

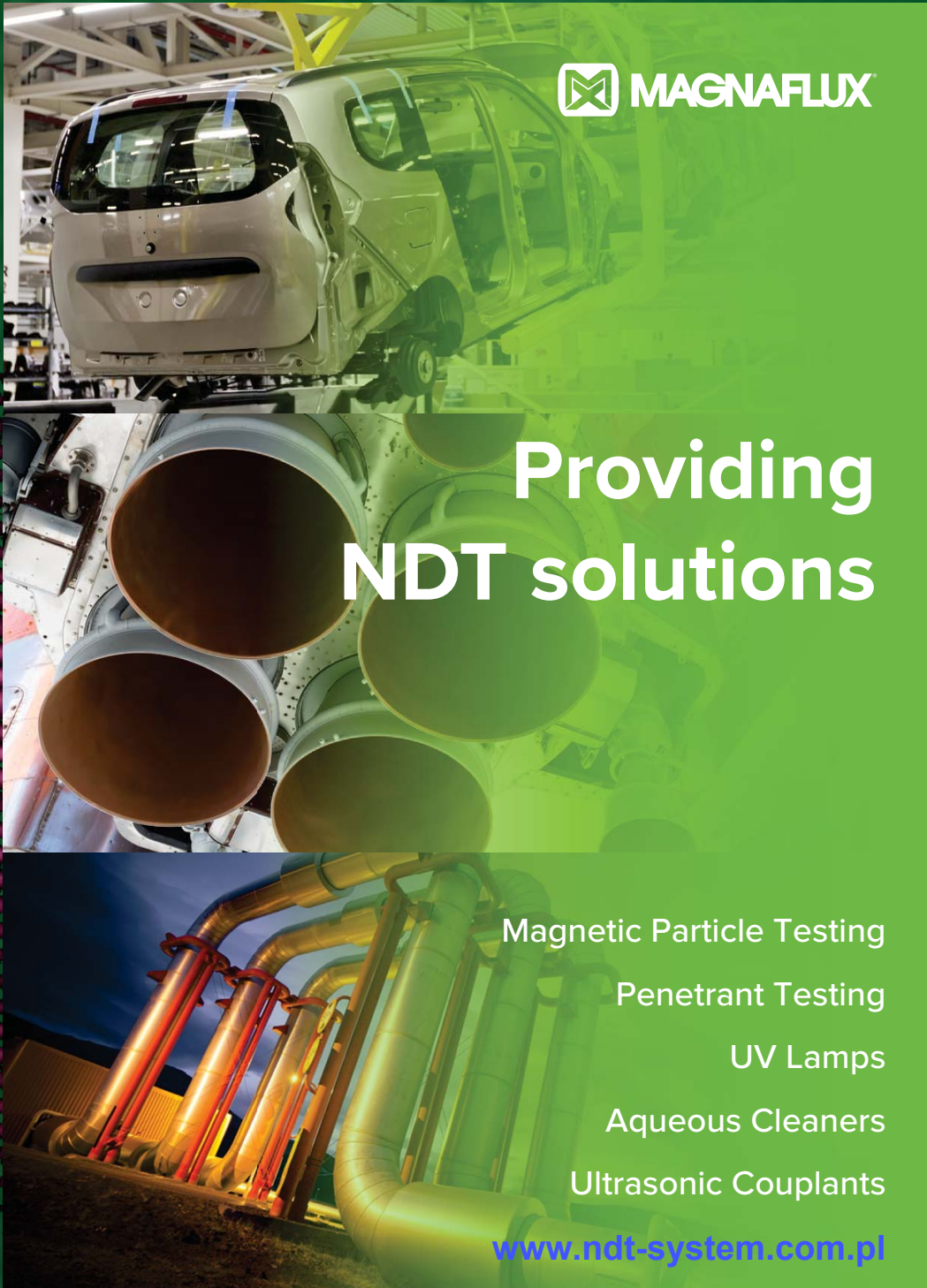
Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2023 i Diagnostyka


Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics

50. KKBN

www.kkbn.pl



 **MAGNAFLUX**

Providing NDT solutions

- Magnetic Particle Testing
- Penetrant Testing
- UV Lamps
- Aqueous Cleaners
- Ultrasonic Couplants

www.ndt-system.com.pl

DXR75P-HR

Mały system obrazowania o najwyższej rozdzielczości do krytycznych zastosowań

Detektor DXR75P-HR daje wysoką rozdzielczość pikseli 75 μm , wymaganą do rozróżnienia drobnych szczegółów w krytycznych zastosowaniach. Detektor obejmuje kontrolę spoin klasy B według ISO 17636-2, dając precyzyjne obrazy spełniające najostrzejsze wymagania.



Dzięki małej szerokości detektor jest idealny do tworzenia obrazów w sytuacjach o ograniczonej swobodzie ustawienia.

DXR75P-HR jest odpowiedni do zastosowań krytycznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola spoin w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce i lotnictwie:**
 - rurociągi transportowe
 - złożone konstrukcje (odcinki rurociągu)
 - rury kotłowe
 - przewody paliwowe
 - rury ciśnieniowe
 - zbiorniki ciśnieniowe i magazynowe
- **kontrola spoin w okrętownictwie**

DXR140P-HE

Duży system obrazowania o wysokim kontraście do radiografii o wysokiej energii

DXR140P-HE jest idealnym przenośnym detektorem przeznaczonym do zastosowań o wysokiej energii (izotopowych). Optymalne wewnętrzne ekranowanie zapobiega promieniowaniu rozproszonemu o niskiej energii, ujemnie wpływającemu na jakość obrazu i żywotność elektroniki.



Detektor DXR140P-HE może być stosowany z izotopami i promieniowaniem RTG o wysokiej energii (powyżej 450 kV), jest odpowiedni do ogólnych zastosowań radiograficznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola eksploatacyjna w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce:**
 - badanie korozji pod izolacją
 - pozycjonowanie zaworów
 - pomiar grubości ścianki
 - badanie podpór rurociągów
 - rury kotłowe
- **kontrola odlewów**
- **konserwacja, naprawa i przeglądy w lotnictwie**
- **przemysł zbrojeniowy i bezpieczeństwo**
- **kontrola konstrukcji:**
 - beton, mosty, podpory, ...
- **nauka, sztuka i archeologia**
- **kontrola linii energetycznych, kontrola GIS**



Badania Nieniszczące i Diagnostyka
Agenda Wydawnicza SIMP
ul. Sabaly 11a, 71-341 Szczecin
e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl
www.bnid.pl

ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF
Tomasz Chady

Z-CY REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF
Adam Sajek
Ryszard Pakos

CZŁONKOWIE REDAKCJI / MEMBERS OF THE BOARD
Jacek Grochowalski
Ryszard Łukaszk

REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY
Sławomir Mackiewicz, Marek Śliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH
Bogdan Piekarczyk

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ
/ EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH
Grzegorz Jezierski, Marek Lipnicki

PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ
/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH
Krzysztof Dragan, Darek Wojdała

DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS
Bogusław Ładecki,

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. Ermanno Cardelli, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

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. Antonio Faba, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Nikolaos Gouskos, *University of Athens, Grece*

Mgr Paweł Grześkowiak, *UDT, Polska*

Prof. Jerzy Hoła, *Politechnika Wroclawska, 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*

Dr 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. Helena Maria Geirinhas Ramos, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

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. Krzysztof Schabowicz, *Politechnika Wroclawska, Polska*

Prof. Valentin R. Skalsky, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Jacek Stania, *Łukasiewicz – Górnosłaski Instytut Technologiczny, Polska*

Prof. Jacek Szelażek, *IPPT PAN, Polska*

Dr Marek Śliwowski, *NDTEST 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 Wojas, *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 1-4/2023

ISSN 2451-4462 (ONLINE: 2543-7755)

VOLUMEN 8

SPIS TREŚCI

Adam Kondej, Dominik Kukla

Nieniszcząca ocena grubości przypowierzchniowej warstwy azotków w technicznych stopach żelaza metodą prądów wirowych* 12

Tomasz Katz

Modelowanie wykrywania wad kontaktowozmęczenia w szynach kolejowych metodą ultradźwiękową* 17

Piotr Bielawski

Diagnozowanie potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn* 25

Tomasz Gorzelańczyk, Krzysztof Schabowicz

Przegląd nowoczesnych metod nieniszczących wykorzystywanych do badania płyt włóknisto-cementowych* 30

Alireza Akhlaghi

Porosity measurement in CFRP* 37

Jerzy Kaszyński

Problematyka badań nieniszczących w budownictwie na krajowych konferencjach KKBN - przeżyjmy to jeszcze raz 40

Maciej Martyna, Roman Martyna

Możliwości i ograniczenia magnetycznej metody MRT badania stanu technicznego lin stalowych w czasie ich eksploatacji na urządzeniach dźwignicowych* 48

Mateusz Cybulski, Marek Lipnicki, Krzysztof Mroczek, Rafał Obląkowski

Badania ultradźwiękowe Phased Array złączów choinkowych stopki łopaty stopni L-0 po stronie turbiny i generatora w elektrowni jądrowej w Szwecji* 56

Bartosz Hyla, Michał Sobczak, Jakub Roemer

Badania nieniszczące materiałów kompozytowych metodą termografii laserowej* 62

Mateusz Napiórkowski, Mariusz Szóstak, Krzysztof Schabowicz

Nieniszczące, wizualne metody badań wykorzystujące wirtualną rzeczywistość w budownictwie – stan wiedzy* 67

Mateusz Wróbel, Maciej Szwed

Fitness for service dla urządzeń ciśnieniowych – doświadczenia UDT* 72

Maciej Szwed, Tomasz Jakubowski, Michał Targoński

Detekcja pęcherzy wodorowych metodami ultradźwiękowymi TOFD, TULA i Phased Array* 80

Karol Kaczmarek

Wymagania normy PN-EN ISO 9712 dla egzaminu praktycznego w sektorach przemysłowych* 88

Marcin Lewandowski, Jakub Rozbicki, Hanna Smach, Piotr Karwat,

Arkadiusz Szczurek, Jolanta Sala, Alicja Bera
Modelowe rozwiązania skanerów UTPA do badań spawów dla wież wiatrowych, sekcji płaskich oraz konstrukcji wielkogabarytowych on-shore/off-shore* 97

Jakub Spytek, Kajetan Dziedzic, Łukasz Ambroziński, Łukasz Pieczonka

Obrazowanie wad w strukturach cienkościennych z wykorzystaniem ultradźwiękowych fal przewodzonych* 101

Streszczenia artykułów zgłoszonych na 50. KKBN 105

Bogusław Ładecki, Joanna Augustyn-Nadzieja

Problemy pęknięcia zmęczeniowego wału wirnika wentylatora ze stali C45* 120

Informacje BNID - **Wspomnienie o plk. dr. inż. Romanie OSTROWSKIM** 124

Informacje dla Autorów i Czytelników 125

* Artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



PTBNiDT

Mateusz Napiórkowski¹, Mariusz Szóstak², Krzysztof Schabowicz²

1) Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Szkoła Doktorska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

2) Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Budownictwa Ogólnego, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Nieniszczące, wizualne metody badań wykorzystujące wirtualną rzeczywistość w budownictwie – stan wiedzy

Non-destructive, visual testing methods using virtual reality in construction - state-of-the-art

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono możliwości zastosowania wirtualnej rzeczywistości i innowacyjnych technologii (m.in. zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych, skaningu laserowego) do nieniszczących, wizualnych badań w budownictwie. Zastosowanie wirtualnej rzeczywistości umożliwia przeprowadzenie zdalnej i bezpiecznej inspekcji budowlanej, bez konieczności „fizycznego” wejścia i przebywania na niepewnej konstrukcji lub w obiekcie budowlanym, będącym w złym stanie technicznym. Wizualne badania stanu technicznego, uszkodzeń, można wykonać w wirtualnym świecie, za pomocą gogli VR. Wirtualna rzeczywistość to technologia, która pozwala na stworzenie trójwymiarowego wirtualnego świata, w którym użytkownik ma możliwość swobodnej eksploracji. Środowisko cyfrowe zostaje stworzone w oparciu o dane pozyskane w sposób bezpieczny (zdalny) przy pomocy skanerów laserowych i dronów. Zapewnia to dokładne odwzorowanie obiektu w środowisku cyfrowym oraz zapewnia możliwość wykonania precyzyjnej inspekcji. VR może również stanowić platformę do koordynacji międzybranżowej dla obiektów wymagających planów naprawczych przy braku możliwości wizji lokalnej. W artykule przedstawiono obecny stan wiedzy oraz zaproponowano kolejne kierunki badań.

Słowa kluczowe: wirtualna rzeczywistość, badania nieniszczące, nowe technologie, budownictwo

ABSTRACT

The paper presents the possibilities of using virtual reality and innovative technologies (including the use of drones, laser scanning) for non-destructive, visual inspections in construction. The use of virtual reality makes it possible to carry out a remote and safe construction inspection, without the need to "physically" enter and stay on a precarious structure or in a construction object that is in poor condition. Visual inspections of technical condition, damage, can be performed in a virtual world, using VR goggles. Virtual reality is a technology that allows the creation of a three-dimensional virtual world in which the user is free to explore. The digital environment is created based on data acquired securely (remotely) using laser scanners and drones. This provides an accurate representation of the object in the digital environment and ensures that precise inspections can be performed. VR can also provide a platform for interprofessional coordination for facilities requiring remediation plans in the absence of on-site inspection. The article presents the current state of knowledge and proposes future research directions.

Keywords: virtual reality, nondestructive testing, new technology, construction

1. Wprowadzenie

Obecnie znajdujemy się w okresie czwartej rewolucji przemysłowej (Przemysł 4.0 – digitalizacja). Czwarta rewolucja przemysłowa obejmuje proces transformacji technologicznej i charakteryzuje się wykorzystaniem Internetu (sieci) jako spoiwa do połączenia wszystkich procesów oraz ich uczestników. Dzięki sieci mamy możliwość zdalnego podglądu w czasie rzeczywistym oraz interakcji w procesy produkcyjne, logistyczne oraz decyzje. Przemysł ten opiera się na coraz to silniejszym przenikaniu się cyfrowego i analogowego świata. Pomimo wciąż rozwijającego się przemysłu 4.0, chociażby przez rozwój sieci 5 i 6G, trwają prace nad przemysłem 5.0, w którym to człowiek jest w centrum, a technologia otacza go i dopełnia jego pracę. Przemysł 5.0 zorientowany jest na człowieka, a otaczające go pozostałe dwa filary skierowane są w kierunku

zrównoważonego rozwoju oraz odporności. Zorientowanie na człowieka oznacza umiejscowienie ludzkich potrzeb i interesów w sercu procesu produkcji, które możliwe jest dzięki zastosowaniu nowoczesnych i innowacyjnych technologii, między innymi wirtualnej rzeczywistości. Wirtualna rzeczywistość otwiera przed nami nowe możliwości, których do tej pory nie znaliśmy.

Wirtualna rzeczywistość jest jedną z innowacyjnych technologii, dzięki której praca człowieka może zostać dopełniona. Człowiek jest kluczową postacią procesu produkcji, tzn. posiada wiedzę oraz umiejętności zrozumienia problemów a technologia, jako jego dopełnienie, pozwala mu na szybsze, łatwiejsze oraz bezpieczniejsze wykonanie zadania. W artykule przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat nieniszczących, wizualnych metod badań wykorzystujących wirtualną rzeczywistość w budownictwie oraz zaproponowano możliwości zastosowania wirtualnej rzeczywistości (ang. virtual reality) jako element poprawiający bezpieczeństwo pracy, podczas wizualnych

*Autor korespondencyjny.

E-mail: mariusz.szostak@pwr.edu.pl

badania obiektów budowlanych będących w złym stanie technicznym, uniemożliwiającym fizyczne wejście do obiektu.

2. Wirtualna rzeczywistość w badaniach naukowych

Wirtualna rzeczywistość jeszcze do niedawna kojarzona była głównie ze światem rozrywki, w szczególności z grami komputerowymi. Świat gier komputerowych pozwalał graczowi na niemal fizyczne doświadczenie innej rzeczywistości – wirtualnej.

Wirtualna rzeczywistość to komputerowo skonstruowane trójwymiarowe środowisko, które pozwala użytkownikowi na poruszanie się i interakcję, której wynikiem jest symulacja trzech z pięciu zmysłów człowieka - najczęściej wzroku, słuchu oraz dotyku [1]. Wirtualna rzeczywistość jest jedną ze składowych kontinuum rzeczywistości, które rozciąga się od świata rzeczywistego, przez rozszerzoną rzeczywistość oraz rozszerzoną wirtualność, do wirtualnej rzeczywistości.[2]

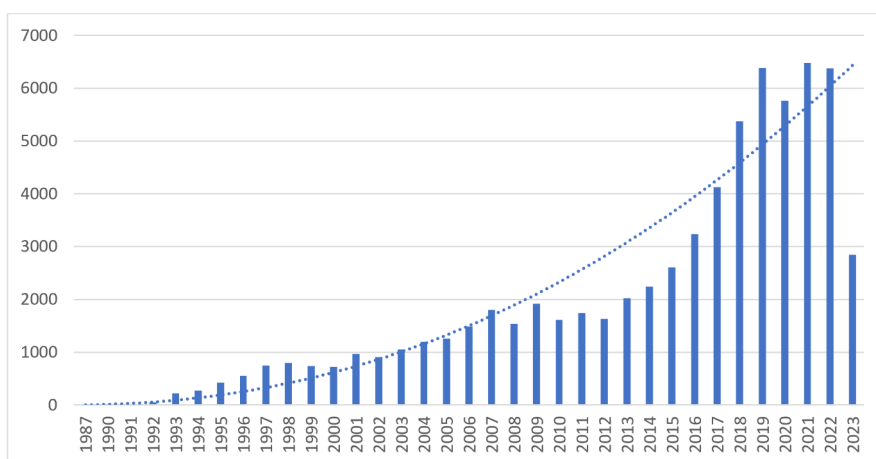
Stosowanie wirtualnej rzeczywistości staje się coraz powszechniejsze. Jest ona obecna w różnych branżach m. in. w architekturze [3], medycynie [4], a także branży rozrywkowej [5]. Zauważalne jest również duże

zainteresowanie wykorzystaniem tej technologii w budownictwie. Zastosowanie w badaniach naukowych wirtualnej rzeczywistości występuje już od 35 lat. Pierwszy artykuł na ten temat został opublikowany w „The Sciences” już w 1987 roku [6]. Z kolei pierwsze praktyczne wykorzystanie wirtualnej rzeczywistości przedstawiono w pracy [7] z 1998 roku, dzięki opracowaniu aplikacji Lightning VR [7].

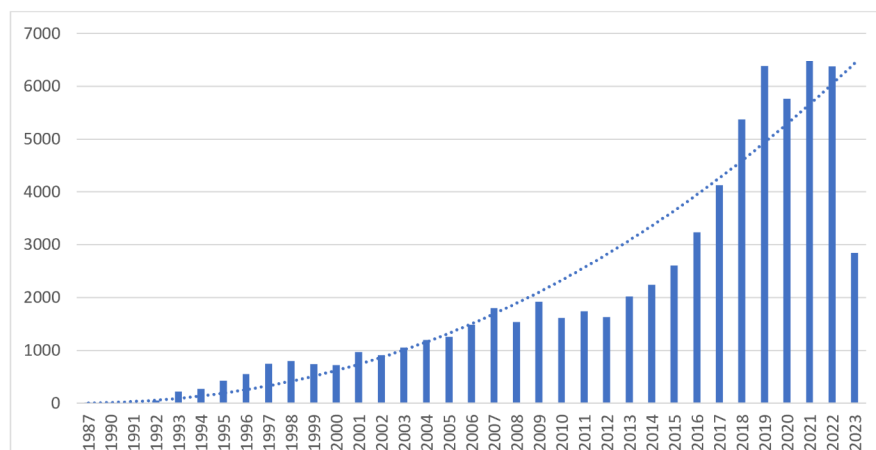
Na rys. 1 przedstawiono dynamikę wzrostu zainteresowania przez badaczy technologią wirtualnej rzeczywistości w badaniach naukowych w ostatnich 35 latach. Dane do opracowania wykresu zostały pozyskane za pomocą wyszukiwarki artykułów naukowych bazy danych Web of Science dla słowa kluczowego: virtual reality.

Z rys. 1 wynika, że w ostatnich latach liczba publikacji poświęconych temu zagadnieniu gwałtownie wzrasta. Widoczny wzrost nastąpił od 2012 roku, a tendencja wzrostowa utrzymuje się na wysokim poziomie.

Z kolei w budownictwie wirtualna rzeczywistość jest obecna od 1993 roku i pierwszego artykułu, dotyczącego teorii percepcji oraz systemów obrazowania [8]. rys. 2 przedstawiono liczbę artykułów dla słów kluczowych: virtual reality oraz civil engineering indeksowanych w bazie danych Web of Science.



Rys. 1. Wirtualna rzeczywistość w pracach indeksowanych w bazie danych Web of Science dla słowa kluczowego: virtual reality.



Rys. 2. Wirtualna rzeczywistość w pracach indeksowanych w bazie danych Web of Science dla słów kluczowych: virtual reality i civil engineering

Jak można zauważyć, zainteresowanie w branży budowlanej pokrywa się z przedstawionym na rys. 1 i do dnia dzisiejszego utrzymuje tendencję wzrostową. W 2017 roku odnotowano znaczny wzrost liczby publikacji o 107%, w stosunku do roku poprzedniego. Ponowny wzrost liczby publikacji zbiega się z pojawieniem się wizji piątej rewolucji przemysłowej (2021) i stale rośnie.

3. Wirtualna rzeczywistość w badaniach nieniszczących

Zgodnie z artykułem [9] różnica między metodami półniszczącymi i nieniszczącymi polega na tym, że w przypadku metod półniszczących materiał jest zwykle lokalnie i powierzchownie uszkodzany podczas badania. Takie uszkodzenia nie występują z kolei w przypadku metod nieniszczących. Jest to jeden z powodów, dla których są one odpowiednie do stosowania podczas badania dużych powierzchni do znacznej głębokości oraz w budownictwie ogólnym. Co więcej, w przypadku badań nieniszczących, pomiary mogą być powtarzane, dzięki czemu wyniki testów mogą być weryfikowane, zatwierdzone i walidowane.

Wirtualna rzeczywistość może stanowić nową podstawę dla badań nieniszczących lub ich dopełnienie. Mimo dużego zainteresowania zastosowaniem wirtualnej rzeczywistości to technologia ta, w aspekcie badań nieniszczących, jest rzadko spotykana. Analiza publikowanych prac indeksowanych w bazie danych Web of Science wykazała, że dla słów kluczowych: virtual reality oraz non-destructive otrzymano 33 prace.

Pierwsza praca [10] pojawiła się już w 1999 roku, w której autorzy zastanawiali się, jaką rolę, w rozwoju badań nieniszczących, będzie pełniło modelowanie elementu i symulowanie jego pracy w środowisku wirtualnym. Autorzy dostrzegli korzyści z możliwości uzyskania informacji zwrotnej w czasie rzeczywistym, bez konieczności wytworzenia rzeczywistego elementu [10].

W niniejszej pracy omówiono prace, w których wirtualna rzeczywistość została wykorzystana, jako pomocnicza lub podstawowa metoda badań nieniszczących. Artykuły [11-12] pomimo, że dotyczą branży lotniczej z powodzeniem mogą zostać zaaplikowane w branży budowlanej.

W pracy [11] przedstawiono wykorzystanie wirtualnej oraz rozszerzonej rzeczywistości do wykonywania badań ultradźwiękowych. Zaproponowana przez autorów metoda zakłada, że dane z badań ultradźwiękowych (UT) są powiązane z ich współrzędnymi przestrzennymi i wektorem kierunku do badanej próbki. Odpowiednio przetworzone wyniki badań nieniszczących (NDT) mogą być wizualizowane bezpośrednio na próbce w czasie rzeczywistym przy użyciu rzeczywistości rozszerzonej lub wirtualnej. Aby umożliwić połączenie danych NDT z obiektem fizycznym, wykorzystywany jest system śledzenia 3D. Proces badania składa się z rejestracji, przetwarzania i wizualizacji danych. Wszystkie trzy kroki są wykonywane w czasie rzeczywistym. Dane są rejestrowane przez interfejs UT-USB, przetwarzane na stacji roboczej PC i wyświetlane za pomocą systemu rzeczywistości mieszanej (MR). System umożliwia wizualizację 3D ultradźwiękowych danych NDT w czasie

rzeczywistym, które są bezpośrednio wyświetlane w wirtualnej reprezentacji. Dzięki prowadzeniu badań z wykorzystaniem rozszerzonej i wirtualnej rzeczywistości pojawia się możliwość wspomaganie operatora podczas ręcznego procesu badania. Zaproponowane przez autorów nowe podejście skutkuje znacznie bardziej intuicyjnym procesem testowania i opracowaniem zestawu danych przygotowanych do zapisu w środowisku cyfrowego bliźniaka.

Z kolei w artykule [12] udowodniono, że stosowanie obrazów 2D jest niewystarczające do zilustrowania i wyjaśniania wyników testów badań nieniszczących. Autorzy wskazali konieczność opracowania bardziej odpowiednich narzędzi i metod wizualizacji 3D, w celu poprawy zrozumienia i interpretacji danych NDT. Autorzy opracowali interfejs rzeczywistości rozszerzonej umożliwiający wizualizację wyników z badań nieniszczących bezpośrednio na badanym elemencie/konstrukcji. W ten sposób operator może łatwiej i szybciej zidentyfikować obszary wymagające dalszego badania. Według autorów ten tryb wizualizacji jest bardziej intuicyjny niż analiza danych liczbowych, oszczędza czas i zmniejsza złożoność zadania inspekcji.

W artykule [13] zaproponowano metodę inspekcji mostów, która przenosi konstrukcje mostów do środowiska cyfrowego, umożliwiając ich późniejszą weryfikację w rzeczywistości wirtualnej (VR). Według autorów nowe podejście zapowiada się, jako wysoce efektywne pod względem interpretacji wyników, dostępu do kluczowych obszarów oraz zapewnienia bezpieczeństwa inspektorom. Praca stanowi istotny krok w kierunku opracowania cyfrowych bliźniaków elementów infrastruktury w środowisku miejskim. Do głównych zalet tej metody uznano: możliwość dokonania inspekcji z dowolnego miejsca na świecie (można to porównać do konsultacji medycznej z lekarzami z całego świata), możliwość inspekcji elementów bez konieczności używania dźwigów lub podnośników oraz zwiększenie bezpieczeństwa dla osób dokonujących kontroli.

4. Propozycja zastosowania wirtualnej rzeczywistości w badaniach naukowych

Zdaniem autorów, głównym efektem zastosowania wirtualnej rzeczywistości może być poprawa bezpieczeństwa osób pracujących przy wykonywaniu inspekcji. Spodziewanymi dodatkowymi rezultatami jest zwiększona dokładność kontroli oraz ich wnikliwość, rozumiana jako możliwość dotarcia do miejsc wcześniej trudno- lub niedostępnych.

Podstawę zastosowania wirtualnej rzeczywistości w planowanych badaniach stanowić będzie chmura punktów, czyli model reprezentujący rzeczywisty obiekt wraz z jego cechami np. kolorem. [14]. Chmura punktów jest to zbiór punktów, w którym każdy punkt posiada przypisaną współrzędną (X, Y, Z) oraz barwę (RGB) [15]. Chmury punktów mogą być pozyskiwane przy pomocy czujników np. skanerów LiDAR, zestawu kamer lub jednej kamery poruszającej się wokół obiektu. Obecnie rozwiązanie to jest coraz bardziej popularne ze względu na łatwość i szybkość pozyskania danych. W badaniach pozyskanie chmury

punktów będzie realizowane na dwa sposoby, za pomocą bezzałogowego statku powietrznego (elementy zewnętrzne), za pomocą autonomicznego robota z mobilnym skanerem laserowym (MLS) (elementy wewnątrz analizowanego obiektu).

Bezzałogowe statki powietrzne, potocznie zwane dronami, znajdują coraz szersze zastosowanie. Są one dostępne i powszechnie wykorzystywane w różnych sektorach gospodarki, takich jak produkcja filmowa, monitorowanie bezpieczeństwa [16], czy przemysł budowlany [17]. W budownictwie drony służą między innymi do pomiarów terenowych za pomocą fotogrametrii [18], bieżącej kontroli postępu prac [19] oraz inspekcji obiektów, np. takich jak mosty [20]. W przypadku dronów, kluczową rolę odgrywa ich wyposażenie, takie jak kamery i sensory laserowe. To właśnie dzięki nim możliwe jest przeprowadzanie nalotów oraz skanowanie całych struktur, w celu pozyskania chmur punktów pomiarowych. Sam dron, jako statek powietrzny byłby niewystarczający, gdyby nie został wyposażony w tak zaawansowane technologie. W badaniach dron zostanie wykorzystany do pozyskania chmury punktów elewacji oraz dachu (elementów zewnętrznych) obiektu budowlanego, która będzie stanowiła jedną ze składowych modeli, w którym będzie możliwa inspekcja wizualna.

Elementy wnętrza zostaną poddane skanowaniu za pomocą metody dynamicznej [21]. W celu zapewnienia maksymalnego bezpieczeństwa, skanowanie będzie realizowane przy użyciu dwóch urządzeń: skanera mobilnego oraz autonomicznego robota, np. Spot z firmy Boston Dynamics, na którym umieszczony zostanie skaner. Możliwość wykorzystania autonomicznego robota zostało opisane w artykule [22]. Taki zestaw zostanie wprowadzony do obiektu w celu przeprowadzenia kompleksowej eksploracji, mającej na celu osiągnięcie pełnego zeskanowania obiektu.

Po przeprowadzeniu procesu skanowania pozyskane dane zostaną poddane obróbce, modelowaniu i zostaną przeniesione, za pomocą odpowiedniego oprogramowania, do wirtualnej rzeczywistości. Za pomocą gogli VR oraz dzięki kontrolerom wirtualnej rzeczywistości osoba wykonująca inspekcję zostanie „przeniesiona” do wirtualnej rzeczywistości. W wirtualnym środowisku możliwa będzie ocena stanu technicznego obiektu, nanoszenie uwag i komentarzy. Proponowany sposób prowadzenia inspekcji, poza poprawą bezpieczeństwa, ułatwi proces komunikacji przy identyfikacji miejsc wymagających naprawy.

Zaproponowana metoda będzie miała na celu weryfikację wizualną, na podstawie której będzie można określić m.in. skalę zagrożenia, miejsca wymagające napraw, a także pozwoli stwierdzić czy obiekt może być dłużej użytkowany.

Jak przedstawiono w artykule, na podstawie aktualnego stanu wiedzy, możliwe jest zastosowanie wirtualnej rzeczywistości do wizualizacji wyników badań, jako narzędzie towarzyszące podstawowym badaniom nieniszczącym. Analiza aktualnych trendów, przedstawiona w pracy [23], związanych z rozwojem wirtualnej rzeczywistości wskazuje, że pod względem liczby publikacji sytuacja powinna zacząć się stabilizować. Mimo, że pojawiają się nowe propozycje metod oraz prace zajmujące się tą

technologią, to istotnym problemem jest brak ich praktycznego wykorzystania.

Zdaniem autorów niezbędne jest przeprowadzenie projektów pilotażowych, w których możliwe będzie zweryfikowanie i praktyczne zastosowanie tej technologii. W dzisiejszych czasach sama technologia wirtualnej rzeczywistości nie stanowi przeszkody i wydaje się być wystarczająca do wykonania proponowanego planu badań.

5. Podsumowanie

Wirtualna rzeczywistość zyskuje dużą popularność, co widać po tendencji wzrostowej prowadzonych badań i publikowanych prac z nią związanych. Zainteresowanie jej zastosowaniem w budownictwie również rośnie, co jest dobrym prognostykiem na przyszłość. Również nowe technologie, takie jak bezzałogowe statki powietrzne, skanery laserowe, roboty autonomiczne, zaproponowane do zastosowania w planowanych badaniach, są już obecne w budownictwie i ich zastosowanie również jest coraz częstsze. Łącząc wszystkie te technologie podjęta zostanie próba podążania w planowanych badaniach za nowymi trendami związanymi z Przemysłem 5.0.

6. Bibliografia

- [1] Guttentag D.A. "Virtual Reality: Applications and Implications for Tourism", *Tourism Management*, No. 31(5), 637-651, 2010
- [2] Milgram P. Kishino F. "A Taxonomy of Mixed Reality", *Transactions on Information Systems*, Vol. E77-D no.12, 1994
- [3] Zhou W. Whyte J. Sacks R. "Construction safety and digital design: A review", *Automation in Construction*, 22, 102-111, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2011.07.005>.
- [4] Cannon W.D. Garrett Jr. W.E. Hunter R.E. Sweeney H.J. Eckhoff D.G. Nicandri G.T., Hill J.A. "Improving residency training in arthroscopic knee surgery with use of a virtual-reality simulator: a randomized blinded study", *The Journal of Bone and Joint Surgery* 96 (21), 1798 - 1806, 2014 <http://dx.doi.org/10.2106/JBJS.N.00058>.
- [5] Dickinson J.K. Woodard P. Canas R. Ahamed S. Lockston D. "Game-based trench safety education: development and lessons learned", *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 16 , 119-134, 2011, <http://www.itcon.org/2011/8>.
- [6] Wright, R. „Virtual Reality” *The Sciences*, 27(6), 8-10, 1987, DOI:10.1002/j.2326-1951.1987.tb02976.x
- [7] Blach R. Landauer J. Rosch A. Simon A. "A highly flexible virtual reality system", *Future Generation Computer Systems*, 14, 167-178, 1998
- [8] Smets GJF. Overbeeke CJ. Stappers PJ. „Perception theory and imaging systems”, *Advanced Technologies*, 405-410, 1993.
- [9] Schabowicz K. „Non-Destructive Testing of Materials in Civil Engineering”, *Materials*, 12, 2019, doi:10.3390/ma12193237
- [10] Generazio E.R. Harris C.E. "The role of modelling and simulation in the development of advanced non-destructive evaluation systems", *The Aeronautical Journal*, czerwiec 1999, 325-328.
- [11] Rehbein J. Lorenz S. J. Holtmannspötter J. Valeske B. „3D-Visualization of Ultrasonic NDT Data Using Mixed Reality”, *Journal of Nondestructive Evaluation* 41:26, 2022, DOI:

- 10.1007/s10921-022-00860-7.
- [12] Ababsa F. „Augmented Reality Application in Manufacturing Industry: Maintenance and Non-destructive Testing (NDT) Use Cases”, 7th International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics, 2020, Lecce, Italy, pp.333-344.
- [13] Omer M. Margetts L. Mosleh M. Hewitt S. Parwaiz M. “ Use of gaming technology to bring bridge inspection to the office” , Structure and Infrastructure Engineering, 15:10, 1292-1307, DOI: 10.1080/15732479.2019.1615962
- [14] Oliveira Rente P. Brites C. Ascenso J. Pereira F. “Graph-based Static 3D Point Clouds Geometry Coding”, IEEE Transactions on Multimedia, vol. 21, no. 2, pp. 284-299, Feb. 2019, DOI 10.1109/TMM.2018.2859591
- [15] Nowobilski T. Szóstak M. “Kontrola stanu technicznego rusztowań budowlanych z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych”, Przegląd Komunikacyjny, 23-25, 2-3/2022.
- [16] T. Addabbo et al., "An Automatic Battery Recharge and Condition Monitoring System for Autonomous Drones," 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, Roma, Italy, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138314.
- [17] Nowobilski T. Szóstak M. „Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie”, Przegląd Komunikacyjny, 26-31, 2-3/2022.
- [18] Lee J. Jo H. Oh J. “Application of Drone LiDAR Survey for Evaluation of a Long-Term Consolidation Settlement of Large Land Reclamation”, Appl. Sci. 2023, 13, 8277, <https://doi.org/10.3390/app13148277>
- [19] Lee S. Song M. Kim S. Won J. “Change Monitoring at Expressway Infrastructure Construction Sites Using Drone”, Sensors and Materials, Vol. 32, No. 11, 3923–3933, 2020.
- [20] Nowobilski T. „Bezzałogowe statki powietrzne w kontroli obiektów budowlanych” Builder 02 (271), 18-20, 2020. DOI: 10.5604/01.3001.0013.7500
- [21] Liu Z. Oosterom P. Balado J. Swart A. Beers B. “Data frame aware optimized Octomap-based dynamic object detection and removal in Mobile Laser Scanning data”, Alexandria Engineering Journal, 327-344, Volume 74, 2023.
- [22] Lindqvist B. Karlsson S. Koval A. Tevetzidis I. Haluska J. Kanellakis C. Agha-mohammadi A. Nikolakopoulos, G. „Multimodality robotic systems: Integrated combined legged-aerial mobility for subterranean search-and-rescue”, Robotics and Autonomous Systems, Volume 154, 2022, DOI: doi.org/10.1016/j.robot.2022.104134.
- [23] Saavedra M. L. Miro - Amarante L. Domínguez – Morales M. „Augmented and Virtual Reality Evolution and Future Tendency”, Applied Sciences, 10, 2020, DOI:10.3390/app10010322.