

# Identyfikacja stanu tworzywa wirników turbin parowych metodami nieniszczącymi

Identification of the material state of turbine rotors using non-destructive methods

## Streszczenie

Przy ocenie stanu technicznego wirników turbin parowych problematyczne jest określenie rzeczywistych własności tworzywa. Analiza mikrostruktury, składu chemicznego, pomiary twardości oraz badania defektoskopowe stanowią współcześnie obowiązujący w diagnostyce tego typu obiektów kanon metod badawczych.

Najczęściej nieznane pozostają rzeczywiste makroskopowe własności wytrzymałościowe, ponieważ ich wyznaczenie wymaga przeprowadzenia badań niszczących, które wymagają pobrania z wirnika próbek o znacznych rozmiarach, czego w zasadzie się nie praktykuje. W artykule pokazano możliwości metody badawczej wykorzystującej małe próbki – *Small Punch Test* (SPT). Metoda SPT jest formalnie metodą niszczącą, jednak ze względu na znikomą ilość materiału pobieranego do badania można ją traktować jako metodę nieniszczącą, a miejsce pobrania próbki z wirnika nie wymaga naprawy. Za pomocą metody SPT możliwe jest wyznaczanie podstawowych własności mechanicznych materiału, określanych normalnie za pomocą statycznej próby rozciągania, takich jak moduł Younga  $E$ , granica plastyczności  $R_e$  czy wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  oraz wielkości normalnie wyznaczanych za pomocą badania udarności, tj. temperatury przejścia plastyczno-kruchości czy odporności materiału na pęknięcie. Istnieje również możliwość określania własności materiału przy pełzaniu.

**Słowa kluczowe:** właściwości materiałowe; metoda małych próbek SPT; wirniki turbin parowych

## Abstract

During durability assessment of steam turbine rotors it is problematic to determine the actual properties of the material. Analysis of microstructure, chemical composition, hardness measurements and defectoscopic examinations are the contemporary methods used in the assessment of such objects.

Usually the real macroscopic mechanical properties remains unknown because their determination requires a destructive testing that requires large specimens to be taken from the rotor, which is not practically practiced. The paper presents the possibilities of the small punch test method (SPT) which bases on small specimens. The SPT method is a formally destructive method of material examination, however, because of the insufficient amount of material necessary to prepare specimens, it can be treated as a non-destructive method of material testing. Moreover the place of sampling does not require repair.

Using the SPT method, it is possible to determine the basic mechanical properties of a material normally determined by a tensile test such as the Young's modulus  $E$ , yield stress  $R_e$  or ultimate stress  $R_m$ , and properties determined by Charpy impact test in example fracture appearance transition temperature or fracture strength. It is also possible to determine the material properties under creep conditions.

**Keywords:** material properties; SPT method; steam turbine rotor

## Wstęp

Ocena stanu technicznego eksploatowanych wirników turbin powinna być oparta na dogłębnej analizie ich stanu technicznego. Szczególnej uwagi wymaga określenie stanu materiału, przy czym kompletną wiedzę o stanie materiału można uzyskać dopiero po przeprowadzeniu szeregu

niszczących i nieniszczących badań materiałowych. Analiza mikrostruktury, składu chemicznego, pomiary twardości oraz badania defektoskopowe stanowią współcześnie obowiązujący w diagnostyce tego typu obiektów kanon metod badawczych, jednakże nie pozwalają one na wyznaczenie

**Dr inż. Michał Bieniek** – Politechnika Śląska, CASTOR Unia Gospodarcza Sp. z o.o.; **dr hab. inż. Maciej Roskosz, prof. AGH** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; **prof. dr hab. inż. Andrzej Rusin** – Politechnika Śląska; **mgr inż. Rafał Budzisz;** **mgr inż. Tomasz Skoczylas** – Doosan Babcock Energy Polska S.A.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: [mroskosz@agh.edu.pl](mailto:mroskosz@agh.edu.pl)

makroskopowych właściwości wytrzymałościowych badanego tworzywa. Wyznaczenie makroskopowych właściwości wytrzymałościowych wymaga przeprowadzenia badań niszczących, które wymagają pobrania z wirnika próbek o znacznych rozmiarach, czego w zasadzie się nie praktykuje.

W sytuacji, gdy nie można z elementu pobrać tradycyjnej próbki, można wykorzystać stosunkowo nową metodę badań, wykorzystującą małe próbki – *Small Punch Test* (SPT) [1÷3,5÷8]. Pomimo że metoda SPT jest formalnie metodą niszczącą, to ze względu na znikomą ilość materiału pobieranego do badania można ją traktować jako metodę quasi-niszczącą.

## Metoda SPT

Metoda *Small Punch Test* (SPT) zasadniczo jest sprowadzoną do skali mikro próbą tłoczenia materiału i polega na przetłaczaniu próbki za pomocą kuliście zakończonego trzpienia. Próbka do badań tą metodą wg [1,6] ma postać krążka o średnicy 8 mm i grubości 0,5 mm. Za pomocą metody SPT możliwe jest wyznaczanie podstawowych własności mechanicznych materiału, określanych normalnie za pomocą statycznej próby rozciągania, takich jak moduł Younga  $E$ , granica plastyczności  $R_e$  czy wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  oraz wielkości normalnie wyznaczanych za pomocą badania udarności, tj. temperatury przejścia plastyczno-kruchości czy odporności materiału na pękanie [1÷3,5÷8]. Istnieje również możliwość określania własności materiału przy pełzaniu [4,6,9]. Wyznaczanie wymienionych wielkości odbywa się zazwyczaj za pomocą zależności korelacyjnych, opracowanych na podstawie „tradycyjnych” badań. Należy jednak zaznaczyć, że opracowane równania korelacyjne są prawdziwe dla określonych typów stanowisk badawczych i wymiarów próbek [1].

Największą zaletą metody SPT jest możliwość oceny własności materiału eksploatowanych elementów i uzyskania rzeczywistych danych materiałowych na potrzeby oceny ich trwałości. Ponadto, dzięki tej metodzie możliwe jest określenie zmiany własności materiału na skutek eksploatacji.

## Opis przeprowadzonych badań

Objektem badań była martenzytyczna stal wirnikowa nowej generacji X12CrMoWVNbN10-1-1. Materiał do badań pobrano z odkuwki w stanie dostawy oraz elementów poddanych długotrwałemu, wysokiemu odpuszczaniu w temperaturze 700 °C. Skład chemiczny badanego materiału przedstawiono w tabelcy I [1].

W ramach badań przeprowadzono dla materiału w stanie dostawy próbę rozciągania w temperaturze otoczenia, wyznaczono temperaturę przejścia plastyczno-kruchości oraz przeprowadzono badania metodą SPT. W przypadku materiału obrobionego cieplnie, z racji bardzo małej ilości dostępnego materiału, przeprowadzono jedynie badania SPT. Na podstawie otrzymanych wyników opracowano korelacje pozwalające na wyznaczanie modułu Younga  $E$ , granicy plastyczności  $R_e$ , czy wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$

Tablica I. Skład chemiczny badanej stali, %

Table I. Chemical composition of examined steel, %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,11	0,08	0,41	0,008	0,004	10,35	1,00
Ni	W	V	Al	N	Nb	
0,80	1,03	0,18	0,02	0,051	0,040	

oraz temperatury przejścia plastyczno-kruchości  $T_{FATT}$  dla badanej stali. Pokazano ponadto wpływ obróbki cieplnej na właściwości wytrzymałościowe badanego materiału.

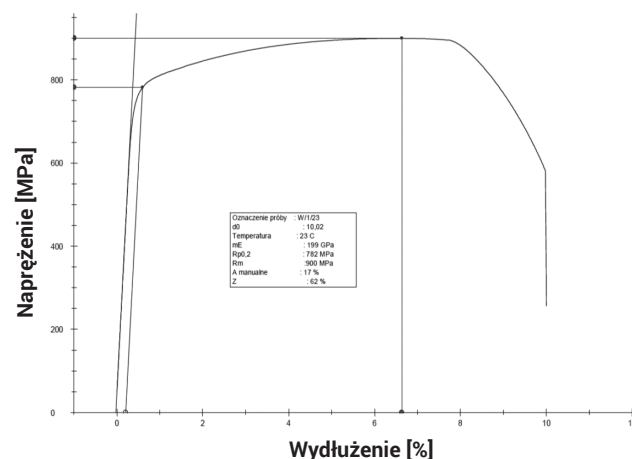
W pierwszym etapie badań skupiono się na wyznaczeniu zależności korelacyjnych dla wielkości wyznaczanych przy pomocy statycznej próby rozciągania. Na rysunku 1 oraz w tabelcy II przedstawiono wyniki próby rozciągania, a na rysunku 2 oraz w tabelcy III przedstawiono wyniki badań SPT stali X12CrMoWVNbN10-1-1 w stanie dostawy, przeprowadzonych w temperaturze otoczenia. Na podstawie otrzymanych wyników opracowano zależności korelacyjne pomiędzy badaniami „tradycyjnymi” a wynikami badań SPT.

Znajdujące się w tabelcy III, wielkości oznaczane jako  $F_{max}$ ,  $u_E$  oraz  $F_E$  oznaczają odpowiednio maksymalną siłę w próbie SPT, przemieszczenie odpowiadające sile  $F_E$  oraz siłę powodującą uplastycznienie próbki w próbie SPT. Maksymalna siła w próbie SPT jest odpowiednikiem wytrzymałości materiału na rozciąganie, a siła  $F_E$  jest odpowiednikiem granicy

Tablica II. Wyniki statycznej próby rozciągania stali X12CrMoWVNbN10-1-1

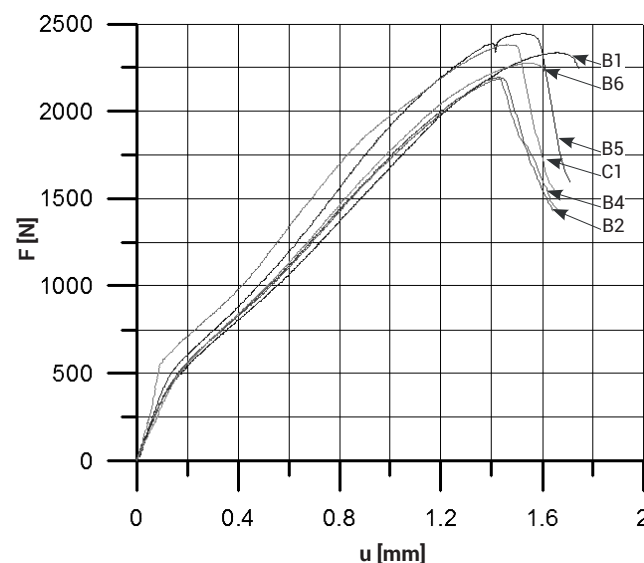
Table II. Tensile properties of X12CrMoWVNbN10-1-1 steel

E [MPa]	$R_{0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]
$1,99 \cdot 10^5$	782	900



Rys. 1. Krzywa rozciągania stali X12CrMoWVNbN10-1-1

Fig. 1. Stress-strain curve for X12CrMoWVNbN10-1-1 steel



Rys. 2. Wyniki badań SPT dla temperatury otoczenia dla stali X12CrMoWVNbN10-1-1

Fig.2. SPT curves for ambient temperature for X12CrMoWVNbN10-1-1 steel

**Tablica III.** Wyniki badań SPT dla temperatury otoczenia dla stali X12CrMoWVNbN10-1-1

**Table III.** The results of SPT testing of the X12CrMoWVNbN10-1-1 steel

nr	t [°C]	u <sub>E</sub> [mm]	F <sub>E</sub> [N]	E <sub>SPT</sub> [N/mm]	F <sub>max</sub> [N]	E <sub>0-max</sub> [J]	E <sub>0-end</sub> [J]
B1	15	0,115	424,9	3827,6	2336,0	2,3034	2,6856
B2	17	0,133	478,6	3583,1	2194,5	1,8104	2,2379
B4	19	0,133	468,0	3444,7	2188,0	1,8167	2,2379
B5	25	0,128	507,6	3952,8	2444,0	2,2063	2,6256
B6	25	0,107	335,0	3070,5	2274,5	2,0993	2,4641
C1	20	0,094	537,0	6079,2	2383,0	2,1853	2,5583

plastyczności. E<sub>SPT</sub> oznacza nachylenie początkowego, liniowego odcinka krzywej SPT i jest odpowiednikiem modułu Younga.

Poszukiwane zależności korelacyjne, pozwalające na wyznaczenie wytrzymałości materiału na rozciąganie, granicy plastyczności oraz modułu Younga na podstawie próby SPT, mają postać:

$$R_m = A_1 F_{max} \quad (1)$$

$$R_e = A_2 F_E \quad (2)$$

$$E = A_3 E_{SPT} \quad (3)$$

gdzie:

A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> – stałe.

Po podstawieniu wyznaczonych na podstawie pomiarów wartości współczynników A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub> zależności korelacyjne (1), (2) i (3) dla stali X12CrMoWVNbN10-1-1 przyjmują postać:

$$R_m = 0,391 \cdot F_{max} \quad (4)$$

$$R_e = 1,706 \cdot F_E \quad (5)$$

$$E = 49,838 \cdot E_{SPT} \quad (6)$$

Do zależności (4) i (5) wartości sił należy podstawiać w N, a otrzymane wartości granicy plastyczności i wytrzymałości materiału na rozciąganie będą wyrażone w MPa. W przypadku zależności (6) E<sub>SPT</sub> należy podstawiać w N/mm aby wartość modułu Younga była wyrażona w MPa.

Kolejnym etapem badań było wyznaczenie zależności korelacyjnej dla temperatury przejścia plastyczno-krucho. W tym celu przeprowadzono badania udarności stali w temperaturze z zakresu od -197 °C do 100 °C. Wartości pracy łamania w różnych wartościach temperatury przedstawiono w tabelicy IV, a wartości pracy przetłaczania próbki w próbie SPT w różnych wartościach temperatury przedstawiono w tabelicy V. Wyniki badań SPT przedstawiono zarówno dla stali w stanie wyjściowym, jak i dla stali po obróbce cieplnej. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie badań udarności oraz badań SPT w obniżonych wartościach temperatury.

Poszukiwano zależności korelacyjnej pozwalającej przeliczać wartość temperatury przejścia plastyczno-krucho wyznaczoną za pomocą badań SPT na tą wyznaczoną za pomocą badań „tradycyjnych” o postaci:

$$T_{FATT} = A_4 \cdot T_{SPT} \quad (7)$$

**Tablica IV.** Wyniki próby udarności dla stali X12CrMoWVNbN10-1-1

**Table IV.** The results of Charpy impact testing of the X12CrMoWVNbN10-1-1 steel

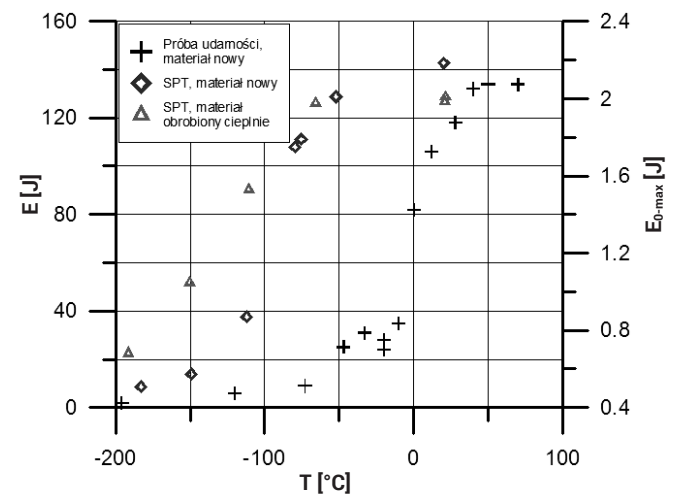
Nr próbki	Temperatura próby T [°C]	Praca łamania KV [J]
1	-196	2
2	-120	6
3	-73	9
4	-47	25
5	-33	31
6	-10	35
7	0	82
8	12	106
9	28	118
10	40	132
11	50	134
12	70	134

Po podstawieniu wartości współczynnika zależność ta przyjmie postać:

$$T_{FATT} = 1,478 \cdot T_{SPT} \quad (8)$$

Wartości temperatur w równaniu (8) należy podstawiać w stopniach Kelvina.

Na rysunku 3 widoczna jest również poprawa plastyczności (obniżenie się temperatury przejścia plastyczno-krucho) materiału poddanego obróbce cieplnej w odniesieniu do materiału wyjściowego.



**Rys. 3.** Wyznaczanie temperatury przejścia plastyczno-krucho dla stali X12CrMoWVNbN10-1-1

**Fig. 3.** Evaluation of fracture appearance transition temperature for X12CrMoWVNbN10-1-1 steel

**Tablica V.** Wyniki badań SPT dla różnych wartości temperatury dla stali X12CrMoWVNbN10-1-1  
**Table V.** The results of SPT testing of the X12CrMoWVNbN10-1-1 steel for different temperatures

Materiał nowy			Materiał obrobiony cieplnie		
Nr próbki	Temperatura próby T [°C]	E <sub>0-max</sub> [J]	Nr próbki	Temperatura próby T [°C]	E <sub>0-max</sub> [J]
1	-183	0,508	1	-192	0,682
2	-149	0,574	2	-150	1,046
3	-112	0,870	3	-111	1,529
4	-80	1,750	4	-66	1,975
5	-75	1,790	5	21	1,985
6	-52	2,011	6	21	2,008
7	20	2,185			

## Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wyniki badań stali wirnikowej X12CrMoWVNbN10-1-1 za pomocą metody *Small Punch Test*. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano zależności korelacyjne pozwalające wyznaczać moduł Younga, granicę plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie, a także temperaturę przejścia plastyczno-kruczego na podstawie prób SPT dla stali X12CrMoWVNbN10-1-1.

Uzyskane wyniki pokazują, że jest możliwe wykorzystanie metody SPT w diagnostyce wirników turbin parowych, jednakże niezbędne jest wcześniejsze opracowanie zależności korelacyjnych dla poszczególnych gatunków stali wirnikowych lub opracowanie zależności mających charakter uniwersalny. Prowadzone są badania mające na celu diagnozowanie stanu tworzywa wirników turbin bloków 200 MW, które ciągle są podstawowymi blokami polskiej energetyki zawodowej a ich stan techniczny i niezawodność eksploatacji może znacząco wpływać na stabilność systemu energetycznego Polski.

## Literatura

- [1] Bieniek M.: Ocena bezpieczeństwa eksploatacji maszyn i urządzeń energetycznych o znacznym stopniu zużycia, Rozprawa doktorska, Gliwice 2014.
- [2] Fleury E., Ha J.S.: Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: I, Mechanical strength, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1998, Vol. 75, pp. 699-706.
- [3] Fleury E.: Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: II, Fracture toughness, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1998, Vol. 75, pp. 707-713.
- [4] Izaki T., Kobayashi T., Kusumoto J., Kanaya A.: A creep life assessment method for boiler pipes using small punch creep test, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2009, Vol. 86, pp. 637-642.
- [5] Klevtsov I., Dedov A., Molodtsov A.: Using of small punch test for determination of tensile properties for power plant steels, 6th International Daaam Baltic Conference Industrial Engineering, Tallin, 24-26 April 2008.
- [6] Norma PKN-CEN/CWA 15627: Small Punch Test Method for Metallic Materials.
- [7] Shekhter A., Croker A.B.I., Hellier A.K., Moss C.J., Ringer S.P.: Towards the correlation of fracture toughness in an ex-service power generating rotor, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2000, Vol. 77, pp. 113-116.
- [8] Song S.H., Faulkner R.G., Flewitt P.E.J., Smith R.F., Marmy P.: Temper embrittlement of a CrMo low-alloy steel evaluated by means of small punch testing, *Material Science and Engineering A*, 2000, Vol. 281, pp. 75-81.
- [9] Yang Z., Wang Z.: Relationship between strain and central deflection in small punch creep specimens, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2003, Vol. 80, pp. 397-404.