

Wojciech Szymański*

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Metali Nieżelaznych Oddział w Skawinie

Zastosowanie rentgenowskiej metody pomiaru naprężeń w diagnostyce przyczyny pęknięcia elementu spawanego turbiny gazowej

Application of the X-ray method of stress measurement in the diagnosis of the cause of cracking of the welded element of the gas turbine conveyor after a fire

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono metodykę diagnostyki przyczyn pęknięcia detalu turbiny gazowej w miejscu połączenia spawanego dwóch stopów żarowytrzymałych. Wykonano rozkład naprężeń w okolicy złącza spawanego po wykonaniu elementu, co pozwoliło określić przyczynę pęknięcia. Próby wyżarzania i odprężania wibracyjnego, nie przyniosły spodziewanych efektów. W dalszej części pracy przeprowadzono pomiary naprężeń łączonych spoiną elementów detalu na kolejnych etapach jego wytwarzania, co pozwoliło na określenie, w którym momencie produkcji powstają krytyczne naprężenia będące przyczyną przedwczesnego pęknięcia w czasie pracy turbiny. Poprawa technologii produkcji eliminująca niekorzystny rozkład naprężeń pozwoliła na uzyskanie oczekiwanego czasu pracy turbiny bez awarii.

Słowa kluczowe: naprężenia własne; pomiar naprężeń; diagnostyka, pęknięcie.

ABSTRACT

The paper presents the methodology of diagnostics of the causes of cracking of a gas turbine detail in the place of a welded joint of two heat-resistant alloys. The stress distribution in the area of the welded joint was made after the element was made, which allowed to determine the cause of the cracking. Attempts at annealing and vibration stressing did not bring the expected results. In the further part of the work, measurements of the stresses of the elements connected by welding were carried out at subsequent stages of its production, which allowed to determine at which point in production critical stresses arise, which cause premature fracture during the operation of the turbine. The improvement of the production technology eliminating the unfavourable stress distribution allowed to obtain the expected working time of the turbine without failure.

Keywords: residual stresses; stress measurement; diagnostics, cracking.

1. Wstęp

Jedną z istotniejszych cech materiału pozwalającą określić jego przydatność do określonych zadań, zarówno jako pojedynczego przedmiotu jak i integralnej części konstrukcji, są występujące w nim naprężenia. Naprężenie własne jest rodzajem naprężenia sprężystego, które jest obecne w materiale w stałej temperaturze i braku oddziaływania sił zewnętrznych, pozostają one po ustąpieniu działania przyczyny ich powstawania. Występują z wielu różnych powodów, takich jak np. nieelastyczne deformacje (piaskowanie, kulkowanie), obróbka cieplna, obróbka skrawaniem, obróbka chemiczna (nawęglanie, azotowanie), łączenie elementów konstrukcji i inne. Naprężenia własne, które mogą być rozciągające lub ściskające są zamknięte w materiale w wyniku jego historii. Są one bardzo ważne, ponieważ mogą być duże pod względem wielkości, a jako

składowe mogą się dodawać (lub odejmować) do naprężeń spowodowanych przez siły przyłożone.

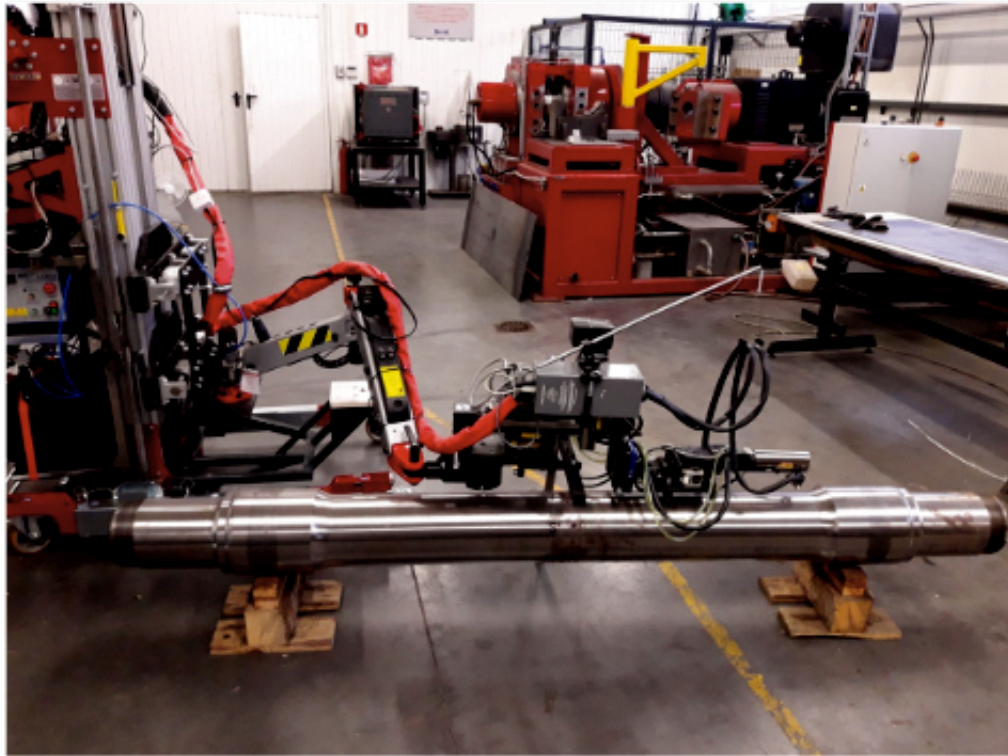
Praktycznie wszystkie metody pomiaru naprężeń własnych, ograniczają się do pomiaru naprężeń w warstwie wierzchniej badanego materiału. Z jednej strony jest to korzystne gdy chcemy określać jakość zabiegów powierzchniowych takich jak kulowanie, czy nagniatanie lub procesów obróbki skrawaniem, z drugiej strony, gdy chcemy poznać stan naprężeń w głębi materiału to musimy usuwać kolejne jego warstwy mając na uwadze, że samo usuwanie może mieć wpływ na stan naprężeń pozostałego materiału.

Spośród wielu metod pomiaru naprężeń, najczęściej wykorzystywanymi do badania części maszyn i konstrukcji są metody nieniszczące. Wśród nich za dające najdokładniejsze wyniki uznaje się metody rentgenowskie.[1]

Metody rentgenowskie opierają się na pomiarze zmian odległości międzyplaszczynowych. Pod wpływem obciążeń powodujących odkształcenie w materiale dochodzi do przesunięć elementów struktury krystalicznej. Zmiany

*Autor korespondencyjny.

E-mail: Wojciech.Szymanski@imn.lukasiewicz.gov.pl



Rys. 1. Dyfraktometr rentgenowski PROTO iXRD w trakcie pomiaru naprężeń w osi kolejowej [18].
 Fig. 1. The X-ray diffractometer PROTO iXRD during stress measurement on the railway axis [18].

odstępu płaszczyzn dhkl mogą być miernikiem naprężeń, co stanowi fundament metod rentgenowskich.[2, 3]. Z szeregu metod rentgenowskich obecnie najczęściej stosowana jest metoda $\sin^2\psi$. Jest ona realizowana za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego. Istotą tej metody jest określenie zmian odległości międzypłaszczyznowych w sieci krystalicznej materiału pod wpływem sił w nim występujących.

Metody rentgenowskie mierzą naprężenia w warstwie o grubości około 10-20 μm , nie wymagają stosowania wzorców, a jedynie znajomości stałych materiałowych takich jak moduł Younga i współczynnik Poissona. Pomiar naprężeń dokonywany jest w określonym kierunku, co pozwala na wyznaczanie tensora naprężeń. Rozdzielczość metody to nawet poniżej 0.5 mm^2 . Są one znane od wielu lat, jednak nie są zbyt często stosowane, zwłaszcza w przemyśle, gdy z dużą nieufnością podchodzi się do otrzymanych nimi wyników. Próbę walidacji potwierdzającą zgodność wyników pomiaru naprężeń metodą rentgenowską przedstawiono na konferencji Diagnostyka Materiałów i Urządzeń Technicznych [4]. Badania te potwierdziły również zjawisko sumowania się naprężeń pochodzących od różnych sił przyłożonych (szlifowanie i siła rozciągająca).

Instytut Metali Nieżelaznych Oddział Metali Lekkich w Skawinie od lat prowadzi badania naprężeń metodą rentgenowską. Są to zarówno prace o charakterze badawczym [5-11], jak i prace aplikacyjne pozwalające np. na zweryfikowanie stosowanej technologii lub kontrolę wyrobu [12-16]. Ostatnio coraz większym zainteresowaniem cieszą się pomiary naprężeń wykonywane w celu dostarczenia

danych do tworzenia modeli matematycznych procesów technologicznych [17].

W niniejszej pracy zostanie przedstawiona metodyka diagnostyki przyczyn pęknięcia detalu turbiny gazowej w miejscu połączenia spawanego dwóch stopów żarowytrzymałych.

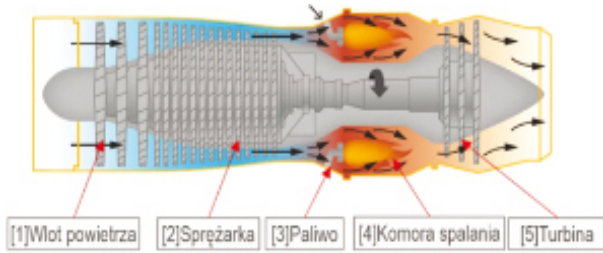
2. Aparatura

Pomiary naprężeń metodą rentgenowską detalu turbiny gazowej przeprowadzono dyfraktometrem rentgenowskim produkcji firmy PROTO Manufacturing Ltd. – Jest to przenośny dyfraktometry rentgenowski, w pełni skomputeryzowany, służący jedynie do pomiaru naprężeń własnych i zawartości austenitu szczątkowego. Został on zintegrowany z manipulatorem przejezdny (rys. 1). Pomiar i wykorzystana metoda obliczeniowa wykonywane wg własnej procedury badawczej laboratorium (PB-N wyd. III z dnia 08.12.2016) były zgodne ze standardami: SAE J84a i ASTM E915. Wielkość padającej wiązki wynosiła 1mm, a efektywna głębokość wnikania wynosiła około 7 μm .

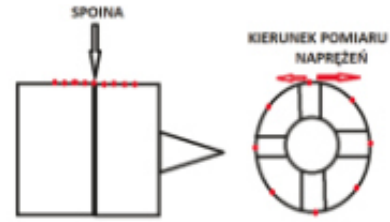
3. Opis zagadnienia

Turbina gazowa (rys. 2) swoją konstrukcją i zasadą działania przypomina znany z samolotów i śmigłowców silnik turbopowalowy.

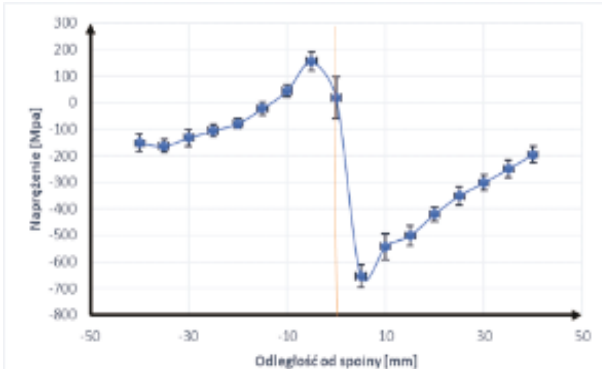
Problemem, który wystąpił u producenta jednego z detali turbiny gazowej było występujące po krótkim czasie prób (około 10% założonego czasu po którym detal powinien być nadal sprawny) pęknięcie w pobliżu połączenia spawanego dwóch stopów żarowytrzymałych.



Rys. 2. Przykładowy schemat turbiny gazowej [19].
Fig. 2. An example of a gas turbine diagram [19].

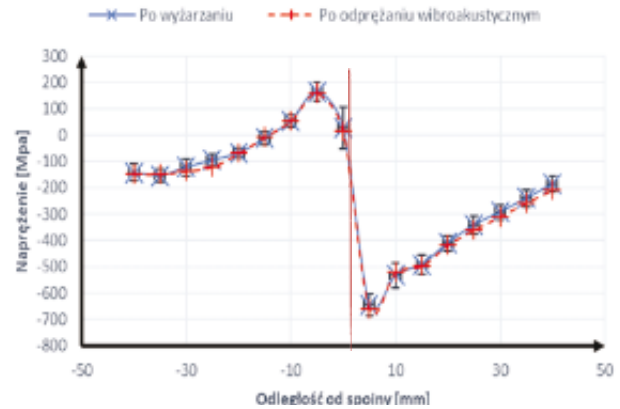


Rys. 3. Schemat położenia punktów pomiaru naprężeń w detalu turbiny gazowej.
Fig. 3. Diagram of the location of the stress measurement points in a gas turbine detail.



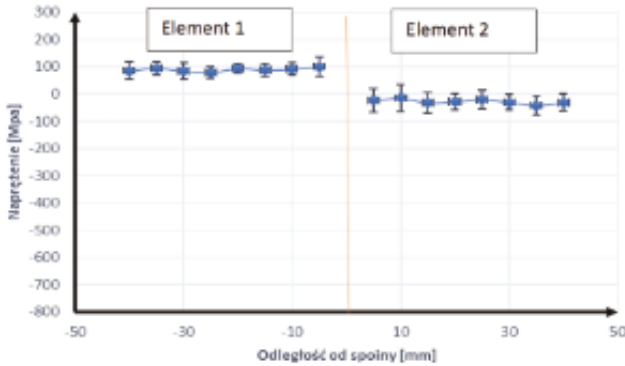
Rys. 4. Rozkład naprężeń w detalu turbiny gazowej. Wyniki uśrednione na obwodzie.

Fig. 4. Stress distribution in a gas turbine detail. Results averaged around the circumference.



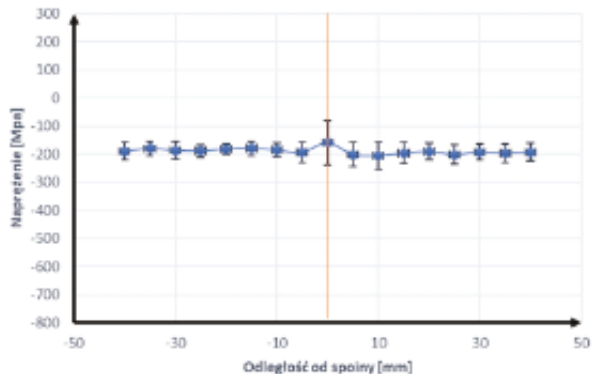
Rys. 5. Rozkład naprężeń w detalu turbiny gazowej po wyżarzaniu i po obróbce wibroakustycznej.

Fig. 5. Stress distribution in a gas turbine detail after annealing and after vibroacoustic treatment.



Rys. 6. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej przed ich połączeniem.

Fig. 6. Stress distribution in parts of the gas turbine detail before joining them.



Rys. 7. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej po spawaniu i szlifowaniu powierzchni.

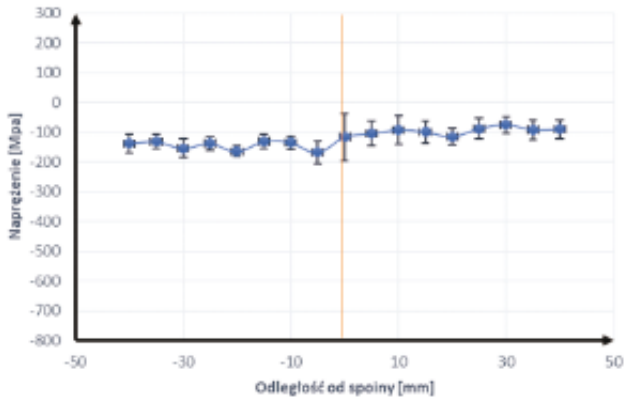
Fig. 7. Stress distribution in parts of the gas turbine after welding and surface grinding.

Pierwszy pomiar naprężeń wykonany według rysunku 3 wykazał znaczny gradient naprężeń obwodowych w obszarze przyspoinowym (rys. 4). Uznano, że to właśnie tak wysoki (około 800 MPa) gradient naprężeń jest odpowiedzialny za pęknięcie detalu. Początkowo podjęto próby zmniejszenia gradientu naprężeń poprzez wyżarzanie i obróbkę wibroakustyczną (rys. 5). Oba te zabiegi nie przyniosły istotnych zmian w rozkładzie naprężeń i ich gradient w obszarze spoiny pozostawał na poziomie około 800 MPa.

4. Badania

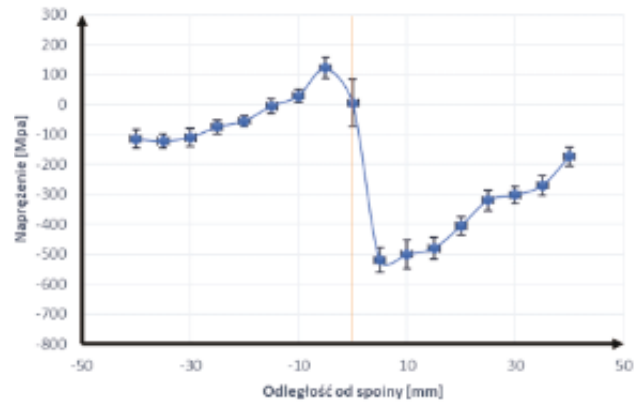
W celu określenia przyczyny powstawania tak wysokiego gradientu naprężeń postanowiono wykonywać pomiary

rozkładu naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej na kolejnych etapach procesu produkcji. Najpierw zmierzono naprężenia w elementach przed spawaniem i stwierdzono, że nie występują w nich gradienty naprężeń a różnica w poziomie naprężeń pomiędzy elementami wynosi około 100 MPa (rys. 6). Następnie oba elementy zostały ze sobą połączone spoiną, a ich powierzchnię wyszlifowano. Po pomiarze rozkładu naprężeń nie stwierdzono występowania gradientu naprężeń, natomiast zmierzone naprężenia były naprężeniami ściskającymi (rys. 7), co było najprawdopodobnie efektem szlifowania i co jest bardzo korzystne dla konstrukcji.



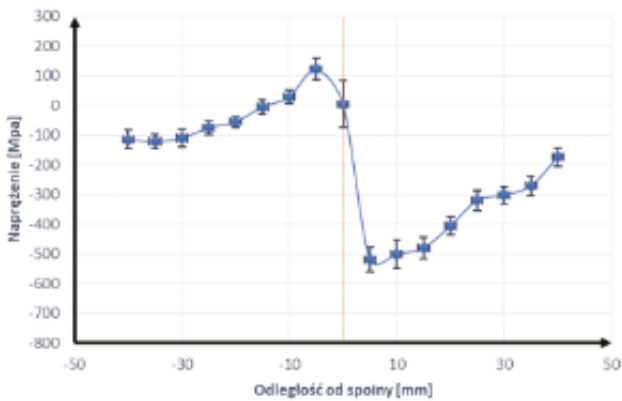
Rys. 8. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej po pierwszej operacji technologicznej po spawaniu i szlifowaniu powierzchni.

Fig. 8. Stress distribution in gas turbine detail elements after the first technological operation after welding and surface grinding.



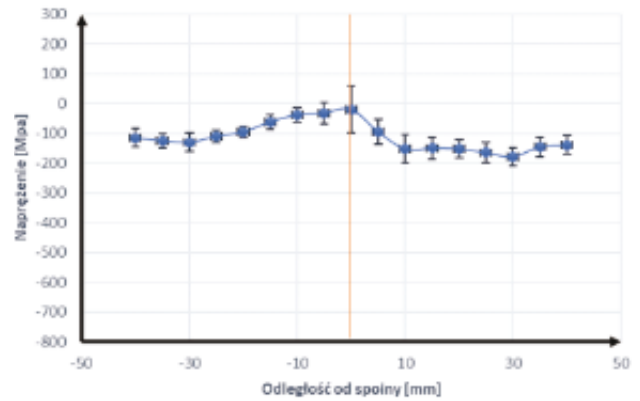
Rys. 9. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej po drugiej operacji technologicznej po spawaniu i szlifowaniu powierzchni.

Fig. 9. Stress distribution in gas turbine detail elements after the second technological operation after welding and surface grinding.



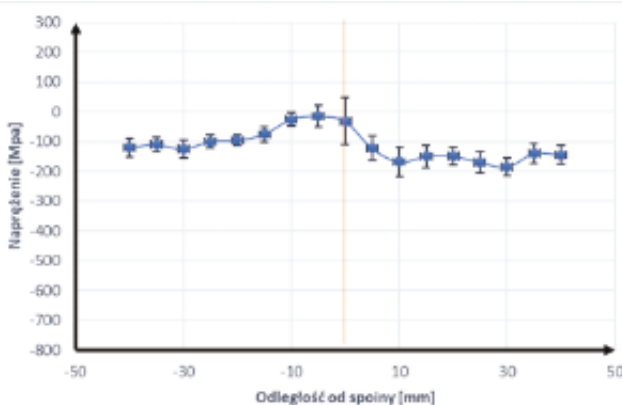
Rys. 10. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej po trzeciej operacji technologicznej po spawaniu i szlifowaniu powierzchni.

Fig. 10. Stress distribution in gas turbine detail elements after the third technological operation after welding and surface grinding.



Rys. 11. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej po skorygowaniu drugiej i trzeciej operacji technologicznej po spawaniu i szlifowaniu powierzchni.

Fig. 11. Stress distribution in parts of the gas turbine after correcting the second and third technological operations after welding and surface grinding.



Rys. 12. Rozkład naprężeń w gotowym detalu turbiny gazowej po poprawie.

Fig. 12. Stress distribution in parts of the gas turbine detail before joining them.

Kolejne operacje technologiczne procesu produkcyjnego polegające na wycinaniu otworów i dodawaniu kolejnych elementów konstrukcji detalu turbiny gazowej spowodowały zmianę rozkładu naprężeń przedstawioną na rysunkach 8, 9 i 10. Jak widać na rysunku 8 po pierwszej operacji technologicznej po spawaniu i szlifowaniu nie nastąpiła istotna zmiana w rozkładzie naprężeń.

Natomiast druga operacja technologiczna wytworzyła gradient naprężeń około 700 MPa (rys. 9), który został powiększony po 3 operacji technologicznej do około 900 MPa (rys. 10).

Po przeprowadzeniu szeregu poprawek procesu produkcji detalu na etapach 2 i 3 korygowanych wynikami pomiaru naprężeń uzyskano po etapie trzecim gradient naprężeń w obszarze okołospoinowym w granicy 200 MPa (rys. 11) utrzymany do końcowego etapu produkcji (rys. 12).

5. Podsumowanie

- Pomiar naprężeń metodą rentgenowską okazał się skutecznym narzędziem diagnostycznym do kontroli konstrukcji urządzeń.
- Dzięki bieżącej kontroli stanu naprężeń można sterować procesem produkcyjnym tego typu konstrukcji w celu uzyskania jak najkorzystniejszych jej parametrów.

6. Literatura

- [1] E. Kula, V. Weiss, „Residual Stress and Stress Relaxation”, 1982 Plenum Press New York.
- [2] I.C. Noyan, J.B. Cohen, „Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation”, Springer-Verlag New York 1987.
- [3] A. Pszonka, J. Ziaja, „Rentgenograficzne metody pomiaru naprężeń”, Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1971.
- [4] W. Szymański, M. Lech-Grega, „Validation of the X-Ray Stress Measurement Method” *Advances In Materials Science* (ISSN: 1730-2439), Vol.42, No.4, 2014.
- [5] M. Lech-Grega, A. Kłyszewski, „Aparat Strainflex PSF-2M do pomiaru naprężeń własnych i austenitu szczytkowego”, *Hutnik*, lipiec 1991
- [6] M. Lech-Grega, W. Szymański, „Zastosowanie rentgenowskiej metody pomiaru naprężeń własnych w badaniach nieniszczących”, XVI Sesja naukowa okrętowców cz. II str.137, Szczecin-Dziwnówek, 1994.
- [7] M. Lech-Grega, W. Szymański, „X-Ray Residual Stress Measurement in 7020 Alloy Welded Joints”, 2003 TMS 132nd Annual Meeting & Exhibition, San Diego, California, USA
- [8] M. Lech-Grega, K. Mazurkiewicz, W. Szymański, „Zmęczenie materiału a stan naprężeń własnych w obszarze okołospoinowym złącz spawanych ze stopu AlZnMg”. Krajowa Konferencja Dobór i eksploatacja materiałów inżynierskich Jurata, 22-25 września 1997.
- [9] M. Lech-Grega, J. Kusnerz, W. Szymański, „Naprężenia własne w złączach spawanych ze stopu AlZnMg”, VII Ogólnopolska Konferencja pt. Metale Nieżelazne w Przemysle Okrętowym; Szczecin Międzyzdroje, 12-14 września 1996, *Mat. Konf.* str. 115-122.
- [10] L. Fajkiel., M. Lech-Grega, W. Szymański, „Naprężenia własne w warstwie wierzchniej formy ciśnieniowej pod wpływem oddziaływań ciekłego stopu aluminium”, *Konf. Naukowa Nowe Materiały – Nowe Technologie Materiałowe w Przemysle Okrętowym i Maszynowym Szczecin-Świnoujście*, wrzesień 1998.
- [11] A. Jurcius, A.V. Valiulis, O. Cernasejus, K.J. Kurzydłowski, A. Jaskiewicz, M. Lech-Grega, „Influence of vibratory stress relief on residual stresses in weldment and mechanical properties of structural steel joint”, *Vibromechanika, Journal of Vibroengineering*, March 2010, vol. 12, str.133-141.
- [12] W. Szymański, M. Lech-Grega, M. Gawlik, „Ocena stanu naprężeń szczytkowych w warstwie nawęglanej kół zębatych”, *Sprawozdanie IMN nr 7066/II/2013*.
- [13] W. Szymański, „Opracowanie metody oceny skuteczności obróbki wielkogabarytowych odlewów z żeliwa EN-GJS-500-7”, *Sprawozdanie IMN nr 7255/14*.
- [14] W. Szymański, M. Lech-Grega, M. Gawlik, „Ocena zmian stanu naprężeń w taśmie ze stali nierdzewnej w trakcie procesu prostowania”, *Sprawozdanie IMN nr 7254/14*.
- [15] W. Szymański, „Ocena wpływu obróbki skrawaniem i obróbki cieplnej na stan naprężeń w walcach ze staliwa L 200HNM”, *Sprawozdanie IMN nr. 7441/15*.
- [16] Wojciech Szymański, Marzena Lech-Grega, Maciej Gawlik, Adam Kokosza, Adam Chochorowski, „Measurement of residual stresses in hot-rolled steel sheets for laser cutting”, *Computer Methods in Materials Science*, Krynica; 11-15 stycznia 2015, str. 251-257.
- [17] A.Milenin, R.Kuziak, M.Lech-Grega, A.Chochorowski, S.Witek, M.Pietrzyk, „Numerical modeling and experimental identification of residual stresses in hot-rolled strips”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 16 (2016) 125 – 134.
- [18] W. Szymański, „Pomiar naprężeń własnych w osiach kolejowych metodą rentgenowską wg PN-EN 13261+A1 2011”, *Badania nieniszczące i diagnostyka*, vol. 4, str. 23-26, 2018.
- [19] <https://eneria.pl/blog/turbina-gazowa-czym-jest-i-jak-dziala>