

Marek Nowak*, Patryk Baran
Urząd Dozoru Technicznego

Możliwości i korzyści zastosowania metody Small Punch Test w diagnostyce urządzeń przemysłowych

Possibilities and benefits of using the Small Punch Test method in the diagnosis of industrial devices

STRESZCZENIE

Dla zapewnienia bezpiecznej eksploatacji urządzeń technicznych konieczna jest wiedza o aktualnym ich stanie technicznym. Dotyczy to zarówno urządzeń w przemyśle energetycznym, petrochemicznym czy też chemicznym. W celu zapewnienia bezawaryjnej eksploatacji urządzeń prowadzone są badania z wykorzystaniem różnych metod nieniszczących. Katalog stosowanych metod jest co raz szerszy ze względu na rozwój różnych metod badawczych i potrzeby lepszej diagnostyki. Badania te prowadzone są w celu ujawniania uszkodzeń jak również istotne jest dostarczenie informacji o stanie materiału badanego obiektu. Dane dotyczące własności materiału pozyskuje się dzięki wykorzystaniu różnych metod badawczych, niekiedy mocno inwazyjnych. Alternatywą może być wykorzystanie metody Small Punch Test (SPT), która uważana jest za metodę mało inwazyjną. W artykule przedstawiono przykłady wykorzystania metody SPT w praktyce przemysłowej do wyznaczenia własności wytrzymałościowych materiałów jak również inne korzyści zastosowania tej metody. Pobranie niewielkiego wycinka materiału pozwala m.in. na realizację badań mikrostruktury za pomocą mikroskopu świetlnego i skaningowego mikroskopu elektronowego czy pomiarów twardości.

Słowa kluczowe: Small Punch Test (SPT); własności wytrzymałościowe; ocena stanu materiału.

1. Wstęp

Metoda SPT (Small Punch Test) jest mało inwazyjną metodą służącą do wyznaczenia własności wytrzymałościowych materiałów. Została opracowana na potrzeby energetyki jądrowej, gdzie istotnym jest, aby pobrany z urządzenia wycinek materiału, który jest napromieniowany był jak najmniejszy. Metoda ta znalazła aktualnie szersze zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Badania metodą SPT pozwalają wyznaczyć m.in. podstawowe własności materiału ($R_{p0,2}$, R_m) wyznaczane standardowo w statycznej próbie rozciągania. Dodatkowo oprócz podstawowych własności wytrzymałościowych, metoda umożliwia wyznaczenie temperatury przejścia w stan kruchy (ang. Ductile to Brittle Transition temperature, DBTT) czy wykonanie skróconych prób pełzania. Aktualnie metoda SPT stanowi znormalizowaną metodę badań. Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej jak również

*Autor korespondencyjny.

E-mail: marek.nowak@udt.gov.pl

ABSTRACT

In order to ensure safe operation of technical devices, knowledge of their current technical condition is necessary. This applies to devices in the energy as well petrochemical and chemical industries. In order to ensure failure-free operation of devices, the various non-destructive methods are used. The catalogue of methods used is becoming wider due to the development of various research methods and the needs for better diagnostics. These tests are carried out to detect damage and it is also important to provide information about material condition of tested object. Mechanical properties of the material are obtained through the use of various research methods, sometimes very invasive. An alternative may be the use of the Small Punch Test (SPT) method, which is considered a minimally invasive method. The article presents examples of the use of the SPT method in industrial practice to determine the strength properties of materials as well as other benefits of using this method. Taking a small sample of the material allows, among others, to carry out microstructure tests using a light microscope and a scanning electron microscope or hardness measurements.

Keywords: computed tomography; NDT testing; tomogram reconstruction; CT image quality.

sposobu wykonywania badań opisano w normie PN-EN 10371:2021-9 „Metale – Metoda badania małym stemplem”, która wprowadza normę europejską EN 10371:2021 – Metallic materials – Small Punch Test method. Istotnym jest, że wykorzystywany system powierzchniowego pobierania materiału pozwala na otrzymanie wycinków materiału o średnicy około 25 mm i wysokości do 3,2 mm, a ubytek materiału powstały w danym obiekcie nie zawiera ostrych krawędzi.

2. Badania wstępne

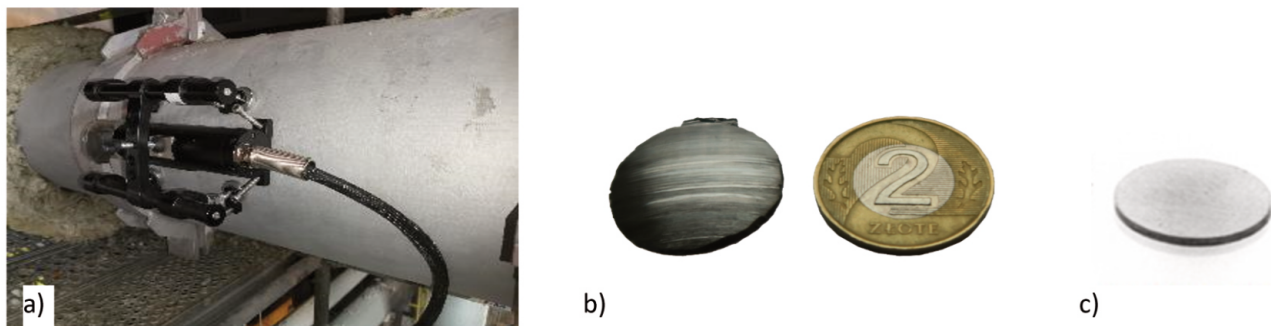
Badania podjęte w celu wdrożenia metody SPT do diagnostyki przemysłowej zostały poprzedzone wstępnymi badaniami walidacyjnymi, potwierdzającymi poprawność wyznaczenia własności materiałów w próbach SPT. Badania porównawcze zrealizowano na materiałach wykorzystywanych w przemyśle energetycznym zarówno do budowy rurociągów (10H2M, 13HMF, 15HM) jak również do badania walczaków (15NiCuMoNb5-6-4; 18CuMNT) oraz na materiałach stosowanych w innych gałęziach

przemysłu (St37.2, SA516 Gr 70). Jako metodę porównawczą przyjęto metodę badania wytrzymałości na rozciąganie metali wg normy PN-EN ISO 6892-1:2020-05 „Metale -- Próba rozciągania -- Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej”, a parametry podlegające porównaniu to R_m i $R_{p0.2}$. Ponieważ docelowe badania są realizowane na materiałach o różnym stopniu wyeksploatowania, badaniom porównawczym poddano zarówno materiały nowe jak również materiały o różnym stopniu eksploatacji (od 30 do 250 tys. godzin pracy). Dla przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników wyznaczono wartości średnie jak również wartości odchylenia standardowego jako podstawowej miary rozrzutu otrzymanych wyników. Dla określenia poprawności oznaczania i przydatności metody SPT, obliczono procentową różnicę między wartościami odniesienia (uzyskanymi w badaniach statycznej próby rozciągania), a wyznaczonymi wartościami wybranych parametrów. Następnie porównano wartości średnie z małym stemplem z przyjętymi kryteriami akceptacji opartymi o opracowanie „Current status of the small punch test standardization within the ASTM”. Przyjęto kryterium, że średnia wartość z badań metodą SPT musi się mieścić w przedziale 2σ od wartości średniej dla badań statycznej próby rozciągania. Przedział 2σ przyjęto jako $2x$ odchylenie standardowe dla oznaczenia danej wartości w próbie statycznego rozciągania. Przyjęte w procesie walidacji kryteria akceptacji zostały spełnione.

3. Badania przemysłowe

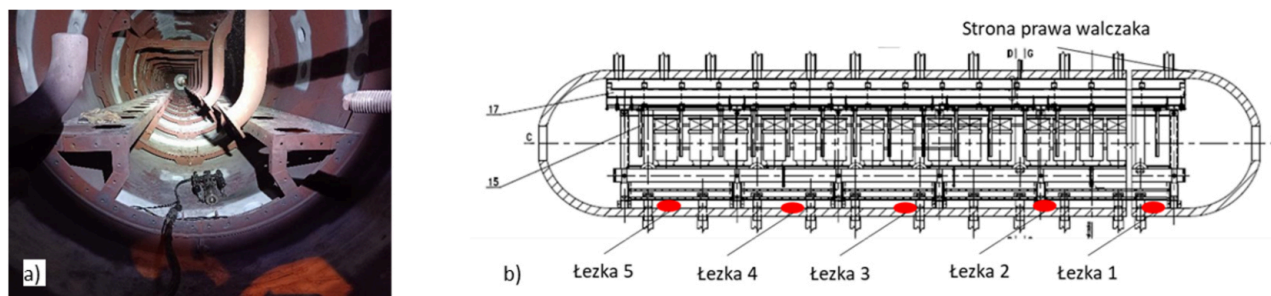
Pierwsze badania przemysłowe miały charakter porównawczy, tzn. ocenie poddano materiał pochodzący

z rurociągu wtórnego przegrzewu pary pobrany z dwóch stref. Jeden wycinek pobrano z elementu, który w czasie eksploatacji uległ uszkodzeniu, a drugi z elementu odniesienia. Celem badań było sprawdzenie czy doszło do pogorszenia własności wytrzymałościowych materiału uszkodzonego elementu. Próbkę do badań pobrano w formie wycinków o sferycznym kształcie (łezek) z wykorzystaniem urządzenia Scooper Automatic Scoop Sampling zamontowanego na obiekcie przy użyciu uchwytów magnetycznych. Pobrany wycinek poddano dalszej obróbce mechanicznej celem uzyskania próbek o średnicy 8mm i grubości $500 \pm 5 \mu\text{m}$ – zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 10371:2021-09. Zamontowane urządzenie do pobierania próbek na rurociągu oraz pobrany wycinek materiału z którego możliwe jest uzyskanie kilku finalnych próbek do badań SPT przedstawiono na Rys. 1. Przeprowadzone zostały badania na serii próbek z danej strefy, a następnie wartości średnie porównano między sobą jak również porównano z wymaganiami normy dla gatunku materiału z którego wykonany jest rurociąg. Uzyskane wyniki własności wytrzymałościowych potwierdziły brak zmian własności materiału w strefie awarii i jednocześnie spełnienie wymagań normy. Przykładem obrazującym wykorzystanie metody SPT w szerszym zakresie są badania przeprowadzone na walcach kotłów w przemyśle energetycznym. W przypadku pierwszego urządzenia wykonanego z materiału 15NCuMnNb i czasie eksploatacji około 180 tys. h. celem badań było określenie własności wytrzymałościowych na poszczególnych cargach części walcowej zbiornika. Materiał z walczków pobrano z wewnętrznej powierzchni (Rys. 2).



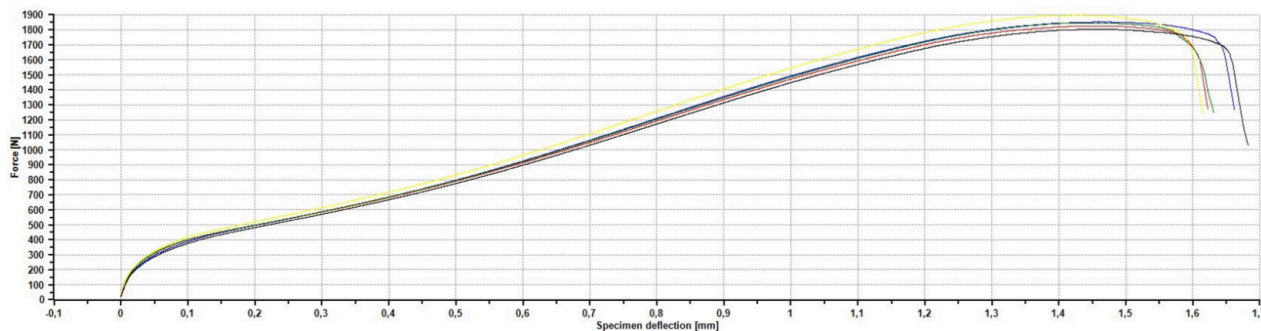
Rys. 1. a) Urządzenie do pobierania próbek, b) pobrany materiał, c) próbka do badań.

Fig. 1. a) Sampling device, b) sampled material, c) test sample.



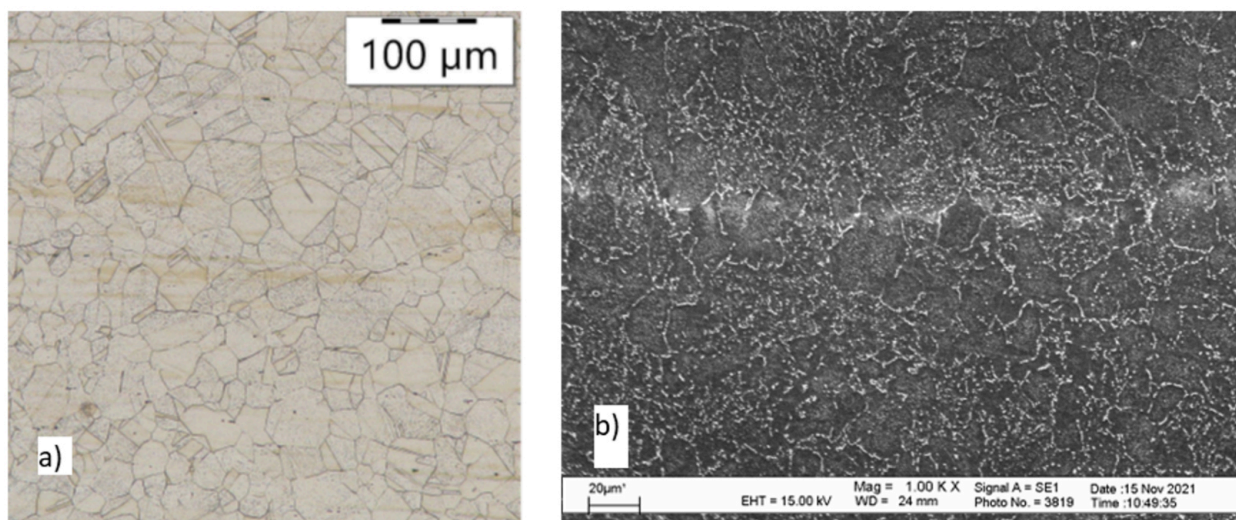
Rys. 2. a) Widok urządzenia wewnątrz walczaka, b) miejsca poboru próbek.

Fig. 2. a) View of the device inside the steam drum, b) sampling area.



Rys. 3. Wykres siły w funkcji odkształcenia w czasie badania SPT jednego elementu.

Fig. 3. Force versus strain for SPT tests of samples from one of the element



Rys. 4. a) Mikrostruktura z badania mikroskopem optycznym b) obraz SEM materiału rurociągu.

Fig. 4. a) Microstructure from optical microscope examination b) SEM of the pipeline material

Zgodnie z wymaganiami normy badania wykonane były dla kilku próbek z danej cangi, a następnie wyznaczono wartości średnie. Otrzymane własności wytrzymałościowe stali 15NCuMNB, pozwoliły na potwierdzenie spełnienia wymagań normy w zakresie wymaganych wartości. Jednocześnie należy podkreślić dużą powtarzalność poszczególnych prób, co widoczne jest na wykresie z prób wciskania małego stempla dla serii pomiarów próbek z jednej z cang (Rys. 3).

Badania walczaka z materiału 18CuNMT i czasie eksploatacji około 250 tys. h. były zrealizowane w szerszym zakresie, ponieważ oprócz wyznaczenia podstawowych własności wytrzymałościowych należało wyznaczyć dodatkowo temperaturę przejścia w stan kruchy (DBTT). Ze względu na specyfikę metody dla wyznaczenia temperatury przejścia w stan kruchy, badania prowadzone są na minimum 12 próbkach dla danego elementu, w temperaturze otoczenia oraz w obniżonych temperaturach w zakresie od -193°C do -50°C . Podobnie jak w przypadku badań udarności, które standardowo służą do wyznaczenia temperatury przejściu w stan kruchy, w tym przypadku do wyznaczenia wartości temperatury wykorzystywana jest energia. Obliczana ona jest z wykresu siły w funkcji odkształcenia, dodatkowo

odniesiona do maksymalnej wartości siły tzw. znormalizowana energia (ang. normalized energy). Na tej podstawie w przedstawianym przykładzie wyznaczono temperaturę wynoszącą $+24^{\circ}\text{C}$. Należy zaznaczyć, że zarówno dane literaturowe jak również badania własne metodą tradycyjną (próby udarności) potwierdzają, że stal w gatunku 18CuNMT po długotrwałej eksploatacji zmienia swoje własności w taki sposób, że temperatura przejścia w stan kruchy osiąga wartości powyżej zera.

Istotną zaletą prowadzonych badań z wykorzystaniem systemu powierzchniowego pobierania materiałów jest fakt, że na pobranym materiale można przeprowadzić inne badania pozwalające w dokładniejszy sposób ocenić stan materiału. Przykłady szerszego wykorzystania pozyskanego materiału to badania mikroskopem optycznym struktury materiału węzownicy pieca w przemyśle petrochemicznym czy ocena stopnia degradacji materiału rurociągu parowego – badania twardości, skład chemiczny oraz skaningowa mikroskopia elektronowa.

W przypadku materiału pozyskanego z węzownicy pieca i poddawanego badaniom z wykorzystaniem mikroskopu optycznego (Rys. 4a), celem badań było stwierdzenie czy nie dochodzi do miejscowego wzrostu temperatury i co za tym idzie zmian struktury materiału we wskazanych strefach

urządzenia. Wężownica wykonana była z materiału A213TP347 i pracowała w temperaturze około 400°C.

Pozyskanie wycinka materiału z rurociągu pozwoliło natomiast na wykonanie badań w zakresie oznaczenia składu chemicznego, pomiarów twardości oraz ocenę wielkości ziarna i ocenę stopnia degradacji materiału poprzez badanie struktury przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (Rys. 4b).

4. Podsumowanie

System powierzchniowego pobierania materiału jako mało inwazyjny sposób pobierania wycinków do badań wraz z badaniami metodą Small Punch niesie za sobą wiele korzyści. Do najważniejszych można zaliczyć:

- możliwość wykonania szeregu badań bezpośrednio na materiale, które pozwolą na wyznaczenie podstawowych własności wytrzymałościowych, ale także mikrostruktury, składu chemicznego, twardości itd.;
- możliwość pobierania wycinków materiału do badań bez konieczności wyłączania i/lub opróżniania urządzenia z medium roboczego;
- brak ostrych korbów w miejscach po pobraniu wycinka do badań, co sprawia, że naprawa może nie być konieczna;
- wyniki badań wykonanych w laboratorium charakteryzują się większą dokładnością od swoich przenośnych odpowiedników (badania twardości, wyznaczanie własności wytrzymałościowych).

Przedstawione przykłady jako wybrane spośród już zrealizowanych prac badawczych w różnych gałęziach przemysłu, potwierdzają szerokie możliwości zastosowania oraz korzyści wynikające z zastosowania metody Small Punch Test

5. Literatura

- [1] Mierzwiński D.: Analiza zależności wyników pełzania metodą małych próbek i konwencjonalnej próby pełzania Archiwum Odlewnictwa Rok 2006, Rocznik 6, Nr 21(1/2)
- [2] PN-EN 10371:2021-09 Metale - Metoda badania małym stemplem
- [3] PN-EN ISO 6892-1:2020-05 „Metale -- Próba rozciągania -- Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej”
- [4] T.E. García, C. Rodríguez, F.J. Belzunce, C. Suárez: Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test - Journal of Alloys and Compounds, 582 (2014) 708–717
- [5] Radim KOPŘIVA, Milan BRUMOVSKÝ, Petra PETELOVÁ: „Current status of the small punch test standardization within the ASTM”, 5th International Small Sample Test Techniques Conference – SSTT2018
- [6] Maciej Kaliciak, Tadeusz Uhl and Marek Nowak: „Small Punch Test for material degradation assessment” Materials 2023
- [7] Andrzej Kielbus, i inni „Ocena stopnia degradacji stali walczakowej 18CuNMT po długotrwałej eksploatacji”, Dozór Techniczny 2001
- [8] Krzysztof Brunné: „Ocena stanu technicznego i prognoza trwałości parowych na podstawie badań niszczących”, Dozór Techniczny 2015
- [9] C. Rodríguez i inni, „Use of the small punch test for the mechanical characterization of small areas such as the different zones that characterize the HAZ showed promise”, Welding Research 2009
- [10] M. Kaliciak, T. Uhl, “Small Punch Test (SPT) - Najnowsze trendy współczesnej diagnostyki instalacji przemysłowych,” Chemia przemysłowa, 2021