

Dariusz Mężyk\*

Instytut Energetyki – Państwowy Instytut Badawczy

# Problemy występujące w trakcie eksploatacji rurociągów energetycznych wraz z systemem zamocowań

## Problems occurred during operation of energy pipelines with the fastening system

### STRESZCZENIE

Podczas długotrwałej eksploatacji bloków energetycznych materiały konstrukcyjne stosowane w przemyśle energetycznym pracują w warunkach zmiennych pól naprężeń i zmiennych temperatur. Materiały te są narażone na oddziaływanie środowiska gazów i cieczy oraz na działanie obciążeń mechanicznych. Czynniki te powodują pogorszenie ich własności mechanicznych. Jedną z metod rozpoznania aktualnego stanu materiału są badania diagnostyczne, zarówno nieniszczące, jak i niszczące. W opracowaniu przedstawiono powiązanie w systemie diagnostycznym znaczenia obciążeń mechanicznych i cieplnych ze zmianami struktury materiału oraz wpływ okresu eksploatacji wysokoprężnych instalacji rurociągowych na stan ich wytrzymałości. Wykazano istotę znajomości stanów wyjściowych materiału w procesie diagnostycznym, zwłaszcza na prognozowanie żywotności i prowadzenie bezpiecznej, bezawaryjnej eksploatacji obiektów energetycznych.

**Słowa kluczowe:** Eksploatacja rurociągów energetycznych, zmiany struktury materiału; diagnostyka.

### 1. Wprowadzenie

Technologiczny proces wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach ciepłych jest złożony i zależy od sprawności technicznej węzłów technologicznych. Niewątpliwie najistotniejsze znaczenie dla pracy elektrowni ma dyspozycyjność techniczna podstawowych urządzeń energetycznych, czyli kotła i turbiny. Wieloletnie doświadczenie wskazuje, że dyspozycyjność eksploatacyjna turbozespołu jest wysoka i ma nieznaczny wpływ na dyspozycyjność całego bloku energetycznego. Można powiedzieć, że dyspozycyjność techniczna części ciśnieniowej kotła łącznie z rurociągami wysokoprężnymi w znacznej mierze decyduje o dyspozycyjności technicznej całego obiektu energetycznego. Awaria instalacji rurociągów wysokoprężnych często jest przyczyną wyłączenia całego bloku energetycznego (w układzie blokowym) lub kotła (w układzie kolektorowym), co odbija się na kosztach ekonomicznych eksploatacji obiektu. Z tego powodu rurociągi wysokoprężne stanowią istotny węzeł technologiczny w procesie diagnostycznym.

Podczas długotrwałej eksploatacji obiektów energetycznych

### ABSTRACT

During the long-term operation of power units, structural materials used in the power generation industry operate under conditions of varying stress fields and varying temperatures. These materials are exposed to gas and liquid environments and mechanical loads. These factors cause deterioration of their mechanical properties. One method of recognizing the current state of a material is diagnostic testing, both non-destructive and destructive. The paper presents a link in the diagnostic system between the importance of mechanical and thermal loads and changes in the structure of the material, as well as the effect of the service life of high-pressure piping systems on their state of fatigue. The relevance of the knowledge of the initial states of the material in the diagnostic process is demonstrated, especially on predicting the service life and conducting safe, trouble-free operation of power facilities.

**Keywords:** Operation of energy pipelines, changes in material structure; diagnostics.

wskutek zmian zachodzących w układach rurociągów (np. wartość naciągów montażowych, charakterystyki pracy zamocowań) dochodzi do zmiennych stanów naprężeń głównie w elementach kształtowych (kolana, trójniki, czwórniki, zmiana średnicy) rurociągów. Efektem wzrostu wartości i koncentracji naprężeń są awarie złączy spawanych i elementów krytycznych rurociągów.

W energetyce zawodowej stosowane są dwa rodzaje układów cieplnych: system kolektorowy i system blokowy.

Zasadniczą cechą systemu kolektorowego jest możliwość łączenia poszczególnych kotłów z różnymi turbozespołami obiektu w zależności od aktualnych możliwości i potrzeb wytwarzania energii. System ten stosowany jest głównie w elektrowniach z instalacją rurociągu zbiorczego (kolektora). Rozwiązanie to obciążone jest niedoskonałością, że w przypadku uszkodzenia kolektora zachodzi niebezpieczeństwo unieruchomienia siłowni. Dlatego zwrócenie szczególnej uwagi na diagnostykę kolektora powinno być podstawową czynnością w celu zapewnienia ciągłości ruchowej obiektu.

Innym rozwiązaniem technologicznym jest system blokowy polegający na bezpośrednim powiązaniu kotłów z przynależnymi turbozespołami. System ten jest przejrzysty, lecz stwarza niebezpieczeństwo wyłączenia turbozespołu

\*Autor korespondencyjny.

E-mail: [dariusz.mezyk@ien.com.pl](mailto:dariusz.mezyk@ien.com.pl)

w przypadku awarii kotła. Układ blokowy charakteryzuje się występowaniem trzech rurociągów pary:

- rurociągi pary pierwotnej,
- rurociągi pary do wtórnego przegrzewu,
- rurociągi pary wtórnie przegrzanej.

Ze względu na wyjątkowy charakter pracy, wysoka temperatura w zakresie temperatur krytycznych, obciążenie ciśnieniem czynnika i obciążenie mechaniczne (Rys.1.) powoduje, że w dłuższym okresie eksploatacji poszczególne elementy rurociągów ulegają niszczeniu. Zagrożenie, jakie niesie ze sobą awaria rurociągów wysokoprężnych może polegać na katastrofalnych skutkach zwłaszcza w przypadku nagłego rozszczelnienia (kruche pęknięcie).

Odpowiedni system diagnostyczny i prawidłowo prowadzona eksploatacja rurociągów ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo i niezawodność pracy bloku energetycznego. W trakcie długotrwałej eksploatacji ciśnieniowych obiektów energetycznych pracujących w wysokich temperaturach następuje wyczerpanie zapasu trwałości i zmiana struktury materiału. Jedną z przyczyn jest zmienny stan naprężeń oraz ich rozkład względem osi wzdłużnej rurociągów w kolejnych cyklach pracy obiektu.

Prognozowanie trwałości w warunkach pełzania opiera się na określeniu czasu potrzebnego do osiągnięcia przy danym obciążeniu określonej wartości odkształcenia trwałego lub prędkości pełzania (Rys.2.). Najczęściej projektowa trwałość obiektu pracującego w warunkach pełzania rozumiana jest jako czas, który uwzględniono w obliczeniach wytrzymałościowych przyjmując dopuszczalną wartość naprężenia na podstawie czasowej wytrzymałości na pełzanie.

Najczęściej okazuje się jednak, że po upływie tego czasu rurociągi często nie wykazują widocznych oznak odkształceń trwałych. Nienaruszone pozostają prostoliniowe odcinki rur. Objawy pęknięcia można zauważyć w obszarze łuków, trójników, zmian średnic elementów, itp. Awariom ulegają również

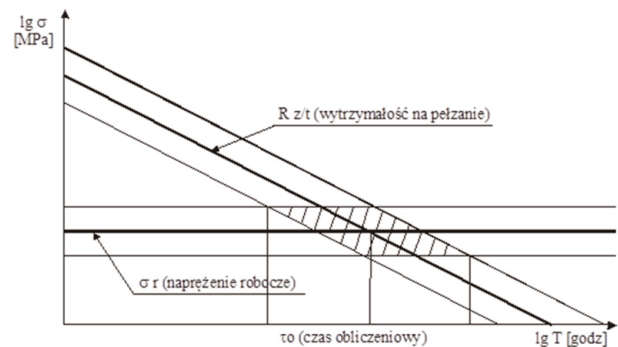
spoiny obwodowe rurociągów, zwłaszcza w sąsiedztwie elementów kształtowych.

Przyczynami uszkodzenia elementów kształtowych rurociągów wysokoprężnych poza wpływem cyklicznych zmian obciążeń i pól temperatur są czynniki wynikające z:

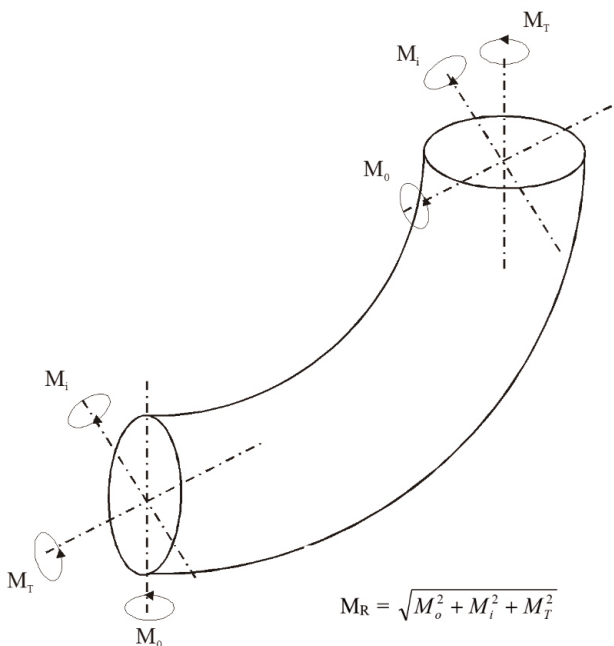
- niewłaściwej technologii wytwarzania,
- owalizacji przekroju poprzecznego,
- niewystarczającej grubości ścianki (również lokalne pocienienia),
- wadliwego funkcjonowania systemu zamocowań - ograniczenie dylatacji cieplnej rurociągu, kierunki spadów ( Rys.3.),
- zjawiska pełzania w wyniku długotrwałej eksploatacji,
- błędów eksploatacyjnych.

## 2. Metody badawcze

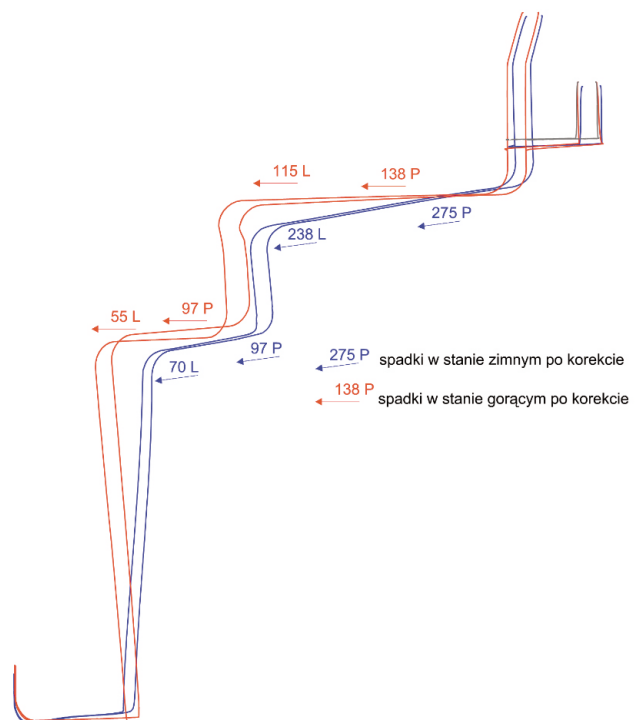
TW celu zdiagnozowania stanu rurociągów parowych na potrzeby dalszej bezawaryjnej eksploatacji oraz sformułowania wytycznych ewentualnej modernizacji lub



Rys. 2. Schemat wyznaczania trwałości metoda obliczeniową



Rys. 1. Schemat obciążenia łuku momentami gnącymi i skręcającymi



Rys. 3. Przykładowa deformacja rurociągu od stanu zimnego do gorącego (widok z boku)

prac remontowych stosuje się poniższe metody pomiarowo-badawcze.

1. Badania nieniszczące:
  - badania naprężeń,
  - badania ultradźwiękowe (spoiny, elementy kształtowe),
  - badania magnetyczno-proszkowe,
  - badania strukturalne,
  - badania systemu zamocowań,
  - pomiary pełzania na czopach pomiarowych,
  - pomiary owalizacji łuków,
  - pomiary grubości ścianki,
  - pomiary twardości.
2. Badania niszczące prowadzone na odcinkach przewidzianych projektem oraz na materiale pozyskanym podczas wymiany elementów i mają na celu określenie właściwości mechanicznych materiału:
  - statyczne próby rozciągania,
  - próby uderzeniowe, staloskopowe analizy składu chemicznego,
  - metalografia mikro i makroskopowa,
  - pomiary twardości.

Oprócz powyższych (najczęściej stosowanych) prowadzone są również badania innymi metodami dobranymi przez zespoły diagnostyczne dla konkretnych przypadków i sytuacji.

### 3. Wyniki badań materiałowych

Degradacja struktury poprzedzająca poziom dyskwalifikujący materiał z dalszej eksploatacji dla różnych stali przebiega w fazie wstępnej podobnie.

W stalach dwuskładnikowych np. 10H2M degradacja struktury charakteryzuje się początkowo pojawieniem pojedynczych porów, których wielkość i liczba wzrasta z upływem czasu. W miarę postępu procesu degradacji rozkład porów z nieuporządkowanego przechodzi w zorientowany o charakterze łańcuchów na granicy ziaren.

Gdy proces ten jest już zaawansowany łańcuchy przekształcają się w mikropęknięcia.

W przypadku stali gat. 13HMF zaawansowany proces degradacji grożący nagłym pęknięciem objawia się wystąpieniem pojedynczych porów.

Zmierzone w obu próbkach naprężenia są mniejsze od naprężeń dopuszczalnych równych 185 MPa dla stali gat. 13HMF wg PN-79/M-34033. Jednocześnie daje się zauważyć wzrost poziomu naprężeń w materiale eksploatowanym. Wielkości twardości w obu przypadkach spełniają warunki normy PN-92/M-34031. Dla stali 13HMF dopuszczalna twardość wynosi 200 HV. Grubość ścianek próbek przewyższa grubość minimalną dla rurociągu, z którego wycięto próbkę.

Jak widać wartości granicy plastyczności  $R_e$  i wytrzymałości materiału na rozciąganie  $R_m$  dla materiału w stanie dostawy i po okresie eksploatacji (w tym przypadku po 76 tys. godzin) wykazują zauważalne różnicowane wartości. Wartości obu parametrów po przepracowaniu przez rurociąg prawie 8 letniego okresu uległy zmniejszeniu. Wskazuje to na potrzebę monitorowania stanu materiału z wykorzystaniem projektowo założonych próbek materiału rurociągu do badań niszczących określających parametry wytrzymałościowe instalacji wysokoprężnej w kolejnych okresach eksploatacji. Istotną rolę w procesie monitoringu odgrywa znajomość stanu wyjściowego, najlepiej gdy jest on odzwierciedleniem stanu dostawy badanego rurociągu.

Także w przypadku remontowej wymiany elementów lub modernizacji instalacji ciśnieniowej powinny być zbadane stany wyjściowe materiałów tych elementów tworząc odniesienie dla historii pracy poszczególnych elementów i całego obiektu. W trakcie długotrwałej eksploatacji wymiana zużytych elementów (najczęściej kształtowych) na nowe jest rutynową czynnością remontową.

Zachodzi wówczas zjawisko łączenia materiału nowego z materiałem rodzimym pracującym w warunkach pełzania

Tabela 1. Parametry wytrzymałościowe ze statycznej próby rozciągania stali gat. 13HMF

próbka	Re [MPa]	Rm [MPa]	HV	$\sigma_{zred}$ [MPa]	grubość zmierzona [mm]	grubość minimalna [mm]
13HMF stan dostawy	313	510	124	22	39,5	32,3
13HMF po 76 tys. h eksploatacji	266	480	138	52	32,5	32,3

Tabela 2. Wyniki badań składu chemicznego odcinków rur ze stali 13HMF

próbka	zawartość pierwiastków [%]									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
13HMF stan wyjściowy	0,10	0,45	0,24	0,022	0,028	0,49	0,10	0,07	0,60	0,35
13HMF po 13tys.h pracy	0,16	0,54	0,22	0,011	0,025	0,34	0,06	0,10	0,55	0,25

**Tabela 3.** Wyniki badań mechanicznych odcinków rur ze stali 13HMF w rejonie spoiny

próbka	R <sub>0.2</sub> [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A <sub>5</sub> [%]	KCU2 [J/cm <sup>2</sup> ]	HV
13HMF po 134tys.h eksploatacji	300 306	491 495	31 28	312,287 290,300	149 151
13HMF po 134tys.h po wyżarzaniu	340 345	493 497	28,4 28	287,277 247,265	157 159
13HMF stan wyjściowy po wyżarzaniu	408 414	567 585	32,2 24,4	162,152 175,152	179 183
PN-75/H-84024	min 365	490- -690	min 20	min 90	-

wysokotemperaturowego, co stanowi wyzwanie technologiczne ze względu na różnice stanu materiałów spajanych. Prawdłowo wykonana spoina stanowi o bezpieczeństwie dalszej pracy naprawianego rurociągu.

Przy opracowywaniu technologii spawania należy określić poziom naprężeń eksploatacyjnych, przeprowadzić badania penetracyjne w rejonie spoiny oraz wykonać badania mikrostruktury i twardości. Pozytywny wynik prac przygotowawczych pozwala na wybór parametrów spawania i późniejszej obróbki cieplnej.

Badania przeprowadzone na zniszczonych łukach wykazały, że proces degradacji struktury nie przebiega równomiernie w całej ich objętości. Obszarem uszkodzenia jest najczęściej zewnętrzna powierzchnia na zewnętrznej konturze łuku (obszar rozciągany w procesie gięcia). Pęknięcia mogą jednak wystąpić również w innych obszarach zależnie od charakteru obciążenia. Przy niejednorodnym wycięciu materiału w obszarze karbów konstrukcyjnych i technologicznych powstaje lokalna strefa nasilenia defektów. Wskutek lokalnej koncentracji naprężeń i odpowiadającego jej wzrostu odkształceń może wystąpić niebezpieczeństwo przed rozerwaniem

rurociągu. Propagacja pęknięcia następuje z dużą prędkością wtedy, gdy osiągnie ono wielkość krytyczną. W przypadku łuków głównych rurociągów energetycznych rozwój pęknięcia może przebiegać także przy obciążeniu stałym. Dodatkowe naprężenia, powstające na skutek działania momentów zginających i skręcających, w wyniku wadliwych naciągów kompensacyjnych oraz niesprawności zamocowań przyspieszają procesy degradacyjne przebiegające w materiale. Uwidocznionym efektem są pęknięcia zewnętrzne w spoinach obwodowych.

Z uwagi na powyższe eksploatacja urządzeń ciśnieniowych, do których należą rurociągi wysokoprężne, wymaga szczególnego nadzoru. Czas eksploatacji, temperatura pracy, rodzaj i charakter obciążeń oraz agresywność medium wpływają na zmiany stanu materiału w stosunku do stanu wyjściowego. W przypadkach, gdy nie dysponujemy wynikami badań stanu wyjściowego materiału (a takie sytuacje są spotykane dość często) jako stan wyjściowy przyjmuje się pierwszy zarejestrowany stan odpowiadający warunkom prowadzonych badań. W takim przypadku odniesieniowy stan wyjściowy będzie oczywiście reprezentować własności badanego materiału obarczony nieudokumentowaną w stosunku do stanu dostawy historią zmiany mikrostruktury. Jednakże będzie to stanowić jednoznaczny punkt odniesienia w procesie diagnostyki materiałowej dla danego obiektu.

Materiałami stosowanymi w wysokoprężnych instalacjach energetycznych są stale ferrytyczno-perlityczne/bainityczne do pracy w podwyższonych temperaturach. Należą do nich stale gat. K18, 15HM, 10H2M, 13HMF oraz nowo stosowane stale P91 i P92. Stale te w podwyższonej temperaturze ulegają degradacji (rozpad perlitu/bainitu i przemiany węglików), co wiąże się z obniżeniem ich własności wytrzymałościowej oraz twardości.

Stale te charakteryzują się strukturą martenzytyczną z wydzieleniami węglików na granicach ziaren. Stale P91 i P92 stosowane są w stanie hartowanym i odpuszczonym.

**Tabela 4.** Skład chemiczny stali P91 i P92

Stal	Pierwiastek [%wag]												
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	N	Al
P 91	0.10	0.36	0.42	0.017	0.004	0.13	8.75	0.96	-	0.20	0.07	0.58	0.024
P 92	0,07 ÷ 0,13	<0,5	0,3 ÷ 0,8	≤0,02	≤0,01	≤0,4	8,5 ÷ 9,5	0,3 ÷ 0,6	1,5÷2	0,15 ÷ 0,25	0,04 ÷ 0,09	0,03 ÷ 0,07	≤0,04

**Tabela 5.** Własności mechaniczne stali P91 i P92 w stanie dostawy

Własności stali	P91	P92
R <sub>m</sub> [MPa]	585-770	min. 620
R <sub>0,2min</sub> [MPa]	415	min. 440
R <sub>0,2min</sub> [MPa] - 600°C	-	280
A <sub>5min</sub> [%]	20	20
Udarność KCV [J/cm <sup>2</sup> ]	min. 50	min. 50
R <sub>Z100 000</sub> - 600°C, [MPa]	98	132



Znajomość stanów wyjściowych dla poszczególnych obiektów konstruowanych w oparciu o stale P91 i P92 będzie punktem odniesienia dla dalszej eksploatacji umożliwiając jednocześnie prognozowanie żywotności w dowolnym momencie diagnostycznym.

Ocena stanu materiału na podstawie aktualnych wyników badań przedstawia największą wartość, gdy można je odnieść do wartości początkowych (wyjściowych stanów materiału). Ujawnione zmiany stanu materiału zaistniałe w trakcie eksploatacji dają podstawy przewidywania dalszego okresu pracy obiektu.

#### 4. Podsumowanie

Proces degradacji stali eksploatowanej w trakcie wieloletniego okresu w warunkach podwyższonych temperatur i zmiennych naprężeń jest jednym z podstawowych problemów technologicznych i ekonomicznych obiektów energetycznych.

Szczególne znaczenie ma prognozowanie trwałości resztkowej instalacji rozumianej jako różnica czasu między praktyczną i obliczeniową trwałością rozporządzalną.

Problematyka prognozowania stanu rurociągów wysokoprężnych powinna być oparta na znajomości własności mechanicznych materiałów wyznaczonych w badaniach i określeniu relacji pomiędzy zmienną w czasie strukturą materiałów oraz ich własnościami z uwzględnieniem warunków pracy. Możliwe jest to do osiągnięcia jedynie poprzez integrację metod niszczących i nieniszczących w powiązaniu z metodami numerycznymi wychodzącymi poza przyjęte standardy diagnostyczne.

W świetle tego, że znakomita większość użytkowanych rurociągów wysokoprężnych przekroczyła lub zbliża się do okresu obliczeniowego 100 tys. godzin należy położyć nacisk na wdrożenie metod pozwalających na wczesne wykrywanie i określenie stopnia degradacji materiału z możliwością określenia zapasu trwałości poprzez monitorowanie zniszczenia zmęczeniowego w powiązaniu z obserwacją poziomu naprężenia.

Generalnie o stanie rurociągów decyduje stan

poszczególnych elementów poddanych największym obciążeniom eksploatacyjnym, tzw. elementów kryterialnych. Dla układu rurociągów wysokoprężnych są to elementy kształtowe takie jak kolana, trójniki i czwórniki. Dużym obciążeniem podlegają również obszary zmian średnic i grubości ścianek, co ma miejsce na styku rurociąg – trójnik. Są to obszary koncentracji naprężenia mogących powodować pęknięcie złączy spawanych. W przypadku dalszej długookresowej eksploatacji rurociągów z zachowaniem dotychczasowych parametrów pracy należy uwzględnić wymianę najbardziej wyeksploatowanych elementów kształtowych.

#### 5. Literatura

- [1] Mężyk D. Skibiński T. Malesa K. Jaworski M. Badania naprężeń własnych w rurociągu przesyłowym Konferencja Techniczna Zarządzanie ryzykiem w Eksploatacji Rurociągów Płock 2003.
- [2] Mężyk D. Skibiński T. Modernizacja bloków energetycznych po długotrwałej eksploatacji Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej – VII Forum Energetyków Opole 2000.
- [3] Mężyk D.: Wpływ przebiegu eksploatacji urządzeń ciśnieniowych w energetyce zawodowej na ich bezpieczeństwo i niezawodność pracy, Zagadnienia projektowo-diagnostyczne. Seminarium rozwoju niszczenia materiałów i laserowego modelowania materiałów, Zakopane 2003.
- [4] T. Płociński, W. Manaj, M. Spychalski, K.J. Kurzydłowski: Nieniszczące badania metalograficzne – porównanie technik, Seminarium – Nieniszczące Badania M. 2003.
- [5] Sprawozdanie z badań IEn-PIB 6/12. Niepublikowane.
- [6] Kowalewski Z. L., Mackiewicz S., Szelążek J., Deputat J.: Ocena uszkodzenia stali w wyniku pełzania na podstawie badań materiałów, Materiały Konferencyjne XXI Symposium Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego. 2004.
- [7] D. Mężyk: Eksploatacja i diagnostyka rurociągów energetycznych, IX Forum Energetyków 2004.
- [8] D. Mężyk: Diagnostyka stanu naprężenia elementów rurociągów wysokoprężnych za pomocą efektu Barkhausena, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL 2022
- [9] Normy: PN-79/M-34033, PN-92/M-34031, PN-EN ISO 13480.