

# Biuletyn

nr 1/2016

Zespół redakcyjny: mgr inż. Jerzy Dobosiewicz,  
dr inż. Jerzy Trzeszczyński



nr LB-003/09 nr LB-179/09

**pro·vum**<sup>®</sup>  
RESEARCH & TECHNOLOGICAL SERVICES  
Centrum Badawczo - Rozwojowe

**Szanowni Państwo,**

Związki chemii energetycznej oraz diagnostyki materiałowej urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrowni występują „od zawsze”. Nie da się identyfikować, a zwłaszcza rozwiązywać wielu problemów dotyczących stanu technicznego urządzeń bez znajomości ciepłno-mechanicznych i chemicznych warunków eksploatacji zarówno w trakcie pracy, jak i podczas postojów. Aktualne wyzwania eksploatacyjne, zwłaszcza dotyczące pracy regulacyjnej w jeszcze większym stopniu niż dotąd zwiększają potrzebę odpowiedniej integracji chemii energetycznej i diagnostyki. Zaprezentowane w niniejszym Biuletynie Pro Novum artykuły opracowane na podstawie wygłoszonych referatów podczas XVI Konferencji: „Udział chemii energetycznej we wzroście efektywności urządzeń” mogą posłużyć jako przykład udanej integracji obydwu dziedzin techniki i wiedzy. Zapraszamy także do zapoznania się z relacją z wymienionej Konferencji.

Jerzy Trzeszczyński & Jerzy Dobosiewicz

Elżbieta Boehme-Śliwa  
Pro Novum sp. z o.o.

Stanisław Jagustyn  
Fortum Silesia S.A.

## Doświadczenia z uruchomienia stacji generacji wody oczyszczonej (DEMINT) zamontowanej na terenie Fortum Silesia S.A.

### Experience from commissioning of the demineralization plant in Fortum Silesia S.A. – CHP Zabrze

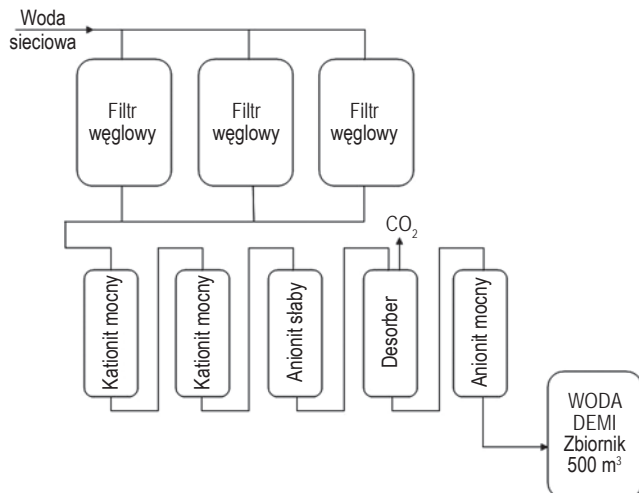
W lutym 2014 roku Fortum Zabrze S.A. ogłosiło postępowanie w sprawie wyboru wykonawcy zadania inwestycyjnego pt.: *Modernizacja stacji demineralizacji wody dla Fortum Zabrze S.A.* W założeniu zmodernizowana stacja miała zastąpić istniejącą stację przygotowania wody, wykorzystującą techniki jonitowe i produkującą wodę na potrzeby uzupełniania układów wodno-parowych zainstalowanych kotłów energetycznych.

Zgodnie z wymaganiami Zamawiającego zmodernizowana stacja uzdatniania wody (SUW) powinna pracować w technice membranowej i produkować wodę zdemineralizowaną z maksymalną wydajnością netto 30 m<sup>3</sup>/h w ilościach i o jakości spełniającej wymagania wody dodatkowej (zdemineralizowanej) używanej do uzupełnienia wysokoprężnych układów wodno-parowych.

## Stan stacji demineralizacji wody przed modernizacją

Stacja uzdatniania wody w dawnej *EC Zabrze* składała się z dwóch ciągów technologicznych o wydajności  $2 \times 40 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Schemat technologiczny dawnego układu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1.

Tablica 1

Przykładowe fotografie uszkodzonych jonitów

Masa jonowymienna	Ciąg nr 1	
Wofatit KPS Kationit I°		
Wofatit KPS Kationit II°		
Wofatit AD-41		
Wofatit SBW		

Jonity na stacji DEMI eksploatowano przez 40 lat bez całkowitej wymiany (jedynie z okresowymi dosypkami). Kondycja mas jonowymiennych nie pozwalała już na ich dalszą eksploatację. W lipcu 2013 r. firma *Pro Novum sp. z o.o.* przeprowadziła ocenę stanu technicznego żywic. Analiza mikroskopowa wykazała bardzo znaczny stopień uszkodzeń mechanicznych: dla kationitów procent uszkodzonych ziaren wahał się od 23 do 68%, dla anionitów słabozasadowych od 31 do 70%, a dla anionitów silnie zasadowych od 85 do 88% uszkodzonych ziaren.

Pogorszenie własności fizycznych żywic, tym samym pogorszenie się warunków wymiany jonowej, zwiększanie się oporów hydraulicznych, obniżanie sprawności regeneracji, wzrost zużycia regeneratów i wody na potrzeby własne stacji, ale również stan wykładzin chemoodpornych poszczególnych wymienników jonitowych były argumentem przemawiającym za modernizacją stacji demineralizacji wody.

## Niektóre z przyjętych założeń dla nowej stacji demineralizacji wody

Głównym argumentem przedłożonym w zapytaniu ofertowym było ograniczenie ilości zużywanego kwasu solnego i ługu sodowego w procesie uzdatniania wody.

Zgodnie z wymaganiami Zamawiającego nowa stacja demineralizacji wody miała zostać zaprojektowana z wykorzystaniem technik membranowych.

W przypadku technik membranowych ważnym wskaźnikiem jest „indeks gęstości osadu” – SDI wody kierowanej na membrany. Zanieczyszczenie modułów membranowych zawiesinami, łożami czy też koloidami prowadzi najpierw do wzrostu różnicy ciśnień na modułach osmotycznych, a dalej do obniżenia wydajności urządzeń.

Wartość wskaźnika SDI równa 6,7 odpowiada pełnej blokadzie przepływu przez sącdek w zalecanej normie procedury pomiaru. Woda o takim wskaźniku w żadnym przypadku nie powinna być kierowana na moduły osmotyczne. Woda o wskaźniku równym i poniżej 5 nadaje się już do odsalania metodami membranowymi, ale należy się liczyć z koniecznością częstego stosowania zabiegów oczyszczających i krótszą żywotnością membran. Dopiero woda o wartości wskaźnika 3 i poniżej ma jakość zapewniającą długotrwałą eksploatację membran bez zagrożenia blokadą omawianymi zanieczyszczeniami.

W związku z tym, że w trakcie prowadzenia badań jakości wody surowej nie zostały wykonane badania wartości wskaźnika indeksu SDI, a wszyscy Oferenci, jak wynikało z przekazanych „Tabel oceny ofert” przyjęli, że wartość wskaźnika SDI wody kierowanej na moduły osmotyczne będzie na poziomie  $< 3$ , zalecono wykonanie kontrolnych pomiarów rzeczywistej wartości SDI wody surowej planowanej do uzdatniania na nowej stacji oczyszczania.

Pomiary wykonane w maju 2014 roku przez zewnętrzną firmę wykazały, że wartość SDI dla wody surowej wynosi  $> 6,5$ , co praktycznie wykluczyło możliwość jej bezpośredniego wykorzystania w procesie odwróconej osmozy, a jednocześnie wskazywało na konieczność jej wstępnego uzdatniania np. w procesie ultrafiltracji.

Informacja ta została przekazana Oferentom z prośbą o uwzględnienie w dalszym postępowaniu. Na podstawie analizy warunków techniczno-ekonomicznych skorygowanych ofert komisja przetargowa wybrała ofertę firmy *Veolia Water Technologies Sp. z o.o.*

## Stacja generacji wody oczyszczonej (stan obecny)

### Zasilanie

Stacja zasilana jest z dwóch niezależnych ujęć:

- źródło podstawowe – woda surowa dostarczana przez *GPW Dystrybucja Sp. z o.o.* – jest to woda z ujęcia *Czarny Las*, charakteryzująca się parametrami zgodnymi z wymaganiami stawianymi wodzie pitnej;
- źródło awaryjne – ujęcie GPW w Karchowicach ze studni głębinowej nr 4 w Zawadzie i Jelina; korzystanie ze źródła awaryjnego regulują odrębne umowy pomiędzy dostawcą wody a odbiorcą.

Niezależnie od źródła zasilania temperatura wody doprowadzanej do urządzeń technologicznych wymagana jest na poziomie 12-14°C. Obniżenie tej temperatury wpłynie niekorzystnie na wydajność ciągów oraz parametrów procesowych. Utrzymanie właściwej temperatury gwarantuje zamontowany wymiennik ciepła (płytkowy), odpowiedzialny za podgrzanie wody zasilającej urządzenia technologiczne. Wartość temperatury wody zasilającej stację DEMI na wylocie z wymiennika ustawiono podczas rozruchu i mieści się w przedziale 15-20°C.

Czynnikiem grzewczym wykorzystywanym do podgrzewu jest woda gorąca z magistrali ciepłowniczej.

### Wydajność

Hydrauliczna wydajność stacji demineralizacji wynosi max 30 m<sup>3</sup>/h, dla dwóch ciągów (2×15 m<sup>3</sup>/h)

### Parametry

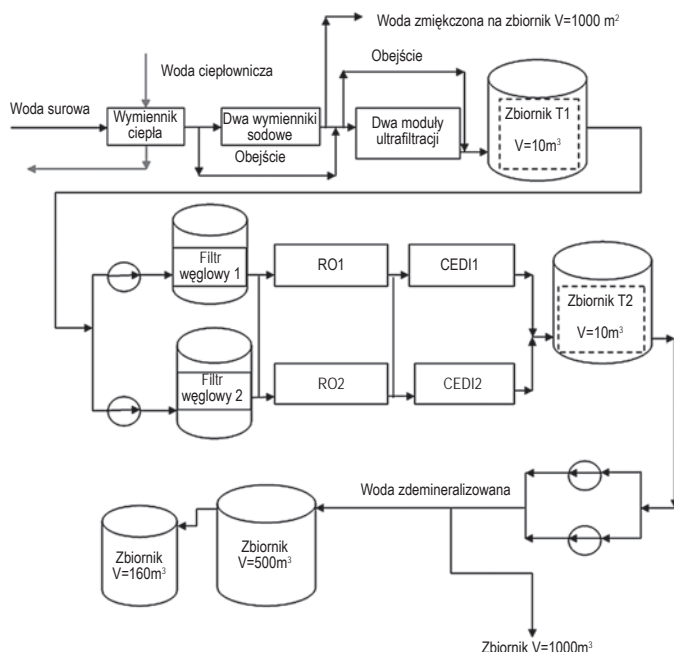
Wstępne założenia dla nowej stacji demineralizacji wody były następujące:

- przewodność właściwa < 0,3 μS/cm,
  - zawartość krzemionki 0,03 mg/dm<sup>3</sup>.
- Ostatecznie parametry gwarantowane to:
- przewodność mierzona po CEDI (w 25°C) ≤ 0,2 μS/cm,
  - krzemionka mierzona po CEDI ≤ 0,02 mg/dm<sup>3</sup>.
- Schemat instalacji przedstawiono na rysunku 2.

## System demineralizacji wody

System demineralizacji wody można podzielić na dwie grupy:

- system wstępnej obróbki wody – złożony z układu zmiękczenia, filtracji i dechloracji wody, a także chemicznego programu ochrony membran przed scalingiem i foulingiem;
- system uzdatniania właściwego – oparty na technikach membranowych.



Rys. 2. Schemat instalacji

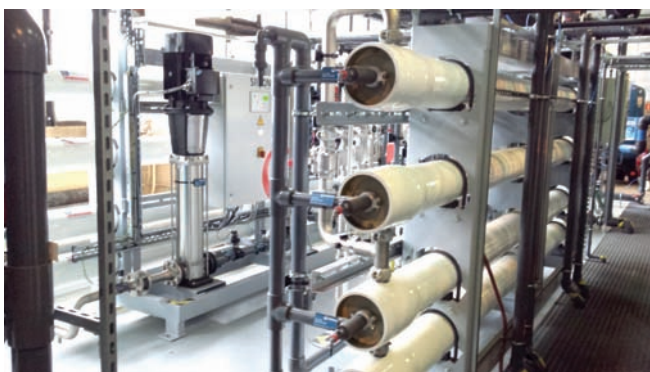
Na podstawowy ciąg technologiczny składają się poniżej wymienione urządzenia.

- **Wymiennik jonitowy** – zmiękczenie.  
Woda zmiękczona kierowana jest do dwóch niezależnych procesowo rurociągów:
  - do rurociągu wody uzupełniającej zbiornik V 1000 lub odgazowywacz,
  - do rurociągu zasilającego zespół ultrafiltracji.
Zainstalowane dwa wymienniki jonitowe pracują w systemie naprzemiennym zapewniającym produkcję wody przez 24 godz./dobę niezależnie od rozbioru i fluktuacji twardości ogólnej wody surowej (zasilającej). Regenerację prowadzi się nasyconym roztworem solanki. Regeneracja wyzwala na jest w zależności od objętości lub jakości wody (pomiar twardości resztkowej). Ścieki poregeneracyjne odprowadzane są do zakładowej instalacji ściekowej.
- **Ultrafiltracja ciśnieniowa** – frakcjonowanie związków wielkocząsteczkowych.  
Na zespół ultrafiltracji składają się dwie zależne od siebie, pracujące równolegle jednostki UF 1 i UF 2 oraz stacja CIP (wspólna dla obu urządzeń). W określonych, programowalnych interwałach czasowych do wody płuczącej daną jednostkę dodawane są chemikalia zapewniające odpowiedni poziom wyczyszczenia i dezynfekcji membran. Proces filtracji membranowej w układzie technologicznym umożliwia zatrzymanie cząstek i makromolekuł od wielkości 0,01 μm.
- **Filtr węglowy** – dechloracja.  
Po jednostkach UF woda trafia do zbiornika T1 o pojemności 10 m<sup>3</sup>. Zbiornik ten stanowi retencję wody filtrowanej koniecznej do procesu płukania zespołu UF oraz zasilania filtrów z węglem aktywnym (ACF 1 i 2). Wolny chlor obecny w wodzie surowej, mimo korzystnego dezynfekcyjnego

działania, powoduje chemiczną degradację membran osmotycznych (RO). Dechloratory pracują sekwencyjnie na zasadzie liniowego przepływu wody przez warstwę węgla aktywnego. Płukanie filtrów zachodzi okresowo według nastawy czasowej lub od różnicy ciśnienia przed/ za filtrem.

- **Odwrócona osmoza** – separacja związków małocząsteczkowych (sole nieorganiczne, małocząsteczkowe związki organiczne) od rozpuszczalnika.

W celu ochrony membran wody zasilającej RO dozowane są dwa preparaty – NaOH (chemiczne wiązanie CO<sub>2</sub>) i antyskalant (zapobieganie scalingowi). Moduły odwróconej osmozy wraz ze wszystkimi towarzyszącymi urządzeniami i komponentami przeznaczone są do odsalania wody do poziomu < 20 μS/cm (permeat). Pozostały strumień (koncentrat) zawierający załężone jony w sposób ciągły odprowadzany jest z membran do kanału otwartego.



Rys. 3. Jednostki odwróconej osmozy

- **Elektrodejonizator** – demineralizacja końcowa. Jednostki CEDI 1 i 2 to ostatni w ciągu demii proces technologiczny mający na celu doczyszczanie wody do założonych parametrów. Urządzenie realizuje proces ciągłej dejonizacji wykorzystując pary membran jonoselektywnych oraz pole elektryczne emitowane przez prąd stały. Zasilanie CEDI odbywa się permeatem po RO, następnie strumień wody jest dzielony na rozcieńczony (diluat) i stężony koncentrat. Moduły CEDI doczyszczają wodę do wartości <0,1 μS/cm. Gdy przewodność przekroczy próg alarmowy zawory przetaczają się i następuje zrzut diluatu do kanału ściekowego.



Rys. 4. Elektrodejonizator CEDI-1/ CEDI-2

Woda zdeminielizowana trafia do zbiornika T2 o pojemności 10 m<sup>3</sup>. Zbiornik ten stanowi retencję wodę demii kierowanej zgodnie z bieżącym zapotrzebowaniem do punktów odbiorczych.

## Pomiar poinwestycyjny stacji demineralizacji wody

### Wnioski

Po przekazaniu do eksploatacji firma *Pro Novum sp. z o.o.* wykonała cykl pomiarów poinwestycyjnych.

W okresie od 21 lipca do 28 lipca oraz 8 października 2015 roku przeprowadzono cztery serie pomiarowe. Badaniom poddano wodę zasilającą stację, media po poszczególnych stopniach technologicznych oraz koncentrat po RO (pobraną z kanału otwartego). Stacja każdorazowo pracowała z wydajnością 30 m<sup>3</sup>/h.

Przeprowadzone badania dały podstawy do stwierdzenia, że węzeł technologiczny pracuje zgodnie z przyjętymi wcześniej założeniami, tym samym jakość produkowanej wody jest wysoka.

Oprócz założonych wartości przewodnictwa i krzemionki po węzle elektrodjonizacji, ważnymi parametrami są również (zgodnie z normatywnymi bazowymi parametrami jakości wody zdeminielizowanej) uzyskane wartości substancji organicznych i żelaza ogólnego.

Z przeprowadzonych badań wynikało, że ilość substancji organicznych określonych metodą nadmanganianową znajduje się poniżej progu granicznego dla wody dodatkowej dla obiegu wodno-parowego, ustalonego na 5 mg KMnO<sub>4</sub>/dm<sup>3</sup>. Należy jednak zauważyć, że zawartość związków organicznych w wodzie wodociągowej – zasilającej instalację – jest mała. W związku z tym trudno oczekiwać, że redukcja tych związków w trakcie procesu uzdatniania będzie duża.

Ilość żelaza ogólnego w wodzie surowej – wodociągowej jest niewielka rzędu 0,04-0,05 mg/dm<sup>3</sup>. Na podstawie pomiaru zawartości żelaza stwierdzono jego wzrost w koncentracie, co wskazuje na brak kumulacji żelaza w obrębie membran.

Pomiar SDI wykonano w wodzie surowej zasilającej stację demineralizacji oraz w wodzie po modułach ultrafiltracji. Uzyskane każdorazowo wyniki po węzle ultrafiltracji na poziomie < 3 wskazują, że mogą być kierowane bez obaw na moduły osmotyczne.

W trakcie pomiarów wykonano badania rozkładu mikrozanieczyszczeń w wodzie surowej, zasilającej stację oraz w wodach za poszczególnymi urządzeniami wchodzącymi w jej skład. Wykonane badania nie wykazały żadnych zanieczyszczeń, co wskazuje na bardzo dobry stan czystości urządzeń.

Wykonane pomiary wolnego CO<sub>2</sub> (na poziomie 0,00 – ślady) w instalacji RO nie stanowiły powodu do niepokoju.

### Podsumowanie

*Fortum Zabrze S.A.* (obecnie *Fortum Silesia S.A.*) po wielu latach eksploatacji SUW w pewnym momencie stanęła przed dylematem – i co dalej? W jakim kierunku powinna pójść modernizacja stacji demineralizacji wody?

Po wielu rozmowach i analizach zdecydowano się na techniki membranowe. Przeważały argumenty przemawiające za systemami membranowymi, powszechnie wszystkim znane, tj.:

- łatwe powiększenie skali (system modułowy),
- prowadzenie procesu w sposób ciągły,
- możliwość ulepszania własności separacyjnych membran w trakcie eksploatacji systemu,
- całkowite zużycie chemikaliów wskazujące na zalety instalacji membranowych,
- przyjazne środowisku,
- zawartość soli w ściekach ok. 2-3 razy mniejsza niż z wymiany jonowej,
- ograniczenie zużycia kwasu solnego i ługu sodowego.

Po niepełnym roku eksploatacji stacja spisuje się dobrze, obsługa nie odbiera niepokojących sygnałów.

Techniki membranowe posiadają więcej zalet niż wad, a nad niekorzystnymi zjawiskami, np. „foulingiem”, można zapobiegać, podobnie jak nad zjawiskami występującymi w tradycyjnych układach technologicznych.

Modernizacja stacji generacji wody oczyszczonej w *Fortum Silesia S.A.* okazała się dobrym rozwiązaniem technologicznym.

Przemysław Syty, Adrian Sobczyszyn  
*Pro Novum sp. z o.o.*

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Litwinowicz A., „Skuteczność usuwania niektórych zanieczyszczeń z wody w instalacjach z membran dla odwróconej osmozy”. V Forum Dyskusyjne „Chemia i diagnostyka dla energetyki”, Centrum Falenty, Raszyn, 18- 20 maja 2005.
- [2] *Fortum/Veolia*, Ogólna instrukcja obsługi – Stacja Generacji Wody Oczyszczonej.
- [3] PN-EN 12952-12:2006: Kotły wodnorurkowe i urządzenia pomocnicze – Część 12: wymagania dotyczące jakości wody zasilającej i wody kotłowej.
- [4] Litwinowicz A., „Przydatność wskaźnika SDI do kontroli procesów zatrzymywania mikrozanieczyszczeń w różnych stopniach uzdatniania wody”. V Konferencja Naukowo-Techniczna „Udział chemii energetycznej we wzroście efektywności urządzeń”, Bielsko-Biała, 26-27 maja 1994.
- [5] Szałol-Sikora D., „Doświadczenia z 15 lat eksploatacji stacji uzdatniania wody opartej na technikach membranowych”. XIV Konferencja Naukowo-Techniczna „Udział chemii energetycznej we wzroście efektywności urządzeń”, Wiśła, 14-16 maja 2012.
- [6] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 63.2943/2013, niepublikowane.
- [7] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 48.3228/2015, niepublikowane.



## Uszkodzenia korozyjne węzownic przegrzewacza pary ze stali austenitycznej w warunkach spalania biomasy

### Corrosion damages of austenitic superheater tubes in a biomass-fired boiler

W ostatnich latach w krajach UE ogromnego znaczenia nabrało wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii (OZE) w związku z potrzebą zmniejszenia zużycia paliw kopalnych oraz ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki Polska zobowiązała się do osiągnięcia w roku 2020 poziomu 14% zużycia energii elektrycznej brutto pochodzącej ze źródeł odnawialnych [1].

Spośród wszystkich odnawialnych źródeł energii w Polsce największym powodzeniem cieszy się biomasa pochodzenia roślinnego z uwagi na najniższe koszty inwestycyjne w porównaniu z innymi OZE. Dodatkowo biomasa uważana jest za paliwo o zerowym bilansie emisji dwutlenku węgla, gdyż wyemitowany CO<sub>2</sub> jest pochłaniany przez rośliny w procesie fotosyntezy.

Powszechnie stosowanymi technologiami przemysłowego przetwarzania biomasy jest spalanie w kotłach: rusztowych, fluidalnych ze złożem stacjonarnym (BFB), fluidalnych ze złożem cyrkulacyjnym (CFB) oraz współspalanie w kotłach na paliwa kopalne.

#### Problemy związane ze spalaniem biomasy w kotłach

Pomimo korzystnych efektów ekologicznych, ekonomicznych i społecznych stosowanie biomasy w produkcji energii przysparza wielu problemów eksploatacyjnych wynikających z jej właściwości fizykochemicznych. Odmienny skład oraz

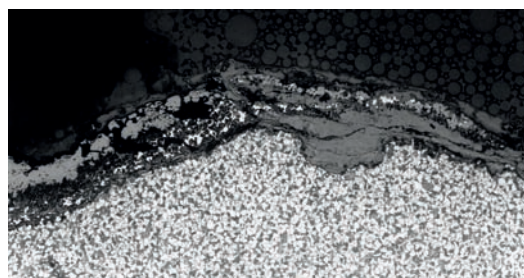
większy udział części lotnych biomasy w porównaniu z węglem powoduje, że powierzchnie ogrzewalne – głównie wężownice przegrzewaczy pary – narażone są na powstawanie groźnych osadów oraz korozję wysokotemperaturową. Jednym z pierwiastków zawartych w biomase jest chlor, który, podobnie jak siarka, jest szczególnie korozyjny w wysokiej temperaturze. Oba te pierwiastki przy współdziałaniu z metali alkalicznych (głównie sodu i potasu) powodują tzw. aktywne utlenianie metalu, niszczące ochronną warstwę tlenków.

W celu zapobiegania korozji wysokotemperaturowej powierzchni ogrzewalnych stosuje się różne rozwiązania, takie jak powłoki ochronne lub systemy dozowania dodatków neutralizujących korozyjne działanie chloru. Innym sposobem rozwiązania problemu jest zastosowanie stali austenitycznych (chromowo-niklowych) na wężownice najbardziej narażone na tego typu korozję. Stale te charakteryzują się wysoką odpornością na działanie korozji chlorkowej z uwagi na zawarty w nich chrom, którego tlenek stanowi skuteczną warstwę ochronną powierzchni metalu.

### Przykład zastosowania stali chromowo-niklowej w kotle na biomasę

Stosowanie stali austenitycznych na wężownice przegrzewaczy pary w kotłach na biomasę daje wyraźną poprawę, jeśli chodzi o zapobieganie korozji wysokotemperaturowej.

Na przykładzie jednego z kotłów opalanych biomasą można porównać stan powierzchni wężownic przegrzewacza pary I° wykonanych ze stali 13CrMo4-5 oraz przegrzewacza pary III° ze stali chromowo-niklowej TP310HCBN (rys. 1, 2). Sumaryczny czas pracy kotła jest mniejszy niż 25 tys. godzin. Mimo znacznie niższej temperatury środowiska pracy (rys. 3) powierzchnia rur p.p. I° jest dużo bardziej zniszczona w wyniku działania korozji wysokotemperaturowej, o której świadczy skład osadów z powierzchni zewnętrznej rur (tab. 1).



Rys. 1. Powierzchnia zewnętrzna wężownicy p.p. I° (stal 13CrMo4-5)

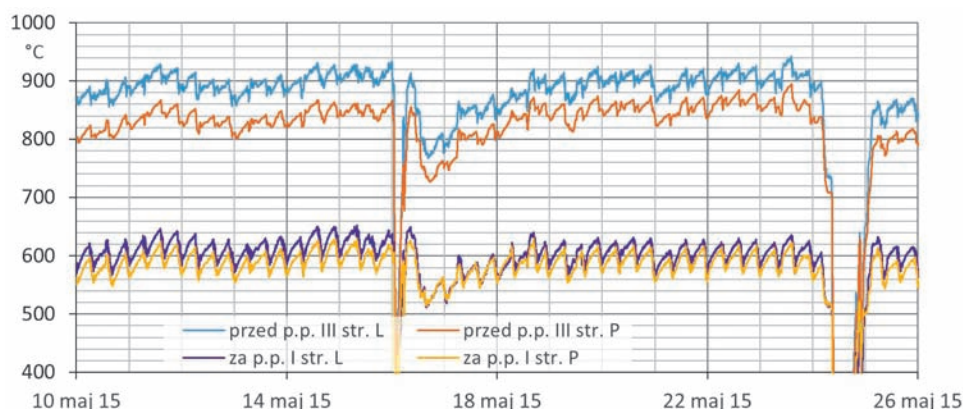


Rys. 2. Powierzchnia zewnętrzna wężownicy p.p. III° (stal TP310HCBN)

### Problemy z zastosowaniem stali austenitycznych

Powierzchnie ogrzewalne kotła ze stali chromowo-niklowych mogą jednak ulegać uszkodzeniom korozyjnym w wyniku naruszenia ciągłości warstwy pasywnej, powodującego obniżenie jej własności ochronnych.

We wspomnianym przykładzie wężownice p.p. III° uległy uszkodzeniom w postaci licznych pęknięć zlokalizowanych w strefach ściskanych kolan (rys. 4-6). Wszystkie pęknięcia biorą swój początek na powierzchni zewnętrznej i na całej długości mają



Rys. 3. Wykres temperatur spalin

Tabela 1

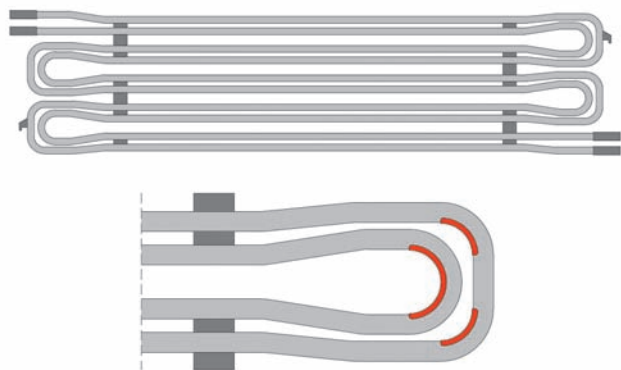
Skład osadów z powierzchni zewnętrznej, %wag.

Pierwiastek	O	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Cr	Fe	Ni
p.p. I°	29,91	–	–	–	–	0,46	2,56	2,17	–	0,91	66,99	–
p.p. III°	38,52	1,54	1,06	3,53	0,48	9,11	2,16	22,12	6,15	1,12	9,98	4,21

charakter międzykrystaliczny (rys. 7). Ze względu na wąski obszar występowania pęknięć – wewnętrzne strony łuków węzownic – można stwierdzić, że ich przyczyną jest korozja naprężeniowa.

Pękanie naprężeniowe wywoływane jest głównie naprężeniami występującymi w całej objętości i współmiernymi z wielkością elementu. Jeżeli naprężenia będące efektem oddziaływań zewnętrznych lub przemian strukturalnych leżą w zakresie odkształceń sprężystych, to wpływają na obniżenie odporności materiału na korozję w wyniku dwóch procesów: obniżania stabilności termodynamicznej metalu na skutek dostarczenia energii (wpływ tego procesu jest bardzo mały) oraz naruszenia ciągłości warstwy pasywnej. Ogólnie mówiąc, pękanie korozyjne pod wpływem naprężenia może zachodzić tylko przy równoczesnym oddziaływaniu środowiska korozyjnego i naprężeń rozciągających [2].

W przypadku kolan najczęściej mamy do czynienia z naprężeniami własnymi, powstałymi podczas procesu ich gięcia, ponadto występować mogą dodatkowe naprężenia w wyniku niejednorodnych, okresowo zmiennych warunków pracy układu węzownic (przepływający strumień spalin, zmiany temperatur).



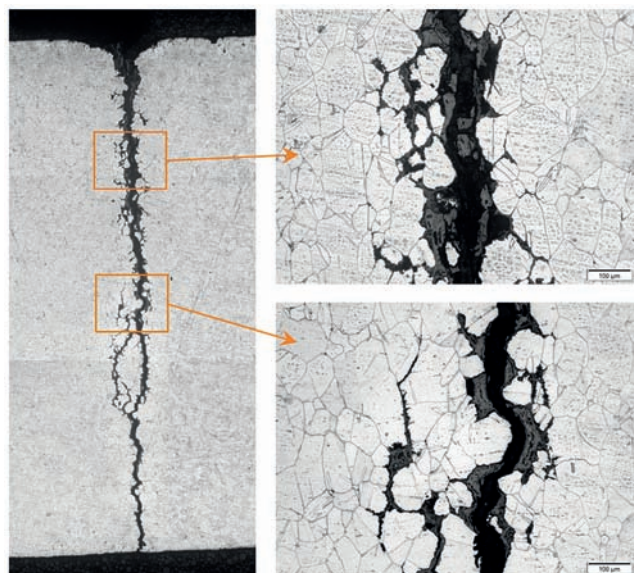
Rys. 4. Schemat węzownic p.p. III° z lokalizacją stref występowania pęknięć



Rys. 5. Pęknięcie w strefie ściskanej kolana węzownicy



Rys. 6. Pęknięcie na wskroś – powierzchnia wewnętrzna rury

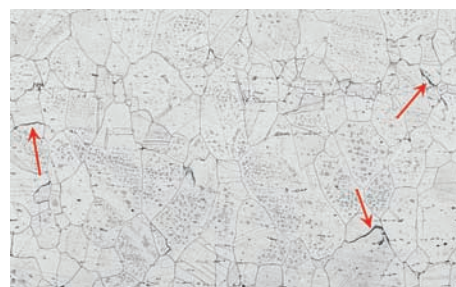


Rys. 7. Przykładowe pęknięcie węzownicy p.p. III° na zglądzie metalograficznym

Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym powstawaniu i rozwojowi pęknięć jest korozja międzykrystaliczna, która również jest istotnym problemem w przypadku stali austenitycznych. Korozja ta zachodzi w temperaturze 500-850°C i objawia się powstawaniem na granicach ziaren węglików chromu  $Cr_{23}C_6$ , które tworząc się zubożają w chrom strefę przygraniczną ziaren. Proces korozji naprężeniowej zachodzi przeważnie w głębiej położonych warstwach, lecz jeśli występuje przy powierzchni elementu zachodzi ryzyko miejscowego osłabienia warstwy pasywnej lub jej braku. Zatem, jeżeli w elemencie wykonanym ze stali austenitycznej zawartość chromu w austenicie spadnie poniżej 12%, stal ta będzie ulegać korozji jak zwykła stal [2].

Mimo iż czas pracy omawianych węzownic p.p. III° jest mniejszy niż 25 tys. godzin, to w strukturze materiału można już zaobserwować początki korozji międzykrystalicznej na całym przekroju grubości ścianki (rys. 8). Jak widać korozja ta jest szczególnie niebezpieczna, ponieważ jej działanie jest niewidoczne, a powstałe na granicach ziaren wydzielienia powodują znaczne zmniejszenie wytrzymałości i plastyczności stali.

Międzykrystaliczny charakter pęknięcia widocznego na rysunku 7 może dodatkowo świadczyć o współdziałaniu korozji naprężeniowej i międzykrystalicznej, gdyż występujące w odpowiednim skupieniu wydzielienia na granicach ziaren stanowią osłabienie struktury i mogą niejako przyspieszać propagację pęknięć naprężeniowych.



Rys. 8. Początki korozji międzykrystalicznej w materiale węzownicy p.p. III°

## Sposoby zapobiegania przedstawionym problemom

Korozji naprężeniowej można zapobiec eliminując występującą w elemencie naprężenia własne (rozciągające) lub w razie potrzeby wprowadzić naprężenia ściskające poprzez obróbkę cieplną lub odpowiednie zmiany strukturalne (np. azotowanie). Zdarza się również, że powodem korozji naprężeniowej są naprężenia powstające w wyniku zmiennych warunków pracy elementu (drgania, niewłaściwa kompensacja wydłużeń cieplnych), zatem element taki należałoby dokładnie zoptymalizować pod kątem naprężeniowo-odkształceniowym.

Rozwiązaniem problemu korozji naprężeniowej mogą być napawane powłoki antykorozyjne z odpowiednio dobranych materiałów, zastępujące warstwę pasywną metalu, która może być w łatwy sposób naruszona.

Korozji międzykrystalicznej stali austenitycznych zapobiega się poprzez [2]:

- ograniczenie zawartości węgla do 0,002-0,03%,
- stosowanie przesycań stali z temperaturze 1000-1100°C, przez co osiąga się równomierne rozmieszczenie węgla w roztworze,
- unikanie nagrzewania stali do temperatury 500-850°C, przy której wydzielają się węgliki chromu (co jest niemożliwe do osiągnięcia, gdy stale muszą być spawane),
- wprowadzenie do stali tytanu lub niobu w ilości 5- lub 10-krotnej zawartości węgla; dodatki te tworzą trwałe węgliki MC, usuwając węgiel z roztworu stałego i uodparniają stal całkowicie na korozję międzykrystaliczną. Stale te można spawać bez konieczności ich przesycań.

Przemysław Jurasz

*Pro Novum sp. z o.o.*

## Podsumowanie

Sposób niszczenia omówiony w artykule stanowi problem w eksploatacji elementów wykonanych ze stali austenitycznych w agresywnym środowisku. Nietuzinkowości dodaje fakt, iż z jednej strony materiał posiada dobrą odporność na korozję, z drugiej strony struktura austenityczna jest wysoce podatna na korozję międzykrystaliczną podczas pracy w temperaturach powyżej 500°C, co czyni tę stal bardziej zawodną w takich warunkach pracy.

Cechą charakterystyczną uszkodzenia jest oddziaływanie korozji naprężeniowej. Cykliczne odkształcenia sprężyste oraz obecność związków chloru niszczą ochronną warstwę pasywną stali i tworzą ognisko pęknięcia.

Połączenie obu procesów korozyjnych sukcesywnie osłabia strukturę i przyspiesza rozwój nieciągłości, co potwierdza krótki czas pracy elementu.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Strategia rozwoju energetyki odnawialnej, Ministerstwo Środowiska, Warszawa, wrzesień 2000.
- [2] Surowska B., Wybrane zagadnienia z korozji i ochrona przed korozją, Politechnika Lubelska, Lublin 2002.
- [3] *Pro Novum Sp. z o.o.* Opinia techniczna nr OT.211.1270/2015, niepublikowana.



## Chemiczne oczyszczanie urządzeń – wzrost potrzeb, ograniczenia realizacyjne na urządzeniach długo eksploatowanych

### Chemical cleaning of power plant equipment, increase of the needs and execution limitations, in the a long time operated power units

Park urządzeń polskiej energetyki w znacznej większości liczy sobie co najmniej kilkanaście lat. Urządzenia te mają za sobą liczne remonty i modernizacje, które ograniczyły do minimum występowanie awarii oraz pozwoliły na bezpieczną pracę aż do obecnych czasów. Mimo budowy nowych jednostek wytwórczych wiele wskazuje na to, iż w najbliższych latach długo eksploatowane bloki nadal będą stanowiły trzon polskiej energetyki.

Chemiczne oczyszczenie urządzeń energetycznych jest nieodzownym działaniem w trakcie ich eksploatacji, niezależnie od poziomu utrzymania technicznego. Czystość wewnętrznych powierzchni ogrzewalnych wpływa bezpośrednio na sprawność, a ta przekłada się na koszty eksploatacji. Utrzymywanie wysokiej czystości wewnętrznych powierzchni ogrzewalnych poprzez dotrzymywanie reżimów chemicznych, a także niedopuszczanie



do przekroczenia ilości osadów ponad wartość bezpieczną dla danego urządzenia jest gwarancją dyspozycyjności urządzenia oraz odsuwa w czasie możliwość wystąpienia awarii.

W ostatnich latach bloki energetyczne coraz częściej pracują w głębokiej regulacji, niejednokrotnie poniżej swojego minimum technicznego. Prognozy wskazują, że taki tryb pracy będzie występował coraz częściej. Praca w takich warunkach sprzyja szybszemu wytrącaniu się osadów na wewnętrznych powierzchniach ogrzewalnych kotłów, co w konsekwencji wymusza częstsze ich czyszczenie. Zaniechanie tych działań w dalszej perspektywie może doprowadzić do poważnych awarii układu ciśnieniowego i wówczas koszty naprawy znacząco przewyższą koszt procesu czyszczenia. Należy również pamiętać, że poważna awaria skutkuje postojem urządzenia o wiele dłuższym niż czas przewidziany na proces czyszczenia.

Właściwy proces chemicznego czyszczenia poprzedza szereg prac przygotowawczych, zbieżnych dla różnych obiektów energetycznych, ale ustalanych indywidualnie z uwzględnieniem lokalnych uwarunkowań. Czynności poprzedzające czyszczenie to m.in. ustalenie sposobu:

- zabezpieczenia elementów niepodlegających czyszczeniu, w tym aparatury kontrolno-pomiarowej,
- odłączenia urządzenia od układu eksploatacyjnego,
- przygotowania roztworu czyszczącego,
- podgrzewania roztworów procesowych (jeżeli istnieje taka potrzeba),
- napełnienia i usunięcia roztworów procesowych z urządzenia,
- kontroli procesu (miejsca poboru próbek do badań analitycznych),
- określania wielkości i rozwiązania konstrukcyjnego instalacji pomocniczej,
- określania możliwości i zakresu wykorzystania stałych instalacji pomocniczych u eksploatatora.

## Plan remontu a chemiczne czyszczenie

Każdy użytkownik stara się, by jak najbardziej skrócić czas przewidziany na remont kotła. Należy tu zwrócić szczególną uwagę na fakt, iż proces chemicznego czyszczenia przewidziany

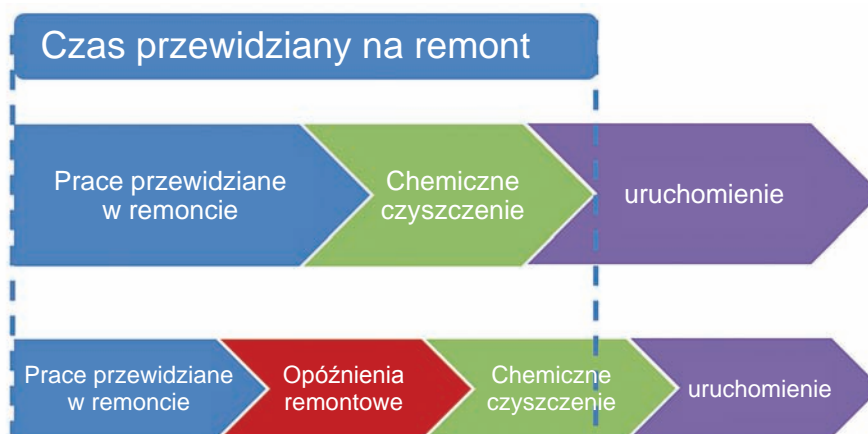
ny jest praktycznie zawsze w końcowym etapie przedsięwzięcia, gdy wszystkie prace związane z układem ciśnieniowym kotła zostały już zakończone. Niedotrzymanie terminu zakończenia któregośkolwiek z etapów remontu opóźnia finalizację kolejnych, uwzględnionych w harmonogramie, w tym chemicznego czyszczenia. Sytuację tę obrazuje rysunek 1.

W takich sytuacjach eksploatatorzy, chcąc dotrzymać wstępnie założonego terminu zakończenia remontu, starają się skrócić czas pierwotnie przewidziany na chemiczne czyszczenie. Działanie takie jest niemożliwe, gdyż już na etapie planowania harmonogramu remontu nie przewiduje się opóźnień. Należy zwrócić uwagę na fakt, że wstępnie założony harmonogram uwzględnia czas niezbędny nie tylko na przeprowadzenie procesu czyszczenia, ale także na wszystkie prace towarzyszące temu przedsięwzięciu. Istotne jest także, że w razie pojawienia się dużej nieszczelności w trakcie procesu, czyszczenie należy przerwać do momentu naprawienia uszkodzenia, a następnie powtórzyć/dokończyć cały proces. Stąd też jasno wynika, że nie ma możliwości skrócenia czasu przewidzianego na chemiczne czyszczenie, jeśli proces ten ma być przeprowadzony zgodnie z dobrą praktyką inżynierską oraz z wysoką skutecznością. Także próby łączenia procesu oczyszczania z innymi pracami prowadzonymi w tym samym czasie w obrębie oczyszczanego urządzenia są niezgodne z wymaganiami BHP i mogą stwarzać zagrożenie bezpieczeństwu wszystkich osób znajdujących się w wyznaczonej strefie zagrożenia.

Podkreślić trzeba, że tylko rzetelnie wykonany proces zgodnie z założoną technologią pozwoli na osiągnięcie zamierzonego efektu czyszczenia powierzchni ogrzewalnych, co w dalszej mierze rzutuje na bezawaryjną pracę urządzenia.

## Wybór metody czyszczenia

Chemiczne czyszczenie pozwala na usunięcie osadów eksploatacyjnych wytrąconych z czynnika obiegowego, produktów korozji powstałej w trakcie eksploatacji urządzenia, korozji atmosferycznej/postojowej, zanieczyszczeń pomontażowych oraz ewentualnych substancji konserwujących. Roztwory wykorzystywane do procesu chemicznego czyszczenia urządzeń najczęściej można sklasyfikować według rysunku 2.



Rys. 1.



Rys. 2.

Każda z metod prowadzona jest przy innych parametrach i pozwala na osiągnięcie innego stopnia oczyszczenia powierzchni. Także ryzyko, jakie niesie ze sobą proces w razie wystąpienia awarii/rozszczenia urządzenia, jest różne.

Dobierając metodykę usunięcia osadów eksploatacyjnych brane są pod uwagę aspekty m.in. takie jak:

- skład i ilość osadu przypadająca na jednostkę powierzchni ogrzewalnej,
- zakres wymian w trakcie remontu (jeżeli występował przed czyszczeniem),
- techniczne możliwości podłączenia instalacji pomocniczej i napełnienia urządzenia roztworem czyszczącym.

W zależności od wymienionych warunków oraz na podstawie analizy osadów dobiera się parametry kąpeli czyszczącej oraz uszczegóławia się wszystkie etapy towarzyszące procesowi, między innymi sposób napełniania, płukania, utylizacji ścieków i inne.

## Zagrożenia

W urządzeniach długo eksploatowanych, a zwłaszcza z nieprawidłowo zdiagnozowanym stanem technicznym powierzchni ogrzewalnych istnieje ryzyko rozszczenia elementu podczas jego czyszczenia. Sytuacja taka mimo wszelkich niedogodności z nią związanych na etapie czyszczenia, ma swoje pozytywne strony. Pozwala na wykrycie osłabionych korozyjnie miejsc, niejednokrotnie takich, które nie zostały ujawnione w trakcie próby ciśnieniowej. Wykrycie i naprawa uszkodzeń jeszcze na etapie chemicznego czyszczenia nie generuje tak dużych kosztów jak to samo uszkodzenie ujawnione w ruchu.

## Ścieki

Chemiczne czyszczenie jest procesem generującym bardzo dużą ilość ścieków. Roztwór potrawienny, popłuczyny oraz roztwory neutralizujące i pasywujące stanowią ogromny ładunek, będący wielokrotnością pojemności wodnej kotła, który trzeba odpowiednio zagospodarować. Z uwagi na brak technicznych oraz unormowanych prawnie możliwości utyli-

zacji odpadów potrawiennych na terenie elektrowni czy elektrociepłowni, konieczne staje się zagospodarowanie odpadów poza terenem zakładu, na którym prowadzony jest proces. Znaczna ilość odpadów po chemicznym czyszczeniu, liczona w setkach metrów sześciennych, wymaga odpowiedniego zabezpieczenia logistycznego, z gwarancją przejęcia całości ładunku odpadów do przystosowanych do tego rodzaju zbiorników (autocystern, cystern kolejowych itp.). Co ważne – transport odpadów do miejsca zagospodarowania powinien być prowadzony przez podmioty posiadające odpowiednie zezwolenia na transport i/lub zagospodarowanie odpadów (dla odpadów o konkretnym kodzie).

Potwierdzeniem zagospodarowania odpadów zgodnie z przepisami prawa powinien być wystawiony dokument „Karty przekazania odpadu”. Konieczność wywozu i zagospodarowania odpadów niewątpliwie znacząco podnosi koszt realizacji operacji czyszczenia, jednakże niesie ze sobą niewątpliwie korzyści:

- po pierwsze – przy zabezpieczeniu całkowitej pojemności oczyszczanego kotła w cysternach/autocysternach (wariant optymalny i zalecany) w momencie rozszczenia urządzenia w trakcie procesu istnieje możliwość spustu i zdeponowania niebezpiecznych roztworów i ich ponownego użycia lub przekazania do zagospodarowania;
- po drugie – zwalnia eksploatatora urządzenia z problemów związanych z technicznymi i prawnymi aspektami związanymi z zagospodarowaniem odpadów.

## Podsumowanie

Zapewnienie wysokiej dyspozycyjności urządzeń długo eksploatowanych, zwłaszcza pracujących w warunkach intensywnej regulacji wymaga przestrzegania określonych zasad i wymagań. Jednym ze sposobów jest regularne kontrolowanie ilości osadów i usuwanie ich nadmiaru z wewnętrznych powierzchni ogrzewalnych. Dzięki takiemu działaniu zapewniona jest odpowiednia wymiana ciepła przez materiał rur oraz minimalizowana ewentualność wystąpienia procesów korozyjnych (różnego typu), które w konsekwencji mogą prowadzić do awarii. Praca w warunkach głębokiej regulacji, w jakiej eksploatowana jest znaczna część omawianych jednostek, wpływa na szybsze niż standardowo tempo przyrostu ilości osadów na powierzchniach ogrzewalnych.

Wszystkie omawiane w artykule problemy i ograniczenia, a także inne, o mniejszej wadze, ale również istotne z perspektywy zakładu wykonującego proces czyszczenia, zostały na przestrzeni ostatnich lat dobrze poznane. Są one na bieżąco rozwiązywane i nie stanowią większego ograniczenia w realizacji procesu czyszczenia.

Chemicznego czyszczenia, o ile jest zaplanowane i wykonane zgodnie ze sztuką inżynierską, nie należy się obawiać; bilans pomiędzy zagrożeniami związanymi z samym procesem czyszczenia a efektami procesu jest zdecydowanie pozytywny.

# XVI KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

W dniach 18–20 maja 2016 r. w Hotelu STOK w Wiśle-Jawornik odbyła się zorganizowana przez Przedsiębiorstwo Usług Naukowo-Technicznych „Pro Novum” sp. z o.o. XVI Konferencja Naukowo-Techniczna UDZIAŁ CHEMII ENERGETYCZNEJ WE WZROŚCIE EFEKTYWNOŚCI URZĄDZEŃ. Konferencja została zorganizowana przy współpracy z TAURON Wytwarzanie S.A., Urzędem Dozoru Technicznego oraz Towarzystwem Gospodarczym Polskie Elektryczne Grupa Chemiczna.

Patronat medialny sprawowały czasopisma: Energetyka, Dozór Techniczny, Przegląd Energetyczny, Energetyka Ciepła i Zawodowa, Chemia Przemysłowa i Nowa Energia oraz portal Elektroenergetyka i Przemysł on-line. Inżynieria w praktyce. Konferencja będąca kontynuacją cyklicznych, mających już ponad 30 lat tradycji, spotkań środowiska chemików – energetyków zatrudnionych w jednostkach energetyki zawodowej i przemysłowej ze specjalistami krajowych oraz zagranicznych firm działających w branży energetycznej oraz przedstawicielami jednostek naukowych i badawczych zgromadziła ponad 170 uczestników.

Konferencję otworzył Dyrektor d/s Rozwoju Pan Paweł Gawron, następnie miały miejsce wystąpienia Prezesa Pro Novum Pana Jerzego Trzeszczyńskiego oraz Prezesa firmy Ecol sp. z o.o. Pana Wojciecha Majki – Sponsora Strategicznego XVI Konferencji. W swoim wystąpieniu Prezes Pro Novum wskazał na korzyści z integracji diagnostyki i chemii energetycznej oraz przedstawił sposób powiązania diagnostyki z procesem zarządzania efektywnością produkcji, informując, że jest to jeden z intensywnie rozwijanych kierunków działalności Pro Novum.

W sześciu sesjach plenarnych wygłoszono w sumie 28 referatów, których tematyka dotyczyła szerokiego zakresu zagadnień i problemów technicznych, organizacyjnych i prawnych związanych z szeroko pojętą chemią energetyczną. Referaty w sesjach plenarnych koncentrowały się wokół zagadnień dotyczących m.in.:

Referaty w sesjach plenarnych koncentrowały się wokół zagadnień dotyczących m.in.:

- Przygotowania wody do celów energetycznych – nowych wyzwań, nowych trendów, nowych technologii,
- Gospodarki wodno-ściekowej,
- Doświadczeń eksploatacyjnych i remontowych, problemów i rozwiązań,
- Zarządzania majątkiem produkcyjnym elektrowni podczas długotrwałego postoju,
- Problemów korozji i zabezpieczeń antykorozyjnych urządzeń energetycznych,
- Pracy w regulacji – realnego stanu, realnych problemów,
- Diagnostyki i chemii,
- Norm, wytycznych, reżimów, rekomendacji, prawa,
- Usług z zakresu chemii energetycznej.

Pierwsza część Konferencji poświęcona była aktualnym i żywotnie ważnym dla wytwórców energii zagadnieniom związanym z koniecznością spełnienia wymagań dyrektywy IED w zakresie konkluzji BAT. Wystąpienie przedstawienia TGPE przybliżyło Uczestnikom zakres problemów z jakimi będzie musiał zmierzyć się sektor wytwarzania energii aby spełnić wymagania prawne w zakresie wielkości emisji. Jednocześnie, co optymistyczne, kolejne wystąpienia referentów z różnych grup energetycznych potwierdziły wysoki stopień świadomości problemów oraz pokazały szeroki zakres działań techniczno-badawczych jakie są podejmowane w celu sprostania przyszłym wymaganiom prawa. Ta bardzo dobra wizytówka dla wszystkich specjalistów, zaangażowanych na polu chemii energetycznej.

Kolejny panel konferencji poświęcony był zmianie trybu pracy bloków energetycznych. Praca podstawowa do której bloki 200 i 360 MW zostały zaprojektowane to już historia. Realia rynku energii nie gwarantują również takiej pracy nowym, dużym jednostkom wytwórczym. Praca w głębokiej regulacji, częste postoje i uruchomienia to nietypowe warunki generujące nowe, nieznanne lub niedoceniane dotąd problemy eksploatacyjne i remontowe. Wszystkie wpływające na trwałość i dyspozycyjność. Wystąpienia dotyczyły m.in. problemów związanych z dostosowaniem korekcji chemicznej do zmiany trybu pracy urządzeń



oraz zagadnień dotyczących zabezpieczenia antykorozyjnego w zależności od długości i rodzaju postępu. Przedmiotowej tematyki dotyczył również zorganizowany po raz pierwszy panel dyskusyjny pt. „Reżimy chemiczne w nowych warunkach eksploatacji – czy optymalne nadal jest optymalne” do którego zaproszeni zostali przedstawiciele największych grup energetycznych oraz specjaliści branżowi. W dyskusji ujawniły się różnice w podejściu do tematu pracy bloków w głębokiej regulacji w zależności od poziomu wyposażenia technicznego oraz danych dotyczących realnego obciążenia przez operatora danego typu jednostek wytwórczych. Jako pewnik przyjęto konieczność prowadzenia różnego rodzaju działań, które minimalizowałyby niekorzystne skutki pracy w regulacji, nie ograniczając się przy tym jedynie do głównych urządzeń wytwórczych, z koniecznym zakresem działań po stronie innych układów technologicznych m.in. układów przygotowania wody. Zwrócono również uwagę na konieczność zbierania doświadczeń, tak aby w przyszłości, z lepszym rozeznaniem problemu i konsekwencji pracy w regulacji, móc zaproponować kompleksowy zakres rozwiązań.

Tradycyjnie już jedna z sesji dotyczyła spraw związanych z przygotowaniem wody do celów energetycznych oraz gospodarką wodno-ściekową. Referaty wygłosili przedstawiciele elektrowni eksploatujący na co dzień układy przygotowania wody, projektanci oraz dostawcy urządzeń i technologii. Wystąpienia pozwoliły na zapoznanie się z aktualnymi trendami oraz obszarami zainteresowania w dziedzinie pozyskiwania, obróbki i przygotowania wody do celów nie tylko stricte energetycznych.

Ostatnia grupa wystąpień dotyczyła diagnostyki oraz różnego rodzaju problemów związanych z chemicznym oddziaływaniem czynników na elementy urządzeń. Szeroko poruszono temat usług związanych z utrzymaniem dobrego stanu technicznego urządzeń w tym chemicznego oczyszczania, konserwacji, gospodarki olejowej oraz odbudowy elementów z wykorzystaniem nowoczesnych technologii.

Tradycyjnie konferencji towarzyszyły stoiska wystawowe, gdzie 13 firm krajowych i zagranicznych prezentowało swoje najnowsze produkty i technologie mogące mieć zastosowanie w eksploatacji i w pracach remontowych urządzeń energetycznych:

- Doster sp. z o.o.
- EBRO ARMATUREN sp. z o.o.
- Ecol sp. z o.o.
- Mettler-Toledo sp. z o.o.
- NALCO POLSKA Sp. z o.o.
- PKPU ORIONTEC Krzysztof Jasik/DOW Water and Process Solutions
- ProMinent Dozotechnika sp. z o.o.
- Przedsiębiorstwo Usług Naukowo-Technicznych „Pro Novum” sp. z o.o.
- Purolite sp. z o.o.
- SEEN Technologie sp. z o.o.
- TECHNOPOMIAR sp. z o.o.
- Weber Polska sp. z o.o.

Organizatorzy konferencji, wsłuchując się w opinie uczestników, żywią przekonanie, że wydarzenie było dobrym miejscem wymiany opinii i doświadczeń bliskich szeroko pojętym problemom związanym z chemią energetyczną oraz inspiracji do podjęcia konkretnych działań potrzebnych energetyce, które pozwolą na jej dalszą transformację w bardziej przewidywalnym niż dotąd kierunku.



# Usuwanie źródeł spiętrzenia naprężeń w elementach krytycznych rurociągów poprzez zmiany konstrukcyjne

## Removal of stress concentration sources in piping critical elements through construction changes

„Tylko ten, co nic nie robi, nie robi błędów”

### Dodatkowe spiętrzenia naprężeń

Projektując rurociąg nie sposób uniknąć spiętrzenia naprężeń w węzłach o relatywnie większej sztywności (spoiny, kształtki, armatura itp.). Podstawowym zadaniem projektowania jest, aby te spiętrzenia nie przekraczały naprężeń dopuszczalnych. Niestety zdarzają się przypadki, że tak nie jest, a powodem tego są błędy, które można pogrupować następujący sposób:

- nieprawidłowy dobór zamocowań i/lub całego systemu,
- nieprawidłowa trasa rurociągu,
- nieprawidłowa zarówno trasa jak i dobór zamocowań.

Powyższa klasyfikacja jest oczywiście umowna i została poczyniona na potrzeby niniejszego artykułu.

### Nieprawidłowy dobór zamocowań

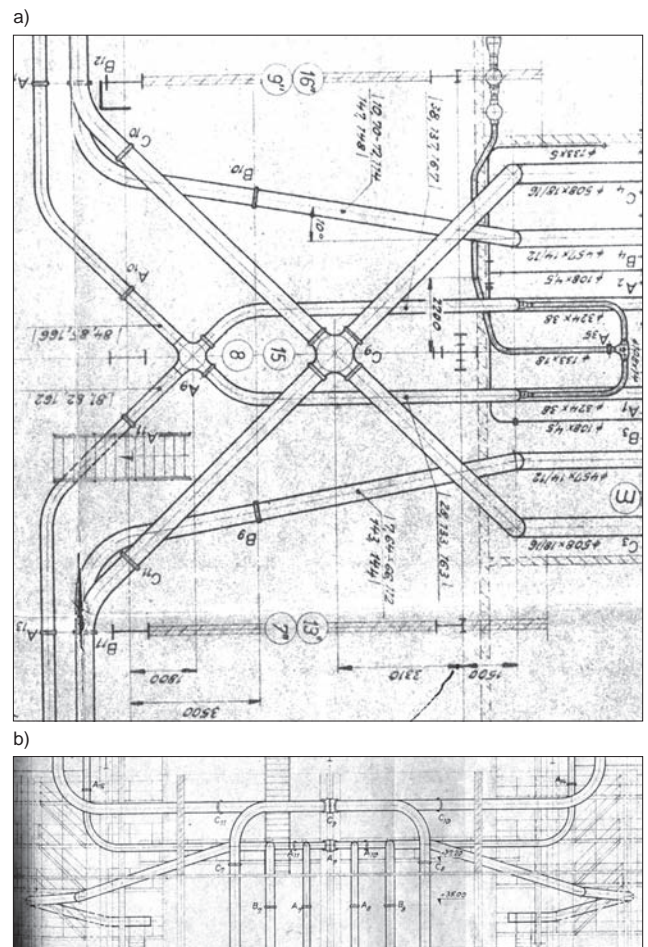
Nieprawidłowości przy projektowaniu zamocowań można podzielić na dwie podgrupy. Pierwsza – błąd leży w samym doborze, co obrazuje rysunek 1 [1].



Rys. 1. Żle dobrany udźwig zamocowania sprężynowego jednokolumnowego

Druga – rzadsza, ale za to bardziej złożona podgrupa, to zarówno zły dobór zamocowań dla większego obszaru na jednym rurociągu, czy nawet na kilku rurociągach [2,3]. Przykładem

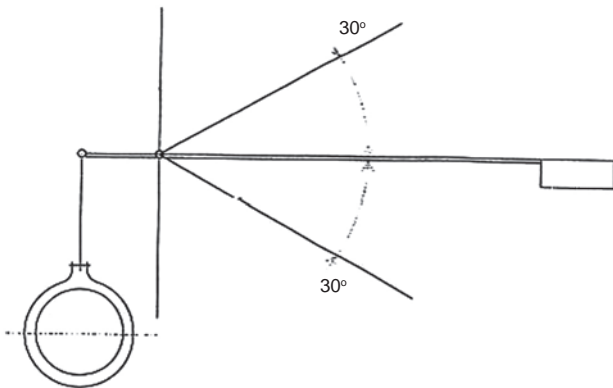
takiej sytuacji jest zastosowanie zamocowań dźwigowo-ciężarkowych o przekładni dźwigni 10 w rejonie czwórników głównych rurociągów parowych bloków 200 MW (rys. 2).



Rys. 2. Główne rurociągi parowe bloków 200 MW w rejonie czwórników (para świeża i wtórnie przegrzana)  
a) widok z góry, b) widok z boku



Rys. 3. Wzajemnie poblokowane zamocowania dźwigniowo-ciężarkowe w rejonie czwórników



Rys. 4. Zakres działania (przemieszczeń pionowych) zamocowania dźwigniowo-ciężarkowego



Rys. 5. Zamocowania dźwigniowo-ciężarkowe, konstrukcja stosowana do 1965 roku



Rys. 6. Zamocowania dźwigniowo-ciężarkowe, konstrukcja według KER

Bliskie usytuowanie sześciu nitek rurociągów, mnogość zamocowań oraz fakt, że ramię z przeciwcieżarem ma długość 2,5 m spowodowało wzajemne blokowanie zamocowań (rys. 3).

Na pokazaną na rysunku 3 sytuację nałożyło się kilka przyczyn i zbiegów okoliczności, a mianowicie:

- zastosowanie zamocowań o niewystarczającym zakresie przemieszczeń (rys. 4),
- usytuowanie zamocowań zbyt blisko siebie – nachodzące na siebie obszary działania (rys. 2),
- zmiana przez producenta konstrukcji zamocowań (rys. 5, 6).

Omówiony powyżej zły dobór zamocowań spowodował blokadę przemieszczeń wszystkich trzech nitek głównych rurociągów parowych bloków 200 MW w rejonie czwórników. Powstała sytuacja spowodowała znaczne spiętrzenie naprężeń w rejonie spoin doczołowych czwórników, co z kolei spowodowało pęknięcie tych spoin. Problem należało rozwiązać dobierając zamocowania stałositowe o bardzo dużej zdolności przenoszenia przemieszczeń pionowych i zarazem zamocowań o małej przestrzeni działania.

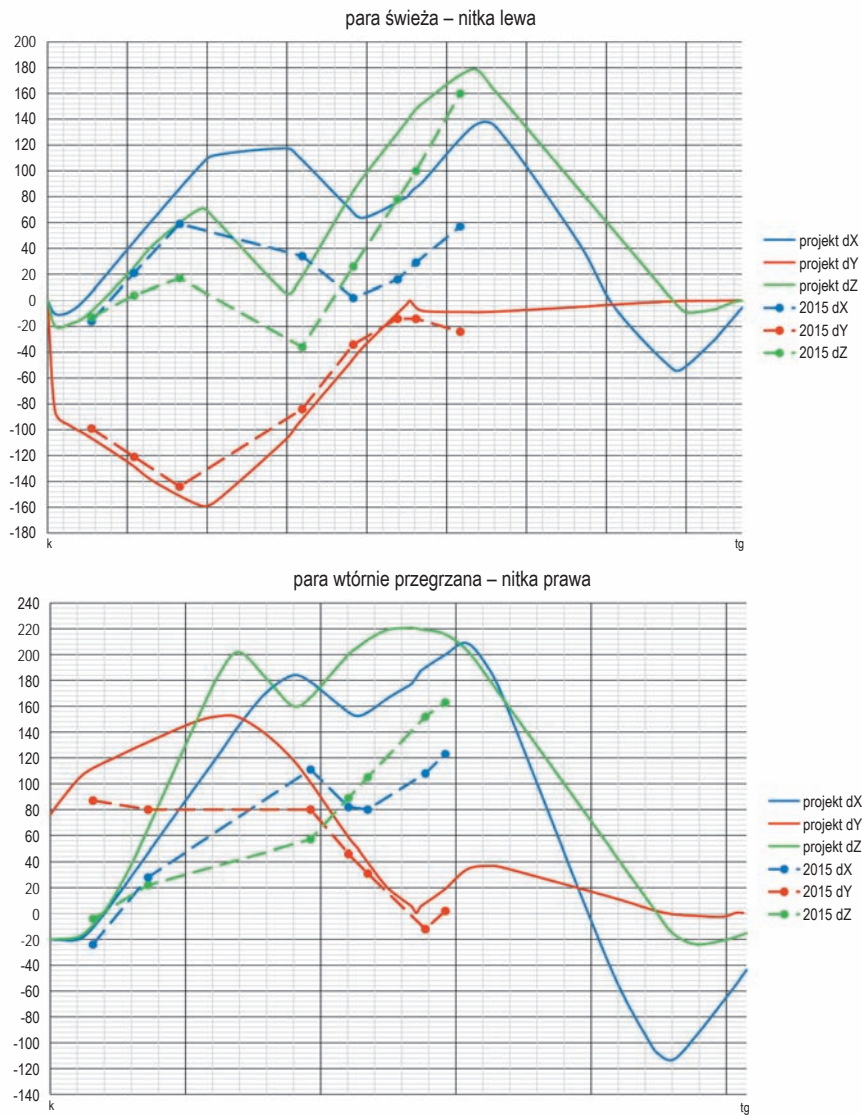
Jedynym zamocowaniem, które spełnia tak ekstremalne wymagania jest zamocowanie wielokrążkowe-sześciokrotne i takie zastosowano w tym wypadku dla całego pokazanego na rysunku 2 obszaru. Zawieszenia czwórnika pokazano na rysunku 7 [4].



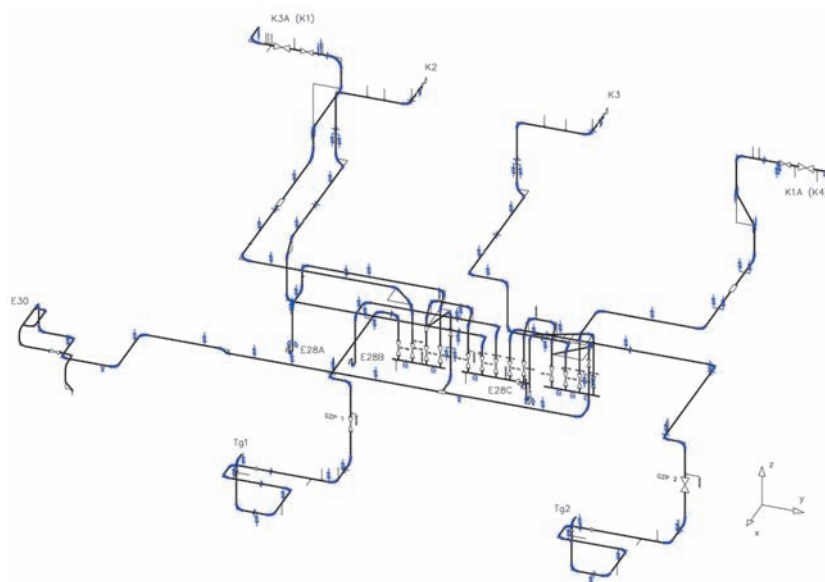
Rys. 7. Podwójne zamocowanie wielokrążkowe-sześciokrotne czwórnika rurociągu pary wtórnie przegrzanej

Zakres przemieszczeń głównych rurociągów parowych w rejonie czwórników ilustruje rysunek 8 [5].

Kolejnym przykładem nieprawidłowego doboru zamocowań do warunków pracy rurociągów był układ liniowy trzech kolektorów zbiorczych (rys. 9). Zablockowanie możliwości przemieszczeń osiowych kolektorów (podpory stałe) skutkowało dodatkowym spiętrzeniem naprężeń na króćcach kolektorów wyprowadzających rurociągi łączące (bypassy). Zastosowanie podpór rolkowych wyeliminowało ten problem [6].

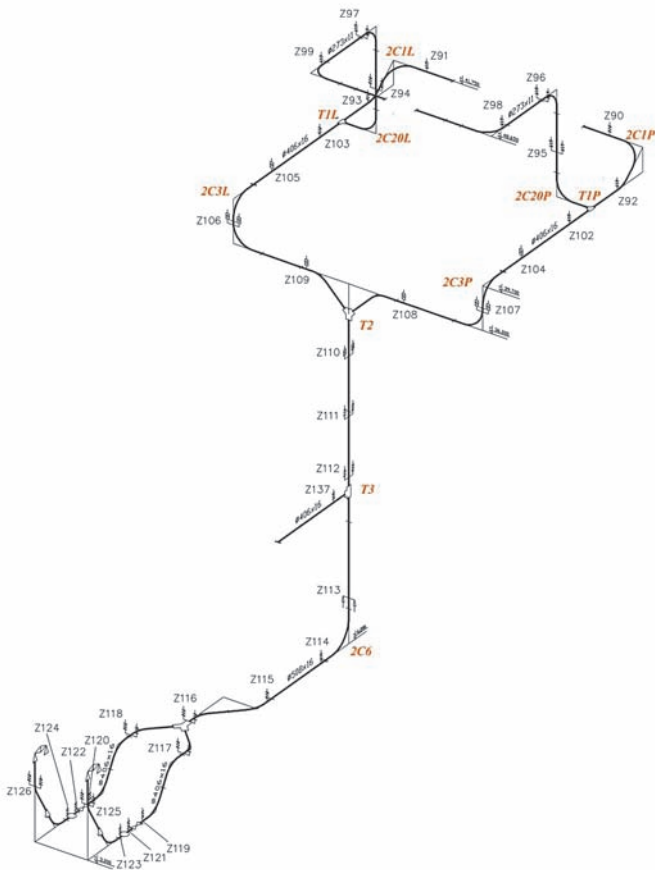


Rys. 8. Przemieszczenia ciepłe głównych rurociągów parowych w rejonie czworników otrzymane na drodze obliczeniowej i na podstawie pomiarów geodezyjnych

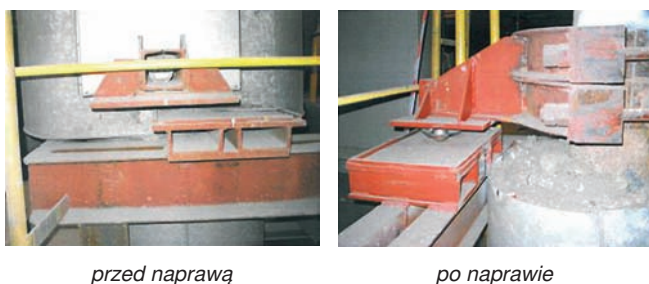


Rys. 9. Zespół kolektorów zbiorczych w układzie rurociągów jednej z elektrociepłowni przemysłowych

Kolejnym przykładem niefortunnego doboru zamocowania, a dokładniej kierunku przesuwu podpory, jest rurociąg pary wtórnie przegrzanej kotła OP-380 [10]. Ponieważ z pionowego odcinka rurociągu odchodzi rurociąg do stacji redukcyjno schładzającej (rys. 10) podpora Z 113 powinna umożliwić ruch rurociągu w kierunku stacji RS, a nie tylko zgodnie z osią symetrii kotła. Fakt ten powodował blokowanie się podpory, wyginanie pionowej części rurociągu i w konsekwencji przekroczenie naprężeń dopuszczalnych. Taka sytuacja spowodowała uszkodzenie spoiny na pionowym odcinku rurociągu pomiędzy trójnikiem a kolanem ZC6 (rys. 15). Umożliwienie swobodnego ruchu rurociągu o płaszczyźnie ułożonej pod kątem  $\sim 37^\circ$  do płaszczyzny symetrii kotła skutecznie wyeliminowała powód dodatkowego spiętrzenia naprężeń [10] (rys. 11).



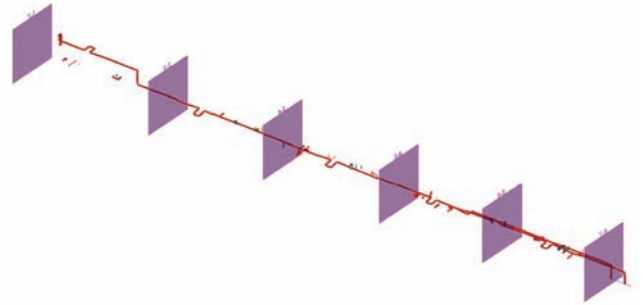
Rys. 10. Rurociąg pary wtórnie przegrzanej kotła OP-380



Rys. 11. Podpora kulowa, pionowa nr Z113 po modernizacji

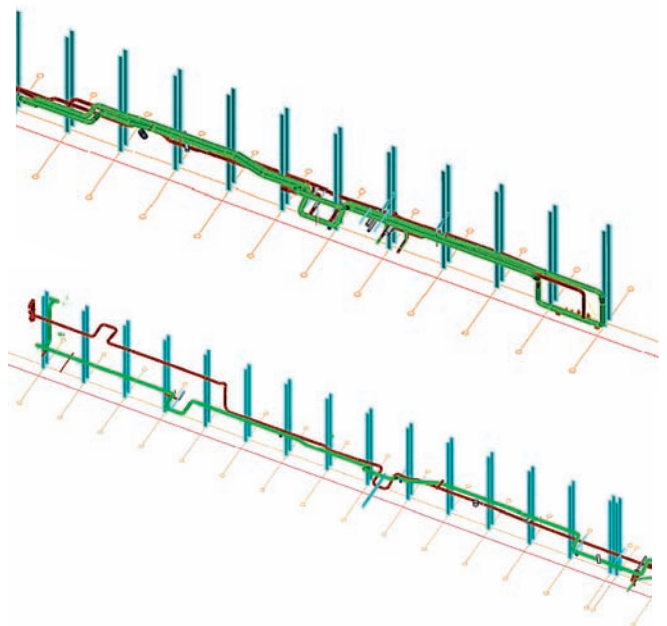
## Nieprawidłowy wybór trasy rurociągów

Ciągłe problemy techniczne z rurociągiem technologicznym skłoniły Użytkownika do gruntownego zajęcia się tą sytuacją. Ponieważ elektrownia nie dysponowała dokumentacją techniczną rurociągu należało ją odtworzyć. Bardzo rozbudowana infrastruktura techniczna w rejonie całej trasy rurociągu wymusiła zastosowanie techniki laserowego skanowania w celu inwentaryzacji istniejącego rurociągu technologicznego. Odtworzoną w ten sposób trasę rurociągu (rys. 12) wykorzystano do zbudowania modelu obliczeniowego. Obliczenia wykazały, że praktycznie na całej trasie rurociągu występują niedopuszczalne spiętrzenia naprężeń.



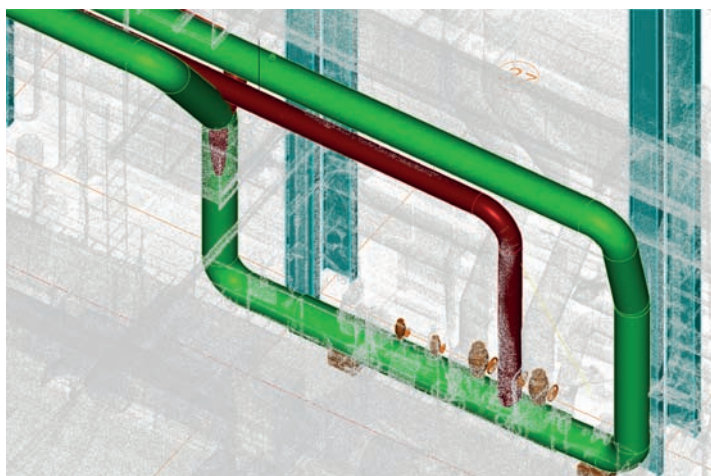
Rys. 12. Odtworzona trasa rurociągu technologicznego uzyskana w wyniku analizy laserowego skanowania otaczającej rurociąg infrastruktury technicznej

Z uwagi na wspomniane wcześniej problemy techniczne oraz biorąc pod uwagę wiek rurociągu Użytkownik podjął decyzję o zaprojektowaniu nowego rurociągu technologicznego. Wcześniejszy skan laserowy wykorzystano jako inwentaryzację wolnej przestrzeni do dyspozycji i metodą kolejnych prób (ale bez konieczności sprawdzenia na obiekcie) wybrano nową, bezkolizyjną trasę rurociągu.



Rys. 13. Propozycja trasy nowego rurociągu technologicznego (kolor zielony) na tle istniejącego rurociągu (kolor czerwony)





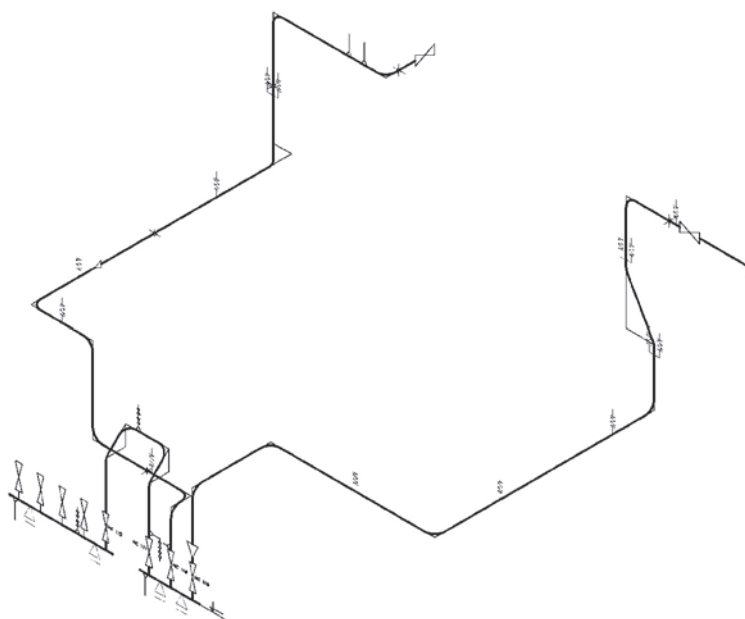
Rys. 14. Nowe rozwiązanie kolektora zbiorczego rurociągu technologicznego

Zadanie było dodatkowo utrudnione przez konieczność zachowania dotychczas pracującego rurociągu, bo maksymalny dopuszczalny czas odstawienia rurociągu technologicznego to zaledwie 5 dni, czyli nowy rurociąg musi być budowany obok jeszcze pracującego, starszego rurociągu. Wyniki prac pokazano na rysunkach 13 i 14 [7].

Projekt nowego rurociągu spełnia nie tylko oczekiwany warunek minimalizacji naprężeń ( $\delta_{zr} < \delta_d$ ), ale również rozwiązuje problem sztywnego kolektora zbiorczego i głównych odejść (rys. 14).

Kolejny przykład, to tylko pośrednio źle dobrana trasa, a głównie źle zdefiniowane granice projektowania. W tym przypadku zabrakło „spojrzenia na całość”. Modernizacja dwóch kotłów zwiększyła ich wydajności, co skutkowało

zwiększeniem średnicy rurociągu z  $\phi$  219 mm na  $\phi$  273 mm i do tego momentu wszystko było dobrze. Nowe rurociągi wprowadzono do tych samych, co poprzednio kolektorów zbiorczych nie zmieniając średnicy króćców kolektorów, a jedynie łącząc rurociągi z króćcami kolektorów poprzez zwężki [8]. Mechanicznie było dobrze, ale przepływy „powieździaty sprawdzam”. Drgania węzła „kolektor III-by-pas” były (rys. 15) tak duże (205 Hz), że przestały dobrze działać wskazówkowe manometry. Ilość pary wpływającej do kolektora była istotnie wyższa od możliwości odbioru. Bilans przepływu wykazał, że nie tylko należy zastosować odpowiednie króćce, ale należy zmienić (zwiększyć) średnicę rurociągu łączącego kolektory oraz zwiększyć średnicę samego kolektora, a ściślej dwóch kolektorów (rys. 16) [9].



Rys. 15. Liniowy układ kolektorów zbiorczych przed drugą modernizacją

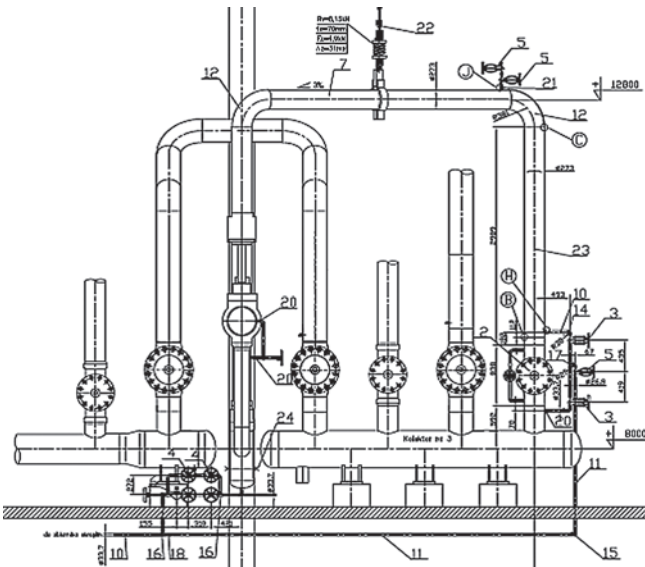
## Nieprawidłowości związane ze złym wyborem trasy i systemu zamocowań

Bywają, aczkolwiek rzadko, także takie przypadki, że nie tylko system zamocowań, ale i trasa rurociągu została źle dobrana.

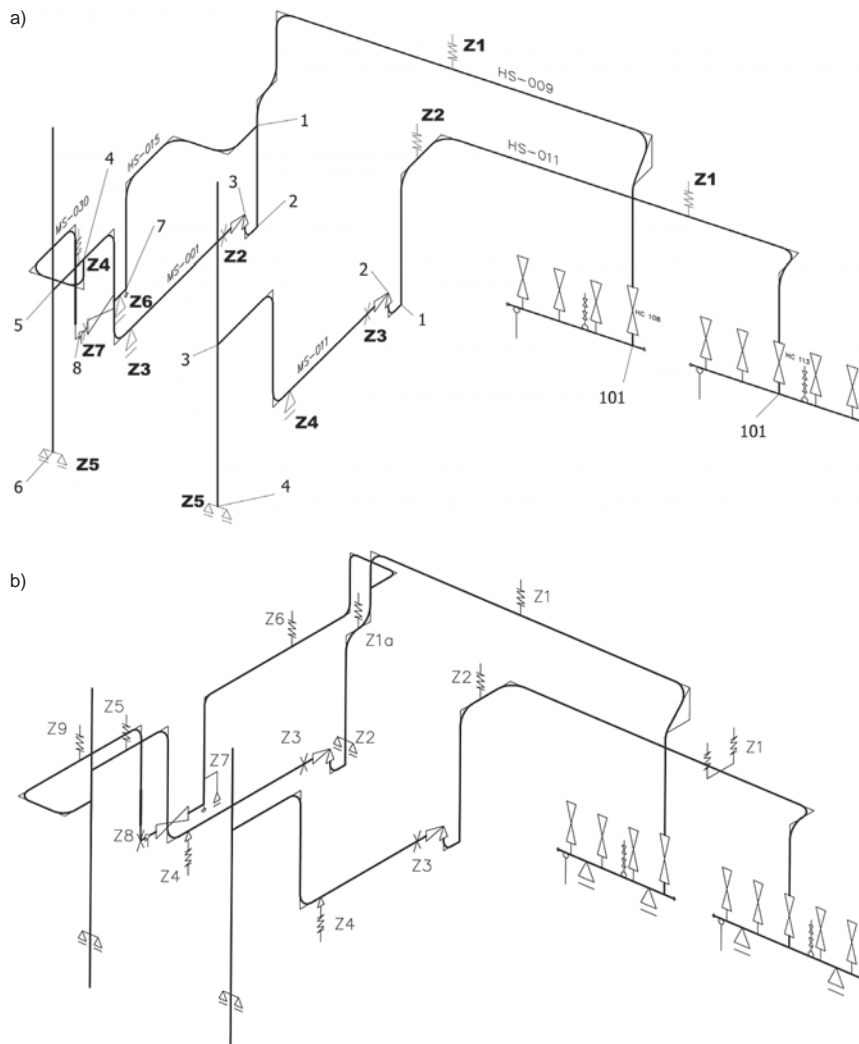
Na rurociągu pary świeżej do stacji redukcyjno-schładzającej stwierdzono przekroczenie naprężeń dopuszczalnych. Ponieważ system zamocowań był w nienajlepszym stanie w nim upatrywano powód przekroczenia naprężeń. Wielokrotne projektowe próby zmian systemu zamocowań nie dawały oczekiwanych rezultatów.

Aby zaistniała możliwość obniżenia wartości naprężeń zredukowanych poniżej poziomu naprężeń dopuszczalnych konieczna była zmiana trasy rurociągu oraz całego systemu zamocowań (rys. 17).

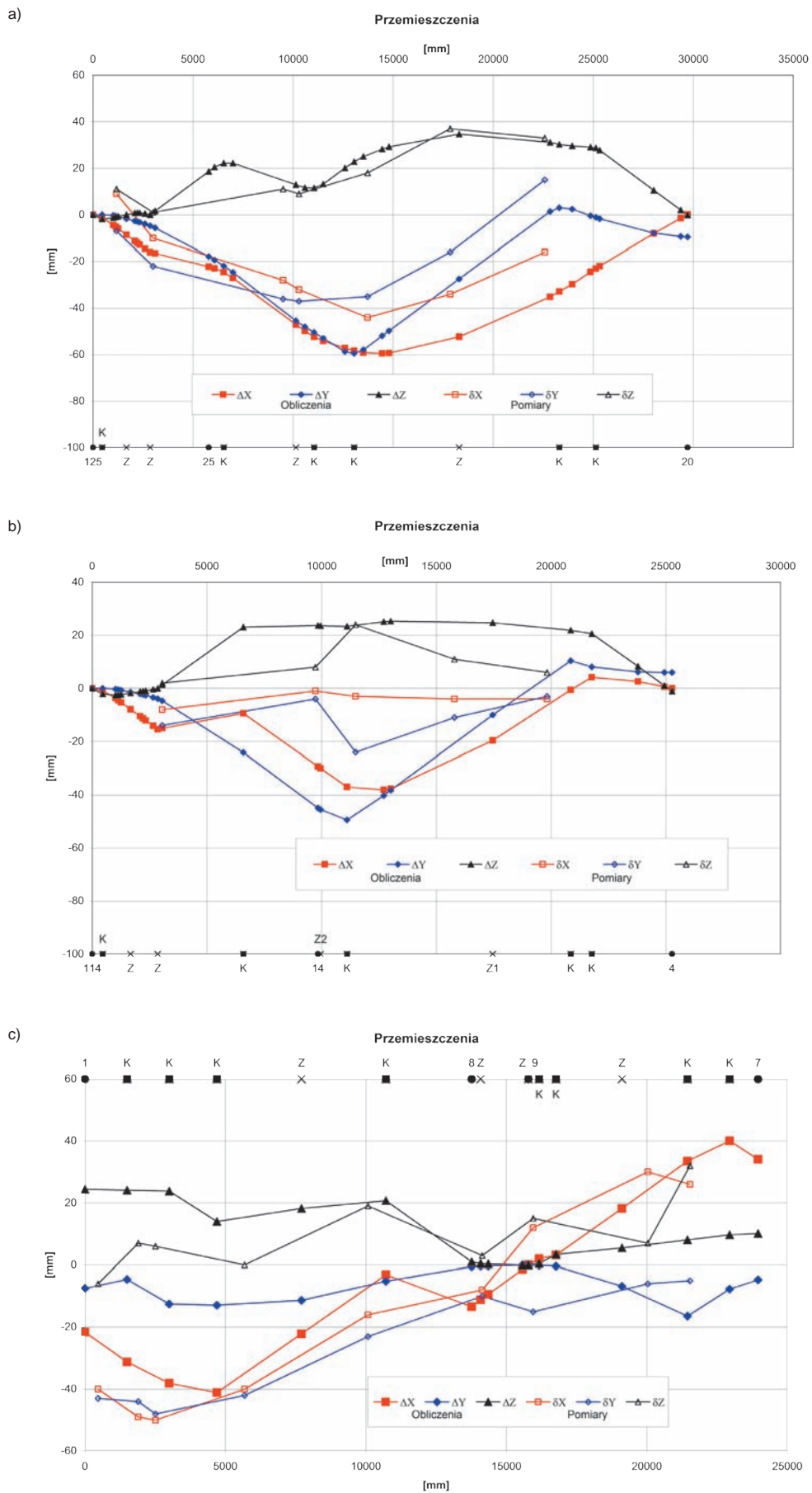
Na rysunku 18 pokazano zgodność przemieszczeń cieplnych rzeczywistych (pomiary geodezyjne) i teoretycznych uzyskanych na drodze obliczeniowej (AUTOPipe).



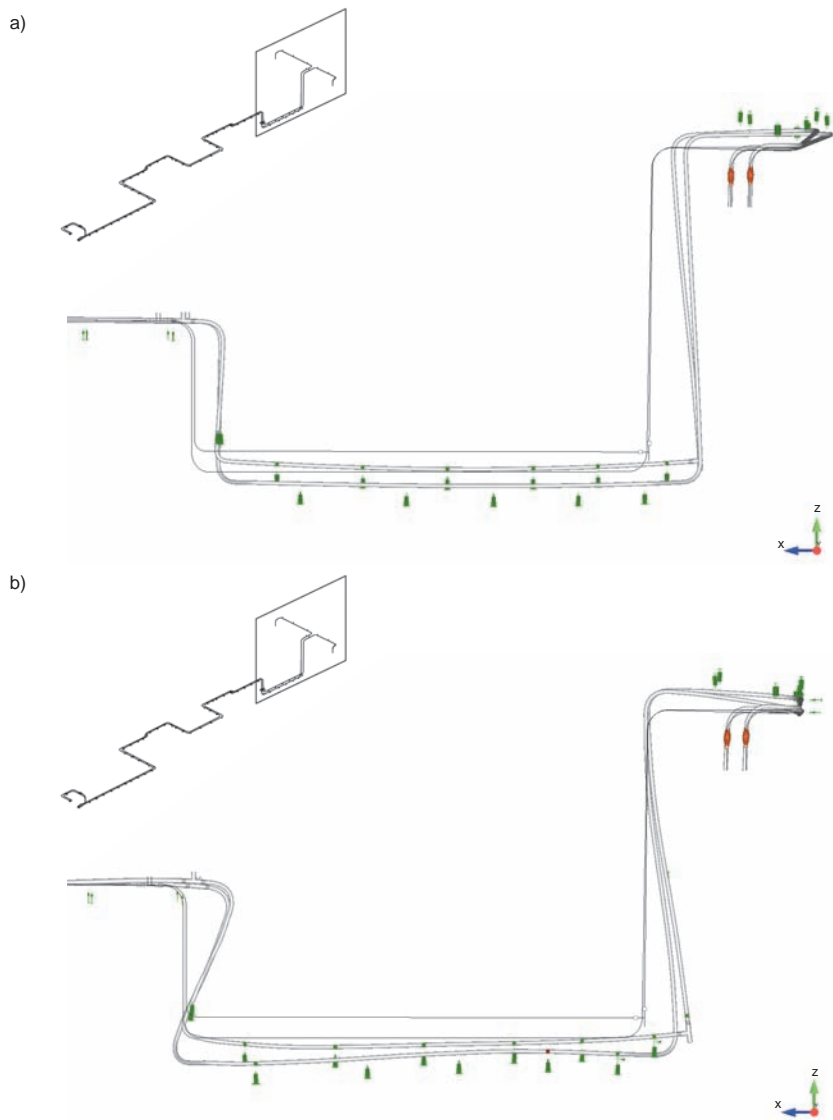
Rys. 16. Układ kolektorów pary świeżej po modernizacji



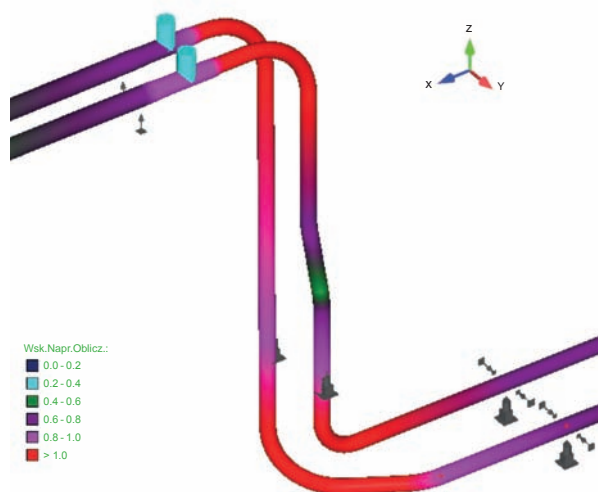
Rys. 17. Zmiana trasy i systemu zamocowań rurociągów do stacji redukcyjno-schładzających: a) przed modernizacją, b) po modernizacji



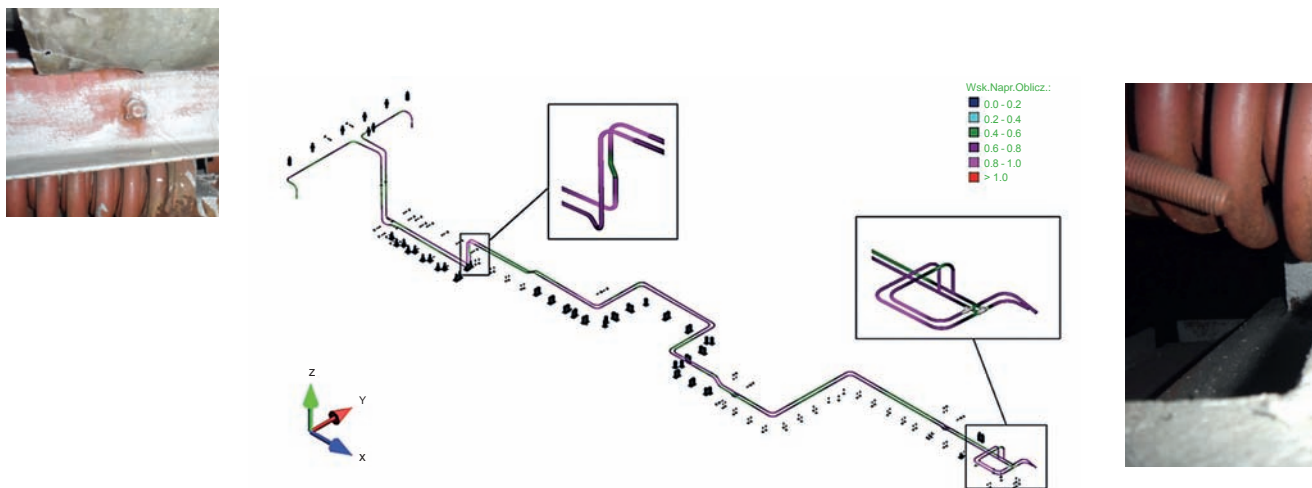
Rys. 18. Przemieszczenia cieplne rurociągów do stacji redukcyjno-schładzających: a) stacja E28A, b) stacja E28B, c) stacja E35



Rys. 19. Położenie rurociągu na skutek przemieszczeń cieplnych: a) teoretyczne, b) rzeczywiste



Rys. 20. Przekroczenie naprężeń dopuszczalnych na kolanach rurociągu

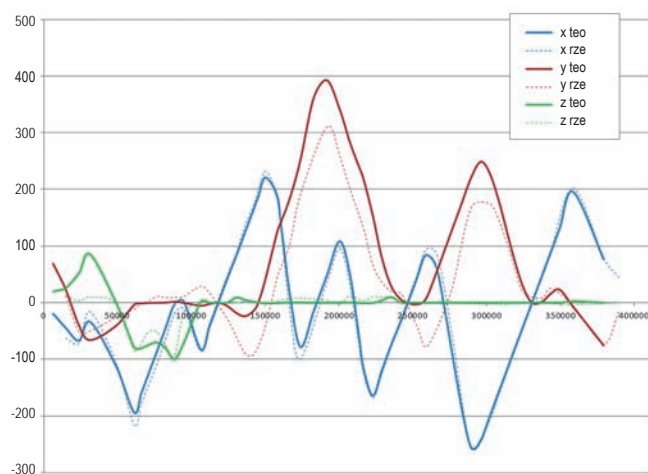


Rys. 21. Zablokowane stałosiłowe podpory sprężynowe rurociągu

Kolejnym przykładem dodatkowego spiętrzenia naprężeń, którego powodem była nieoptymalnie wybrana trasa i zły dobór zamocowań, jest komunikacyjny rurociąg pokazany na rysunku 19 [13].

Taki układ generował w czasie pracy istotne przekroczenie naprężeń dopuszczalnych (rys. 20) przy równoczesnym blokowaniu podpór stałosiłowych – sprężynowych (rys. 21).

Zmiana trasy (niewielkie skrócenie odcinka poziomego i zastąpienia trójkąta kolanem) oraz zmiana systemu podpór pozwoliła na obniżenie poziomu naprężeń poniżej poziomu naprężeń dopuszczalnych oraz na dobrą zgodność przemieszczeń rzeczywistych z przemieszczeniem teoretycznym (rys. 22) [14].



Rys. 22. Przemieszczenia rzeczywiste i faktyczne rurociągu

## Podsumowanie

Dobrze zaprojektowane rurociągi, a takich jest zdecydowana większość, nie są narażone na spiętrzenia naprężeń skutkujące przekroczeniem naprężeń dopuszczalnych.

W artykule omówiono te nieliczne przypadki, w których przekroczenie poziomu naprężeń dopuszczalnych wynikało z błędów w procesie projektowania.

Pokazano także, w jaki sposób problemy rozwiązano lub można rozwiązać na podstawie wnikliwej analizy rozpatrywanych przypadków.

Skuteczność modernizacji rurociągów, mającą na celu obniżenie poziomu naprężeń zredukowanych, sprawdzano wykorzystując geodezyjne pomiary przemieszczeń ciepłych rurociągów i porównując uzyskane dane z oczekiwanymi na drodze obliczeń konstrukcyjnych, opierając się na których realizowano modernizację.

Powyższy sposób, mierzalny i obiektywny można uważać za walidację skuteczności modernizacji.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 006.0531/1995, niepubl.
- [2] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 002.0545/1996, niepubl.
- [3] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 053.0598/1996, niepubl.
- [4] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 024.0343/1994, niepubl.
- [5] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 028.3208/2015, niepubl.
- [6] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 069.2949/2013, niepubl.
- [7] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 131.3311/2015, niepubl.
- [8] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 011.1684/2005, niepubl.
- [9] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 047.2333/2009, niepubl.
- [10] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 137.1668/2005, niepubl.
- [11] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 006.1679/2005, niepubl.
- [12] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 005.1812/2006, niepubl.
- [13] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 041.3088/2014A, niepubl.
- [14] Sprawozdanie „Pro Novum” Sp. z o.o. nr 087.3267/2015, niepubl.