

## STANOWISKO LABORATORYJNE DO ZDALNEGO BADANIA I ANALIZY POŁĄCZEŃ SPAWANYCH Z WYKORZYSTANIEM LASEROWYCH CZUJNIKÓW PRZEMIESZCZEŃ

Adam MUC<sup>1</sup>, Adam SZELEZIŃSKI<sup>2</sup>

1. Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni  
e-mail: a.muc@we.am.gdynia.pl
2. Wydział Mechaniczny, Akademia Morska w Gdyni  
e-mail: a.szelezinski@wm.am.gdynia.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono propozycję dedykowanego stanowiska laboratoryjnego, w którym z wykorzystaniem technologii internetowych i sieci komputerowej można diagnozować, za pomocą optycznych czujników przemieszczeń, jakość połączeń spawanych w płytach stalowych. W ramach ćwiczenia przedstawiono również możliwości analizy otrzymanych danych wibrodiagnostycznych w dziedzinie czasu i częstotliwości. Opisane w pracy ćwiczenie, na tle innych - realizowanych na kierunku mechanicznym w Akademii Morskiej w Gdyni, cechuje się przede wszystkim tym, że pozwala studentom w sposób zdalny i z wykorzystaniem technologii informatycznych rejestrować, analizować i diagnozować układy mechaniczne metodą wibrodiagnostyczną.

**Słowa kluczowe:** stanowisko laboratoryjne, czujniki przemieszczeń, NDT, sieć LAN, analiza danych.

### 1. WSTĘP

Badania nieniszczące NDT (ang. *Non-Destructive Testing*) są badaniami, dzięki którym można uzyskać informacje o stanie, właściwościach i ewentualnych wadach badanego obiektu bez ingerowania w jego cechy użytkowe (bez naruszenia jego spójności ani pogorszenia cech funkcjonalnych czy użytkowych).

Obiektami technicznymi badań nieniszczących są m.in. połączenia złączy spawanych, ale też połączenia klejone, zgrzewane i lutowane oraz obiekty wykonane z materiałów kompozytowych. Badania nieniszczące pozwalają na ocenę stanu połączeń spawanych bez fizycznej ingerencji w ich strukturę [1, 2].

Badania NDT są stosowane w celu osiągnięcia odpowiednio wysokiego poziomu jakości i bezpieczeństwa. Wykonuje się je w przemyśle oraz w laboratoriach ośrodków naukowych podczas projektowania i określania własności nowych materiałów. Badania nieniszczące można prowadzić na różnych etapach wytwarzania złączy spawanych: przed spawaniem, w trakcie i po spawaniu. Diagnostyczne eksploatacyjne badania nieniszczące wykonuje się, aby uniknąć niespodziewanych uszkodzeń obiektów technicznych. Niewykonywanie nieniszczących badań diagnostycznych eksploatacyjnych obiektów technicznych

(np. samolotów, statków, urządzeń dźwigowych) bądź przeprowadzanie ich niezgodnie z przyjętymi zasadami, może prowadzić do katastrof i awarii [4].

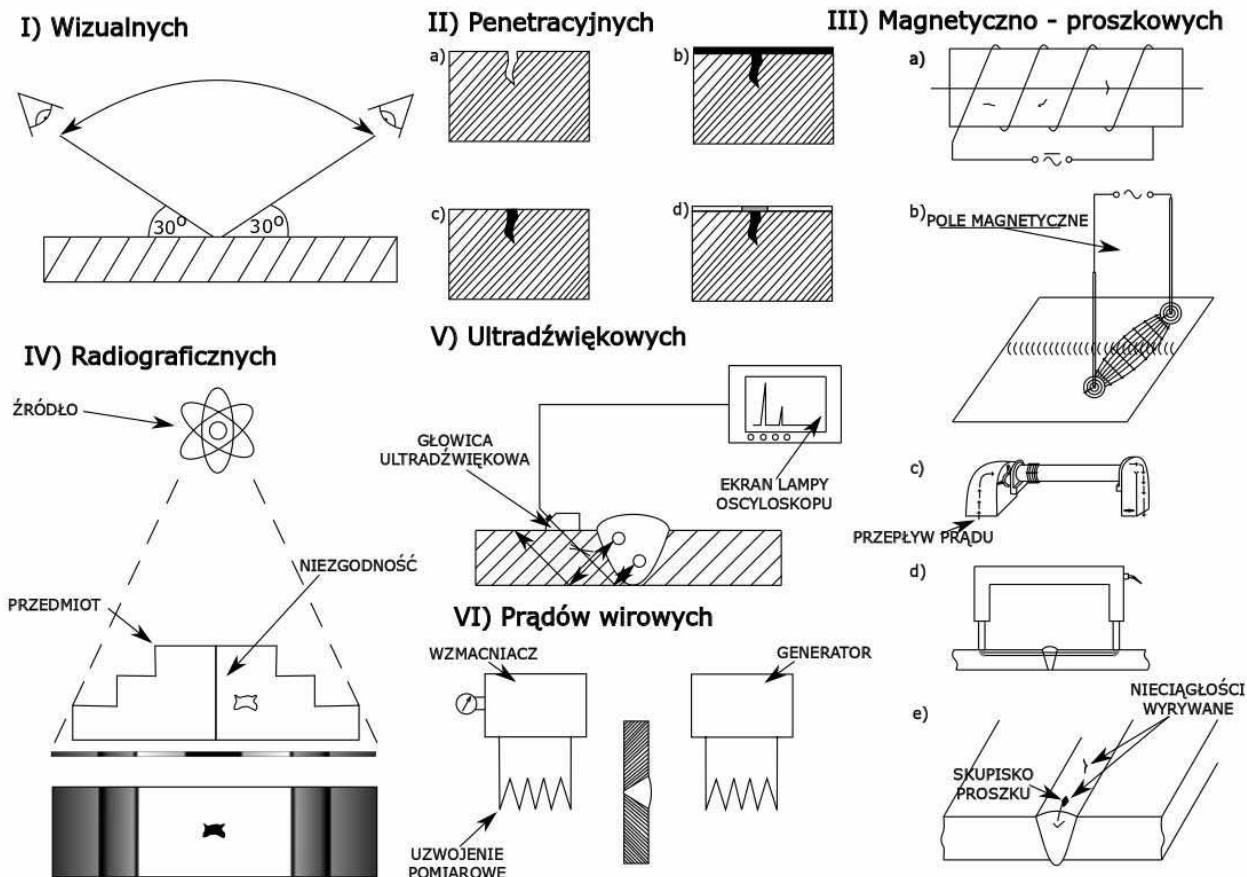
Rosnące zainteresowanie badaniami NDT i coraz większe oczekiwania stawiane otrzymanym za ich pomocą informacjom diagnostycznym są czynnikiem ewolucyjnego doskonalenia metod badań nieniszczących. Powoduje to rosnące znaczenie metod badań nieniszczących jako bardzo ważnego elementu współczesnej techniki [1,3].

W zastosowaniach przemysłowych korzysta się głównie z sześciu podstawowych metod badań: I - wizualnych (VT), II - penetracyjnych (PT), III - magnetyczno - proszkowych (MT), IV - radiograficznych (RT), V - ultradźwiękowych (UT), VI - prądów wirowych (ET), które schematycznie zostały pokazane na rysunku 1.

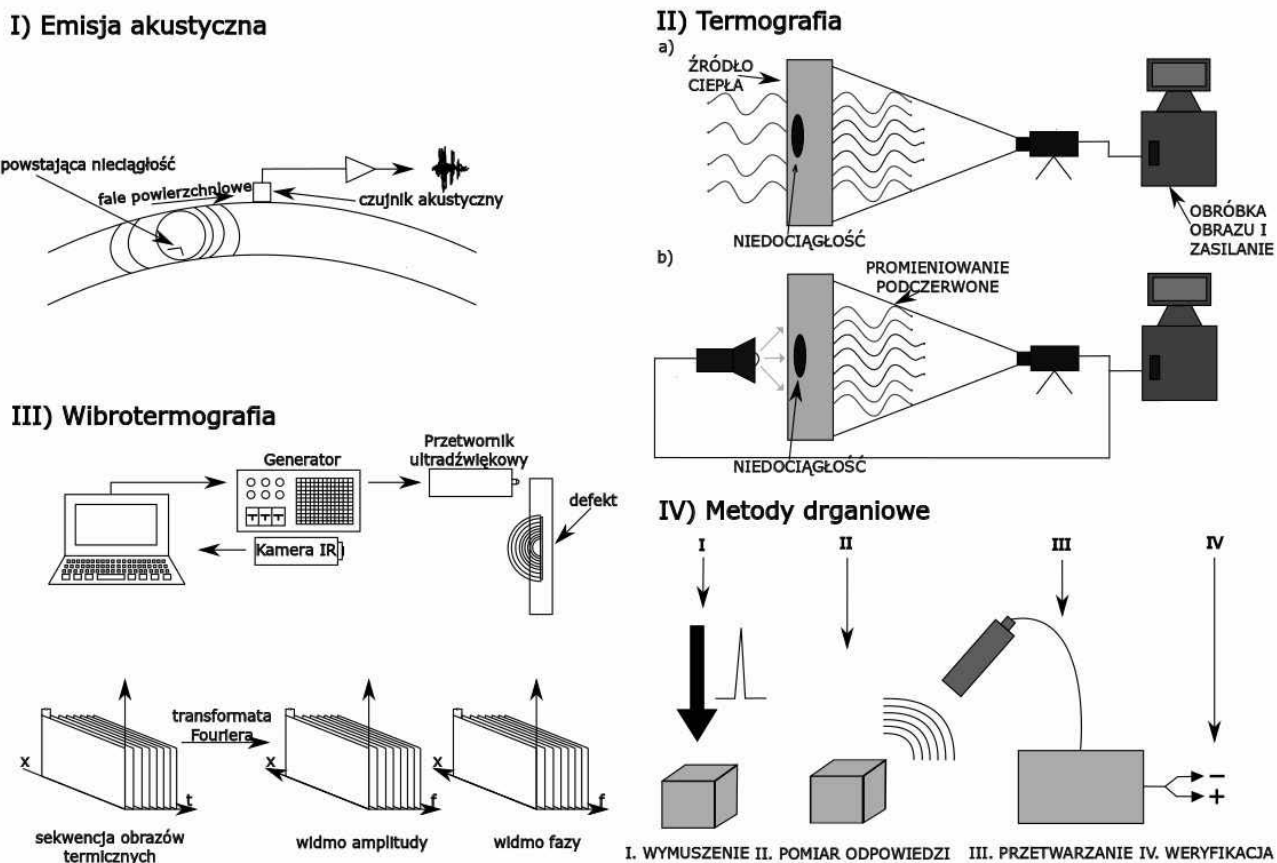
Nowoczesne (będące w trakcie badań naukowych) metody badań nieniszczących to I - emisja akustyczna, II - termografia, III - wibrotermografia, IV - metody drganiowe, które schematycznie zostały pokazane na rysunku 2 [6].

Budowa znacznej części stanowisk laboratoryjnych wykorzystywanych na kierunkach związanych z mechaniką napotyka najczęściej na jeden problem, który związany jest z bardzo wysokimi nakładami na same urządzenia i infrastrukturę. W proponowanym ćwiczeniu laserowe czujniki przemieszczeń są elementem nowoczesnego systemu wibrodiagnostycznego. Same czujniki jak i niezbędny osprzęt są drogie i wymagają stworzenia właściwej infrastruktury - w tym przypadku sieci komputerowej. Jeżeli cena sprzętu jest wysoka, to wówczas istotne jest by jak najlepiej optymalizować stanowiska pomiarowe i analityczne - warto wykorzystać pełnię możliwości narzędzi pomiarowych i udostępnić je dla jak największej grupy studentów.

W kontekście nowoczesnych technik pomiarowych oraz redukcji kosztów realizacji wymagających ćwiczeń laboratoryjnych opisane stanowisko laboratoryjne oraz scenariusz zajęć mogą dostarczyć inspiracji do modyfikowania i unowocześniania zajęć nawet w tak mało elastycznej dziedzinie techniki jaką jest mechanika.



Rys. 1. Podstawowe metody badań NDT



Rys. 2. Nowoczesne metody badań NDT

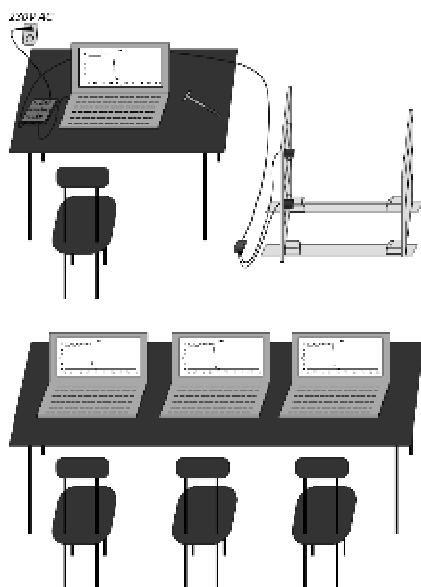
## 2. STANOWISKO DO REALIZACJI NIENISZCZĄCYCH BADAŃ POŁĄCZEŃ SPAWANYCH Z ZASTOSOWANIEM LASEROWYCH CZUJNIKÓW PRZEMIESZCZEŃ

Podczas realizacji ćwiczenia laboratoryjnego wykorzystuje się laserowe czujniki przemieszczeń ILD 2300 Micro – Epsilon. W trakcie zajęć laboratoryjnych wykładowca wymusza młotkiem modalnym drgania płyty spawanej (np. jednej z wadą w połączeniu spawanym typu przeklejenie brzegowe, drugiej bez wady). Studenci natomiast, w czasie zajęć, na komputerach, przez sieć komputerową, rejestrują drgania płyt, zapisują ich przebiegi i przetwarzają je w programie Matlab, Mathcad, MS Excel lub innym. Stanowiska schematyczne przedstawiono na rysunku 3, natomiast rzeczywiste zestawienie laboratorium zaprezentowano na rysunku 4.

Stanowisko obejmuje stojak z czujnikami optycznymi, młotek modalny, płyty spawane z różnymi wadami w połączeniu spawanym, stanowisko dla prowadzącego zajęcia, w skład którego wchodzi komputer pomiarowy, router pozwalając wprowadzić sygnały z czujników optycznych do sieci LAN oraz stanowiska komputerowe studentów uczestniczących w ćwiczeniach.

Stanowisko komputerowe studentów powinno obejmować komputer podłączony do lokalnej sieci komputerowej zgodnie z adresacją IP wykorzystywanych w pomiarach czujników przemieszczeń, przeglądarkę internetową i program obliczeniowy.

Zalety wykorzystywanych podczas ćwiczenia laserowych czujników przemieszczeń to: pomiar bezkontaktowy, dystans od mierzonej powierzchni, mała plamka pomiarowa, duża prędkość pomiaru, wysoka precyzja, możliwość pomiaru względem prawie wszystkich rodzajów powierzchni. Czujniki optoNCDT wykorzystywane są do pomiarów grubości różnorodnych materiałów, w procesie kontroli jakości, obrabianych części metalowych, w aplikacjach związanych z rejestracją różnych tekstur powierzchni, określaniu kształtu powierzchni kół aluminiowych (po odlaniu felgi aluminiowe są mierzone w celu określenia różnych własności na przykład głębokości środka, okrągłości oraz walcowości).

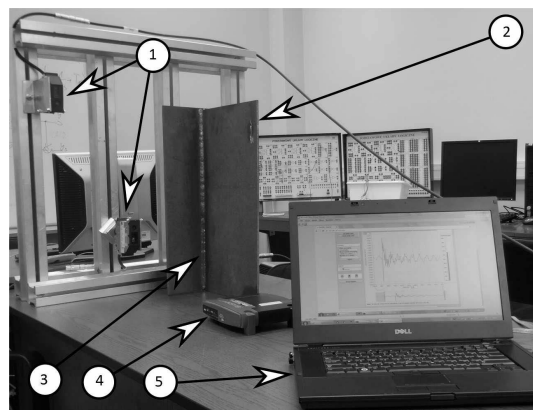


Rys. 3. Schemat stanowiska laboratoryjnego do przeprowadzania badania NDT płyt spawanych z wykorzystaniem laserowych czujników przemieszczeń

## 3. PRZEBIEG ĆWICZENIA REALIZOWANY W SIECI KOMPUTEROWEJ

Przed rozpoczęciem zajęć prowadzący ćwiczenia, w ramach czynności wstępnych, powinien sprawdzić, czy stanowisko jest kompletne i właściwie skonfigurowane, tj. czy jest młotek modalny z nałożoną końcówką, czy są obiekty badawcze w postaci różnych płyt spawanych i czy stanowiska komputerowe prowadzącego i studentów oraz router z czujnikami przemieszczeń, znajdują się w tej samej i prawidłowo skonfigurowanej sieci LAN [5].

Zaletą budowy takiego laboratorium jest stworzenie studentom możliwości jednoczesnej analizy tego samego przypadku w czasie rzeczywistym nowoczesnymi technikami i czujnikami.

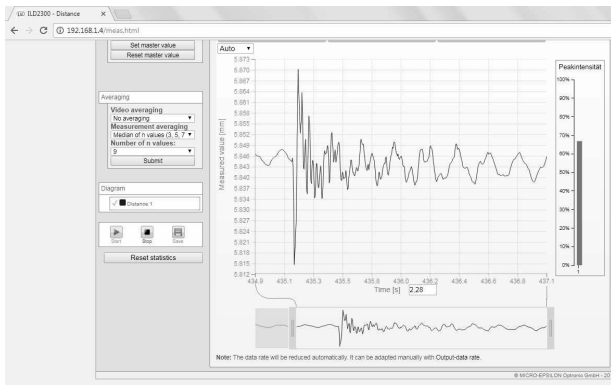


Rys. 4. Zdjęcie rzeczywistego stanowiska laboratoryjnego do przeprowadzania badań NDT płyt spawanych z wykorzystaniem laserowych czujników przemieszczeń, gdzie: 1-laserowe czujniki przemieszczeń, 2 - płyta spawana, 3 - spaw, 4 - router sieciowy, komputer z przeglądarką internetową

Użycie sieci LAN opartej na standardzie Ethernet w celu umożliwienia komunikacji pomiędzy czujnikami, a komputerami pozwala, niedużym kosztem, udostępnić dużej liczbie studentów dane, które każdy z nich indywidualnie może przetwarzać analitycznie. Jedynymi ograniczeniami ilości stanowisk jest pula adresacji IPv4 sieci prywatnej oraz ilość jednoczesnych żądań pobrania informacji jakie są w stanie obsłużyć czujniki. Dzięki temu rozwiązaniu każdy student otrzyma taki sam jak inni odczyt, którego przetworzeniem i analizą będzie mógł zająć się na swoim stanowisku komputerowym. Z ćwiczenia mogą również zdalnie korzystać studenci, którzy nie są obecni, a mają dostęp do sieci komputerowej z miejsca zamieszkania lub innego. Jest to też możliwość na odpracowanie ćwiczenia w sposób komfortowy zarówno dla prowadzącego zajęcia i studentów.

W najprostszym wariantcie, w trakcie ćwiczenia można skorzystać z interfejsu webowego, który jest wbudowany w każdy z czujników. Aktywacja tego interfejsu jest prosta, ponieważ wymaga wpisania w przeglądarkę internetową adresu IP czujnika optoNCDT. Po właściwym wykonaniu tej czynności, w przeglądarce internetowej prowadzącego ćwiczenia i studentów pojawi się strona internetowa o postaci zbliżonej do tej z rysunku 5.

Na rysunku 5, oprócz przykładowego interfejsu webowego wbudowanego w optyczny czujnik przemieszczeń, przedstawiono również przykładową rejestrację drgań po wzbudzeniu młotkiem modalnym.



Rys. 5. Wygląd strony interfejsu webowego optycznego czujnika przemieszczeń

Na rysunku tym widoczne są również po lewej stronie podstawowe przyciski, które należy wykorzystać do rozpoczęcia rejestracji, jej zakończenia oraz zapisania wyników na dysku komputera.

Moment rejestracji właściwych drgań powinien rozpocząć się na wyraźne polecenie prowadzącego ćwiczenia. Wymóg ten wynika z faktu, że to właśnie prowadzący, młotkiem modalnym generuje impuls, który staje się źródłem drgań podejmowanych do analizy przez studentów.

Interfejs webowy optycznego czujnika przemieszczeń umożliwia zapisanie wyników rejestracji w postaci pliku tekstowego lub csv.

W następnym etapie ćwiczenia zadaniem studentów jest przeprowadzenie analizy zarejestrowanych przebiegów różnymi metodami. Zaleca się, aby analiza została przeprowadzona w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. Taki scenariusz analizy pozwoli studentom porównać wyniki analizy w zależności od różnych sposobów prezentacji danych pomiarowych.

W analizie czasowej studenci mogą wstępnie przeanalizować i porównać zarejestrowane odpowiedzi z czujników przemieszczeń dla różnych płyt. W analizie czasowej studenci powinni również skorzystać z równania 1, które pozwoli im obliczyć uśrednione tłumienie konstrukcji względem maksymalnej amplitudy.

$$\Psi_T = \frac{1}{n} \cdot \ln \left( \frac{A_0}{A_n} \right) \quad (1)$$

gdzie:

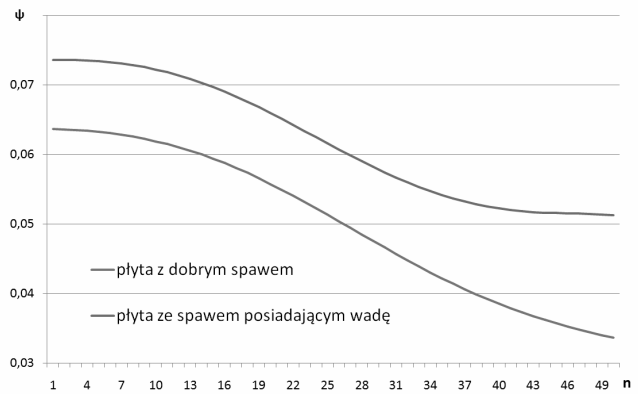
$\Psi$  - logarytmiczny dekrement tłumienia,

$A_{0-n,m}$  – kolejne wartości szczytowe amplitud,

$n, m$  – kolejny numer amplitudy.

Wyniki obliczeń studenci powinni przedstawić w postaci charakterystyki, na której na osi x prezentowane są numery maksimów a na osi y wartości obliczonego tłumienia ( $\psi$ ). Przez analizę charakterystyk studenci mogą ocenić i porównać tłumienie jakie towarzyszy płycie spawanej bez wad w spoinie z tłumieniem płyt spawanych z wadami w spoinie. Przykładowe wyniki zostały zaprezentowane na rysunku 6.

W kolejnym etapie ćwiczenia zaleca się, aby studenci podjęli trud i obliczyli transformatę Fouriera. W tym celu mogą skorzystać z wielu znanych algorytmów obliczeniowych, który przykładowo może być zapisany równaniem 2.



Rys. 6. Charakterystyki tłumienia płyty dobrze pospawanej i płyty posiadającej wadę w spoinie typu przeklejenie brzegowe

$$F(\omega) = \sum_0^{N-1} f(nT) e^{-janT} T \quad (2)$$

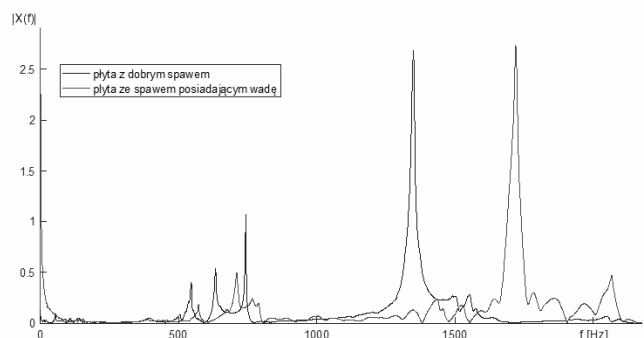
gdzie:

$N$  - numer próbek funkcji czasu,

$n$  - numer kolejnej próbki,

$T$  - okres próbkowania.

Wyniki obliczeń studenci powinni przedstawić w postaci charakterystyki, na której na osi x prezentowana jest częstotliwość poszczególnych harmonicznich, a na osi y moduły widma amplitudowego ( $|X(f)|$ ). Przez analizę widm amplitudowych studenci mogą ocenić i porównać je dla płyt z różnymi wadami. Przykładowe wyniki zostały zaprezentowane na rysunku 7.



Rys. 7. Charakterystyki amplitudowe płyty dobrze pospawanej i płyty posiadającej wadę w spoinie typu przeklejenie brzegowe

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Parametrem świadczącym o jakości każdego Wydziału Uczelni Technicznej są jej studenci i zdobywana przez nich wiedza, z którą wiążą się posiadane umiejętności. Podczas nauczania prowadzenia badań nieniszczących ważne jest stosowanie nowoczesnych metod wykonywania ćwiczeń w trakcie zajęć laboratoryjnych. Badania NDT charakteryzują się różnorodnością technik, dlatego istotne jest nauczenie umiejętności realizacji tych badań różnymi metodami (zwłaszcza nowoczesnymi). Umiejętność przeprowadzania badań paroma metodami prowadzi do zwiększenia wiarygodności i obiektywizmu uzyskanych wyników (przykładowo, można jednocześnie prowadzić badania z wykorzystaniem laserowych czujników przemieszczeń i akcelerometrów).

Nowoczesne metody NDT bardzo często wykorzystują technologie IT. Wykorzystanie sprawdzonych i pewnych

technologii informatycznych tj. sieć LAN w standardzie Ethernet, jest kluczowe do sprawnego i bezpiecznego przeprowadzenia procesu badawczego. Nowoczesne, skomputeryzowane metody wykazują się skutecznością i wiarygodnością wyników – są aktualnie najlepszymi narzędziami pomiarowymi, dlatego ważne jest by studenci zaznajamiali się z najbardziej przyszłościowymi sposobami pomiarów. Diagnostyka za pomocą badań NDT głównie zależy od właściwie zdefiniowanej potrzeby (wyboru metody badań) oraz umiejętności i kompetencji personelu je realizującego. Operatorzy realizujący badania nieniszczące muszą posiadać przygotowanie do ich realizacji ale również informacje o diagnozowanym obiekcie, jego elementach składowych, technologii wytwarzania i warunkach eksploatacji. Ważne jest przeprowadzenie obiektywnej oceny uzyskanych wyników przez operatorów badań NDT co ściśle wiąże się z znajomością norm i przepisów z zakresu badań nieniszczących. Wyniki badań nieniszczących są bardzo często elementem wejściowym do analizy eksperckiej związanej z oceną żywotności obiektu.

Opisane w pracy ćwiczenie cechują się przede wszystkim tym, że pozwala studentom w sposób zdalny i z wykorzystaniem technologii informatycznych rejestrować, analizować i diagnozować układy mechaniczne metodą vibrodiagnostyczną.

W przyszłości, ćwiczenie to można rozwinąć i udostępnić dla osób z niepełnosprawnością ze względu na dostępność z tzw. domu.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Krajewski A., Hudycz M.: Zapewnienie jakości i kontrola złączy spajanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015
2. Lewińska – Romicka A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2001
3. Czuchry J.: Badania złączy spawanych wg norm europejskich. Wydawnictwo Biura Gamma, Warszawa 2003
4. Deptuła J., Mackiewicz S., Szelążek J.: Problemy i techniki nieniszczących badań materiałów. Wydawnictwo Biura Gamma, Warszawa 2007
5. Muc A. Idzikowski T. , Szeleziński A., Maj M.: System do zarządzania infrastrukturą komputerową uczelni wyższej wykorzystujący technologię Intel AMT. Zeszyty naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG z .48, Gdańsk 2016
6. Szeleziński A. Muc A., Murawski L.: Analysis concerning changes of structure damping in welded joints diagnostics. Journal of KONES Power train and Transport, Vol. 24, No 4, European Science Society of Power train and Transport Publication, Warsaw 2017.

## LABORATORY STATION FOR REMOTE EXAMINATION AND ANALYSIS OF WELDING JOINS WITH USAGE OF LASER DISPLACEMENT SENSORS

In the paper there is presented a proposition of dedicated laboratory station in which, with usage of internet technologies and computer network, quality of welding joins in steel plates can be diagnosed by laser displacement sensors. As part of the exercise, options of analysis the received vibrodiagnostic data in the domain of time and frequency were presented. The exercise described in the work, against the background of others - the ones carried out in the mechanical department, is primarily characterized by the fact that it can help students - with usage of the informatic technologies - register, analyze and diagnose mechanical systems in the remote way by vibrodiagnostic method.

**Keywords:** laboratory station, displacement sensors, NDT, LAN, data analysis.

