachy oraz zapis mapy korozji przetworzonej przez oprogramowanie Mapscan w laptopie

- umieszczony w suwaku obwodowym - wózek do zdejmowania profilu grubości, wyposażony:
  - w enkoder położenia przy jego ruchu po obwodzie,
  - głowicę pomiarową grubości ścianki (zabezpieczoną pierścieniem ochronnym i zawieszoną sprężyną w mechanizmie wózka),

- system regulowanego sprzężenia filmu wodnego zapewniającego stabilność sygnału ultradźwiękowego;
- aparat ultradźwiękowy Epoch 4, z opcją zapisu profilu grubości dla każdego kolejnego przekroju rury (tzw. zobrazowanie B-scan – por. rys. 13);
- laptop z oprogramowaniem Mapscan (autor S. Mackiewicz) przetwarzającym zapamiętane B-scany dla całego obszaru skanowania – w mapę grubości obszaru – por. rys. 13.

Oprogramowanie Mapscan pozwala uzyskać obraz grubości przeszukanego obszaru jako znanego zobrazowania C-scan w postaci mapy kolorów przyporządkowanych określonym zakresom grubości (por. rys. 14). Umożliwia ponadto uzyskanie różnego rodzaju przekrojów grubości ścianki oraz opracowanie statystyczne wyników dla każdej mapy (grubość średnia, minimalna, maksymalna, histogram rozkładu grubości itp.) – podobnie jak to miało miejsce w przypadku płaskiego skanera.

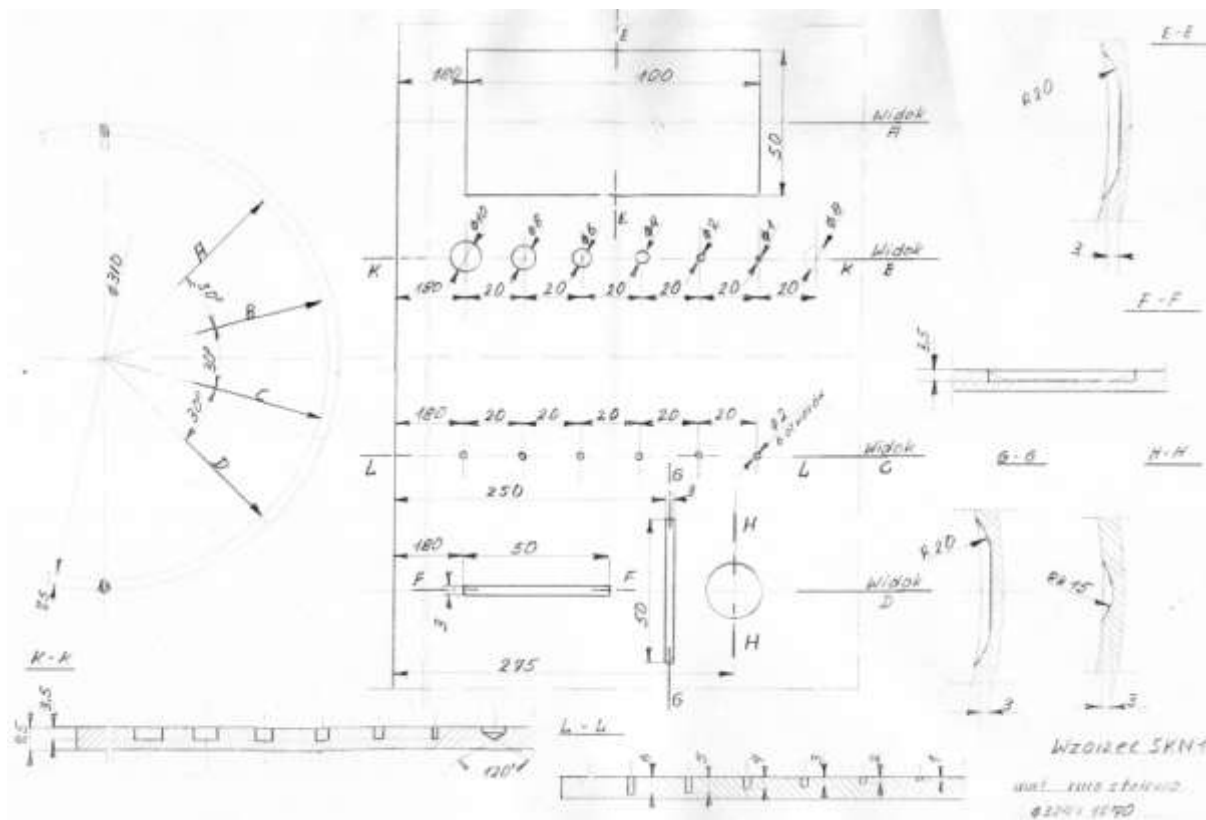


Rys.14. Ultradźwiękowa mapa grubości uzyskana za pomocą systemu do skanowania rurociągów

#### 4.4 Badania walidacyjne skanera rurowego

W celu sprawdzenia poprawności działania systemu i określenia jego parametrów pomiarowych zostały przygotowane rury odniesienia z naniesionymi sztucznie wadami wzorcowymi implementującymi różne wielkości i postacie korozji: zarówno wżerowej jak też równomiernej podobnie jak w przypadku skanera płaskiego

Na rys. 15 przedstawiono dla celów informacyjnych (bez zachowania proporcji wymiarowych) szkic i przekroje wykonanych wad, zaprojektowanych również pod kątem określenia odtwarzalności i rozdzielczości systemu pomiarowego oraz określenia czułości systemu na wykrywanie małych wad typu wżerów korozyjnych.



Rys.15. Schemat rozmieszczenia, kształtu i rozmiarów wad na rurowej płycie odniesienia (na schemacie nie zachowano proporcji wymiarowych)

Wykonanie rurowej próbki odniesienia nastęrczało znaczne trudności w przypadku średnicy DN 300, ponieważ trzeba najpierw wyciąć fragment rury, następnie wykonać sztuczne reflektory zgodnie z planem przedstawionym na rys. 15 na wewnętrznej powierzchni i ostatecznie z powrotem wspawać tak spreparowany fragment rury w całość. Jak widać z mapy grubości przedstawionej na rys. 14, montaż tego fragmentu spowodował zmienną grubość w miejscu spoiny oraz miejscowe nierówności zewnętrznej powierzchni skanowania. W rezultacie obraz zaprojektowanych wad został częściowo zakłócony przez niemożliwość precyzyjnego skanowania.

Dlatego w tym przypadku nie da się wyciągnąć tak jednoznacznych wniosków jak w przypadku skanera płaskiego. Ograniczono się do stwierdzenia, że w przypadku skanowania powierzchni o dużej krzywiznie osiąga gorszą dokładność lokalizacji i wymiarowania wad. Nie wykryto praktycznie wskazań o średnicy 2 mm, przy czym jednocześnie na mapie na rys. 14 zanotowano szereg fałszywych wskazań, które są przekroczeniami bramki przez szumy (wynikające między innymi z „niedopasowania” płaskiej głowicy do skanowanej krzywizny).

Dlatego poprzestano tu na ogólnym stwierdzeniu, że osiągnięto zadowalającą dokładność lokalizacji wad dużych (poczynając od średnicy 4 mm i więcej).

Proces walidacji skanera rurowego zostanie powtórzony po przygotowaniu skanera i próbki odniesienia o większej średnicy – DN 1400.

Należy podkreślić, że również dla skanera rurowego skanowanie obszarów odniesienia o wymiarach 0,5 x 0,5 m, o prezentowanej na rys. 14 dokładności, uzyskiwano w czasie około pół godziny, co jest wynikiem zadowalającym.

## 5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy i badań walidacyjnych systemów dla uzyskiwania map korozji można sformułować poniższe stwierdzenia:

1. Dla wiarygodnej oceny stanu technicznego eksploatowanych zbiorników magazynowych i długich odcinków rurociągów wymagane jest czasami pobieranie próbek map korozji o rozmiarach 0,5 x 0,5 m do 0,5 x 1 m w rozsądnych przedziałach czasowych.
2. Prędkość skanowania obszarów odniesienia o wymiarach 0,5 x 0,5 m pozwalała uzyskiwanie mapy grubości, o wystarczającej dokładności wymiarowania, w czasie około pół godziny, co jest wynikiem zadowalającym.
3. Porównanie rzeczywistego i ultradźwiękowego obrazu wad pozwala na sformułowanie następujących wniosków dla skanera płaskiego:
  - system pozwala na uzyskiwanie zadowalającej powtarzalności wyników (obrazy większych wad na obydwu obrazach ultradźwiękowych powtórzyły się);
  - system pozwala na uzyskiwanie zadowalającej odtwarzalności wyników (uzyskano bardzo dobrą zgodność ze stanem rzeczywistym dla wad dużych usytuowanych równoległe powierzchni blachy i zadowalającą – dla wad małych usytuowanych równoległe powierzchni blachy bądź wad dużych o powierzchni stożka lub kuli);
  - osiągalna czułość systemu pozwala wykrywać wady typu wżerów korozyjnych (usytuowane w połowie grubości blachy) o średnicy 2 mm, a nawet dla jednego ze skanów o średnicy - 1 mm;
  - rozdzielczość odległościowa systemu wymaga jeszcze dopracowania – nie zostały wykryte małe reflektory ( $\Phi 2\text{ mm}$ ) o bardzo małej i dużej głębokości, tzn. znajdujące się w odległości 1 mm od powierzchni naprzeciwległej oraz powierzchni skanowania
4. W przypadku skanera rurowego DN 300 przestano tu na ogólnym stwierdzeniu, że osiągnięto zadowalającą dokładność lokalizacji wad dużych (poczynając od średnicy 4 mm i więcej).
5. Proces walidacji skanera rurowego zostanie powtórzony po przygotowaniu skanera i próbki odniesienia o większej średnicy – DN 1400.
6. Skuteczne sporządzanie map korozji jako losowych próbek, ale reprezentatywnych dla danej konstrukcji obszarów pomiarowych, traktuje się jako wstępny etap oceny stanu technicznego eksploatowanego obiektu.
7. Rozwiązanie problemu stanowi tutaj zastosowanie odpowiednich technik statystycznych. Statystyczna Teoria Wartości Ekstremalnych [1] pozwala na ekstrapolację wniosków zebranych dla próbek losowych na obszar całej konstrukcji.

## 6. Literatura

1. Narayan R, Joshi., Statistical Analysis of UT Corrosion Data from Floor Plates of a Crude Oil Aboveground Storage Tank., Materials Evaluation, July 1994.
2. J. R. Rudlin, Review of existing and possible techniques for corrosion under insulation and wall thickness measurement in steel pressure containments, INSIGHT, 39, No 6, June 1997.
3. Mackiewicz S., Śliwowski M.. Badanie ubytków korozyjnych, Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 1999