

## 5. Podsumowanie

Możliwe jest pozyskanie terenu na potrzeby lokalizacji nowych bloków energetycznych po przeprowadzeniu procesu likwidacji istniejącego składowiska odpadów paleniskowych. Likwidacja powinna być prowadzona etapowo z uwagi na wymóg zachowania ciągłości produkcji energii przez istniejące bloki i wynikającą stąd potrzebę składowania odpadów poprodukcyjnych. W przygotowanej koncepcji założono lokalizację nowych bloków w części komory 2 składowiska. Założono tym samym etapowość prac polegających na przystosowaniu części tej komory pod wymogi nowych obiektów, jednakże z pozostawieniem drugiej części na tyle dużej, aby możliwe było naprzemienne eksploataowanie pozostałych komór. Zaproponowano przyjęcie

do realizacji wariantu II, jako „kompromisu”, tj. pozwalającego odzyskać tereny niezbędne do realizacji inwestycji, a jednocześnie znacznie ograniczającego oddziaływanie na środowisko. Wariant ten wydaje się być optymalny łącząc oczekiwania właściciela obiektu oraz minimalizując oddziaływanie na środowisko.

Należy też podkreślić, że zarówno wariant z przystosowaniem części terenu (zalecany), jak i wariant z rozbiórką całego obiektu nie jest sprzeczny z definicją rekultywacji. Rekultywacja w odniesieniu do składowisk odpadów czy to komunalnych, czy to przemysłowych związana jest albo z decyzją o pozostawieniu obiektu w całości, pewnej jego części lub jego całkowitej rozbiórce. Można również pozostawić obiekt do jego naturalnej sukcesji, można proces ten odpowiednio przyspieszyć.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Maciak F., Ochrona i rekultywacja środowiska. Wydawnictwo SGGW. Warszawa 1996
- [2] Zadroga B., Olańczuk-Neyman K., Ochrona i rekultywacja podłoża gruntowego. Aspekty geotechniczno-budowlane. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2001
- [3] Fanti K., Stawy osadowe i składowiska. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1980
- [4] Spoz J., Mokre składowiska odpadów. Eksploatacja zbiorników odpadów paleniskowych w energetyce zawodowej. Gospodarka Wodna Nr 11/1984, s. 331 – 333
- [5] Koncepcja etapowej rekultywacji składowiska odpadów paleniskowych EC Czechnica w Siechnicach. Politechnika Wroclawska, Instytut Geotechniki i Hydrotechniki. Raport SPR nr 10/2009. Wrocław, grudzień 2009

# Zagadnienia trwałości stalowych konstrukcji w zmodernizowanych obiektach energetycznych

Dr hab. inż. Eugeniusz Hołała, prof. dr hab. inż. Kazimierz Rykaluk,  
Politechnika Wroclawska

## 1. Wprowadzenie

Wiele z obecnie eksploatowanych obiektów energetycznych o konstrukcji stalowej wzniesionych zostało w Polsce przed 30–40 laty. Obecnie przeprowadza się ich modernizacje w związku ze zmianami technologicznymi bloków energetycznych. Modernizacje konstrukcji nośnych obiektów

energetycznych poprzedzane są rutynową oceną ich przydatności do nowych warunków eksploatacji. Podstawowy zakres takich ekspertyz technicznych stalowych konstrukcji obiektów budownictwa energetycznego sprowadzany jest często jedynie do oceny stopnia korozyjnego zużycia i ogólnych oględzin elementów oraz sprawdzenia nośności według aktual-

nych norm obciążeń i wymiarowania konstrukcji budowlanych. Dobry stan techniczny stalowych elementów konstrukcyjnych w obiektach przemysłowych, oceniony jedynie na podstawie oględzin i pomiarów odkształceń, nie może być jednak wystarczającą przesłanką do podjęcia decyzji o ich wykorzystaniu jako pełnowartościowych elementów nośnych

w nowych warunkach eksploatacyjnych po modernizacji, nawet po ich wzmocnieniu. W takich przypadkach, kiedy ocena stanu konstrukcji ma bardzo pobieżny charakter, może dochodzić do jej uszkodzeń lub awarii [2] niedługo po przeprowadzonej modernizacji lub wzmocnieniu.

W stalowych konstrukcjach nośnych obiektów energetycznych, eksploatowanych w ruchu ciągłym w bardzo trudnych warunkach korozyjnych i obciążanych cyklicznie przez kilkadziesiąt lat, analiza przydatności tych konstrukcji do modernizacji musi uwzględniać skutki dotychczasowej eksploatacji na zmiany struktury wewnętrznej stali i spadek lub nawet całkowite wyczerpanie jej wytrzymałości zmęczeniowej [1], [4], [5], [7]. Nie bez znaczenia są też trudne do wykrycia pierwotne wady konstrukcji i stopień zaawansowania korozji w miejscach trudno dostępnych, w tym w połączeniach śrubowych. Przebyte stany przeciążeń awaryjnych mogły doprowadzić do niewidocznych lokalnych uplastycznień stali, a lokalne przegrzania wskutek awarii technologicznych lub pożarów mogły niekorzystnie zmienić jej wewnętrzną strukturę. Jeśli nie rozpozna się właściwie wszystkich wymienionych wyżej niekorzystnych czynników, które mogą wyraźnie zmniejszać przydatność stalowych konstrukcji do wykorzystania ich w projekcie modernizacji obiektów energetycznych, to wszystkie dalsze działania projektowe i wykonawcze będą nieskuteczne. W niniejszym artykule omówiono istotne problemy, które powinny być brane pod uwagę w przygotowaniu dokumentacji projektowej modernizacji budowlanych obiektów energetycznych i realizacji prac modernizacyjnych.

## 2. Przykłady uszkodzeń starych połączeń po modernizacji

W stalowych konstrukcjach modernizowanych budynków podstawowym problemem jest właściwa



Fot. 1. Korozyjne zużycie śrub



Fot. 2. Plastyczne deformacje śrub



Fot. 3. Śrubowe połączenie po jego przeciążeniu



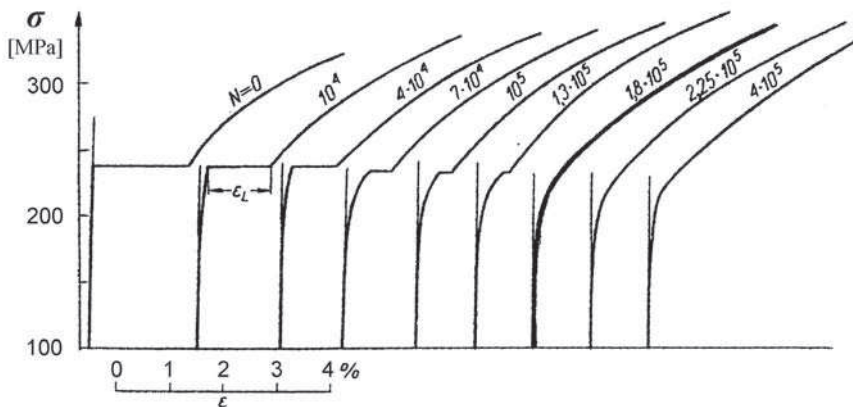
Fot. 4. Pęknięta spoina pachwinowa

ocena stanu technicznego i nośności istniejących połączeń śrubowych i spawanych. Pod względem wytrzymałościowym są to miejsca o największym wpływie karbów geometrycznych i strukturalnych. Do podstawowych wad połączeń śrubowych, mogących skutkować awaryjnym zagrożeniem zmodernizowanego obiektu, należą plastyczne podłużne i poprzeczne deformacje trzpieni śrub (fot. 1, 2, 3), powstałe w wyniku przeciążenia awaryjnego lub eksploatacyjnego. Niezwykle ważne znaczenie ma też niewidoczny z zewnątrz proces korozji śrub wewnątrz połączeń (fot. 1, 2), który powoduje spadek ich nośności oraz rozluźnienie elementów w połączeniu, co przyczynia się do degradacji ich nośności zmęczeniowej. Korozja trzpieni śrub wewnątrz połączenia ma na ogół charakter korozji szczelinowej, wynikającej z różnic w stopniu napowietrzania ich zewnętrznych i wewnętrznych części. Jest ona trudna do wykrycia podczas oględzin zewnętrznych, gdyż na ogół ich łby i nakrętki są dobrze zabezpieczone antykorozyjnie i nie wykazują objawów

korozji. Niezbędne jest więc kontrolne wyjęcie reprezentatywnej, losowej liczby śrub w celu dokładnego sprawdzenia ich stanu technicznego.

W połączeniach spawanych jakość połączeń spawanych powinna być sprawdzana zgodnie z aktualnymi przepisami odbiorowymi, co może skutkować potrzebą naprawy lub wzmocnienia niektórych połączeń w modernizowanej konstrukcji. Szczególną uwagę należy zwrócić na objawy przeciążeń połączeń, które na ogół objawiają się mikro-pęknięciami lub pęknięciami (fot. 4), dyskwalifikującymi takie połączenie.

Wszystkie wady połączeń, przedstawione na fotografiach 1–4, zostały stwierdzone po wystąpieniu awarii zmodernizowanego obiektu energetycznego. Z analizy nośności wynika, że te wady miały pewien wpływ na jej wystąpienie. Można więc postulować, aby w każdym przypadku modernizacji obiektu nie dopuszczać do pozostawiania starych śrub w połączeniach, lecz wymieniać je na nowe, zaś pęknięte spoiny odpowiednio naprawiać.



Rys. 1. Wpływ liczby cykli obciążeń N na zmianę wykresu rozciągania

### 3. Nośność zmęczeniowa starej konstrukcji stalowej

W konstrukcjach obiektów energetycznych obciążenia cykliczne są powszechne. Obciążenia te pochodzą od kół przejezdnych przenośników rewersyjnych do transportu węgla, od turbin i wentylatorów, od młynów obrotowych i kruszarek, od kół przejeżdżających suwnic, od stacji napędowych przenośników usytuowanych na stropach zasobników węgla oraz innych maszyn i urządzeń technologicznych.

Każdy cykl obciążenia wywołuje w strukturze stali nieodwracalne uszkodzenie wiązań międzycząsteczkowych, skutkujące zmniejszeniem wytrzymałości na rozciąganie i ścinanie, a także zmniejszeniem plastyczności. Dla zilustrowania tego zjawiska pokazano na rysunku 1a wykresy statycznego rozciągania próbek poddanych uprzednio różnej liczbie cykli rozciągania pulsującego [4]. Widać wyraźny zanik plastycznych właściwości stali już po osiągnięciu  $N = 1,8 \times 10^5$  cykli zmian naprężeń.

Wytrzymałość zmęczeniowa stali nie odnosi się do wartości naprężenia maksymalnego, wywołanego obciążeniem stałym i zmiennym, lecz tylko do zakresu zmienności naprężeń:

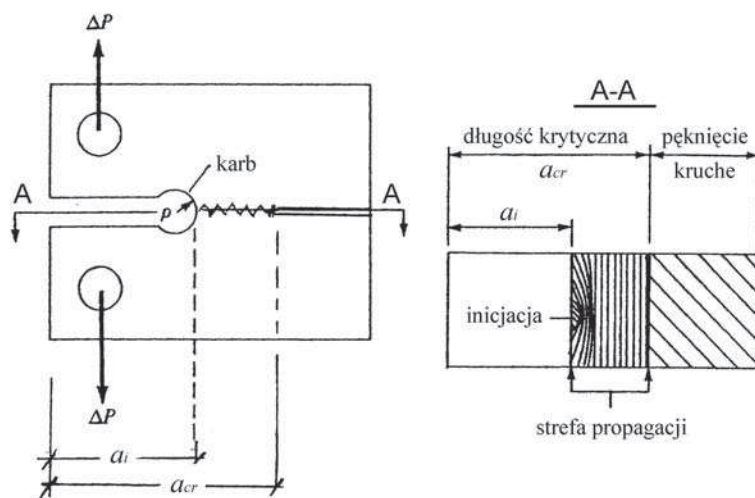
$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1)$$

Sumaryczna liczba cykli (żywność zmęczeniowa) wynosi zatem [6]:

$$N = N_i + N_p \quad (2)$$

i jest określona jako punkt na aproksymującej linii Wöhlera dla danego zakresu zmienności naprężeń  $\Delta\sigma = \Delta\sigma_B$ .

Względny okres inkubacji  $N/N$  zależy od zakresu zmienności  $\Delta\sigma$  (im większy zakres  $\Delta\sigma$ , tym krótsza żywność  $N$ ) oraz od ostrości karbów w konstrukcji. Najwcześniej inicjują się pęknięcia w elementach wielkogabarytowych spawa-



Rys. 1. Schematyczna ilustracja etapów pęknięcia zmęczeniowego.

Pęknięcie zmęczeniowe nigdy nie rozpoczyna się w pierwszych cyklach obciążenia, lecz po zadziałaniu  $N_i$  cykli, które możemy nazwać cyklami inkubacyjnymi. Wtedy rozpoczyna się okres propagacji (wzrostu) pęknięcia, aż do osiągnięcia wymiaru krytycznego  $a^{cr}$ , charakterystycznego dla kruchego pęknięcia (rys. 2). Liczba cykli propagacji wynosi  $N_p$ .

nych, a najpóźniej w elementach małowabarytowych niespawalnych (np. w zginanych belkach walcowanych). Orientacyjne wartości  $N_i/N$  podano wg [8] w tabeli 1. Z zestawienia w tabeli 1 widać, że druga grupa elementów ma bardzo krótki okres propagacji pęknięcia, co w przypadku modernizacji „starej” konstrukcji musi

Tabela 1. Względne okresy inicjowania pęknięć  $N_i/N$  wg [8]

Żywność elementu N	Elementy spawane wielkogabarytowe	Elementy niespawane małowabarytowe
$10^4$	0,20	0,67
$10^5$	0,23	0,58
$10^6$	0,32	0,80
$2 \times 10^6$	0,38	0,85
$5 \times 10^6$	0,41	0,91

być brane pod uwagę, a więc czy dany element można pozostawić w konstrukcji, czy też go wymienić. Każdorazowo należy kierować się stopniem zużycia zmęczeniowego, korzystając z hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren-Minera [1], [10], [12]:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (3)$$

w której:  $n_i$  – liczba cykli obciążenia o zakresie zmienności naprężeń  $\Delta\sigma_i$ , dla którego żywotność na krzywej Wöhlera [12] wynosi  $N_i$ . Na podstawie tej hipotezy jesteśmy w stanie określić żywotność wykorzystaną oraz pozostałą, możliwą do dalszego wykorzystania, i porównać ją z żywotnością przewidywaną po modernizacji. Jeżeli modernizacja wiąże się ze zwiększeniem nośności elementów konstrukcyjnych przez zwiększenie

ich przekrojów za pomocą przyspawania elementów dodatkowych, wówczas powstaje nowy karb, obniżający pierwotną kategorię zmęczeniową (inaczej: wytrzymałość normatywną)  $\Delta\sigma_c$  przy  $N = 2 \times 10^6$  cykli, a tym samym zmniejszającym pozostałą żywotność elementów. Przy danym zakresie zmienności naprężeń  $\Delta\sigma$  żywotność jest tym krótsza, im niższa jest kategoria zmęczeniowa. Znajomość zagadnień związanych z wytrzymałością zmęczeniową stalowych elementów konstrukcji i obiektów przemysłowych, jest niestety ciągle mało powszechna w środowisku inżynierów budownictwa (nie tylko w Polsce). Dowodem tego są różne przypadki uszkodzeń i awarii konstrukcji, w których przed kilkoma laty wykonano gruntowne modernizacje. Nieuwzględnienie dotychczasowej liczby cykli obciążenia, jakie oddziaływały na elementy konstrukcyjne,

doprowadziło m.in. do poważnych uszkodzeń belek jezdnych przenośników rewersyjnych w zasobniku węgla (rys. 3, 4).

#### 4. Przykłady badań konstrukcji przed i po modernizacji

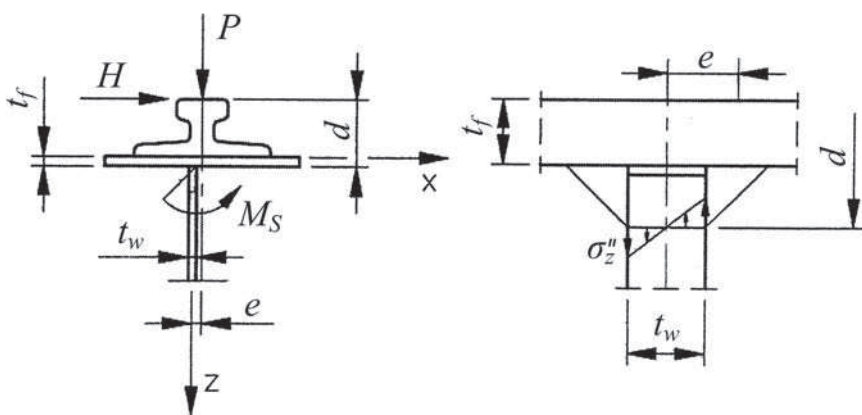
Zmodernizowane bloki energetyczne pozwalają na uzyskanie lepszego „komfortu” cieplnego wewnątrz budynku kotłowni niż miało to miejsce przed modernizacją. W konsekwencji występuje często większe niż przed modernizacją zróżnicowanie temperatur poszczególnych fragmentów wielokondygnacyjnej i wielonawowej konstrukcji budynku kotłowni, co obniża nośność eksploatacyjną.

Jako przykład niekorzystnych wpływów termicznych przedstawiono uszkodzenie fragmentu konstrukcji zmodernizowanego budynku kotłowni, w której zwiększyła się wyraźnie różnica temperatur w stosunku do innych części budynku. Podczas modernizacji zwiększono przekroje podłużnych belek stropowych o około 50%, przez co siły podłużne od oddziaływań termicznych zwiększyły się również o 50%. Przed modernizacją nie było zbyt dużych różnic temperatur w tej części konstrukcji budynku i nie występowały awarie, takie jaka się zdarzyła bezpośrednio po zakończonej modernizacji (rys. 5, fot. 3÷5).

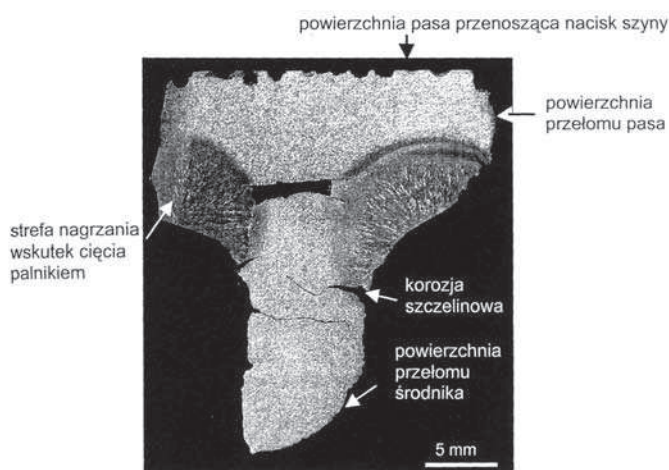
Przedstawiony przykład awarii fragmentu konstrukcji budynku kotłowni po przeprowadzonej modernizacji wskazuje wyraźnie na potrzebę starannej analizy wpływu oddziaływań temperatur pochodzenia klimatycznego i technologicznego [9], [11] na bezpieczeństwo konstrukcji po modernizacji.

Do analiz nośności zmodernizowanej konstrukcji wykorzystano wyniki 2-letnich badań tensometrycznych in situ.

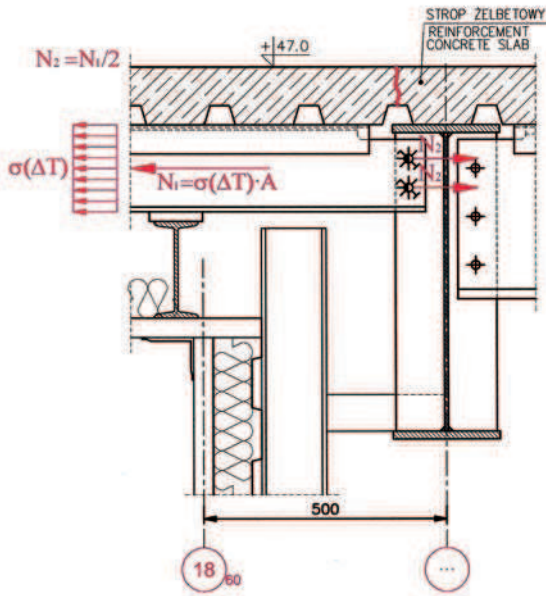
Prawidłowa ocena przydatności stalowych konstrukcji do dalszej długotrwałej eksploatacji po planowanej modernizacji powinna być



Rys. 3. Fragment przekroju poprzecznego belki jezdnej przenośnika węgla



Rys. 4. Pęknięcia zmęczeniowe w rejonie spoin pachwinowych pasa górnego i środka belki

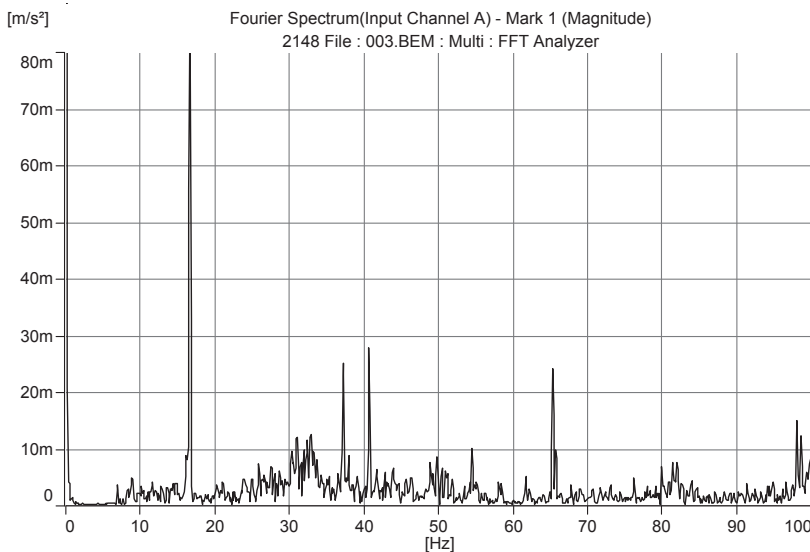


**Rys. 5a.** Oddziaływania termiczne na belkę stropową i jej połączenia śrubowe

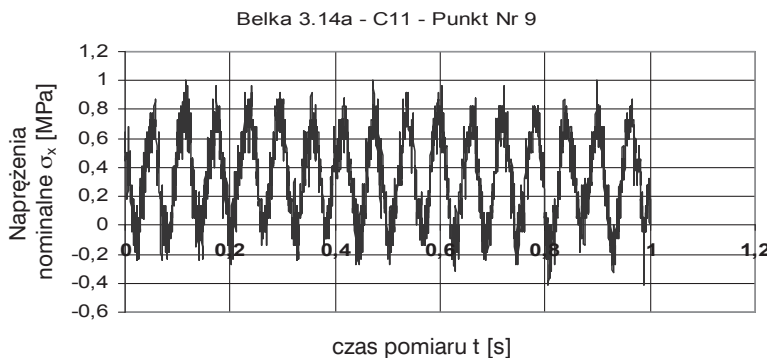


**Rys. 5b.** Widok uszkodzonego połączenia belki po ścięciu 2 śrub M16

oparta na wiarygodnych wynikach badań i pomiarów. Konstrukcje poddane działaniu cyklicznych obciążeń od wielu różnych maszyn i urządzeń powinny być poddane pomiarom drgań, aby można było obiektywnie ocenić wartości przyspieszeń, amplitud i częstości drgań poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Takie pomiary wykonano w stropie obciążonym cyklicznie 3 stacjami napędowymi przenośników. W belkach stropowych mierzono drgania za pomocą akcelerometrów i analizatorów drgań (rys. 6), a także zmienność naprężeń  $\Delta\sigma$  za pomocą tenzometrów elektrooporowych (rys. 7). Pomiary pozwoliły określić obiektywnie podatność konstrukcji na wpływy zmęczeniowe, gdyż subiektywne odczucia drgań stropu mogą prowadzić do błędnych wniosków. W badanym przypadku stwierdzono, że zakres zmian naprężeń  $\Delta\sigma$  w badanych belkach nie przekraczał 2 MPa (rys. 7), a więc wpływy zmęczeniowe w tej konstrukcji mogły być pominięte, co uwzględniono w projekcie modernizacji stropu.



**Rys. 6.** Wyniki pomiarów drgań jednej z belek stropu pod stacją napędową przenośnika



**Rys. 7.** Przebieg zmienności naprężeń w ciągu 1 s w belce pod stacją napędową przenośnika

## 5. Podsumowanie

Każda zmiana konstrukcyjna w istniejących obiektach przemysłowych, dokonana podczas modernizacji lub remontu, powinna być wszechstronnie analizowana. Oprócz standardowej oceny stanu technicznego i nośności statycznej elementów konstrukcyjnych, należy przeprowadzać wieloparametrowe analizy wytrzymałości zmęczeniowej oraz uwzględniać starannie skutki przebytych już wpływów eksploatacyjnych, w tym skutki intensywnej korozji modernizowanych elementów. Szczególnie ważnym zagadnieniem jest ocena wpływu temperatur pochodzenia klimatycznego i technologicznego na bezpieczną eksploatację zmodernizowanych obiektów, w których podczas modernizacji warunki cieplne uległy zmianie. Szczególnie ważnym zagadnieniem jest staran-

na ocena jakości istniejących połączeń elementów konstrukcyjnych, gdyż w wielu przypadkach stare łączniki śrubowe powinny być wymienione z uwagi na ich zużycie korozyjne i objawy plastycznych przeciążeń, co mocno obniża wytrzymałość zmęczeniową.

Wykonanie specjalistycznych pomiarów drgań i zmienności naprężeń w eksploatowanych konstrukcjach pozwala na obiektywną ocenę wytrzymałości zmęczeniowej modernizowanej konstrukcji i racjonalizację zakresu prac modernizacyjnych.

Szczegółowa analiza zagadnień związanych z problematyką wykorzystania starych elementów stalowych konstrukcji obiektów budownictwa energetycznego w projektach modernizacji tych obiektów, zawarta jest w [3].

**BIBLIOGRAFIA**

[1] Czudek H., Pietraszek T., Trwałość stalowych konstrukcji mostowych przy obciążeniach zmiennych, WKiŁ, Warszawa 1980  
 [2] Hołała E., Hołała P., Zagrożenia awaryjne stalowej konstrukcji galerii wskutek oddziaływań termicznych, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 86 „Budownictwo w energetyce”, Wrocław 2006  
 [3] Hołała E., Rykaluk K., Zagrożenia awaryjne stalowych konstrukcji obiektów energetycznych po modernizacji. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 90 „Budownictwo w Energetyce”, Wrocław 2008  
 [4] Katarzyński S., Kocańda S., Zakrzewski M., Badanie własności mechanicznych metali, WNT, Warszawa 1969  
 [5] Kawecki J., Wpływy dynamiczne na konstrukcje metalowe, Materiały XXIII Ogólnopolskiej Konferencji „Warsztat pracy projektanta konstrukcji”, Szczyrk 5–8 marca 2008, t. II, s. 1–64  
 [6] Rykaluk K., Pęknięcia w konstrukcjach stalowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2005

[7] Rykaluk K., Wpływy zmęczeniowe na istniejące konstrukcje stalowe, Materiały XXIII Ogólnopolskiej Konferencji „Warsztat pracy projektanta konstrukcji”, Szczyrk 5–8 marca 2008, t. III, s. 59–128  
 [8] Sedlacek G., Stranghöner N., Strzel., Dahl W., Langenberg P., Liessem A., Die Tragsicherheit, die Ermüdungssicherheit und das Spröbruchproblem, Stahlbau 65, H. 11, s. 407–414  
 [9] PN-EN 1991–1–5–2005 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–5: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania termiczne  
 [10] PN-EN 1993–1–9. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1–9: Zmęczenie, PKN, Warszawa 2007  
 [11] PN-86/B-02015 Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne środowiskowe. Obciążenie temperaturą  
 [12] PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie



## MC-Bauchemie

### Technologie dla Energetyki

Nowa jakość ochrony powierzchni przy stałym kontakcie z wodą

## MC-APC

### Mineralna elastyczna powłoka paroprzepuszczalna

**Zalety:**

- ✓ powłoka paroprzepuszczalna
- ✓ odporna na alkalia i stałe obciążenie wodą
- ✓ szczelna dla chlorków
- ✓ hamuje postęp karbonatyzacji
- ✓ odporna na ciśnienie dodatnie do 6 bar
- ✓ odporna na ciśnienie ujemne do 3 bar
- ✓ mostkuje rysy statyczne w temp. -20°C do 0,8 mm
- ✓ nie wymaga pielęgnacji, nie ulega starzeniu
- ✓ odporna na stałą temp. do +50°C

**Obszary zastosowań:**

- ✓ tace chłodni kominowych
- ✓ tace chłodni wentylatorowych
- ✓ akcelatory wody chłodzącej
- ✓ kanały
- ✓ wszelkie zarysowane zbiorniki na wodę

[www.mcbauchemie.pl](http://www.mcbauchemie.pl)

MC-Bauchemie Sp. z o.o.	Warszawa	22 500 1864
Protection Technologies	Sosnowiec	32 266 3753
Ul. Wyścigowa 39	Środa Wlkp.	61 286 4544
53-011 Wrocław	Sopot	58 555 1705
Tel./Fax: 71 339 7744		