



■ Beata Superson-Polowiec,
Polowiec i Wspólnicy Sp.j.



■ Angelika Babiarz,
Polowiec i Wspólnicy Sp.j.

Problem z definicją wodoru

Rozwój gospodarki wodorowej jest uznawany za jeden z priorytetów realizacji Europejskiego Zielonego Ładu, którego głównym celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej Europy do 2050 r. W związku z czym niewątpliwym jest, że Komisja Europejska stawia sobie za cel wdrożenie technologii produkcji wodoru odnawialnego na szeroką skalę.



Jednym z podstawowych dokumentów UE szeroko poruszających tematykę wodoru jest *Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu (dalej Strategia Wodorowa UE)*. Komisja zwraca w nim uwagę na potencjał jaki niesie ze sobą wykorzystanie wodoru w różnych dziedzinach gospodarki. War-

to zwrócić uwagę, że wodór może być wykorzystywany jako surowiec, paliwo lub jako nośnik i magazyn energii. Ma on również wiele potencjalnych zastosowań w sektorach przemysłu, transportu, energii i budownictwa. Może zatem stanowić rozwiązanie na potrzeby dekarbonizacji procesów przemysłowych.

Polska Strategia Wodorowa opublikowana w grudniu 2021 stanowi kluczowy dokument, którego celem jest wskazanie kierunków rozwoju krajowego rynku i branży wodoru. W dokumencie określono 6 celów szczegółowych, które mają umożliwić ich osiągnięcie:



Rys. 1. Rozwój rynku wodoru w Polsce - kluczowe dokumenty
Źródło: Opracowanie własne PiW

- CEL 1 - Wdrożenie technologii wodorowych w energetyce i ciepłownictwie,
- CEL 2 - Wykorzystanie wodoru jako alternatywnego paliwa w transporcie,
- CEL 3 - Wsparcie dekarbonizacji przemysłu,
- CEL 4 - Produkcja wodoru w nowych instalacjach,
- CEL 5 - Sprawny i bezpieczny przesył, dystrybucja i magazynowanie wodoru,
- CEL 6 - Stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego.

Dokumenty strategiczne, w tym Polska Strategia Wodorowa wyznaczają kierunki i wspierają rozwój rynku wodoru w Polsce, jednak stanowią jedynie wyraz woli i intencji. Osiągnięcie zakładanych celów wymaga wdrożenia regulacji w formie aktów prawnych, które pozwolą przejść z fazy planowania do fazy realizacji.

CEL 6 Stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego

„Last but not least” cel Polskiej Strategii Wodorowej nawiązuje do konieczności kreacji stabilnego i transparentnego otoczenia legislacyjnego dla rozwoju rynku wodoru w kraju. W Polskiej Strategii Wodorowej wskazano następujące dedykowane kamienie milowe dotyczące regulacji:

- IIIQ 2021 r. - stworzenie ram regulacyjnych funkcjonowania wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie,
- IVQ 2021 r. - opracowanie legislacyjnego pakietu wodorowego, tworzącego podstawy funkcjonowania rynku,
- 2022-2023 r. - opracowanie legislacyjnego pakietu wodorowego - przepisów określających szczegóły funkcjonowania rynku, implemen-

tujących prawo UE w tym zakresie oraz wdrażających system zachęt do produkcji niskoemisyjnego wodoru.

Jaki wodór?

Warto zwrócić uwagę, że w kontekście osiągnięcia naturalności klimatycznej na uwagę zasługują tzw. czyste technologie wodorowe, a co za tym idzie - nie każda technologia wodorowa w takim samym stopniu przybliża nas do realizacji założeń Europejskiego Zielonego Ładu. W tym miejscu warto wskazać definicje wodoru zamieszczone Strategii Wodorowej UE, a mianowicie:

- wodór odnawialny - wodór wytwarzany w drodze elektrolizy wody, do której została wykorzystana energia elektryczna ze źródeł odnawialnych. Wodór odnawialny może być wytwarzany również w procesie reformingu biogazu lub biochemicznego przekształcania biomasy, pod warunkiem spełniania wymogów zrównoważonego rozwoju,
- wodór niskoemisyjny - wodór wytwarzany z paliw kopalnych przy zastosowaniu technologii wychwytywania CO₂ oraz wodór powstały w procesie elektrolizy wody ze znacznym ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia.

Jednocześnie dla zasygnalizowania i uzasadnienia niejakiego „zamieszania” wokół zagadnienia definicji wodoru na-

Tab. 1. Dziewięć rodzajów wodoru, różniących się pod kątem technologii wytwarzania, bądź surowców, z których powstają
Źródło: Opracowanie własne PiW

zielony	wytwarzany w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii odnawialnej. Może być również wytwarzany w procesie reformingu biogazu, czyli biochemicznego przekształcania biomasy
żółty	wytwarza się w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii słonecznej. Ta odmiana wodoru często klasyfikowana jest jako jeden z podtypów zielonego wodoru
fioletowy	wytwarzany jest w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach atomowych
szary	wytwarzany jest w procesie reformingu gazu ziemnego lub innych węglowodorów powstałych w procesie rafinacji ropy naftowej
niebieski	wytwarzany jest w procesach wykorzystujących paliwa kopalne, uzupełnione o technologie wychwytywania, składowania lub przetwarzania CO ₂
biały	pochodzi z naturalnych źródeł geologicznych
czarny	wytwarzany jest w procesie gazyfikacji węgla kamiennego
brązowy	wytwarzany jest w procesie gazyfikacji węgla brunatnego
turkusowy	wytwarzany jest w procesie pirolizy metanu lub przetwarzania odpadowych tworzyw sztucznych

Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw (t. j. Dz. U. z 2022 r. poz. 1315 z późn. zm.).	wodór - wodór przeznaczony do napędu pojazdu wykorzystującego energię elektryczną wytworzoną z wodoru w zainstalowanych w nim ogniach paliwowych, oznaczony kodem CN 2804 10 00
Ustawa z dnia 11 stycznia 2018 r. Elektromobilność i paliwa alternatywne (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 1083 z późn. zm.).	wodór niskoemisyjny - wodór w rozumieniu art. 2 ust. 1 pkt 10a ustawy z dnia 25 sierpnia 2006 r. o systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw (Dz. U. z 2022 r. poz. 1315, 1576, 1967, 2411 i 2687), uzyskany w procesie elektrolizy lub innymi metodami, w sposób niewyrządzający poważnych szkód dla celów środowiskowych, w przypadku którego emisja gazów cieplarnianych w cyklu życia nie przekracza 3 t ekwiwalentu dwutlenku węgla na 1 t wodoru
	wodór elektrolityczny - wodór niskoemisyjny uzyskany w wyniku przetworzenia energii elektrycznej w procesie elektrolizy
Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 403 z późn. zm.).	wodór odnawialny - wodór odnawialny w rozumieniu art. 2 pkt 102c rozporządzenia Komisji (UE) nr 651/2014 z dnia 17 czerwca 2014 r. uznającego niektóre rodzaje pomocy za zgodne z rynkiem wewnętrznym w zastosowaniu art. 107 i 108 Traktatu (Dz. Urz. UE L 187 z 26.06.2014, str. 1, z późn. zm.)
	biowodór - wodór wytworzony z biomasy

Tab. 2. Przykłady definicji wodoru w obecnych przepisach prawa w Polsce

leży wskazać że w debatach eksperckich wymienia się aż dziewięć rodzajów wodoru, różniących się pod kątem technologii wytwarzania, bądź surowców, z których powstają.

Projekt prawa wodorowego

Procedowany od października 2022 r. projekt nowelizacji ustawy Prawo energetyczne oraz niektórych innych ustaw (UD 382), pomimo, że stanowi duży krok w kierunku wprowadzenia do porządku prawnego regulacji zapewniających rozwój gospodarki wodorowej, nadal stanowi przedmiot dyskusji i podlega zmianom. Kluczowymi zagadnieniami objętymi projektem są:

- wprowadzenie siatki pojęć w Prawie energetycznym koniecznych do rozwoju i funkcjonowania rynku wodoru w Polsce,
- uregulowanie zasad koncesjonowania działalności związanej z wodorem,
- zaprojektowanie zasad funkcjonowania systemu dedykowanego dla wodoru - sieci wodorowe,
- wprowadzenie systemowych mechanizmów wsparcia dla prowadzenia działalności badawczo-rozwojowej dla projektów z zakresu technologii wodorowych,
- uwzględnienie międzysektorowych możliwości wykorzystania wodoru,

- propozycje uproszczeń regulacyjnych dla podmiotów inwestujących w rozwój systemu wodorowego.

Priorytetem niewątpliwie jest stworzenie odpowiedniej siatki pojęciowej dla wodoru w głównych aktach regulacyjnych odnoszących się do energetyki, tj. Prawie energetycznym, ustawie o odnawialnych źródłach energii, czy ustawie o biokomponentach i biopaliwach ciekłych.

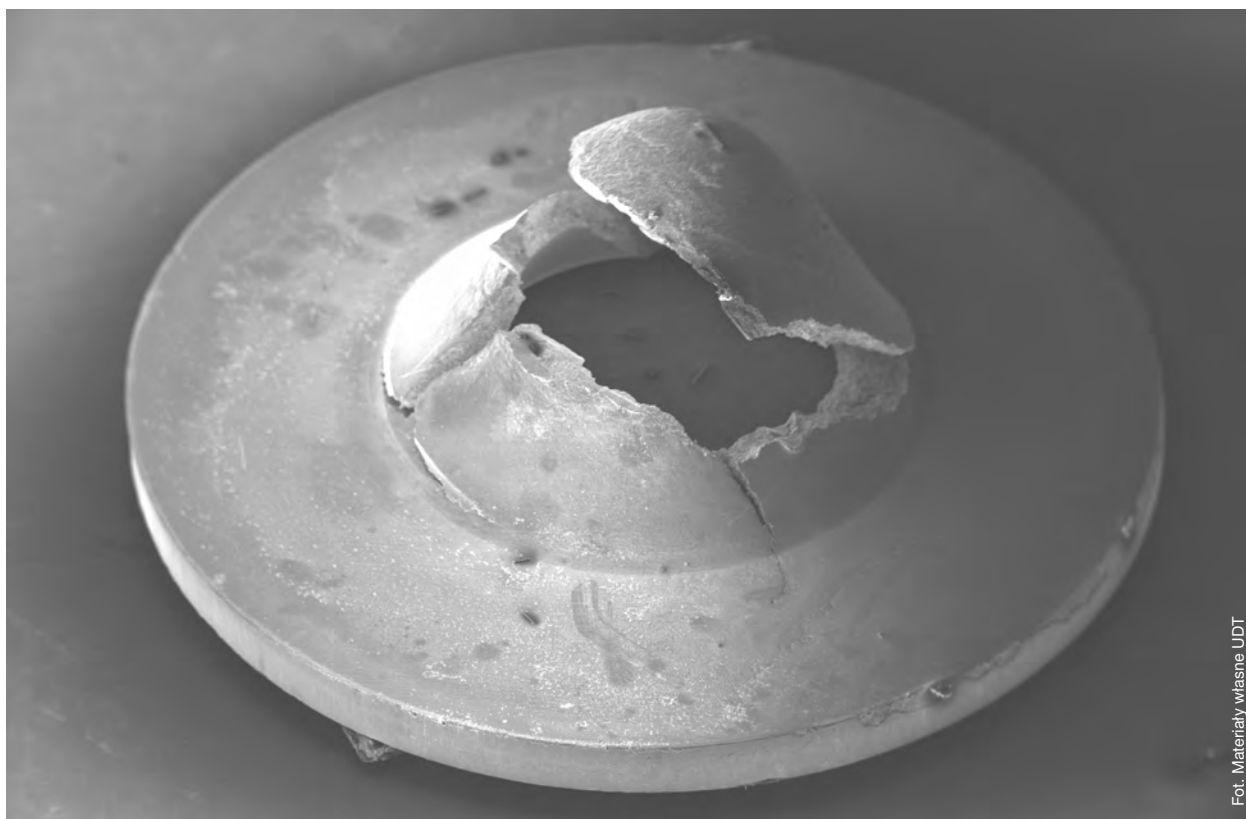
W pierwszej wersji projektu wodór był definiowany jako substancja chemiczna oznaczona kodem CN 2804 10 00. Wzbudziło to wiele kontrowersji oraz dyskusji na etapie konsultacji. Pomijając przytoczenie obszernych głosów krytycznych dla tak ujętej definicji wodoru, wskazać jedynie warto że większość podnosiła, iż odwołanie się jedynie do określonego kodu CN nie uwzględnia właściwości wodoru, które ustawodawca chciał poddać regulacjom. W tym zakresie istotnym jest, że wodór ma szerokie zastosowanie w gospodarce, nie tylko jako jeden z rodzajów paliwa. Obecny projekt opublikowany 3 lutego 2023 r. nie zawiera już kontrowersyjnej definicji. Nadal jednak trwa próba zdefiniowania wodoru. Tym razem wprowadza się definicje wodoru niskoemisyjnego, elektrolitycznego oraz odnawialnego, poprzez odesłanie do ich definicji w ustawie o elektromobilności i paliwach alternatywnych.

Biorąc pod uwagę powyższe nie ulega wątpliwości, że definicja wodoru stanowi wyzwanie legislacyjne. Niewątpliwie na gruncie prawa energetycznego nie chodzi o objęcie definicją wodoru, tych jego zastosowań, które mają neutralny wpływ na rozwój gospodarki wodorowej, zastosowań w przemyśle i do celów innych niż energetyczne.

Wydaje się że obecnie są dwie możliwości wyjścia z tego impasu:

- przyjęcie, że wodór podlega regulacjom bez względu na sposób jego wytworzenia oraz zastosowanie i tym samym powrót do pierwotnej koncepcji bardzo szerokiego zdefiniowania wodoru w Prawie energetycznym,
- objęcie definicją wodoru szczegółowo zdefiniowanych jego „rodzajów”, czyli objęcie ogólną definicją, wodoru definiowanego poprzez zastosowanie albo sposób wytworzenia. W tym rozwiązaniu na gruncie ostatniej wersji projektu „wodór” oznaczałby wodór niskoemisyjny, elektrolityczny oraz odnawialny.

Nie ulega wątpliwości, że dyskusja wokół definicji jest niezbędna jeśli mamy osiągnąć cele założone w zarówno w Polskiej Strategii Wodorowej, jak i Strategii Wodorowej UE oraz dobrze sparametryzować regulacje w obszarze niezbędnym dla rozwoju gospodarki wodorowej. □



Fot. Materiały własne UDT

■ Mateusz Wróbel,
Urząd Dozoru Technicznego

■ Marek Nowak,
Urząd Dozoru Technicznego

■ Tadeusz Uhl,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Diagnostyka urządzeń ciśnieniowych infrastruktury krytycznej z wykorzystaniem metody Small Punch Test

Urząd Dozoru Technicznego od kilku lat konsekwentnie realizuje strategię związaną z rozwojem sieci laboratoriów stacjonarnych i mobilnych. Jednym z głównych celów tego działania jest wzrost dostępności specjalistycznych usług badawczych dla przedsiębiorców działających w Polsce. Oprócz standardowych metod badań nieniszczących oraz niszczących w ofercie laboratoriów UDT znajdują się także badania z wykorzystaniem dronów, robotów inspekcyjnych, a także zaawansowane techniki badań NDT, tj.: PEC (ang. *Pulsed Eddy Current*) lub UT-TFM (ang. *Total Focusing Method*).

W nowoczesnej diagnostyce urządzeń ciśnieniowych infrastruktury krytycznej coraz większego znaczenia nabierają również badania z wykorzystaniem minipróbek, czego przykładem stanowią badania metodą Small Punch Test. Zaletą pobierania minipróbek zamiast próbek do klasycznych testów wytrzymałościowych jest brak konieczności naprawy miejsca pobrania i możliwość dopuszczenia do dalszej eksploatacji, co ma również pozytywny wymiar ekonomiczny. Zwiększa to możliwość częstszego badania stanu materiału konstrukcji.

Metoda SPT została opracowana i jest stosowana dla instalacji w elektrowniach jądrowych, ponieważ minimalizuje wpływ napromieniowania próbek na obsługę realizującą badania.

Diagnostyka urządzeń ciśnieniowych infrastruktury krytycznej

Wiele urządzeń ciśnieniowych wchodzących w skład infrastruktury krytycznej przekroczyło planowany na etapie projektowania czas eksploatacji. Ocena stanu technicznego wybranych elementów bloków energetycznych, rafinerii, czy zakładów chemicznych wymaga podejmowania szerokiego spektrum działań. Ich podstawę stanowi zazwyczaj wykonanie badań nieniszczących (NDT, ang. *Non-Destructive Testing*).

Badania NDT, mimo wielu zalet, nie pozwalają jednak na dokładne scharakteryzowanie własności wytrzymałościowych materiałów, które mogą ulegać znaczącym zmianom podczas liczonej w setkach tysięcy godzin pracy. Aby określić parametry, tj. granicę plastyczności, czy też wytrzymałość na pełzanie - konieczne staje się pobranie z danego obiektu wycinków materiału, przygotowanie odpowiednich próbek i przeprowadzenie badań niszczących w warunkach laboratoryjnych.

Tradycyjne metody pobierania wycinków materiału do badań

Pobieranie wycinków materiału do badań wiąże się z wieloma trudnościami.

Tradycyjne sposoby oparte o procesy skrawania lub cięcia palnikiem gazowym wymagają zazwyczaj unieruchomienia danego urządzenia i opróżnienia z medium roboczego. Dochodzi do tego także konieczność wykonania niezbędnych napraw, co dodatkowo zwiększa czas i koszty prowadzonych prac. Nie bez znaczenia pozostaje również możliwość pogorszenia stanu danej konstrukcji, np. poprzez niewłaściwie wykonaną obróbkę cieplną po wstawieniu nowego fragmentu urządzenia.

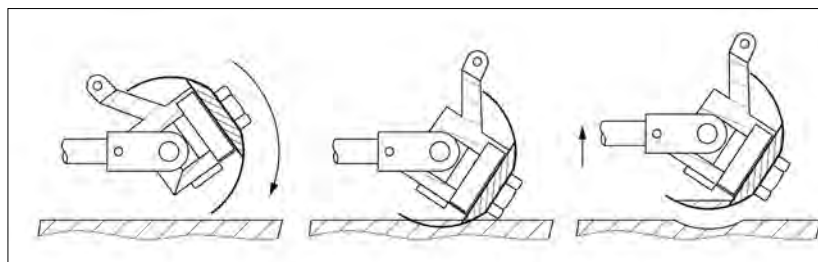
System powierzchniowego pobierania materiału

Licznym wyzwaniem związanym z pobieraniem wycinków materiału do badań pozwala sprostać system powierzchniowego pobierania materiału (ang. *Surface Sampling System*). Urządzeniem, które wykorzystuje tę technologię jest SCOOPER 50 - Scoop Sampling Machine. Składa się ono z głowicy tnącej, panelu sterującego i układu chłodzenia.

Zasadę działania systemu można porównać do łyżki do lodów. Specjalne półkuliste ostrze pokryte materiałem ściernym wykonuje ruch obrotowy wokół



SCOOPER 50 - urządzenie do pobierania wycinków materiału do badań



Sposób pobierania wycinka materiału do badań



Przykładowe wycinki materiału do badań

własnej osi i jednocześnie pochyla się w kierunku prostopadłym do powierzchni danego elementu. Niewielki posuw połączony z chłodzeniem stwarzają warunki, w których nie dochodzi do zmian struktury materiału.

System powierzchniowego pobierania materiału pozwala na otrzymanie próbek o średnicy około 25 mm i wysokości do 3,2 mm. Ubytek materiału powstały w danym obiekcie nie zawiera ostrych krawędzi.

Sposoby wykorzystania wycinków materiału

Wycinki materiału pobrane za pomocą systemu Scooper 50 mogą zostać wykorzystane do przeprowadzenia wielu rodzajów badań materiałowych. Odpowiednia preparatyka pozwala na wykonanie m. in.:

- badań mikrostruktury za pomocą mikroskopu świetlnego i skaningowego mikroskopu elektronowego,
- pomiarów twardości,
- analiz składu chemicznego i fazowego.

Ciekawa aplikacja dotyczy badań wytrzymałościowych z wykorzystaniem

minipróbek, np. badań metodą Small Punch Test.

Small Punch Test - wyznaczenie własności wytrzymałościowych materiałów

Small Punch Test jest metodą służącą do wyznaczania własności wytrzymałościowych materiałów. Polega ona na wciskaniu wgnębnika w kształcie kulki w sztywno umocowaną próbkę o średnicy 8 mm i grubości 0,5 mm. Badania realizowane są zgodnie z normą PN-EN 10371:2021-9 „Metale - Metoda badania małym stemplem” wprowadzającą normę europejską EN 10371:2021 - Metallic materials - Small Punch Test method.

Będąca na wyposażeniu aparatury umożliwia przeprowadzanie badań metodą Small Punch Test w warunkach pokojowych oraz w temperaturach obniżonych (do -193°C).

Prezentowane metody badań znajdują zastosowanie do określenia:

- umownej granicy plastyczności,
- wytrzymałości na rozciąganie,
- wydłużenia do zerwania,
- temperatury przejścia w stan kruchy (ang. *Ductile to Brittle Transition temperature*, DBTT).

Możliwe jest również wyznaczenie odporności na pełzanie podczas skróconych prób pełzania (tzw. Small Punch Creep Test). Najważniejsze parametry dotyczące prób pełzania możliwe do osiągnięcia na aparaturze będącej w dyspozycji Urzędu Dozoru Technicznego to:

- czas trwania próby: do 5000 h,
- temperatura badania: do 800°C ,
- obciążenie: do 500 N.

Metoda należy do metod empirycznych i jej zastosowanie wymaga doświadczonego wyznaczenia parametrów współczynników umożliwiających otrzymanie podstawowych wielkości charakteryzujących materiały stosowane w energetyce oraz instalacjach w przemyśle chemicznym, czy petrochemicznym. Dla typowych materiałów współczynniki te podaje norma.

Przykładowe wyniki badań

W ramach wspólnych prac rozwojowych UDT i Centrum Energetyki AGH przeprowadzono szereg badań mających na celu porównanie wyników badań jednoosiowego rozciągania realizowanych z wykorzystaniem standardowych znormalizowanych próbek z wynikami otrzymanymi podczas badań metodą

Small Punch Test. Analizom poddano różne gatunki stali, znajdujące się zarówno w stanie po eksploatacji, jak i materiały nowe. W przypadku materiałów drobnoziarnistych, parametry wyznaczone podczas badań metodą Small Punch Test, tj.: $R_{p0,2}$, R_m są zbliżone z parametrami wyznaczanymi podczas badań próbek znormalizowanych. Na podstawie przeprowadzonych badań statystycznych metodą SPT, dla większej populacji próbek, można, dla przebadanych stali, rozróżnić stopień degradacji materiału.

Przykłady zastosowań przemysłowych

Mało inwazyjny sposób pobierania wycinków materiału do badań oraz sama metoda Small Punch Test zyskują coraz większe zainteresowanie wśród przedsiębiorców odpowiedzialnych za kluczowe elementy infrastruktury krytycznej w kraju. W ostatnim czasie zrealizowano już zlecenia w zakładach energetyki

ŚREDNIE WARTOŚCI OTRZYMANE PODCZAS BADANIA SERII PRÓBEK			
MATERIAŁ	PARAMETR	BADANIA	
		STANDARDOWE	SMALL PUNCH TEST
Eksploatowany	$R_{p0,2}$ [MPa]	333	316
	R_m [MPa]	526	549
Nowy	$R_{p0,2}$ [MPa]	357	386
	R_m [MPa]	525	546

Wyniki badań porównawczych dla wybranego gatunku stali



Przebieg badania metodą Small Punch Test



Pobieranie wycinka do badań z rurociągu

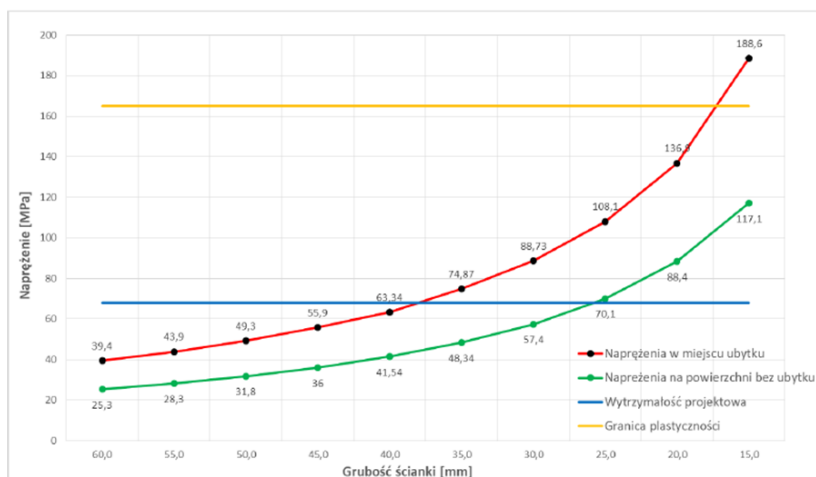
cieplej, a także w firmach działających w branży petrochemicznej.

Planowane jest, aby metoda Small Punch Test znalazła szersze zastosowanie w następujących obszarach:

- diagnostyka i ocena trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania,
- diagnostyka pieców technologicznych,
- diagnostyka wybranych urządzeń, np. turbin parowych,
- wyznaczanie rzeczywistych własności wytrzymałościowych materiałów.

Wpływ powstających ubytków materiału na stan konstrukcji

W celu scharakteryzowania wpływu powstających ubytków materiału na wytrzymałość całej konstrukcji przeprowadzono szereg symulacji Metodą Elementów Skończonych. Przykładem analizowanej konstrukcji jest rurociąg wykonany ze stali 10H2M (10CrMo9-10) o średnicy wewnętrznej 273 mm i ciśnieniu wewnętrznym 13,5 MPa. W zależności od przyjętej grubości ścianki zmiane ulegają naprężenia w miejscu powstającego ubytku. Przeprowadzona symulacja potwierdza, że w rozpatrywanym przypadku, dla rurociągu o grubości ścianki powyżej 35 mm powstający ubytek materiału jest bezpieczny. Nie dochodzi wówczas do przekroczenia naprężeń dopuszczalnych (projektowych). Ewentualna naprawa, np. poprzez napawanie, również nie jest konieczna, co często może wprowadzić dodatkowe naprężenia, wynikające z miejscowego nagrzewania w czasie naprawy.



Wyniki symulacji Metodą Elementów Skończonych

Korzyści wynikające z mało inwazyjnego sposobu pobierania wycinków materiału i badań metodą Small Punch Test

Prezentowane rozwiązania niosą za sobą wiele korzyści. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- Możliwość pobierania wycinków materiału do badań bez konieczności wyłączenia i/lub opróżnienia urządzenia z medium roboczego.
- Brak ostrych korbów w miejscach po pobraniu wycinka do badań. Nie dochodzi do tworzenia miejsc koncentracji naprężeń. Dodatkowa naprawa może nie być konieczna.
- Możliwość charakterystyki materiałów pod kątem ich własności wytrzymałościowych, ale także mikrostruktury, składu chemicznego, itp.
- Omawiane badania metodą SPT, wykonywane w laboratoriach, cha-

rakteryzują się większą dokładnością od innych metod badawczych wykorzystujących techniki przenośne.

Podsumowanie

Mało inwazyjny sposób pobierania wycinków do badań wraz z badaniami metodą Small Punch Test stanowią ciekawe rozwiązanie, które znajduje coraz szersze zastosowanie w przemyśle. Omawiane techniki są dobrą alternatywą dla tradycyjnych badań wytrzymałościowych materiałów eksploatowanych w instalacjach przemysłowych. Dotychczasowe doświadczenia potwierdzają, że własności wytrzymałościowe wyznaczone podczas badań metodą Small Punch Test są spójne z wynikami otrzymywanymi podczas standardowej próby rozciągania. Prezentowane rozwiązanie może przyczynić się do redukcji czasu i kosztów prac diagnostycznych realizowanych dla określonych urządzeń ciśnieniowych. □