



**DIAGNOSTYKA STANU TECHNICZNEGO RUROCIĄGÓW
STAŁOWYCH Z WYKORZYSTANIEM TŁOKÓW
ULTRADŹWIĘKOWYCH WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI**

**DIAGNOSTICS OF STEEL PIPELINES WITH USAGE
OF THE HIGH DEFINITION ULTRASONIC INTELLIGENT PIGS**

Paweł Raczyński*,**, Krzysztof Warnke**

*Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki

**Centrum Diagnostyki Rurociągów i Aparatury

Słowa kluczowe: korozja, diagnostyka, rurociąg, tłoki inteligentne
Keywords: corrosion, diagnostics, pipeline, intelligent pigs

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane przykłady możliwości pomiarowych ultradźwiękowych tłoków wysokiej rozdzielczości do badania stanu ścianek rurociągów. Przedstawiono techniki zmierzające do precyzyjnej lokalizacji wykrywanych wad oraz opisano znaczenie i metodykę oszacowania trendów rozwojowych wad. Wskazano również na możliwości synergii informacji otrzymywanych różnymi technikami pomiarowymi w oparciu o systemy GIS. Na koniec podano przykłady zdolności detekcyjnej tłoków w stosunku do wad materiałowych i deformacji geometrycznych.

Summary

The paper presents selected examples of the possibilities of high-resolution ultrasonic pigs for examination of the walls of steel pipelines. Techniques aimed at precise location of detected defects and description of the importance and methodology of estimating trends in development defects are described. It also indicated the possibility of synergies information received different measuring techniques based on GIS systems. Finally, examples of the pig capabilities for the detection of defects in material and geometric deformation are presented.

1. Wprowadzenie

Eksploatacja rurociągów, podobnie jak każdego innego systemu technicznego, obarczona jest ryzykiem związanym z możliwością ich uszkodzenie zarówno przez procesy środowiskowe jak i działalność osób trzecich. O ile trudno przewidywać działania ludzką, o tyle procesy związane z oddziaływaniem na konstrukcję środowiska przebiegają stosunkowo powoli i przy obecnie dostępnych środkach technicznych dość łatwo podają się monitorowaniu, modelowaniu zachodzących procesów i predykcji przyszłego stanu technicznego. Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów przesyłowych wynika z odpowiedzialności spoczywającej na operatorze i dążenia do jego minimalizacji. Operator rurociągu jest odpowiedzialny za życie i zdrowie ludzi żyjących i pracujących w otoczeniu rurociągu, mienia własnego oraz osób trzecich, ale z drugiej strony jest zainteresowany maksymalizacją zysków z eksploatowanej konstrukcji. Najbardziej efektywną metodą minimalizacji ryzyka jest zapobieganie katastrofom. Punktem wyjścia dla efektywnej diagnostyki eksploatowanej konstrukcji jest rzetelna ocena jej stanu technicznego. Jedną z technik wspomagających optymalizację kosztów związanych z realizacją wyżej nakreślonych zadań jest wykorzystanie tłoków inteligentnych, które w sposób nieinwazyjny badają stan techniczny rurociągu z jednoczesnym zapewnieniem ciągłości tłoczeń.

Na świecie opracowano wiele rodzajów technik i technologii pomiarowych, wykorzystujących różne zjawiska fizyczne do oceny stanu technicznego konstrukcji stalowych i rurociągów w szczególności. Poszczególne techniki dostarczają różnorodnych informacji na temat stanu badanej konstrukcji i umożliwiają detekcję i parametryzację szerokiej gamy defektów. Aby uzyskać pełny obraz stanu technicznego badanego obiektu, należy łączyć wiele różnych technik pomiarowych, które wzajemnie się uzupełniają.

Na skuteczność podejmowanych decyzji istotny wpływ ma jakość przesłanek, na jakich decyzje są podejmowane. W przypadku rurociągów istotną rolę odgrywa jakość i dokładność pomiarów wykonywanych przez tłoki pomiarowe. Z tego też punktu widzenia bardzo istotne jest posługiwanie się tłokami o wysokiej rozdzielczości, pozwalającej wykryć defekty ścianki rurociągu we wczesnym etapie ich rozwoju a przy okazji kolejnych inspekcji określić tempo ich rozwoju a na tej podstawie podjąć racjonalne korki naprawcze. [1]

2. Stosowane urządzenia pomiarowe

W praktyce stosowane są tłoki inteligentne wykorzystujące różne zjawiska fizyczne mierzące do oceny procesów zachodzących w ściance badanego rurociągu. W niniejszym artykule ograniczymy się do tzw. tłoków ultradźwiękowych. Wśród tłoków ultradźwiękowych można wyróżnić dwa rodzaje tłoków do sondowania ścianek rurociągu. Zasadniczym ich przeznaczeniem jest ocena stanu ścianek rurociągu i detekcja ubytków oraz pęknięć materiału, z którego wykonane są rury. Z uwagi na tematykę Konferencji skupimy się na technikach nastawionych na detekcję i oszacowanie parametrów geometrycznych ścianki rurociągu spowodowanych procesami korozyjnymi [2] [3].

Idea działania tego typu tłoka pomiarowego polega na wykorzystaniu zestawu grubościomierzy ultradźwiękowych skanujących od wnętrza powierzchnię ścianki rurociągu. Osadzenie grubościomierzy na sztywnym pierścieniu pozwala równocześnie na monitorowanie zmian geometrii ścianki rurociągu. Emitowana przez przetwornik fala akustyczna powraca do przetwornika w postaci szeregu ech odbitych od powierzchni styku materiałów o różnej im-

pedancji akustycznej. Pierwsze z tych ech pochodzi od wewnętrznej ścianki rurociągu. Na podstawie znajomości prędkości dźwięku w tłoczonym medium oraz znajomości gabarytów sztywnego pierścienia, pomiar czasu powrotu pierwszego echa pozwala precyzyjnie ocenić kształt i wymiary przekroju poprzecznego rurociągu. W przypadku tłoków wysokiej rozdzielczości, o dużej liczbie przetworników i dużej częstotliwości repetycji pomiarów uzyskuje się gęstą siatkę pomiarów zarówno po obwodzie jak i wzdłuż badanego rurociągu (rys. 1). Wysoka rozdzielczość pomiarów ultradźwiękowych pozwala na wykorzystanie zebranych danych do wykonania obliczeń naprężeń powstałych wewnątrz konstrukcji rurociągu w wyniku odkształceń i deformacji.

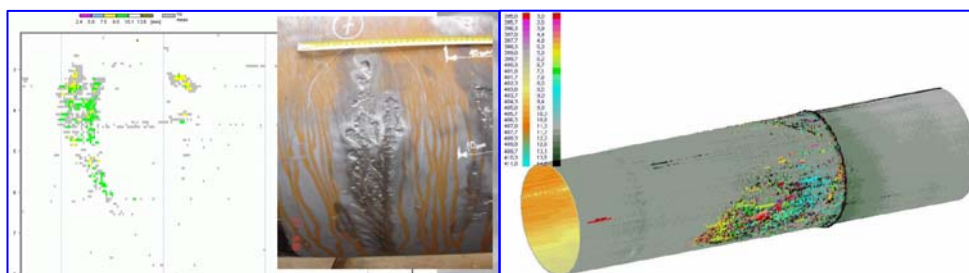


Gęstość siatki pomiarowej pozwala zastosować tu np. metodę elementów skończonych. W przypadku ubytków materiału ścianki, precyzyjne oszacowanie ich rozmiarów umożliwia określenie ich wpływu na wytrzymałość ścianki z zastosowaniem różnych norm takich jak ASME B31G, RSTRENG czy DNV [3][4].

Rys. 1. Ultradźwiękowy tłok wysokiej rozdzielczości

3. Możliwości tłoków wysokiej rozdzielczości

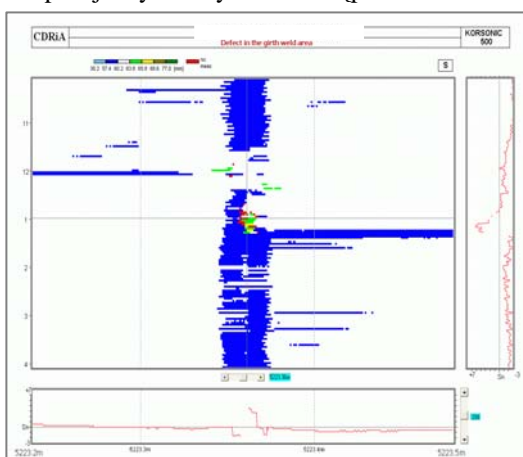
Zdolność detekcyjna współczesnych tłoków ultradźwiękowych pozwala na wykrycie i określenie parametrów praktycznie wszystkich defektów zagrażających w sposób istotny bezpieczeństwu eksploatacji rurociągu. Przykład wykrywanych wad i różne sposoby ich prezentacji przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przykłady anomalii: po lewej zewnętrzny ubytek metalu, po prawej laminacja przy spoinie obwodowej

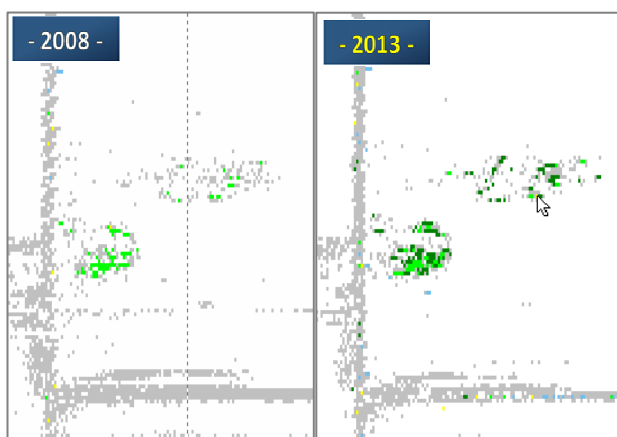
Doskonałym przykładem możliwości tłoków wysokiej rozdzielczości z przetwornikami na sztywnym pierścieniu może być możliwość wykrywania defektów spoin obwodowych polegających na niepełnym przetopie spoiny i pocienieniu ścianki rury w obrębie spoiny wynikającym z niepełnego wypełnienia jej od wewnątrz. Na rysunku 3 przedstawiono przykład zapisu wady tego typu zarejestrowanej przy rozdzielczości wzdłużnej równej 1 mm.

Tłoki ultradźwiękowe, a zwłaszcza tłoki wysokiej rozdzielczości oferują możliwość śledzenia dynamiki rozwoju wad. Obserwacja rozwoju wady zarejestrowanej podczas kolejnych inspekcji wykonanych w odstępach kilkuletnich pozwala na ocenę aktywności wady i na estymację tempa jej rozwoju. Jest to cenna wskazówka dla operatora odnośnie tworzenia harmonogramu napraw rurociągu.



Rys. 3. Ubytek materiału w obrębie spoiny

Przykładowe zestawienie obrazów wad uzyskanych podczas kolejnych inspekcji w odstępie 5 lat pokazano na rysunku 4. W okresie pomiędzy inspekcjami przyrost głębokości wady wyniósł 1,4 mm. Znając głębokość i długość wady, grubość ścianki w otoczeniu wady oraz tempo jej rozwoju można z wykorzystaniem normy np. ASME B31G wyznaczyć czas, po którym, wada stanie się groźna i będzie wymagała redukcji ciśnienia roboczego lub naprawy rurociągu.



Rys. 4. Rozwój zewnętrznego ubytku metalu w ciągu 5 lat (wzrost głębokości 1,4 mm)

Tempo rozwoju wady zależy od wielu czynników. Mają na nie wpływ warunki środowiskowe takie jak rodzaj gleby, wilgotność oraz czynniki antropogeniczne takie jak np. rodzaj i jakość ochrony elektrochemicznej. Stąd tempo rozwoju wad występujących w różnych punktach rurociągu będzie różne. Analiza porównawcza poszczególnych wad jest pracochłonna i prowadzi do rozbieżnych wniosków odnośnie terminarza niezbędnych prac naprawczych.

Do zagadnienia oszacowania tempa zmian stanu technicznego rurociągu można także podejść w sposób całościowy. Dysponując wynikami inspekcji wykonanych w jakimś odstępie czasu (w Europie jest to najczęściej okres 5 lat) można stosując metody statystyczne dokonać oszacowania tempa zmian zachodzących w ścianie rurociągu a także dokonać predykcji jej stanu na lata następne. Metodyka polega na znalezieniu takiego rozkładu prawdopodobieństwa, który jest zgodny z histogramami rozkładu głębokości wad na danym odcinku rurociągu w kolejnych badaniach. Bardzo często jest to np. rozkład logarytmów głębokości wad, który może być dobrze zamodelowany rozkładem normalnym (Gaussa). Na podstawie

zmian zachodzących w badanej konstrukcji można określić tempo zmian wyrażoną zmianami parametrów statystycznymi otrzymanych rozkładów. Zakładając niezmiennosć warunków środowiskowych oraz parametrów eksploatacji rurociągu możemy postawić hipotezę o liniowości zmian parametrów rozkładu prawdopodobieństwa i dokonać predykcji stanu badanego rurociągu na lata następne. Oczywiście tak postawioną hipotezę należy zweryfikować. Istnieją narzędzia statystyczne służące do weryfikacji hipotez. Znając zależności pomiędzy parametrami statystycznymi rozkładu a realizacjami procesu statystycznego możemy dokonać predykcji takich parametrów jak średnia lub mediana głębokości uszkodzeń, wartości graniczne głębokości wad czy też czasokres, po którym najgłębsze wady osiągną wartość krytyczną w świetle przyjętego kryterium. [5][6] Wyniki predykcji można wykorzystać do optymalizacji określenia terminów kolejnych inspekcji, a także do racjonalnego planowania napraw lub modyfikacji modelu eksploatacji rurociągu.

4. Precyzyjna lokalizacja wad

Detekcja i oszacowanie istotności wykrytych wad ma sens jeżeli jesteśmy w stanie precyzyjnie określić ich lokalizację, co umożliwi ich weryfikację i naprawę. Szerokie możliwości dają tu współczesne systemy typu GIS pozwalające na ścisłe powiązanie położenia wad z informacjami geodezyjnymi. Klasyczną techniką bazowania przy określeniu położenia wad na nawigacji zliczeniowej w oparciu o odometr tłoka charakteryzuje kumulacja błędów. Nawet przy uwzględnieniu techniki „skracania bazy” polegającej na okresowym korygowaniu wskazań odometru na podstawie odnoszenia wskazań odometru do precyzyjnie określonych punktów w terenie (tzw. technika znacznikowania) pozwala zmniejszyć błąd pozycjonowania do kilku metrów.

Współcześnie coraz częściej dokładność pozycjonowania wad wspiera się przy użyciu nawigacji inercyjnej. Coraz szerzej dostępne są wysoko stabilne i precyzyjne triady akcelerometrów oraz żyroskopów. Zespoły takie wsparte układami korekcji oraz jednostkami obliczeniowymi tworzą tzw. IMU (Inertial Measurement Unit) umożliwiające prowadzenie precyzyjnej nawigacji. Nawigacja ta wsparta techniką znacznikowania oraz systemem GPS pozwala na prowadzenie nawigacji z decymetrową dokładnością.

Nawigacja dostarcza informacji o współrzędnych geograficznych (np. w systemie WGS84) lub w stosowanym systemie geodezyjnych współrzędnych płaskich (np. PUWG 2000), co pozwala wszelkie informacje dotyczące badanego rurociągu nanieść na mapy (rys. 5). Zapewnia to nie tylko minimalizację kosztów wykonywanych napraw, ale daje również ogromne możliwości wynikające z możliwości agregacji informacji pozyskanych z badaniem tłokiem z informacjami pozyskanymi innymi technikami.

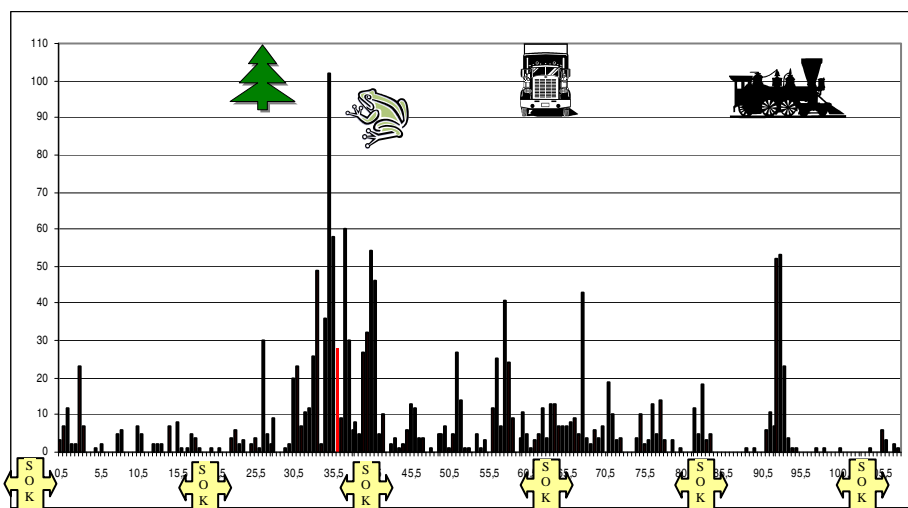


Rys. 5. Wyniki inspekcji naniesione na ortofotomapę

5. Synergia w badaniu rurociągów

Rurociągi są obiektami rozległymi. Konstrukcja ta, wraz z elementami infrastruktury rozłożona jest na dużym obszarze, często setek kilometrów. Na obszarze tym występują różne warunki obejmujące np. ukształtowanie terenu czy warunki hydrologiczne. Konstrukcja rurociągu wchodzi również w interakcję z elementami infrastruktury przemysłowej lub komunikacyjnej tworząc złożony system wzajemnych oddziaływań. Systemy GIS stanowią doskonałą bazę integracji informacji o stanie badanego rurociągu oraz informacji o znajdujących się w pobliżu innych obiektów przemysłowych i instalacji oraz wiele informacji charakteryzujących środowisko geograficzne i przyrodnicze rurociągu. Kompletność oraz łatwy dostęp do informacji umożliwia wyciąganie bardziej kompleksowych wniosków, racjonalizację podejmowanych działań oraz obniżenie ich kosztów.

Załóżmy, że wykonaliśmy badanie rurociągu przy pomocy tłoka inteligentnego. W wyniku badania otrzymaliśmy listę wad wraz z ich precyzyjną lokalizacją. Analiza otrzymanych danych pozwala stwierdzić, że zewnętrzne ubytki metalu na badanym odcinku są rozłożone nierównomiernie. Pomijając problem ich naprawy powinniśmy zastanowić się nad przyczynami ich powstania oraz nad działaniami zmierzającymi do zahamowania procesu ich rozwoju. Jednym z istotnych czynników powodujących powstanie zewnętrznych ubytków metalu jest elektrokorozja spowodowana uszkodzeniami izolacji i brakiem lub niewłaściwą ochroną katodową. Jak znaleźć miejsca, w których zachodzą intensywne procesy elektrokorozyjne? Jest wiele metod np. precyzyjna metoda pomiarów intensywnych jest pracochłonna i droga. Chcąc obniżyć koszty i szybko odnaleźć miejsca najbardziej zagrożone możemy wykorzystać dane inspekcyjne oraz informacje z systemu GIS i wytypować do badania najbardziej zagrożone fragmenty rurociągu.



Rys. 6. Przykład synergii wyników badań i danych z systemu GIS

Na rys. 6 przedstawiono w dużym uproszczeniu hipotetyczną sytuację, w której na histogram rozkładu zewnętrznych ubytków metalu wzdłuż badanego rurociągu nałożono informacje o położeniu stacji ochrony katodowej oraz symbolicznie informacje o warunkach środo-

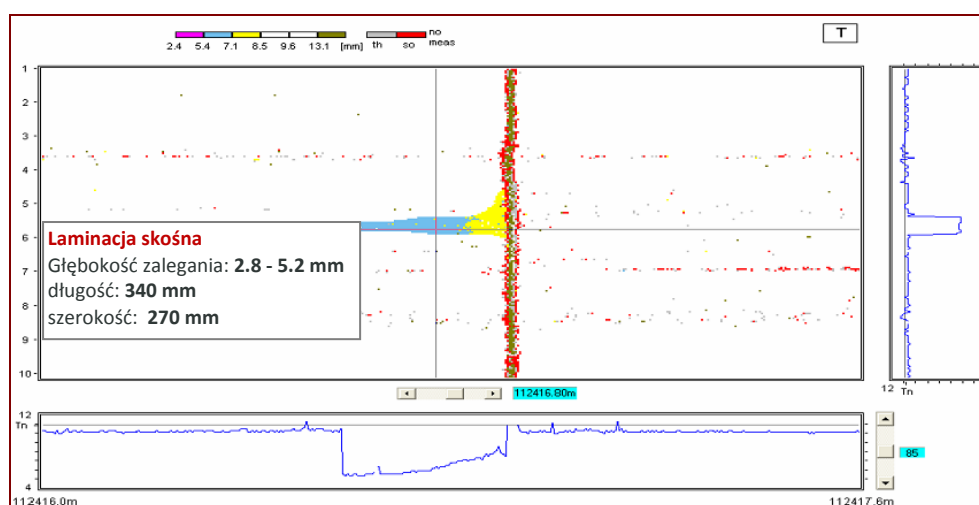
wiskowych (las, tereny podmokłe) oraz o infrastrukturze (szosa, linia kolejowa). Analizując korelację pomiędzy tymi informacjami możemy wytypować odcinki najbardziej zagrożone i określić przyczyny tego zagrożenia. Wnioski te należy oczywiście zweryfikować dodatkowymi badaniami, ale z tej analizy możemy również wnioskować, jakie badania i w jakim regionie należy wykonać.

Przedstawiona wyżej analiza ma charakter statyczny. Odnosimy się do wyników badania wykonanego w określonym momencie w czasie. Wyciągnięte wnioski mogą być nie do końca prawdziwe, z uwagi na to, że niektóre z wykrytych wad mogą być aktywne i pogłębiać się, a inne mogą być nieaktywne, jako że czynniki powodujące ich rozwój dawno zanikły. Wnioski z analizy tego typu będą znacznie bardziej przydatne, jeżeli uwzględnimy trendy rozwoju wad uzyskane z analizy przedstawionej w poprzednim rozdziale. Jeżeli dysponujemy danymi porównawczymi należy ograniczyć użyty w przykładzie histogram do wad aktywnych i ewentualnie zastosować ważenie wysokości słupka uzależniając jego wysokość od tempa rozwoju wad.

Można tu nadmienić, że istnieją tłoki wyspecjalizowane w ocenie zagrożenia konstrukcji rurociągu prądami płynącymi w jego ściankach oraz umożliwiające lokalizację miejsc uszkodzenia izolacji, ale to już zagadnienie na oddzielną prezentację.

6. Nie tylko ubytki korozyjne

Ultradźwiękowe tłoki wysokiej rozdzielczości dostarczają znacznie szersze spektrum informacji niż tylko położenie i parametry geometryczne ubytków metalu. Pozwalają one na wykrywanie i precyzyjne określenie parametrów wad materiałowych typu wtrącenia i laminacje. Wada typu laminacja jest szczególnie groźna, gdy jest ułożona skośnie i zbliża się do powierzchni rurociągu. Grozi to rozszczelnieniem rurociągu i migracji tłoczonego medium na zewnątrz. Ocena zagrożenia powodowana przez tego typu wadę wymaga precyzyjnego określenia profilu głębokości jej zalegania i położenia względem spoin. Na Rys. 7 zaprezentowano C-skan szczególnie niebezpiecznej laminacji skośnej dochodzącej do spoiny obwodowej [2][3].



Rys. 7. Przykład laminacji skośnej dochodzącej do spoiny obwodowej

Innym przykładem zastosowania ultradźwiękowych tłoków wysokiej rozdzielczości z przetwornikami umieszczonymi na sztywnym pierścieniu jest możliwość precyzyjnego pomiaru deformacji ścianki rurociągu. Deformacja, a w szczególności wgniecenie, jest często początkiem destrukcji ścianki rurociągu. Z reguły towarzyszy jej uszkodzenie izolacji zapoczątkowując procesy korozyjne. Powoduje również powstanie naprężeń w ścianie rurociągu co również jest sprzyjające powstaniu korozji. Wielkość powstałych naprężeń zależy od stromości zboczy wgniecenia, stąd istotne jest jej oszacowanie na podstawie pomiarów [4].

Literatura

- [1] Bogotko W., Raczyński P., Skrok K., *Rola tłoków inteligentnych w zapewnieniu niezawodności rurociągów dalekosiężnych*, Materiały X Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Konstrukcje Metalowe – Gdańsk 2001”, Gdańsk, 6–8.06.2001, s. 105-112.
- [2] Dąbrowski L., Łomotowski T., Raczyński P., *Identyfikacja krytycznych uszkodzeń ścianek rurociągów na podstawie analizy MDCR w oparciu o skaning ultradźwiękowy*, Materiały VI Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Diagnostyka Procesów Przemysłowych”, Władysławowo, 15–17.09.2003, Pomorskie Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Gdańsk 2003, s. 351–356.
- [3] Raczyński P., Bogotko W., Leszczyński T., *Wykorzystanie ultradźwiękowych tłoków pomiarowych do oceny uszkodzeń korozyjnych ścianek rurociągów magistralnych oraz wpływu ich na parametry eksploatacyjne*, Materiały Międzynarodowej Konferencji „Nowoczesne Metody Monitorowania Korozji dla Oceny Strat Korozyjnych i Kosztów Korozji”, Jurata, 19–21.05.2003, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 2003, s. 153–161.
- [4] Łabecki G., Raczyński P., *Anomalie materiałowe i ubytki materiału w ściankach rurociągów stalowych w świetle badań tłokami ultradźwiękowymi wysokiej rozdzielczości*, Materiały Pięćdziesiąta Pierwsza Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Gdańsk – Krynica 12–17.09.2005, „KRYNICA 2005”, s. 213–222.
- [5] Raczyński P., *Wykorzystanie wyników badań tłokami pomiarowymi do oszacowania kierunków i tempa zmian stanu rurociągów*, [w:] *Pomiary Automatyka Kontrola – Wydanie specjalne dodatkowe 9'2005 bis*, VII Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Rajgród, 12–14.09.2005, s. 197–199.
- [6] Lewandowski M., Raczyński P., *Analysis and trend estimation of geometry defects and metal losses in the pipeline wall based on out intelligent pig inspection*, Materiały 9th Pipeline Technology Conference, 12–14.05.2014, Berlin.