

POMIARY DRGAŃ METALOWEJ PŁYTY ZE STOPU HASTELLOY X

Dariusz STRĄK¹, Marzena MIĘSIKOWSKA², Magdalena PIASECKA³, Dariusz MICHALSKI⁴

1. Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Mechaniki
tel.: 41 34 24 320, e-mail: dstrak@tu.kielce.pl
2. Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Technik Komputerowych i Uzbrojenia
tel.: 41 34 24 334, e-mail: marzena@tu.kielce.pl
3. Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Mechaniki
tel.: 41 34 24 320, e-mail: tmpmj@tu.kielce.pl
4. Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Wydziałowe Laboratorium Komputerowe
tel.: 41 34 24 314, e-mail: michalski@tu.kielce.pl

Streszczenie: Celem artykułu jest pomiar drgań metalowej płyty ze stopu Hastelloy X i ich analiza. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem wzbudnika magnetycznego własnej konstrukcji oraz wibrometru laserowego PSV-500. Wprowadzenie płyty w drgania o różnej częstotliwości ma na celu wytworzenie sytuacji fizycznej podobnej do występującej na powierzchni grzejnej wymiennika ciepła. W pracy przedstawiono konstrukcję stanowiska badawczego i metodykę przeprowadzenia eksperymentów. Zarejestrowane sygnały analizowano w dziedzinie czasu i częstotliwości.

Słowa kluczowe: drgania, analiza czasowa, analiza częstotliwościowa, płyta Hastelloy X.

1. WPROWADZENIE

1.1. Drgania powierzchni grzejnej wymiennika ciepła

Podczas pracy wielu urządzeń, w których występują duże różnice temperatury, powstają naprężenia termiczne elementów powierzchni i lokalne jej odkształcenia. Przykładem takich urządzeń są wymienniki ciepła. Na pracę urządzenia o niewielkich wymiarach, jakimi są przepływowe wymienniki ciepła z minikanalami, istotny wpływ mogą wywierać deformacje wynikające z rozszerzalności cieplnej powierzchni grzejnej. Deformacje takie mogą prowadzić do powstania miejscowych przewężeń kanału. Może to powodować zaburzenia przepływu płynu oraz procesu wymiany ciepła. Zgodnie z uznawanymi w literaturze klasyfikacjami kanałów, minikanaly są to kanały o średnicy hydraulicznej poniżej 3 mm. Zgodnie z szeroko uznawaną w literaturze klasyfikacją kanałów zaproponowaną przez *Kandlikara* [1], minikanal ma średnicę hydrauliczną z zakresu $3 \text{ mm} \geq d_h > 200 \mu\text{m}$.

Dodatkowym czynnikiem powodującym nasilenie powstawania deformacji powierzchni są procesy przebiegające ze zmianą fazy medium roboczego, takie jak zjawisko wrzenia w minikanale prostokątnym ogrzewanym asymetrycznie. Intensyfikują one sprężyste odkształcenia płyty grzejnej w wyniku zmian temperatury i ciśnienia towarzyszących tworzeniu się, wzrostowi i odrywaniu się pęcherzy parowych. Są to zjawiska niestabilne, którym towarzyszą niestabilności przepływu płynu oraz ciśnienia w kanale.

Na podstawie pomiaru drgań powierzchni można wyznaczyć jej lokalne odkształcenia przy znanych przemieszczeniach. Zatem zmienna częstotliwość drgań powierzchni może wskazywać na powstawanie jej lokalnych deformacji. Identyfikację częstotliwości drgań powierzchni wymiennika ciepła można wykorzystać również do badania zjawisk niestabilności przepływu, które są szczególnie intensywne podczas zmiany fazy czynnika.

1.2. Metody pomiaru i analizy drgań powierzchni grzejnej

Do pomiaru drgań powierzchni grzejnej zastosowano metodę bezstykową. Metoda ta nie wymaga umieszczania czujników drgań wraz z infrastrukturą pomiarową na rozpatrywanej powierzchni. Jest to metoda umożliwiająca jednoczesny pomiar rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej. Przeprowadzenie pomiaru bezstykowego umożliwia wibrometr laserowy Polytec PSV-500 [2].

Analizę drgań powierzchni grzejnej można przeprowadzić w dziedzinie czasu oraz w dziedzinie częstotliwości. Analiza w dziedzinie częstotliwości pozwala badać charakterystyczne harmoniczne drgań powierzchni.

1.3. Cel pracy

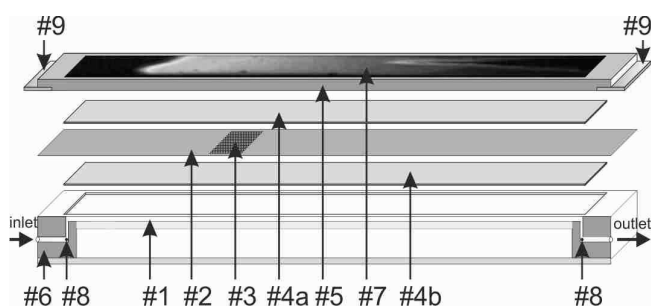
Zagadnienia realizowane w ramach pracy mają charakter interdyscyplinarny. Wiążą one problematykę wymiany ciepła z analizą drgań – czasową oraz częstotliwościową. Celem tej pracy jest identyfikacja i pomiar drgań metalowej płyty ze stopu Hastelloy X, które są generowane na skutek trzech zastosowanych rodzajów wymuszeń. W pracy wykorzystywane jest, opracowane we własnym zakresie, stanowisko badawcze do wytwarzania i pomiaru drgań powierzchni grzejnej z wykorzystaniem wibrometru laserowego Polytec PSV-500.

2. STANOWISKO I METODY BADAWCZE

2.1. Płyta metalowa ze stopu HASTELLOY X

W badaniach wykorzystano płytę, która stanowi powierzchnię grzejną dla płynu roboczego przepływającego wzdłuż minikanalu w modelowym wymienniku ciepła [3].

Schemat modułu testowego, wykorzystywanego w badaniach wymiany przy wrzeniu podczas przepływu przez minikanal, pokazano na rysunku 1. W przedstawionej konstrukcji wymiennika ciepła z minikanalem prostokątnym, do detekcji temperatury powierzchni grzejnej wykorzystywano technikę termczułych ciekłych kryształów. Powierzchnię grzejną dla przepływającego płynu chłodniczego stanowiła cienka metalowa płyta wykonana ze stopu Hastelloy X firmy Haynes Int. (USA). Głównymi składnikami stopu są nikiel, chrom, żelazo i molibden. Materiał grzejnika wybrano kierując się wymogiem cechowania się przez powierzchnię grzejną odpowiednio dużej rezystancji elektrycznej przy założeniu, że zmiany oporności właściwej materiału powierzchni grzejnej względem temperatury są pomijalnie małe. Według informacji producenta, Hastelloy X odznacza się odpornością na utlenianie, modyfikacją i wytrzymałością na wysokie temperatury. Ponadto stop ten ma dobre właściwości odnośnie formowania i możliwości zgrzewania.



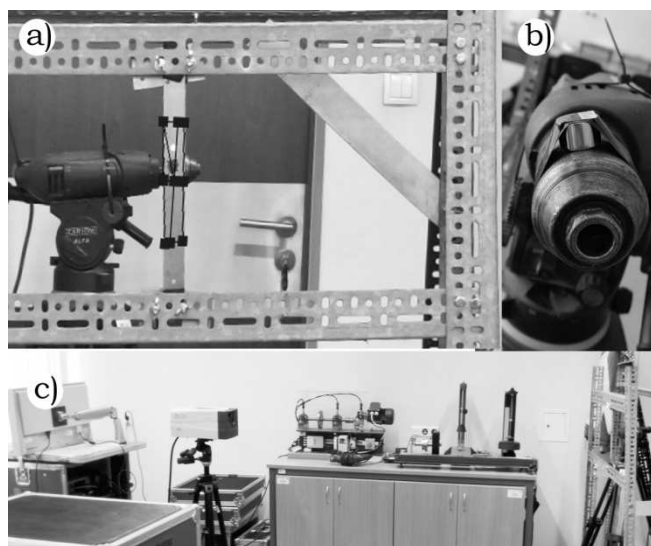
Rys. 1. Schemat modułu testowego, w którym do detekcji temperatury powierzchni grzejnej wykorzystuje się technikę termczułych ciekłych kryształów: 1-minikanal, 2-płyta grzejna, 3-powierzchnia rozwinięta, 4a,b-szyba, 5-pokrywa, 6-korpus, 7-czarna farba podkładowa i warstwa ciekłych kryształów, 8-termopara, 9- elektroda miedziana

Zmiana geometrii minikanalów z równoczesną zmianą ciśnienia wpływają na intensywność wymiany ciepła oraz na wytrzymałość elementów składowych wymiennika ciepła. Zagadnienie to omówiono w pracach [4,5], których celem było przedstawienie problematyki naprężeń cieplnych i odkształceń termicznych podczas przepływu czynnika chłodniczego w minikanale wymiennika ciepła. Naprężenia cieplne określono w metalowej przegrodzie wymiennika, w której generowane jest ciepło na skutek przepływu prądu elektrycznego. Wyznaczenie odkształceń oraz rozkładów temperatury wewnątrz płyty wykonano przy pomocy programu Ansys Workbench wykorzystującego numeryczne metody rozwiązań równań przewodnictwa cieplnego oraz równań przemieszczeń. Stwierdzono, że jednym z najważniejszych aspektów, który należy uwzględnić przy modelowaniu zjawisk fizycznych zachodzących w trakcie przepływu czynnika o podwyższonej temperaturze przez kanały o niewielkich wymiarach, są deformacje termosprężyste ograniczających je ścianek. Jak to wykazano na podstawie prezentowanych wyników obliczeń, różnica temperatur występująca wzdłuż długości minikanalu wywołuje zmiany jego kształtu, co prowadzi do wystąpienia lokalnego przewężenia kanału nawet do 40% w stosunku do głębokości nominalnej kanału. Zniekształcenia te mają wpływ na zmianę prędkości przepływu czynnika przez kanał oraz intensywność wymiany ciepła na odcinku pomiarowym. W wymienionych pracach nie przedstawiono wyników badań eksperymentalnych rzeczywistych odkształceń płyty,

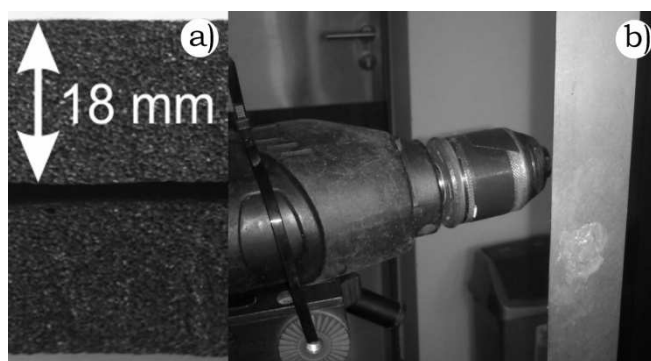
a jedynie obliczenia numeryczne, w którym zostały wprowadzone rozkłady temperatury oraz lokalne współczynniki przejmowania ciepła wzdłuż przepływu. Należy podkreślić, że planowane eksperymenty pozwolą na eksperymentalną weryfikację przedstawionych wstępnych wyników obliczeń numerycznych.

2.2. Opis stanowiska badawczego oraz aparatury pomiarowej

Podstawowym elementem stanowiska jest opisana w poprzednim punkcie metalowa płyta zamocowana na stalowej ramie (rys. 2). Płyta metalowa Hastelloy X ma wymiary: 310 mm (długość), 31 mm (szerokość) oraz 0,65 mm (grubość). W środkowej części płytki zamocowany został magnes neodymowy N38, pokazany na rysunku 3b [7, 8].



Rys. 2. Widok stanowiska badawczego: a) od strony wibrometru laserowego, b) od strony zamocowania magnesu, c) widok ogólny



Rys. 3. Widok elementów stanowiska badawczego: a) pianki izolacyjnej drgania zastosowanej do stanowiska badawczego, b) płytki i magnesów neodymowych zamocowanych

Płytkę została przymocowana do konstrukcji metalowej na dwóch jej końcach, co pokazano na rysunku 2a. W miejscu jej mocowania, między płytą metalową a konstrukcją stalową, zastosowano piankę o grubości 18 mm (rys. 3a), która spełnia zadanie izolatora drgań tak, aby płytka z Hastelloy X nie przenosiła drgań na całą ramę metalową. Jako wzbudnik drgań posłużyło wprowadzane w ruch obrotowy wrzeciono wiertarki o regulowanej prędkości obrotowej z zamontowanym magnesem neodymowym [7]. Wiertarkę umieszczono na metalowym statywie oddzielonym od konstrukcji. Podłoga w laboratorium została

wyłożona grubą wykładziną. Pod stopkami konstrukcji i statywu z wiertarką zamontowano dodatkowo piankę izolacyjną, która spełnia zadanie tłumienia drgań między poszczególnymi elementami konstrukcji. Do pomiaru drgań płytki wykorzystano wibrometr laserowy typu PSV-500-B pozwalający na pomiar w sposób bezstykowy oraz na analizę i wizualizację drgań na podstawie skanu powierzchni drgającego obiektu zgodnie z zadaną siatką punktów pomiarowych za pomocą wiązki lasera. Zasada działania wibrometru laserowego polega na porównaniu wiązki lasera odbitej od badanego obiektu i docierającej do fotodetektora ze znanym sygnałem referencyjnym. W przypadku, gdy źródło fali lub odbiornik porusza się, częstotliwość światła zmienia się w wyniku efektu Dopplera. Częstotliwość fali rośnie przy wzajemnym zbliżaniu się źródła i odbiornika, a maleje podczas oddalania się źródła fali i odbiornika. Mierząc tę różnicę częstotliwości można bezpośrednio odczytać prędkość badanego obiektu. Cyfrowa obróbka sygnału pozwala uzyskać informacje o amplitudzie drgań, prędkości drgań, przyspieszeniu i widmie częstotliwościowym. Z punktu widzenia wiarygodności otrzymanywnych wyników pomiarów ważne jest, aby przyrząd pomiarowy nie był podatny na wpływ pozostałych elementów konstrukcji na badany obiekt. Nabiera to szczególnie dużego znaczenia w przypadku pomiaru drgań obiektów o małych wymiarach i masach [10,11]. Dlatego zastosowano autorski bezstykowy wzбудnik magnetyczny.

Do wytworzenia drgań płytki użyto magnesu neodymowego N38 [6-8]. Odległość pomiędzy magnese m wymuszenia a magnese m wzbudzenia wynosiła 70 mm, natomiast odległość płytki metalowej Hastelloy X do głowicy laserowej 2,5 m. Pomiarów dokonano przy użyciu obrotomierza DT-30LK [9].

2.3. Metodyka przeprowadzenia badań

Każda 5,5 sekundowa seria pomiarowa miała na celu zbadanie powtarzalnych drgań płytki. Do wzbudzenia drgań wykorzystano autorski układ bezstykowego wzbudnika magnetycznego. Magnes wzbudzenia [7] został umieszczony na wrzecionie wiertarki. Układ regulacji obrotów wrzeciona wiertarki umożliwiał ustawienia 5 różnych prędkości obrotowych. Wiertarka została zamocowana na statywie, którego podstawę skutecznie wytłumiono. Zastosowano trzy częstotliwości wymuszenia: W1 – 25 Hz odpowiadające prędkości obrotowej 1500 obr/min wiertarki, W2 – 35 Hz odpowiadające prędkości obrotowej 2100 obr/min i W3 – 50 Hz odpowiadające prędkości obrotowej 3000 obr/min. Pomiaru prędkości obrotowej bezstykowego wzbudnika magnetycznego dokonano po ustabilizowaniu obrotów przy użyciu obrotomierza DT-30LK [9]. Pomiar bezstykowy przeprowadzany jest na zasadzie odbicia od paska odbłaskowego emitowanej przez obrotomierz wiązki laserowej o długości fali 630 – 670 nm. Odbite światło pada na fotodiode znajdującą się w urządzeniu. Fotodiode służy do rejestracji i pomiaru parametrów odbitej wiązki laserowej. Obrotomierz znajdował się w odległości około 350 mm od wału z zamocowanym magnese m neodymowym i został ustawiony tak, aby wiązka laserowa padała na zamocowany na wrzecionie pasek odbłaskowy. Podstawowe parametry pomiarowe zastosowanego obrotomierza są następujące: zakres pomiarowy dla pomiaru bezstykowego: 2 – 200 000 obr/min, dokładność pomiaru $\pm 0,05\%$ lub ± 1 obr/min, rozdzielczość pomiaru 0,001 – 1 [9].

Po ustabilizowaniu obrotów bezstykowego wzbudnika magnetycznego, wykonywano pomiary częstotliwości drgań

za pomocą wibrometru laserowego. Częstotliwość próbkowania wynosiła 12,5 kHz. Pomiary wykonano dla temperatury otoczenia 20,4°C, wilgotności powietrza 55% i ciśnienia atmosferycznego 0,1 MPa.

Dane techniczne magnesu wymuszenia były następujące [6]: wymiary gabarytowe: średnica: $10 \pm 0,1$ mm, wysokość: $5 \pm 0,1$ mm, a jego właściwości fizyczne określa gęstość $\sim 7,5$ g/cm³, ciężar magnesu $\sim 2,94$ g, twardość Vickersa (HV) ~ 600 kG/mm², rezystywność ~ 144 uOhm x cm oraz udźwig $\sim 2,5$ kg. Właściwości magnetyczne magnesu z materiału N38 zestawiono w źródle [7]. Szczegółowe dane o magnese m z materiału N38 są przedstawione w pracach [7,8].

2.4. Zastosowane analizy sygnału

Sygnały pomiarowe zarejestrowano za pomocą wibrometru laserowego Polytec PSV-500. Dokonano trzech prób pomiarowych w postaci przebiegów czasowych o czasie trwania 5,5 s dla trzech różnych wymuszeń drgań.

Analizę zarejestrowanych sygnałów przeprowadzono na podstawie przebiegów czasowych oraz w dziedzinie częstotliwości. Na podstawie przebiegów czasowych wyznaczono wartość minimalną, maksymalną oraz wartość skuteczną amplitudy drgań (RMS), wartość średnią oraz odchylenie standardowe [12]. Zależności częstotliwościowe uzyskane za pomocą szybkiego przekształcenia Fouriera (FFT) pozwoliły na wyznaczenie charakterystycznych częstotliwości płytki.

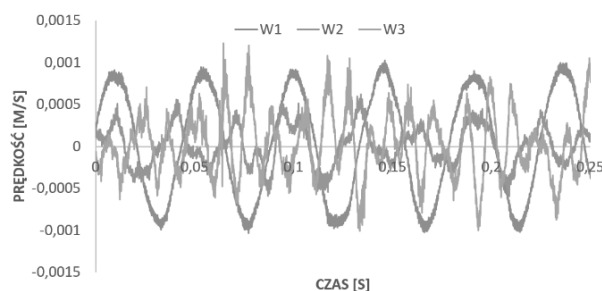
3. REZULTATY

Uzyskane wartości RMS, średnia \bar{x} , odchylenie standardowe S(x), minimum, maksimum z przebiegów czasowych zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wartości parametrów sygnału uzyskane z przebiegów czasowych

Wymuszenie	RMS	\bar{x}	S(x)	Max	Min
Hz	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
W1 – 25	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-7}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$-1,1 \cdot 10^{-3}$
W2 – 35	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$-4,0 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$-1,0 \cdot 10^{-3}$
W3 – 50	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$-3,5 \cdot 10^{-3}$

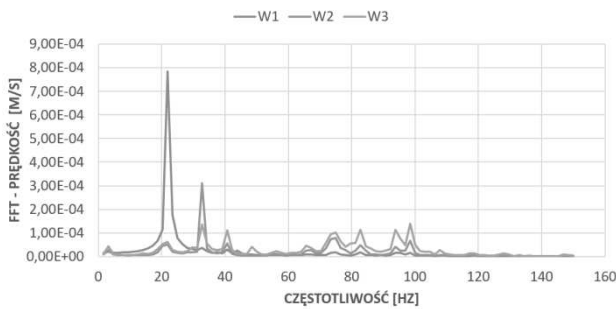
Fragmety przebiegów czasowych dla zastosowanych trzech różnych wymuszeń drgań przedstawione zostały na rysunku 4.



Rys. 4. Przebiegi czasowe drgań dla trzech różnych wymuszeń W1, W2, W3

Po uwzględnieniu niepewności wzorcowania wibrometru laserowego [2] uzyskano niepewność maksymalną pomiaru odpowiednio dla wymuszenia: W1 - $\pm 0,0018$ m/s; W2 - $\pm 0,00085$ m/s; W3 - $\pm 0,001$ m/s.

Fragmenty zależności częstotliwościowych dla zastosowanych trzech różnych wymuszeń drgań przedstawione zostały na rysunku 5.



Rys. 5. Przebiegi częstotliwościowe drgań dla trzech różnych wymuszeń W1, W2, W3

Charakterystyczne częstotliwości wymuszenia mają swój wyraz w zależnościach częstotliwościowych. Dla wymuszenia W1 - 25Hz uzyskano charakterystyczną częstotliwość 23,4375 Hz, dla wymuszenia W2 - 35Hz częstotliwość 32,8125 Hz, a dla W3- 50Hz częstotliwość 98,4375 Hz będącą dwukrotnością częstotliwości W3.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Zbudowane stanowisko badawcze pozwala na pomiary metodą bezstykową drgań metalowej płyty wymuszanych za pomocą opracowanego urządzenia w celu przeprowadzenia analizy zjawisk na powierzchni grzejnej wymiennika ciepła. Zarejestrowane sygnały analizowano w dziedzinie czasu i częstotliwości. Wyznaczona amplituda drgań zależna była od sztywności płytki, warunków podparcia i siły wymuszającej.

Wykorzystana aparatura i zaproponowana metodyka przeprowadzania eksperymentów może być wykorzystana do badania warunków wymiany ciepła podczas przepływu czynnika wrzącego wzdłuż minikanalu na podstawie analizy drgań jego powierzchni grzejnej. Uzyskane wyniki będą podstawą dalszych badań.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Kandlikar, S. G.: Fundamental Issues Related to Flow Boiling in Minichannels and Microchannels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 26, No. 2-4, 2002, pp. 389-407.
2. Dokumentacja wibrometru Polytec PSV-500, www.polytec.com
3. Piasecka M.: Impact of selected parameters on boiling heat transfer and pressure drop in minichannels, *International Journal of Refrigeration*, vol. 56, 2015, pp. 198-212.
4. Błasiak S., Musiał T., Piasecka M., Strąk K.: Thermal stresses in the heated wall of the minichannel, *Measurement Automation Monitoring*, vol. 62, No.1, 2016, pp. 22-25.
5. Piasecka M., Błasiak S., Musiał T.: Numerical calculations of the thermal deformations of the rectangular minichannel walls, *The European Physical Journal Web of Conferences*, vol. 114, 2016, paper No. 02096.
6. <http://www.magnesy.eu/mw-10-x-5--n38---magnes-neodymowy-t-1755.html#>
7. http://www.magnesy.eu/index.php?action=towar&mode=zalacznik&ID=1755&ATTACHMENT_ID=61
8. <http://www.magnesy.eu/mw-10-x-1,5--n38---magnes-neodymowy-t-1267.html>
9. Voltcraft obrotomierz DT-30LK instrukcja użytkowania.
10. Cichoń P., Stosiak M.: Zastosowanie wibrometru laserowego do pomiaru drgań stołu symulatora liniowego napędu hydrostatycznego, *Napędy i Sterowanie*, Nr 5, 2012, s. 66-72.
11. Samborski S., Wieczorkiewicz J., Rusinek R., Dziedzic J.: Methodology of structures damage estimation in case of cantilever isotropic beam, *Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 1-2, 2015, s.5-16.
12. Dąbrowki Z., Dziurdź J., Klekot G., Radkowski S.: *Materiały Pracowni Wibroakustyki Instytutu Podstaw Budowy Maszyn, Wydział SIMR Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.*

MEASUREMENT OF VIBRATIONS OF METAL PLATE OF HASTELLOY X ALLOY

Abstract: The aim of this article is to measure vibrations of a metal plate of Hastelloy X alloy and its analysis. The research was performed using a magnetic inductor of authors design and a laser vibrometer PSV-500. The introduction of the plate into vibrations of different frequencies is aimed at creating a physical situation similar to that occurring on the heating surface of the heat exchanger. The work presents the construction of the test stand and the methodology of performing the experiments. The recorded signals were analyzed in terms of time and frequency domain.

Keywords: vibration, time analysis, frequency analysis, Hastelloy X metal plate.