

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

1-2/2016

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics

45. Krajowa Konferencja
Badań Nieniszczących
18-20 października 2016, Kołobrzeg

casp system

ADVANCED TECHNOLOGIES



Lider automatyzacji
w badaniach nieniszczących



Twój Mentor pomoże Ci podjąć właściwą decyzję

Przedstawiamy WideoEndoskop
- Mentor Visual iQ™

Mentor Visual iQ™ to szybsze i dokładniejsze badania. Łączność w czasie rzeczywistym, intuicyjny ekran dotykowy, indywidualne profile użytkownika oraz trójwymiarowe obrazowanie w Pomiarze Fazowym 3D, to tylko niektóre możliwości, znacznie podnoszące efektywność badań wizualnych. Inteligentne rozwiązania wbudowane w urządzenie VideoProbe™, to nie tylko większa efektywność badań, ale przede wszystkim trafniejsze decyzje.

Więcej na temat nowego podejścia
GE do badań nieniszczących na:
mentorvisualiQ.com lub endoskopy.pl





Badania Nieniszczące i Diagnostyka
Agenda Wydawnicza SIMP
ul. Sabaly 11a, 71-341 Szczecin
tel. +48 576 400 550
e-mail: wydawnictwo@ptbnid.pl
www.ptbnid.pl

ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF

Jerzy Nowacki

Z-CA REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF

Tomasz Chady

SEKRETARZ NAUKOWY / SCIENTIFIC SECRETARY

Grzegorz Psuj

REDAKTOR JĘZYKOWY / EDITOR OF LANGUAGE AFFAIRS

Marcin Żytkowiak

REDAKTOR STATYSTYCZNY / EDITOR OF STATISTIC AFFAIRS

Sławomir Krajewski

REDAKTOR WYDAWNICZY / PUBLISHING EDITOR

Adam Sajak

REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY

Dr Sławomir Mackiewicz, Dr Marek Śliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH

Mgr Bogdan Piekarczyk, Mgr Marta Wojaś

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ

/ EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH

Dr Grzegorz Jezierski, Mgr Marek Lipnicki

PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ

/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH

Dr Krzysztof Dragan, Mgr Bogusław Olech, Mgr Darek Wojdała

DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS

Dr Bogusław Ładecki, Dr Ryszard Nowicki

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA
/ INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Ryszard Sikora,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
Przewodniczący/President

Prof. Krishnan Balasubramaniam, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India

Prof. Alexander Balitskii, National Academy of Science of Ukraine, Ukraine

Prof. Gilmar F. Batalha, University of Sao Paulo, Brasil

Prof. Leonard J. Bond, Iowa State University, USA

Dr Pierre Calmon, CEA, France

Prof. Zhenmao Chen, Xi'an Jiaotong University, China

Prof. Leszek A. Dobrzański, World Academy of Materials and Manufacturing Eng., Polska

Dr Hubert Drzeniek, AMIL Werkstofftechnologie GmbH, Germany

Prof. Helena Maria Geirinhas Ramos, Instituto Superior Técnico, Portugal

Prof. Nikolaos Gouskos, University of Athens, Grece

Mgr Paweł Grześkowiak, UDT, Polska

Prof. Jolanta Janczak-Rusch, Empa, Switzerland

Mgr Ryszard Jawor, Ryszard Jawor Usługi NDT, Polska

Dr Grzegorz Jezierski, Politechnika Opolska, Polska

Inż. Sławomir Józwiak, NDT Systems, Polska

Mgr Pablo Katchadjian, National Atomic Energy Commission of Argentina, Argentina

Mgr Jan Kielczyk, Energomontaż-Północ, Polska

Mgr Jacek Kozłowski, TEST PLB, Polska

Prof. Marc Kreutzbruck, University of Stuttgart, Germany

Dr. Jochen Kurz, DB Systemtechnik GmbH, Germany

Mgr Marek Lipnicki, KOLI, Polska

Prof. Leonid M. Lobanow, Paton Welding Institute, Ukraine

Dr Sławomir Mackiewicz, NDT SOFT, Polska

Mgr Wojciech Manaj, Instytut Lotnictwa, Polska

Dr Tadeusz Morawski, Usługi Techniczne i Ekonomiczne "Level", Polska

Prof. Zinovy T. Nazarchuk, National Academy of Science of Ukraine, Ukraine

Dr Ryszard Nowicki, GE Energy, Polska

Prof. Mohachiro Oka, Oita National College of Technology, Japan

Dr Jolanta Radziszewska-Wolińska, Instytut Kolejnictwa, Polska

Prof. Joao M A Rebello, Federal University of Rio de Janeiro, Brasil

Prof. Artur Lopes Ribeiro, Instituto Superior Técnico, Portugal

Prof. Maria Helena Robert, University of Campinas, Brasil

Dr hab. Maciej Roskosz, Politechnika Śląska, Polska

Prof. Leonard Runkiewicz, Instytut Techniki Budowlanej, Polska

Prof. Krzysztof Schabowicz, Politechnika Wrocławska, Polska

Prof. Valentyn R. Skalsky, National Academy of Science of Ukraine, Ukraine

Prof. Jacek Słania, Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, Polska

Prof. Jacek Szelażek, IPPT PAN, Polska

Prof. Andrzej Szymański, Politechnika Śląska, Polska

Dr Marek Śliwowski, NDTTEST Warszawa, Polska

Prof. Antonello Tamburrino, University of Cassino and Southern Lazio, Italia

Prof. Yuji Tsuchida, Oita University, Japan

Prof. Andrzej Tytko, AGH Kraków, Polska

Prof. Lalita Udpa, Michigan State University, USA

Prof. Gábor Vértesy, Hungarian Academy of Sciences, Hungary

Dr Grzegorz Wojaś, UDT, Polska

Prof. Sławomir Wronka, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska

Prof. Chunguang Xu, Beijing Institute of Technology, China

Prof. Noritaka Yusa, Tohoku University, Japan

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 1-2/2016

ISSN 2451-4462

VOLUMEN 1

SPIS TREŚCI / CONTENTS

Słowo od Zarządu PTBNiDT	2
Słowo od Redaktora Naczelnego	3
Ryszard Sikora Badania nieniszczące – moje refleksje.....	5
Mike Farley* JOINING UP THE WORLD OF NDT – the role of ICNDT in a changing world.....	7
Roger Lyon* A strategic overview of Non-Destructive Testing according to the European Federation of NDT	11
Qiang Tianpeng* Development of Non-destructive Testing Technology in China	15
Marek Śliwowski* Studium przypadków - badanie złączy austenitycznych na terminalu LNG	19
Gerd Dobmann* Probability of detection – the approach to combine probabilistic fracture mechanics with NDT – where we are ?.....	27
Marta Wojaś Certyfikacja personelu NDT – zalecenia wytycznych EA 4/15 G:2015... 34	34
Uwe Ewert* Progress in Digital Industrial Radiology. Part I: Radiographic Techniques - Film Replacement and Backscatter Imaging.....	37
Philippe Rioux, Jonathan Turcotte, Philippe Cyr* True advancements for longitudinal weld pipe inspection in PA.....	44
Terry Clausing* Thermography – Past, Present and Future	49
Neil R. Pearson, Steven Marshall, Wayne Woodhead, Alan Ashton, Radosław Boba* Use of water immersion UT techniques to assist with data capture	51
Walenty Jasiński* Ocena trwałości resztkowej rur katalitycznych reformerów amoniaku badaniami NDT	57
Tomasz Chady, Krzysztof Schabowicz* Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu.....	62
Bogusław Olech, Grzegorz Psuj Biuletyn Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP	67
Informacje dla Autorów i Czytelników	68

* - artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA
/PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION

PTBNiDT



casp system
ADVANCED TECHNOLOGIES



Słowo od Zarządu PTBNiDT

Szanowni Czytelnicy, Koleżanki i Koledzy członkowie PTBNiDT SIMP

Z przyjemnością oddajemy w Wasze ręce pierwszy numer czasopisma „Badania Nieniszczące i Diagnostyka” i witamy na jego łamach. Czasopismo powstało z inicjatywy Zarządu Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP, który zainspirował jego Prezes, dr hab. inż. Tomasz Chady prof. ZUT.



Zdjęcie z posiedzenia zarządu PTBNiDT SIMP dn. 15.09.2016. Od prawej: Tomasz Chady – Prezes Zarządu, Alicja Kozłowska – członek Komisji Rewizyjnej, Dionizy Szewczyk – członek Zarządu, Marta. Wojas, v-ce Prezes Zarządu, Dariusz Wojdała – członek Zarządu, Justyna Szlagowska-Spychalska – członek Zarządu, Bogusław Ładecki – Sekretarz Zarządu, Jan Kielczyk – Przewodniczący Komisji Rewizyjnej

Jest to już trzeci krok w obecnej kadencji Zarządu Towarzystwa w kierunku stworzenia platformy komunikacji w polskim środowisku badań nieniszczących, po uaktywnieniu strony internetowej www.ptbnidt.pl i uruchomieniu „Biuletynu PTBNiDT”.

Na łamach czasopisma pragniemy publikować najnowsze osiągnięcia w dziedzinie badań nieniszczących i diagnostyki, ze szczególnym uwzględnieniem: badań naukowych, konstrukcyjnych, technologicznych, działalności dydaktyczno-szkoleniowej i potwierdzania kompetencji personelu wykonującego badania, normalizacji, a także osiągnięcia i rozwiązania praktyczne powstałe w trakcie prac badawczych prowadzonych w przemyśle.

Chcemy, aby czasopismo to stało się otwartym forum wymiany osiągnięć, doświadczeń i opinii w w/w dziedzinach, jak również stanowiło źródło informacji o najnowszych technikach badawczych oraz o aparaturze do badań, stosowanych w nieniszczącej kontroli materiałów i diagnostyce technicznej.

Przewidujemy, że w czasopiśmie będą się pojawiać prace autorów zarówno krajowych jak i zagranicznych. Publikacje będą w języku polskim i angielskim. Odpowiedni poziom publikacji zapewni zespół ekspertów krajowych i zagranicznych, którzy przyjęli zaproszenie do współpracy z nami. Redakcja czasopisma rozpoczęła starania o przyznanie punktów za publikacje, zgodnie z wymaganiami Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Na łamach czasopisma będziemy informować o inicjatywach podejmowanych przez Zarząd Towarzystwa takich jak: przyznawanie nagród i wyróżnień, przygotowanie projektów norm i ich tłumaczeń itp.



Medal im. Prof. Zdzisława Pawłowskiego

Jednocześnie mamy wielką przyjemność poinformować, że z inicjatywy Zarządu PTBNiDT SIMP ustanowiony został medal im. prof. Zdzisława Pawłowskiego, którym nagradzane będą najważniejsze osiągnięcia w zakresie badań nieniszczących i diagnostyki technicznej w naszym kraju i za granicą.

Zarząd PTBNiDT SIMP

Prezes Tomasz Chady
Wiceprezes Marta Wojas
Sekretarz Bogusław Ładecki
Skarbnik Dionizy Szewczyk
Członek zarządu Bogdan Piekarczyk
Członek zarządu Justyna Szlagowska-Spychalska
Członek zarządu Dariusz Wojdała



Redaktor Naczelny
Jerzy Nowacki

Słowo od Redaktora Naczelnego

Szanowni Państwo,

Z wielką satysfakcją oddaję w Państwa ręce pierwszy numer czasopisma naukowo - technicznego „Badania Nieniszczące i Diagnostyka” wydawanego przez Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich oraz Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP.

Znaczenie, powszechność zastosowań oraz dynamiczny rozwój technik badań nieniszczących i diagnostyki widoczny w licznych doniesieniach naukowych i w praktyce przemysłowej uzasadnia potrzebę utworzenia czasopisma poświęconego tej tematyce.

Czasopismo „Badania Nieniszczące i Diagnostyka” skierowane jest do specjalistów, ośrodków naukowych, dydaktycznych oraz krajowych i zagranicznych organizacji gospodarczych zainteresowanych problematyką: metodologii badań, certyfikacji w badaniach, charakterystyki urządzeń, sprzętu, materiałów i systemów w badaniach nieniszczących, diagnostyki, szkoleń, przepisów i normalizacji, praktyki badań w przemyśle i poradnictwa technicznego, wydarzeń, karier zawodowych specjalistów oraz ich doświadczeń zawodowych.

W radzie programowej czasopisma znaleźli się czołowi specjaliści w obszarze badań nieniszczących i diagnostyki z Argentyny, Brazylii, Chin, Grecji, Indii, Japonii, Niemiec, Polski, Portugalii, Szwajcarii, Ukrainy, Węgier i Stanów Zjednoczonych a w zespole redakcyjnym skupiła się grupa oddanych redaktorów pracujących społecznie.

Czasopismo wydawane będzie jako kwartalnik i znajdą się w nim oryginalne publikacje i materiały w języku polskim oraz angielskim. Czasopismo będzie dostępne zarówno w wersji drukowanej, jak i elektronicznej w ramach Open Access Library w Internecie.

Aby czasopismo stanowiło źródło wszechstronnej informacji, forum wymiany poglądów i dobrze służyło środowisku specjalistów z obszaru badań nieniszczących i diagnostyki serdecznie zapraszam Państwa do zamieszczania w nim publikacji, informacji, a także materiałów reklamowych i promocyjnych.

Gorąco zachęcam do lektury pierwszego numeru czasopisma.

Redaktor Naczelny
Jerzy Nowacki



NAUKA DLA PRZEMYSŁU

KURSY w zakresie badań nieniszczących

według programów Instytutu Spawalnictwa
zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 9712

Oferta obejmuje następujące kursy:

- badania wizualne (VT)
- badania penetracyjne (PT)
- badania magnetyczno-proszkowe (MT)
- badania radiograficzne (RT)
- badania ultradźwiękowe (UT)

Nowość:

Szkolenie w sektorze „Utrzymanie ruchu kolei” w metodach UT, PT i MT

Absolwenci, po zdaniu egzaminu prowadzonego przez Transportowy Dozór Techniczny (TDT), otrzymają Certyfikat Personelu Badań Nieniszczących TDT.

Ryszard Sikora*
ZUT w Szczecinie, Polska

Badania nieniszczące – moje refleksje



Profesor
Ryszard Sikora

Oddając w ręce Szanownych Czytelniczek i Czytelników pierwszy numer czasopisma *Badania Nieniszczące i Diagnostyka* pragnę przedstawić kilka spostrzeżeń związanych z badaniami nieniszczącymi z perspektywy profesora seniora. Po raz pierwszy zetknąłem się z badaniami nieniszczącymi w 1980 roku. Jako elektryk, teoretyk zostałem przyjęty do zespołu profesora Zdzisława Pawłowskiego z IPPT PAN, który w ramach programu Badań Podstawowych 02.20 prowadził badania związane z bezpieczeństwem pierwszej projektowanej w Polsce elektrowni jądrowej w Żarnowcu. Przydzielono mi wtedy tematykę obejmującą zagadnienia związane z badaniami nieniszczącymi prowadzonymi metodami elektromagnetycznymi. Obecnie, jak pokazują różne statystyki, metody elektromagnetyczne odgrywają w badaniach nieniszczących drugoplanową rolę i obejmują około 25% rynku badań nieniszczących. Pierwoplanową rolę odgrywają badania ultradźwiękowe, które są używane w około 50% wszystkich badań. W pozostałych 25% stosowane są różne inne metody, a mianowicie: termograficzne, radiograficzne, optyczne (w swojej naturze elektromagnetyczne), akustyczne, penetracyjne i wiele innych. Z powyższego zestawienia wynika, że w badaniach nieniszczących elektrotechnika bezpośrednio lub pośrednio przewija się w prawie 50% przypadków. Dzieje się tak dlatego, że praktycznie prawie we wszystkich rodzajach badań istnieje jakiś element związany z elektromagnetyzmem. Dość wspomnieć tu o przetwornikach stosowanych w badaniach ultradźwiękowych, w których to również wykorzystuje się zjawiska elektromagnetyczne.

Oprócz podziału metod badań nieniszczących mającego na uwadze rodzaj wykorzystywanego zjawiska fizycznego, można je także podzielić ze względu na sposób generowania sygnału diagnostycznego. Sygnały informujące o stanie testowanego obiektu mogą powstawać w sposób naturalny lub mogą być wymuszone. Generalnie ujmując temat szeroko pojętej diagnostyki i badań nieniszczących (nie tylko w aspekcie technicznym ale i medycznym), do naturalnych sygnałów diagnostycznych można zaliczyć: sposób zachowania, uczucie bólu, zmianę koloru, powstawanie dźwięku lub zmianę jego tonu, zapach itp. Sygnały diagnostyczne mogą też powstawać w wyniku oddziaływania wzbudników na obiekty badane. Wzbudniki mogą powodować w obiekcie drgania mechaniczne, zmianę

orientacji domen (w materiałach magnetycznych), przepływ prądu elektrycznego, przenikanie przez nie promieniowania elektromagnetycznego (w tym promieniowania widzialnego, rentgenowskiego, terahercowego), itp.

Metoda badań musi być dobrana stosownie do postawionego celu. Jakie są zasadnicze cechy opisujące przydatność metod badań nieniszczących? Moim zdaniem są to: czułość, selektywność, łatwość stosowania i pewność uzyskiwanych wyników. Czasami metody doskonale sprawdzające się w warunkach laboratoryjnych są zupełnie nieprzydatne w warunkach przemysłowych. Badania nieniszczące towarzyszą ludzkości od zarania dziejów. Sygnały pochodzące z atmosfery umożliwiały predykcję pogody. Dźwięki wydawane przez różne obiekty pozwalały przewidzieć ewentualną katastrofę. Przełomem w badaniach nieniszczących było odkrycie w 1895r. przez W. C. Röntgena promieniowania przenikliwego. Największe zmiany w badaniach nieniszczących spowodowało wprowadzenie techniki cyfrowej i systemów komputerowych. Przykładem może być tu radiografia. Cyfrowe detektory czy też płyty obrazowe z dedykowanymi skanerami zaczęły się masowo pojawiać w radiografii już w latach 80-tych. Spowodowało to wiele zmian, a wśród nich warto tu wspomnieć o zastosowaniu cyfrowego przetwarzania obrazów i sztucznej inteligencji w radiografii do automatycznego rozpoznawania defektów.

Nowoczesne, zaawansowane systemy badań nieniszczących zawierają cztery podstawowe bloki: blok akwizycji sygnałów diagnostycznych, blok gromadzenia danych (wiedzy) o uprzednio testowanych podobnych obiektach i podejmowanych decyzjach, blok analizy i porównania sygnałów oraz blok decyzyjny (np. w postaci systemu eksperckiego).

Zmarły przed dwoma laty wybitny specjalista w dziedzinie badań nieniszczących profesor Donald O. Thompson z Iowa State University, przewodniczący World Federation of Nondestructive Evaluation Centers, pisząc o historii badań nieniszczących w USA wskazał, że historia nowoczesnych badań nieniszczących w USA rozpoczęła się w okresie Drugiej Wojny Światowej. Wysokie wymagania niezawodnościowe stawiane wobec elementów uzbrojenia, a w szczególności wobec części produkowanych w przemyśle lotniczym spowodowały, że przed oddaniem do użytkowania były poddawane szerokim i dogłębnym badaniom. Badania nieniszczące mają olbrzymie znaczenie w wielu dziedzinach ludzkiej działalności. Szczególnie w diagnostyce medycznej, przemyśle zbrojeniowym, astronautyce, lotnictwie, energetyce nuklearnej i w wielu innych dziedzinach.

Metodą, która w sposób niezaprzeczalny wzbogaciła możliwości badań nieniszczących jest metoda ultradźwiękowa. Powstała ona po Pierwszej Wojnie Światowej, a szeroko weszła do diagnostyki medycznej i technicznej w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Prawdziwa ekspansja tej metody wiąże się ściśle z rozwojem techniki cyfrowej i komputerowej, bez których to niemożliwa była by technologia wykorzystująca głowice mozaikowe (ang. phased array). Jak już wcześniej wspomniałem,

*Autor korespondencyjny. E-mail: rs@zut.edu.pl

ważną grupę badań nieniszczących stanowiły i ciągle stanowią metody elektromagnetyczne. Spośród nich należy wymienić następujące metody: magnetycznego strumienia rozproszenia, prądów wirowych, potencjałową (tomografię impedancyjną), mikrofalową, terahercową i radiograficzną. Kolejną grupą są metody wizualne, w swej istocie również elektromagnetyczne. Promieniowanie terahercowe leżące na granicy pomiędzy mikrofalami a promieniowaniem podczerwonym zaczyna być coraz szerzej stosowane w badaniach nieniszczących. Metoda terahercowa jest szczególnie przydatna w testowaniu materiałów kompozytowych, które we współczesnej technice nabierają dominującego znaczenia.

Pomimo rozwoju wielu nowoczesnych technologii, ciągle podstawową metodą badań nieniszczących jest bezpośrednie wykorzystanie ludzkich zmysłów. Dokładne oglądanie, dotykanie, czy też w pewnych przypadkach osłuchiwanie badanego obiektu jest zawsze wstępem do bardziej wyrafinowanych badań nieniszczących, a czasami może pozostać jedyną zastosowaną metodą badawczą.

Ludzkie zmysły i ludzka inteligencja ciągle odgrywają dużą rolę w badaniach nieniszczących. W analizie informacji o stanie badanego materiału lub urządzenia i podejmowaniu decyzji w sprawie jego stanu, czynnik ludzki ma dominujące znaczenie. Jednak ze względu na dużą dozę niepewności i ograniczoną powtarzalność, powoli posuwamy się w kierunku redukcji personelu i wykorzystania sztucznej inteligencji. Silnie są rozwijane sztuczne układy wykorzystywane w analizie i rozpoznawaniu sygnałów, czy też podejmowaniu decyzji. W tym ostatnim procesie zasadniczą rolę odgrywają układy sztucznej inteligencji. Najczęściej wykorzystywane są sztuczne sieci neuronowe i zbiory rozmyte. Dr inż. Lech Misztal wprowadził do metod identyfikacji używanych w badaniach nieniszczących teorię zbiorów przybliżonych. Trudno jest określić jaka jest proporcja między systemami naturalnymi posługującymi się tylko ludzkimi możliwościami, a metodami całkowicie sztucznymi. Nie obserwuje się sprzeciwu przed wykorzystaniem dodatkowych

coraz doskonalszych narzędzi zamiast ludzkich zmysłów. Jednak występuje często opór wobec wykorzystania sztucznej inteligencji w procesie podejmowania decyzji. Jest to szczególnie widoczne w diagnostyce medycznej. W tym obszarze preferowane jest wykorzystanie ludzkiego umysłu specjalisty diagnosty, a nie układu sztucznej inteligencji. Jednak należy wspomnieć, że w układzie sztucznej inteligencji mogą być zgromadzone umiejętności i wiedza najlepszych diagnostów medycznych czy też operatorów o olbrzymim doświadczeniu.

Kolejną bardzo ważną sprawą są przygotowania do budowy pierwszej polskiej elektrowni jądrowej. Elektrownia jądrowa wymaga zastosowania wyspecjalizowanych systemów do badań nieniszczących i diagnostyki, zarówno w trakcie budowy jak i w trakcie eksploatacji. Oprócz sprzętu potrzebne są również wysoko wykwalifikowane kadry. W Polsce są ośrodki, które w tej dziedzinie współpracowały np. z japońskimi nuklearnymi ośrodkami badawczymi. Należy się zastanowić nad uruchomieniem projektów badawczych w tej dziedzinie. W ten sposób można wykształcić własną kadrę, a nie oddawać intratne zlecenia badań firmom zewnętrznym. Następnym obszarem zainteresowań powinien być polski przemysł obronny i polska armia. Jest tam prawdziwa kopalnia tematów badawczych związanych z badaniami nieniszczącymi i diagnostyką. Podobna sytuacja występuje w kolejnictwie. Osobnym bardzo ważnym obszarem badań i innowacji powinna być diagnostyka medyczna. Konieczne są w tym przypadku wspólne projekty realizowane przez zespoły interdyscyplinarne.

Badania nieniszczące stanowią wysokospecjalistyczny i innowacyjny sektor gospodarki. Należy dążyć do rozwoju istniejących i organizacji nowych krajowych ośrodków naukowo-badawczych zajmujących się badaniami nieniszczącymi. Ważne jest też rozwijanie współpracy z czołowymi światowymi ośrodkami badawczymi takimi jak np. te zgrupowane na platformie World Federation of Nondestructive Evaluation Centers, ICNDT czy EFNDT.

**Badania Nieniszczące
i Diagnostyka**
Nondestructive Testing and Diagnostics

Mike Farley*

Immediate Past Chairman of ICNDT

JOINING UP THE WORLD OF NDT – the role of ICNDT in a changing world

Wstępując do świata badań nieniszczących – rola ICNDT w zmieniającym się świecie

ABSTRACT

ICNDT and its Regions provide a unique network for multilateral cooperation between NDT societies devoted to the development of the science and practice of NDT for the benefit of the public worldwide. As NDT, and the industries it serves, become more globalised, the need for international cooperation increases in priority and ICNDT and its Regions become more important. The individual member NDT Societies have vital roles to play and acting collectively have considerably more influence than if they act individually.

Keywords: NDT organizations, standardization, integration and cooperation

STRESZCZENIE

ICNDT i jej Oddziały tworzą unikalną sieć wielostronnej współpracy między Towarzystwami Badań Nieniszczących (BN), oddaną rozwojowi nauki i praktyki NDT dla dobra światowej społeczności. Wraz z tym jak badania nieniszczące i przemysł, który im służy, stają się bardziej globalne, znaczenie międzynarodowej współpracy wzrasta, a ICNDT i jej Oddziały stają się ważniejsze. Poszczególne narodowe Towarzystwa Badań Nieniszczących odgrywają istotną rolę i działając wspólnie mają znacząco większy wpływ, niż gdyby działały indywidualnie.

Słowa Kluczowe: Organizacje BN, standaryzacja, integracja i współpraca



BSc PhD FEI FInstNDT Chairman

Mike Farley

1. Introduction

ICNDT established in 1960 is an international not-for-profit organisation registered as a not-for-profit association in Vienna since 2008. The Members are the national NDT Societies – around 60 in total varying from very large to very small. Members elect a Chairman, Executive Committee and Secretariat to manage their affairs. The ICNDT chooses the NDT Society/country to run the World Conference every four years (19th WCNDT Munich 13-17 June 2016). ICNDT carries out activities in accordance with a Strategic Plan developed with its members and representatives of Regional Groupings of NDT Societies (currently EFNDT, APFNDT, Pan Am NDT, AFNDT).

The paper describes how ICNDT and its Regions work to join together people, societies and organisations working in the field of NDT:

- joined up approach - NDT and CM/ SHM;
- joining up - professionals;
- joining up - globally;
- joining up - the quality infrastructure;
- joining up - qualification and certification;
- joining up - NDT research;
- joining together - to maintain knowledge and motivation;
- joining up - ICNDT and the Regions.

*Corresponding author. E-mail: Mike.Farley@icndt.org

2. Joined up approach - NDT and Condition Monitoring/ Structural Health Monitoring/ Technical Diagnostics

Non-destructive testing (NDT) has a number of important roles to play in ensuring the through-life quality and reliability of many important products whose integrity is of paramount importance. CM/SHM/ Technical Diagnostics additionally allows maintenance to be scheduled, or other actions to be taken to prevent failure and avoid its consequences. Conditions that would shorten the normal lifespan can be addressed before they develop into a major failure. The correct and integrated application of NDT and CM/SHM/TD can prevent accidents, save lives, protect the environment and avoid economic loss. Joining up of NDT and CM/SHM/TD programmes can maximise benefits and reduce through-life costs.

ICNDT includes CM/SHM/TD in its scope (referred to as just CM in the remainder of this paper), reflecting the scope of activities of around half of the members. ICNDT's actions in this subject area are organised by the newest of its Working Groups – WG6.

3. Joining up - professionals

Nowadays NDT and CM should sit confidently alongside other engineering disciplines in a team approach to integrity and reliability. In the past NDT was sometimes treated as a second grade, overhead activity with no added value. Now NDT engineers and technicians are professionals, the technicians are certificated and the engineers may be formally registered (eg IEng, TechEng and Chartered Engineer in the UK). ICNDT encourages its members to link to other professional societies in engineering.

The ICNDT Guide on Education and Training in NDT [1], published in 2015 following two international Workshops, promotes best practice in the education and training of technicians and engineers in NDT and essential related disciplines – both

those who may be considered NDT specialists and other engineers who should know about NDT. These training courses recognise that NDT specialists may be involved in the execution of NDT but also, increasingly and importantly, in “NDT engineering” – upstream and downstream of execution of NDT.

A Workshop on the role of e-learning in NDT and CM was held during the 19th WCNDT and will be reported on the ICNDT website [2].

4. Joining up – globally

Design, building and operation of plant, equipment and machinery are globalised.

Industrial companies procure equipment and materials from wherever is most cost effective, increasingly from developing countries, using local NDT services working to the contract standards. Site construction of plant may be by home personnel or by teams from other countries.

Safety, reliability and availability thus depends on the whole supply chain of companies and contractors all around the world, each with their own NDT personnel and equipment.

ICNDT recognises the need for an international quality infrastructure that can facilitate global trade and effective NDT and CM.

5. Joining up - the quality infrastructure

NDT and CM are vitally important for new build, in-service inspection and life extension and need to be reliable, with the level of reliability dependent on the risk and consequences of a failure:

- NDT in quality control during manufacture:
 - code based NDT with established acceptance standards applied by certificated NDT personnel is generally sufficiently reliable based on longstanding practice;
- pre-service and in-service inspection (or CM) to demonstrate continued fitness for service, or to justify life extension:
 - much more specific consideration of the types, sizes and orientations of flaws is required to allow technique selection, followed by more specific training and certification, and in some cases inspection qualification;
- NDT to investigate specific deterioration issues that threaten the integrity of a structure:
 - specific design of techniques, qualification of equipment, procedures and personnel on representative testpieces.

In each case there are four important factors to achieve the necessary quality and reliability of NDT and CM:

- the responsible engineer must specify his requirements very clearly in terms of the regions to be inspected, % coverage, and the types of flaws or deterioration to be looked for (100% coverage of all-encompassing combinations could be prohibitively expensive);
- methods, equipment and personnel must be capable of the purpose for which they are being employed;
- the selected NDT process must be implemented thoroughly;
- results must be reported and communicated clearly.

There is a need for a joined-up approach between Engineers and NDT specialists at each stage of the NDT Quality chain

(Fig. 1.). Quality and reliability of NDT (and CM) depends on each element of the chain.



Fig. 1. NDT quality chain – extended

Rys. 1. Łańcuch jakości w BN - rozszerzony

The Quality Chain shown in Figure 1 is extended compared to previous versions presented by the author to better link up at each end (design and specification of NDT and reporting) and to include an additional important link (employer’s responsibilities).

ICNDT’s new Strategic Plan [3] approved by the General Assembly in Munich at the 19th WCNDT includes new actions to address reliability, employer’s responsibilities and the overall chain.

6. Joining up - qualification and certification

The NDT quality chain is very dependent on personnel training and certification. This has been an area of intense ICNDT activity for many years and is the responsibility of Working Group 1 (21 members from 21 countries) and the ICNDT Certification Executive Committee.

It is clear that we need NDT Certification that we can rely on all around the world. This depends on correct understanding and implementation of Third Party certification and In-company certification (SNT-TC1A).

Third party certificates gained in one country need to be valid/recognised world-wide. This depends on harmonisation and mutual recognition of similar Certification schemes. ICNDT’s recent and planned activities are directed towards these objectives and focussed on the unified International Standard ISO9712 published in 2012. More detail of ICNDT’s actions is given on the ICNDT website and recommendations are given in the ICNDT Guide on Qualification and Certification of NDT personnel [4]:

- recommendations to users of central third-party certification:
 - when central third-party certification is appropriate, it is recommended that regulators and industry define the levels of competency of NDT personnel who are certified in accordance with ISO 9712 by a certification body accredited to ISO/IEC 17024 or approved by ICNDT and, where possible, which is recognised in the ICNDT Multilateral Recognition Agreement;
 - regulators, users and auditors of NDT operations

should recognise the importance of employers of NDT personnel properly fulfilling their responsibilities to authorise personnel to work after first confirming that their employees are adequately trained, experienced and qualified;

- recommendations to certification bodies:
 - certification bodies are urged to provide certification to ISO 9712 in order to maximise the value of their certification. In anticipation of future harmonisation, their training syllabuses should encompass the requirements of ISO/TR 25107;
 - national NDT societies seeking to establish national certification schemes are recommended to consider seeking cooperation with an existing personnel certification body (PCB) as an alternative or complementary approach. This does not preclude setting up a local PCB;
 - NDT societies or PCBs that are operating outside their own home country are encouraged to cooperate closely with the national NDT society where they wish to operate. In practice, this should be achieved by means of a signed agreement between the parties. When there is a disagreement, the matter should be referred to ICNDT for mediation;
- guidance for developing countries seeking to establish national certification schemes is provided in an Appendix;
- recommendations to national standards bodies:
 - in adopting the international standard ISO 9712, the ISO member body is strongly urged to apply it without deviation from the original text in order to ensure that it acts as a harmonising influence. Significant deviations, although permitted under ISO Guide 21, could result in a refusal to recognise or accept NDT personnel certification.

There is an important section in the Guide on the “Responsibilities of the employer”.

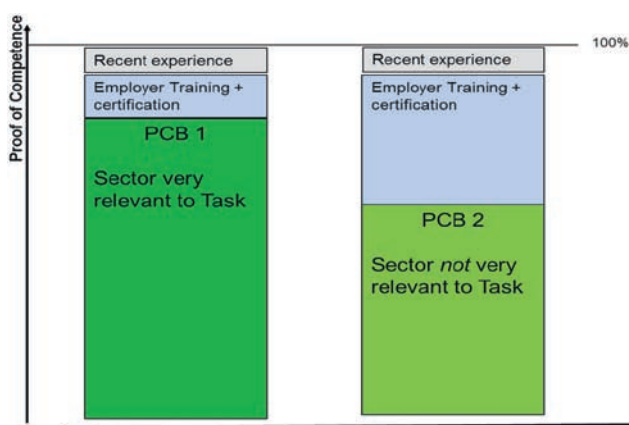


Fig. 2. Differences between pcbs should be compensated by the employer

Rys. 2. Różnice pomiędzy ciałami certyfikującymi personel (PCB) powinny być kompensowane przez pracodawcę

An employer of NDT personnel carries important responsibilities for the overall quality of NDT operations. These should be reflected in the employer’s quality procedure for NDT (which may be known as the written practice). The employer retains

these responsibilities whether he uses third-party certification, in-company certification, or a combination of both. This section of the ICNDT Guide clarifies the employer’s responsibilities and gives guidance on how the employer should fulfil these responsibilities. In this context, the employer (or responsible agency) is defined as ‘The organisation for which the candidate works on a regular basis’. If the individual is self-employed, he shall assume all responsibilities specified for the employer or responsible agency.

It is a central tenet of the ISO 9712 standard that the employer has overall responsibility for the results of NDT operations and is fully responsible for the authorisation of his staff to work. In practice, this must include checking that the NDT tasks to be carried out are within the scope of the individual’s certification (sector, method and level) and his/her’s recent experience, if they are not, organising additional employer/company job-specific training and/or examinations – see Figure 2. In some countries the central third party certification may be supplemented by industry sector specific training and examinations (sometimes called “trade tests”) to fill this gap. In some industries specific Job Task Analysis may be carried out to determine exactly what job-specific training and/or examinations are appropriate.

Progressively increasing degrees of harmonisation can be represented diagrammatically, as shown in Figure 3, where the areas of ICNDT activity and the level of the ICNDT MRA are indicated. There is a strong case for recognition of certification even without complete harmonisation and many practical examples of recognition are familiar:

- personnel certificated under earlier versions of the standard retain their certification until it expires;
- personnel certificated under another standard (EN473) are similarly recognised;
- personnel certificated by another PCB are given exemptions from examinations.

The alternative to such recognition is to require NDT personnel to take repeat examinations, demoralising for the very people we need to motivate, and causing undesirable cost and delay.

A separate ICNDT Guide on Qualification and Certification of personnel for Condition Monitoring has been published [5].

7. Joining up – research and development

ICNDT seeks to help promote research and development in NDT and condition monitoring and to facilitate contacts between researchers around the world. To help NDT specialists make the case for funding ICNDT has produced the “ICNDT Guide on NDT - why it is important and why more R+D should be supported” [6].

It is stressed that research is needed both to find new techniques and new applications of existing techniques but also in support of the better understanding and qualification of existing techniques.

NDT and CM conferences (World, Regional and national) have an important role in promoting contact between researchers but also, because of the vertical integration of the NDT industry and the practice of combining NDT conferences with equipment exhibitions, facilitating the links between academic researchers and industry. ICNDT, the Regions and many members follow this model.

In specific areas, ICNDT is helping to promote interaction

between specialists in the period between World and Regional conferences by setting up "ICNDT International Specialist Groups" (ISGs), each hosted by a Member Society. The initial plans are for eight groups (Hosts indicated):

- full matrix capture - BINDT;
- terahertz imaging – BINDT;
- microwave NDT – ASNT;
- magnetic Memory Method- RSSNDT;
- NDT of Art and Heritage - BINDT;
- NDT Reliability – DGZfP;
- non-linear UT – DGZfP;
- guided Wave UT – KSNT.

ISGs will be open to all members of NDT Societies in ICNDT and will organise their meetings on the internet.

8. Joining up –to maintain knowledge and motivation

ICNDT recognises that both knowledge and motivation are important in the quest for high quality and efficiency in NDT and CM. The organisation encourages member-run NDT societies where individuals can participate, contributing to the work of the society, learning from the experience and enjoying the benefits. Most member societies also have web-sites and increasingly make use of social media to encourage participation. An ICNDT Workshop on use of social media was held during the 19th WCNDT and this will be reported on the ICNDT website [7].

The ICNDT Journal [8] is produced three times a year and used to share information between ICNDT, its Regions and Members. The ICNDT Journal is available electronically and member societies are encouraged to share it with their members.

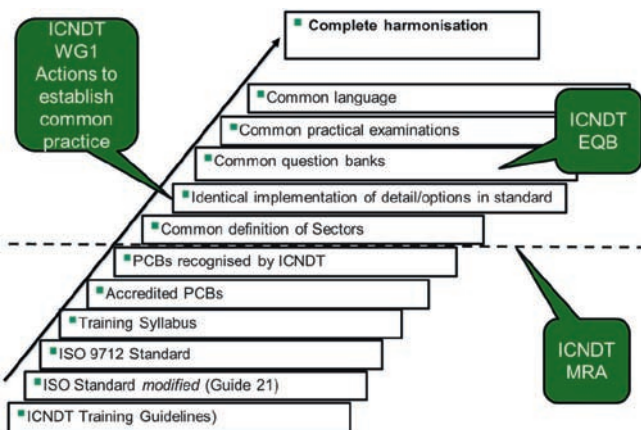


Fig. 3. Progressively increasing degrees of harmonisation
Rys. 3. Progresywnie wzrastające stopnie standaryzacji

9. Joining up – ICNDT and the Regions

A plan to better integrate ICNDT and the Regional organisations (AFNDT, APFNDT, EFNDT, PANNDT) was approved at the General Assembly during the 19th WCNDT and will be implemented from the next General Assembly in 2018.

The planned changes to the organisation will better integrate the activities of ICNDT and its Regions, reduce duplication and sharpen focus. These changes and the new fee structure will

allow more use to be made of professional support, reducing the present dependence on the voluntary effort of members and will accelerate the delivery of projects by ICNDT and the Regions. Membership fees for all sizes of NDT society are modest and affordable, a small proportion of a society's annual spend on international activities and a very small proportion of gross annual income. Specifically, the re-organisation plan provides very good value to the membership:

- to Small/fledgling Societies whose membership is an essential step in gaining recognition at home and networking internationally. The new fee structure makes access to ICNDT and the Regions easier for small/fledgling societies;
- to Medium Societies that need to access to international networks and value the opportunities and ability to exert influence globally;
- to Larger Societies which already operate outside their countries' boundaries and can utilise ICNDT and the Regions to further their international programmes.

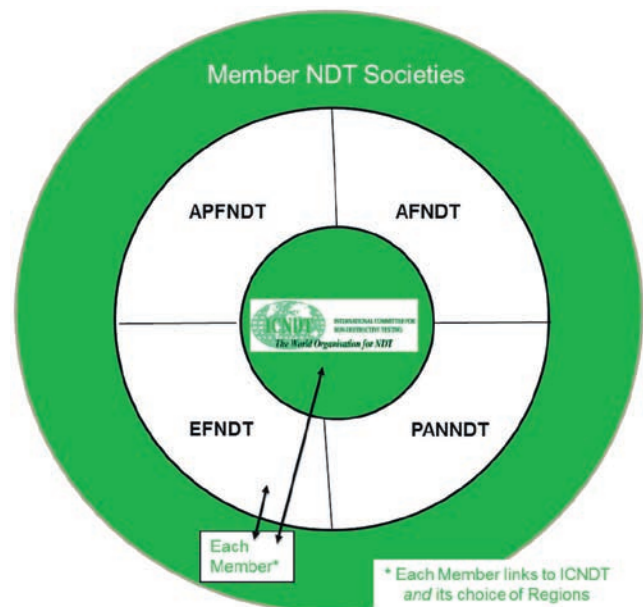


Fig. 4. Integration of icndt and the regions
Rys. 4. Integracja icndt i jej oddziałów

10. References – see www.icndt.org for the latest version of each

- [1] ICNDT Guide on Education and Training in NDT, 2015
- [2] ICNDT Workshop on the role of E-learning in NDT and CM, 2016
- [3] ICNDT Strategic Plan to be published, 2016
- [4] ICNDT Guide on Qualification and Certification of NDT personnel, 2016
- [5] ICNDT Guide on Qualification and Certification of Condition Monitoring personnel, 2016
- [6] ICNDT Guide on NDT - why it is important and why more R+D should be supported, 2015
- [7] ICNDT Workshop on the use of social media by NDT societies, 2016, to be published.
- [8] ICNDT Journal

Roger Lyon*

British Institute of Non-Destructive Testing

A strategic overview of Non-Destructive Testing according to the European Federation of NDT

Strategiczny przegląd Badań Nieniszczących według Europejskiej Federacji NDT

ABSTRACT

The current structure for the International Committee for NDT and the Regional groups which include the European Federation of NDT established in the 1990s is presented. EFNDT has proposed a reorganisation of the ICNDT/Regional Federations, with clearer definitions as to what is to be done at each level and stronger coordination. In order to promote fairness and safety in Europe, it is essential that each EFNDT Member society makes a commitment to uphold and promote the principles of the EFNDT Code of Ethics and in doing so, we will create a greater level of trust and confidence, and a positive perception of the non-destructive testing profession. EFNDT is currently managed by a President, Vice President and eight other Board of Directors who are democratically elected at the EFNDT General Assembly. It is essential however, that the Board of Directors and the other 22 member societies and 7 associate members communicate effectively in order to develop a harmonised approach to the provision of NDT products and services. In terms of normalisation, EFNDT's key process is the Multilateral Recognition Agreement (MRA), which promotes harmonisation of the personnel. Certification schemes operated by Certification Bodies and nominated by the national NDT societies facilitate worldwide recognition and acceptance of certificates of competence. Cooperation of NDT Companies across European countries will promote global harmonisation and will facilitate the sharing of knowledge and skills to mutual benefit. Education and training are also key components of international cooperation and harmonisation; EFNDT are currently considering creating documents about the requirements for training centres and defining the levels of excellence. The United Kingdom has undergone a transformation in terms of delivering Apprenticeships, in particular NDT Apprenticeships. EFNDT are considering the possibility of a European apprenticeship scheme framework for NDT. The NDT personnel in Europe have a responsibility to promote NDT as a key Engineering skill which helps to reduce risk, operate safely and save lives.

Keywords: Structure, Codes of Ethics, Communication, Normalisation, Certification, Cooperation, Education and Training, Contribution

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono obecną strukturę Międzynarodowego Komitetu NDT oraz grup regionalnych Europejskiej Federacji NDT założonych w 1990 roku. EFNDT zaproponowała reorganizację ICNDT i federacji regionalnych na każdym poziomie dla lepszej koordynacji działań. W celu promowania uczciwości i bezpieczeństwa w Europie, istotne jest, żeby organizacje członkowskie EFNDT zobowiązały się do wspierania i promowania zasad Kodeksu Etyki EFNDT aby stworzyć wyższy poziom zaufania i pozytywnego postrzegania badań nieniszczących. EFNDT jest obecnie zarządzana przez Prezesa, Wiceprezesa i ośmiu innych demokratycznie wybranych przez Walne Zgromadzenie EFNDT, członków tworzących Zarząd. Istotne jest, aby Zarząd, 22 organizacje członkowskie oraz 7 członków stowarzyszonych mogli się skutecznie komunikować w celu opracowania spójnej oferty produktów i usług NDT. W zakresie normalizacji kluczową procedurą EFNDT jest wielostronna umowa o uznaniu (MRA), sprzyjająca spójności personelu. Systemy certyfikacji prowadzone przez jednostki certyfikujące, nominowane przez krajowe towarzystwa NDT ułatwią prowadzenie procesu wzajemnego uznania i akceptacji świadectw kwalifikacji na skalę światową. Współpraca firm NDT w różnych krajach europejskich będzie promować koherencję globalną oraz ułatwi wymianę wiedzy i umiejętności dla wzajemnych korzyści. Kształcenie i szkolenia są również kluczowymi elementami międzynarodowej współpracy i spójności. EFNDT rozważa obecnie tworzenie dokumentów dotyczących wymagań dla ośrodków szkoleniowych i definiowanie poziomów doskonałości. Wielka Brytania przeszła transformację w zakresie organizacji praktyk zawodowych, w szczególności staży w obszarze badań nieniszczących. EFNDT rozważa możliwość stworzenia europejskich ram programu praktyk dla NDT. Personel NDT w Europie ma obowiązek promowania badań nieniszczących jako kluczowej umiejętności inżynierii co w efekcie pomoże zmniejszyć ryzyko groźnych zdarzeń, prowadzić bezpiecznie produkcję i chronić życie ludzkie.

Słowa Kluczowe: Struktura, kodeksy etyczne, komunikacja, normalizacja, certyfikacja, współpraca, edukacja i szkolenia, udział.



EFNDT Vice President
Roger Lyon

1. Global Structure of NDT

The current structure for the International Committee for NDT (ICNDT) and the Regional groups which include the European Federation of NDT (EFNDT), the Asian Pacific Federation of NDT (APFNDT), the African Federation of NDT (AFNDT) and the Pan-American Conference for Non-destructive Testing

(PANNDT) was established in the 1990s.

EFNDT has proposed a reorganisation of the ICNDT/Regional Federations structure, with clearer definitions as to what is to be done at each level and stronger coordination. The objective is to improve efficiency and reduce duplication. Doing away with overlaps and duplication of effort is a key component of the restructuring, for example, there is a condition monitoring working group in both ICNDT and EFNDT, the Chair for both groups is the same person, so it is likely that the two groups are discussing the same issues.

The fee structure was originally based on the principle of one society per country, paying one fee to ICNDT and another fee to the appropriate Region with no distinction on the basis of member size. In the future, all societies will pay a single fee for joint membership of ICNDT and their Region and the intention is for smaller societies (in terms of gross income), to pay a reduced rate to maintain their membership with ICNDT and

*Corresponding author. E-mail: roger.lyon@hotmail.co.uk

their Region, whereas larger societies will pay a larger fee.

Re-structuring will allow EFNDT to spend more time concentrating on European Regional issues, particularly supporting European NDT Societies.

2. Codes of Ethics

Observing the Code of Ethics is essential to creating a greater level of trust and confidence, and a positive perception of the non-destructive testing profession.

Each EFNDT member society has an obligation to act with integrity in the public interest and to encourage members to:

- act honourably, responsibly and lawfully;
- hold paramount the safety, health and welfare of the public and the protection of the environment;
- not discriminate on the basis of race, sex, religion, age, disability, national origin, or other such factors;
- not disclose confidential information acquired in the course of work, without the consent of the parties concerned or unless disclosure is clearly in the public interest;
- reject bribery in all forms;
- make a systematic assessment of environmental, health and safety risks related to work;
- provide objective and truthful information, especially when giving advice or criticism, making public statements or advertising/publicising services;
- avoid misrepresentation of EFNDT, or positions and policies of EFNDT, or any EFNDT units and association in cooperation with EFNDT or any national NDT society;
- report any violations of this code by another member to the Secretary of European Federation for Non-Destructive Testing (EFNDT).

3. Communicating Effectively

EFNDT is currently managed by a President, Vice President and eight other Board of Directors who are democratically elected at the EFNDT General Assembly. It is essential however, that the Board of Directors and the other 22 member societies and 7 associate members communicate effectively in order to develop a harmonised approach to the provision of NDT products and services. It is essential that the 22 member societies and 7 associate members who are not fortunate enough to sit on the EFNDT Board of Directors are consulted on major strategic issues and have the opportunity to voice their opinion. Similarly, it is equally important for EFNDT to communicate their actions and decisions to the member societies as and when they occur.

4. Prospects for Normalising Certification

The EN ISO 9712:2012 standard specifies the responsibilities for the Certification Body, Authorised Qualification Body, Examination Centre, Employer, Candidate and Certificate Holders. The standard also stipulates the different levels of certification, Level 1, Level 2 and Level 3. The standard then goes on to describes what is required in terms of eligibility, which includes training, visual requirements and experience. The experience requirement is where the standard becomes unclear and subject to interpretation. Some people think that gaining experience is simply applying the method under supervision, however, the definition of experience according to the standard

implies that experience is an extension of the training whereby the candidates extend their knowledge and skills. Another area of experience requiring clarification is the reduction in experience due to attempting more than one method at the same time. In one part of the standard it refers to no reduction if you go direct to Level 2 without undertaking Level 1, whereas in another part of the standard it allows reductions for attempting more than one method at the same time, without any reference to Level 1 or Level 2. Further confusion arises when in one section of the standard it specifies that reductions occur if you are attempting two or more surface methods, yet four paragraphs further on, it allows reductions for multiples of any method. One aspect of normalisation is if all certification bodies interpret the standards in the same way and at the moment, that is not the case.

EFNDT has created and is operating a Multilateral Recognition Agreement (MRA) since 1994. The first objective of the MRA is to promote harmonisation of the personnel certification schemes operated by Certification Bodies nominated by the national NDT societies in full or associate membership of the European Federation for NDT (EFNDT). The second objective of the MRA is to facilitate worldwide recognition and acceptance of certificates of competence conforming to applicable certification standards and issued to NDT personnel by the bodies referred to above. The EFNDT Multilateral Recognition Agreement refers to two schedules:

Schedule 1

The following national NDT Societies have signed the EFNDT Agreement on Multilateral Recognition of NDT Personnel Certification schemes and have thereby agreed to recognise certificates issued by the particular Certification Schemes registered by EFNDT in accordance with the Agreement (see Schedule 2).

Tab. 1. Extract from EFNDT MRA Schedule 1

Tab. 1. Wyciąg z EFNDT MRA Program 1

Country	National NDT Society	Name of signatory	Place and date of signing
Poland	Polish Society for NDT and Technical Diagnostics - SIMP	Z Pawlowski	Berlin 21st June 1997

So signatories to the EFNDT MRA recognise that each other's certification schemes meet the requirements of ISO 9712:2012 - Non-Destructive Testing – Qualification and Certification of NDT Personnel but is this enough for harmonisation and normalisation? Unfortunately, there is a glaring omission from ISO 9712:2012 and that is the number and type of samples you need to test in order to be certificated in a method. As I understand it, it is a matter for the certification body to make that judgement, for example, one certification body requires NDT ultrasonic operators to test two samples in order to be fully certificated in ultrasonic testing, whereas another certification body requires eight to be tested. This anomaly needs to be sorted out if we are to achieve proper harmonisation within Europe and the rest of the world.

5. Cooperation

Harmonisation and normalisation can also be enhanced by agreements between the NDT institutes in different countries

Schedule 2

Tab. 2. Extract from EFNDT MRA Schedule 2
Tab. 2. Wyciąg z EFNDT MRA Program 2

Country	Accredited Certification Body	Situation	ISO/IEC 17024 compliance Stated by: On (date):	ISO 9712 compliance Stated by : On (date):	Expiry of registration of MRA	Code of pract. Signed by: On (date):	MRA Registration Number
Poland	Jedn. Certyfikująca UDT-CERT ul. Szczęśliwicka 34 02-353 Warsaw E: cert@udt.gov.pl	Active ICNDT MRA since 27 February 2014	Polish Centre for Accreditation On 24.02.2006 Expiring 26.02.2018 ISO/IEC 17024: 2012	Polish Centre for Accreditation On 24.02.2006 Expiring 26.02.2018 EN ISO 9712:2012	26.02.2017	Marek Walczak 09.03.2006	6007

or by partnership arrangements between employers in different countries. Around 2005, RWE Npower, as it was called then, were heavily involved in developing and delivering specialist inspections. These specialist inspections covered a large range of power station plant items but concentrated on rotating plant. RWE's customer base was predominantly in the UK but they were frequently asked by customers overseas, normally but not exclusively Original Engineering Manufacturers (OEMs), to carry out inspections on their plant.

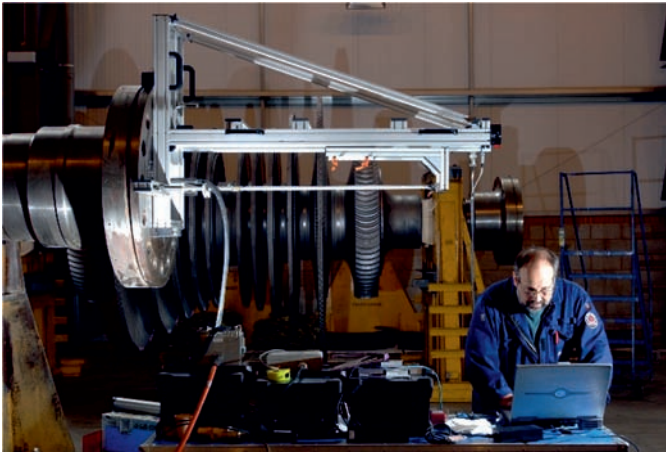


Fig. 1. Rotor Bore Inspection
Rys. 1. Badanie łopatki wirnika

To overcome the issues appertaining to language, logistics, mobilisation and the requirement to include standard NDT inspections, RWE developed partnering arrangements with local NDT service providers. Such arrangements existed in South Africa, France, Czech Republic, Australia and Poland. When I was the Managing the Inspection Management Group in RWE, we were fortunate in striking up a relationship with a company called 'Koli Co.Ltd. (Sp. z o.o.)' based in Gdansk, Poland. Very often, turbine rotor shafts have bores drilled through the centre of the shaft in order to reduce the weight. Turbine rotor bores are one of the highest stressed areas on a steam turbine and are susceptible to creep and fatigue cracking.

The consequences of failure from rotor bore cracking could be catastrophic so there is a need to carry out periodic inspections in order to detects at the earliest opportunity. The problem is that the critical defect size is very small and initiates on a relatively inaccessible surface. Previous inspections techniques have been time consuming and subject to operator interpretation. The rotor bore inspections involve eddy current and ultrasonic inspections carried out simultaneously, the results of which are

captured with PC based analyse software.



Fig. 2. Rotor Disc Bore Inspection
Rys. 2. Badanie koła wirnika

Another important inspection is the rotor disc bore inspection which could also suffer from stress corrosion cracking. This inspection involves ultrasonically scanning off the ever-changing profile of the rotor discs in order to interrogate the disc bores. End Rings are essential components of generator rotors and are shrunk on to either end of the rotor. There is a global history of end ring failures due to stress corrosion cracking, with crack initiation from internal ring bores not accessible to high integrity surface inspection without removal of generator rotor from stator and subsequent removal of end ring.



Fig. 3. End Ring Inspection
Rys. 3. Badanie pierścienia końcowego

The solution was to develop a high integrity end ring inspection that can be carried out with generator rotors both 'in-situ' and out of stator housings, and that negates the alternative high expense and risk of removing end rings from rotors, while overcoming the ultrasonically attenuative nature of their material. The involvement of Koli to liaise with the customers and to provide resources to assist with the standard NDT inspection requirement was essential, the arrangement worked well and eventually Koli inspectors visited RWE in the UK to undergo training in some of the specialist inspection applications. Cooperation arrangements can break down barriers, can enhance harmonisation and lead to normalisation. In this section I have referred to my own experiences to emphasise the advantages gained through cooperation, EFNDT is keen to support such initiatives that see member societies and employers working together.

6. Education in NDT

In EFNDT member countries education and vocational training initiatives are encouraged in order to raise the standard of NDT. Each member country manages education and vocational training differently but often we are working to the same principle and standards, such as, EN ISO 9712:2012. For the purpose of this paper, I would like to share with you the experiences of the UK. Like other EFNDT NDT societies, the UK has created a certification scheme called PCN.

PCN (Personnel Certification in NDT) got off to a slow start but very quickly became the primary certification scheme in the UK, it is used worldwide and is regarded by many countries as high quality in terms of the NDT training and certification. Its popularity is based on consistency of delivery and the high standards that PCN is set at. It is essential to British industry that these standards are maintained.

The Research Centre for NDT in the UK introduced an Engineering Doctorate scheme, the scheme has been running for 11 years, it is an excellent opportunity for academics to develop their NDT career to the highest level. The Engineering Doctorate degree is a 4-year research degree of equivalent academic standing to a PhD. The research engineers are based in companies where they carry out applied research on one or more topics of interest to the company.

Around 2012, the UK government introduced a new apprenticeship framework, the new supported (funded) apprenticeship model is called Trailblazer which, as far as funding is concerned, will replace all existing apprenticeship schemes in the 2016-2017 academic year. BINDT have helped to develop Trailblazers since September 2014 which has resulted in two apprenticeships being fully approved and another one on the way.

With support from BINDT, Northampton University has developed a suite of NDT degrees which include a Foundation degree, a BSc degree and a BSc honours degree. The Foundation degree has been available in September 2007 and the BSc degrees have been available since January 2010. The Foundation and BSc degrees are currently being developed in to an Apprenticeship which will allow employers to apply for funding.

A new initiative being developed by Northampton University, which is fully supported by BINDT is an MSc which is called 'MSc Advanced Industrial Practice (STEM) – by negotiation'.

These proposed programs of study are aimed specifically at those in positions of responsibility working in STEM-based disciplines, who want to develop their expertise within their current profession.

EFNDT are currently revising its strategy to take into account the new global structure, together with other new initiatives in vocational training and education. I am hoping to convince EFNDT that there is merit in developing a European Apprenticeship Framework that could be used by EFNDT members and would provide additional harmonisation and normalisation.

7. Contribution to the Engineering Value Chain

I know this statement may be different in other countries but I have always thought that NDT is not fully understood and is therefore undervalued. Many industries use components, materials and plant items, which when operational, are subject to immense stresses and risk, and therefore, the likelihood of failure is high. To mitigate the risk when justifying continued operation, extensive NDT is carried out which helps to make the necessary operational safety case. The consequences of failure could result in loss of life, an adverse environmental impact and commercial penalties. Very often the results of NDT inspections are not re-checked and are taken at face value, therefore it is essential that the NDT results are correct and that the NDT Operators or Engineering Technicians are fully aware of the importance and the impact of their role.

At every opportunity we must tell plant owners, other engineering groups, insurers and regulators how good we are and what value we add to the engineering life cycle of plant and components. Our current equipment and technology is vastly superior to what was used 15 years ago and the skills of NDT personnel have increased by orders of magnitude. EFNDT wishes to promote NDT accomplishments in order to gain the recognition we deserve.

8. Conclusion

EFNDT has proposed a reorganisation of the ICNDT/Regional Federations, with clearer definitions as to what is to be done at each level and stronger coordination. It intends to promote fairness and safety in Europe and will encourage EFNDT Member society to make a commitment to uphold and promote the principles of the EFNDT Code of Ethics, which in doing so, we will create a greater level of trust and confidence, and a positive perception of the non-destructive testing profession. EFNDT encourages all of its members to communicate effectively in order to develop a harmonised approach to the provision of NDT products and services. Where different cultures and principles allow, normalisation and harmonisation are essential between EFNDT members. Cooperation of NDT Societies and Companies across European countries will promote global harmonisation and will facilitate the sharing of knowledge and skills to mutual benefit. Education and vocational training are key components of developing and promoting NDT excellence. NDT personnel in Europe have a responsibility to promote NDT as a key Engineering skill which helps to reduce risk, operate safely and save lives.

Qiang Tianpeng*

Far East Nondestructive Testing New Technology & Application Forum Council, China

Development of Non-destructive Testing Technology in China

Rozwój technologii badań nieniszczących w Chinach

ABSTRACT

This article puts forward the concept of three stages of NDT technology development in China; it also introduces the number of the NDT personnel and the issuance of certificates in China; with the special pressure equipment as the example to illustrate the scale of application of NDT technology in China; with the TOFD technology as the example to illustrate the present situation of application of new NDT technology in China; it introduces the situation of NDT instruments in China, including categories of the instrument products, number of the instrument production enterprises and the product characteristics, the instrument industrial policies of China; it introduces the universities and scientific research institutes in China that carry out NDT education and research, and their research fields, academic specialty and leaders; it introduces the present situation of NDT standards, the standard management system and number of standards, and formulation of NDT new technology standards in China; and it introduces the advanced concept on NDT put forward by Chinese scholars.

Keywords: China, NDT, technical development

STRESZCZENIE

Prezentowano koncepcję trzech obszarów rozwoju technologii NDT w Chinach. Omówiono strukturę i liczebność personelu zatrudnionego w sektorze NDT oraz proces certyfikacji, akredytacji i standaryzacji w Chinach. Zakres stosowania technologii i wdrażania nowych rozwiązań NDT zaprezentowano na przykładzie procedur kontroli bieżącego stanu urządzeń ciśnieniowych i implementacji metody TOFD. W artykule przedstawiono także bieżący stan sektora produkcji i utrzymania oprzyrządowania NDT w Chinach, odnosząc się w tym do kategorii i właściwości wytwarzanych produktów, liczby przedsiębiorstw produkcyjnych i polityki przemysłowej. Na koniec odniesiono się do sektora badawczo-rozwojowego. Przedstawiono uniwersytety i instytuty naukowo-badawcze w Chinach, które prowadzą edukację i badania NDT. Omówiono obszary badawcze i specjalności akademickie liderów tworzących jednostki badawcze oraz koncepcję zaawansowanych rozwiązań NDT przyjmowaną przez chińskich uczonych. Ponadto przedstawiono obecny stan standardów badań nieniszczących, system zarządzania standaryzacją i liczbę norm NDT.

Słowa Kluczowe: Badania nieniszczące w Chinach, Nowe technologie



Professor

Qiang Tianpeng

1. Three stages of NDT technology development in China

Stage 1: Before 1980

There were very few applications, and very few professional personnel; it was weak in theory and poor in technology;

From 1954, China started to introduce NDT technology and equipment such as RT, UT, MT and PT from the former Soviet Union, which were used in such industrial fields as the electric power, metallurgy, mechanical and automobile manufacturing. And at the same time, China began to learn and digest and absorb the technology and imitate and develop the equipment; in 1957, the first ultrasonic flaw detector and the first magnetic particle flaw detector were developed; in 1958, film for industrial radiographic testing began to be produced; in 1959, the first X-ray machine was developed successfully; in 1960, the first portable Co60 γ ray detector was developed; and in 1964, penetrant flaw detection agent was developed successfully.

From 1966, NDT technology in China was at a standstill status.

By 1980, the NDT technology of China is far behind that of the foreign countries.

Stage 2: 1980-2000

China learned and drew on the experience of foreign achievements, constructed the basis theory, technology and process systems or frames; the conventional NDT technologies became basically complete.

Since 1980, China started to open up to the outside world, and carried out large scale economic construction; and NDT technology application entered a rapid development stage: learning from America, Europe and Japan, China established and improved the conventional NDT theoretical system, industrial standard system, personnel training and assessment certification system, NDT equipment and material manufacturing system, and industrial NDT technology and process management system and quality control system. The scale of NDT technology application is gradually enlarged, the level is improved continuously, and the management is standardized day by day, which have met the demands of the national economic development and the demands of such fields as the mechanical manufacturing, energy and chemical industry, transportation, and national defense and military. Besides, the new technology research and application began to speed up: in 1986, the 36-channel acoustic emission instrument was developed; in 1988, the first digital ultrasonic flaw detector was developed; in 1991, X-ray real-time image-forming system was developed; in 1993, γ -ray source CT machine and the digital multi-frequency multi-channel eddy current testing instrument were developed; in 1995, industrial

*Corresponding author. E-mail: inloving@126.com

test linear accelerator was developed; and in 2000, metal magnetic memory diagnostic apparatus was developed.

Stage 3: 2000+

The stage of all-round development and ability and level improvement; the conventional NDT technology application scale is huge and increasingly standardized. The steps of learning, researching, perfecting and promoting new technologies are quickened; for example, new technology of X-ray detection – CR and DR; new technology of ultrasonic testing – TOFD, PAUT, guided wave, and EMA; new technology of electromagnetic detection - pulsed eddy current, magnetic flux leakage, magnetic memory, and infrared, laser, terahertz wave, etc. The application scale and level of a number of NDT new technologies are in the lead of the world. The varieties and categories of the NDT instruments and products are complete, and their quality and performance are further improved. The research and development of advanced instruments achieve results continuously.

2. Number of the NDT personnel and issuance of certificates in China

By 2015, about 340,000 NDT personal qualification certificates were issued by the respective departments of China.

There are several types of non-destructive testing certificates in China; in addition to the certificates issued by the Society for Nondestructive Testing, many government departments also issue the certificates for the non-destructive testing personnel within their jurisdiction. There are 7 main departments issuing certificates: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (AQSIQ) (special equipment), railway system, Ministry of Industry and Information Technology (aeronautical and space and weapons), Ministry of Environment Protection (nuclear power system), Ministry of Water Resources, CAAC, China Electricity Council and China State Shipbuilding Corporation, etc. The top three fields that have issued most certificates are: the special pressure equipment (boiler, pressure vessel, pressure pipeline) industry has issued about 160,000 certificates; the second is the railway system, having issued about 80,000 certificates; and the third is the Society for Nondestructive Testing, having issued about 60,000 certificates.

3. Application of special pressure equipment NDT technology

In China, the special pressure equipment is the biggest user of non-destructive testing.

China is a large country of equipment manufacturing; there are over 20,000 enterprises that are engaged in special pressure equipment (boilers, pressure vessels, pressure pipelines) manufacturing, installation and repair. China is also a large country of using the pressure equipment; there are in-service 700,000 boilers, 3.5 million pressure vessels, 143 million gas bottles and 940,000km of pressure pipelines.

The industrial chain from design, manufacturing, detection to installation, modification and repair of the special pressure equipment, the annual output value is about 1 trillion yuan. Of which, the output value of special equipment non-destructive testing is over 20 billion yuan, with employees of over 100,000,

qualification certificates of about 160,000. Of which, class III certificates make up 5%, issued to about 8,000 persons; and class I and class II certificates make up 95%.

4. Application of NDT new technologies

TOFD technology has been widely used in special pressure equipment manufacturing and in-service detection; digital radiography (DR and CR) technology is gradually being popularized; AUT/PA technology has been applied in long distance natural gas pipeline and submarine pipeline project since 2000; PAUT technology has achieved good results in the detection of wheel sets and in the application of various structural members in high-speed railway industry; magnetic flux leakage technology is applied in steel pipe manufacturing production lines; guided wave technology is applied in pressure pipelines; ultrasonic C scanning technology is applied in detection of thin-wall structures (metallic and non-metallic composite materials); laser speckle technique is applied in detection of composite materials, etc.

5. Examples of popularization and application of new technology - TOFD

In 2000, China began to research TOFD technology; in 2004, China First Heavy Industries used TOFD in pressure equipment manufacturing for the first time instead of radiographic photography; in 2007, AQSIQ approved some units that have technical abilities to use TOFD technology in pressure equipment manufacturing; in 2008, qualification training and assessment was started for TOFD personnel; at present, over 1500 TOFD level 2 certificates have been issued; in 2010, the Chinese TOFD standard was published, TOFD technology is widely used in manufacturing of special pressure equipment instead of radiographic photography; at present, TOFD technology has been applied in 90% of the newly-built spherical tanks; and TOFD technology has been applied in 50% of the thick wall vessels.

The coal liquefaction hydrogenation reactor that was welded at the site of Inner Mongolia, weighted 2040t, with wall thickness of 336mm, a diameter of 4812mm, and a height of 63m, all the welds were detected by TOFD technique, which was implemented by China First Heavy Industries.

The dimethyl benzene column that was welded at the site of Hainan Province, weighted 3960t, with a height of 126.6m, a diameter of 10800mm, wall thickness of 96mm~142mm, having a total weld length of 3400m, it was made by Ningbo Tianyi Company; the vessel was transported to the site in 9 separate sections, fitted up and welded at high altitude; Jiangsu Zhongtechuangye Equipment Inspection Co., Ltd. implemented TOFD detection for all the welds.

6. NDT instruments and materials

There are a lot of NDT instrument manufacturing enterprises in China, with complete varieties. Over 800 enterprises are engaged in manufacturing of NDT instruments, equipment and materials; some instruments of new technology are produced and sold at the market, for example: TOFD, phased array, guided wave, acoustic emission, industrial CT, high-energy accelerator, DR, and pipeline pig.

According to the statistics, there are over 320 enterprises that

are engaged in ray (including X-ray, γ -ray, accelerator, CT) instruments and equipment production; over 220 enterprises that are engaged in ultrasonic (including conventional ultrasonic, TOFD, phased array, guided wave) instruments and probe equipment production; over 180 enterprises that are engaged in electromagnetic (magnetic powder, eddy current, magnetic flux leakage) instruments and equipment production; over 40 enterprises that engaged in production of penetrating equipment and materials; and over 100 enterprises that are engaged in producing instruments, equipment and materials of new technology.

7. Introduction to some advanced NDT instrument manufacturing enterprises and their products

- 1) RT: Dandong Aolong Radiative Instrument Co., Ltd. (X-ray machine/DR image-forming system); Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry (accelerator); NUCTECH Company Limited (accelerator/CT); Chongqing Zhence Science & Technology Co., Ltd. (CT); Sichuan Ruidi X-ray Digital Image Technology Co., Ltd. (DR); Lanzhou Sanlei Electronic Co., Ltd. (DR); Zhejiang Jinyun Image Quality Indicator Factory (image quality indicator/intensifying screen); Wenzhou Lucheng Non-destructive Testing Equipment Company (Film viewer / densitometer).
- 2) UT: Wuhan Zhong Ke Innovation Technology Co., Ltd. (TOFD/ultrasonic testing system); Nantong Union Digital Technology Development Co., Ltd. (TOFD/ultrasonic testing system); Guangzhou Doppler Electronic Technology Co., Ltd. (phased array instrument /probe); Shantou Ultrasonic Instrument Research Institute Co., Ltd. (phased array instrument /probe); Hangzhou Zheda Jingyi Electromechanical Technology Engineering Co Ltd. (magnetostrictive guided wave / steel plate ultrasonic testing system); Guangzhou Soundwel Technology Co., Ltd. (acoustic emission); Chengdu Zudao Science & Technology Co., Ltd. (high-speed railway wheel set UT/PAUT/EMT automatic detection system); Allrising Beijing Science & Technology Co. Ltd. (steel plate steel pipe UT/ET automatic detection system); Xi'an Jin Bo Testing Instrument Company (laser ultrasonic); Shandong Ruixiang Mould Co. Ltd. (test block).
- 3) Electromagnetic: Eddysun (Xiamen) Electronics Co., Ltd. (eddy current / integrated detection system); Shenyang Ligong University (MFL / pipeline pig); Wuhan Huayu Yimo Testing Equipment Co., Ltd. (MFL/steel wire rope/pipeline);
- 4) PT Shanghai Chengyou Industrial Group Co., Ltd.; Wujiang Hyperd NDT-Material Co., Ltd.

8. The Chinese government implements the "Special projects of major scientific instruments and equipment development"

Although there are many instrument manufacturers in China, there is still a gap in the quality and performance of the instruments compared with the international advanced level. In order to change this situation, the Chinese government has implemented the "Special projects of major scientific instruments

and equipment development". From 2011~2016, there have been more than 300 projects established, each project was invested with 50 ~100 million yuan. Of which there are nearly 30 projects of nondestructive testing instruments and equipment, involving such fields as electromagnetic, Radiography, ultrasonic, and optical areas, including: 3 projects of terahertz technology based equipment systems; 2 projects of X-ray technology-based tomography and 3-D microscopic imaging system; 2 projects of new-type phased array ultrasonic equipment; and others: electromagnetic ultrasonic equipment, 3-D magnetic flux leakage imaging system, millimeter wave imaging system, new-type thermal imaging instrument, and new-type leak detection instrument, etc.

9. R&D-type advanced NDT application enterprises

There are more than 5000 institutions or units and departments that apply NDT technology in China; and there are more than 1000 professional companies that are engaged in NDT. The following are some NDT application enterprises that have technical research and development capability and their technical characteristics: China Nuclear Power Operation Technology Corporation, LTD. (nuclear power detection, pipe ultrasonic imaging system, austenitic weld ultrasonic); CGNPC Inspection Technology Co., Ltd. (nuclear power detection, reactor detection/robot); Langfang North Nondestructive Detection Company (NNDT) (long-distance pipeline detection, pipeline circumferential weld AUT/PA); China Petroleum Pipeline Inspection Technologies Co., Ltd (long-distance pipeline detection, pipeline inner detection/pipeline pig); Sinopec Long-distance Oil and Gas Pipeline Detection Co., Ltd. (pipeline inner detection/pipeline pig); the Testing and Failure Analysis Center of Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology (ultrasonic C scanning, laser holography); AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials Aviation Materials Testing Laboratory (ultrasonic C scanning, phased array); Jiangsu Zhongtechuangye Equipment Inspection Co., Ltd. (radiographic examination of tube to tube-sheet fillet welds, TOFD, phased array, local magnetic saturation eddy current, HF guided wave); China First Heavy Industries Dalian Hydrogenation Reactor Manufacturing Co., Ltd. (thick-wall weld TOFD, austenitic weld ultrasonic); Beijing Guodian Electrical Testing Technology Research Institute Co., Ltd. (in-service power plant boiler detection, piping guided wave detection, pipeline scale cinder detection); Jiangsu Fasten Material Analysis & Inspection Co., Ltd. (bridge sling/AE); China Classification Society Industrial Corporation (phased array).

10. Institutes and universities that carry out NDT research

There are more than 40 colleges and universities in China that have some 1000 undergraduate and graduate students of NDT detection every year. There are more than 50 research-type colleges and universities and institutes that are engaged in researches of NDT technology; the following are some academic leaders of the important institutions and their research areas and achievements: Professor Lin Shuqing of China Special Equipment Inspection and Research Institute (AE technology and equipment, TOFD process, structural health monitoring,

pipeline pig technique, pulsed eddy current technique, etc.); Professor Tian Guiyun of School of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (pulsed eddy current, electromagnetic stress determination); Professor Han Yan of North University of China Modern NDT Engineering Technology Research Center of Shanxi Province (digital signal processing (DSP) and CT reconstruction algorithm); Professor Xu Chunguang of School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology (ultrasonic stress measurement, robot-based detection technology); Professor Chen Zhenmao of School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University (eddy current-based quantitative NDT); Professor Huang Songling of Department of Electrical Engineering, Tsinghua University (submarine pipeline inner detection, MFL 3-D imaging); Professor Zhou Zhenggan of Ultrasonic NDT Laboratory, Beihang University (air coupling ultrasonic, laser-generated ultrasonic, nonlinear ultrasonic); Professor Gao Xiaorong of NDT Research Center, Southwest Jiaotong University (high-speed railway detection technology and equipment); Professor Wang Jue of Chongqing University (industrial CT); Professor Liu Songping of Beijing Aeronautical Manufacturing Engineering Research Institute (composite material detection); Professor Kang Yihua of School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology (super magnetization MFL detection); Professor Zhang Yan of Physics Department, Capital Normal University (infrared/terahertz wave); professor Lu Chao of Key Laboratory of Ministry of Education of China for NDT Technology (Nanchang Hangkong University), (NDT technology and process); professor Zeng Zhiwei of School of Aerospace Engineering, Xiamen University (numerical simulation of eddy current).

11. The Chinese non-destructive testing standards organization

Standardization Administration of China is responsible for management of the national standards. Many departments formulate industrial standards respectively, now more than 350 NDT standards have been formulated and promulgated; the departments that have formulated quite a few non-destructive testing standards include: machinery, aerospace, aviation, railways, nuclear industry, military products, electric power, petroleum and natural gas, etc. There are three NDT standardization administration organizations that are more influential:

- 1) National Technical Committee on Non-destructive Testing of Standardization Administration of China (CSBTS/TC56). It is responsible for national standards: GB/T and some standards of machinery industry: JB/T (NB/T); and now it has promulgated over 140 standards.
- 2) Sub-committee on Non-destructive Testing Instrument of National Technical Committee on Test Machines of

Standardization Administration of China (TC122 / SC1); it is responsible for ISO/TC135 instrument parts; it has promulgated and is formulating more than 40 standards.

- 3) China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels (SAC/TC 262); it is responsible for formulation and management of the non-destructive testing standards of special pressure equipment; now it has promulgated 14 standards: NB/T47013.1-14.

12. Non-destructive testing new technology and method standards

GB/T series: The following have been promulgated: TOFD (GB/T23902), CR (GB/T 26642), magnetostrictive guided wave (GB/T28704), pulsed eddy current (GB/T28705), phased array (GB/T32563). The following are under preparation: X-ray digital imaging, guided wave, and magnetic flux leakage.

NB/T47013 series: The following have been promulgated: TOFD (NB/T47013.10); DR (NB/T47013.11); magnetic flux leakage (NB/T47013.12), pulsed eddy current testing (NB/T47013.13); the following will be promulgated soon: CR (NB/T47013.14); and the following is under preparation: PAUT (NB/T47013.15).

13. Advanced concepts of NDT

The following advanced concepts on NDT technology are put forward by the Chinese scholars:

- 1) Dr. Geng Rongsheng, former director of Chinese Society for Nondestructive Testing, has pointed out: green NDT is the inevitable course of development, which must be vigorously promoted and advocated. The connotation of green includes: energy conservation and emission reduction, environmental protection and sustainable development.
- 2) Professor Shou Binan, secretary-general of China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels, advocates the concept "the failure mode-based NDT": in order to improve the validity and reliability of NDT technology application, when formulating the standard, the selection of NDT methods, the technical parameters and the determination of the detection ratio shall be considered based on the structure's failure mode and failure probability.
- 3) Mr. Lin Junming, researcher and director of the Electromagnetic Committee, Chinese Society for Nondestructive Testing, points out the importance of "modern NDT integrated system" development: to improve the detection accuracy, efficiency and reliability, the main development direction of the instrument system is comprehensive integration of mechanical and electrical integrated.

Marek Śliwowski*
NDTEST Warszawa, Polska

Studium przypadków - badanie złączy austenitycznych na terminalu LNG

Case study - the study of austenitic joints for LNG terminal

ABSTRACT

In paper, in a frame of case study, the ultrasonic inspection of austenitic girth butt welds in storage tank of LNG terminal for the range of diameter till 60 m and thickness range $10 \div 40$ mm was studied.

There are presented the fundamental problems arise by ultrasonic testing of austenitic coarse grained welds. The examination technique selection based on accessible knowledge, existing standards and tests on representative weld specimen is followed through in a frame of case study.

It is presented the scan plan of testing the austenitic girth welds using conventional ultrasonic system, based on the multiprobe scanning. There is presented a range and sensitivity setting on reference block manufactured on the base of representative austenitic weld with reference reflectors dedicated to each area of interest of inspected weld volume.

It is also presented the new modern solution of scanner with only two probes. Each of them is dual matrix phase -array probe working in pitch-catch mode and cold symbolic PA DMA-TRL. They are connected with phase-array apparatus controlled localization and acquisition of experimental data. There are discussed advantages such a modern examination technique reached highest level of NDT techniques.

The presented case study is an assumption formulation example of examination procedure for technically important and responsible object - like assessment of requirements agreement with technical regulations for the austenitic welds in storage tanks of liquid gas LNG.

Keywords: case study, ultrasonic inspection, austenitic welds (austenitic welded joints), austenitic welds (seams), conventional ultrasonic pulse echo probes PE, ultrasonic twin probes of longitudinal waves TRL, ultrasonic dual matrix phase-array probes PA DMA-TRL

STRESZCZENIE

W referacie rozważono, w ramach studium przypadku, zadanie ultradźwiękowego badania doczołowych austenitycznych złączy spawanych na zbiornikach ciekłego gazu terminalu LNG, w zakresie średnic do DN 60 m oraz zakresie grubości $10 \div 40$ mm.

Przedstawiono podstawowe problemy występujące przy ultradźwiękowym badaniu austenitycznych złączy spawanych o dużej grubości ziaren w spoinach. W ramach studium przypadku prześledzono dobór techniki badania - w oparciu o dostępną wiedzę, istniejące dokumenty normatywne i badania na reprezentatywnych próbkach złączy.

Zaprezentowano plan badania obwodowych złączy spawanych zbiorników austenitycznych z wykorzystaniem konwencjonalnego ultradźwiękowego systemu badawczego, opartego na technice wielogłowicowej. Omówiony został sposób nastawiania zakresu pomiarowego i czułości badania na reprezentatywnej próbce odniesienia w postaci spoiny austenitycznej z reflektorami referencyjnymi przewidzianymi dla każdej strefy przeszukiwania.

Przedstawiono również alternatywne nowoczesne rozwiązanie skanera z dwoma głowicami ultradźwiękowymi z podwójną matrycą phase-array typu PA DMA-TRL, współpracującymi z aparaturą sterującą lokalizacją i akwizycją wyników badania. Omówione zostały zalety nowoczesnej techniki badawczej.

Prezentowane studium przypadku jest przykładem sformułowania założeń do przygotowania procedury badania obiektu dla technicznie ważnego i odpowiedzialnego zadania badawczego - ocena zgodności z wymaganiami złączy austenitycznych w zbiornikach magazynowych ciekłego gazu LNG.

Słowa Kluczowe: studium przypadku, badanie ultradźwiękowe, złącza austenityczne, spoiny austenityczne, konwencjonalne głowice ultradźwiękowe echa PE, głowice ultradźwiękowe nadawczo-odbiorcze fal podłużnych TRL, głowice ultradźwiękowe z podwójną matrycą phase-array, nadawczo-odbiorcze PA DMA-TRL.

1. Wstęp

W niniejszej pracy rozpatrzone zostaną problemy związane z badaniem złączy austenitycznych (Rys. 1) podczas konstrukcji zbiorników ciekłego gazu na terminalu LNG. Przedstawione materiały są elementem prezentacji możliwości badawczych konsorcjum badawczego Applus RTD i NDTEST przy aplikacji do projektu polskiego LNG. [1]

Termin „austenityczny” odnosi się do różnorodnych materiałów i ich kombinacji, zawierających stale wysokostopowe austenityczne oraz stopy Ni-Cr takie np. jak „Inconel”, „Incoloy”, itd.. Wykorzystanie ultradźwięków, w porównaniu do przypadku materiałów ferrytycznych, dla badania materiałów a w szczególności spoin austenitycznych jest istotnie ograniczone z wielu powodów:

- anizotropowej struktury charakterystycznej dla materiałów austenitycznych w postaci preferencyjnej orientacji

w kierunku wzrostu ziaren - na ogół wzdłuż grubości - Rys. 2. (tzw. struktury dendrytyczne);

- tworzenia się struktury odlewu w obszarze jeziorka spawalniczego spoiny;
- tworzenia się strefy przejścia pomiędzy materiałem rodzimym i materiałem spoiny (tzw. linia - granica wtopienia);
- dla spoin austenitycznych tworzenie dużych wydłużonych ziaren (do kilku mm), które nadają strukturze spoiny cechy niejednorodności - szczególnie w okolicach linii wtopienia.

Punktem wyjścia, w ramach studium przypadku - badanie złączy austenitycznych - jest pytanie: dlaczego standardowe techniki badania złączy spawanych (np. wg EN ISO 17640:2011 [2]) nie mogą być zastosowane bezpośrednio do badania połączeń typu austenitycznego? Sama struktura krystalograficzna stali austenitycznych nie stanowi istotnej przeszkody w stosowaniu standardowych technik badań ultradźwiękowych. Wiele wyrobów kutyh, walcowanych, tłoczonych czy ciągnionych

*Autor korespondencyjny. E-mail: m.sliwowski@ndtest.com.pl

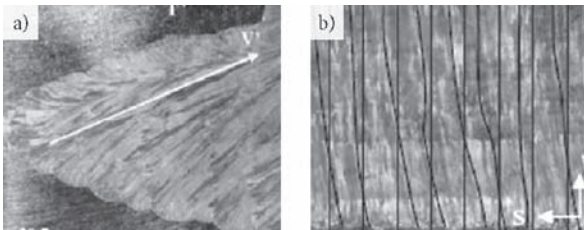
wykonanych ze stali austenitycznych bada się podobnymi technikami jak stale ferrytyczne drobno- lub średnioziarniste [3].



Rys. 1. Złącze spawane 9 % Ni – Inconel 625 - układ tekstury dendrytycznej spoiny austenitycznej w zbiornikach LNG

Fig. 1. Weld joint 9% Ni – Inconel 625 – dendritic texture arrangement in austenitic weld of LNG storage tank

Istotny problem badawczy powstaje wówczas, gdy w wyniku procesu technologicznego, w materiale austenitycznym powstaje gruboziarnista struktura dendrytyczna. Sytuacja taka ma miejsce w odlewach oraz w złączach austenitycznych wymagających dużej energii spawania. W porównaniu do stali ferrytycznych istotna różnica polega na tym, że powstająca w procesie krzepnięcia struktura gruboziarnista jeziorka spawalniczego pozostaje austenityczna i nie ulega przemianom w rozdrobniony ferryt, jak to ma miejsce podczas stygnięcia zwykłych stali ferrytycznych.



Rys. 2. Układ tekstury dendrytycznej spoiny austenitycznej spawanej w pozycji : (a) poziomej – nachylenie krystalitów około 20°; (b) pionowej – nachylenie pionowe około 90°

Fig. 2. Dendritic texture arrangement of austenitic joint welded in position: (a) lateral – crystallite inclination about 20°; (b) vertical – crystallite inclination about 90°

Struktura dendrytyczna ma charakter ukierunkowany i prowadzi do silnej anizotropii właściwości sprężystych stopiwa (Rys. 2a, 2b). W rezultacie to anizotropia struktury, obok gruboziarnistości oraz niejednorodności, jest głównym źródłem trudności w stosowaniu standardowych technik ultradźwiękowych do badań tych materiałów.

W przypadkach, gdy w procesie spawania w materiale spoiny austenitycznej zostaje zachowana lub zmieniona w niewielkim stopniu struktura drobnoziarnista badanie ultradźwiękowe może być przeprowadzone standardowymi technikami.

Struktura drobnoziarnista często pozostaje niezmienna w złączach o małej grubości, w trakcie spawania z niewielką energią liniową lub przy dużej szybkości odprowadzania ciepła. W ramach studium przypadku należy rozstrzygnąć, w oparciu o badania makro oraz testy ultradźwiękowe przeprowadzone na reprezentatywnych próbkach spoin, czy należy stworzyć specjalną procedurę badania złączy austenitycznych. Istotnym

ułatwieniem i uporządkowaniem tego problemu badawczego jest powstała niedawno norma wyrobu EN ISO 22825:2012 [4].

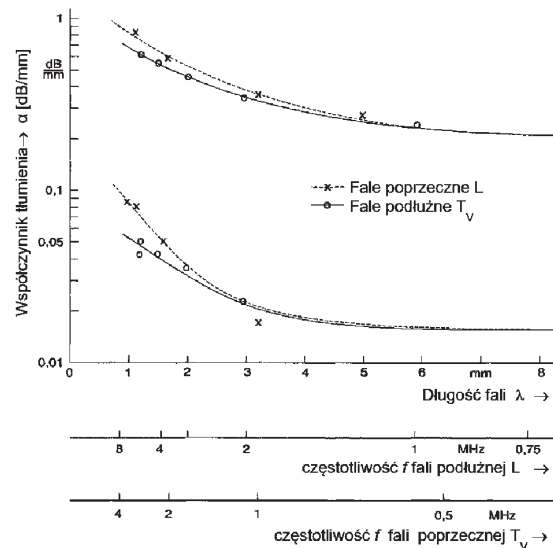
2. Konsekwencje struktury anizotropowej i gruboziarnistej dla przebiegu fal UT

Duże rozmiary ziaren powodują wzrost rozpraszania fal ultradźwiękowych na granicach ziaren, co przyczynia się do znacznego wzrostu współczynnika tłumienia jak i podwyższenia poziomu szumu strukturalnych materiału spoiny w porównaniu do materiału rodzimego [5].

Współczynnik tłumienia fal ultradźwiękowych szybko wzrasta z częstotliwością fali, zaś przy tej samej częstotliwości jest wyraźnie większy dla fal poprzecznych T_V niż podłużnych L (Rys. 3).

Materiał spoiny austenitycznej działa jak filtr dolnoprzepustowy (Rys. 4.), z charakterystyki widmowej wycinane są wyższe częstotliwości, szczególnie w miarę rosnącego przebiegu drogi fali $s = \dots$ [mm]

Parametrem głowice ultradźwiękowych, który wymaga optymalizacji w przypadku badania gruboziarnistej struktury spoin austenitycznych jest częstotliwość podstawowa głowicy oraz szerokość pasma częstotliwości. Aby zredukować negatywne efekty wywołane silnym rozpraszaniem fal ultradźwiękowych na granicach ziaren, częstotliwość fali powinna być możliwie niska, co z drugiej strony skutkuje pogorszeniem rozdzielczości zasięgowej głowicy [6].

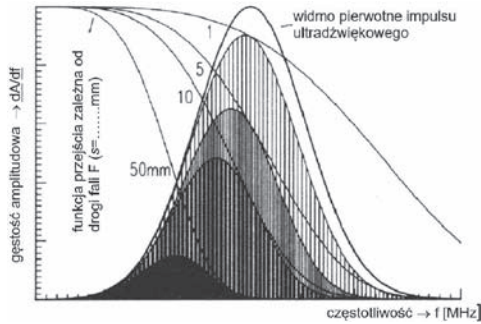


Rys. 3. Zależność tłumienia ultradźwiękowego dla fali podłużnej L i poprzecznej T_V (polaryzacja pionowa) w zależności od długości (częstotliwości) fali głowicy w stopiwie spoiny austenitycznej oraz materiale rodzimym austenitycznym - złącza spawanego

Fig. 3. Ultrasonic attenuation relationship of the L- longitudinal and T_V – transversal (vertically polarized) waves in respect to wave length (frequency) of probes used to inspection in virgin austenitic material and in austenitic seam material

Dla złagodzenia tych sprzeczności należy użyć głowice o szerokim paśmie częstotliwości, co jest korzystne z uwagi na mniejszą szybkość zaniku amplitudy impulsów podczas ich przechodzenia przez silnie tłumiący materiał. W skład szerokiego widma impulsu wchodzi bowiem również niskie częstotliwości, które są słabiej tłumione przez materiał niż częstotliwość podstawowa

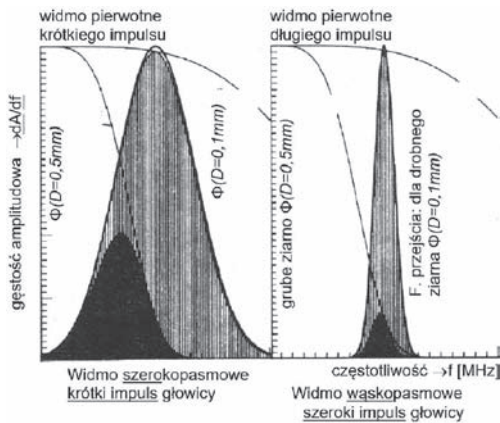
i wyższe. W efekcie widmo propagującego się impulsu szerokopasmowego ulega przesunięciu w kierunku niższych częstotliwości ale dzięki temu jego efektywne tłumienie w materiale ulega zmniejszeniu. Wpływ silnego tłumienia materiału na zmiany widma wąsko i szerokopasmowych impulsów ultradźwiękowych pokazano na Rys. 5. – dla materiałów o różnej ziarnistości.



Rys. 4. Mechanizm tłumienia charakterystyki widmowej głowicy dla rosnącej drogi przejścia s impulsu ultradźwiękowego dla gruboziarnistej tekstury spoiny austenicznej

Fig. 4. Attenuation mechanism of frequency spectrum characteristic for the increased paths s of ultrasonic pulse for the case of coarse-grained austenitic seam texture

Oprócz ogólnego pogorszenia stosunku sygnał-szum interferencje fal rozproszonych na granicach dużych ziaren mogą czasem prowadzić do powstawania wskazań pozornych (Rys. 9.).

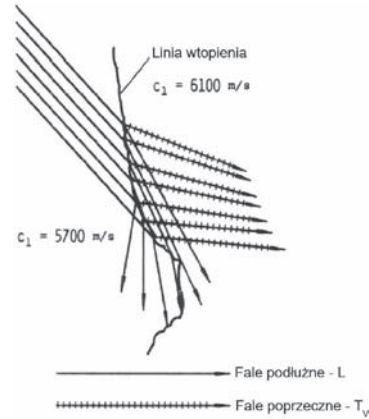


Rys. 5. Mechanizm tłumienia charakterystyki widmowej głowicy przy tej samej drodze fali: dla drobno ($D=0,1\text{mm}$) oraz grubo-ziarnistej ($D=0,5\text{mm}$) tekstury spoiny austenicznej

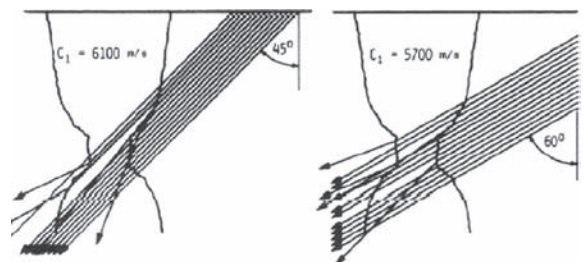
Fig. 5. Attenuation mechanism of frequency spectrum characteristic for the increased paths s of ultrasonic pulse for the case of fine- ($D=0,1\text{mm}$) and coarse-grained ($D=0,5\text{mm}$) austenitic seam texture

Anizotropia spowodowana wyróżnionym kierunkiem orientacji krystalitów słupkowych powoduje:

- kierunkową zależność prędkości fal względem tego kierunku. Zależność ta objawia się w mniejszym stopniu dla fal podłużnych L, w większym stopniu dla spolaryzowanych pionowo fal poprzecznych, TV (Rys. 6, 7);
- zwiększanie kąta rozbieżności (w porównaniu do przypadków izotropowych) i rozszczepienie wiązki zależne od kierunku wprowadzenia fali (Rys. 7);
- tworzenie się rozróżnialnej akustycznie granicy wtopienia, wywołującej zjawiska odbicia i konwersji modu fali (Rys. 6, 8.) oraz ech pozornych (Rys. 9).

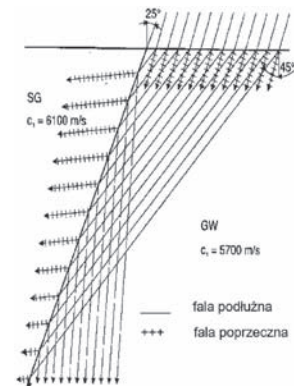


Rys. 6. Mechanizm konwersji modu fali na linii wtopienia
Fig. 6. Mode conversion of longitudinal wave on the sidewall fusion line



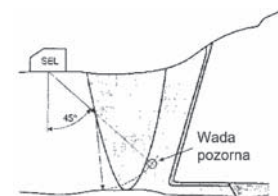
Rys. 7. Mechanizm zwiększania rozbieżności i rozszczepienia wiązki w anizotropowym materiale spoiny

Fig. 7. Increasing of divergence and decomposition of ultrasonic beam in anisotropic material of weld seam



Rys. 8. Całkowite odbicie fali podłużnej od granicy wtopienia złącza austenicznego

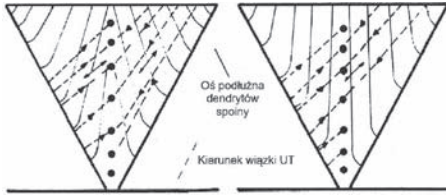
Fig. 8. Total mode conversion of longitudinal wave on the sidewall fusion line



Rys. 9. Wskazanie pozorne jako konsekwencja odbicia całkowitego fali L
Fig. 9. False (geometrical) indication as a consequence of total mode conversion

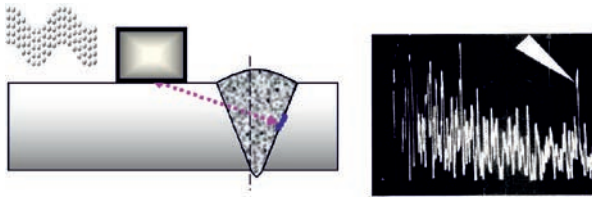
W rzeczywistych spoinach austenicznych struktura krystalitów słupkowych nie jest całkowicie jednorodna a ich wyróżniony

kierunek (Rys. 10) odchyła się od ustawienia pionowego w pobliżu granicy wtopienia spoiny. Fala ultradźwiękowa propagująca się w takim niejednorodnym materiale może zmieniać w sposób ciągły swój kierunek oraz prędkość. Wiązka ultradźwiękowa nie przebiega po liniach prostych lecz może ulegać zniekształceniom (zagięciom) na linii wtopienia, a także na kolejnych granicach ziaren. Dlatego należy liczyć się z możliwością znaczących błędów w lokalizacji wskazań od wad występujących w dalszych rejonach (poza oś spoiny) względem punktu wprowadzenia wiązki. Stąd wynika zalecenie badania spoin austenitycznych w zakresie drogi fali do pierwszej połowy skoku głowicy kątowej, $sp/2$.



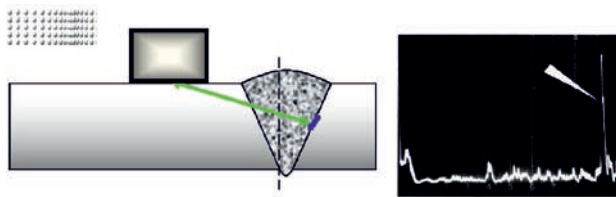
Rys. 10. Wiązka ultradźwiękowa może ulegać zniekształceniom (zagięciom) na kolumnowej niejednorodnej strukturze dendrytów, w szczególności w obszarach ich zakrzywienia (działanie podobne do fal prowadzonych – guided waves)

Fig. 10. Wiązka ultradźwiękowa może ulegać zniekształceniom (zagięciom) na kolumnowej niejednorodnej strukturze dendrytów, w szczególności w obszarach ich zakrzywienia (działanie podobne do fal prowadzonych – guided waves)



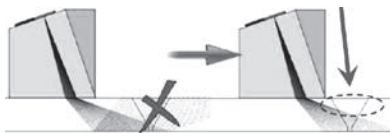
Rys. 11. Lokalizacja i obraz wskazania wady w spoinie austenitycznej falą poprzeczną spolaryzowaną pionowo – T_v

Fig. 11. Localization and image indication of imperfection in austenitic weld using transversal vertically polarized wave – T_v



Rys. 12. Lokalizacja i obraz wskazania wady w spoinie austenitycznej falą podłużną – L

Fig. 12. Lokalizacja i obraz wskazania wady w spoinie austenitycznej falą podłużną – L

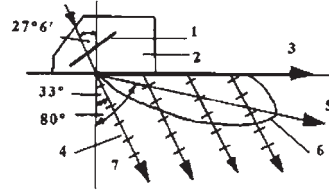


Rys. 13. W przypadku braku możliwości usunięcia lica wskazania wad w strefie przypowierzchniowej spoiny austenitycznej należy badać falą podłużną – L pelzającą, tzn. falą podpowierzchniową.

Fig. 13. In a case of no possibility of weld cap removal an indication of imperfections in subsurface area of austenitic weld shall be tested using creeping longitudinal wave – L

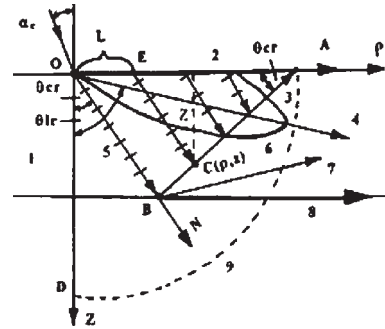
2.1 Wybór rodzaju fali w strukturach austenitycznych

W krytycznym teście lokalizacja wady w spoinie austenitycznej głowicami fal poprzecznych TV oraz fal podłużnych L o tej samej częstotliwości wykazała polepszenie stosunku sygnału do szumu $SNR > 4 \div 5$ dB (Rys. 11, 12)



Rys. 14. Zasada tworzenia fal w głowicy fal podpowierzchniowych: 1. przetwornik 2. głowica 3. fala pelzająca I rodzaju – fala podłużna (primary creeping wave) 4. fala poprzeczna główna 5. fali podłużna główna 6. obwiednia listka głównego fali podłużnej 7. Fale poprzeczne wtórne

Fig. 14. The principle of subsurface wave of longitudinal wave probe: 1. transducer 2. probe 3. primary creeping wave 4. head wave - transversal 5. head wave - longitudinal 6. the envelope of main wave vector 7. shear waves – wave mode spreading



Rys. 15. Konfiguracja wiązek w głowicy fal podpowierzchniowych: 1. obiekt badany, 2. fala pelzająca I rodzaju, 3. front fali poprzecznej, 4. fala podłużna główna I rodzaju, 5. fala poprzeczna główna, 6. obwiednia listka głównego fali podłużnej 7. fala podłużna główna II rodzaju, 8. fala pelzająca II rodzaju, 9. front fali podłużnej

Fig. 15. Beam configurations of creeping wave probe: 1. object 2. primary creeping wave 3. wave front of transversal wave 4. head longitudinal wave 5. head transversal wave 6. the envelope of main wave vector 7. secondary head longitudinal wave 8. Secondary creeping wave 9. Longitudinal wave front

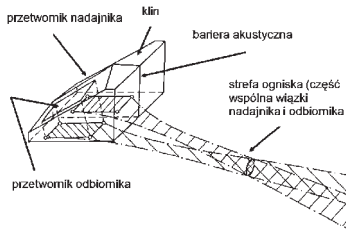
3. Dobór głowic ultradźwiękowych dla badania złączy austenitycznych

Na podstawie informacji charakteryzujących specyfikę zachowania fal UT w gruboziarnistych strukturach spoin austenitycznych można sformułować wytyczne doboru głowic do problemu badawczego anizotropowych złączy austenitycznych:

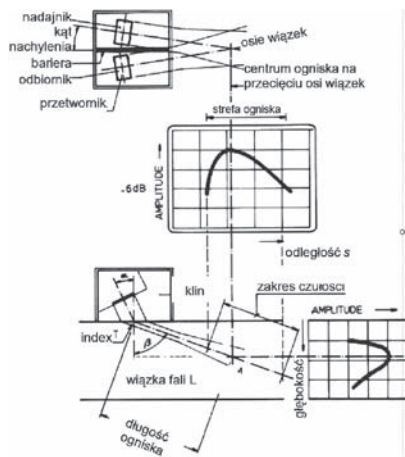
- głowice fal poprzecznych T_v mogą być stosowane raczej w ograniczonym zakresie - dla badania materiału rodzimego, cienkich spoin, itp.;
- dla polepszenia SNR preferowane są głowice fal podłużnych L (o częstotliwości podstawowej $2 \div 4$ MHz – szerokopasmowe - w zakresie szerokości pasma $40 \div 80\%$);
- ze względu na geometrię problemu należy przewidywać stosowanie głowic zarówno normalnych jak i kątowych na fale podłużne;
- analizę wskazań należy starać ograniczać w zakresie do połowy skoku głowic kątowych, ze względu na straty

po odbiciu oraz zakrzywianie trajektorii fal w stopniu złącza;

- w sytuacjach braku możliwości usunięcia lica należy przewidzieć pokrycie przeszukania strefy lica głowicami fal podpowierzchniowych (pełzających – tzw. creeping wave Rys. 13);
- należy mieć na uwadze, że towarzysząca zawsze fala T_v może zakłócać interpretację;
- nie jest zalecane głowic 1-przetwornikowych PE (duże pole bliskie ze strefą martwą) i ich ogniskowanie, ze względu na małą aperturę lokalizacji wskazań;
- preferowane jest stosowanie dwuprzetwornikowych głowic fal podłużnych TRL – większa apertura naturalnego ogniska; lepszy SNR.



Rys. 16. Przebieg wiązki ultradźwiękowej podwójnej głowicy kątowej TRL
Fig. 16. A course of ultrasonic beam of angle twin probe TRL



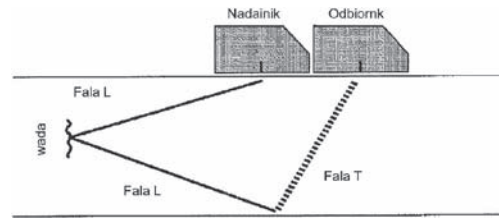
Rys. 17. Podstawowe parametry i charakterystyki podwójnej głowicy kątowej TRL
Fig. 17. Basic parameters and characteristic of angle twin probe - TRL

3.1 Dobór głowic fal podpowierzchniowych – creeping wave CWL

Jest to głowica fal podłużnych L - pełzających (tzw. creeping wave - o kącie wprowadzenia fal podłużnych bliskich 90° , $\alpha \sim 80^\circ \div 85^\circ$) i służy do badania podpowierzchniowych i powierzchniowych stref złącza spawanego.

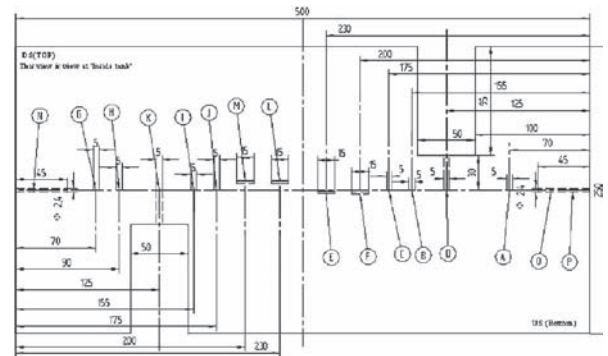
3.2 Dobór głowic kątowych fal podłużnych – TRL

Efekt rozdzielenia torów głowicy kątowej fal podłużnych pokazano schematycznie na Rys. 16. Profile wiązki przetwornika nadawczego i odbiorczego nakładają się jedynie w ograniczonym obszarze materiału, który jest strefą czułości takiej głowicy (ogniskiem). Jego położenie i długość są sterowane przez kąt nachylenia przetworników.



Rys. 18. Zasada wykorzystania pośredniej techniki tandem - opartej na zjawisku transformacji fali, tzw. zamknięta pętla typu LLT – możliwe stosowanie dla różnych obszarów złącza – przez dobór kątów wprowadzenia fali L

Fig. 18. The rule of indirect tandem technique – based on mode wave conversion, i.e. closed loop LLT type – implemented for each weld area by using a different refracted angles



Rys. 19. Przykład bloku kalibracyjnego jako próbki odniesienia dla nastawiania zakresu i czułości głowic ultradźwiękowych – na wcześniej przygotowanym złączu austenitycznym wykonuje się zaprojektowane do zadania badawczego – reflektory referencyjne

Fig. 19. The scheme of calibration block as a reference specimen for range and sensitivity setting of ultrasonic probes – with special reference reflectors manufactured on base an austenitic weld previewed by LNG storage tank inspection plan

Ograniczenie efektywnej strefy czułości głowicy oznacza mniejszą ilość szumów strukturalnych, które przychodzą z wybranej objętości materiału, co zdecydowanie polepsza wartość współczynnika SNR w stosunku do głowic jednoprzetwornikowych. Jednocześnie głowica TRL wykazuje lepszą rozdzielczość kierunkową i zasięgową przy wykrywaniu i lokalizowaniu nieciągłości w obszarze ogniska (Rys. 16, 17).

3.3 Dobór głowic kątowych fal podłużnych – technika tandem – pętla LLT

Dla celów lokalizacji wad usytuowanych prostopadle do powierzchni stosuje się specjalną technikę tandem, wykorzystującą transformowaną falę poprzeczną, jak to pokazano schematycznie na Rys. 18.

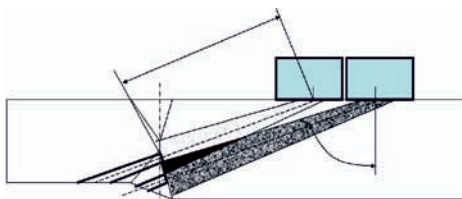
4. Plan badania – “scan plan” przykładowego w zbiornikach LNG

Blok kalibracyjny/e z typowymi złączami austenitycznymi zawierającymi reflektory referencyjne (A do P), przygotowane dla każdej strefy złącza w postaci:

- reflektorów tarczowych DSR - pod różnymi kątami;
- nacięć pod różnymi kątami

i dostosowane do wymagań studium przypadku - „badanie złącza austenitycznych o kształcie niesymetrycznego X z kontrolowanym brakiem przetopu”, pokazano na Rys. 19.

Sposób projektowania reflektorów referencyjnych dla poszczególnych stref złącza pokazano schematycznie na Rys. 20.



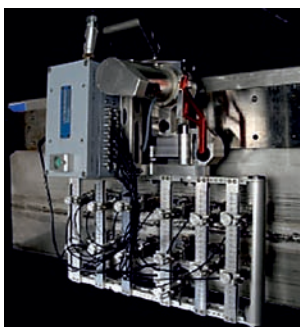
Rys. 20. Parametry każdej głowicy są optymalizowane (dla strefy w której ma być wykryty reflektor referencyjny i nastawiona wymagana czułość badania)

Fig. 20. The range and sensitivity setting of each probe are optimized on the reference reflectors previewed in any zone of inspected volume of austenitic weld

5. Wykonanie badania

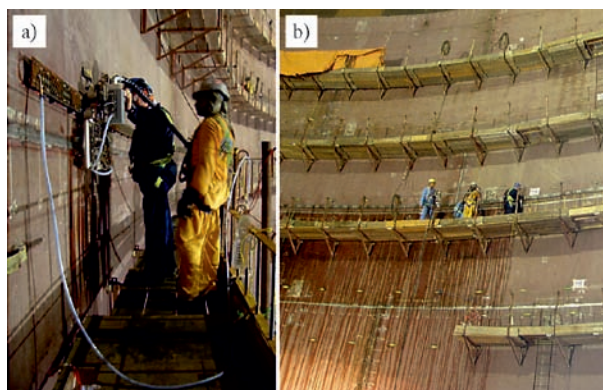
5.1 Konwencjonalny system w zbiornikach LNG – „Applus RTD”

Na Rys.21 przedstawiono widok konwencjonalnego systemu ultradźwiękowego – „Applus RTD” w trakcie kalibracji skanera wielogłowicowego na próbce odniesienia przygotowanej na bazie austenitycznego złącza spawanego, wykonanego zgodnie z projektem i technologią WPS badanego obiektu.



Rys. 21. Widok skanera wielogłowicowego w trakcie kalibracji na bloku referencyjnym

Fig. 21. Widok skanera wielogłowicowego w trakcie kalibracji na bloku referencyjnym



Rys. 22. Badanie złącza austenitycznego (9% Ni+Inconel 625) na zbiorniku LNG w trakcie montażu i ekipy badającej złącze obwodowe
Fig. 22. Implementation of multiprobe system for inspection of austenitic joints (9% Ni+Inconel 625) on the LNG storage tank during construction and inspection of girth welds from inside

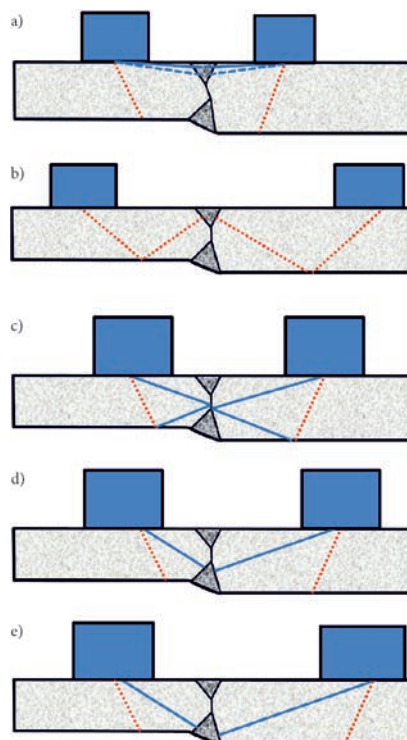
Z kolei na Rys.22a zaprezentowano sposób organizacji badania austenitycznego złącza spawanego obwodowego bezpośrednio

na obiekcie terminalu LNG. System prowadzony jest na taśmie mocowanej do ścian zbiornika przy pomocy przyssawek próżniowych.

Rys. 22b pozwala ocenić skalę procesu badania na zbiorniku wewnętrznym o średnicy 60 m i wysokości 40 m.

5.2 Przeszukiwanie złącza zbiornika LNG głowicami klasycznymi – elementy planu badania

Na rysunku 23 pokazano sposób przeszukiwania złącza dla zbiornika LNG, który składa się z następujących etapów:



Rys. 23. Przeszukiwanie złącza głowicami UT

Fig. 23. Scanning of zone with UT probes

- badanie stref powierzchniowych i podpowierzchniowych głowicami creeping wave CW-L (niebieska ciągła i przerywana linia – w zakresie do osi spoiny);
- przeszukiwanie linii wtopienia na wewnętrznej części złącza z wykorzystaniem fali poprzecznej (czerwone linie przerywane);
- przeszukiwanie strefy kontrolowanego baku przetopu – przy pomocy techniki tandem LLT (niebieskie & czerwone linie);
- badanie strefy przetopu złącza zewnętrznego głowicami nadawczo- odbiorczymi TRL (niebieska linia – w zakresie do osi);
- przeszukiwanie linii wtopienia i wewnętrznej części złącza z wykorzystaniem fali podłużnej (niebieskie linie – do osi złącza).

5.3 Zmodernizowany system Phased Array „Tank Scan LNG - Applus RTD”

Przyczyny modernizacji:

- duży ciężar skanera - konieczność używania windy;
- system prowadzenia mocowany na przyssawkach próżniowych;

- rynek badań wymaga badania głowicami PA - Phased Array
- rynkowo dostępne rozwiązania PA nie spełniają wymagań dla badania złączy austenitycznych.

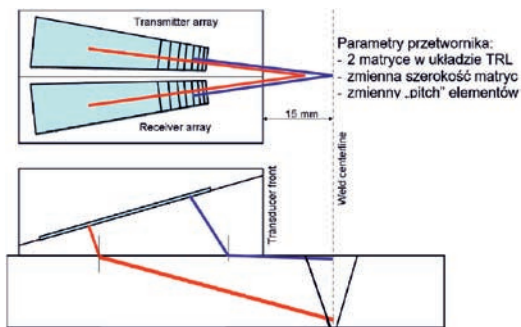


Rys. 24. Widok skanera Phased-Array w trakcie kalibracji na bloku referencyjnym

Fig. 24. View of the phased-array scanner during calibration on the welded austenitic calibration block

Korzyści modernizacji

- operacyjna mobilność skanera PA - „Tank Scan LNG - Applus RTD”, wykorzystanie rynkowych rozwiązań aparatów PA 128 z nowoczesnym oprogramowaniem (Rys. 24);
- sterowanie z laptopa, mniejsze zużycie energii i wody na sprzężenie;
- możliwość konfiguracji do 100 rodzajów głowic konwencjonalnych na tylko dwóch głowicach PA DMA-TRL (Dual Matrix Transmitter-Receiver Longitudinal wave) ;
- możliwość wcześniejszego oprogramowania grup przeszukiwania wynikających z planu skanowania złącza;
- jednoczesne uruchamianie i praca wielu konfiguracji w tym samym czasie;
- zapis i śledzenie wyników w czasie rzeczywistym.



Rys. 25. Schemat budowy głowicy podwójnej kątowej phase-array – PA DMA-TRL

Fig. 25. Construction scheme of angle twin phase-array probe – PA DMA-TRL

5.4 Wymagania dla głowic PA DMA-TRL – dla spoin austenitycznych

Możliwości generacji:

- fal pełzających L;
- fal podłużnych L
- techniki tandem LLT
- grupy konwencjonalnych głowic TRL

Wymiary PA DMA-TRL

- duże matryce (64 mm, 2 MHz, kąt klina 10°, pitch 1÷3 mm);
- małe matryce (32 mm, 2 ÷5 MHz, kąt klina 10°÷20°, pitch 1 mm).

Rys. 25 i 26 przedstawiają zasady budowy i pracy nowoczesnego rozwiązania głowic phase-array, dedykowanego dla badania złączy austenitycznych.

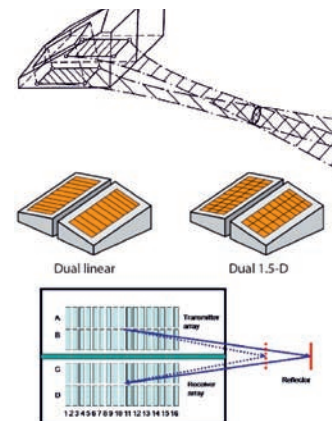


Rys. 26. Widok zintegrowanej głowicy – PA DMA-TRL

Fig. 26. View of integrated angle twin phase-array probe – PA DMA-TRL

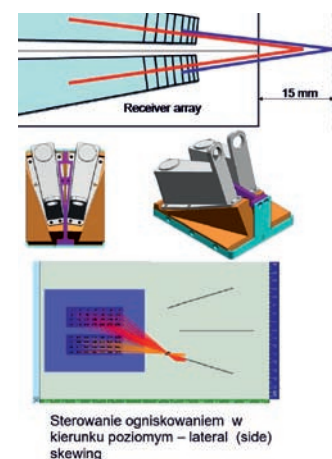
5.5 Aktualna technologia głowic PA DMA-TRL w badaniu złączy austenitycznych

W obecnych technologiach Phased Array - PA dla złączy austenitycznych, głowice TRL są symulowane przez podwójną matrycę DMA. Kąt wprowadzenia (odbioru) wiązki może się zmieniać, index głowicy pozostaje na ogół stały;



Rys. 27. Zasady budowy i sterowania wiązką głowicy PA DMA-TRL

Fig. 27. The rule of construction scheme of angle twin probe and beam steering of phase-array probe – PA DMA-TRL



Rys. 28. Zasady budowy i sterowania wiązką głowicy PA DMA-TRL (patent Applus RTD) – w wykonaniu do badania złączy austenitycznych zbiorników LNG

Fig. 28. The rule of construction scheme of angle twin probe matrix (patent of Applus RTD) and beam steering of phase-array probe – PA DMA-TRL – the probe dedicated to austenitic weld inspection of LNG storage tank

Pojedyncze kryształy głowic klasycznych są zastąpione przez matrycę PA, typowo 16 x 4 elementy.

Matryce PA pozwalają na sterowanie wiązką w dwóch kierunkach: kątowym oraz "ogniska" (część wspólna wiązek) lub mogą być też wersje z ograniczeniami.

5.6 Konsekwencje zastosowania głowic PA DMA-TRL

Wprowadzenie do praktyki badań ultradźwiękowych głowic PA DMA-TRL niesie za sobą następujące skutki:

- głowice PA DMA-TRL pozwalają na pełne pokrycie objętości badania, wykorzystując możliwość sterowania w zakresie kątowym aż do $\sim 85^\circ$ (fale pełzające) oraz sterowanie w zakresie apertury matryc DMA;
- kalibracja poszczególnych pozycji skanowania głowic PA DMA-TRL - wynikających z planu skanowania - na bloku kalibracyjnym;
- dla zastosowanych wymiarów matryc index głowic może ulegać zmianom, zatem płaskie wady mogą być wykrywane pod kątem prostym;
- pewne wykrywanie wad pionowych (np. - zimnych pęknięć, przyklejeń z wykorzystaniem techniki tandem LLT);
- amplituda sygnału może być używana do wymiarowania wskazań;
- dyfrakcja sygnałów (TOFD) nie może być używana do wymiarowania (zbyt słabe echa w spoinie austenitycznej).

5.7 Badanie złączy austenitycznych zbiornika LNG – głowice PA DMA-TRL

Na rysunku 29 pokazano przykładowy sposób przeszukiwania złącza dla zbiornika LNG, który składa się z następujących etapów:

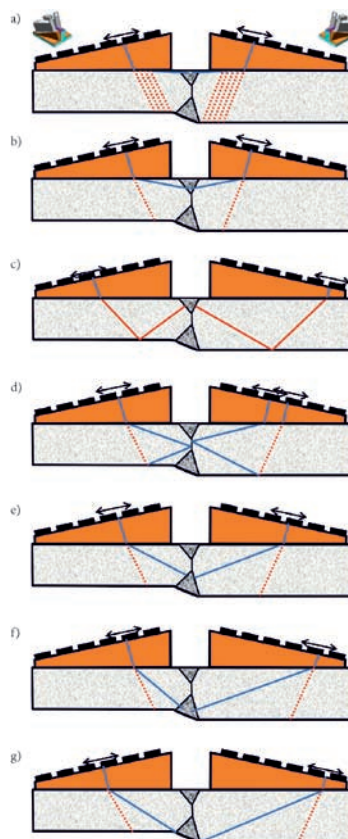
- a) badanie stref powierzchniowych falami creeping wave CW-L (niebieska ciągła linia – w zakresie do osi spoiny);
- b) badanie stref podpowierzchniowych falami L (niebieska ciągła linia – w zakresie do osi spoiny);
- c) przeszukiwanie linii wtopienia na wewnętrznej części złącza z wykorzystaniem fali poprzecznej (czerwone linie ciągłe);
- d) przeszukiwanie strefy kontrolowanego braku przetopu – przy pomocy techniki tandem LLT (niebieskie & czerwone linie);
- e) badanie strefy przetopu i linii wtopienia złącza zewnętrznego falami L (niebieska linia – w zakresie do osi);
- f) badanie i linii wtopienia i strefy złącza zewnętrznego falami L (niebieska linia – w zakresie do osi)
- g) badanie strefy podpowierzchniowej i linii wtopienia złącza zewnętrznego falami L (niebieska linia – w zakresie do osi).

6. Podsumowanie - zalety głowic PA DMA-TRL i zmechanizowanego systemu UT

Opisane powyżej aspekty badań głowicami PA SMA-TRL w połączeniu ze zmechanizowanym systemem UT ujawniają się następujące cechy:

- matryce mają wystarczającą długość do akomodacji indeksu głowicy, wystarczającego do przeszukania całej grubości ścianki złącza – na konstrukcji zbiornika LNG;
- szerokość kryształów matryc modyfikowana do sposobu pracy konwencjonalnych głowic (przód węższy, tył szerszy);

- wielkość pitch'u zmienia się od przodu do tyłu:
 - sterowanie z wykorzystaniem co najmniej 8 elementów (wymagane do poprawnego sterowania),
 - zmiana wielkości pitch'u - umożliwia likwidację listków bocznych (czyszczenie wiązki);
- apertura kątowa (zбочzenie kątowe) wiązki wystarczające dla górnej i dolnej strefy złącza, nie jest potrzebne sterowanie poziome (lateral steering);



Rys. 29. Przeszukiwanie złącza głowicami PA DMA-TRL
Fig. 29. Przeszukiwanie złącza głowicami PA DMA-TRL

- głowice PA DMA-TRL generują fale pełzające oraz przejmują funkcję pozostałych głowic konwencjonalnych;
- wiele głowic konwencjonalnych zastępują 2 głowice PA DMA-TRL (lżejszy skaner, mniejsze zużycie wody);
- wymiarowanie możliwe na bazie skanu podstawowego
- mechanizacja przesuwu skanera pozwala na płynny cyfrowy zapis wyników oraz dostosowanie wydajności badania do wymagań projektu.

7. Dokumenty cytowane

- [1] LNG Presentation, Polskie LNG Project, April 6, 2011, Rotterdam, Netherlands
- [2] PN-EN ISO 17640:2011, Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych
- [3] J. Deputat, Ultradźwiękowe badanie spoin austenitycznych, Dozór Techniczny Nr 1/1991, s. 5 ÷ 11
- [4] PN-EN ISO 22825:2012, Badanie Ultradźwiękowe. Badanie spoin w stalach austenitycznych i stopach na bazie niklu
- [5] UDT-CERT, Materiały szkoleniowe, kurs specj. UT3s, rozdz. 9.1
- [6] S. Mackiewicz, Ultradźwiękowe badanie spoin austenitycznych, XII Seminarium Nieniszczące Badanie Materiałów, Zakopane, marzec 2006

Gerd Dobmann*
Saarland University, Germany

Probability of detection – the approach to combine probabilistic fracture mechanics with NDT – where we are ?

Prawdopodobieństwo detekcji - podejście do łączenia probabilistycznej mechaniki pęknięcia z NDT - gdzie jesteśmy?

ABSTRACT

The contribution presents the detail discussion on various problematic aspects of utilization of both fracture mechanics based methodology and NDT technology to conduct the assessment of failure of components. Consequently, it shows a software tool concerning Probability of Detection – Probability of Sizing Concept, which allow to bring both methodologies (Fracture Mechanics and NDT) together and to meet in a joint approach. The contribution introduces in the application of one software approach, which allows modeling and simulation of real scenarios in detail, based on a variety of properties of different relevant materials from practice.

Keywords: fracture mechanics, assessment of failure, NDT

STRESZCZENIE

Praca ta przedstawia szczegółową dyskusję na temat różnych aspektów problematyki jednoczesnego wykorzystania metodyki opartej na mechanice pęknięcia i technologii badań nieniszczących (NDT) do przeprowadzania oceny i predykcji uszkodzenia komponentów. W konsekwencji, przedstawiono oprogramowanie narzędziowe odnoszące się do koncepcji prawdopodobieństwa wykrycia (Probability of Detection – Probability of Sizing), które pozwalają na połączenie obu metodologii (mechaniki pęknięcia i NDT) i działanie w ramach wspólnego podejścia. Praca przedstawia implementację w ramach oprogramowania podejścia, które umożliwia modelowanie i szczegółową symulację rzeczywistych sytuacji, przy uwzględnianiu wielu właściwości różnych materiałów używanych w praktyce.

Słowa Kluczowe: mechanika pęknięcia, predykcja uszkodzenia, NDT



Professor
Gerd Dobmann

1. Introduction

Based – for instance - on standards like BS 7910: 2005, Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, fracture mechanics experts have introduced a methodology to assess failure of components taking into account the geometry of the component and the flaw, the applied mechanical loading, including residual stresses, and material properties. In case of simple geometries, according to canonical co-ordinates, like cylindrical pipes, by analytical solutions the Stress-Intensity-Factor (SIF) can simply be calculated – so far the NDT technology has delivered reliable information to the relevant flaw size/geometry. In case of complicated geometries, numerical approaches like FE, BE or FD have to be used. However, in order to evaluate, under which conditions, a component due to loading, fails or not, to answer this question, needs – besides the knowledge of the actual mechanical stress distribution – the knowledge of material properties. These are the Critical Stress-Intensity-Factor, K_{IC} , also

named fracture toughness, the yield $Rp0.2$ and the tensile strength σ_{UTS} of the material of interest, which have to be known. It is trivial, these three properties are not constant as function of position in a component, they are statistically distributed. The distribution functions, with mean values and standard deviation, depend on a manifold of influence parameters. They depend basically on the material, but also its properties changes due to manufacturing and machining (casting, forging, welding, ...) and ageing in service life (fatigue, creep, corrosion, irradiation, ...). Therefore, the use of constant material parameters, taken from tables in text books, can be reliable only, if worst case considerations are asked for, which always are extremely conservative. When realistic approaches are the objective of a critical engineering assessment then the statistical distributions have to be taken into account, which only realistically can be determined due to a high number of destructive tests, i.e. with a tremendous financial effort. That is why most of component producers do not follow this expensive approach as nearly all consensus standards, not yet are asking for such a procedure. Only in nuclear technology we have, with the ASME Lower Bound Fracture Toughness Curve, respectively, the Master Curve Concept, first important and relevant steps into stochastic scenarios.

The effort is much more enhanced if the fact is observed, that all of our NDT techniques suffer under measurement uncertainties, also following probabilistic, and not, deterministic laws. The tool, to bring both methodologies (Fracture Mechanics and NDT) together, to meet in a joint approach, is the Probability of Detection – Probability of Sizing Concept which is discussed in the

*Corresponding author. E-mail: Gerd.Dobmann@izfp-extern.fraunhofer.de

here presented contribution, based on probabilistic Monte Carlo simulation. Modeling is also the only chance to reliably reduces the costs by simulation to play realistic scenarios. The contribution introduces in the application of one software approach, which stands, as one example, for many others available on the market, and, which allows this modeling in detail, based on a variety of properties of different relevant materials from practice.

Fracture mechanics as part of theoretical mechanics and especially elasticity theory started with developments early in the 19th century combined with names of scientists like Kolosov 1908/1909 [1], Ingles 1913 [2], Griffith 1921 [3], Westergaard 1939 [4], Sneddon 1946 [5], Irvin 1949 and 1957 [6,7], Dugdale 1960 [8], Burdekin and Stone 1966 [9], Rice 1968 [10], Heald, Spink, and Worthington, 1972 [11], Dowling and Townley, 1975 [12], and, Wallin, 1991 [13].

Kolosov [1], in the former USSR, was the first, who has used the calculus of complex-valued, so-called analytical, functions to describe on their basis elasticity problems. These functions fulfil the Cauchy-Riemann differential equations which implicitly ask for their Real- and Imaginary Function parts, to be real valued potential function, i.e., fulfilling Laplace' equation. The calculus, later by Westergaard [4] was further developed to the theory of the complex-valued stress functions $\Phi(x_1, x_2)$, which are the generalized tool, to find at that time analytical solutions describing the stress enhancement in the vicinity of cracks, simply modeled as ellipses, assumed in elastic, plane, thin sheets under boundary loads in the infinite. The stress functions Φ are solutions of the Bi-Harmonic Differential equation:

$$\Delta\Delta\Phi = 0 \quad (1)$$

what can be verified by calculation, when certain important presumptions are fulfilled, which are:

The balance of moments and forces in a volume element and in the thermal equilibrium: $\sum F_i = \sum F_{i'} \equiv 0$ (balance of forces); $\tau_{x_1x_2} = \tau_{x_2x_1}$ (balance of moments) which results in:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \sigma_{x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} \tau_{x_1x_2} = 0 \text{ and } \frac{\partial}{\partial x_2} \sigma_{x_2} + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{x_1x_2} = 0 \quad (2)$$

Hooke' law as materials law (under plane strain or plane stress conditions)

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$

or

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (3)$$

E is Young' module and ν is Poisson' ratio, and the so-called Compatibility Conditions which are the mathematical, necessary and sufficient conditions that the existence of a unique deformation or strain field in an elastic body is guaranteed, when the body is exposed to a continuous single valued displacement field.

In 2-D plane strain problems, which here are of interest, the strain-displacement relations are:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial}{\partial x_1} u_1 \quad \varepsilon_{22} = \frac{\partial}{\partial x_2} u_2 \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} u_1 + \frac{\partial}{\partial x_1} u_2 \right] \quad (4)$$

which, by further differentiation, results in the compatibility

condition (5).

$$\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \varepsilon_{11} - 2 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} \varepsilon_{12} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \varepsilon_{22} = 0 \quad (5)$$

From (5) follows that only a plane displacement field $u(x_1, x_2)$ is compatible with a plane strain field, and by calculation, with (2) and Hooke' law (3), $u(x_1, x_2)$ is a solution of (1).

It was Sneddon [5], who, based on Westergaard' complex-valued stress function in plane polar coordinates, translated the origin of the coordinate system, in the position of the crack tip, and developed an approximation in the case, that the distance r from the tip is small, compared with the half crack length a ($r \ll a$). In his formulas (6) a typical factor occur ($\sigma\sqrt{\pi a}$). By comparing the manifold of existing analytical solutions in cases of degenerating the ellipses to spheres [1] or infinite small slits [3], [6], Irvin [7] was able to show, that all of them, when investigated near the crack tip, show this factor, which he called Similarity Parameter. This parameter is nothing else, as the Stress Intensity Factor (SIF), which was firstly introduced in use, with his approach and terminology. Furthermore, the mathematical singularity in case of $r = 0$ at the crack-tip position, was found in each of these solutions.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{pmatrix} \left[1 - \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3\Theta}{2} \right] \cos \frac{\Theta}{2} \\ \left[1 + \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3\Theta}{2} \right] \cos \frac{\Theta}{2} \\ \left[\sin \frac{\Theta}{2} \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3\Theta}{2} \right] \end{pmatrix} \quad (6)$$

This singularity really cannot exist, because a real material answers with plastic deformation if the stress is larger than the yield strength. This is true, in the case of linear elastic (brittle) materials too, even if the plastic zone here is very small, restricted immediately on the crack-tip vicinity.

It was Griffith, who found, that failure loads observed at brittle materials were tremendous smaller than predicted by theories describing the separation of atomic bonds. In other words: on one hand, there are additionally to the observed individual crack, numerous other microscopic imperfections in the material. And, on the other hand, a certain amount of stored potential energy is consumed by another effect than only driving a crack to failure. Griffith' conclusion, based on the law of energy preservation, was, that crack propagation can only happen if the amount of potential energy, stored in the specimen, which is released by crack propagation, is larger than the amount of energy, which is consumed by increasing the crack surface. If the external loads are fixed, they do not perform any work. The change of the potential energy is therefore the decrease of the stored elastic energy in the body. Griffith found an excellent agreement of his approach, in case of brittle material, i.e. glass.

Griffith' result was ignored up to the work of Irvin [6, 7] in the early 1950s because most of the used material was metal and ductile and surface energy increase, predicted by Griffith, was too high. Even more, the mathematical singularity at the crack tip was not real, as the materials have developed a plastic zone.

Irvin discussed the total thermodynamic energy G dissipated due to crack growth, which is the sum of increasing of the surface energy (2γ ; factor 2 because of the two surfaces in the crack, γ -surface energy [$\sigma 2\pi a$]/ E' ; E' =Young' modulus E in case of plane stress- and $E'=E/(1-\nu^2)$ under plane strain-conditions) and

an energy part consumed by the ductile material to increase the plastic zone, named G_p .

In the case of the important Crack-Opening-I-mode of fracture and linear elastic materials (neglecting G_p), he found the relationship:

$$G = K_I^2 / E' \quad (7)$$

With this approach Irvin found also the experimental access to estimate the Critical Stress Intensity Factor KIC under plane strain conditions in the linear elastic fracture mechanics.

Dougdale [8], with his strip yield model, then in his approach, taking the plastic zone into account, by virtually enlarging the geometric crack-length a to $a + a_p$, where a_p has the dimension of the plastic zone in x -direction. According his approach, in the stress function, the mathematical singularity at $y = 0$ and $x = a$ should be compensated by the new introduced singularity at $y = 0$ and $x = a + a_p$. Then the material, macroscopically, acts again linear elastic. Following this idea, he was able to describe the size of the plastic zone approximately to:

$$a_p = \pi/8 \times (K_I / Y_p)^2, Y_p - \text{Yield strength} \quad (8)$$

According to Burdekin' and Stone' approach [9], the measurement of δ , the CTOD (Crack-Tip-Opening-Displacement) -technique was introduced, to estimate the Critical Stress-Intensity-Factor, i.e. the fracture toughness:

$$\text{CTOD} = \delta = K_I^2 / (E Y_p) \quad (9)$$

The procedure, how to measure CTOD in an incremental-stress/load-increase test up to the critical-one, by using a clip-gage (knife-edge-strain gage) and calculate from the measured crack-mouth opening the crack-tip-opening in case of the critical load, was regulated by defining standard testing procedures and test specimens of which the geometry has to observe restrictions, because of the geometry dependence.

Based on the approach of Rice [10] the so called J-Integral was introduced, as he found in case of elastic plastic materials (non-linear materials) a generalized energy release approach. Based on the yield strip model stress function he found a Path-Independent-Energy Integral, called J, of which the calculation, nowadays, is part of every actually available fracture mechanics software. In the case of linear elastic material consistently J is in conformance with G of (7); in the elastic-plastic (non-linear) case, a relationship to the CTOD is found:

$$J = Y_p \times \text{CTOD} \quad (10)$$

Heald, Spink and Worthington [11] analyzed the displacement v in y -direction at the crack-tip behind a plastically deformed material and its contribution to a crack-opening $\delta = 2v$.

They found:

$$\delta = 2v = 8 \frac{a}{\pi E} Y_p \times \ln \left(\sec \left[\frac{\pi \sigma}{2 Y_p} \right] \right); \sec(x) \equiv 1/\cos(x) \quad (11)$$

By introducing an Effective Stress Intensity Factor $K_{\text{eff}} = \sqrt{J E}$ and taking into account that $J = (Y_p \delta)$, then, by simple calculation, follows:

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{\left\{ \frac{8 a Y_p^2}{\pi} \times \ln \left(\sec \left[\frac{\pi \sigma}{2 Y_p} \right] \right) \right\}} = Y_p \sqrt{\pi} a \times \sqrt{\frac{8}{\pi^2} \times \ln \left(\sec \left[\frac{\pi \sigma}{2 Y_p} \right] \right)} \quad (12)$$

To account for real structural components, the Yield strength is replaced by the strength for plastic collapse, identified with the flow stress $\sigma_{\text{flow}} = (Y_p + \sigma_{\text{UTS}})/2$. The ratios K_r and S_r are defined:

$$K_r = K_I / K_{\text{eff}} \quad \text{and} \quad S_r = \sigma / \sigma_{\text{flow}} \quad (13)$$

By calculation follows:

$$K_r = S_r \frac{1}{\sqrt{\frac{8}{\pi^2} \times \ln \left(\sec \left[\frac{\pi}{2} S_r \right] \right)}} \quad (14)$$

the so-called 2-Criteria Approach, which defines the FAD, the Failure-Assessment Diagram, on which we concentrate in the next chapters and which at first was introduced by Dowling and Townley in 1975 [12].

Series of codes, guidelines and standards exist describing the technical rules to destructively determining the relevant material properties. Only the most important should be mentioned here:

- ASTM E1820, 2009 – Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. Determination of J, CTOD, and K,
- ASTM E1921, - Test Method for Determination of Reference Temperature T₀ for Ferritic Steels in the Transition Region,
- BS 7448 Part 1, 1991 – Fracture Mechanics Toughness Tests, Methods for Determination of K_{Ic}, critical CTOD and J-values for metallic Materials,
- BS 7448 Part 2, 1997 – similar as Part 1, but for Metallic Welds,
- BS 7910, 2005 – Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures,
- API 579, 2007 – Recommended Practice for Fitness for Service, 2nd edition.

A most modern approach, to characterize the brittle-to-ductile transition of martensitic/bainitic steels used in pressure vessels and pipes in nuclear power plants, goes back to K. Wallin [13], who found an engineering procedure, to describe the statistical scatter in the J-Integral if specimens are tested as function of temperature, by assuming a Weibull Statistic. However, the technique delivers no access to the toughness value, but to the transition temperature T₀.

2. PVrisk

This chapter is an introduction in the software PVrisk [14] developed theoretically by D. Cioclov and compiled as software by J. Kurz in the Fraunhofer Institute for NDT in Saarbrücken, Germany. The software is an example, for comparable software products available in the market. However, a special feature is given by the integration of randomness, concerning the geometrical parameters of a crack, i.e., its crack size can scatter according to statistical distributions, as well as the randomness can be in the material data. The randomness is introduced due to Monte Carlo simulation. This fact allows the calculation of the POF, i.e., the probability of failure. An absolute new and a unique feature in such type of software is the introduction of the use of Non-destructive Testing (NDT). This is done by introducing the concept of the POD, i.e., the probability of detection, a terminology which goes back to the NASA in US and W. Rummel as a pioneer [15]. In PVrisk theoretically assumed POD-models can be applied, to virtually study the advantage of POD, but,

POD-curves based on experimentally determined NDT result can be implemented after data fitting [16, 17] into PVrisk too.

2.1 The principle of Failure Assessment

The assessment of the failure risk of a load-carrying structural component is based on the analysis of the component state, taking into account the initial strength of the material and the production technology used in the manufacturing process, as well as the types of flaws which may be pre-existent or generated during operation. The local states of the material, its microstructure and the state of stress/strain in the regions with irregularities have to be taken into account. The analysis of these regions must consider the applied NDT and especially its capacity to distinguish between a crack- and a no-crack-signal.

For metals, in the case of a deterministic approach, this ends with a prediction either of failure or non-failure [18, 19]. The method was first developed for such deterministic analyses and is a recognized tool for failure analysis and in many standards available today, as mentioned in chapter 1. However, realistic discussions make consideration of the reliability of the data investigation necessary. This succeeds, if the statistical fuzziness or uncertainty is integrated into the failure assessment by the use of Monte Carlo simulations, based on probability distribution functions. The result of the probabilistic analysis is, therefore, a statement about the probability of failure (POF) of which – so far the consequences are known – the risk of failure can be calculated. Figure 1 shows a FAD (Strip Yield Model), as one of two possible, which can be used in PVrisk.

The abscissae S_r and ordinates K_r are introduced in accordance with formulae (15) and (16):

$$K_r = K_1 / K_{1C} \quad (15)$$

$$S_r = \sigma_{ref} / \sigma_r \quad \sigma_r = (\sigma_y + \sigma_{UTS}) / 2 \quad (16)$$

Here, K_1 is the stress intensity factor, K_{1C} is the fracture toughness of the material and σ_{ref} is the reference stress, which can be a superposition of the membrane stress σ_{ref}^m , a bending stress σ_{ref}^b and a residual stress Q . σ_y is the yield strength ($R_{p0.2}$, 0.2% yield limit) and σ_{UTS} is the tensile strength (R_m).

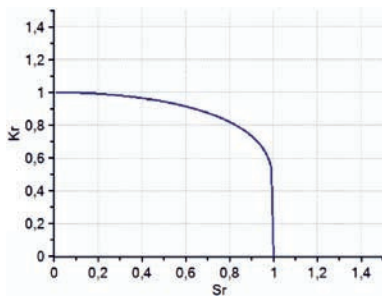


Fig. 1. Failure assessment diagram (FAD) – the failure bounding curve is shown

Rys. 1. Krzywa zniszczenia FAD (Failure assessment diagram)

The stress intensity factor (SIF) is made up of two parts. The first part is influenced by the load-induced stresses (primary stresses) and the second part takes residual stresses (secondary stresses) into account (Equations (17) to (19)):

$$K_1 = K_1^p + K_1^s \quad (17)$$

$$K_1^p = (F_{SIF}^m \times \kappa^m \times \sigma_{ref}^m + F_{SIF}^b \times \kappa^b \times \sigma_{ref}^b) \times \sqrt{(\pi b)} \quad (18)$$

$$K_1^s = F_{SIF}^m \times Q_m + F_{SIF}^b \times Q_b \times \sqrt{(\pi b)} \quad (19)$$

Here, F_{SIF}^m is the geometry-dependent correction factor (see also as example equation (6)), taking the membrane loads into account, and F_{SIF}^b is the corresponding correction factor when bending loads are applied. Weld seams can be accounted for, through the correction factors κ_m (membrane loads) and κ_b (bending loads), as well as through the residual stresses (Q_m , Q_b). The b in the term $\sqrt{(\pi b)}$ is the crack size – in the geometry module, the crack depth b .

In the FAD, the analysis is based on obtaining a value-pair (S_r , K_r). Here, K_r is a characteristic for the brittleness and S_r for the ductility of a material state situation. The bounding curve (failure curve) shown in Figure 1 is derived by elastic-plastic theoretical considerations according to [20], where, in Equation (20), S_r is varied in the interval [0, 1] to find, respectively, the K_r values:

$$K_r = S_r / \sqrt{\{(8/\pi^2) \ln [\sec[(\pi/2) S_r]\}} \quad (20)$$

Development of the formula see equations (11) to (14).

Failure assessment can be provided by evaluation of the position of the point pair (S_r , K_r) in the FAD. A position in the area formed by the bounding curve and the coordinate axes in the FAD obviously indicates no failure. If the point pair lies on the bounding curve, or is outside of it, a failure occur.

2.2 Geometry Module

The model of a semi-elliptical crack of length $2a$, with $a = 10$ mm and depth $b = 5$ mm, is chosen here for the crack geometries in the following, oriented in the axial direction and precisely positioned symmetrically in the middle position of the cylinder, assumed with length $2L = 2000$ mm, thickness $t = 20$ mm and outer radius $R_0 = 200$ mm. Several, different crack models are implemented into PVrisk. The actual model has the advantage that a semi-analytic formulae exist, to calculate the stress intensity factor (SIF). If the crack geometry is assumed to be distributed according to a statistical distribution function, this also has to be defined in the geometry module. In the case of crack-like defects, the length and depth values can be normally distributed, log normally distributed or distributed according to a Weibull distribution.

It should be mentioned here, that extensive destructive statistical investigations must be performed for a given component geometry, in order to determine the distribution (frequency) of defect sizes, which, for instance, remain in the component after production. In order to achieve a reliable statistical result, usually some thousand metallographic micrographs must be produced and examined. Only then the type of distribution function can reliably be determined with mathematical methods. Early publications in the field, historically speaking, have already studied this problem [21, 22]. Here, the probabilities of different NDT techniques detecting surface-breaking cracks have already been discussed. Even if an automated NDT technique is applied [22], where the human factor influence is low, the uncertainty in the NDT performance is not only a problem when the crack size is small and near the physical limit of detectability. Larger defects can also be missed by NDT (“the evidence of absence is not the absence of evidence” [23]).

2.3 Material Module

The material properties must be defined in the material module. These are the values as shown in Figure 2 for the yield strength, the tensile strength and the fracture toughness as fixed values in the case of a deterministic evaluation. This module is also the input window for the statistical parameters, if a probabilistic approach is performed (middle part of Figure 3, left-hand side, here a normal, Gauss distribution). Distribution functions according to a normal distribution, a log normal distribution or a Weibull distribution can be selected. However, as already mentioned in the previous paragraph - when we discussed the case of the crack geometry distribution functions - a high number of destructive tests must also be performed here, in order to predict the type of the material parameter distribution and its statistical scatter.

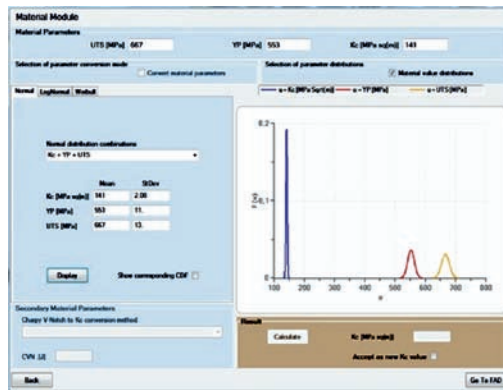


Fig. 2. The material module, screenshot of the GUI
Rys. 2. Widok interfejsu GUI modułu materiałowego

The background to discuss here a material state, called <recovery annealed>, reflects the fact, that this material, by heat treatment at the last applied stress relieve annealing temperature, can be fully recovered, bringing the Cu particles again in solid solution.

Tab. 1. The steel WB36 in the states <recovery annealed> and <thermally aged>

Tab. 1. Stal WB36 w stanach <wyżarzanie wtórne> i <starzenie termiczne>

microstructure	Yp in MPa	UT in MPa	KIc = Kc in MPa √m
<recovery annealed>	553±11	667±13	141±2.08
<thermally aged> at 350 °C for 57.000 h	661±13.22	776±15.52	96±36

In the case-studies discussed later, the copper alloyed steel 15 NiCuMo Nb 5 (WB36) which is applied for piping and vessels in German power plants is studied in detail [24]. This material is prone for thermal ageing due to Cu-precipitates in the nanometer range, when exposed at service temperatures of 350 °C and higher, for a duration, as usual within one service period, of 57.000 h. In the <thermal aged> state, a shift of the ductile to brittle temperature (Charpy test) of about 70 °C can be observed. Table 1 summarizes the material properties in the microstructure states <recovery annealed> and <thermally aged>.

So far only values of Charpy energy for toughness are available (Fig. 3), these values can be converted in PVRisk by using model-based assumptions into a fracture toughness value, here, of KIc = 141 MPa√m (in the software abbreviated with Kc). In

the destructive examinations [24] mentioned above, the scatter of the data in terms of a standard deviation in case of the <recovery annealed material> was very small in the range of ±2 %. These values were used in the following sensitivity analyses. Both deterministic and probabilistic approaches were applied. In the case of the probabilistic assessment, 106 trials (opportunities) were assumed for the Monte Carlo simulation. The load is assumed as inner pressure when the cylinder is closed at both ends.

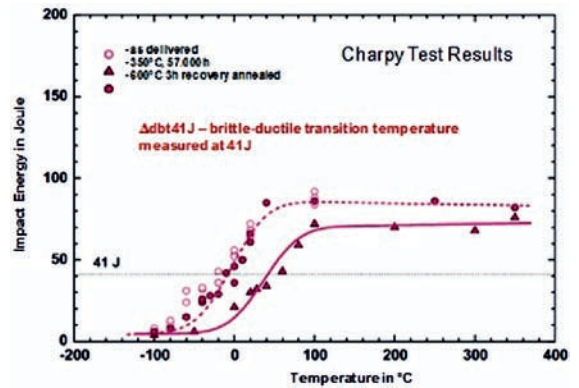


Fig. 3. Charpy Test Results of WB 36
Rys. 3. Wyniki testowania młotem Charpy'ego stali WB36

2.4 Deterministic approach

Table 2 documents the development of the load (inner pressure) to failure, in both of the material microstructures if a, the half crack length, is increasing as well as the crack depth b. The thermally aged material with degradation shows lower crack size values to failure, i.e. when the limiting curve is reached. However, the differences are not very large. It seems to be, that the higher strengths values compensate the lower toughness.

Tab. 2. The steel WB36 in the states <recovery annealed> and <thermally aged>

Tab. 2. Stal WB36 w stanach <wyżarzanie wtórne> i <starzenie termiczne>

microstructure	Half critical crack length a in mm	Critical crack depth b in mm	Stress to failure in MPa
<recovery annealed>	23	18	17.5
<thermally aged> at 350 °C for 57.000 h	22	17	17.7

Tab. 3. The steel WB36 in the state <thermally aged>, but reduced wall thickness

Tab. 3. Stal WB36 w stanie <starzenie termiczne>, przy zredukowanej grubości ściany

Critically half crack length a in mm	Critically crack depth b in mm	Stress applied in MPa	Wall thickness in mm
22.2	17.0	17.5	20
17.4	12.1	17.5	15
12.5	7.2	17.5	10

A question was asked: What happens, if we reduce the wall thickness from 20 mm to 15 mm and then 10 mm ? Table 3 give the answer.

We learn, the material fails earlier, i.e., smaller critical crack

sizes are obtained.

If we continuously now increase the pressure, the critical crack size to failure is further reduced. Table 4 documents the result.

Tab. 4. The steel WB36 in the state <thermally aged>, but with enhanced pressure

Tab. 4. Stal WB36 w stanie <starzenie termiczne>, przy zwiększonym ciśnieniu

Critically half crack length a in mm	Critically crack depth b in mm	Wall thickness t in mm	Internal pressure in MPa
12.5	7.2	10	17.5
12	6.5	10	20
11.2	5.7	10	23
10.9	5.4	10	24
10.7	5.1	10	25

2.5 Probabilistic approach

PVrisk allows using mixed modes (deterministic and probabilistic parameters) for analyzing different scenarios [24, 25]. So, for instance, the crack geometry can be taken as deterministically given ($a = 10$ mm, $b = 5$ mm, wall thickness $t = 10$ mm) and the material parameters are allowed to vary statistically, for instance according to a Gauss distribution as shown in Figure 2. In Table 5 the result in case of the <thermally aged> microstructure is presented:

Tab. 5. POF in 10^6 trials, the scatter in toughness as influence parameter was reduced

Tab. 5. POF po 10^6 próbach, rozrzut w twardości jako parametru wpływu został zredukowany

	POF – Probability of Failure in 10^6 trials	Pressure in MPa – primary circuit service pressure in a Nuclear PWR	Scatter K _{IC} in MPa $\times \sqrt{m}$
Microstructure <thermally aged> at 350 °C for 57.000 h	8.3×10^{-2}	15	96 ± 36
	7.8×10^{-2}	15	96 ± 35.2
	7.5×10^{-2}	15	96 ± 34.4
	6×10^{-2}	15	96 ± 32
	2×10^{-2}	15	96 ± 24
	7×10^{-3}	15	96 ± 20
	1×10^{-3}	15	96 ± 16
	2.9×10^{-5}	15	96 ± 12
	5×10^{-6}	15	96 ± 11
	0 - safe	15	96 ± 8

We learn, that the reduction of the scattering in toughness has a tremendous influence on the POF.

The NDT concept, by using models for the probability of detection (POD), will be discussed in the following. A quantitative consideration of NDT methods in assessment procedures requires quantitative statements about the reliability of the applied NDT method. The determination of the probability of detection (POD) is one possibility to quantify the probability to detect a specific flaw with a NDT method. Details about the POD concept can be found in [16, 17]. The POD is expressed in form of a cumulative distribution function. This concept is represented by different usable models within PVrisk. As well as for material parameters, realistic scattering values should be taken also for POD results from evaluation of real cracks in their geometrical sizes. The differences between results gained with real and artificial cracks can

be exemplarily found in [26]. If no data is available, conservative assumptions should be taken, for a first run.

PVrisk allows simulating the POD in different models representing different approaches to map the detectability. We will discuss here only one of these models, the use of an asymptotic power law, according to Cioclov [27] (Figure 4).

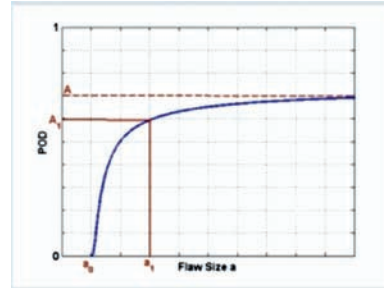


Fig. 4. Asymptotic power law to model the POD
Rys. 4. Asymptota modelu krzywej POD

In Table 6 the parameters A, A₁, a₀ and a₁ are defined, describing the model and its quality to reliably detect a crack-like defect. By reducing the values of a₀ and a₁, as well as by increasing the value of A₁, the POD is improved. In the aerospace industry, based on the damage tolerance design principle, the parameter a₁ has a special meaning. The value here is called a_{90/95} and gives the defect size, for instance the crack length of a crack penetrating the wall of the airplane hull [28], at which the POD reaches 90% with 95% confidence.

Tab. 6. POD models according to an asymptotic power law

Tab. 6. Modele POD

POD model	A	A ₁	a ₀ in mm	a ₁ in mm
POD1	1	0.9	2	3
POD2	1	0.9	1	2
POD3	1	0.9	1	1.5
POD4	1		0.5	1

In Table 7 the result of the application of the different POD models is discussed. The material is the <thermally aged> WB36 with a Gauss distributed crack geometry $a_{mean} = 10$ mm and $b_{mean} = 5$ mm, and scatter in the data $\Delta a = 2$ mm, $\Delta b = 1$ mm, wall thickness $t = 10$ mm, internal pressure $p = 15$ MPa. The material properties scatter according the Gauss distributions of Figure 2.

Tab. 7. Material properties and crack sizes are Gauss distributed

Tab. 7. Właściwości materiału i rozmiary wady o rozkładzie Gaussa

POD model	Number of failures	POF Probability of Failure
No POD	7100 in 10^6	7.1×10^{-3}
POD1	195 in 10^6	1.95×10^{-4}
POD2	132 in 10^6	1.32×10^{-4}
POD3	127 in 10^6	1.27×10^{-4}
POD4	60 in 10^6	6×10^{-5}

Obviously, an enhanced POD reduces the number of failures. However, a further realistic enhancement in reduction of the POF can only be achieved, not by enhancing POD, but, if and only if, the mean values of a and b are reduced, for instance, to $a_{mean} = 8$ mm, $b_{mean} = 2$ mm, and the scatter to $\Delta a = 1$ mm, $\Delta b = 0.5$ mm. Then a POF-value $POF = 2 \times 10^{-5}$ can be obtained, i.e., only

a number of 20 remaining failures in 106 opportunities.

3. Conclusion

Obviously, PVrisk is an elegant tool to simulate inspection trials of NDT. As the software allows deterministic as well as probabilistic approaches, a wide parameter study can be performed taking into account the variation of geometrical and material data. As the most sensitive parameter concerning the probability for failure, the fracture toughness absolute (deterministic approach) or mean value (probabilistic approach) as well as its scatter (standard deviation) can be identified.

As the fracture toughness values are a result of destructive tests more of these tests have to be performed by steel as well as component producers to evaluate the scatter in these data for each really safety relevant component form and applied steel grade, and not, to utilize values "sometimes" determined in laboratory and published in tables. Whereas the prediction of strength properties at some real production goods by NDT in steel industry, more and more, becomes to be the today state of the art [29], this is not yet the case with fracture toughness. Therefore, it has to be the objective of material characterization as a NDT task in the future to develop correlations between NDT quantities and toughness properties, in order to predict at the component locally toughness by NDT in in-service inspection strategies.

The sensitivity analysis here performed was based on material properties values, taken at ambient temperature, and not at elevated service temperatures, where toughness is in the upper shelf regime and much higher. Therefore, the results are extremely conservative, However, the critical crack sizes here obtained as result of the studies are no real problem to be detected by enhanced NDT. The inner pressure, in most of the simulations have been assumed higher than service pressure. The conclusion is: Our components are designed with high safety margins.

4. Acknowledgement

The author acknowledges the financial support of the German ministry of economy and technology to the development of the methodology in the nuclear safety research program.

The paper was compiled during the stay of the author in June/July 2016 as guest scientist at the Tohoku University in Sendai, Japan and is dedicated to the Professors T. Takagi and T. Uchimoto of the Institute of Fluid Science (IFS). Both have invited the author and supported as lecturer to serve in the master course and to present a lecture to the combination of fracture mechanics and NDT in a Quantitative Nondestructive Evaluation Approach, based on POD. The view back, on the historical development of the fracture mechanics in the introduction of this paper, is a very personnel-one of the author as a non-expert, to try a brief, popular, scientific description.

5. References

- [1] Kolosov G. V., On One Application of the Theory of Functions of Complex Variables to the Plane Problem of the, *Mathematical Theory of Elasticity*; Yurev, 1909, *Complete Dictionary of Scientific Biography*, 2008
- [2] Inglis C. E., *Trans Inst Nav Archit*, 1913, Vol 55, pp 219
- [3] Griffith A. A., The phenomena of rupture and flow in solids, *Phys. Trans. Roy. Soc., A series*, Vol 221, 1921, pp 163-198
- [4] Westergaard H. M., Bearing pressures and cracks, *Journ. Applied Mech.* 6, 1939, pp 49-53
- [5] Sneddon I. N., The distribution of stress in the neighborhood of a crack in an elastic solid, free download from <http://rspa.royalsocietypublishing.org/>, *Proc. Roy. Soc A series* 187, original 1946
- [6] Irvin G. R., *Fracturing of metals*, ASM, Ohio, 1949, p 147
- [7] Irvin G. R., Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate, *J. Appl. Mech.*, 24, 1957, pp 361-374
- [8] Dugdale D. S., Yielding of a steel containing slits, *J. Mech. Phys. Solids*. 18, 1960
- [9] Burdekin F. M., Stone D. E. W., The crack opening displacement approach to fracture mechanics in yielding materials, *J. of Strain Anal.* 1, 1966, pp 145-153
- [10] Rice J. R., A path-independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, *J. of App. Mech.* 35, 1968, pp 379-386
- [11] Heald P.T., Spink, G.M., and Worthington, P.J.: *Post Yield Fracture Mechanics*, *Mater. Sci. and Eng.*, 10, 1972, pp. 129-138
- [12] Dowling A.R., Townley C.H.A.: The effect of defects on structural failure: A two criteria approach, *J. Press. Vess. and Pip.*, V3, 1975, pp. 77-107
- [13] Wallin K., Statistical modeling of fracture in the ductile-to-brittle transition range, defect assessment in components, fundamentals and applications, *Mech. Eng. Publ.*, 1991, pp 415-445
- [14] PVrisk, User Manual of Version: Jochen H. Kurz and Dragos Cioclov, Version 1.1, 18. June 2008
- [15] Rummel W.D. et al.: *Application of NDE Reliability to Systems*, *ASM Handbook*, Vol 17, *NDE and Quality Control* 3rd edition, *ASM International*, 1994, pp 674-688
- [16] ASTM E3023-15: *Standard Practice for Probability of Detection Analysis for a Versus a Data*
- [17] Annis, C.: MIL-HDBK-1823A. *Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment*. Department of Defense Handbook, Wright-Patterson AFB, USA 2009
- [18] API RP 579: *American Petroleum Inst., Fitness for Service*, 2000
- [19] Berens, A.P.: *NDE Reliability Data Analysis*, *ASM Handbook V. 17, NDE and Quality Control* 3rd ed., *ASM*, 1994, pp 689-701
- [20] Dugdale, D.S.: *Yielding of Steel Sheets*, *J. Mech. Phys. Solids*, 8, 1960, pp 100-104
- [21] Kremer, K.J.: The Therm-O-Matic procedure, a new procedure for the online examination of steel products concerning surface defects, Report volume 4 to the 3rd European Conference on NDT, Florence, AIPND, 15-18 October 1984.
- [22] Palanisamy, R., Morris, C.J., Keener, D.M., and Curran, M.N.: On the accuracy of AC flux leakage, eddy current, EMAT and ultrasonic methods of measuring surface connected flaws in seamless steel tubing, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Plenum Press, Volume 5A, pp 215-223, 1986.
- [23] http://en.wikipedia.org/wiki/Evidence_of_absence
- [24] Kurz, J.H., Cioclov, D., and Dobmann, G.: On the integrating of non-destructive testing and probabilistic fracture mechanics, In: C. A. Graubner and H. Schmidt (eds), *6th International Probabilistic Workshop*, Technische Universität Darmstadt, 2008, pp 43-56
- [25] Dobmann, G., Cioclov, D., and Kurz, J.H.: The role of probabilistic approaches in NDT defect detection, classification and sizing, *Welding in the World*, 51, 5/6, 2007, pp 9-13
- [26] Kurz, J.H., Jüngert, A., Dugan, S., Dobmann, G., Boller, Ch.: Reliability considerations of NDT by probability of detection (POD) determination using ultrasound phased array. *Engineering failure analysis* 35, 2013, pp.609-617
- [27] Dobmann, G., Ciclov, D., and Kurz, J.H.: NDT and fracture mechanics. How can we improve failure assessment by NDT - Where we are - where do we go?, *Insight* Vol 53 No 12 December 2011
- [28] Schmidt, H.J., Schmidt-Brandecker, B., and Tober, G.: Design of modern aircraft structure and the role of NDT, *Proceedings of the 7th European Conference on NDT*, Copenhagen, May 1998
- [29] Wolter, B., and Dobmann, G.: Micromagnetic testing for rolled steel, *Proceedings of the European Conference on Non-Destructive Testing*, 9, Th.3.7.1, 2006

Marta Wojas*

Urząd Dozoru Technicznego, Warszawa

Certyfikacja personelu NDT – zalecenia wytycznych EA 4/15 G:2015

Certification of NDT personnel - recommendations guidelines EA 4/15 G:2015

ABSTRACT

Non-destructive testing laboratory may be accredited or recognized according to the reference document - EN ISO / IEC 17025. Document EA-4/15 G:2015 is a guideline that specify how to implement the requirements of EN ISO / IEC 17025. According to EA-04/15 the competence of personnel performing NDT should meet the requirements of testing standards / customer specifications / regulations, if any are specified, regardless of the form of employment. If not, the staff should have a valid certificate issued by an accredited certification body in accordance with EN ISO 9712 or an equivalent, and be authorized by the employer to certain activities in the field of certificate held. Supervision and monitoring should be performed by a person level 3 in each of the NDT methods used in the laboratory, through internal or external comparative testing. It specifies the minimum responsibilities of the supervisor. Annexes A to E identified guidance on calibration and / or checking of the measuring and testing equipment taking into account the requirements of the testing standards or own laboratory or customer's specifications. Annex F applies to the contents of the test procedure, and Annex G is the guidelines for internal audit.

Keywords: laboratory, non-destructive testing, personnel, certification

1. Wstęp

Norma EN ISO / IEC 17025, wdrożona do normalizacji polskiej jako PN EN ISO/IEC 17025, znajduje zastosowanie jako dokument odniesienia w procesach potwierdzania lub uznawania kompetencji laboratoriów [1]. Stosują ją laboratoria wdrażające i rozwijające administracyjne i techniczne systemy jakości, jak również jednostki akredytujące lub uznające laboratoria. Określa ona wymagania ogólne dotyczące każdego laboratorium badawczego / wzorcującego ubiegającego się o akredytację / uznanie, niezależnie od metody badania czy wzorcowania.

Działania laboratorium w dziedzinie badań nieniszczących mogą być zatem oceniane i uznawane czy akredytowane w oparciu o wymagania EN ISO/IEC 17025.

Przydatnym dokumentem uzupełniającym, zawierającym wskazówki praktyczne dotyczące sposobów spełniania wymagań EN ISO / IEC 17025 w laboratorium badań nieniszczących jest dokument EA-4/15:2015 [2]. Został on opracowany przez EA (European co-operation for Accreditation - europejskie stowarzyszenie krajowych jednostek akredytujących), liczące łącznie 48 członków. Dokumenty takie są opracowywane dla różnych norm w celu ułatwienia prawidłowego ich stosowania.

Wytyczne EA-4/15 zostały znowelizowane w maju 2015 roku, zatwierdzone 14 maja i opublikowane 21 maja tego roku. Przewidziano okres przejściowy dla stosowania tego dokumentu wynoszący 1 rok. Od 21 maja 2016 roku jest to dokument, który powinien być wdrożony do stosowania przez krajowe jednostki akredytujące. Może on być stosowany również przez jednostki uznające laboratoria.

Wytyczne odnoszą się do wszystkich rozdziałów normy EN ISO/IEC

STRESZCZENIE

Laboratorium badań nieniszczących może być akredytowane lub uznane w oparciu o dokument odniesienia - EN ISO/IEC 17025. Dokument EA-4/15 G:2015 to wytyczne, które określają sposób realizacji wymagań EN ISO / IEC 17025. Wg EA-04/15, kompetencje personelu wykonującego NDT, niezależnie od formy zatrudnienia, powinny spełniać wymagania norm badań / specyfikacji klienta / przepisów, jeśli takie zostały określone. Jeśli nie, personel powinien posiadać ważne certyfikaty wydane przez akredytowaną jednostkę certyfikującą zgodnie z EN ISO 9712 lub inną równoważną i być upoważniony przez pracodawcę do określonych czynności, w zakresie posiadanego certyfikatu. Nadzór i monitorowanie poprzez wewnętrzne i zewnętrzne badania porównawcze powinna sprawować osoba z 3. stopniem w każdej z metod NDT stosowanych w laboratorium. Określono minimalny zakres odpowiedzialności osoby nadzorującej z 3. stopniem.

W załącznikach A do E określono wskazówki odnośnie wzorcowania i / lub sprawdzania WPB z uwzględnieniem wymagań norm badań / specyfikacji własnych laboratorium albo klienta.

Załącznik F dotyczy zawartości procedury badania, a załącznik G to wytyczne odnośnie auditu wewnętrznego.

Słowa Kluczowe: laboratorium, badania nieniszczące, personel, certyfikacja

17025, w tym dotyczącego personelu NDT.

Jak wspomiano powyżej, EA-4/15 ma status wytycznych, zaś obowiązkowe wymagania zawarte są w normach badań nieniszczących, które w oryginalnej wersji językowej (angielskiej) są identyfikowane za pomocą terminu "shall" - musi.

Kompetencje personelu NDT powinny spełniać wymagania norm badań / specyfikacji klienta / przepisów, jeśli takie zostały określone. Jeśli nie, personel powinien posiadać ważne certyfikaty wydane przez akredytowaną jednostkę certyfikującą zgodnie z EN ISO 9712 lub inną równoważną i być upoważniony przez pracodawcę do określonych czynności, w zakresie posiadanego certyfikatu. Nadzór merytoryczny nad badaniami NDT sprawować powinna osoba z 3. stopniem w każdej z metod stosowanych w laboratorium. W dokumencie określono minimalny zakres odpowiedzialności osoby nadzorującej z 3. stopniem.

Personel wykonujący badania powinien być nadzorowany i monitorowany poprzez wewnętrzne i zewnętrzne badania porównawcze.

Wszystkie wymagania dla personelu badań nieniszczących określone w niniejszym opracowaniu dotyczą pracowników zatrudnionych na stałe, dorywczo oraz personelu podwykonawcy.

Ponadto dokument zawiera załączniki A do E dotyczące wyposażenia do badań metodami: radiograficzną, ultradźwiękową, magnetyczno-proszkową, penetracyjną, prądów wirowych.

W załącznikach tych określono szczegółowe wskazówki odnośnie wzorcowania i / lub sprawdzania funkcjonalności oraz działania wyposażenia badawczego z uwzględnieniem odpowiednich wymagań norm badań. Jeśli klient żąda innych parametrów badania, dopuszcza się ich zastosowanie w oparciu o jego specyfikację. Odpowiedzialność za dobór okresów wzorcowania / sprawdzania spoczywa na laboratorium, które powinno zapewnić spełnienie wymagań odpowiednich norm badań

* Autor korespondencyjny. E-mail: marta.wojas@udt.gov.pl

lub specyfikacji klienta.

Dokument podkreśla, że we wszystkich przypadkach wszystkie wymagania norm / specyfikacji klienta muszą być spełnione w całości.

Nie określono takich wymagań w odniesieniu do innych metod badań nieniszczących niż te podane powyżej, co nie oznacza, że laboratorium nie powinno zapewnić spójności z normami badań lub specyfikacjami klienta.

W załączniku F zawarto wskazówki co do zawartości procedury badania, zaś załącznik G podaje wytyczne odnośnie auditu wewnętrznego.

Niniejsze opracowanie dotyczy przede wszystkim kompetencji personelu wykonującego badania nieniszczące w laboratorium w oparciu o EN ISO/IEC 17025:2012 i EA-4/15:2015 oraz EN ISO 9712:2012 [3].

2. System zarządzania

Norma EN ISO/IEC 17025 wymaga, aby laboratorium badawcze opracowało i wdrożyło odpowiedni system jakości. Wytyczne EA-4/15 zwracają uwagę na to, aby w przypadku badań nieniszczących, system jakości nie tylko określał warunki do prowadzenia działalności laboratorium, ale również szczególnie uwzględniał:

- zasady kierowania badaniami nieniszczącymi w przypadku wykonywania badań w wielu lokalizacjach, jeśli występują;
- zasady nadzoru i zatwierdzania procedur i instrukcji badawczych;
- zapewnienie, że procedury i instrukcje badawcze są dostępne w miejscu badania;
- zasady nadzoru i auditów z uwzględnieniem wszystkich lokalizacji oraz kontroli ich współdziałania.

3. Organizacja

Wytyczne EA zwracają uwagę na zapewnienie, że personel badań nieniszczących jest wolny od wszelkich nacisków, które mogłyby wpłynąć na ich bezstronność i wpływać na oceny wyników tych badań.

Jako istotne podkreśla się rozważenie ubezpieczenia od odpowiedzialności cywilnej rozważając wszystkie rodzaje ryzyka w zależności od stosowanych metod badawczych. Szczególną uwagę zwraca się na badania radiograficzne ze względu na zagrożenie promieniowaniem jonizującym i jego wpływ na organizm personelu badawczego i otoczenia.

4. Personel badań nieniszczących

4.1 Wymagania ogólne

Osoby, które:

- nadzorują badania w zakresie wyposażenia badawczego i pomocniczego, wykonywania badań, oceny i interpretacji wyników badań, opracowywania procedur i instrukcji badawczych, kwalifikowania personelu badawczego;
- wykonują badania;
- oceniają wyniki badań;
- podpisują sprawozdania / protokoły badań;
- zatwierdzają procedury / instrukcje badawcze;

powinny mieć, właściwe dla metody badawczej kompetencje wyspecyfikowane na piśmie przez pracodawcę / kierownictwo laboratorium (np. opis stanowisk, księga służb, itp.). Osoby takie powinny być kwalifikowane przez pracodawcę / kierownictwo laboratorium na podstawie programu kwalifikowania (np. procedura kwalifikowania personelu badań nieniszczących), dotyczącego co najmniej wykształcenia, szkolenia, doświadczenia / praktyki oraz umiejętności.

Personel, który jest w trakcie szkolenia, powinien być nadzorowany przez osoby posiadające odpowiednie kompetencje, właściwe dla metody badawczej, określone przez pracodawcę / kierownictwo laboratorium.

Wszystkie ww. osoby powinny posiadać odpowiednie pisemne upoważnienia pracodawcy / kierownictwa laboratorium do wykonywania czynności związanych z badaniami, w których określono szczegółowy ich zakres oraz odpowiedzialności.

4.2 Wymagania szczegółowe

Personel badań nieniszczących powinien posiadać certyfikaty wydane przez akredytowaną jednostkę certyfikującą zgodnie z EN ISO 9712. Certyfikaty powinny być ważne w rozumieniu EN ISO 9712:2012, pkt 9.4 lub, w przypadku upływu terminu ich ważności, co najmniej w trakcie procesu odnowienia / recertyfikacji. Wtedy spełniony musi być warunek ciągłości wykonywania czynności w zakresie upoważnienia oraz badania ostrości widzenia.

Kiedy personel jest kwalifikowany wg programu pracodawcy, laboratorium powinno wykazać, że ustalenia dotyczące szkolenia i certyfikacji zgodne są z uznanymi programami certyfikacji, odpowiednio zatwierdzonymi przez stronę niezależną jak podano powyżej, w odniesieniu do osób odpowiedzialnych za NDT.

Niezależnie od podstawowych kwalifikacji jednostki certyfikującej wymagane jest wykazanie, że personel NDT posiada wiedzę, szkolenie, wykształcenia i doświadczenia w zakresie rodzajów nieciągłości, które mogą zostać wykryte podczas wytwarzania i / lub eksploatacji.

Oprócz ważnych certyfikatów wymagane jest posiadanie pisemnego upoważnienia pracodawcy / kierownictwa laboratorium do wykonywania czynności wyspecyfikowanych odpowiednio do stopnia i zakresu certyfikacji, zgodnie z EN ISO 9712:2012, pkt 6.

Za właściwy merytorycznie zakres upoważnienia powinna być odpowiedzialna osoba z 3. stopniem w metodzie, której upoważnienie dotyczy. Upoważnienie staje się nieważne z chwilą utraty ważności certyfikatu.

Osoby nadzorujące badania powinny posiadać ważne certyfikaty 3. stopnia wydane przez akredytowaną jednostkę certyfikującą we wszystkich metodach, które stosuje laboratorium.

Jeśli certyfikacja przez akredytowaną jednostkę certyfikującą jest niedostępna, można uznać za dopuszczalne, w przypadku, gdy inne wymagania nie występują, certyfikaty 3 stopnia wydane przez uznaną jednostkę zatwierdzoną przez stronę niezależną. Taka jednostka nie powinna mieć żadnego interesu handlowego czy innego z laboratorium i mieć personel posiadający certyfikaty 3. stopnia wg EN ISO 9712 lub równoważnej, w każdej z metod NDT.

Nadzór powinien dotyczyć co najmniej:

- opracowania i zarządzania programem kwalifikowania personelu NDT;
- ustalania zakresu pisemnego upoważnienia certyfikowanego personelu NDT;
- zatwierdzania procedur i instrukcji oraz walidacji metod badawczych; w przypadku, kiedy laboratorium stosuje metody znormalizowane, nie jest wymagane opracowywanie procedur badawczych. W takim przypadku norma stanowi procedurę (wg definicji EN ISO 9712, pkt 3.18: „procedura NDT to pisemny opis wszystkich istotnych parametrów i środków ostrożności, których należy przestrzegać w czasie badania nieniszczącego...”), a laboratorium opracowuje instrukcję (wg EN ISO 9712, pkt 3.16: „... opis szczegółowych etapów, które powinny być przestrzegane...”) czyli dokument opisujący sposób postępowania krok po kroku. Instrukcja badania opracowana jest przez upoważnioną osobę z 2. stopniem w oparciu o odpowiednią normę / procedurę badania;
- monitorowanie biegłości personelu NDT.

W przypadku, gdy żadne standardy nie określają wymagań co do certyfikacji, może być konieczne ustanowienie programu kwalifikowania (wewnętrznego lub zewnętrznego), np. w zakresie badań ultradźwiękowych silnie tłumiących materiałów - stali austenitycznych czy stopów niklu typu Inconel.

Sposób opracowania pisemnej instrukcji lub procedury dotyczącej nieznormalizowanej metody własnej określa załącznik F wytycznych.

Procedury metod nieznormalizowanych powinny być kwalifikowane i walidowane w taki sposób, aby uzyskać odpowiednie potwierdzenie możliwości wykrywania spodziewanych nieciągłości szczególnego

zainteresowania.

Osobą nadzorującą może być osoba zatrudniona na stałe lub na podstawie innej umowy, jednak upoważniona i działająca na odpowiedzialność pracodawcy / kierownictwa laboratorium.

Należy wyjaśnić, co oznacza zatwierdzenie procedury przez upoważnioną osobę z 3. stopniem. Otóż oznacza odpowiedzialność takiej osoby wobec pracodawcy / kierownictwa laboratorium za właściwie określone, odpowiednie do zastosowania, co najmniej:

- normy badań;
- wyposażenie pomiarowe – badawcze;
- kwalifikacje personelu;
- warunki środowiskowe badania;
- kryteria akceptacji;
- sposób przedstawiania wyników badania;
- sposób oceny i raportowania.

Zatwierdzenie procedury / instrukcji przez pracodawcę / kierownictwo laboratorium oznacza przyjęcie odpowiedzialności za wyniki badań wykonanych w oparciu o zatwierdzoną procedurę / instrukcję.

Biegłość poszczególnych osób w wykonywaniu badań powinna być monitorowana na jeden lub kilka sposobów określonych w EN ISO/IEC 17025:2005, pkt 5.9, w jak najszerszym, możliwym zakresie wszystkich stosowanych metod i technik badawczych, ale nie powinna się ograniczać tylko do tego. Jednym ze sposobów jest prowadzenie badań próbek o znanych nieciągłościach przez osoby wykonujące dane badania i porównanie oraz ocenę wyników badań.

Wytyczne sugerują również obserwację podczas wykonywania badania w siedzibie laboratorium / w innych lokalizacjach / w terenie, aby ocenić, czy badania są wykonywane zgodnie z procedurami / instrukcjami, zwracając uwagę na przestrzeganie warunków środowiskowych wymaganych dla określonej metody badawczej.

Osoby odpowiedzialne za opinie i interpretacje wyników badań (np. decydowanie o istotności wykrytych nieciągłości dla eksploatacji badanego obiektu) powinny posiadać wiedzę z zakresu:

- technologii wytwarzania badanych obiektów, materiałów itd. i związanych z tym nieciągłości;
- zamierzonego zastosowania obiektu / materiału oraz wymagań (kryteriów akceptacji) dla takich obiektów / materiałów;
- przepisów i norm / specyfikacji dotyczących badanych obiektów / materiałów;
- rozumienia istotności wykrytych nieciągłości dla określonych obiektów / materiałów.

Wymagania takie spełniają np.:

- osoby z 3. stopniem certyfikacji w metodzie, którą wykonywano badanie, przeszkolone, a następnie upoważnione przez pracodawcę do opiniowania i interpretacji wyników;
- inne osoby upoważnione przez pracodawcę, które posiadają odpowiednio udokumentowaną wiedzę (np. zapisy, świadectwa ukończenia odpowiednich szkoleń).

Sprawozdania / protokoły powinny być:

- podpisane przez upoważniony personel wykonujący badanie;
- sprawdzone pod względem merytorycznym i podpisane przez osobę z certyfikatem co najmniej 2. stopnia w metodzie, której sprawozdanie / protokół dotyczy;
- zatwierdzone i podpisane przez upoważnionego przedstawiciela pracodawcy. Zatwierdzenie takie potwierdza odpowiedzialność pracodawcy za wyniki badań, które zawiera sprawozdanie / protokół;
- EN ISO/IEC 17025 w rozdziale dotyczącym sprawozdania mówi o „opiniach i interpretacjach”. Mogą one dotyczyć np. zgodności lub niezgodności wyników z wymaganiami, spełnienia wymagań zlecenia, sugestii odnośnie wykorzystania wyników badań itp., przy czym nie należy mylić tych pojęć z „interpretacją” dotyczącą

np. przyczyny wystąpienia wykrytej nieciągłości czy dalszego postępowania z obiektem – czy nieciągłość np. kwalifikuje się do naprawy.

5. Odpowiedzialność pracodawcy

Pracodawca / kierownictwo laboratorium odpowiedzialne jest za personel wykonujący zadania, a w szczególności za wyniki badań.

W przypadku certyfikowanego personelu badań nieniszczących pracodawca odpowiedzialny jest ponadto w zakresie określonym w EN ISO 9712:2012, pkt 5.5 za:

- szkolenia stanowiskowe i z zakresu wiedzy specjalistycznej dotyczącej specyfiki badanych obiektów (np. technologie, przepisy, normy / specyfikacje itp.), warunków pracy i inne, warunkujące udzielenie upoważnienia
- wydawanie pisemnych upoważnień
- zapewnienie corocznego badania ostrości widzenia
- nadzorowanie ciągłości wykonywania czynności, do których wydał upoważnienie, bez istotnej przerwy (w rozumieniu EN ISO 9712:2012, pkt 3.27)
- zapewnienie, że personel wykonuje czynności zgodnie z zakresem certyfikacji i upoważnienia
- prowadzenie odpowiednich zapisów dokumentujących spełnienie wszystkich ww. wymagań odnośnie personelu własnego jak i podwykonawców.

6. Podsumowanie

- 1) Dokument EA-4/15:2015 zawiera praktyczne uszczegółowienie wymagań EN ISO/IEC 17025:2005 odnośnie kompetencji personelu wykonującego i nadzorującego badania oraz interpretującego wyniki takich badań w laboratorium badań nieniszczących.
- 2) Minimalne wymagania dotyczące kompetencji wszystkich osób wymienionych w 6.1 powinny być odpowiednio określone przez pracodawcę / kierownictwo laboratorium, przy czym w każdym przypadku wymagane jest udokumentowanie przez pracodawcę / kierownictwo laboratorium spełnienia wymagań normy badania / specyfikacji klienta / przepisów.
- 3) W przypadku, kiedy w normie badania / specyfikacji klienta / przepisach nie ma mowy o wymaganiach dla personelu NDT (np. metoda własna laboratorium), personel powinien być kwalifikowany przez akredytowaną jednostkę certyfikującą.
- 4) Personel NDT powinien być nadzorowany przez osoby z 3. stopniem certyfikacji w każdej z metod, którą stosuje laboratorium.
- 5) Procedury badawcze powinny być zatwierdzone przez osoby z 3. stopniem.
- 6) Walidację metod badawczych powinny przeprowadzać osoby z 3. stopniem certyfikacji odpowiednio do metody.
- 7) Za autoryzację certyfikowanego personelu NDT do wykonywania badań oraz za zarządzaniem programem kompetencji personelu badań nieniszczących powinny być odpowiedzialne osoby z 3. stopniem certyfikacji odpowiednio do metody badawczej.
- 8) Kompetencje personelu NDT powinno być monitorowane przez osoby z 3. stopniem certyfikacji odpowiednio do metody.

7. Spis literatury

- [1] PN EN ISO/IEC 17025:2005 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących, PKN, Warszawa 2005
- [2] EA-4/15 C:2015 Accreditation for Non-Destructive Testing, EA, May 2015, rev.01
- [3] PN EN ISO 9712:2012 Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących, PKN, Warszawa, 2014

Uwe Ewert*

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung, Germany

Progress in Digital Industrial Radiology Part I: Radiographic Techniques - Film Replacement and Backscatter Imaging

Postępy w cyfrowej radiologii przemysłowej Część I: Techniki radiograficzne - sukcesor błony i obrazowanie rozproszone wstecznie

ABSTRACT

Similar to the success story of digital photography a major upheaval has been observed in digital industrial radiology. This paper is split into 3 parts:

Part 1: Film Replacement and Backscatter Imaging: Computed radiography with phosphor imaging plates substitutes film applications. Digital Detector Arrays enable an extraordinary increase of contrast sensitivity in comparison to film radiography. The increased sensitivity of digital detectors enables the efficient usage for dimensional measurements and functionality tests substituting manual maintenance. The digital measurement of wall thickness and corrosion status is state of the art in petrochemical industry. Photon counting and energy discriminating detectors are applied up to 300 kV and provide increased thickness dynamic and material discrimination by synchronously acquisition of images of the high and low energy part of the spectrum. X-ray back scatter techniques have been applied in safety and security relevant applications with single sided access of source and detector. First inspections of CFRP in aerospace industry were successfully conducted with newly designed back scatter cameras. Numeric modeling is used to design X-Ray optics and inspection scenarios as well as conducting RT training.

Part 2: Computed tomography (CT)

Part 3: Micro Radiography and Micro CT.

Keywords: Digital radiography, computed tomography, laminography, Imaging plates, digital detector arrays, photon counting detectors, back scatter, numeric modelling, CFRP, welding, corrosion

STRESZCZENIE

Podobnie jak w przypadku fotografii cyfrowej tak i w cyfrowej radiologii przemysłowej nastąpiły poważne zmiany. Publikacja składa się z 3 części.

Część 1.: Zastąpienie techniki analogowej i obrazowanie metodą rozproszenia wstecznego. Radiografia komputerowa z zastosowaniem ekranów luminoforowych (płyty obrazowych) zastępuje błony. Cyfrowe detektory radiograficzne DDA umożliwiają uzyskanie ponadprzeciętnego wzrostu czułości kontrastowej w stosunku do błony. Zwiększona czułość detektorów cyfrowych umożliwia wykorzystanie radiografii do określenia rozmiarów obiektów i przeprowadzenia testów funkcjonalnych, zastępując obsługę ręczną. Pomiar cyfrowy grubości ścianki i procesu korozji rozwinął się znacząco w przemyśle petrochemicznym. Detektory działające w trybie zliczania fotonów z dyskryminacją energetyczną, stosowane do 300 kV umożliwiają większą, dynamiczną rozróżnialność grubości i rodzaju materiału (akwizycja synchroniczna). Techniki związane z rozpraszaniem wstecznym promieniowania X zostały zastosowane w aplikacjach z dziedziny bezpieczeństwa i ochrony, w których źródło i detektor musiały znajdować się po tej samej stronie. Omawiane systemy obrazowania zostały również po raz pierwszy zastosowane do testowania kompozytów węglowych w przemyśle lotniczym. Modelowanie numeryczne zjawisk fizycznych związanych z radiografią jest wykorzystywane w projektowaniu optyki rentgenowskiej, opracowywaniu procedur kontroli materiałów i szkoleniach RT.

Część 2: Tomografia komputerowa (CT)

Część 3: Mikroradiografia i mikrotomografia komputerowa

Słowa Kluczowe: Radiografia cyfrowa, tomografia komputerowa, laminografia, płyty obrazowe, cyfrowe detektory radiograficzne, detektory zliczające fotony, rozpraszanie wsteczne, modelowanie numeryczne, CFRP, spawanie, korozja



Professor

Uwe Ewert

1. Introduction

Industrial Radiography has been dominated by application of special X-ray films with thin lead screens in front and behind the film with double sided emulsion. This technique was the basis for industrial applications since about 120 years. [1] provides related information on film replacement.

New digital detectors substitute the film and improve quality

and efficiency of industrial radiography. Film replacement will be discussed for computed radiography (CR) with phosphor imaging plates (IP) and digital detector arrays (DDA). A new generation of photon counting and energy discriminating detector arrays was developed over the last decade to extend the application range of DDAs [2].

The most important advantages of digital radiography [1] are:

- shorter test and interpretation time;
- new application areas by higher inspection quality and higher wall thickness range;
- no usage of chemicals and dangerous waste as film developer and fixer;
- less consumables;
- high accuracy in the measurement of dimensions;
- visualization and evaluation of flaws and internal structures enhanced by image processing.

The X-Ray back scatter technique was discussed since more than 60 years to permit single sided radiographic testing [3].

*Corresponding author. E-mail: uwe.ewert@bam.de

Especially after the successful application in the security field, the back scatter imaging returns back to the attention of NDT. First applications for carbon fiber reinforced polymer (CFRP) testing are presented [4].

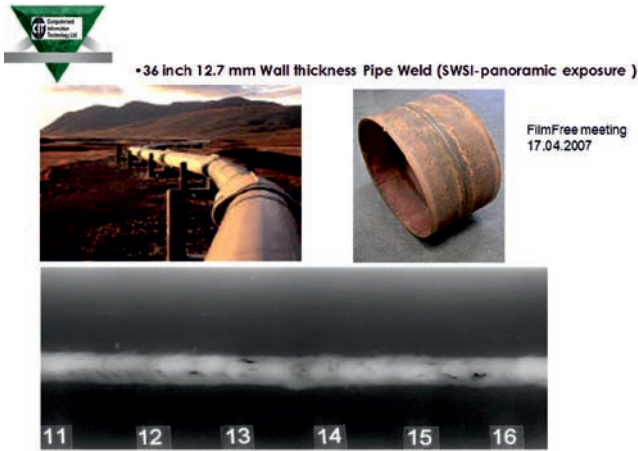


Fig. 1. Inspection of welded pipelines with CR [6]
Rys. 1. Inspekcja rurociągów za pomocą radiografii cyfrowej [6]

Radiography and CT cover a wide application range, despite upcoming alternative NDT methods as phased array ultrasonics with synthetic aperture focusing for 3D visualization and complex electromagnetic methods, as e.g. THz based inspections. Radiography and CT are used in a range of few keV until 15 MeV for industrial usage and cover applications of objects in the nm to meter range.

Selected radiographic application areas will be discussed.

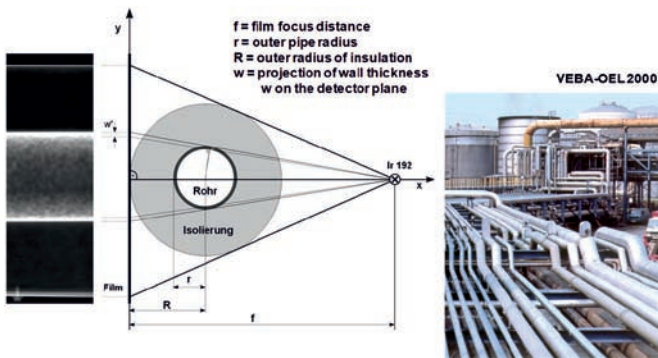


Fig. 2. Inspection of thermal insulated pipes for corrosion and wall thickness measurement with CR [7, 8]

Rys. 2. Inspekcja rur z izolacją termiczną w celu pomiaru korozji oraz grubości ścianek z wykorzystaniem radiografii cyfrowej [7, 8]

2. Filmless Radiography – Film Replacement

2.1 Computed Radiography (CR) with Phosphor Imaging Plates

Imaging Plates (IP) are routinely used in medicine and biomedical autoradiography since more than 20 years. Several systems are also offered for NDT applications [5, 6]. IPs are handled nearly in the same way as radiographic films. After exposure, they are read by a LASER scanner and processed to a digital image instead of being developed like a film [1, 5, 6]. Any remaining latent image can be erased with a light source (e.g. halogen, incandescent). So, the same IP can be recycled up

to more than 1000 times if carefully handled. Less expensive CR scanner require manual handling of the imaging plates. This may reduce the IP cycle to less than 100 applications before scratches disturb the digital images.

Tab. 1. Standards for CR and DDA based applications

Tab. 1. Standardy dla aplikacji bazujących na CR i DDA

EN 13068	Radioscopy
EN 14096, ISO 14096	Film Digitization
EN 14784 CR (2005) ISO 16371 part 1 (2011)	Part 1: Classification of Systems, Part 2: General principles, part 2 becomes ISO 16371-2
ISO 10893-7 (2010)	Steel tubes – NDT of welds with DDA and (CR), in revision
ISO 17636-2 (2012)	NDT of welds: CR and DDA, substitution of EN 1435
EN 16407 (2012)	Practice: wall thickness measurement, with film, CR and DDA, double wall and tangential technique
ASME BPVC, S.V, Article 2 (2015)	Radiography with film, DDA, CR, radioscopy, film digitization
ASTM CR (2013) Under revision	Classification (E 2446-15), Long term stability (E2445-14), Guide (E 2007-10), Practice (E 2033-99, reapproved 2013)
ASTM DDA (2010)	Characterization (E 2597M-14), Guide (E 2736-10), Practice (E 2698-10), Long Term Stability (E 2737-10)
ASTM DICONDE (2010) (data format)	Standard Practice for Digital Imaging and Communication ND Evaluation (DICONDE)(E 2339-10, E 2663-08, E 2699-10, E 2738-10, E 2767-10)
ASTM E 2422-05, E 2660-10, E 2669-10	Digital reference image catalogues, light alloy, titanium and steel castings

CR systems are substituting film applications, especially for mobile NDT. A typical application is quality assurance of welds, based on ISO 17636-2. Fig. 1 shows an example of a CR application for radiographic pipeline inspection [6]. CR is applied in chemical industry more and more for corrosion and pipe thickness monitoring [7, 8] (see Fig. 2). More radiographs are taken for corrosion and thickness measurement in chemical industry than for weld inspection. Nowadays, CR is also applied to optimize manual maintenance of valves, fittings and other armatures. Radiographic imaging permits the evaluation of the functionality. Fig. 3 shows the digital radiograph of a unidirectional restrictor valve [9]. It is clearly seen that the valve is not functioning, because the valve flap sticks in the silt deposit. Manual maintenance is required. Imaging plates are especially sensitive for radiation of lower energy (< 250 keV). CR and DDA applications are regulated by standards. ISO 17635 defines the general rules for weld inspection ISO 17636-2 and ISO (Pipes) describe the standard practice for weld inspection. ASME BPVC Section V, Article 2 describes film and digital radiography practices. Most of the standards are taken over from ASTM E07 standard publications. The most important ones are listed in Table 1.

They can also be applied for high energy radiography in the MeV range, if scattered radiation is properly shielded and lead and steel sandwich filters are applied in front of the IP (see ISO 17636-2).

2.2 Digital Detector Arrays (DDA)

Two types of DDA's, also called flat panel detectors, are

available on the market: The first design is based on a photo diode matrix connected to thin film transistors (TFT) [10]. These components are manufactured of amorphous silicon and they are widely resistant against high energy radiation. The photo diodes are charged by light which is generated by a scintillator converting the incoming X- or gamma rays to visible light. The next generation of DDA's is based on a photo conductor like amorphous selenium [11] or CdTe [12-14] on a multi-micro electrode plate, which is also read out by TFTs [13]. Currently the typical DDA systems for NDT achieve a resolution of 50 - 400 μm . Weld inspection and fine casting testing requires at least 50 μm resolution (see ISO 17636-2, Tables B.13, B.14). This can also be achieved by magnifying technique with mini- or micro-focus tubes.

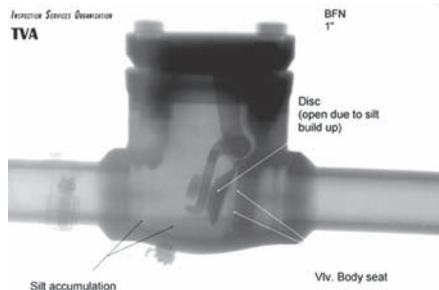


Fig. 3. CR image of a valve with slit deposit, influencing the functionality [9]

Rys. 3. Cyfrowy radiogram zaworu zanieczyszczonego mułem, wpływającym na funkcjonalność części [9]

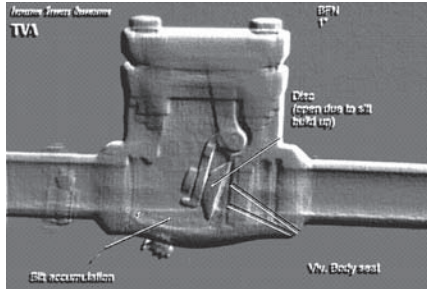


Fig. 4. CR image of a valve with slit deposit, enhanced with a digital gradient filter

Rys. 4. Cyfrowy radiogram zaworu zanieczyszczonego mułem, poprawiony z wykorzystaniem cyfrowego filtra gradientowego

DDAs are suitable for in-house and in-field applications. In-field applications have to be carried out often under harsh environmental conditions, which implies the risk of hardware damage and may exclude the application of DDA's. CR is the recommended technology here.

During the last 15 years a new generation of photon counting and energy discriminating detectors (PCD) has been developed. Most of them are on basis of Si or GaAs [15, 16]. Recently this technology was made available for applications at higher energy (tested up to 300 keV) [2, 17, 18]. The new photon counting detector permits the selection of energy thresholds to obtain an optimum energy range and reduction of the influence of scattered radiation. Since the new detector acquires digital images without offset intensity, long exposure times at low counting rates can be used to extend the range of penetrated thickness permitting a restricted controlled area. A specially designed and

developed photon counting CdTe-CMOS detector by XCounter was tested in the TomoWELD project [2, 18]. The detector has a sensitive area of 100 x 50mm and a pixel size of 100 μm .

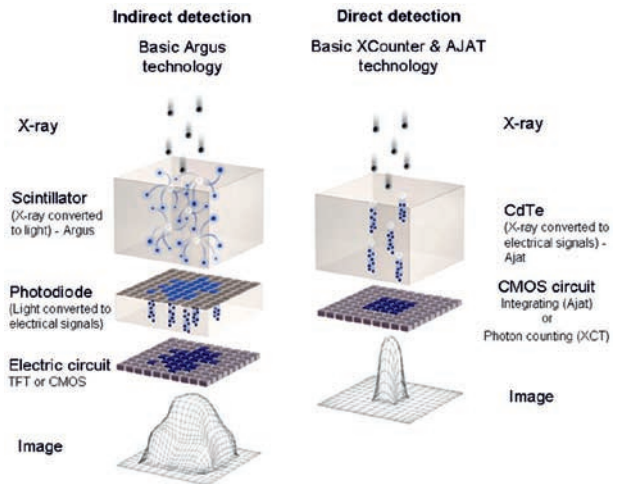
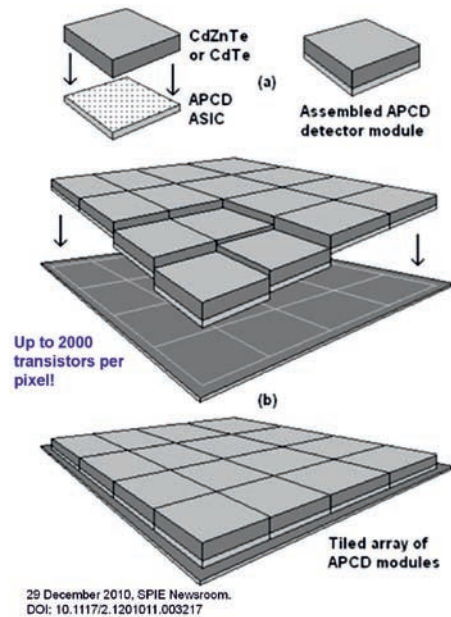


Fig. 5. Comparison between indirect (left) and direct (right) detection of X-rays [2]

Rys. 5. Porównanie pośredniej (z lewej) i bezpośredniej (z prawej) metody detekcji promieni X [2]



29 December 2010, SPIE Newsroom.
DOI: 10.1117/2.1201011.003217



- *PDT 25* (XCounter/Ajat, Sweden/Finland)
- *WidePIX* (IEAP CTU in Prague, Czech)
- *PILATUS* (PSI/SLS, Switzerland)
- *XPAD* (CNRS, France)
- *MEDIPIX* (CERN)
- *LAD* (RAL, UK)
- *MPEC* (Univ. Bonn, Germany)

Fig. 6. General sketch of a photon counting energy discriminating detector (up) and photograph of the prototype PDT 25 (down) [18]

Rys. 6. Ogólny schemat detektora zliczającego fotony z dyskryminacją energii (z lewej) i fotografia prototypu PDT 25 (z prawej) [18]

The basic spatial resolution of the detector was determined, with a duplex wire IQI (ISO 19232-5), as equal to the pixel size

(100 μm). Up to 100 mm of steel were radiographed at 270kV, with the low count rate of about two 2 counts per second per detector element. Testing class B of ISO 17636-2 could be achieved after sufficient image integration [2, 18]. It is a direct converting detector, which enables the simultaneous detection of different parts of the X-ray spectrum depending on the control of energy thresholds. Figure 6 shows the tile structure of the detector and a photograph of a former prototype. Each detector element consists of up to two thousand transistors, which enable the energy discrimination and photon counting in each detector element.

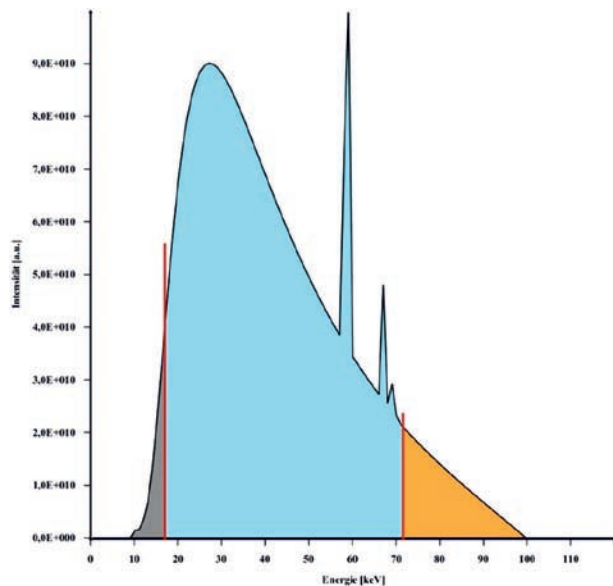


Fig. 7. Selective detection of a bremsstrahlung spectrum (example) by thresholding inside of the detector [2]

Rys. 7. Selektywne wykrycie promieniowania hamowania (przykład) poprzez progowanie wewnątrz detektora [2]

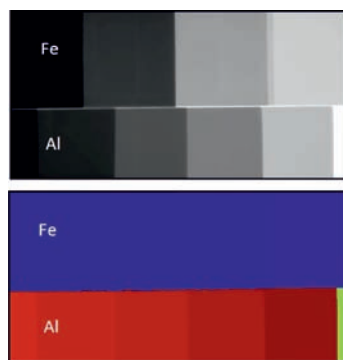


Fig. 8. Radiographic image (left) taken at 160kV and dual energy image (right) of Fe (blue) and Al (red) step wedges (green = free beam/air) [2]

Rys. 8. Radiogram (z lewej) wykonany przy 160 kV i obraz dwuenergetyczny (z prawej) klinów schodkowych wykonanych z Fe (niebieski) i Al (czerwony) (barwa zielona = powietrze) [2]

Photon counting and energy discriminating detectors can be used to acquire dual energy radiographs for discrimination of the different materials [2, 19, 20]. Material's discrimination using X-rays is based on the difference in energy dependency of the mass attenuation coefficient of the investigated materials [21]. When two different energies are used, this technique is called dual-energy imaging. The energy discriminating capability of the PCD enables the separate acquisition of radiographs at the

low energy (LE) and high energy (HE) part of the X-Ray spectrum by internal and selective energy thresholding (see Figure 7). Fig. 8 shows a typical example for the thickness visualization and material separation measured with 2 step wedges from steel and aluminum (red).

2.3 High Contrast Sensitivity Technique with DDAs

The image quality depends on the basic spatial resolution, the attenuation coefficient and the signal to noise ratio (SNR) in digital radiology [22]. DDAs need to be calibrated before usage to equalize the different characteristics of the detector elements. This avoids image distortions by fixed pattern noise due to differences in the detector elements and the electronics. Consequently, the image noise depends dominantly on the photon statistic. This can be exploited for radiography with high SNR and improved contrast sensitivity. DDA systems achieve currently a significantly higher SNR, CNR and better contrast sensitivity than imaging plates and films, if they are properly calibrated.

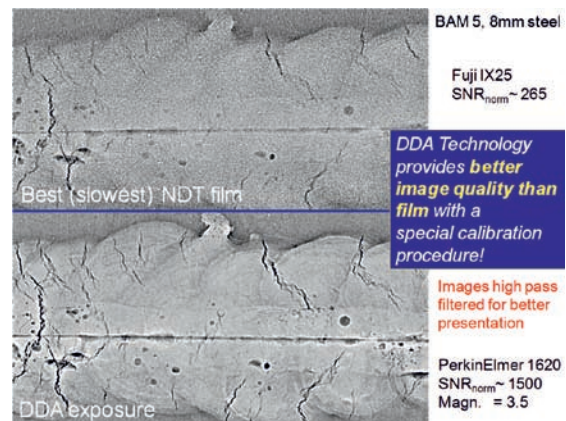


Fig. 9. Enhanced detail visibility of flaws by increased SNR of a DDA image in comparison to a digitized film image of weld sample BAM 5 after numeric high pass filtering [1]

Rys. 9. Poprawiona widoczność detali wad na próbce spawu BAM 5 poprzez zwiększenie SNR obrazu otrzymanego z użyciem detektora cyfrowego, w porównaniu do obrazu otrzymanego ze zdigitalizowanego zdjęcia rentgenowskiego przetworzonego za pomocą cyfrowego filtra górnoprzepustowego [1]

Figure 9 shows the effect of SNR increase (equivalent to CNR increase) on the visibility of fine flaw indications [22, 23] in comparison to film radiography. The digitized fine grained film provides a SNR of 265 in the base material region. The DDA image was measured with a SNR of about 1500 and magnification of 3.5. It shows significantly finer flaw indications.

3. X-ray back scatter technique

The X-ray backscatter radiography is based on inelastically scattered X-ray photons, known as Compton Scattering [24]. Objects, which are transparent to X-rays, emit scattered radiation in forward and backward direction. This occurs preferentially in organic and low-numbered materials based on their ranking in the periodic table of the elements. All elements with high atomic numbers (e.g. heavy metals) mainly absorb X-ray photons; so they emit scattered radiation to the outside with a much lesser intensity. Back scattered radiation can be used for imaging of

inner structures of volumetric objects. This permits to visualize organic materials behind thin metals as e.g. contraband or explosives in cars and containers. The technology is well established for security applications. It has also high potential for safety applications due to the advantage of single sided access. Figure 10 shows a typical example of the back scatter inspection of an airplane by AS&E, which could not be taken with double sided access by source and detector [25]. The flying spot technique is described in [26].

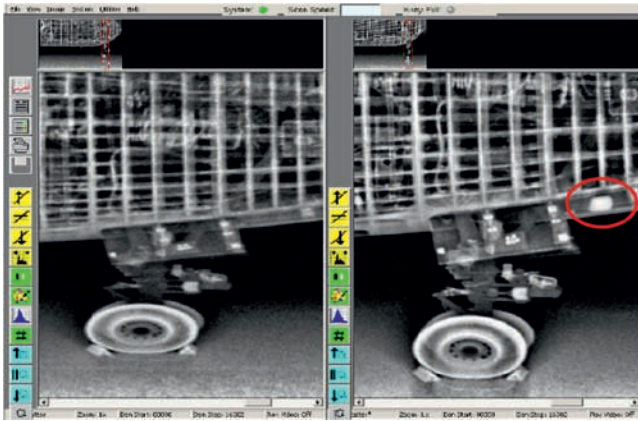


Fig. 10. Back scatter Image of an airplane structure taken with flying spot technology of AS&E [25]

Rys. 10. Obraz elementu struktury samolotu otrzymany techniką rozpraszania wstecznego przy wykorzystaniu technologii flying spot AS&E [25]

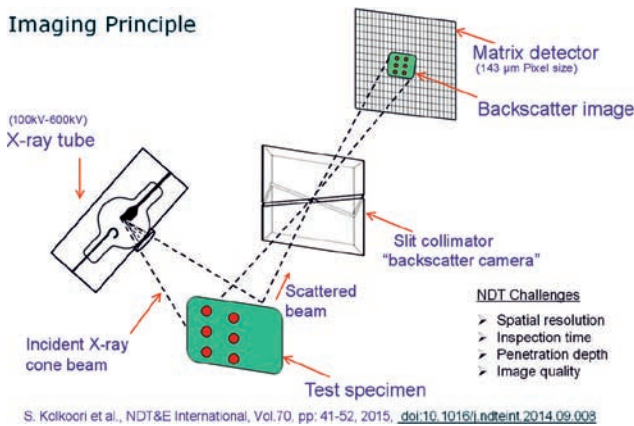


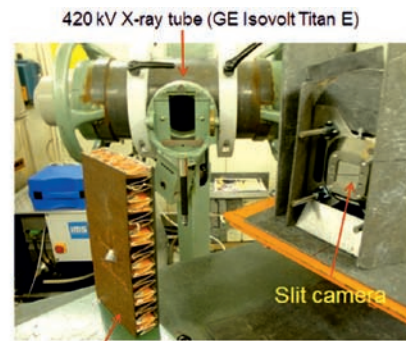
Fig. 11. Scheme of the X-ray back scatter technique using uncollimated incident X-rays and a twisted slit camera with a DDA for imaging of the scattered radiation of the test object [32]

Rys. 11. Schemat techniki rozpraszania wstecznego przy użyciu nieskolimowanych, padających promieni x, kolimatora ze skróconą szczeliną i detektora cyfrowego do obrazowania promieniowania rozproszonego przez obiekt testowy [32]

The general approach for imaging X-ray backscattered radiation from an object is using the 'pinhole camera' principle. A Compton scatter method using an X-ray fan-beam and a pinhole camera for non-destructive testing (NDT) of materials was presented by Strecker [27]. The main drawbacks of this technique are low-efficiency of the pinhole camera and the large measurement time. ComScan (Compton backscatter scanner) a former commercially available backscatter imaging system for NDT applications was described in [28, 29]. Recently, commercial applications of back scatter imaging for NDT in aerospace

industry were published by [30, 31].

Alternatively to the flying spot technology of AS&E [25] a diaphragm based camera was developed and explored for applications in NDT [32 - 34]. Figure 11 shows the setup of the scatter camera of BAM with a diaphragm based on a ruled surface slit. Figure 12 shows a comparison of the back scatter image (90° between camera and exposure direction) and a transmission image of carbon reinforced composite plates with internal stiffening structures and water inclusion. The water and the internal structures are clearly visible [35]. Recently multi slit camera optics were developed and explored with aperture focusing techniques to enhance the sensitivity.



CFRP structured plate (10cm x 20cm x 3.3cm)

X-ray backscatter image

X-ray transmission image



420 kV, 10 mA, 5 min, slit width: 0.9 mm (high-pass filtered)

150 kV, 0.2 mA, 1 min (high-pass filtered)

Fig. 12. Set up of a back scatter measurements of a CFRP structure (up) and back scatter image (left) in comparison to transmission radiograph (right) [35]

Rys. 12. Układ do pomiarów struktury CFRP z wykorzystaniem techniki rozpraszania wstecznego (z lewej) i obraz otrzymany tą techniką (w środku) w porównaniu do obrazu otrzymanego w technice transmisyjnej (z prawej) [35]

First results were published in [36]. The camera diaphragm contains a set of equidistant parallel twisted slits, which generate an overlaid image of the scattered radiation projections per slit emitted by the test object (here the letter "A"). Fig. 13 and Fig. 14 shows the CAD design of the multi slit diaphragm and the simulated image with aRTist and McRay [36, 37]. A deconvolution based aperture focusing technique was developed obtaining the undistorted scatter image of the test object with enhanced sensitivity (Fig. 13-14).

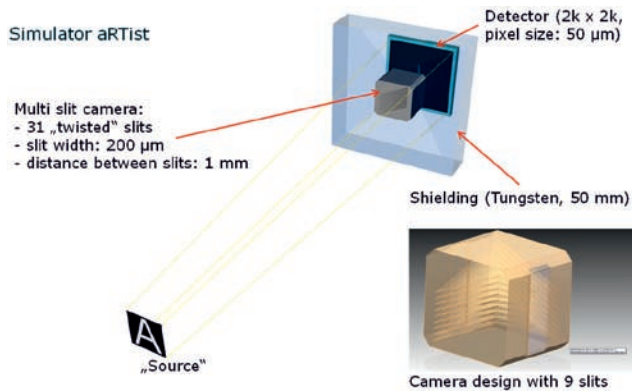


Fig. 13. CAD design of a multi slit camera with parallel twisted slits [36]
Rys. 13. Projekt CAD wieloszczelinowej kamery z równoległymi skróconymi szczelinami [36]

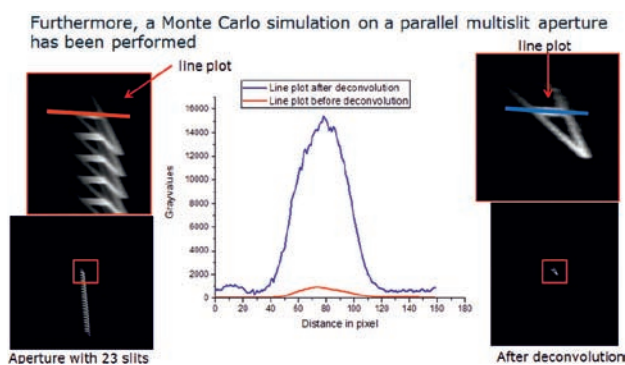


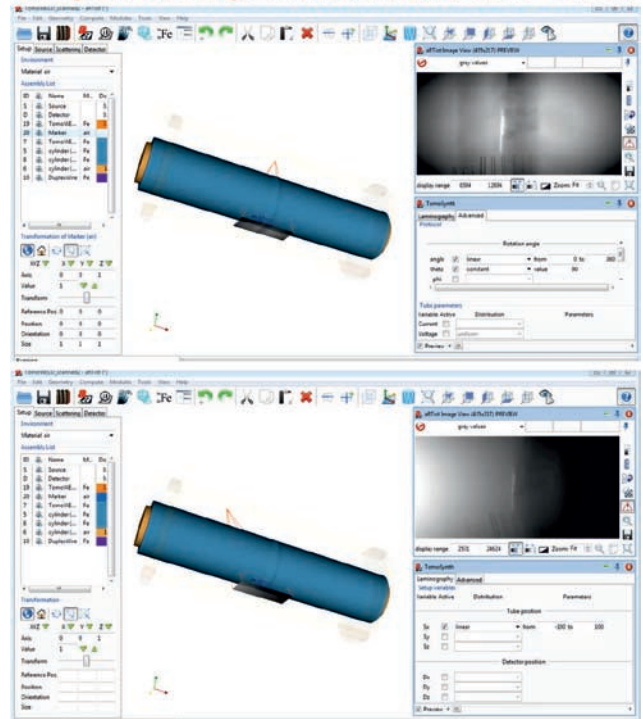
Fig. 14. Simulated camera image (left), profile along the red line (center) and scatter image of the letter "A" after aperture focusing [37, 38]
Rys. 14. Zasympulowany obraz z kamery (z lewej), profil wzdłuż czerwonej linii (w środku) oraz rozproszony obraz litery „A” po wykorzystaniu techniki aperture focusing (SAFT) [37, 38]

4. Simulation

The importance of modelling in NDT was recognized in the last 20 years in the NDT community. Especially the software package CIVA [38] is widely used for modelling different NDT techniques.

In order to adequately simulate the radiographic process several elements need to be considered in a modeling tool. This includes the object's geometry, orientation and position relative to source and detector, material properties, source characteristics and detector parameters. BAM developed the modelling package aRTist (Analytical RT Inspection Simulation Tool [39]) for film based and digital radiography. It permits modelling of Computed Tomography (CT) and laminographic scenarios. There exist also other available modelling software tools for RT as e.g. CIVA, XRSIM and Scorpius XLab. Several variance reduction methods are implemented in aRTist to keep simulation times short [42]. Triangulated surfaces can be processed directly by the code, allowing the use of existing CAD models for complicated objects. aRTist is applied for training in radiography (digital and film), optimization of NDT scenarios, virtual POD trials and recently for development of X-ray optics for back scatter techniques [36, 37]. Fig. 15 shows two modeling examples for design of the new TomoWELD scanner [18].

Analytical RT inspection simulation tool - aRTist



- Optimization of X-ray parameters:**
 - Distances
 - Focal spot
 - Target angle
 - Scan-distances
- Modelling of 360° overview scan by ISO 17636-2 and DIN 25435-7**
- Modelling of Planar-Tomography-Scans**

Fig. 15. aRTist scenarios designed for automated weld inspection with 360° circumferential scan (top) and Planar Tomographic scan (bottom) with modelled projections [18]

Rys. 15. Stworzone w programie aRTist schematy automatycznej kontroli spoin za pomocą 360° skanowania po obwodzie (góra) i tomograficznych skanów powierzchni (dół) z zamodelowanymi projekcjami [18]

5. Summary

Computed Radiography with phosphor imaging plates has gained more and more importance for mobile inspection and film replacement. Weld inspection, corrosion and functionality tests are the major applications. Related standard practices are available at ISO, CEN, ASTM and ASME. New calibration methods enable the High Contrast Sensitivity Technique (HCS RT) for radiographic inspection. The contrast sensitivity can be enhanced in comparison to film. New efficient Digital Detector Arrays (DDA) are available for stationary and mobile testing. They are also applied for automated defect recognition (ADR), CT, Back Scatter and Dual Energy applications. New CdTe-based photon counting (PC) and energy discriminating detectors for X-Ray applications up to 300 kV permit the inspection of an increased thickness range of steel, light alloys and polymers in comparison to integrating DDAs. PC detectors can be applied for inspections with low photon flow, since no dark signals need to be considered. The detectors can be used to shape X-ray spectra for reduction of scattered radiation. Dual energy radiographs can be taken to acquire attenuation images with material discrimination. Back scatter techniques are increasingly applied for security and NDT. Additionally to the flying spot technique new diaphragm based optics were designed for application at higher X-ray potentials (up to MeV range). Diaphragms with

twisted slits were successfully tested for CFRP applications in aerospace industry. Numeric radiographic modeling is applied for experiment planning, film replacement optimization, POD-calculations and training.

6. References

- [1] U. Ewert, Advances in digital industrial radiology – new application areas beyond film radiography, review of progress in quantitative nondestructive evaluation, Colorado, USA 2012, Vol. 32A
- [2] D. Walter, U. Zscherpel, U. Ewert, Photon Counting and Energy Discriminating X-Ray Detectors - Benefits and Applications, 19th World Conference on ND Testing (WCNDT 2016), Germany, <http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/tu2b5.pdf>
- [3] W. Heitler, The quantum theory of radiation, 3rd ed., Oxford University Press: London, 1954
- [4] Sanjeevareddy Kolkoori, Norma Wrobel, Uwe Zscherpel, Uwe Ewert, A new X-ray backscatter imaging technique for NDT of aerospace materials, NDT&E International 70 (2015) 41–52
- [5] U. Ewert, U. Zscherpel, K. Bavendiek, Strategies for Film Replacement in Radiography - a comparative study -, PANNDT 2007, 22nd-26th Oct. 2007, Buenos Aires, Argentina, <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/142.pdf>
- [6] EU project "FilmFree", reference number - FP7-SME-2007-1-GA-222240, <http://www.filmfree.eu.com>, 2005-2009
- [7] U. Zscherpel, U. Ewert, S. Infanzon, N. Rastkhan, P. R. Vaidya, I. Einav, S. Ekinci, Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits in Pipelines: Results of an IAEA Co-ordinated Research Programme, 9th European Conference on NDT Berlin, Proceedings, <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Mo.2.4.1.pdf>
- [8] U. Zscherpel, Y. Onel and U. Ewert, Corrosion Inspection of Pipelines by Digital Industrial Radiology (DIR), NDT net Publ., 2002, <http://www.ndt.net/article/v07n02/zscherp/zscherp.htm>
- [9] M. Turnbow, Impl. of Computed Radiography at Tennessee Valley Auth. Nuclear Power Plants, Present. at IAEA, Vienna, 2005
- [10] U. Ewert, Upheaval in Industrial Radiology, 8th European Conference on NDT – 2002 - Barcelona (Spain), June 17-21, 2002, Proceedings, <http://www.ndt.net/article/ecndt02/414/414.htm>
- [11] R. Venkatachalam, V. Manoharan, C. Raghu, V. Vedula, D. Mishra, Performance characterization of amorphous silicon digital detector arrays for gamma radiography, 12th A-PCNDT 2006 – Asia-Pacific Conference on NDT, 5th – 10th Nov 2006, Auckland, New Zealand, <http://www.ndt.net/article/apcndt2006/papers/10.pdf>
- [12] T. Schulman, Si, CdTe and CdZnTe radiation detectors for imaging applications, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, University of Helsinki, Finland on the 19th of June 2006
- [13] CdTe-DDA, ACORAD, www.acorad.co.jp/us/flatpanel01.html
- [14] CdTe-DDA, AJAT, http://www.ajat.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=34&Itemid=43
- [15] Photon counting, energy discriminating detectors, www.widempix.cz/products/, medipix.web.cern.ch/medipix/, www.dectris.com/, www.esrf.eu/UsersAndScience/Experiments/CRG/BM02/detectors/xpad, www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/kommunikation/publikationen/annual_reports/jb2015/23_L100_X-Ray_line_detector_for_fast_in-line_applications.pdf
- [16] M. Wermes, Pixel detectors for particle physics and imaging applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 512 (2003) 277–288
- [17] Photon counting detector for X-Ray applications until 300 kV: <http://xcounter.com/>
- [18] U. Ewert, B. Redmer, D. Walter, K. Thiessenhusen, C. Bellon, P. Nicholson, A. Clarke, K. Finke-Härkönen, J. Scharfschwerdt, K. Rohde, X-Ray Tomographic In-Service-Testing of Circumferential Pipe Welds - The European Project TomoWELD, 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016), 13-17 June 2016 in Munich, Germany, <http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/we3d5.pdf>
- [19] C. Ullberg, M. Urech, et al., "Measurement of a Dual-Energy Fast Photon Counting CdTe Detector with integrated Charge Sharing Correction", Proc. SPIE 8668, Med. Imaging 2013
- [20] M. Tartare, V. Rebuffel, et al., "Dual and Multi-energy Radiography for CFRP Composites Inspection"; Proc. 11th ECNDT, 2014, Prague, Proceedings http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/424_Rebuffel_Rev1.pdf
- [21] L. Lehmann, R. E. Alvarez, "Generalized image combinations in dual KVP digital radiography", Med. Phys. 8(5), 659 – 667, 1981.
- [22] U. Ewert, U. Zscherpel, K. Heyne, M. Jechow, K. Bavendiek, Image Quality in Digital Industrial Radiology, Materials Evaluation, Vol. 70, No.8, pp 955-964.
- [23] K. Bavendiek, U. Heike, W. D. Meade, U. Zscherpel, U. Ewert, "New Digital Radiography Procedure Exceeds Film Sensitivity Considerably in Aerospace Applications" 9th ECNDT, Berlin, NDT.NET, www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Th.3.2.1.pdf
- [24] W. Heitler, The quantum theory of radiation, 3rd ed., Oxford University Press: London, 1954.
- [25] Lou Wainwright, Three Different Approaches to Bx Imaging, presentation at NASA 2/29/12, https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/62834main_4A-1Wainwright.pdf
- [26] R. H. Bossi, K. D. Friddell, and J.M. Nelson, "Backscatter X-ray Imaging," Mater Eval, vol. 46, pp. 1462-67, 1988.
- [27] H. Strecker, "Scatter imag. of aluminum castings using an X-ray fan beam and a pinhole camera," Mat. Eval., (40), 1050-1056, 1982.
- [28] G. Harding, J. Kosanetzky, "Scattered X-ray Beam Nondestructive Testing," Nucl Instrum Meth A, vol. 280, pp. 517-28, 1989.
- [29] G. Harding, E. Harding, "Compton scatter imaging: A tool for hist. exploration," Appl Radiat Isotopes, vol. 68, pp. 993-1005, 2010.
- [30] Backscatter systems of NUCSAFE, <http://www.nucsafe.com/cms/Backscatter+Radiography/79.html>
- [31] Volodymyr Romanov, Victor Grubsky, Eric Burke, Compton Imaging Tomography for NDE of Spacecraft Thermal Protection Systems, 43rd Review of QNDE, July 17th-22nd, Atlanta, GA, USA, under publication.
- [32] Sanjeevareddy Kolkoori, Norma Wrobel, Uwe Zscherpel, Uwe Ewert, A new X-ray backscatter imaging technique for non-destructive testing, of aerospace materials, NDT&E International 70 (2015) 41–52.
- [33] S. Kolkoori, N. Wrobel, K. Osterloh, U. Zscherpel, and U. Ewert, "Novel X-ray backscatter technique for detection of dangerous materials: Application to aviation and port security," J Instrum, vol. 8, pp. 1-18, 2013.
- [34] K. Osterloh, U. Ewert, and H.J. Knischek, Blende für eine bildgebende Einrichtung, Patent DE 10 2005 029 674. 2008, Germany
- [35] S. Kolkoori, N. Wrobel, U. Zscherpel, U. Ewert, New X-ray Backscatter Imaging Technique for Nondestructive Testing of Aerospace Components, 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague 2010, Oct 6-11, presentation, http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/150_Kolkoori.pdf
- [36] Frank Wieder, Uwe Ewert, Carsten Bellon, Gerd-Rüdiger Jaenisch, Justus Vogel, A novel multi slit x-ray backscatter camera based on synthetic aperture focusing, 43rd Review of QNDE, July 17th-22nd, Atlanta, GA, USA, under publication.
- [37] G. Jaenisch, S. Kolkoori, C. Bellon, Quantitative Simulation of Back Scatter X-ray Imaging and Comparison to Experiments, 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016), 13-17 June 2016 in Munich, Germany, <http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/we3g4.pdf>
- [38] Modelling software package CIVA, <http://www.civa.cea.fr/en/>
- [39] Modelling software package aRTist, <http://www.artist.bam.de/>
- [40] Modelling software package XRSIM, <http://www.artist.bam.de/>
- [41] Modelling software package Scorpius XLab, <http://www.vision.fraunhofer.de/de/technologien-anwendungen/projekte/roentgen-technik/scorpius.html>
- [42] C. Bellon, G. Jaenisch, A. Deresch, Combining Analytical and Monte Carlo Modelling for Industrial Radiology, 19th World Conf. on NDT (WCNDT 2016), Munich, Germany, www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/fr1h1.pdf

Philippe Rioux^{1*}, Jonathan Turcotte¹, Philippe Cyr²¹Sonatest AP, Quebec City, Canada²Eclipse Scientific Inc., Quebec City, Canada

True advancements for longitudinal weld pipe inspection in PA

Prawdziwy postęp w inspekcji spoin wzdłużnych wykonanych w pozycji PA na rurach

ABSTRACT

Phased Array inspection of curved parts brings some real technical challenges. Evaluation of seam welds on small diameter and heavy wall pipes is difficult to accomplish using actual tools that, most of the time, are based on a flat surface model. This often leads to erroneous and imprecise flaw location and sizes. Furthermore, interpretation of the S-Scans becomes very difficult in these circumstances. Trying to take into consideration the effect of the convex surface reflection is something the current instrument imagery is not taking into account and is very difficult for the operators to correct themselves. The typical tools like presenting an overlay of the weld just can't be used in a practical way. This paper presents a totally new approach of inspecting seam welds and more generally curved parts. The novel method rethinks almost all aspects of the traditional implementation. Starting from an original focalisation of beams that allows the technician to define specific focal points in a zone of interest. As well, we describe how the live data is represented in a 3D scan plan in order to facilitate interpretation and identification of flaws. Corrected A-Scan views are also produced, allowing to perform accurate measurements. We finally touch on how to calibrate the instrument prior to performing these inspections on curved surfaces.

Keywords: Longitudinal Seam Weld, Phased Array, Curvature Correction, Pipeline, Weld

Introduction

Longitudinal welded pipes are manufactured according to different specifications and with various wall thicknesses. These products are utilized in a number of diverse industries and are quite frequently used, would it be for power plant construction, water supply, nature gas and petroleum transport.

As for other welded parts, these pipes need to be inspected for defects, both at the time of manufacturing and for maintenance purposes. Using phased array (PAUT) for flaw detection poses numerous problems, as the contact surface is curved. Moreover, not only the outside diameter (OD) causes some difficulties for the interface, the inside diameter (ID) will reflect each beam of the S-Scan at changing angles, as the reflection comes from a convex surface.

From our experimentation, we were able to conclude that the usual PAUT imaging was a less appropriate model to use in the case of curved surfaces because of beam divergence. This beam spread is obviously due to the curved OD interface but mostly to the convex ID reflection. In the end, this namely influences:

- the spatial coverage or acoustic density in the zone of

STRESZCZENIE

Badania metodą Phased Array elementów zakrzywionych stanowią techniczne wyzwanie. Ocena wzdłużnych połączeń spawanych rur o małych średnicach oraz o dużych grubościach ścianki jest trudna do zrealizowania za pomocą aktualnie popularnych narzędzi, ponieważ są one dedykowane głównie do powierzchni płaskich. To często prowadzi do błędnej oceny lokalizacji i rozmiaru wad. Ponadto w tych warunkach prawidłowa interpretacja S-skanów jest bardzo trudna. Próby brania pod uwagę korekty efektu odbicia od wypukłej powierzchni nie są zazwyczaj skuteczne i trudne do stosowania przez operatorów. Typowe narzędzia pozwalające nakładanie na ekran szkicu przekroju złącza są zupełnie niepraktyczne.

Ten artykuł przedstawia zupełnie nowe podejście do badania szwów na rurach lub bardziej ogólnie na elementach zakrzywionych. Ta nowa metoda zmienia wszystkie aspekty tradycyjnego wdrożenia. Począwszy od ogniskowania wiązki, które pozwala inspektorowi definiować szczególne punkty w obszarach istotnych ze względu na cel badania. W dalszej kolejności pokazuje plan skanowania w 3D wraz z rzeczywistymi i chwilowymi wskazaniami (live data) w celu interpretacji i identyfikacji wad. Generowane są również obrazy A-skan, które umożliwiają ocenę i dokładne pomiary. Trzeba podkreślić, że końcowy wynik inspekcji zależy od prawidłowego skalowania i dlatego ten problem jest zauważony i realizowany również przez oprogramowanie aparatu.

Słowa Kluczowe: spoina wzdłużna, Phased Array, korekta krzywizny, rurociąg

interest;

- the precision of the beam focusing;
- the interpretation of data and imaging in S-Scans and A-Scans;
- the measurements accuracy;
- the calibration methods.

1. Theory

1.1 Geometry Challenge

Nowadays, displaying a PAUT S-Scan with an overlay representing the weld is common, broadly used and widely accepted. This is a great aid in order to locate echoes produced by the part geometry itself or by potential flaws. This approach is simple and easy to understand because the reflections are coming from a flat surface, hence producing a perfect reflection as the one produced by a flat mirror.

In the case of flat surfaces, the skips of the sound path are dealt with by representing the weld overlay as a series of folded images. In the case of a curved surface, this method is more challenging to use, as the reflected image formed by the convex surface is distorted. An alternate representation would instead use the profile of the part, and draw folded beams, taking into account the specific reflection angle of each beam. Figure 1 visually shows these expected behaviours.

*Corresponding author. E-mail: riouxp@sonatest.com

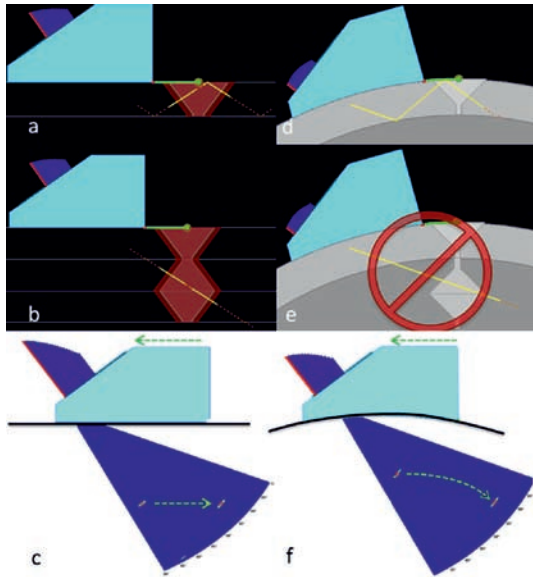


Fig. 1. Showing important differences between curved and flat surfaces imaging: a) real sound path in the flat part; b) unfolded representation of the sound path (same as image a) – as usually represented on instruments); c) the way an indication will “travel” in the S-Scan when the probe is moved backwards on a flat part; d) real sound path in the curved part; e) invalid representation of the sound path when using an unfolded overlay on a curved part; f) the way an indication will “travel” in the S-Scan when the probe is moved backwards on a curved part

Rys. 1. Ważne różnice w zobrazowaniu dla powierzchni zakrzywionych i płaskich: a) rzeczywista droga wiązki w elemencie płaskim; b) uproszczony przebieg wiązki (taki sam jak a), ale bez odbić – często pokazywany w aparatach); c) “przemieszczanie się” wskazania dla S-skanu podczas przesuwu głowicy do tyłu po płaskiej powierzchni; d) rzeczywista droga wiązki w elemencie zakrzywionym; e) nieprawidłowy obraz drogi wiązki z powodu nieaktualnego uproszczenia dla elementu zakrzywionego; f) “przemieszczanie się” wskazania dla S-skanu podczas przesuwu głowicy do tyłu po powierzchni zakrzywionej

1.2 Beam Resolution versus Convex Surface

It shall also be understood that the beam spread, and hence the angular resolution, will greatly vary depending of the diameter of the part. For a reduced diameter pipe, the angular resolution in the second leg is significantly and unevenly reduced, lowering the spatial coverage, which may result in poor probability of detection. The smaller the diameter of the pipe, the larger the inter-beam distance in the second leg. Moreover, after the first reflection, the beams’ energy density is also decreased due to this convex lens effect. For the same reasons, when producing focal laws using the traditional constant path focus method, the focusing points are affected, decreasing the image sharpness.

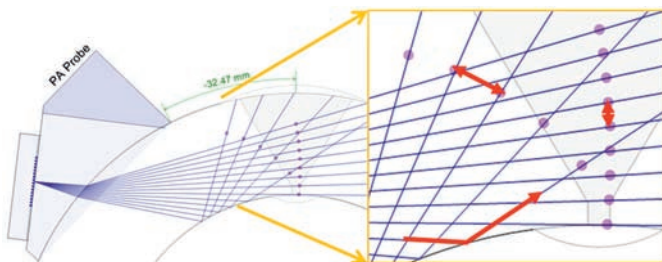


Fig. 2. Effect of ID reflections
Rys. 2. Efekt odbicia od wewnętrznej średnicy rury

2. Proposed Approach

2.1 Using the Part’s True Representation

The new approach uses a true representation of the curved part. By using the main characteristics of the pipe, a precise illustration of the part’s profile is drawn. Then, employing a ray tracer, a correct illustration of the beams is achieved, both in the first and consecutive skips, taking into account a different reflection angle for each beam. The above tools allow the technician to assess full coverage of the zone of interest is achieved. By offering these tools directly on the instrument, the inspection’s configuration and required adjustments can be performed live, as needed.

2.2 Focal Law Calculations

As mentioned above, the convex nature of the part causes the S-Scan beams to diverge, reducing the beams’ spatial density in the second leg. Of course, this can be compensated by increasing the angular resolution of the S-Scan. Yet, this does not guarantee a known spatial resolution in the zone of interest, most often the weld itself.

A better methodology would be to define the required spatial resolution of the beams in the region of interest, and use this parameter as a key input to the focal law calculator. It consequently ensures a proper coverage of the beams, with a known spatial resolution, totally independent of the curvature of the ID.

Interestingly enough, this method would be applicable in all circumstances. For example, for a flat specimen, in the case of longer sound path, the exact beam density might be difficult to figure out or calculate. By defining focus points with a specific spatial resolution, the focal law engine automatically provides effective coverage and beam density, as shown in figure 3. Here again, all tools required to define the spatial resolution, specify the focus points and calculate all resulting focal laws are embedded in the instrument for maximum flexibility.

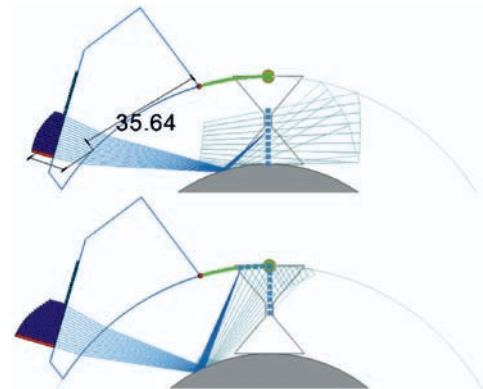


Fig. 3. The complete S-Scan is made of 2 parts: direct and reflected beams. Note that the angular resolution of both has to be different in order to produce a 1mm constant resolution pattern

Rys. 3. Całkowity S-skan składa się z 2 części: wiązki padającej bezpośrednio i po odbiciu. Trzeba zauważyć, że kątowa rozdzielczość będzie inna dla obu przypadków, ponieważ wybrano w programie stałą rozdzielczość 1mm

3. Data Interpretation

3.1 S-Scan

The basic sectorial scan will remain the same in the way it will be displayed. On the other hand, it shall be noted that the depth

scale (usually the vertical scale) cannot be shown since, above the fact it is not linear, it is different for each beam of the scan. Again, this is a result of the curvature of the part. As an example, figure 4 below shows that for beam number 2, the depth to path distance equation is non-linear.

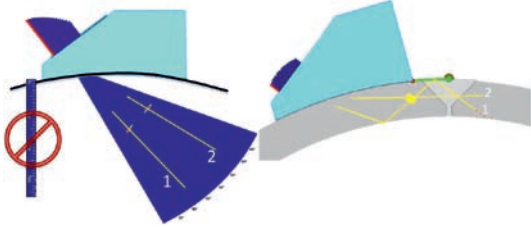


Fig. 4. Sectorial Scan view showing depth ruler not applicable
Rys. 4. Obraz skanu sektorowego (S-skan) pokazuje nieaktualną linijkę głębokości

When using the standard sectorial scan on curved surfaces, it is also more challenging to interpret the position of the echoes that are revealed. The analogy of the distorted image produced by a convex (or concave, as a matter of fact) mirror applies. For one to be able to correctly interpret positions in the S-Scan taking into account the effect of the convex bottom of the part would require remarkable cognitive abilities.

3.2 A-Scan

In the case of the A-Scan, the rulers need be adjusted. In depth mode, the ruler's scale is specific to each A-Scan. Of course, the sound path ruler remains standard. Additionally, the surface distance needs be calculated properly, taking into account the circumference. This allows to physically spot the indication properly. Refer to figure 5, below. Note that the different legs in the A-scan view are separated by a vertical dashed line.

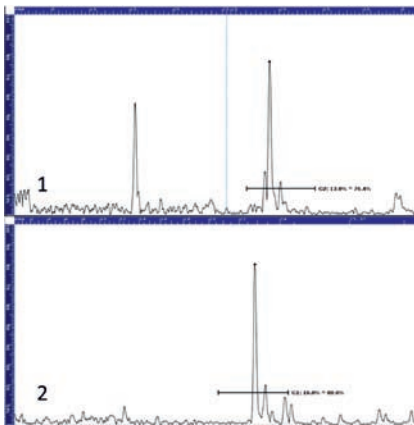


Fig. 5. A-scan #1 refers to beam #1 in figure 4 and A-Scan #2 to beam #2
Rys. 5. Obraz 1 typu A odpowiada wiązce 1, a obraz 2 wiązce 2 z rys. 4

3.3 3D View with Ray Tracing

As a complement to the A-scan, the 3D view renders the specimen. It also shows the beam extractor(s) from the S-Scan. That is, the selected beams are represented in the part using the embedded ray tracer. The ray tracing also highlights the gates defined in the A-Scan, displaying these at the proper distance(s) in the sound path. The triggering point's exact position is also rendered and appears at the correct location in the part's model.

Hence, by establishing a direct link between the S-scan and the 3D view, the instrument provides invaluable help to the user. Echoes, and namely flaws, could be located much more easily and with confidence. An example of the 3D view is presented in figure 6.

4. Results Presentation

4.1 Effect of Focusing Method

The experimentations conducted showed that the traditional focusing method (constant path) was perfectly usable and not greatly affected by the curved ID. This is mainly related to the fact that the limited number of active elements provide a much greater depth of field. On the other hand, additional results confirmed that a focusing degradation was noticeable using more than 22 elements.

As well, scans performed with 32 elements, producing a shallow depth of field, we providing poor image quality. In that case, the advantage of the new focusing method presented earlier is obvious. Figure 6 presents the results obtained.

On the other hand, it is sometimes desirable not to focus, namely in the case of huge volume inspection. This "steer only" scan guarantees a large depth of field and a constant energy distribution along the beam. This focusing method has also been implemented for completeness, as it addresses different needs.

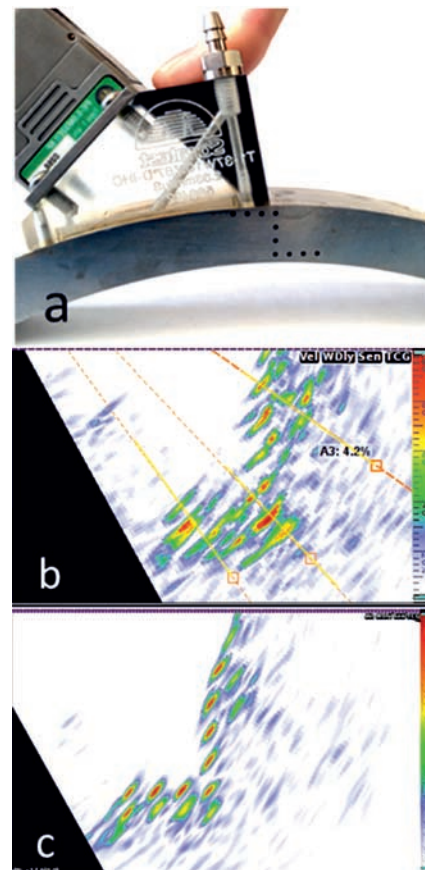


Fig. 6. Comparison of conventional method of focusing and new method proposed. Using 32 active elements: a) demo block used; b) constant path focusing pattern; c) constant resolution focusing

Rys. 6. Porównanie konwencjonalnej i proponowanej, nowej metody ogniskowania. Użyto 32 elementy aktywne: a) użyty wzorec demo; b) ogniskowanie dla stałej drogi wiązki; c) ogniskowanie dla stałej rozdzielczości

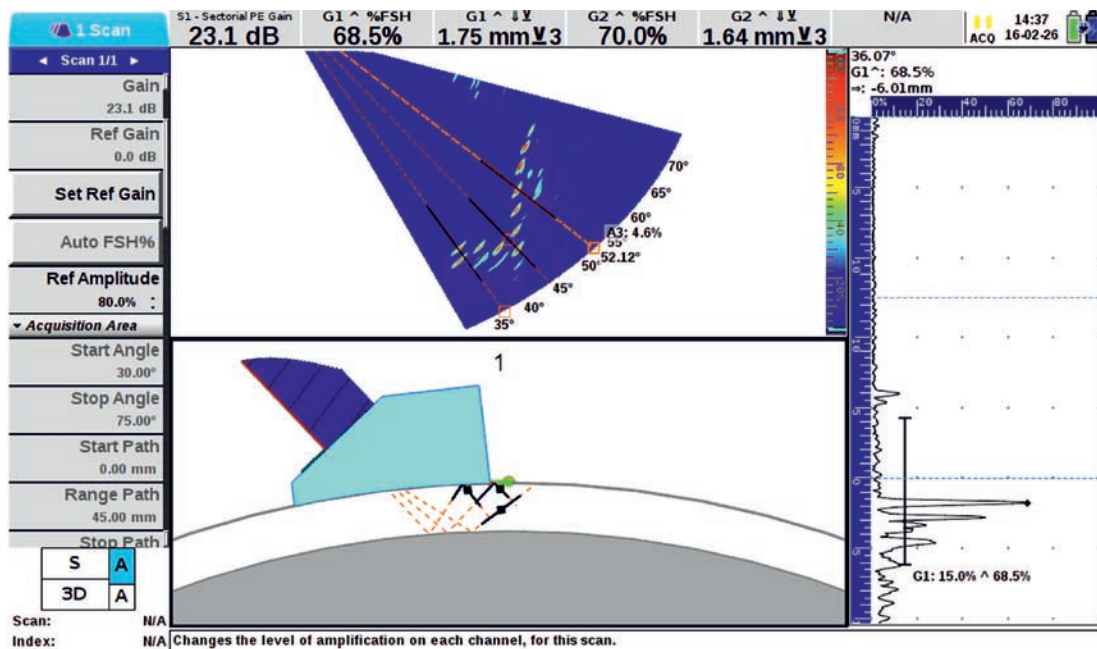


Fig. 7. Recommended Acquisition Layout; ID indication on the A-scan and Confirmed in the 3D View
Rys. 7. Zalecany układ obrazowań podczas rejestracji; wskazanie na obrazie typu A i potwierdzenie w 3D

4.2 Complete Layout of Data

The acquisition layout implemented, as presented in figure 7, should ease the interpretation of the seam weld inspection data. The different views complement each other. The S-scan offers a general view of the data that is being recorded. The A-scan displays the amplitude at one specific angle and offers a depth ruler. Quick measurements such as percentage full screen height (%FSH), true depth, surface path, sound path are available. The 3D view gives the ray tracing corresponding to the extractors shown in the S-Scan.

5. Calibration Method

The usual techniques to calibrate velocities and delays remain the same. Calibration using a radius gives very accurate results. Notches and SDH calibration are nonetheless possible, yet not as good as the previous method.

It is actually a different story in the case of the DAC/TCG calibrations. The quality of the calibrated or corrected curves is improved when a curved version of Navships test block is used. The number of points for each half skip makes the DAC more precise as this helps to better consider the curvature. The 3-point calibration using bottom and top notch in a pipe is the minimum acceptable in the industry. The closest sound path datum is direct, the second comes from the inner rebound, and the third is produced by both the inner and outer reflexions. This means that to cover a full skip, up to 6 DAC/TCG points shall be obtained and recorded. Nine-point calibration shall be quite common, considering many of the pipes will present a limited thickness.

Please note that at the time of writing this paper, the exact and optimal calibration technique was not yet determined.

6. Conclusion

In this paper, a method to improve the PAUT inspection of seam welds was presented. This approach is in fact applicable more generally to any curved surface component. The proposed practise namely offers a proper coverage of the region of interest, by guarantying accurate focus at predefined points. Moreover, the distance between these defined positions define the beams' spread, insuring a sufficient beam density, hence providing a known spatial resolution.

As the interpretation of the S-Scan in the second and third leg proves to be quite challenging by the nature of the part producing a distorted reflection, it was also shown that by using a true representation not only helps define the coverage, but also can be used to visualize more easily the location of defects. By representing specific A-Scans associated to the S-Scan extractors, and by displaying the gates and gate trigger exact position, the 3D view provides an additional and valuable interpretation tool.

Experimental results have shown that the method provides accurate and precise measurements. These tests have been conducted on a number of parts with different diameters and wall thicknesses. At the time of writing, real life testing, in the field, is just to begin and the final calibration strategy shall also be determined.

Finally, as the concept shall also include the proper calibration methods, it is believed to potentially comply with industry standards, like ASME V as an example.

7. References

- [1] GINZEL, Ed, To Focus or Not To Focus, ndt.net forum discussion topic, August 2015

Przenieś swoje Badania wizualne w nowy wymiar z Mentorem Visual IQ

Zaawansowane wideo boroskopy umożliwiają inspektorom wykrywanie, pomiar oraz analizę nieciągłości przy pomocy 3-wymiarowych modeli, oraz współdzielenie tych obrazów i danych z odległymi ekspertami. Dokonuj pomiarów na zarejestrowanych obrazach i weryfikuj na prezentowanym równoległym modelu 3D.

Pomiar Fazowy 3D - opatentowana technologia wykorzystująca projekcję wzorca oraz analizę przesunięcia fazowego w celu generowania 3-wymiarowego modelu badanego obszaru. Doskonałej jakości, pełnoekranowy obraz z możliwością pomiaru w dowolnym momencie, bez konieczności wymiany obiektywów, zapewnia wiarygodne wyniki badań. Dostępne na sondach o średnicy 6,1 mm.

Pomiar Stereo 3D - połączenie opatentowanej technologii pomiaru stereo z zaawansowanymi algorytmami analizy obrazu do generowania 3-wymiarowych modeli badanych powierzchni. Sprawdzaj uzyskane wyniki pomiarów na prezentowanym równoległym modelu 3D.

Podjmij trafniejsze decyzje z 3-wymiarowym modelem.

Pomiary w oparciu o 2-wymiarowe, płaskie obrazy w tradycyjnej technologii stereo lub cienia, mogą prowadzić do kosztownych pomyłek. Pomiar Fazowy lub Stereo 3D, dostępne tylko w urządzeniach GE serii Mentor Visual IQ, generują pełny 3-wymiarowy model obserwowanej powierzchni. Ten 3-wymiarowy model, wraz z umieszczonymi na nim punktami pomiarowymi, może być obracany i obserwowany pod różnymi kątami, minimalizując ryzyko pomyłek, umożliwia podjęcie optymalnej decyzji.



technologia badań wizualnych
Everest
Polska



Channel Partner
GE Oil & Gas

Everest Polska Sp. z o.o.

ul. Geodetów 176, 05-500 Piaseczno k. Warszawa
tel. (+48 22) 750 50 83, faks: (+48 22) 750 70 21
email: everestvit@everestvit.pl, www.everestvit.pl

Wybierz właściwy, dla Twojego badania, typ pomiaru.



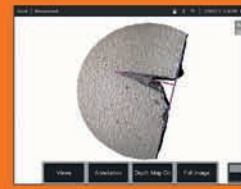
Długość

- Prosty pomiar wielkości uszkodzeń lub elementów
- Długość pęknięcia
- Zmiana wielkości komponentu w wyniku odkształcenia lub erozji/korozji/ zużycia
- Ocena wielkości wskaźników zużycia
- Położenie uszkodzenia na badanej części



Punkt do linii

- Uszkodzenia krawędzi łopatek turbin
- Szerokość przerwy
- Szerokość spoiny
- Brakujące krawędzie łopatek



Multi-Segment

- Całkowita długość pęknięcia
- Długość zapolerowania łopatki lub określenie kąta wejścia
- Pomiar odległości na powierzchniach nieregularnych lub zakrzywionych, dokładniejsze niż przy użyciu prostego pomiaru długości



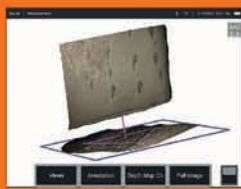
Obszar

- Brzegi łopatek
- Uszkodzenia powłoki
- Powierzchnia wierzchołków lub korozji
- Zakres wpływu FOD



Głębokość

- Pomiar luzów wierzchołkowych
- Zagłębienia lub wżery korozyjne, erozyjne lub wpływu FOD
- Wewnętrzna średnica rury
- Wysokość spoin
- Kamień na stojanie
- Szerokość przerwy



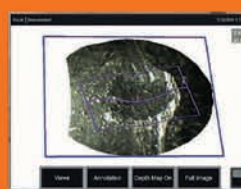
Profil głębokości

- Głębokość ubytków korozyjnych lub zagłębień erozyjnych
- Głębokość uszkodzeń z powodu rury
- Wysokość spoiny lub głębokość rys, rowków, nacięć
- Szybka ocena kształtu powierzchni



Profil obszaru głębokości

- Korozja, erozja i wżery
- Szkody spowodowane FOD
- Maksymalna wysokość spawu
- Maksymalna głębokość bruzdy



Płaszczyzna pomiarowa

- brakujące narożniki łopatek - z pomiarem Obszaru
- uszkodzenia krawędzi łopatek - z pomiarem Punkt do linii
- pomiar luzu wierzchołkowego - z pomiarem Głębokości
- pomiar małych elementów - z pomiarem Długości lub Punkt do linii
- analiza wielkości zagłębień - z Profilem obszaru głębokości



Terry Clausing*

Drysdale & Associates, Inc., USA

Thermography – Past, Present and Future

Termografia - przeszłość, teraźniejszość i przyszłość

ABSTRACT

Infrared thermography is one of the fastest growing inspection techniques nowadays. This article provides an overview of the existing equipment solutions on the market of infrared thermography. It also presents the latest announcements of new products and points the path of future development of this technology.

Keywords: thermography, development, thermographic camera

STRESZCZENIE

Termografia podczerwono to jedna z najszybciej rozwijających się dziś technik inspekcyjnych. W artykule tym przedstawiono przegląd istniejących na rynku rozwiązań sprzętowych stosowanych w termografii podczerwonej. Zaprezentowano także najnowsze zapowiedzi nowych produktów oraz przedstawiono ścieżkę przyszłego rozwoju tej technologii.

Słowa Kluczowe: termografia, rozwój, kamera termograficzna



Terry Clausing

1. Perspective from the past

The technology of infrared thermography has evolved greatly since Sir William Herschel discovered infrared radiation in 1800. While Sir Herschel did discover infrared energy, and he used a thermometer to identify it, he did not discover how to measure it. That credit goes to Max Planck who developed the blackbody equations for the measurement of infrared radiation. The most important point of this is to understand that infrared cameras do not measure temperature; they measure radiosity: a visualization of the distribution of infrared radiation that is received by the camera's detector. Thermography requires knowledge of the electromagnetic spectrum and the relationship between heat, electromagnetic wavelengths and their interaction with varying materials.

The difficulty of using infrared cameras is generally blamed on emissivity. Emissivity is the ratio of the quantity of infrared radiation emitted by a material to the amount emitted by a perfect emitter, that is, by a blackbody. The most significant problem with using infrared cameras is usually the user's lack of technical knowledge of how materials interact with infrared radiation. This ignorance is reinforced by television and movies portrayal of infrared cameras defying the laws of physics. The problem is that the viewing public has no basis for understanding that many of these portrayals are fiction. Infrared cameras can not see thermal images of people through the walls of buildings. Infrared cameras are powerful tools when used by people with the proper knowledge and training. To illustrate this point, consider a well known powerful tool, a stethoscope. A doctor's stethoscope is fairly inexpensive, only about \$250. It is a simple instrument to use, yet it requires a great deal of knowledge and training in order to interpret the sounds. Just as I want a trained professional interpreting the sound of my heart with a stethoscope, I want a trained professional interpreting the images produced by an infrared camera. In the not too distant past, infrared cameras were large and very expensive. A high performance system only 15 years ago cost in the range of \$25,000 to \$50,000 or more. It would often require

a day of preparation in order to use the infrared camera system the following day. The typical system included liquid nitrogen, large heavy batteries, an array of electronic instruments and computer equipment all on a rolling cart. Most of today's infrared cameras are handheld and use long wavelength uncooled microbolometers, developed in 1995, replacing most of the liquid nitrogen cooled detectors. The dominant characteristics of today's infrared camera are the size of the detector array as measured in pixels, and its thermal sensitivity. A simple infrared camera benchmark could be characterized by a 320x240 pixel detector and a thermal sensitivity of about 80-100 mK. These were then, and still are today, higher performance characteristics. The distinction is relevant. Infrared thermographic technology is becoming more specialized and more general at the same time.

2. Present Perspective: specialized applications

By specialized, I refer to technological advances in our understanding and application of the detection in the infrared portion of the electromagnetic spectrum. One of the most advanced examples is the development of gas imaging cameras for identifying fugitive gases.

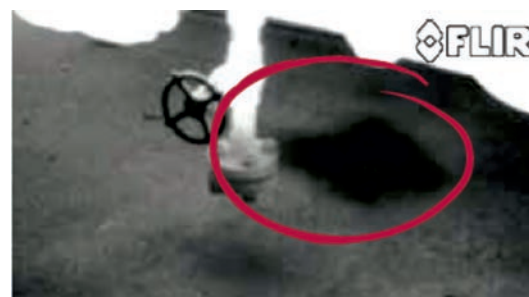


Fig. 1. Captured gas leak from production site
Rys. 1. Wykryty wyciek gazu w instalacji linii produkcyjnej

These infrared cameras blend the spectral characteristics of specific gases with their detectable thermal characteristics. In simple terms, specific gases absorb radiation at certain specific wavelengths. So by observing specific wavelengths where the gases absorb, the infrared camera system is able to produce a visual image of the thermal image of the gas. Different gases have different spectral characteristics, so it is not possible to detect all fugitive gases with a single detector. Several cameras are produced with different detectors, each with the ability to "see" certain specific gases. And these instruments have the added utility of being able to be used for traditional infrared inspections as well.

In exactly the same way, infrared cameras are available with a wide range of detectors and filters for specific materials and applications.

*Corresponding author. E-mail: terryc@virtualspectrum.com

Glass is an example of a material that is familiar to nearly everyone but one that has very unique spectral characteristics. Glass is commonly thought of as being transmissive, that is, light passes through it. This is true in the 0.4 – 0.7 microns wavelength where we see, but glass is also very reflective at certain wavelengths and is totally opaque at other specific wavelengths.

What we find from the spectral characteristics is that if we are working with a glass manufacturing company and it is important to accurately measure the temperature of the glass, then it is essential to use the wavelengths where the glass is opaque and not transmissive or reflective, approximately 4.8 – 5.2 microns. We find that it is essential to understand how the wavelengths of radiation affect the detectability of heat differently with different materials and processes.

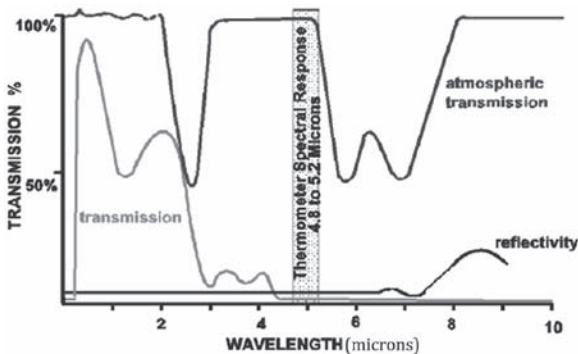


Fig. 2. Temperature measurement with infrared thermometers, Land, Inc.
Rys. 2. Pomiar temperatury przy użyciu termometrów działających w zakresie podczerwieni, Land, Inc.

So on one hand, we must have a detailed knowledge of the detectability of heat in various materials. We also need to understand the nature of heat and how it moves in various materials.

Another specialized infrared technique, based on this understanding, is flash thermography. This technique is broadly applied to inspecting composite materials for defects such as disbonds and voids. The materials used for composite materials are often thermally opaque and good thermal conductors. A pulse of heat is applied to the composite material and the surface is monitored with the infrared camera. We are interested in mapping the rate of change of temperature at the surface. Composite materials would have a uniform rate of thermal conductance in a homogenous material. When a delamination or void occurs, this anomaly is a resistance to the rate of thermal conductance. So mapping the rate of change of temperature at the surface can reveal subsurface defects such as delaminations and voids that would not be detectable with xray.

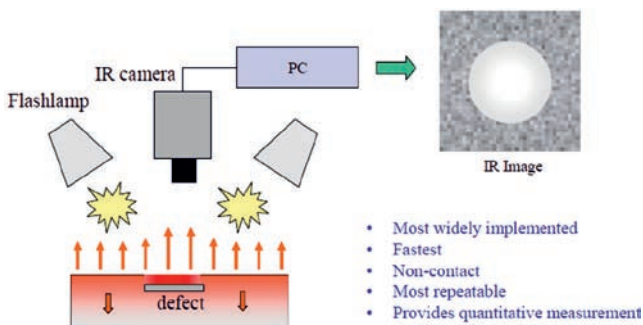


Fig. 3. Thermal Wave Imaging
Rys. 3. Obrazowanie fali cieplnej

The point is that infrared thermography is truly becoming a mainstream technology with wide applications in many industries. The

expansion of the use of infrared has been driven by advances in our understanding of the behavior of heat and our ability to measure radiosity. We are on the cusp of a technological revolution in the application of infrared technology. Two years ago, Flir surprised the entire industry with the introduction of the Flir One: a very small 8-14 micron infrared camera designed to utilize the processing capabilities of our smart phones, turning any smart phone into a real infrared camera. The Flir One combines all the standard features of a smart phone and features a 160x120 pixel detector and thermal sensitivity of about 100mK. And in addition to its performance specifications, it has a price of only \$249. About the same price as the doctor's stethoscope! I point out the technical specifications and the price because the combination of these factors determines the adaptability of the device to applications that were previously impractical due to size, performance and cost limitations.

This year we have seen two additional and similar advances. Seek Thermal introduced their SeekIR CompactPro: another small infrared camera that utilizes the processing capability of the smart phone, featuring a 320x240 pixel detector, 70mK thermal sensitivity, and at a price of \$499. This camera takes another substantial step forward as it meets the benchmark for a serious higher performance infrared camera in an even smaller package. The SeekIR CompactPro is designed for a more serious user. It includes added capabilities such as selectable emissivity settings, an adjustable lens for sharp focus, and on-screen apparent temperature measurement indications. It also includes on-screen level and span adjustability and isotherms to aid in analyzing thermal patterns. This camera is the perfect companion for those who are serious about wanting professional results such as investigating energy efficiency in buildings, detecting water intrusion in building materials, locating electrical problems and much more.

The other product introduction this year is from i3systems, Inc: the Thermal Expert infrared camera. Similarly using the capability of the smart phone, and featuring a 384x288 pixel detector and 50mK thermal sensitivity, it is priced at \$995. Like the SeekIR CompactPro, the Thermal Expert takes another substantial step forward. The Thermal Expert is designed for a more sophisticated and serious user. Where the CompactPro allows you to select emissivity settings of .3, .6, .8 and .95, the Thermal Expert allows any emissivity value from 0.01 to 1.00 which allows you to correct accurately for temperature measurements. The Thermal Expert features the option of 2 interchangeable and adjustable lenses to better match your needs.

While the other "smart phone infrared cameras" are tied to the phone (or tablet), the Thermal Expert goes beyond. Software is included for post processing saved infrared images and producing reports. And an MS Windows application is available for live interface directly to the Thermal Expert infrared camera.

3. The Future

The newest introduction to the smart phone product category is i3system's new VGA Thermal Expert, featuring a 640 x 480 pixel detector, 50mK thermal sensitivity, and 4 interchangeable and focusable lenses. The introduction is planned for October 2016. This newest camera, with an introductory price of \$3,500 rivals high-end cameras costing \$10,000 and more.

Infrared technology will continue to become more powerful, smaller and even lower in cost. And as the price/performance curve advances, the applications for the technology are expected to advance at an increasing rate. The point of including the price of these instruments is that the single greatest attribute of nondestructive testing and condition monitoring is value. With the tremendous reductions in cost of this highly sophisticated instrumentation, and its practical convenience, infrared cameras will become as common to the NDT and Condition Monitoring professionals as the stethoscope is to a doctor or a digital multi-meter is to an electrician.

Neil R. Pearson¹, Steven Marshall¹, Wayne Woodhead¹, Alan Ashton², Radosław Boba^{3*}

¹Swansea Enterprise Park, Swansea

²Dubai, United Arab Emirates

³Jaworzno, Poland

Use of water immersion UT techniques to assist with data capture

Wykorzystanie technik zanurzeniowych UT dla optymalizacji akwizycji danych

ABSTRACT

Ascertaining the integrity of large steel structures such as storage tanks, pipes and vessels is a complex task. Silverwing (UK) Ltd have developed an inspection system based on a water immersion UT (ultrasonic testing) approach that can manage, present and generate reports for large volumes of data, from gigabytes to even terabytes that can be obtained from a single asset. This paper explores inspection efficiency at the data capture stage and shows examples towards illustrating how volumes of information is technically handled and how it can improve the efficiency of the overall inspection process, benefiting the inspection company, asset integrity engineer and asset owner.

Keywords: water immersion UT, tanks automated UT inspection, UT surface discrimination

STRESZCZENIE

Określenie stanu dużych stalowych elementów takich jak zbiorniki magazynowe, rurociągi oraz zbiorniki ciśnieniowe to złożone zadanie. Firma Silverwing UK LTD opracowała system inspekcji oparty na technice zanurzeniowej UT (badania ultradźwiękowe), który umożliwia akwizycję, zarządzanie danymi oraz generowanie raportów nawet dla bardzo dużych ilości danych, od gigabajtów do nawet terabajtów, otrzymanych podczas badania jednej instalacji. W artykule dokonano oceny wydajności inspekcji na etapie akwizycji danych oraz przedstawiono przykłady przetwarzania różnych ilości danych oraz sposoby optymalizacji procesu inspekcji, na czym zyskują zarówno firmy przeprowadzające inspekcję, inżynierowie odpowiedzialni za stan techniczny oraz właściciele elementów poddawanych inspekcji.

Słowa Kluczowe: systemy zanurzeniowe UT, zautomatyzowana inspekcja UT zbiorników, rozróżnienie powierzchni przy badaniach UT

1. Introduction

Several inspection standards which cover the maintenance of large assets frequently state that a relatively small collection of sparsely separated spot-measurements are needed to estimate its remaining life or the interval until the next inspection. The inspection of these large assets can be very time consuming and so a balance is normally derived between the time available to conduct the inspection and the level of measurements required to determine its condition.

Of course, the inspection time can be reduced by only targeting areas of the asset that are normally associated with corrosion, e.g. the product interface level in a storage tank. The complexity of the inspection of such assets is usually derived from a set of guidelines which the asset owner has adopted. EMMUA 159 [1] is one such guideline and by crude approximation, the recommended number of 10 mm² spot-measurements on a 15 m high shell wall of a storage tank 50 m in diameter would cover approximately 0.0012% of its surface. Unless prior information and location of the critical areas of corrosion is available, the likelihood of finding the corrosion is small. The most obvious improvement is to increase the number of spot-measurement, at the cost of time.

The likelihood of locating corrosion on these structures is highly dependent on the non-destructive testing (NDT) approach used. An automated process to collect spot-measurements can improve the positional accuracy but also increases the number

of measurements taken over a given area. With a suitable inspection tool setup, the condition of the internal and external surface, along with inclusions, blistering, dis-bonding of internal liners and even cracking can be found. The umbrella of inspection can arguably be divided into two stages, in-field data acquisition followed by reporting. The basis of this process is shown in Figure 1 beginning with the asset in its normal operating state. Once an inspection is deemed necessary, the two stage inspection process beings. Pending the results of the inspection, repair may or may not be necessary before the asset is re-commissioned (or decommissioned). During inspection the data acquisition and reporting stages can repeat several times, dictated by the analysis of the recorded measurements. This is usually a consequence of fine-tuning the inspection tool setup or deciding to hone in on an area of interest.

Primarily, focus towards driving the efficiency of the inspection process is given to the data acquisition stage by improving the physical speed of the scanner or by creating arrays of sensors to generate a colour coded 2D (X/Y) map of measurements (C-Scans) with one sweep.

It can be argued that the primary goal in this stage is to minimise the operator time in-field and limit the exposure to harsh environments. While such approaches usually result in improved efficiency, little focus is given to the reporting stage. With the ability to capture vast quantities of scan data with the advent of cheap digital storage, the data (or scans) still needs to be labelled, sorted, 'stitched' together, analysed and its key findings consolidated into a final report.

The reporting stage is normally underestimated and normally

*Corresponding author. E-mail: radoslaw.boba@casp.pl

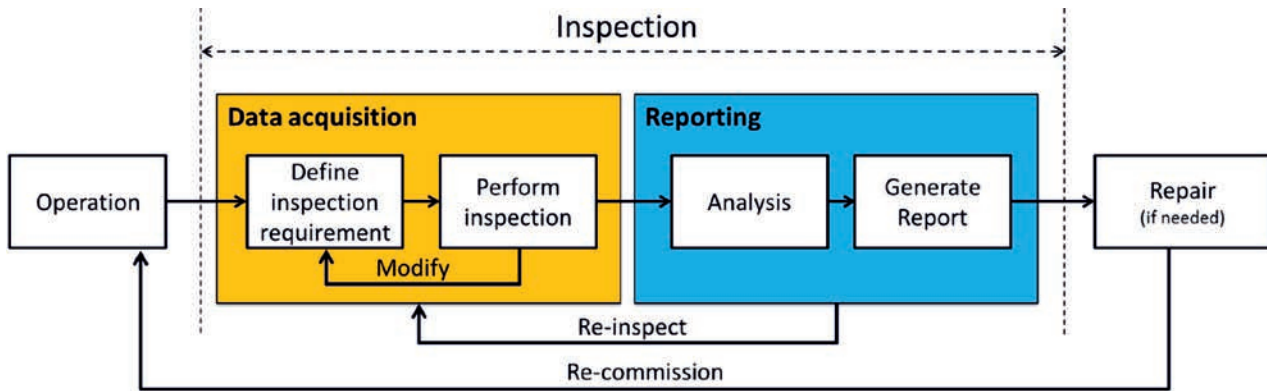


Fig. 1. High-level representation of the inspection process
Rys. 1. Zobrazowanie procesu inspekcji

involves a combination of spreadsheet, word processing and image manipulation software that can be a process just as time-consuming as the first. This paper examines the efficiency of data acquisition stage.

2. Data acquisition stage

There are a myriad of tools available to inspect large areas and perform remote measurements with different inspection instruments, one common form is the deployment of ultrasonic probes. Silverwing (UK) Ltd has an automated inspection tool that is able to perform UT that can cover the vast majority of an assets surface and is able to record millions of spot-measurements, normally referred to as automated UT (AUT). These devices cover relatively small areas and so adjacent scans are conducted in order to cover a larger area. Sometimes the scans are overlapped to aid alignment (the 'stitching' process) during the reporting stage; a topic discussed towards the end of this paper.

The AUT system offered by Silverwing (UK) Ltd uses an immersion approach that utilises a column of water to couple the sound generated by the probe and the surface under inspection. The water column is contained in a 'probe holder' that is continually fed to overcome water dissipation as the probe travels across the surface. The volume of water lost is subject to changes in the surface of the asset. Even if coated, a breakdown can cause an assets wall to be subjected to the environment, eventually resulting in corrosion. In this section, three small case studies are presented that demonstrate the capability of the AUT approach focusing on the following parameters:

- water immersion and surface discrimination,;
- scan resolution;
- amplitude monitoring.

Water immersion and surface discrimination

With the water immersion UT approach, there is a distinct advantage as additional information beyond material thickness can be obtained such as the profile of the near-surface. The water column, between the UT probe and near-surface can vary in the presence of flaws or corrosion. Changing the path length of the water causes the surface interface signal of the UT to vary, indicating the presence of near-surface variation. Coupled with traditional back-wall echo measurements and an additional gate fixed to a single point in time on the UT to track the variation of the interface, changes to the water column length can

be monitored, indicating the presence of wall loss on internal, external or even on both. An example scan of a section of pipe is shown in Figure 2, illustrating a large artificial flaw on the internal surface (a) and three artificial flaws on the near-surface (b) on which the AUT scanner resides. UT signals from the immersion approach can be seen to contain more information than traditional contact probes.

The associated UT thickness map of the flaws shown in Figure 2 (a) and (b) is shown in (c), illustrating a colour coded representation of the thickness of the material. Green relates to the nominal thickness of the pipe, tending from green then yellow through to orange as the material becomes thinner. Peering through the surface of the material with map (c) illustrates the location of the large defect in the centre and also the corresponding defects (i), (ii) and (iii) shown in Figure 2 (b). The near-surface flaws shown in Figure 2 (b) are reported in (d) without the indication of the internal surface flaw illustrating discrimination. Further detail of this approach can be found in [2].

While discrimination is a major benefit there are other parameters to consider with the immersion approach. Along with crystal frequency of the probe plays an important part in the definition of the thickness measurement, the probes focal length is a parameter to consider. With the immersion approach, the focal point is a combination of the path length of the water column and the thickness of material being inspected. Depending on the requirement, the focal point can be chosen to focus on the internal surface to look for flaws or in the centre of the material to observe laminations or inclusions.

Scan resolution

A raster scanning AUT system allows the resolution of spot-measurements to be tailored. Each spot-measurement is typically defined by a square area such as 10 mm x 10 mm and even down to high-resolutions of 0.5 mm x 0.5 mm or less. The choice in resolution is a compromise between the time available to conduct the inspection and the largest discontinuity that the asset owner is willing to miss. When planning the inspection, risks are calculated based on many other factors including, the already mentioned asset history, the assets location (environment), information about neighbouring assets, the timeliness to get the asset back in-service and the approach used to perform the inspection. Some efficiency gain can be achieved by first scanning the majority of an assets surface at a coarse resolution, for example 20 mm x 20 mm or 50 mm x 50 mm. From

these scans, corrections to the inspection requirement may then follow based on unforeseen circumstances or located areas of interest with a more detailed inspection, e.g. re-scanning areas of interest a second time at a higher resolution.

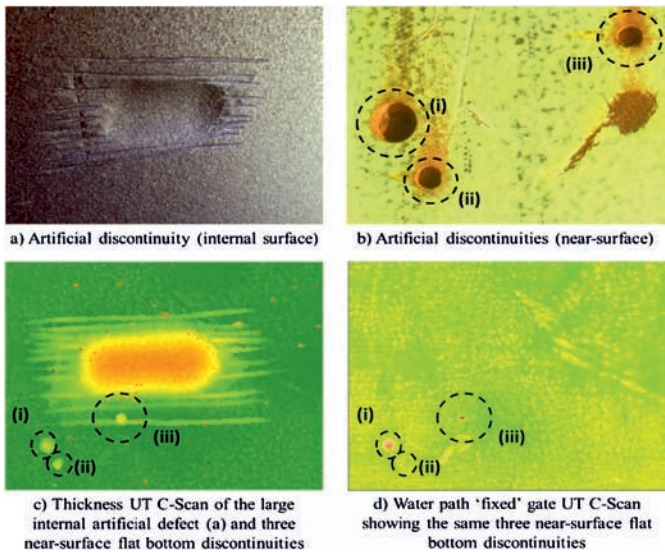


Fig. 2. Example internal and external flaws and their associated top surface and material thickness maps via UT

Rys. 2. Przykłady wewnętrznych i zewnętrznych wad oraz odpowiadających im map powierzchni i grubości materiału zarejestrowanych przez system UT

To illustrate the potential danger of this approach, an AUT inspection has been conducted with a set of artificial defects and their corresponding C-Scans are shown in Figure 3. In this example, the data acquisition has been repeated with four different resolutions starting with a coarse resolution of 50 mm x 50 mm in (a) and increasing the resolution down to 1 mm x 1 mm in (d). It is clear that from the pixelated representation in (a), the increased resolution improves the definition and shape representation of the defects. It is also apparent that the two smaller circular defects and diagonal grind marks shown in (c) and (d) are missing in (a) and only partially represented in (c). Based on the defects illustrated in this example, scan (b) represents the minimal resolution necessary to find the defects. Even so, this is again a compromise as the shape of the diagonal grinds could be misinterpreted as individual narrow defects, only at higher resolutions are their shapes identified.

Ideally, if the inspection equipment were able to perform the inspection at the same speed regardless of resolution then the smallest resolution would be chosen as digital storage is available at relatively low cost. Negating phased array type systems, traditional AUT systems normally comprise of a single transducer that is driven in a raster manner to generate the C-Scan images. As the resolution increases, the number of samples required per second increases as do the number of raster sweeps. This gives an exponential style increase of time required to scan as a function of resolution. At a high resolution of 0.5 mm, the time taken to conduct a scan is approximately 144 minutes. This time decays in an exponential manner as the resolution decreases and down to 1 minute for a resolution of 50 mm. For the corresponding defects, the smallest diameter that could be found as from a choice of scan resolutions is represented by the logarithmic style plots. The

red plot depicts the absolute smallest defect diameter that could be found for a given resolution and is based on the Nyquist sampling rate which states that the sampling rate must be two times higher than the highest frequency to observe. In this context, the highest frequency relates to the smallest defect diameter. Under this sampling theorem, the smallest defect that could be reliably observed at a 0.5 mm resolution is 1mm, at 2 mm it would be a diameter of 4 and so on; double the chosen resolution.

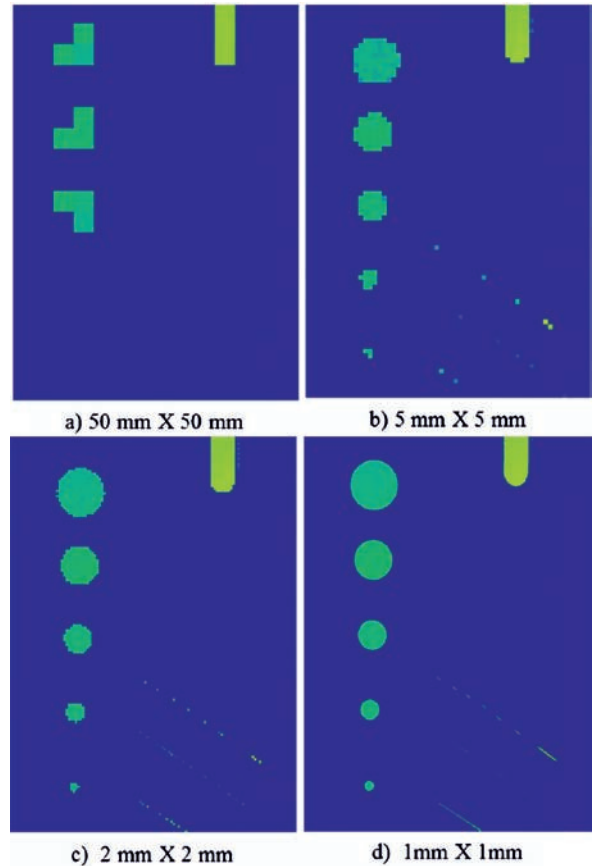


Fig. 3. C-Scans of a set of artificial defects at four different resolutions. Notice that as the resolution decreases towards 50mm x 50mm, a number of smaller discontinuities have been missed

Rys. 3. C-Skany sztucznych wad zarejestrowane przy badaniu z czterema różnymi rozdzielczościami. Należy zwrócić uwagę na to, że zmniejszając rozdzielczość do 50 x 50 mm, nie wykryto kilku mniejszych nieciągłości

This is also under the assumption that these defects are flat-bottom. Another condition is that the Nyquist sampling rate applies to period signals, not discontinuous ones like defects and so to obtain a reasonable estimate of a defect size a typical engineering 'rule-of-thumb' approximation of the sampling resolution should be 10 times that of defect diameter that needs to be located and profiled. This is illustrated by the green profile in Figure 4 and clearly demonstrates the impact that scan resolution can have on the ability of AUT.

However, there are other parameters that can be considered to aid the efficiency. One considers the beam spread at the focal point of the UT probe. Depending on the focal spot, the beam spread can cover an area in the region of mm² and so scan resolutions that are higher than the focal point can be considered excessive.

Another compromise relates to perform data acquisition with

a coarse resolution to first locate defects, followed by higher resolution scans of located defects in order to size them. One caveat with this approach is that the coarse resolution chosen must, at the very minimum adhere to Nyquist sampling rate.

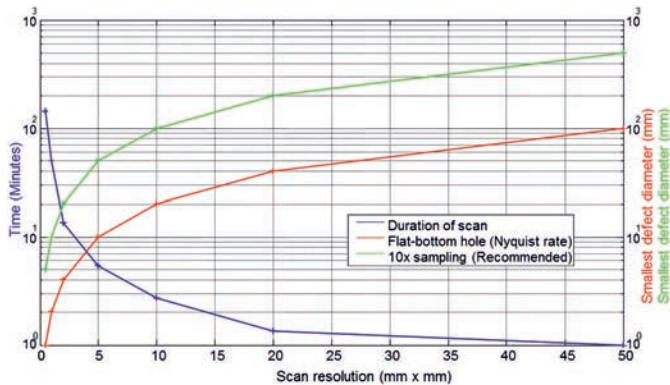


Fig. 4. The time required to perform a scan at a variety of resolutions (blue). The diameter of defect that can be located at a given resolution is also shown, one adhering to the Nyquist sampling rate and the other based on a recommended 'rule-of-thumb' sampling rate of 10

Rys. 4. Czas potrzebny na wykonanie skanu przy różnych rozdzielczościach (niebieski). Dodatkowo zobrazowano wielkość wady, która może zostać zlokalizowana przy określonej rozdzielczości, stosując się do współczynnika próbkowania Nyquista (czerwony) oraz w oparciu o stosowaną w praktyce zasadę współczynnika próbkowania 10 (zielony)

Amplitude monitoring

Traditionally, AUT systems are utilised to determine the condition of an assets structure by measuring its thickness by configuring a set of gates over a UT signal. These gates can have several functions, they can measure the flank of each echo (the first point which crosses the gate in time), the time at which the peak amplitude of the echo is located or from a fixed position in time (as shown earlier to discriminate near-surface flaws). A gate can also be used to monitor the amplitude of a given echo. This can provide further information about the condition of the asset by indicating regions of poor reflectors caused by the sound scattering. As the amplitude of these echoes is a function of the reflecting UT signal, then the edges of defects and those with low amplitudes that make gate measurements difficult can be clearly shown on the corresponding C-Scan. Monitoring the amplitude of an echo can also be used to assess the condition of an internal rubber bonded liner. In the region of a bonded area, the acoustic impedance is less and so the sound travels through asset material, into the adhesive bond and into the liner, absorbing the sound energy and limiting the amount of reflection.

The interface between the internal of an assets surface and an un-bonded area has higher acoustic impedance, thus giving a reflection with higher amplitude. The discrimination of a bonded and un-bonded area with AUT and an amplitude gate configuration is shown in Figure 5. This is a C-Scan of an area of a 16 mm nominal thickness pipe with an internal rubber coating 11 mm thick. The bonded area of rubber is identified by the low amplitude signals, shown here by the red region. The corresponding un-bonded area is shown with higher amplitudes in yellow. The aim here would be to locate any regions of high amplitude (yellow) in the bonded areas and identify regions where the lining or glue had perished. It is also interesting to

see additional information in this scan by the location of the glue overspill area. As the liner was applied, the bonded area was pressed on top of some adhesive at such pressure, the remainder of the glue was forced out the side, resulting in the overspill area. This is made visible by the trace at the edge of the glue, shown here in red, which also causes the amplitude to drop based on the refraction and scattering of sound.

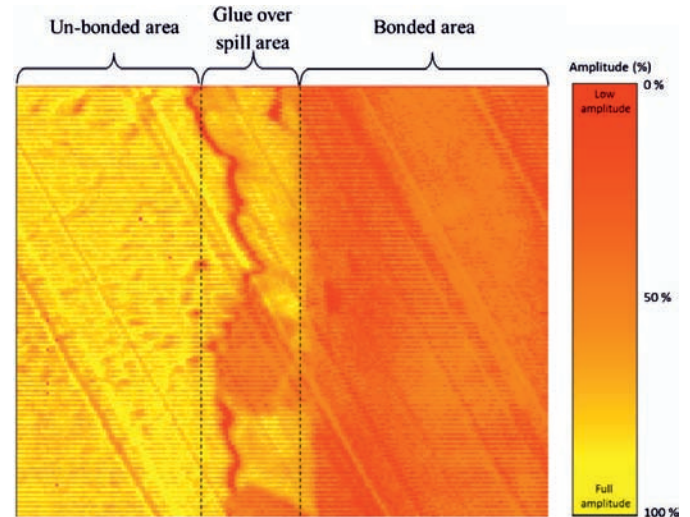


Fig. 5. Amplitude map of a back-wall echo showing bonded, un-bonded and glue line of an internal rubber liner in the internal surface of a pipe

Rys. 5. Mapa amplitudy echa dna pokazująca materiał połączony, niepołączony oraz linię klejenia wkładki gumowej znajdującej się na wewnętrznej powierzchni rury

The case studies of the three parameters presented here demonstrates advantages of the AUT approach and considerations when planning the inspection. Efficiency in the form of time can be chosen at the cost of likelihood of locating a defect in the data acquisition stage.

3. Conclusion

Efficiency of the inspection process is always improving, usually through faster scanning equipment. It then follows that faster scanning can result in more data and while it is generally accepted that more useful data can reveal further details about an assets integrity, more data can also lead to challenges downstream during the analysis. In this paper, we have described being able to obtain more asset information through extra gates and the surface location of defect without impacting on efficiency or tailoring the time taken to inspect by adjusting scan resolutions.

4. Acknowledgments

The authors of this paper would like to thank possible Robert Williams and Richard James who have helped collect the presented data and make this paper possible.

5. References

- [1] The engineering equipment and materials users association (EEMUA). Users guide to the inspection, maintenance and repair of aboveground vertical cylindrical steel storage tanks. 2003. Vol. 2
- [2] Drury, John C. Ultrasonic flaw detection for technicians. 2004

45. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących

18-20 PAŹDZIERNIKA 2016, KOŁOBRZEG



Kołobrzeg - historyczne miejsce, polska stolica SPA, komfortowe zakwaterowanie, najlepsze polskie jedzenie i najpiękniejsze plaże



KKBN

- największa konferencja w obszarze badań nieniszczących w Europie Środkowej
- tradycja, doświadczenie i niezawodność (45. edycja Konferencji)
- forum dyskusji naukowców i praktyków – corocznie ponad 350 uczestników z Polski i zagranicy
- platforma wystąpień znanych ekspertów z dziedziny badań nieniszczących i diagnostyki technicznej
- międzynarodowe środowisko uczestników – tłumaczenie symultaniczne wszystkich sesji
- warsztaty praktyczne z zastosowania renomowanego oprzyrządowania i oprogramowania wspierającego proces badań nieniszczących
- największa w Polsce wystawa wyposażenia i systemów pomiarowych oraz prezentacja usług z zakresu badań nieniszczących

PATRONAT HONOROWY



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

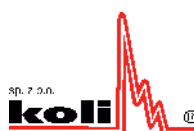


Zachodniopomorski
Uniwersytet
Technologiczny
w Szczecinie



Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju

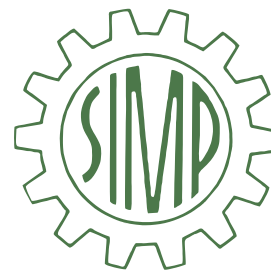
SPONSORZY



46 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących 24-26 Października 2017

Hotel Europa Starachowice
Business & Spa, Starachowice

Zapraszamy na konferencję KKBN



PTBNI DT



REJESTRACJA UCZESTNIKÓW JUŻ RUSZYŁA

TEMATYKA KONFERENCJI:

- badania nieniszczące w przemyśle, budownictwie, transporcie, energetyce,
- metody, urządzenia, wyposażenie i oprogramowanie wykorzystywane w badaniach nieniszczących,
- diagnostyka techniczna urządzeń i konstrukcji,
- szkolenie personelu i certyfikacja w zakresie badań nieniszczących,
- nowe przepisy i normy dotyczące badań nieniszczących,
- akredytacja laboratoriów badań nieniszczących.

Więcej informacji:

Joanna Adamczyk

+48 696 084 313

kkbn46.simp@gmail.com

Walenty Jasiński*

ZUT w Szczecinie, Szczecin

Ocena trwałości resztkowej rur katalitycznych reformerów amoniaku badaniami NDT

Assessment of residual life of ammonia reformers catalytic pipes by NDT test

ABSTRACT

The article presents the results of the stability of the microstructure and properties of catalytic cast pipes in steam reforming conditions. The growing prices of catalytic pipes have resulted in the attempts to prolong of the pipe work above 100,000 h stability. Increasing the time and temperature of operating causes coalescence and coagulation of secondary carbides reducing thus the creep resistance of the alloy. Currently there is no definite and commonly used method to assess the degree of degradation of the microstructure and properties of catalytic pipes. The destructive test methods of catalytic pipes are usually reduced to the assessment of the effects of metallographic creeping process, i.e. relative volume and distribution of mikrovoids on the pipe wall section, as well as evaluating the mechanical properties of steel. These methods generally give a clear assessment but require disassembly for testing pipes and replacement with new ones. The author developed the regression which show a significant dependence of mechanical properties (R_m , A_5 , KCU 2) on the operating parameters of the reformer (P_{LM} , σ) and hardness HB cast IN 519. The equations have been applied to assess the possibility of using non-destructive testing for the assessment of the degree of degradation of the catalyst steel pipe.

Keywords: reforming; Fe-Ni-Cr alloys; microstructure

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań stabilności mikrostruktury i właściwości staliwa rur katalitycznych w warunkach reformingu parowego. Wzrastające ceny rur katalitycznych doprowadziły do analizy możliwości przedłużenia czasu eksploatacji rur powyżej projektowej trwałości 100000 h. Zwiększenie czasu i temperatury eksploatacji powoduje koalescencję i koagulację węglików wtórnych, a tym samym zmniejszenie odporności na pełzanie stopu. Obecnie brak jest jednoznacznej i powszechnie stosowanej metody oceny stopnia degradacji mikrostruktury i właściwości staliwa rur katalitycznych. Niszczące metody badań rur katalitycznych sprowadzają się zwykle do oceny metalograficznej efektów procesu pełzania, tzn. objętości względnej i rozmieszczenie mikropęknięć na przekroju ścianek rur, a także ocenę właściwości mechanicznych staliwa. Metody te dają na ogół jednoznaczną ocenę ale wymagają demontażu rur do badań i zastąpienie ich nowymi. Wykorzystując opracowane równania regresji wykazujące istotną statystycznie zależność właściwości mechanicznych (R_m , A_5 , KCU2) od parametrów eksploatacyjnych reformera (P_{LM} , σ) i twardości HB staliwa IN 519, wykazano możliwość zastosowania badań nieniszczących do oceny stopnia degradacji staliwa rur katalitycznych.

Słowa Kluczowe: reforming, stopy Fe-Cr-Ni, mikrostruktura



Profesor

Walenty Jasiński

1. Wstęp

Światowy wzrost konsumpcji energii wywołany rozwojem cywilizacji spowodował uszczuplenie jej zasobów i globalne ocieplenie klimatu. Obecnie ok. 90% całkowitego zapotrzebowania energii jest wytwarzane z paliw kopalnych. Spalanie tych paliw połączone jest z wydzielaniem dużych ilości dwutlenku węgla, istotnie odpowiedzialnego za efekt cieplarniany. Dlatego większość prowadzonych analiz wskazuje, że w perspektywie najbliższych kilkudziesięciu lat, wodór może stać się podstawowym nośnikiem energii stwarzając jednocześnie przyjazny środowisku system energetyczny. Obecnie ok. 90% światowej produkcji wodoru jest wytwarzane w procesie reformingu parowego z zastosowaniem gazu ziemnego jako surowca podstawowego. Proces konwersji węgłowodoru parą wodną prowadzony jest w temperaturze ok. 800 °C w reformerze (rury wykonane ze staliwa austenitycznego umieszczone pionowo w komorze

pieca wypełnione są pierścieniami ceramicznymi z naniesionym katalizatorem - stop na osnowie niklu). W celu zwiększenia efektywności energetycznej procesu konwersja prowadzona jest przy ciśnieniu 3 ÷ 4 MPa oraz przy stałej tendencji podwyższania temperatury konwersji do 950 °C [1-3]. Długotrwała eksploatacja rur w takich warunkach doprowadza do degradacji mikrostruktury i właściwości staliwa, a w konsekwencji do stanu awaryjnego z wyłączeniem reformera z produkcji włącznie. Wzrastające ceny rur katalitycznych doprowadziły do analizy możliwości przedłużenia czasu eksploatacji rur powyżej projektowej trwałości 100000 h. Jeżeli tak, to w jakim stopniu i na podstawie jakich kryteriów ?

Inspiracją do podjęcia tematu niniejszej pracy jest brak metody ilościowej oceny stopnia degradacji materiału rur katalitycznych pozwalającej na jednoznaczne określenie ich trwałości resztkowej w warunkach eksploatacyjnych. Obecnie diagnostykę stanu rur katalitycznych prowadzi się różnymi nieporównywalnymi metodami. Konsekwencją braku ogólnie przyjętej metodyki postępowania przy ocenie trwałości resztkowej materiału rur katalitycznych jest ich przedwczesna wymiana lub doprowadzenie do katastroficznych awarii wskutek utraty szczelności rur.

W efekcie prowadzonych badań ustalono oddziaływanie parametrów eksploatacyjnych na skład fazowy i mikrostrukturę staliwa, a tym samym na jego właściwości mechaniczne. Zmiana morfologii składników mikrostruktury staliwa w funkcji temperatury i czasu pracy rur umożliwiła określenie rodzaju i kinetyki przemian fazowych w warunkach eksploatacji. Rozwiązanie

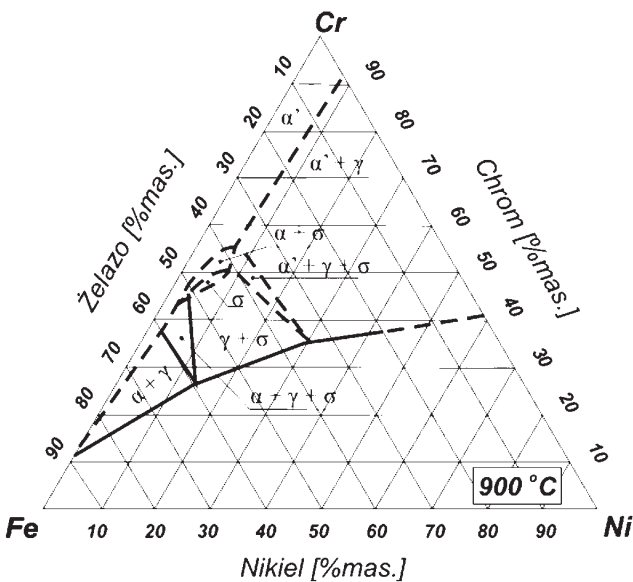
* Autor korespondencyjny. E-mail: walenty.jasinski@zut.edu.pl

tych zagadnień badawczych stanowi istotne uzupełnienie stanu wiedzy z zakresu stabilności mikrostruktury i właściwości żaroodpornego staliwa w warunkach pracy parowego reformingu. Umożliwiło także opracowanie wiarygodnej metody oceny stanu staliwa rur katalitycznych w funkcji czasu eksploatacji.

2. Staliwa stosowane w reformingu

Postęp technologii przemysłu chemicznego, petrochemicznego i energetycznego uwarunkowany jest rozwojem materiałów odpornych na agresywne oddziaływanie środowisk ich pracy. Dobra żaroodporność i żarowytrzymałość tworzyw metalicznych determinuje rozwój wielu gałęzi przemysłu chemicznego. Nadstopy niklu, kobaltu i żelaza charakteryzują się dużą żaroodpornością lub żarowytrzymałością, zachowują stabilne właściwości użytkowe. Powszechnie przyjmuje się, że nadstopy przystosowane są do pracy w temperaturze powyżej 816 °C, (1500 F) [4, 5].

Obecnie zwiększa się zainteresowanie nadstopami żelaza – także ze względów ekonomicznych. Podstawą opracowania nadstopu żelaza był skład chemiczny i mikrostruktura stali austenitycznej 18-8. Pierwsze gatunki stopu na osnowie żelaza charakteryzowały się dobrą plastycznością i były stopami do przeróbki plastycznej [6, 7]. Stopy odlewnicze, o większej żaroodporności i żarowytrzymałości, stosowano jako uzupełnienie dla wytwarzania elementów i urządzeń o złożonym kształcie. W obecnie stosowanych gatunkach nadstopów wykorzystywane jest synergiczne oddziaływanie dodatków stopowych na ich właściwości. Dobór składu chemicznego nadstopu umożliwia jego umocnienie roztworowe i wydzieleniowe zarówno osnowy jak i granic ziaren (Rys. 1).



Rys. 1. Układ równowagi fazowej Fe - Ni - Cr w temp. 900 °C [4]
Fig. 1. A system phase balance Fe - Ni - Cr at 900 °C [4]

Wydzielenia faz międzymetalicznych o dużej dyspersji zapewniają dobrą odporność na pełzanie [8]. Morfologia składników mikrostruktury staliwa ulega zmianie w czasie pierwszych kilku godzin eksploatacji [9, 10]. W przesyconym roztworze stałym austenitycznej osnowy tworzą się węgliki wtórne o dużej dyspersji wewnątrz ziarn austenitu (starzenie). Zwiększenie czasu

i temperatury eksploatacji powoduje koalescencję i koagulację węglików wtórnych a tym samym zmniejszenie odporności na pełzanie stopu [11, 12].

Proces niszczenia rur katalitycznych jest spowodowany przede wszystkim zmiennym w czasie stanem naprężeń cieplnych generowanych warunkami eksploatacji. Odształcenie plastyczne wywołane zjawiskiem pełzania występuje najczęściej na znacznej części obwodu i długości rury. W wyniku procesów dyfuzyjnych podczas pełzania tworzą się pustki, które łącząc się tworzą mikropęknięcia. Finalnym stadium rozwoju mikropęknięć są makropęknięcia wzdłużne rur katalitycznych (Rys. 2).



Rys. 2. Pęknięcia wzdłużne rur katalitycznych [13]
Fig. 2. Longitudinal cracks of catalytic pipes [13]

Ocena stopnia degradacji mikrostruktury materiału rur katalitycznych umożliwi prawidłowe określenie wartości ich trwałości resztkowej i jednocześnie ograniczy liczbę awaryjnych wyłączeń reformera. Obecnie brak jest jednoznacznej i powszechnie stosowanej metody oceny stopnia degradacji mikrostruktury i właściwości staliwa rur katalitycznych. Niszczące metody badań rur katalitycznych sprowadzają się zwykle do oceny metalograficznej efektów procesu pełzania, tzn. objętości względnej i rozmieszczenie mikropustek na przekroju ścianek rur, a także ocenę właściwości mechanicznych staliwa. Metody te dają na ogół jednoznaczną ocenę ale wymagają demontażu rur do badań i zastąpienie ich nowymi.

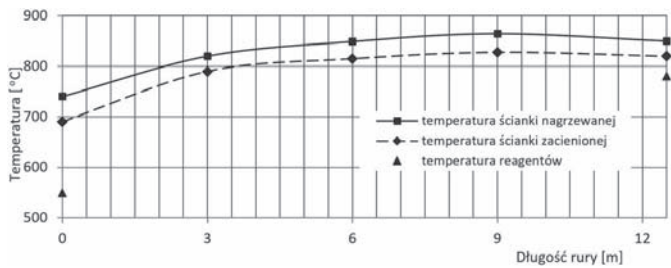
Stosowane są także nieniszczące metody badań rur katalitycznych. Jedną z nich jest prosta metoda oceny makroskopowych objawów pełzania przez pomiar przyrostu obwodu lub średnicy rury [14, 15]. Podstawą innych metod nieniszczących są zmiany właściwości fizycznych staliwa w wyniku przemian fazowych oraz zarodkowania i rozrostu mikropustek [14, 16]. Są skuteczne w ocenie końcowego stadium pełzania stacjonarnego lub początku stadium pełzania przyspieszonego. Nie zapewniają jednak jednoznacznych wyników i muszą być wspomagane innymi metodami badawczymi. Zaletą metod nieniszczących jest prowadzenie badań bez demontażu rur. Rozwój metodyki badań umożliwia ocenę mikrostruktury i twardości staliwa rur katalitycznych „in situ”, w miejscu ich eksploatacji. W energetyce stosowane wzorce mikrostruktury i pomiar twardości są podstawą oceny stopnia degradacji mikrostruktury stali i podstawowym kryterium dopuszczenia do dalszej eksploatacji. Pomiar współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej, w przypadku niemożliwości wycięcia materiału do badań, jest także metodą

oceny stopnia degradacji materiału [14].

3. Wyniki i analiza badań

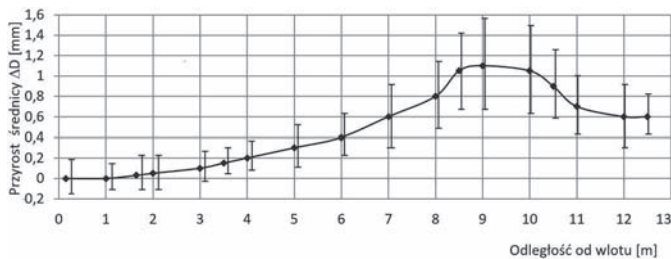
Konieczność dostarczenia energii potrzebnej do endotermicznej reakcji konwersji powoduje zróżnicowanie temperatury pracy rur katalitycznych wzdłuż ich długości (Rys. 3).

Zmiany składu i morfologii składników mikrostruktury w procesie reformingu parowego są funkcją lokalnej temperatury nagrzania materiału rury. Natomiast ciśnienie, środowisko i czas eksploatacji są identyczne dla wszystkich obszarów rury katalitycznej. Makroskopowym efektem procesów pełzaniowych zachodzących w warunkach eksploatacji jest zmiana średnicy rur katalitycznych. Wyniki pomiarów średnicy zewnętrznej rur wykonanych ze staliwa IN 519 (24% Cr, 24% Ni, 1% Nb) po eksploatacji w czasie 120760 h potwierdziły zmiany ich kształtu (Rys. 4). Ustalono, że największy przyrost średnicy występuje w obszarze położonym w odległości 8,5 m od początku rury (Rys. 4).



Rys. 3. Rozkład temperatury na długości rury katalitycznej w reformerze Z.Ch. „POLICE” [17]

Fig. 3. The temperature distribution along the length of the catalyst tubes in the reformer Z.Ch. „POLICE” [17]

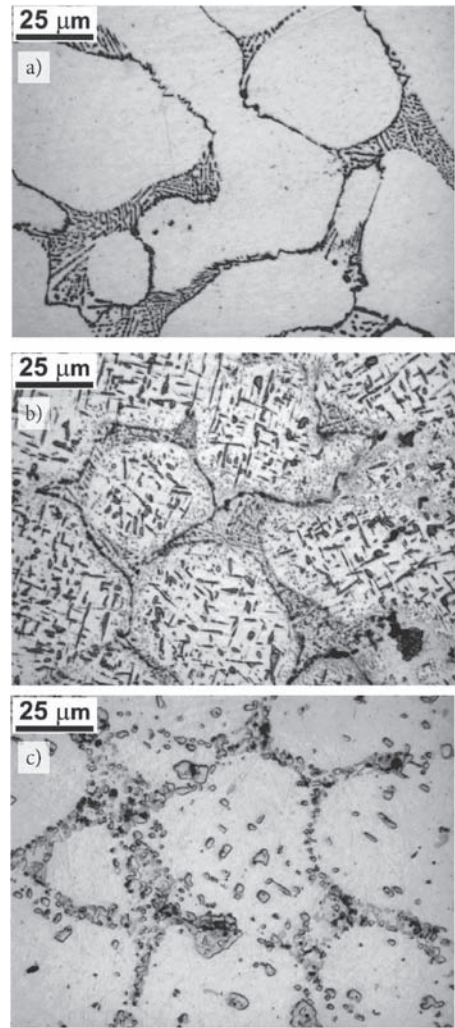


Rys. 4. Przyrost średnicy rur ze staliwa IN 519 wzdłuż ich długości
Fig. 4. Increase diameter of the cast pipe IN 519 along their length

Warunki eksploatacji wpływają na mikrostrukturę i właściwości nadstopów żelaza. Dużą odporność na pełzanie tej grupy stopów zapewnia obecność w mikrostrukturze cząstek faz międzymetalicznych o dużej dyspersji. Są to węgliki pierwotne tworzące siatkę na granicach ziaren austenitu w procesie krystalizacji (Rys. 5a) oraz cząstki faz międzymetalicznych o dużej dyspersji wydzielające się wewnątrz ziaren (Rys. 5b) i ulegające koagulacji w trakcie eksploatacji (Rys. 5c).

Wyniki wykonanych badań właściwości mechanicznych od temperatury i czasu eksploatacji wykazują zależność liniową wyższego stopnia (Rys. 6 - 8).

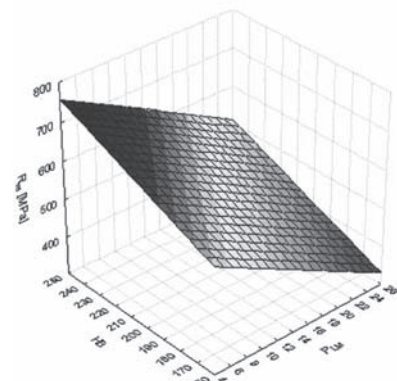
Stwierdzone zależności między mikrostrukturą i właściwościami staliwa rur katalitycznych stały się podstawą opracowania statystycznego wyników badań. Określenie równań regresji wymaga dużej liczby wyników próby statycznej rozciągania próbek



Rys. 5. Mikrostruktura IN519: a) stan lany, b, c) po 120 760 h eksploatacji [17]

Fig. 5. Microstructure IN 519: a) the cast state, b, c) after exploitation 120 760 h [17]

$$R_m \text{ [MPa]} = 304,083 - 11,285 \cdot P_{LM} + 1,9965 \cdot HB \quad R = 0,89$$

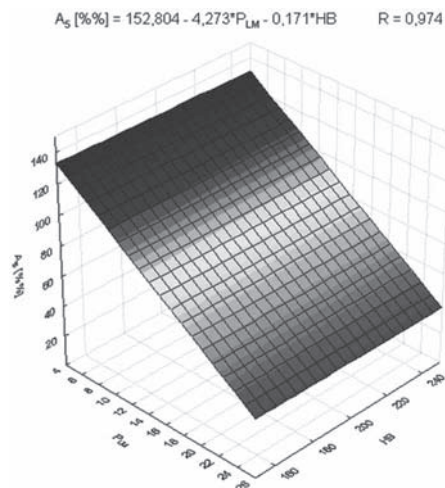


Rys. 6. Zależność wytrzymałości na rozciąganie staliwa IN 519 od parametru Larsona-Millera i twardości Brinella rur w reformerach Z.Ch. „POLICE”

Fig. 6. The dependence of tensile strength cast steel IN 519 on Larson-Miller parameter, and Brinell hardness of tubes in the reformers Z.Ch. „POLICE”

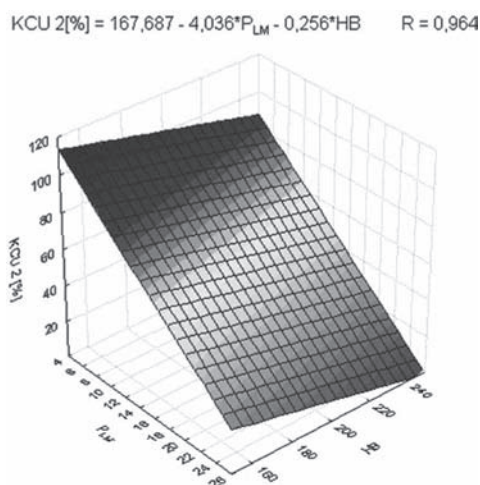
pobranych z rur katalitycznych po różnym czasie prawidłowej pracy reformera. Wysokie koszty demontażu rur do badań

i montażu nowych rur ograniczają możliwości opracowania równań regresji dla dowolnego gatunku staliwa. Przeprowadzona analiza uzyskanych wyników badań wykazała możliwość określenia równań regresji dla znanych parametrów eksploatacji rur katalitycznych IN 519 i ich twardości bez konieczności przeprowadzania statycznej próby rozciągania (Rys. 6 - 8) [17].



Rys. 7. Zależność wydłużenia względnego staliwa IN 519 od parametru Larsona-Millera i twardości Brinella rur w reformerach Z.Ch. „POLICE”

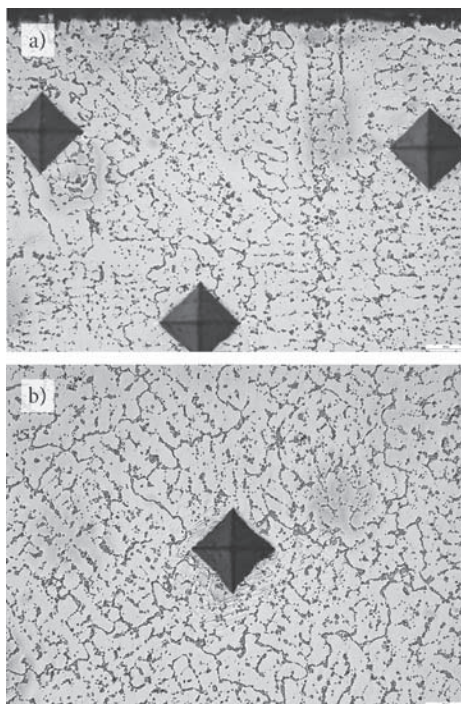
Fig. 7. Dependence of elongation cast steel IN 519 on Larson-Miller parameter and Brinell hardness pipes in the reformers Z.Ch. „POLICE”



Rys. 8. Zależność udarności staliwa IN 519 od parametru Larsona-Millera i twardości Brinella rur w reformerach Z.Ch. „POLICE”

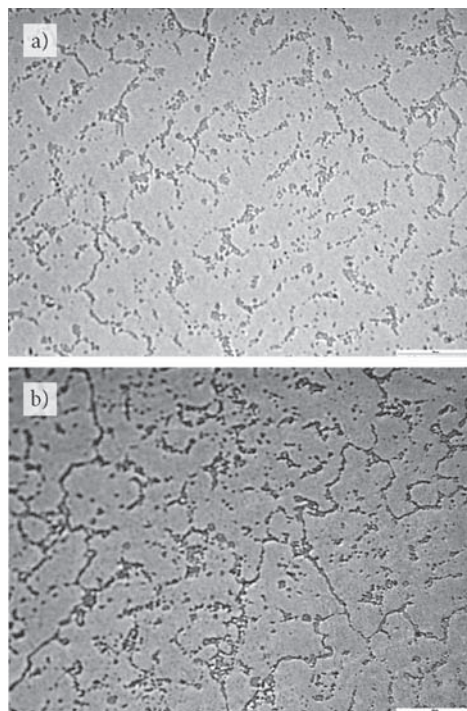
Fig. 8. Dependence of impact strength cast steel IN 519 on Larson-Miller parameter and Brinell hardness pipes in the reformers Z.Ch. „POLICE”

Znaczne możliwości oceny stopnia degradacji staliwa rur katalitycznych stwarzają badania „in situ” w okresie odstawienia reformerów do przeglądów okresowych. Wykonanie łysinki o szerokości kilkunastu milimetrów i długości ok. 50 mm wzdłuż tworzącej rury umożliwia wykonanie replik, pomiarów współczynnika tłumienia i przeprowadzenie pomiarów przenośnym twardościomierzem. Pomiar wykazuje stabilną twardość mikrostruktury staliwa IN 519 na zglądzie poprzecznym w obszarze największego przyrostu średnicy rury (Rys. 9) oraz brak powierzchniowego utlenienia i odwęglenia (Rys. 9a) rury po 120 760 h eksploatacji.



Rys. 9. Mikrostruktura + odciski HV5, IN 519 - 120760h, x100: a) powierzchnia, b) 8 mm od powierzchni

Fig. 9. Microstructure + prints HV5, IN 519 - 120760h, x100: a) at surface, b) 8 mm from the surface



Rys. 10. Replika i obraz nietrawiony zglądu IN 519 - 120760h, x200 a) replika, b) obraz

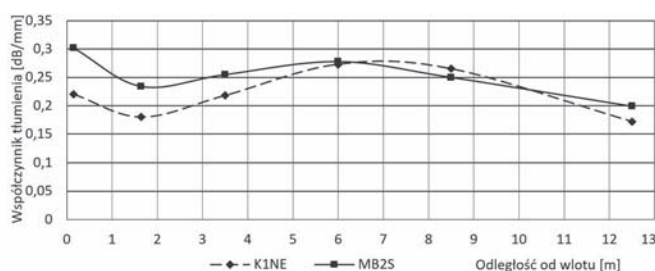
Fig. 10. The replica and the image of non etched IN 519-120760h, and x200) replica, b) image

W literaturze dotyczącej procesu pełzania można znaleźć stwierdzenie, że naruszenie ciągłości materiału, czyli powstanie przelomu występuje, gdy długość łańcuchów powstałych z połączenia pustek pełzaniowych stanowi 50% długości granic ziaren [18]. W badanych rurach nie obserwowano tak silnie

zdegradowanej mikrostruktury co uniemożliwiło określenie minimalnych dopuszczalnych właściwości mechanicznych.

Widok repliki i obraz zglądu nietrawionego z łysinki utworzonej w obszarze największego przyrostu średnicy na rurze po 120760h eksploatacji wykazuje duże podobieństwo mikrostruktury (Rys. 10).

Pomiary współczynnika tłumienia prowadzone sondami o niskiej częstotliwości 1 i 2 MHz wykazują jego korelację z przemianami fazowymi. Po krótkotrwałej eksploatacji 25 760 h występuje wyraźne minimum wartości współczynnika tłumienia w odległości 1,65 m od wlotu substratów. Maksimum w odległości 6 m od wlotu niezależnie od częstotliwości stosowanej sondy pomiarowej (Rys. 11).

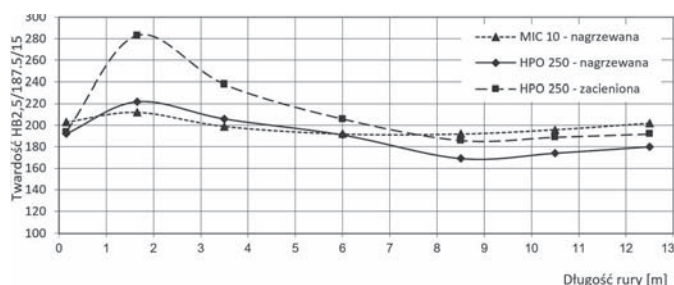


Rys. 11. Zmiana wartości współczynnika tłumienia staliwa IN 519 rury po 25 760 h pracy w funkcji odległości od wlotu substratów, sonda MB2S

Fig. 11. Change the value of the damping coefficient cast tubes IN 519 after 25 760 hours of operation as a function of distance from the inlet substrates, probe MB2S

Wyniki pomiarów twardości staliwa rur IN 519 na powierzchni zewnętrznej 20 rur po 120 760 h eksploatacji, (twardościomierz f-my Krautkramer MIC 10), wskazały na mniejsze różnice w ich wartości na długości rur niż różnice wartości twardości uzyskane przy pomiarach z użyciem HPO 250 (Rys. 12).

Fig. 12.



Rys. 12. Rozkład twardości na powierzchni rur ze staliwa IN 519 po 120760 h eksploatacji w funkcji odległości od wlotu substratów

Fig. 13. Distribution of hardness on the surface of the cast pipe IN 519 after 120 760 h operation as a function of distance from the inlet substrates

4. Podsumowanie

- Opracowane równania regresji wykazały istotną statystycznie zależność właściwości mechanicznych (R_m , A_5 , KCU2) od parametrów eksploatacyjnych reformera (P_{LM} , σ) i twardości HB staliwa IN 519
- Przemiany fazowe w warunkach eksploatacyjnych reformerów amoniaku doprowadzają do uruchomienia procesów pełzania wysokotemperaturowego, co objawia

się makroskopowo w postaci przyrostu średnicy rur katalitycznych w tym obszarze.

- Wykazana korelacja współczynnika tłumienia z właściwościami mechanicznymi staliwa rur katalitycznych umożliwia ocenę stopnia ich degradacji metodami nieniszczącymi bez demontażu rur katalitycznych.
- Badania metodą replik i pomiary twardości w miejscu replikowania umożliwiają ocenę zaawansowania procesów pełzaniowych

5. Literatura

- K. Verfondern, T. Nishihara „Safety aspects of the Combined HTTR/STEM reforming complex for nuclear hydrogen production” *Progress in Nuclear Energy*, 47, s.527-534, 2005
- Steam reforming, http://www.topsoe.com/Business_areas/Ammonia/Processes/SteamReforming.aspx
- J.R. Rostrup-Nielsen „Catalytic Steam Reforming” Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag, 1984
- C.T. Sims, N.S. Stoloff, W.C. Hagel „Superalloys II” Ed. Johan Wiley&Sons 1987, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- R.S. Haro i in. „Microstructural factors that determine the weldability of a high Cr-high Si HK 40 alloy” *Materials Chemistry and Physics*, 66, s. 90-96, 2000
- B. Mikułowski „Stopy żaroodporne i żarowytrzymałe. Nadstopy” Wydawnictwa AGH, Kraków, 1997
- T. Seliga, H. J. Penkalla, F. Schubert „Microstructural stability of wrought Ni-base Superalloys for advanced steam turbine applications beyond 700 °C” *Acta Metallurgica Slovaca*, 10, s. 454-460, 2004
- M. Gajewski „Przemiany strukturalne w stalach i staliwach stosowanych w energetyce oraz ich wpływ na mechanizmy pęknięcia i korozji” Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2003
- W. Jasiński, P. Zawada „The precipitation processes in the Manaurite XM superalloy during 1000 hours of ageing” *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 4/5(3), s. 607-615, 2008
- C.W. Thomas, M. Borshevsky, A.N. Marshall „Assessment of thermal history of niobium modified HP50 reformer tubes by microstructural methods” *Materials Science and Technology*, 8, s. 885-861, 1992
- S.J. Zhu, D.J. Li, Y. Wang, W. Q. Tian, S.G. Xu, F.G. Wang „Effect of niobium on creep and creep crack growth of cast Ni-Cr austenitic steel” *Material Science and Technology*, 6, s. 1193-1198, 1990
- X.Q. Wu, H.M. Jing, Y.G. Zheng, Z.M. Yao, W. Ke, Z.Q. Hu „The eutectic carbides and creep rupture strength of 25Cr20Ni heat-resistant steel tubes centrifugally cast with different solidification conditions” *Materials Science and Engineering*, A293, s. 252-260, 2000
- Ashok Kumar Ray, Samarendra Kumar Sinha „Engineering Failure Analysis”, 10, 351-362, 2003
- J. Brightling „Managing steam reformer tubes” *Nitrogen & Methanol*, 256, s. 29-39, 2002
- D. Shu-Ho „A study on the prediction of remaining life and ageing of material for pressurized tubes of industrial furnace operated at elevated temperature” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 69, s. 247-252, 1996
- I.L. May, T.L. Silveira, C.H. Vianna „Criteria for the evaluation of damage and remaining life in reformer furnace tubes” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78, s. 985-994, 2001
- W. Jasiński „Trwałość eksploatacyjna rur katalitycznych reformerów amoniaku” ISBN 978-83-7663-012-0, Szczecin, 2009
- G.W. Greenwood „Life prediction and residual life assessment. Research and Development of High Temperature Materials for Industry” Ed. E. Bullock. London-New York: Elsevier Applied Science 1989, s. 553-565

Tomasz Chady^{1*}, Krzysztof Schabowicz²¹ ZUT w Szczecinie, Polska² Politechnika Wroclawska, Polska

Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu

Non-destructive testing of fiber-cement boards using time domain terahertz spectroscopy

ABSTRACT

The article proposes the use of NDT method utilizing electromagnetic waves with frequencies in the terahertz range for the inspection of fiber-cement boards. First, the most frequently appearing material defects in the plates, are presented. The measurements of defective and flawless plates were carried out using the terahertz method and the selected results are presented. The preliminary tests have confirmed the usefulness of the proposed method for testing fiber cement boards.

Keywords: non-destructive testing, fiber-cement board, terahertz time domain spectroscopy

STRESZCZENIE

W artykule zaproponowano użycie metody badań nieniszczących wykorzystującej fale elektromagnetyczne o częstotliwościach z zakresu teraherców do inspekcji płyt włóknisto-cementowych. Opisano najczęściej pojawiające się w płytach wady materiałowe. Przeprowadzono pomiary płyt wadliwych i pełnowartościowych z zastosowaniem urządzenia wykorzystującego metodę terahercową. Wstępne badania potwierdziły przydatność zaproponowanej metody do badań płyt włóknisto-cementowych.

Słowa Kluczowe: badania nieniszczące, płyty włóknisto-cementowe, spektroskopia terahercowa



Prezes PTBNiDT

Tomasz Chady

Adiunkt, Politechnika Wroclawska

Krzysztof Schabowicz

1. Wprowadzenie

Przedmiotem niniejszego artykułu są badania nieniszczące płyt włóknisto-cementowych, które stosowane są obecnie w architekturze jako okładziny na elewacje wentylowane, ale także jako okładziny wewnętrzne [1, 2]. Ich historia sięga początków XX wieku, kiedy to czeski inżynier L. Hatschek wymyślił i opatentował proces produkcji lekkich i wytrzymałych płyt okładzinowych. Płyty te zawierały wówczas azbest, który z czasem na skutek regulacji prawnych zastąpiono celulozą i włóknami PVA. W przypadku zastosowania na elewacje płyty te są narażone na działanie zmiennych czynników atmosferycznych, a zatem stawia się im odpowiednie wymagania odnośnie wytrzymałości, wilgotności masowej, nasiąkliwości, a przede wszystkim trwałości zgodnie z odpowiednimi regulacjami [3].

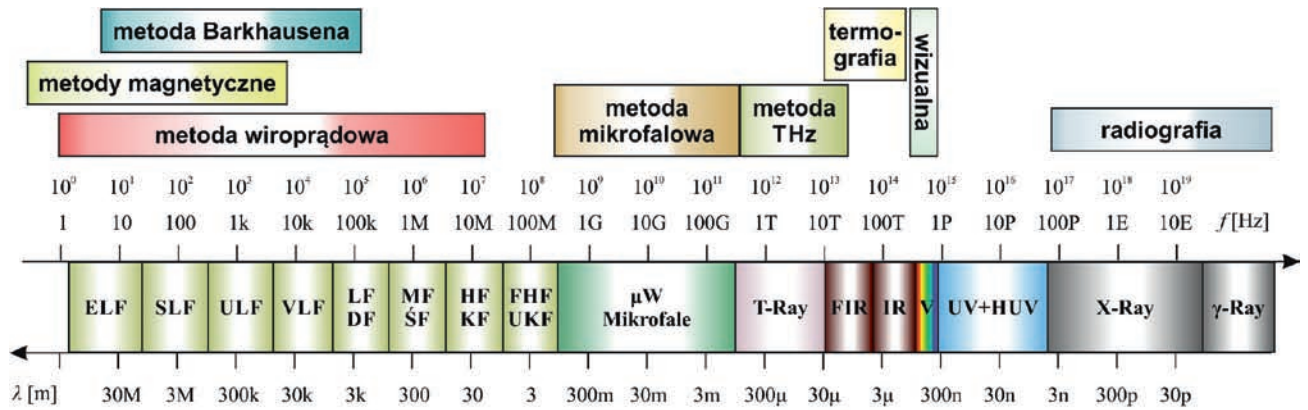
Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt, iż w trakcie produkcji płyta formowana jest w tzw. kąpielii celulozowo-cementowej na bębnie formującym, na który nawijane są kolejne warstwy. Taki sposób produkcji powoduje, że ta kompozytowa płyta ma budowę warstwową. Na styku między warstwami może dochodzić do rozwarstwień między poszczególnymi warstwami

na skutek braku odpowiedniej adhezji. Płyta z taką wadą nie spełnia stawianych jej wymagań i nie nadaje się do wbudowania w obiekt budowlany. Wymaga to zatem kontroli już na etapie produkcji płyt włóknisto-cementowych. Obecnie, kontrola ta polega na badaniach wizualnych tzn. obserwacji powierzchni płyt. Nie jest to jednak badanie miarodajne i obarczone jest dużym błędem. Potrzebna jest zatem dokładniejsza metoda, która pozwoliłaby ocenić strukturę płyty, a szczególnie jej budowę wewnętrzną [4, 5]. Autorzy niniejszej pracy zaproponowali zastosowanie do takiej kontroli metody terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu. Fale elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości (0,5-10 THz) są coraz częściej wykorzystywane w różnych dziedzinach nauki i przemysłu [6]. Właściwości promieniowania terahercowego tworzą unikalną możliwość wykorzystania go do kontroli materiałów kompozytowych. W szczególności, systemy terahercowe pracujące w dziedzinie czasu dostarczają sygnały zawierające precyzyjną informację o wewnętrznej strukturze badanych materiałów.

2. Metoda terahercowa

Fale elektromagnetyczne o częstotliwościach mieszczących się w zakresie od 100 GHz do 10 THz nazywane były falami

* Autor korespondencyjny. E-mail: tomasz.chady@zut.edu.pl

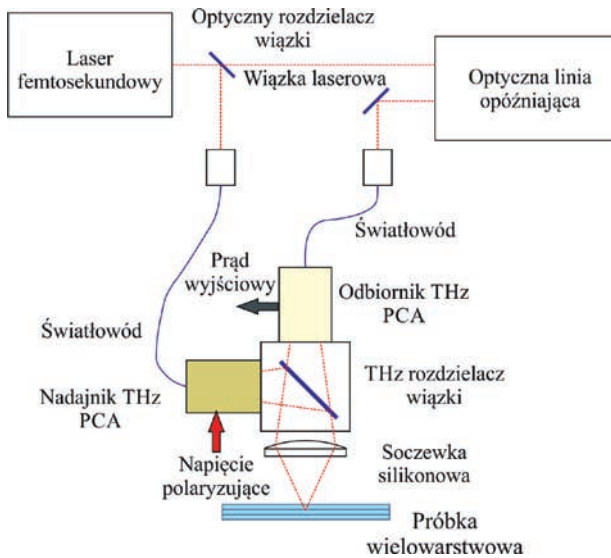


Rys. 1. Wykres zakresów częstotliwości używanych w różnych metodach badań nieniszczących
Fig. 1. Chart of frequency ranges used in different methods of non-destructive testing

submilimetrycznymi ale obecnie coraz częściej stosowana jest nazwa „teraherce”, w skrócie „THz” lub „promieniowanie terahercowe” (ang. TRay). Pasma promieniowania terahercowego znajduje się pomiędzy mikrofalami z jednej strony a promieniowaniem podczerwonym z drugiej strony (rys. 1). Z tego powodu, czasami pasmo terahercowe nazywane jest również pasmem dalekiej podczerwieni (FIR ang. Far Infra-Red).

- nie jest jonizujące i przez to nie stanowi zagrożenia dla ludzi;
- umożliwia uzyskiwać obrazy badanych struktur o dużej rozdzielczości.

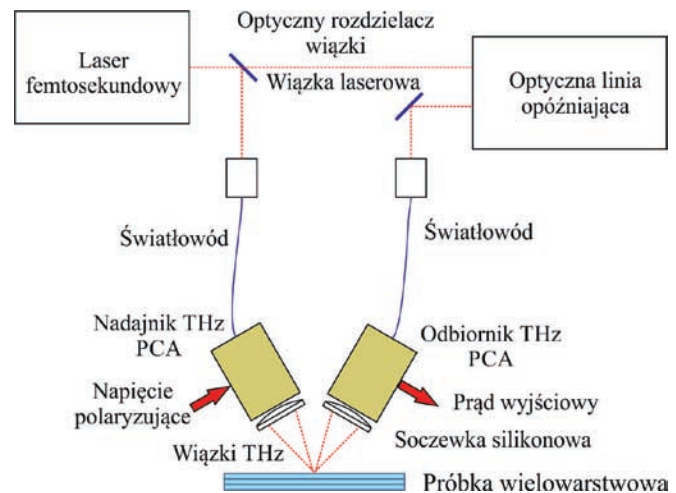
Wymienione właściwości promieniowania terahercowego spowodowały, iż wykorzystywane było w nauce i technice już od dłuższego czasu. Rozwój technologii terahercowej (metod generacji, detekcji, rejestracji i analizy) spowodowały znaczące poszerzenie listy zastosowań, wśród których wymienić należy: badanie składu chemicznego, kontrolę zamkniętych opakowań i pojemników, wykrywanie przesiewowe narkotyków i materiałów wybuchowych, obrazowanie medyczne, a także badania nieniszczące.



Rys. 2. Uproszczony schemat systemu terahercowego TDS pracującego w trybie odbiciowym w układzie z rozdzielaczem wiązki
Fig. 2. Simplified scheme of the terahertz time domain spectroscopy working in reflection mode in configuration with beam splitter

Ze względu na zakres częstotliwości promieniowanie terahercowe wykazuje szereg specyficznych właściwości:

- propaguje się w sposób podobny jak światło;
- przenika przez różne materiały, w zakresie podobnym jak fale radiowe, a więc przechodzi przez różnego rodzaju materiały nieprzewodzące jak tworzywa sztuczne, papier, ceramika, itp.; umożliwia to badania struktury wewnętrznej elementów wykonanych z tego typu materiałów;
- przechodząc przez niektóre substancje wchodzi w interakcję z molekułami i przez to fale o określonych częstotliwościach są silniej absorbowane co umożliwia identyfikację składu chemicznego badanej substancji;
- jest silnie absorbowane przez wodę i parę wodną;

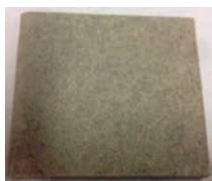


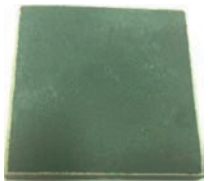



Rys. 3. Uproszczony schemat systemu terahercowego TDS pracującego w trybie odbiciowym w układzie z niezależnymi głowicami
Fig. 3. Simplified scheme of the terahertz time domain spectroscopy working in reflection mode in configuration with independent heads

Technologia terahercowa w badaniach nieniszczących wykorzystywana jest do oceny stanu różnych struktur nieprzewodzących m.in. kompozytów dielektrycznych, powłok malarskich i materiałów ceramicznych. Teraherce pozwalają wykrywać defekty takie jak: rozwarstwienia, puste przestrzenie, braki kleju, braki żywicy, czy nierównomierności wzmocnienia.

Systemy terahercowe wykorzystywać mogą wzbudzenie falą ciągłą (CW, ang. Continuous Wave) lub impulsowe (TDS - spektroskopia w dziedzinie czasu, ang. Time Domain Spectroscopy).

Tab. 1. Podstawowe parametry badanych próbek płyt włóknisto-cementowych
Tab. 1. Basic parameters of the tested fiber-cement boards samples

Oznaczenie płyty	A	B	C	D	E
Rodzaj płyty	włóknisto-cementowa, wewnętrzna	włóknisto-cementowa, wewnętrzna, barwiona w masie	włóknisto-cementowa, zewnętrzna	włóknisto-cementowa, zewnętrzna, malowana	włóknisto-cementowa, wewnętrzna z miką
Grubość płyty [mm]	8	8	8	8	10
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	12,76	13,98	26,54	27,19	10,24
Wilgotność masowa ww [%]	5,05	4,14	2,41	1,19	6,02
Gęstość [kg/m ³]	1100	1200	1600	1650	1000
Zdjęcie płyty					

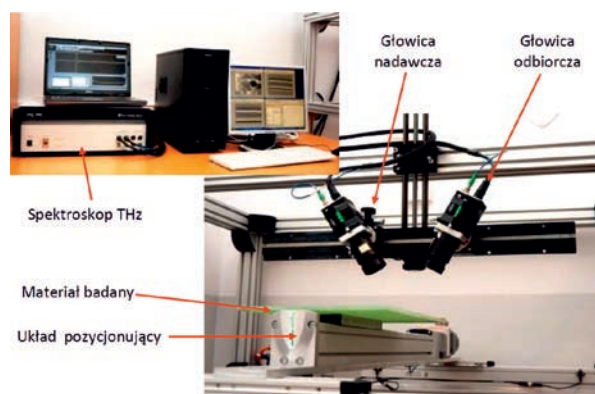
W przypadku systemów TDS niejednorodności materiału wykrywane są dzięki rejestracji fali terahercowych ulegających odbiciu od granic niejednorodności materiału, gdzie występuje zmiana własności elektrycznych i współczynnika refrakcji. Badania mogą być prowadzone w trybie: transmisyjnym (nadajnik i odbiornik znajdują się po przeciwnych stronach obiektu badanego) i odbiciowym (nadajnik i odbiornik znajdują się po tej samej stronie obiektu badanego). Bardziej precyzyjną informację o poszczególnych warstwach występujących w badanym materiale można uzyskać w trybie odbiciowym i dlatego ten tryb został wybrany w tym przypadku.

Uproszczony schemat systemu terahercowego TDS pracującego w trybie odbiciowym został przedstawiony na rys. 2. Jest to jedna z możliwych konfiguracji głowic, w której wykorzystano rozdzielacz wiązki. Drugą z konfiguracji to wariant z niezależnymi głowicami pracującymi w układzie „V” (rys. 3).

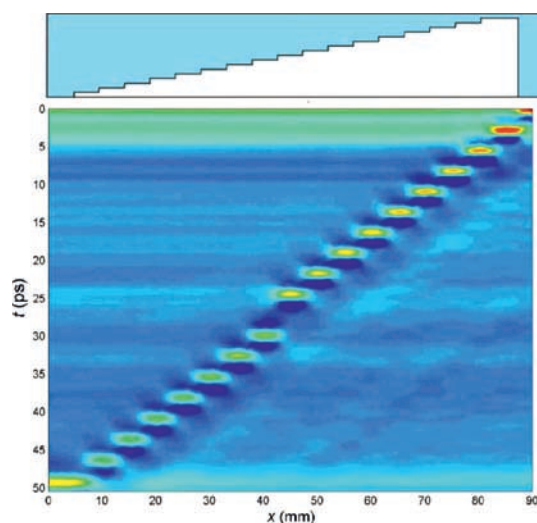
Głównymi elementami systemu terahercowego TDS są: laser femtosekundowy (generujący impulsy o czasie trwania rzędu femtosekund), optyczna linia opóźniająca oraz dwie głowice (nadawcza i odbiorcza) sprzężone z laserem poprzez światłowody. W głowicy nadawczej i odbiorczej znajdują się anteny fotoprzewodzące PCA (ang. Photoconductive Antenna). Femtosekundowe impulsy z lasera padają na antenę motylkową z przerwą fotoprzewodzącą, co powoduje krótkotrwałe przepływy prądu przez ramiona anteny, a w dalszej kolejności powstanie fali elektromagnetycznej o częstotliwościach terahercowych. Wygenerowane fale są skupiane za pomocą układu optycznego na materiale badanym. Fale terahercowe przechodząc przez materiał ulegają odbiciu, stłumieniu i rozproszeniu. Impulsy odbite od kolejnych warstw materiału docierają do detektora z różnymi opóźnieniami. Sygnał elektryczny otrzymywany z detektora zawiera informację o strukturze wewnętrznej badanego materiału. W opisywanych eksperymentach wykorzystano system terahercowy TRay4000 firmy Picometrix (rys. 4). Rozdzielczość przestrzenna systemu (w płaszczyźnie x, y) ograniczona jest przez długość fali i wynosi, ok 150 μm dla częstotliwości $f = 1,5 \text{ THz}$. Rozdzielczość osiowa wynosi ok. 10-40 μm . Głębokość wnikania zależy od właściwości elektrycznych badanego materiału i wynosi od kilku do kilkudziesięciu milimetrów.

3. Opis badań

Badaniom poddano próbki nieuszkodzonych płyt włóknisto-cementowych o różnych właściwościach i parametrach. Zdjęcia próbek jak i ich parametry zawarto w Tabeli 1. Badaniom



Rys. 4. Zdjęcie systemu do badań nieniszczących metodą terahercową
Fig. 4. Photo of the system for terahertz inspection



Rys. 5. Widok przekroju przez fantom i sygnał zmierzony dla tego profilu w postaci B-skanu

Fig. 5.A Sectional view of the phantom and the signal measured for the profile in the form of B-scan

poddano również płytę zawierającą sztuczne defekty (rozwarstwienie i pęknięcie). Każda z badanych płyt była mocowana do układu pozycjonującego (rys. 4). Układ pozycjonujący umożliwiał przesuwanie płyt w dwóch osiach (x i y) względem nieruchomej głowicy pomiarowej. W ten sposób pozyskano dane pozwalające na zbadanie struktury materiału w całej objętości płyty. Wyniki pomiarów przedstawiono w postaci dwuwymiarowych wykresów przebiegów czasowych sygnałów z głowicy odbiorczej (B-skanów i/lub C-skanów). Sygnały z sytemu terahercowego mają charakter bardzo zbliżony do tych uzyskiwanych w metodzie ultradźwiękowej. W artykule zamieszczono jedynie wybrane wyniki pomiarów w celu zilustrowania możliwości zaproponowanej metody testowania.

4. Wyniki badań

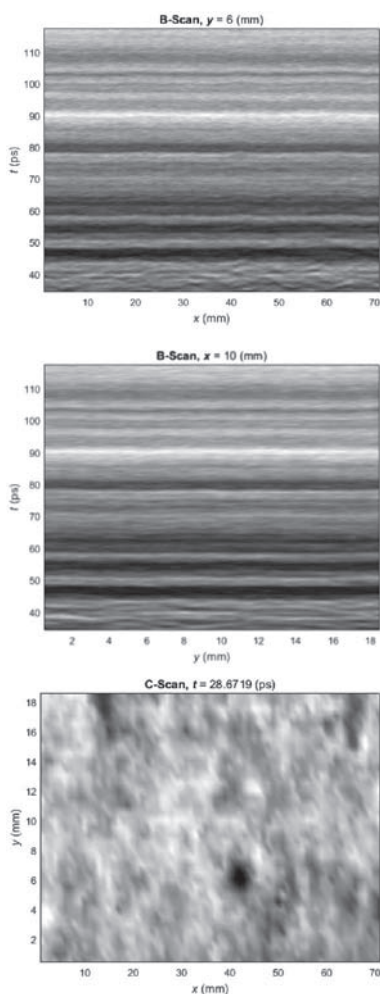
Wstępne badania zostały przeprowadzone dla zobrazowania fantomu wykonanego z plexi o grubości 5mm. W płycie wytworzono różnego typu modelowe wady. Na rys. 5 przedstawiono przekrój, na którym uwidoczniło kształt wady (schodkowe pocienienie płyty), a niżej zamieszczono wynik pomiaru w postaci B-skanu.

Na wykresie widoczne są lokalne ekstrema korespondujące z odbiciem fali od tylnej ścianki płyty. Na wykresie nie zamieszczono

fragmentu sygnału odpowiadającego odbiciu od przedniej ścianki płyty ze względu na bardzo dużą amplitudę, co spowodowałoby brak widoczności sygnałów odpowiadających odbiciom od tylnej ścianki. Pomiary przeprowadzono dla różnych konfiguracji głowic (rys. 2, rys. 3) i różnych odległości głowicy od badanego materiału. Wyniki tych eksperymentów pozwoliły na wybór położenia i konfiguracji głowic pozwalającej na uzyskanie maksymalnej rozdzielczości i czułości. Wykres przedstawiony na rys. 5 przedstawia sygnał zmierzony dla wybranej, optymalnej w sensie rozdzielczości przestrzennej, konfiguracji głowic z rozdzielaczem wiązki. Po określeniu optymalnej konfiguracji, przystąpiono do pomiarów próbek płyt włókniasto-cementowych dla których nie stwierdzono występowania defektów (próbki „A”, „E” opisane w Tabeli 1). Dla porównania zamieszczono również wyniki pomiarów dla próbki, w której wytworzono w sposób sztuczny defekty w postaci pustki i pęknięcia. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 6 do rys 11.

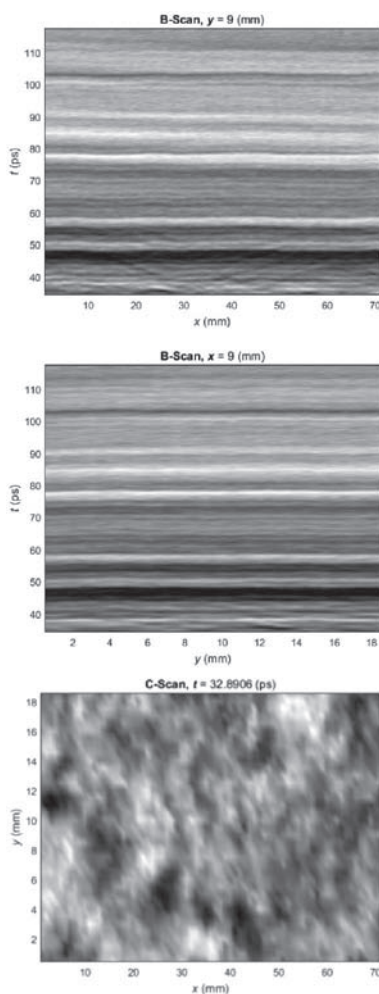
Dla każdej próbki przedstawiono:

- B – skan – zmierzony przy przemieszczaniu głowicy wzdłuż dłuższej osi próbki (x);
- B – skan – zmierzony przy przemieszczaniu głowicy wzdłuż krótszej osi próbki (y);
- C – skan – wykreślony dla wybranej chwili czasowej.



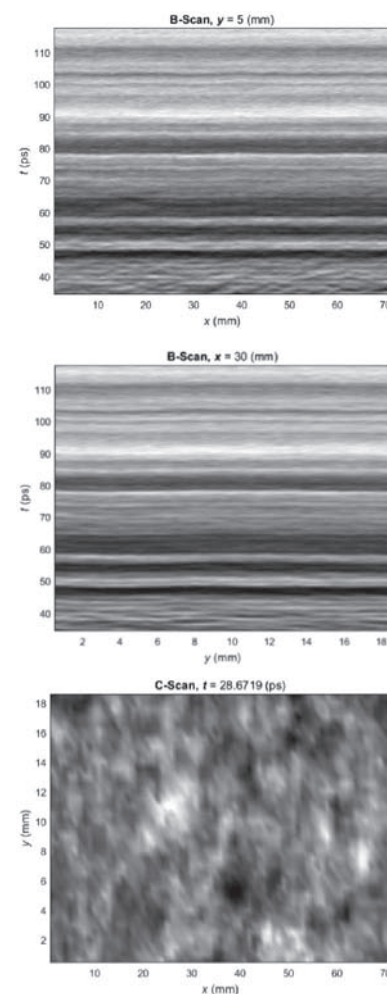
Rys. 6. Sygnały zmierzone dla próbki płyty włókniasto-cementowej "A"

Fig. 6. The signals measured for a sample of fiber-cement "A"



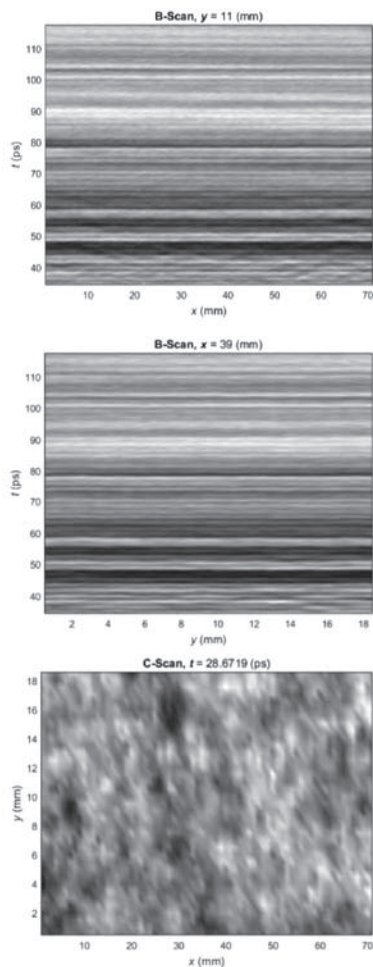
Rys. 7. Sygnały zmierzone dla próbki płyty włókniasto-cementowej "B"

Fig. 7. The signals measured for a sample of fiber-cement "B"



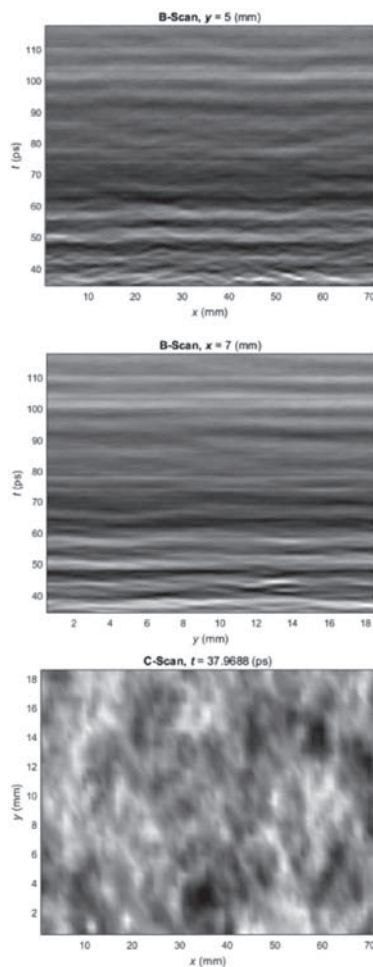
Rys. 8. Sygnały zmierzone dla próbki włókniasto-cementowej "C"

Fig. 8. The signals measured for a sample of fiber-cement "C"



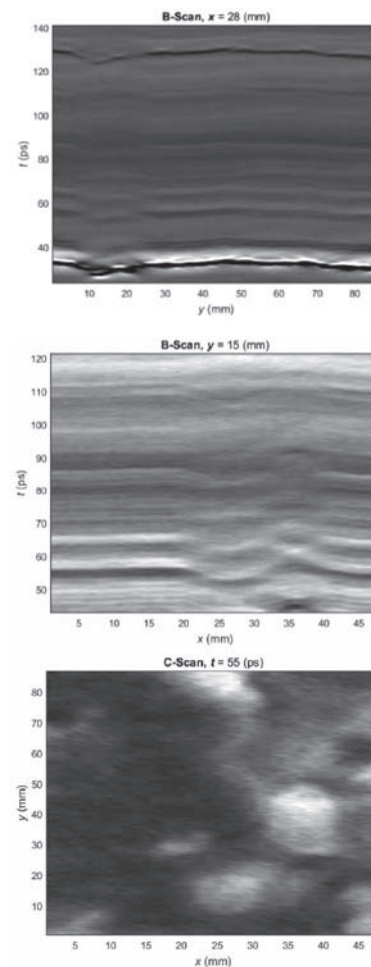
Rys. 9. Sygnały zmierzone dla próbki płyty włóknisto-cementowej „D”

Fig. 9. The signals measured for a sample of fiber-cement “D”



Rys. 10. Sygnały zmierzone dla próbki płyty włóknisto-cementowej „E”

Fig. 10. The signals measured for a sample of fiber-cement “E”



Rys. 11. Sygnały zmierzone dla próbki płyty włóknisto-cementowej z defektami sztucznymi

Fig. 11. The signals measured for a sample of fiber-cement with artificial defects

Wybór obrazów przeprowadzono kierując się występowaniem na nich dobrze widocznych wewnętrznych niejednorodności. Na przedstawionych obrazach zaobserwować można warstwową strukturę w przypadku wszystkich próbek. O ile w przypadku próbek „A” – „D” struktura wewnętrzna jest relatywnie regularna to w przypadku próbki „E” (rys. 10) widać dość silne zaburzenia sygnału co świadczy o występowaniu w tym przypadku niejednorodności struktury wewnętrznej i zaburzeniu układu warstw. Jednakże jeśli te zaburzenia porównamy z wynikami otrzymanymi dla próbki defektami sztucznymi (rys. 11) to łatwo zauważyć, że w przypadku próbki „E” mamy tylko niewielkie niejednorodności.

5. Podsumowanie

Mając na uwadze przedstawione wstępne wyniki pomiarów, można wysnuć wniosek, że metoda terahercowa dostarcza bardzo wiele informacji o wewnętrznej strukturze płyt włóknisto-cementowych. Mierzone sygnały powinny być przetwarzane tak aby uwypuklić wskazania potencjalnych defektów i zwiększyć rozdzielczość pomiarów. Zaletami proponowanej metody są: pomiar bezkontaktowy, dość duża szybkość pomiarów (do 10000 pomiarów typu A-skan na sekundę), duża rozdzielczość i możliwość identyfikacji warstw wewnętrznych. Poważną wadą jest natomiast relatywnie wysoki koszt aparatury pomiarowej,

choć w ostatnich latach można zaobserwować gwałtowny spadek cen i coraz większe grono producentów oferujących tego typu urządzenia.

6. Literatura

- [1] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, „Badania płyt włóknisto-cementowych zawierających materiały z recyklingu” *Materiały Budowlane*, nr 10, s. 27-29, 2015.
- [2] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, „Rewitalizacja elewacji budynków z zastosowaniem płyt włóknisto-cementowych” *Materiały Budowlane*, nr 11, s. 163-165, 2015.
- [3] PN-EN 12467:2013-03E - Płyty płaskie włóknisto-cementowe. Charakterystyka wyrobu i metody badań.
- [4] Z. Ranachowski, D. Józwiak-Niedźwiedzka, A.M. Brandt, T. Dębowski, “Application of Acoustic Emission Method to Determine Critical Stress in Fibre Reinforced Mortar Beams” *Archives of Acoustics*, Vol.37, Nr 3, s.261-268, 2012.
- [5] K. Schabowicz, Z. Ranachowski, D. Józwiak-Niedźwiedzka, Ł. Radzik, Jr. S. Kudela, T. Dvorak, “Application of X-ray microtomography to quality assessment of fibre cement boards” *Construction and Building Materials*, Vol. 110, s.182-188, 2016.
- [6] D. Zimdars, J. A. Valdmanis, J. S. White, G. Stuk, S. Williamson, W. P. Winfree, E. I. Madaras, *Technology and applications of terahertz imaging non-destructive examination: Inspection of space shuttle sprayed on foam insulation*, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* vol. 24 (2005). 570-577.

Informacje dla Autorów i Czytelników

PROFIL CZASOPISMA

Kwartalnik „Badania Nieniszczące i Diagnostyka” jest czasopismem naukowo-technicznym Wydawanym przez Stowarzyszenie Inżynierów Mechaników Polskich w Warszawie we współpracy z Towarzystwem Badań Nieniszczących.

Odbiorcami czasopisma są specjaliści, ośrodki naukowe, dydaktyczne i organizacje gospodarcze zainteresowane problematyką określoną w tytule czasopisma. Czasopismo jest wysyłane również do ważnych ośrodków zagranicznych zainteresowanych tą tematyką.

Czasopismo wydawane jest w języku polskim i jest dostępne zarówno w wersji drukowanej jak i w elektronicznej w internecie. Artykuły publikowane w języku polskim mają dodatkowo streszczenia oraz opisy rysunków i tabel w języku angielskim. Wybrane artykuły naukowe publikowane są w języku angielskim.

W czasopiśmie „Badania Nieniszczące i Diagnostyka” są publikowane oryginalne komunikaty i artykuły dotyczące:

- metodologii badań,
- certyfikacji w badaniach,
- charakterystyki urządzeń, sprzętu, materiałów i systemów w badaniach nieniszczących,
- diagnostyki,
- szkoleń, przepisów i normalizacji,
- praktyki badań w przemyśle i poradnictwa technicznego,
- wydarzeń, karier zawodowych specjalistów i ich doświadczeń zawodowych.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW

Objętość artykułu powinna wynosić do 10 stron, a komunikatu 1 ÷ 4 stron wydruku komputerowego na arkuszu formatu A4 bez tabulatorów i wcięć, czcionka Times New Roman 12, marginesy górny, dolny, lewy i prawy - 2,5 cm.

Rysunki i tablice z ich tytułami winny być umieszczane w tekście. Rysunki, wykresy i fotografie należy nazywać rysunkami (np. Rys. 1), a tablice (np. Tab. 3) i numerować cyframi arabskimi.

Opisy znajdujące się na rysunkach oraz grubość linii powinny mieć wielkość umożliwiającą zmniejszenie rysunku do 30%. Maksymalna szerokość rysunku jednoszpaltowego wynosi 8,5 cm, natomiast dwuszpaltowego 17,5 cm.

Rysunki wykonane komputerowo winny być w oddzielnych plikach w formacie JPEG min. 300 DPI.

Jednostki - układ SI.

Artykuł powinien zawierać:

- informacje o autorach: stopnie naukowe lub zawodowe;
- imię i nazwisko;
- tytuł artykułu;
- streszczenie (do 0,5 strony) z informacją dotyczącą problematyki artykułu, metodyki badań, obliczeń lub analizy problemu oraz wyniku końcowego;
- tekst wraz z podziałem na zatytułowane rozdziały;
- wnioski końcowe;
- wykaz literatury; pozycje literatury numerowane cyframi arabskimi w kwadratowych nawiasach i w kolejności cytowanej w tekście.

Artykuły w formie pliku Word należy przysłać na adres e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl wraz wypełnionym drukiem „Zgłoszenie publikacji” dostępnym na naszej stronie www.ptbnidt.pl.

OGŁOSZENIA I ARTYKUŁY PROMOCYJNE

Ogłoszenia i artykuły promocyjne w kwartalniku "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" – czasopiśmie ogólnopolskim dostępnym w formie drukowanej i elektronicznej na naszej stronie internetowej docierają do szerokiej grupy specjalistów.

W czasopiśmie zamieszczane są kolorowe i czarno-białe: ogłoszenia reklamowe na okładkach lub wewnątrz numeru oraz wrzutki dostarczane przez zleceniodawcę; artykuły techniczno-informacyjne jak również informacje o wydarzeniach oraz imprezach naukowo-technicznych. Cennik i forma ogłoszeń dostępne są na naszej stronie www.ptbnidt.pl.

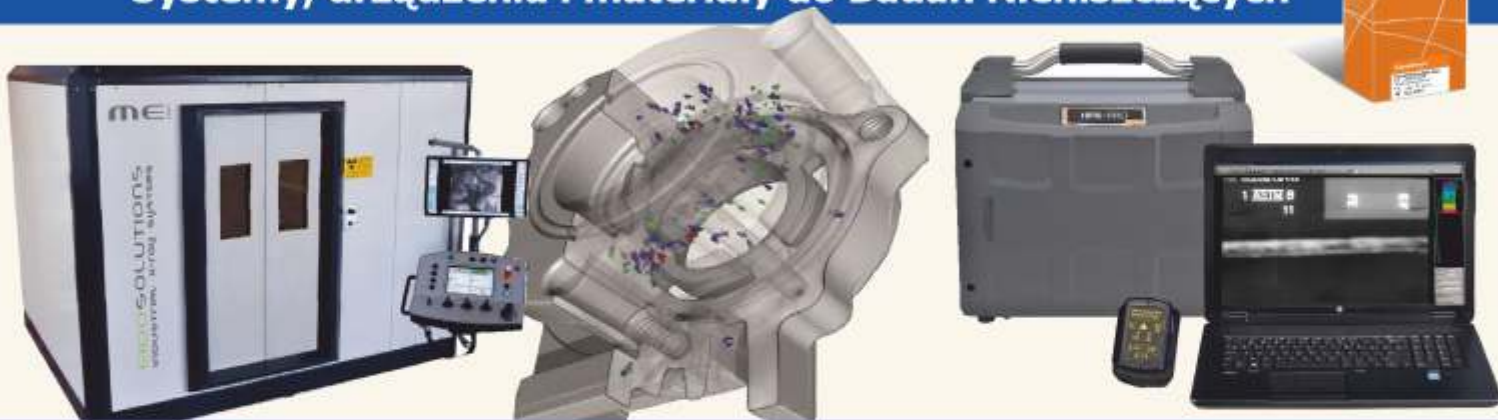
PRENUMERATA

Czasopismo będzie dostępne w prenumeracie w 2017 roku. Zasady prenumeraty zostaną podane w listopadzie 2016 na naszej stronie internetowej: www.ptbnidt.pl.



Kompleksowe rozwiązania

Systemy, urządzenia i materiały do Badań Nieniszczących



RT PT MT UT ET VT LT HT



Metalografia



**spektrometry OES oraz XRF
szlifierko-polerki
dyfraktometry XRD**



Przeglądy okresowe & Kalibracje & Naprawy & Wypożyczenia



XXVI LAT

Laboratorium Badań Nieniszczących



www.draco.com.pl