

Łukasz Sarniak<sup>1\*</sup>, Rafał Molak<sup>1</sup>, Barbara Romelczyk<sup>1</sup>, Piotr Garyga<sup>2</sup>, Zbigniew Pakieła<sup>1</sup>, Andrzej Zagórski<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Warszawa

<sup>2</sup>Zakłady Remontowe Energetyki Katowice Spółka Akcyjna, Katowice

# Diagnostyka stanu technicznego wirników turbin parowych na podstawie badań małych próbek pobranych w sposób mało inwazyjny

## Analysis of technical condition of steam turbine rotors based on miniature samples obtained semi-destructively

### ABSTRACT

Accurate evaluation of the turbine rotor material degradation requires specialized material testing, including light microscopy, SEM and tensile test. Since obtaining standard size samples would significantly weaken the rotor construction, the paper presents a methodology for semi-destructive sampling the material, leaving the surface of the rotor without notches and with a relatively small wall loss. The application of suitable cutting parameters, cooling and equipment fixing enabled the sampling of small samples without interfering in their microstructure. The paper discusses the methodology of mechanical testing of the obtained material with the use of miniaturized specimens such as Miniature Specimen Tensile Test (MSTT) and Small Punch Test (SPT) method

**Keywords:** turbine rotors, miniature specimens, tensile test

### STRESZCZENIE

Precyzyjna ocena stopnia degradacji materiału wirnika turbiny parowej wymaga przeprowadzenia specjalistycznych badań materiałowych, uwzględniających mikroskopię świetlną i skaningową oraz badania wytrzymałościowe. Ponieważ pozyskiwanie próbek o standardowych rozmiarach osłabiłoby pod względem wytrzymałościowym konstrukcję wirnika, w artykule zaprezentowano metodykę pobierania próbek materiału w sposób mało inwazyjny w stosunku do badanego obiektu, pozostawiający powierzchnię wirnika bez karbów i znacznych pocięń. Zastosowanie odpowiednich parametrów cięcia, chłodzenia i mocowania urządzenia umożliwiło pobranie niewielkich próbek o niezmięnionej, nieodkształconej i nieprzepracowanej mikrostrukturze. W pracy omówiono metodykę badań wytrzymałościowych pobranego w ten sposób materiału przy wykorzystaniu małych próbek, tj. statycznej próby rozciągania oraz metody zginania miniaturowych dysków (Small Punch Test).

**Słowa kluczowe:** wirniki turbin, małe próbki, badania wytrzymałościowe

### 1. Wstęp

Celem uzupełnienia diagnostyki i kompleksowej analizy stanu technicznego wirników, uznano za kluczowe przeprowadzenie szeregu dodatkowych badań materiałowych, w tym badań wytrzymałościowych techniką małych próbek (MSTT oraz SPT) oraz zaawansowanych badań mikrostruktury za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Badania wymagają pobrania materiału z wirnika w sposób nieosłabiający zbytnio jego konstrukcji. Obszar, z którego pobierana jest próbka do badań powinien być jednocześnie reprezentatywny w stosunku do reszty wirnika pod kątem właściwości fizycznych materiału.

### 2. Metodyka pobierania próbek

W niniejszym artykule skupiono się na opracowaniu metodyki pobierania próbek materiału z wirników turbin w kontekście badań wytrzymałościowych [1]. W tym celu wykorzystano zaprezentowane na rysunku 1 urządzenie o nazwie Small Sample Scooping Machine (SSSM).

Urządzenie umożliwia pobieranie wycinków materiału z obiektów przemysłowych, w sposób praktycznie nieingerujący w ich mikrostrukturę. Zapewnia możliwość regulacji

prędkości zagłębiania się ostrza w materiał oraz chłodzenie materiału (podłoża i próbki) w obszarze cięcia. Dodatkowo jest urządzeniem w pełni mobilnym [2].

W ramach prowadzonych prac badawczych pobrano próbki z wirnika wysokoprężnej turbiny parowej. Urządzenie zamontowano na wale oraz na tarczy wirnika za pomocą zestawu magnesów i uchwytów mocujących. Zdjęcia wykonane w trakcie procesu pobierania próbek materiału przedstawiono na rysunku 2.

Badania wizualne obszarów pobrania próbek materiału po procesie cięcia wykazały, że powstałe zagłębienie po wycięciu nie posiada ostrych krawędzi ani na brzegach ani na jego dnie. Dzięki temu wgłębienie nie stanowi karbu technologicznego w konstrukcji urządzenia, mogącego stanowić potencjalne źródło lokalnej koncentracji naprężeń.

Fragment pobranego materiału ma średnicę ok. 20 mm i wysokość 3 mm. W zależności od potrzeb urządzenie pozwala również uzyskiwać próbki o większych rozmiarach - o średnicach dochodzących do ok 30 mm i wysokości do 4 mm. Zdjęcie wycinka materiału wirnika pobranego za pomocą urządzenia SSSM przedstawiono na rysunku 4.

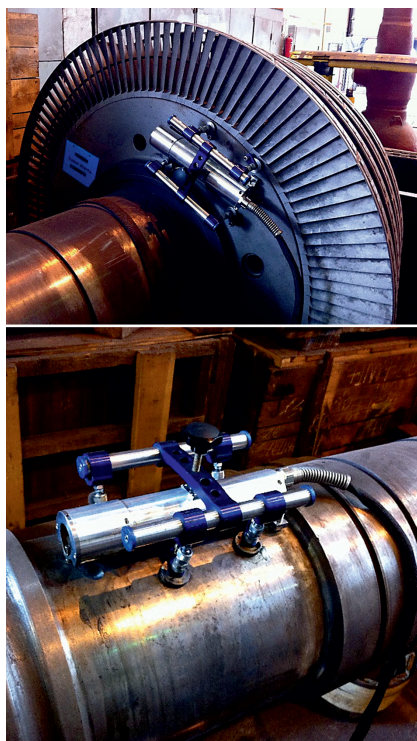
Proces intensywnego chłodzenia materiału pobieranego podczas cięcia zapobiega jego przegrzaniu a w konsekwencji zmianom jego mikrostruktury i właściwości mechanicznych.

\*Autor korespondencyjny. E-mail: lukasz.sarniak@inmat.pw.edu.pl

Ponadto, ilość pobranego materiału jest wystarczająca do przeprowadzenia specjalistycznych badań materiałowych.



Rys. 1. Urządzenie SSSM podłączone do jednostki sterującej  
Fig. 1. SSSM device connected to the control unit



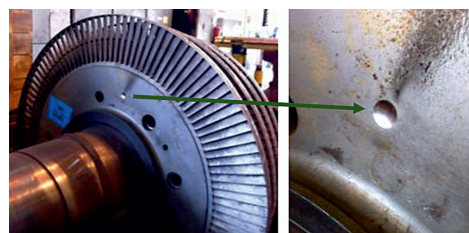
Rys. 2. Zdjęcie urządzenia SSSM w trakcie pobierania próbek materiału z tarczy i wału wirnika turbiny  
Fig. 2. Picture of the SSSM device during turbine rotor disk and shaft material sampling

### 3. Badania wytrzymałościowe przy wykorzystaniu małych próbek

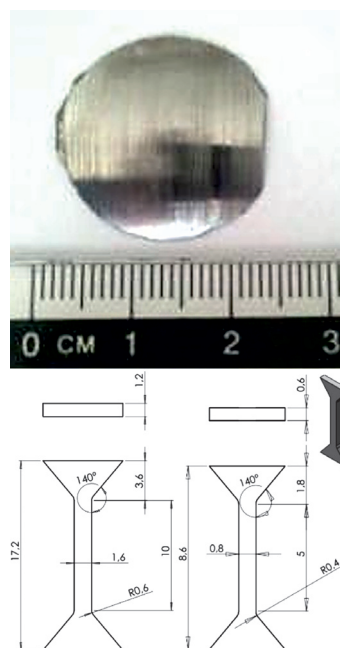
Zastosowanie małych próbek do monitoringu i oceny stanu wirników turbin pozwala na uzyskanie typowych, wyznaczanych na podstawie badań niszczących parametrów wytrzymałościowych, bez istotnej ingerencji w badany obiekt [3]. Do statycznej próby rozciągania małych próbek zastosowano statyczną maszynę wytrzymałościową Zwick/Roell Z005, a próbki pobrano z wycinka metodą cięcia elektroiskrowego (WEDM), celem jak najmniejszej ingerencji w mikrostrukturę materiału [4]. Szkice stosowanych miniaturowanych próbek przedstawiono na Rysunku 4.

Ze względu na mały wymiar próbek do badań, do pomiarów odkształceń wykorzystuje się bezkontaktową, optyczną metodę opartą na cyfrowej korelacji obrazów (ang. DIC – Digital Images

Correlation). Idea metody polega na porównaniu cyfrowych obrazów powierzchni próbki przed badaniem z obrazami po odkształceniu i obliczenie przemieszczeń i obrotów małych obszarów, tzw. „subsetów”. Na podstawie zmierzonych przemieszczeń i obrotów analizowanych obszarów możliwe jest wyznaczenie zarówno odkształceń makroskopowych (porównujemy odkształcenia pomiędzy dwoma „subsetami”), lokalnych odkształceń oraz pól odkształceń na całej analizowanej powierzchni próbki. Metoda umożliwia wyznaczenie charakterystycznych dla próby rozciągania parametrów wytrzymałościowych, takich jak granica plastyczności ( $R_e$ ,  $R_{0,2}$ ), wytrzymałość na rozciąganie ( $R_m$ ), moduł Young’a ( $E$ ) oraz wydłużenie do zerwania ( $A$ ).



Rys. 3. Zdjęcie powierzchni tarczy wirnika turbiny po pobraniu wycinka materiału  
Fig. 3. Picture of turbine rotor disk surface after material sampling



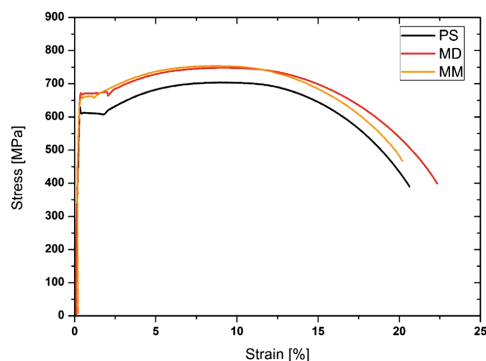
Rys. 4. Zdjęcie powierzchni wycinka materiału wirnika turbiny pobranego techniką SSSM oraz kształty i wymiary stosowanych miniaturowanych próbek

Fig. 4. Picture of the turbine rotor material sample sampled using SSSM technique and the shapes and dimensions of used miniaturized specimens

Bezpośrednie porównywanie właściwości mechanicznych mierzonych przy wykorzystaniu próbek standardowych z danymi uzyskanymi przy użyciu małych próbek jest ograniczone ze względu na tzw. efekt skalowania [5]. W praktyce, dla danego materiału wykonywane są próbki standardowe i małe próbki, a następnie określana jest korelacja pomiędzy wynikami badań wytrzymałościowych. Określoną korelację można odnieść do

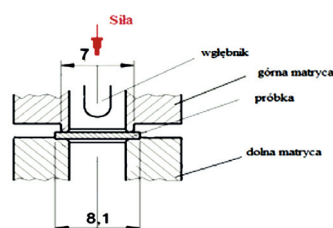
innych próbek tego samego materiału [6].

Wpływ wielkości próbek z materiału 26H2MF, stosowanego na wirniki turbin, w stanie dostawy zaprezentowano na rysunku 5. Na wykresie porównano próbki standardowe (PS), małe próbki „duże” (MD) oraz małe próbki „małe” (MM). Widoczne różnice w parametrach wytrzymałościowych, głównie granicy plastyczności ( $R_e$ ) oraz wytrzymałości na rozciąganie wynikają z oddziaływania wspomnianego powyżej efektu skalowania.

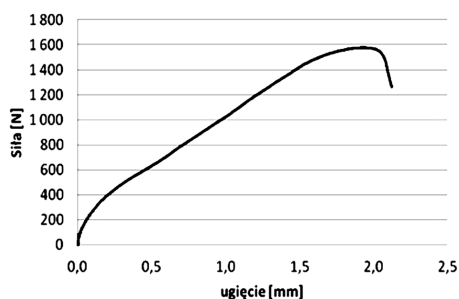


Rys. 5. Krzywe naprężenie – odkształcenie uzyskane w wyniku statycznej próby rozciągania próbek o różnych wymiarach ze stali 26H2MF

Fig. 5. Stress curves obtained from the tensile tests of different size 26H2MF steel samples



Rys. 6. Schemat zamocowania próbek do badań Small Punch Test  
Fig. 6. Small Punch Test sample mounting scheme



Rys. 7. Wykres uzyskany w trakcie badań metodą SPT próbki ze stali ferrytycznej

Fig. 7. Graph obtained during SPT of ferritic steel sample

Alternatywną metodą umożliwiającą badania wytrzymałościowe w przypadku ograniczonej objętości materiału jest metoda Small Punch Test (SPT). Badanie polega na obciążaniu okrągłej próbki podpartej na krawędziach, poprzez wciskanie wgnębniaka o zdefiniowanej geometrii (Rysunek 6). Do badań stosuje się wgnębniak zakończony kulą (Small Punch Test) lub pierścieniem (Minidisc Bend Test) o zdefiniowanym promieniu wewnętrznym i zewnętrznym. Próbkę wykorzystywane do badań SPT zwykle mają postać krążków o średnicy  $8 \div 10$  mm

i grubość  $0.4 \div 1$  mm. W zależności od wyznaczanych parametrów stosowane są próbki z karbem lub bez karbu [7, 8].

Metoda SPT pozwala na wyznaczenie parametrów, takich jak: granica plastyczności ( $R_e$ ), wytrzymałość na rozciąganie ( $R_m$ ), moduł Young'a ( $E$ ), krytyczny współczynnik intensywności naprężeń (KIC), krytyczną całkę Rice'a ( $J$ ), próg kruchości, odporność na pełzanie. Jednakże parametry te wyznacza się na drodze korelacji z wynikami prób standardowych a nie bezpośrednio z badań SPT [9, 10]. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rysunku 7.

#### 4. Podsumowanie

Opracowana metodyka cięcia umożliwia pobieranie miniatury próbek w sposób praktycznie nieingerujący w mikrostrukturę materiału oraz nieosłabiający zbytnio konstrukcji wirnika pod względem wytrzymałościowym. Ponadto, opracowana metodyka badań pozyskanych w ten sposób próbek pozwoli na bardziej precyzyjną ocenę stanu zużycia eksploatacyjnego turbin parowych. Rezultatem wdrożenia omawianej technologii w praktyce może być zobiektywizowanie zasobu międzyremontowego i czasu trwania eksploatacji wirników turbin energetycznych.

#### 5. Literatura/References

- [1] PN-EN ISO 6892-1, Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia
- [2] P. Roberts, I. Dane, "Scoop Sampling for Small Punch Test Method UNI", in CEN Workshop 21 on Small Punch Test Method for Metallic Materials, 2004.
- [3] R. Molak, M. Kartal, Z. Pakiela, W. Manaj, M. Turski, S. Hiller, S. Gungor, L. Edwards, K. Kurzydłowski, "Use of Micro Tensile Test Samples in Determining the Remnant Life of Pressure Vessel Steels", Applied Mechanics and Materials, vol. 7-8, pp. 187-194, 2007. DOI 10.4028/www.scientific.net/amm.7-8.187
- [4] G. Cusanelli, A. Hessler-Wyser, F. Bobard, R. Demellayer, R. Perez, R. Flükiger, "Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique", Journal of Materials Processing Technology, vol. 149, no. 1-3, pp. 289-295, 2004. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.047
- [5] R. Molak, M. Kartal, Z. Pakiela, K. Kurzydłowski, "The effect of specimen size and surface conditions on the local mechanical properties of 14MoV6 ferritic-pearlitic steel", Materials Science and Engineering: A, vol. 651, pp. 810-821, 2016. DOI 10.1016/j.msea.2015.11.037
- [6] R. Molak, "Zastosowanie minipróbek do wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów", Rozprawa doktorska (Ph.D. dissertation), Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2011.
- [7] M. Manahan, "A New Postirradiation Mechanical Behavior Test – The Miniaturized Disk Bend Test", Nuclear Technology, vol. 63, no. 2, pp. 295-315, 1983. DOI 10.13182/nt83-a33289
- [8] M. Abendroth, M. Kuna, "Identification of ductile damage and fracture parameters from the small punch test using neural networks", Engineering Fracture Mechanics, vol. 73, no. 6, pp. 710-725, 2006. DOI 10.1016/j.engfracmech.2005.10.007
- [9] T. García, C. Rodríguez, F. Belzunce, C. Suárez, "Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test", Journal of Alloys and Compounds, vol. 582, pp. 708-717, 2014. DOI 10.1016/j.jallcom.2013.08.009
- [10] B. Romelczyk, T. Brynk, R. Molak, A. Jastrzębska, K. Nowak, Z. Pakiela, "Magnesium AZ91 Alloy Cast Mechanical Properties Measured by the Miniaturized Disc-Bend Test", Key Engineering Materials, vol. 592-593, pp. 805-808, 2014. DOI 10.4028/www.scientific.net/kem.592-593.805