

# OCENA ZMĘCZENIOWEGO ZASOBU EKSPLOATACYJNEGO KONSTRUKCJI NOŚNYCH W WARUNKACH DŁUGOTRWAŁEJ EKSPLOATACJI MASZYN. CZĘŚĆ 1- PROBLEMY W DŁUGOTRWAŁEJ REJESTRACJI OBCIĄŻEŃ EKSPLOATACYJNYCH

## BEARING STRUCTURES FATIGUE RESOURCE ASSESSMENT DURING LONG-LASTING EXPLOITATION OF MACHINES. PART 1 - LOADING DATA ACQUISITION PROBLEMS IN LONG - LASTING EXPLOITATION

Artur Jankowiak, Paweł Grabowski – Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich, Politechnika Warszawska  
Marek Kowalczyk – SKW, Biuro Projektowo-Techniczne, Zgorzelec

*W niniejszym opracowaniu zilustrowane zostało zagadnienie oceny zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego wybranych węzłów konstrukcyjnych konkretnego obiektu, wieloczerpakowej koparki kołowej KWK 910 w ramach długotrwałej eksploatacji. Przedstawiono problemy z dostępnością lub wiarygodnością danych, które mogą wystąpić w trakcie długotrwałej rejestracji przebiegów obciążeń eksploatacyjnych, a które są podstawą do wyznaczania uszkodzeń zmęczeniowych i dalej do prognozowania pozostającej trwałości węzłów. Zaproponowane metody postępowania w obliczeniach zmęczeniowych w okresach, w których wspomniane problemy z rejestracją występują przedstawiono w części drugiej artykułu.*

**Słowa kluczowe:** degradacja zmęczeniowa, zasób eksploatacyjny, konstrukcje nośne, maszyny robocze ciężkie

*The scope of the paper is to describe problems during calculating fatigue resource assessments of structural components of bucket-wheel excavator KWK-910, which may often appear during long-lasting exploitation. The considered problems refer to availability and thrustworthiness of loading data acquired during operating of the machine. Those data are basis for fatigue damage calculations as well as for fatigue resource assessments of the structural joints. In the second part of the paper there were also proposed some procedures in order to keep damage calculation in periods when loading data reveals as not useful because of above mentioned problems with load data availability.*

**Keywords:** fatigue degradation, fatigue resource, supporting structures, heavy machinery

### WPROWADZENIE

Szacowanie zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego elementów konstrukcji nośnych, czy to w ujęciu projektowego wymiarowania trwałościowego, czy dotyczące prognozowania trwałości resztkowej, cały czas nastrocza inżynierskie trudności. Wynikają one ze złożoności samego problemu zmęczenia (mnogości czynników wpływających na zmęczenie), jak i z niepewności, co do jakości wytwarzania (błędy wytwórcze) czy zgodności założonych warunków z występującymi w rzeczywistym środowisku eksploatacji. Kończy się to często zastosowaniem „bezpiecznych” rozwiązań w oparciu o normy i branżowe wytyczne wymiarowania trwałościowego, które kompensują pewne uproszczenia i niedoskonałości zawiązaniem współczynników bezpieczeństwa, co jednak, jak wskazują całkiem liczne przykłady nie daje gwarancji ochrony przed przypadkami uszkodzeń a nawet katastrof obiektów technicznych. Jest to też w sprzeczności z przymusem ekonomicznym, który w przypadku bardzo dużych maszyn z dominującym udziałem masowym (i kosztowym) konstrukcji nośnej przejawia się często poszukiwaniem oszczędności w niej samej (konstrukcji nośnej) poprzez zwiększanie jej wysilenia (ograniczanie wymiarów przekrojów poprzecznych i stosowanie stali o podwyższonej i wysokiej

wytrzymałości). W procesie szacowania trwałości resztkowej dla elementów konstrukcyjnych eksploatowanego już obiektu technicznego, który nie jest wyposażony w system akwizycji obciążeń nie ma praktycznie metod pozwalających na odpowiedź na pytanie, jak długo jeszcze może pracować bezpiecznie dany węzeł konstrukcyjny. Potencjalną odpowiedź na to pytanie determinują bowiem trzy główne grupy czynników wpływających na obliczenia trwałości [3]: stan wyężenia elementów (obiektów), obciążenia eksploatacyjne oddziałujące na obiekt, przyjęte teorie obliczeniowe (hipotezy) opisujące proces zmęczenia (uszkodzenia). W grupie obciążeń eksploatacyjnych jednym z najistotniejszych zadań jest określenie widm, które przyjmuje się do obliczeń zmęczeniowych. Jest to niezwykle trudne zadanie, szczególnie dla maszyn poddawanych obciążeniom o charakterze stochastycznym. W takich przypadkach najlepszym sposobem określenia widm obciążeń są badania na obiekcie rzeczywistym podczas pracy [3], przy czym im dłuższy czas pomiaru tym bardziej reprezentatywne są wyniki takich badań i tym samym bardziej wiarygodne oszacowania trwałości resztkowej. Trzeba mieć oczywiście świadomość zmieniających się warunków eksploatacji (zmiany obciążeń zewnętrznych), jak i zmieniającej się, wraz z rosnącym zużyciem maszyny (pojawiające się luzy pomiędzy współpracującymi

elementami, np. połączenia sworzniowe osprzętu roboczego), odpowiedzi dynamicznej konstrukcji nośnej. Zjawiska te mogą powodować zwiększenie liczności cykli obciążeń danych węzłów konstrukcyjnych i powodować przyspieszoną konsumpcję zasobu eksploatacyjnego.

W obiektach produkowanych jednostkowo, intensywnie eksploatowanych w długich okresach czasu, takich w których konstrukcje nośne są zagrożone pękaniem zmęczeniowym przybierającym w takich przypadkach znaczenie zagrożenia podstawowego, głęboki sens techniczny ma zatem eksploatacja według strategii stanu technicznego i ciągła rejestracja przebiegów obciążeń eksploatacyjnych w wybranych (krytycznych) węzłach konstrukcyjnych maszyny. Widmo (zespół) obciążeń (naprężeń) eksploatacyjnych pozyskiwane jest w poszczególnych węzłach, ich złączach spawanych, uznanych za Potencjalne Słabe Ogniwa Trwałościowe – PSOT (na podstawie wcześniejszej analizy wyężenia konstrukcji, analizy lokalnej formy konstrukcyjnej węzłów, doświadczeń pozyskanych z eksploatacji obiektów podobnych itp.), za pomocą systemu akwizycji.

W tak długich okresach czasu, w których odbywa się rejestracja przebiegów obciążeń eksploatacyjnych, należy się jednak liczyć z perturbacjami w pracy aparatury pomiarowej rozumianymi, jako awaria całego systemu lub wadliwe działanie poszczególnych jego składników. Może to skutkować czasowym brakiem danych, lub brakiem zaufania (niepewnością) do zarejestrowanych danych pomiarowych dotyczących wszystkich lub niektórych nadzorowanych węzłów konstrukcyjnych. Stwierdzenie nieprawidłowości w procesie ciągłej rejestracji jest zazwyczaj możliwe, co jakiś czas, dopiero po dokonaniu odczytu (zrzutu) wyników danego okresu pomiarowego - po analizie otrzymanych danych. Mając na uwadze, że okresy rejestracyjne (okresy pomiędzy zrzutami danych) mogą w takich maszynach liczyć nawet kilkaset godzin pracy

a)



c)

Lokalizacja	PSOT	Kategoria karbu (NC) wg ISO 20332	Wytrzymałość zmęczeniowa $R_{ZK} (\Delta\sigma_C)$ [MPa] dla poziomu jakości „C”
Wieża (połączenie z platformą)	1, 2, 3, 4	3.8	80
Wysięgnik koła (pas dolny)	5, 7	3.22	71
Wysięgnik koła (stężenia górne)	6, 8	3.1	112
Stężenia (wysięgnik przeciwwagi)	9, 10	3.26	90
Cięgna (przednie)	11, 12	3.5	80

lub więcej, można się spodziewać, że przynajmniej takie też mogą wystąpić luki w ciągłości posiadania wiarygodnych danych. Powoduje to konieczność określenia sposobu wypełniania powstałych luk w danych w procesie nadzorowania zasobu eksploatacyjnego maszyny. Wynika to z tego, że obliczanie uszkodzeń zmęczeniowych i szacowanie z ich wykorzystaniem pozostającej trwałości zmęczeniowej w oparciu o hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych (np. Palmgren – Minera) wymaga danych obciążeniowych. Tym samym następstwem okresowych problemów w rejestracji w poszczególnych węzłach są dwa problemy analityczne:

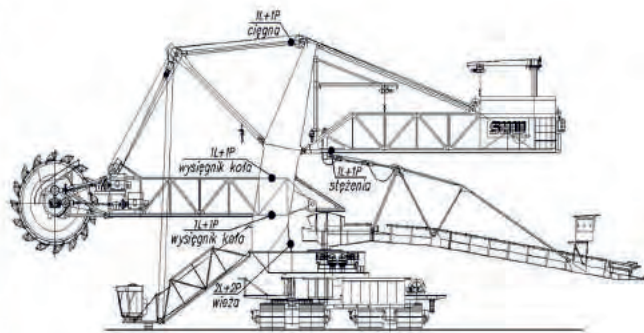
- diagnozowanie (ujawnianie) okresów rejestracji dla każdego z kanałów, w których zebrane dane są niewiarygodne (lub - co paradoksalnie ułatwia decyzję – zupełny brak danych),
- określanie sposobu zapelnienia powstałych luk w danych obciążeniowych. Przyjęcie dla takich okresów uszkodzenia zmęczeniowego równego zero w ocenie zasobu eksploatacyjnego maszyny może skutkować istotnym niedoszacowaniem degradacji węzła i zawyżeniem prognozy jego resztkowej trwałości zmęczeniowej.

W niniejszej pracy przedstawiono problematykę oceny poprawności zarejestrowanych danych obciążeniowych i możliwości ich wykorzystania w obliczeniach zmęczeniowych, jak też propozycje dotyczące obliczeń uszkodzenia zmęczeniowego węzłów w okresach, w których dane obciążeniowe zostały uznane za niewiarygodne.

**OBIEKT I SYSTEM AKWIZYCJI DANYCH**

Obiektem bazowym dla niniejszych rozważań jest Maszyna Podstawowa Górnictwa Odkrywkowego (MPGO) - wielonaczyniowa koparka KWK 910 użytkowana w kopalni

b)



Rys. 1. Obiekt bazowy: a) Koparka KWK910 w scenerii kopalni odkrywkowej, b) Lokalizacja nadzorowanych węzłów konstrukcyjnych na maszynie, c) Identyfikacja spawanych węzłów konstrukcyjnych  
 Fig. 1. Basic object: a) KWK910 excavator in scenery of open-cast mine, b) Reference points localization on load-bearing structure of excavator, c) Welded joints identification

odkrywkowej węgla brunatnego Turów. Maszyna ta pozostaje w eksploatacji od 10 lat i zarejestrowano przez ten czas około 24,650 [h] pracy. Na rysunku 1 przedstawiono lokalizację 12. węzłów konstrukcyjnych, na których prowadzona jest rejestracja obciążeń eksploatacyjnych oraz dokonywana ocena ich pozostającego zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego.

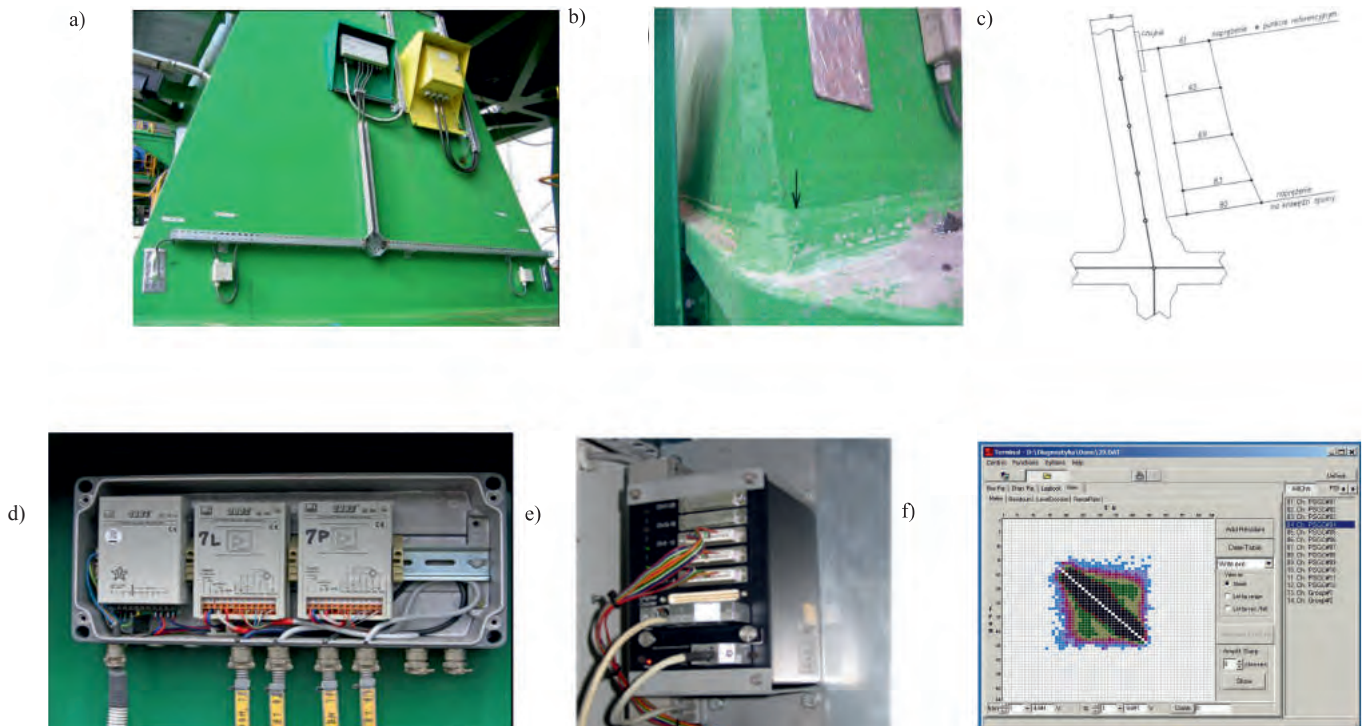
W projekcie maszyny określono formę złączy spawanych oraz poziom jakości ich wykonania (odpowiednik klasy „C” według [4]), co po powykonawczym potwierdzeniu jednoznacznie określa charakterystyki wytrzymałości zmęczeniowej (rys. 1c). Na potrzeby prowadzenia oceny wyczerpywania zasobu eksploatacyjnego węzłów opisywanej maszyny przyjęto je zgodnie z normami dotyczącymi wymiarowania wytrzymałościowego spawanych konstrukcji nośnych: EN 13001, ISO 20332. Identyfikacji typów węzłów konstrukcyjnych, ich własności materiałowych w tym charakterystyk zmęczeniowych poświęcona jest w dużej mierze praca [1]. System akwizycji danych obciążeniowych został z kolei opisany obszernie w artykule [2]. Tutaj zostaną jedynie przypomniane ważniejsze informacje na temat jego funkcjonowania.

Podstawowe elementy składowe systemu oraz forma pozyskiwanych informacji w ujęciu pierwotnym, zostały przedstawione na rysunku 2. W każdym z 12. węzłów, które zostały zdiagnozowane, jako krytyczne dla konstrukcji nośnej maszyny, zainstalowano tensometryczne czujniki odkształceń (naprężeń) typu SLB700A (rys. 2a). Blisko czujników zabudo-

wano wzmacniacze CLIP AE301 (rys.2d), skąd rejestrowane sygnały przesyłane są do rejestratora MAS-MICRO-II (rys. 2e). Dane w nim rejestrowane są zrzucane co jakiś czas (okres) na komputer przenośny z odpowiednim oprogramowaniem (rys. 2f). Sygnał w każdym z 12. kanałów pomiarowych próbkowany jest z częstotliwością 2 [kHz], aby w sposób pewny wyodrębnić minima i maksima przebiegu. Zakres pomiarowy jest podzielony na 64 klasy, stąd algorytm Rainflow rozpoznaje cykle naprężeń (zamknięte pętle histerezy) a następnie zlicza i zapamiętuje w postaci macierzy „rainflow” naprężeń (zawierającej pogrupowane liczby cykli o określonym zakresie i wartości średniej) o wymiarach 64x64. Macierz taka jest podstawową formą przechowywania wyników i w ramach danego kanału pomiarowego (węzła) uzupełniana jest kumulatywnie. Zachowywane są wartości min i max cyklu oraz licznosc danej klasy przejścia. Mając na uwadze ocenę trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych w oparciu o [4] istotna jest jedynie znajomość zakresu naprężeń  $\Delta\sigma_i$  z pominięciem wartości średniej cykli. Wspomniane oprogramowanie pozwala na wygenerowanie pliku zarejestrowanych danych w postaci par  $(\Delta\sigma_i, n_i)$  dogodnego do wykonania widma naprężeń.

## PROBLEMY DŁUGOTRWAŁEJ REJESTRACJI OBCIĄŻEŃ

Niezależnie od źródeł niepewności w ocenie zasobu eksploatacyjnego wynikających z samej przyjętej metody pozyskiwa-



Rys. 2. Rejestracja obciążeń eksploatacyjnych: a) PSOT 1, 2, 3, 4 – czujniki w podstawie wieży, b) PSOT 1, 2, 3, 4 – spawany węzeł konstrukcyjny, miejsce potencjalnego pęknięcia, c) Sposób wyznaczania naprężeń strefowych dla obszaru przejścia materiału rodzimego w lico spoiny, d) Wzmacniacze CLIP AE301 z modułem zasilającym zabudowane na konstrukcji, e) Urządzenie MAS-MICRO-II RECORDER do gromadzenia i wstępnej obróbki sygnałów ze wzmacniaczy, f) Wygląd interfejsu do rejestracji i obróbki danych z MAS-MICRO-II. Widoczna graficzna reprezentacja macierzy naprężeń

Fig. 2. Stress history acquisition: a) PSOT 1, 2, 3, 4 – sensors installed in the corners of tower pillar, b) PSOT 1, 2, 3, 4 – welded joint, area of potential cracking, c) Method of stresses determination for the area of material change into the face of weld, d) CLIP AE301 amplifiers with power supply module located on the structure, e) MAS-MICRO-II RECORDER device for collection and preliminary processing of signals from amplifiers, f) Interface of program for MAS-MICRO-II system data registration and edition. View of graphic illustration of data matrix

nia przebiegów naprężeń eksploatacyjnych, co przedstawiono w [2], mogą się pojawić inne, kolejne problemy wynikające z nieprawidłowości w pracy układu pomiarowego. Pomimo tego, że układ pomiarowy był tworzony na potrzeby długotrwałej, pewnej rejestracji (rezygnacja z bezprzewodowego przesyłania danych, odporność na niedogodności eksploatacyjne, tj. działania atmosferyczne, uszkodzenia mechaniczne) we wspomnianym czasie 24,650 [h] kilkakrotnie miały miejsce większe lub mniejsze nieprawidłowości w pracy układu pomiarowego (awarie pojedynczych czujników i wzmacniaczy obsługujących dany węzeł, niedomagania układu przewodów elektrycznych i zacisków, wprowadzających lokalnie szумы pomiarowe, czasowe zaburzenia w pracy rejestratora). Na 12 nadzorowanych węzłów konstrukcyjnych (12 kanałów pomiarowych) w dotychczasowej pracy 5-ciu kanałów pomiarowych (PSOT-y: 1, 4, 10, 11, 12) wystąpiły problemy o charakterze długotrwałym, na 2 kolejnych (PSOT-y: 2, 3) nastąpiły komplikacje krótkotrwałe lub o charakterze chwilowych zaburzeń. Przebiegi naprężeń eksploatacyjnych zarejestrowane na pięciu pozostałych kanałach wykorzystano w całości, czyli z całego dotychczasowego czasu eksploatacji, choć w trzech z nich (PSOT-y: 5, 7, 8) zaobserwowano okresy, co do których istnieje pewne prawdopodobieństwo, że wystąpiły chwilowe zaburzenia pomiarowe. Jedynie rejestracja na pozostałych dwóch węzłach (PSOT-y: 6, 9) odbywa się prawidłowo od pierwszej godziny eksploatacji nie budząc żadnych zastrzeżeń.

W przypadkach, gdy awaria nie była oczywista (czyli inna, niż np. zupełny brak danych, uszkodzenie zdiagnozowane sprzętowo) oceny w niepewnych okresach dokonywano poprzez: ocenę czy pliki wyjściowe z rejestratora nie są uszkodzone, ocenę merytoryczną zawartości plików wyjściowych, analizę widm pozyskanych obciążeń, analizę graficznej reprezentacji macierzy naprężeń (przykład widoku znamionującego poprawną rejestrację widoczny jest na rys. 2f), analizę tempa przyrostu uszkodzenia węzła w danych okresach (wyznaczonego na bazie zarejestrowanych rzeczywiście przebiegów – niezależnie od oceny ich poprawności) na tle całej historii rejestracji. Ocenę tę przeprowadzono odrębnie dla każdego węzła, ale z uwzględnieniem odpowiednich porównań węzłów pracujących symetrycznie lub w grupach. Okresy, w których pomiary budziły wątpliwości zaczęły się częściej pojawiać po kilkunastu tysiącach godzin rejestracji, ale nie wszystkie były skupione w ramach jednego okresu, dlatego wymagały właściwie odrębnej dla każdego węzła oceny. Wszystkie pliki z dotychczasowej eksploatacji oceniono, jako nieuszkodzone, zapisane poprawnie.

Poniżej przedstawiono opisy wybranych problemów z rejestracją zakończone zestawieniem obrazującym ostateczną ocenę poprawności danych obciążeniowych w całej dotychczasowej eksploatacji (tab. 1).

#### Grupa węzłów 1-4 (PSOT-y 1-4)

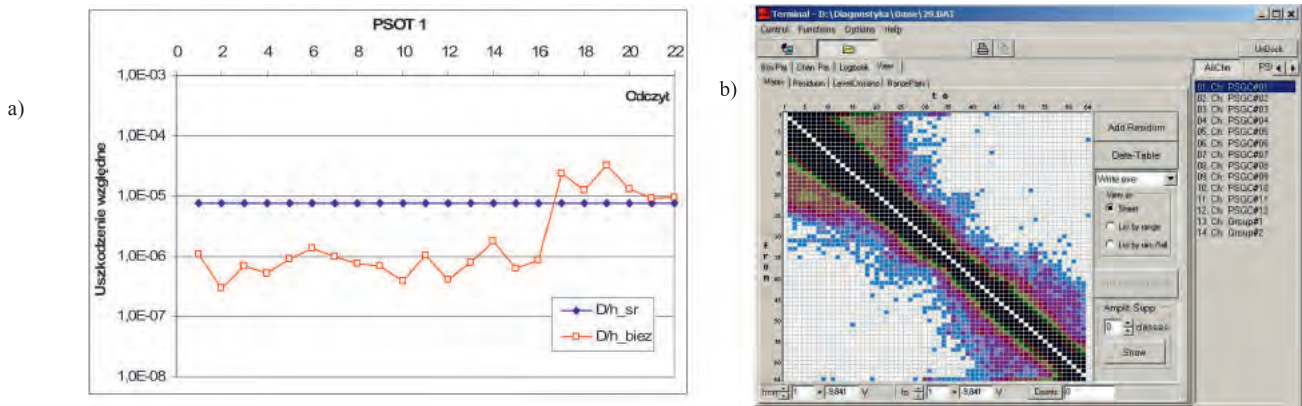
Węzły konstrukcyjne 1-4 znajdują się na podstawie wieży koparki. Rejestracja na tych węzłach nie wzbudzała żadnych wątpliwości aż do końca 14-go okresu rejestracji (zrzut danych po 13,223h). Dla PSOT 1 pomimo pewnych niepokojących symptomów, takich jak pojawienie się dość licznych zliczeń cykli dochodzących do granic zakresu pomiarowego zdecydowano o wykorzystaniu zarejestrowanych danych w okresach 15 i 16 (brak istotnego zwiększenia tempa przyrostu uszkodzenia).

W kolejnych okresach (od 17 do 22) jednak, na graficznej reprezentacji macierzy naprężeń uwidoczniło się całkowite wypełnienie zakresu wzdłuż głównej przekątnej bardzo licznymi sygnałami dochodzącymi do górnej i dolnej granicy zakresu pomiarowego (rys. 3b). Taki efekt przemawia za oddziaływaniem szumu wywołanym uszkodzeniem styków (połączeń przewodów) we wzmacniaczu lub rejestratorze. Tempo przyrostu uszkodzenia jest tu natomiast nawet o dwa rzędy wielkości większe niż we wcześniejszej eksploatacji (rys. 3a). Zarejestrowane dane w tych okresach uznano za niewiarygodne, uszkodzenie zmęczeniowe będzie tu oszacowane metodami zastępczymi.

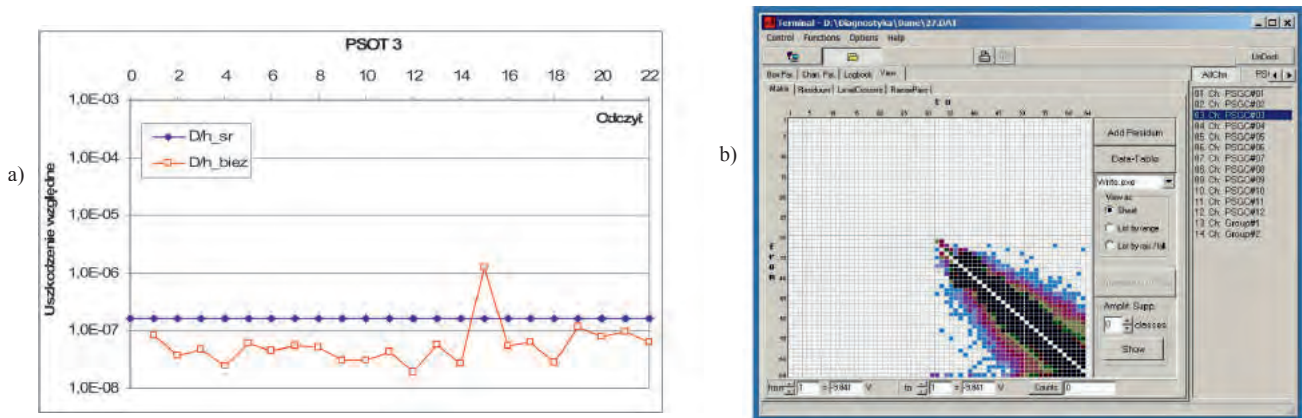
W węźle konstrukcyjnym nr 2 jedynie w 16. okresie zarejestrowano skokowy bezwzględny oraz względny (na jednostkę czasu) przyrost liczby rejestrowanych sygnałów o najniższych i niskich amplitudach, co wyraziło się również poprzez znaczący skok (ponad 23-krotny) tempa przyrostu uszkodzenia. Analiza graficznej reprezentacji macierzy naprężeń nie wskazuje jednoznacznie na pojawienie się szerokopasmowych szumów. Prawdopodobną przyczyną nieprawidłowości było okresowe wystąpienie szumu o niskiej amplitudzie napięcia i dużej częstotliwości, co istotnie podbiło liczbę zliczonych cykli o najniższych zakresach. Okres ten uznano, jako nieposiadający wiarygodnych danych i zdecydowano o szacowaniu w nim zasobu eksploatacyjnego metodami zastępczymi. W czasie prac konserwacyjnych stwierdzono poprawną pracę toru pomiarowego w kolejnych okresach.

Rejestracja w PSOT 3 pracowała poprawnie do końca 14-go okresu rejestracji (zrzut danych po 13,223h). W 15. okresie zarejestrowano skokowy przyrost liczby sygnałów o najniższych i niskich amplitudach. Na graficznej reprezentacji macierzy naprężeń widoczne jest wyraźne przesunięcie i skupienie wykresu przy górnej granicy zakresu pomiarowego (rys. 4b). Obliczane w oparciu o dane zarejestrowane w tym okresie tempo przyrostu uszkodzenia zmęczeniowego jest wielokrotnie (22-krotnie) wyższe niż dla wcześniejszej eksploatacji (rys. 4a). Prawdopodobną przyczyną było okresowe wystąpienie szumu, lub zaburzenia w pracy czujnika lub rejestratora. Zarejestrowane w tym okresie dane muszą zostać uznane za niewiarygodne. Następnie w okresie 19. (zrzut danych po 21,515h) również notuje się lokalnie nieco wyższe, niż charakterystyczne dla tego węzła, tempo przyrostu uszkodzenia. Kształt widma naprężeń tego węzła potwierdza te spostrzeżenia – w okresie tym dokonano zliczenia znacznie większej bezwzględnej liczby cykli w najniższych zakresach naprężeń. Z uwagi na uzupełniane kumulatywnie (pomiędzy zerowaniami) tablice naprężeń nie jest możliwe wnioskowanie, co do podobieństwa charakteru zaburzenia do tego z 15. okresu rejestracji. Wydaje się jednak, że zaburzenie to w niewielkim stopniu wpływa na obliczenia uszkodzenia zmęczeniowego i postanowiono tu wykorzystać te dane (założyć arbitralnie ich poprawność) do oceny uszkodzenia i zasobu eksploatacyjnego. Przy takiej decyzji obliczenia te należy uznać za konserwatywne, ale o niezbyt dużym poziomie tego konserwatywności.

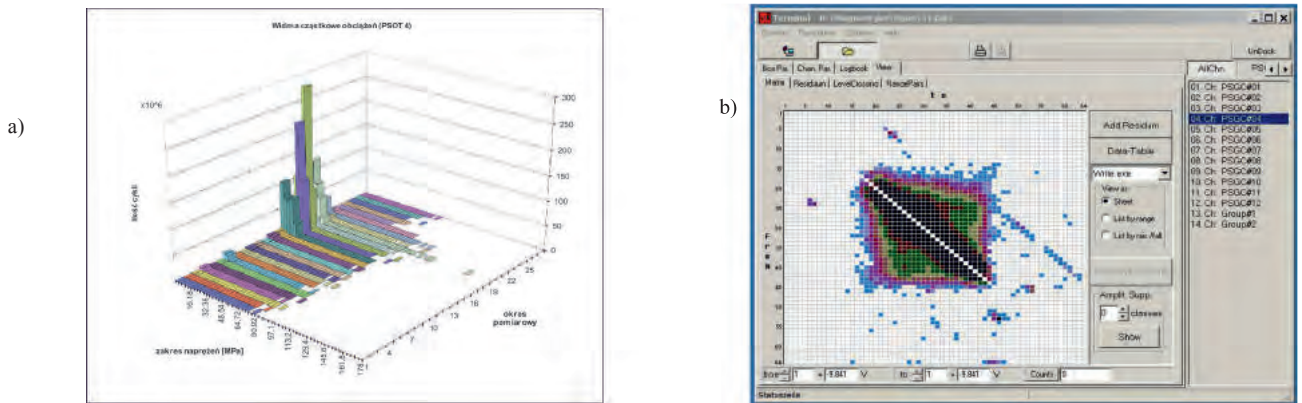
W węźle konstrukcyjnym nr 4 rejestracja pracowała poprawnie do końca 14-go okresu rejestracji (zrzut danych po 13,223h). Następnie w kolejnych kilku okresach zarejestrowano skokowy przyrost liczby sygnałów o najniższych i niskich amplitudach (rys. 5a) i wielokrotnie wyższe tempo przyrostu uszkodzenia (w 16 okresie – większe 17x niż przeciętne dla tego węzła). Obraz macierzy naprężeń nie wskazuje tu jednak



Rys. 3. PSOT 1: a) Tempo przyrostu uszkodzenia w danych okresach rejestracji [D/h], b) Macierz naprężeń dla okresu rejestracji nr 17 (do 18,846h)  
Fig. 3. PSOT 1: a) Fatigue damage growth rate for particular data acquisition periods [D/h], b) Stress matrix -17th data acquisition period (up to 18.846h)



Rys. 4. PSOT 3: a) Tempo przyrostu uszkodzenia w danych okresach rejestracji [D/h], b) Macierz naprężeń - okres rejestracji nr 15 (do 15,367h)  
Fig. 4. PSOT 3: a) Fatigue damage growth rate for particular data acquisition periods [D/h], b) Stress matrix -15th data acquisition period (up to 15.367h)



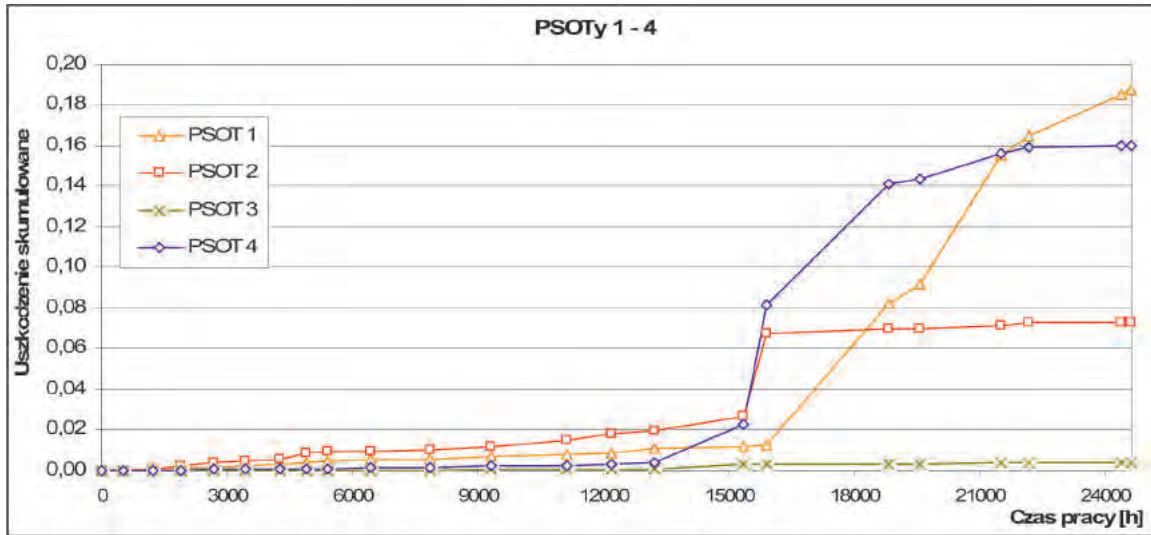
Rys. 5. PSOT 4: a) Widmo cząstkowe, absolutne (cykle) b) Macierz naprężeń – okres rejestracji nr 19 (do 21,515h)  
Fig. 5. PSOT 4: a) Load spectrum for particular data acquisition periods (cycles) b) Stress matrix - 19th data acquisition period (up to 21.515h)

na występowanie szumów szerokopasmowych. Przyczyną może być uszkodzenie czujnika tensometrycznego bądź wzmacniacza, albo wystąpienie skupionych szumów o niewielkiej amplitudzie. Po odkryciu problemu, z uwagi na brak możliwości poprawnego skalibrowania toru pomiarowego dla tego kanału zdecydowano o wymianie czujnika. Dane zaś w okresach 15, 16, 17 pomimo braku jednoznacznego potwierdzenia nieprawidłowości działania toru pomiarowego na graficznej reprezentacji macierzy naprężeń, uznano za niewiarygodne.

W 19. okresie rejestracji (zrzut danych po 21,515h) macierz naprężeń tego węzła wygląda podobnie jak w ww. okresach,

jest bardziej wypełniona (efekt kumulatywnego rejestrowania pomiędzy zerowaniami), ale uwidacznia dodatkowo przypadkowo rozmieszczone zliczenia cykli, co może znamionować pojawianie się szumów w pewnych podokresach czasu (rys. 5b). We wszystkich wspomnianych okresach uszkodzenia zmęczeniowe zostaną zatem wyznaczone metodami zastępczymi.

Ponadto w okresie 18. (zrzut danych po 19,594h) i 20. (zrzut danych po 22,209h) daje się również zauważyć wyższe niż przeciętnie dla tego węzła tempo przyrostu uszkodzenia, choć o mniejszej skali niż w poprzednich okresach. Z uwagi na brak innych przesłanek, co do ewentualnej niewiarygodności



Rys. 6. Uszkodzenia skumulowane liczone na podstawie oryginalnych danych z rejestracji naprężeń - PSOT 1-4

Fig. 6. Cumulative damages calculated on the basis of original data acquired from measurement system - PSOT 1-4

tych danych, postanowiono tu konserwatywnie wykorzystać te dane, jako prawidłowe.

Na rysunku 6 przedstawiono uszkodzenie skumulowane dla węzłów 1-4 obliczone na podstawie oryginalnych zarejestrowanych danych (nawet w tych okresach, w których stwierdzono ewidentną nieprawidłowość danych).

#### Grupa węzłów 5-8 (PSOT-y 5-8)

Węzły konstrukcyjne 5-8 znajdują się na wysięgniku koła czerpakowego i charakteryzują się nieco mniejszą względną (w stosunku do wartości średniej) zmiennością tempa przyrostu uszkodzenia niż grupa węzłów 1-4. Układ pomiarowy dla PSOT 5 pracował bez zastrzeżeń do końca 13. okresu pomiarowego (zrzut danych po 12,200h). Następnie, w 14. okresie nastąpiło wyraźne zwiększenie zliczanej liczby cykli o niskich i średnich amplitudach na jednostkę czasu (rys. 7b), co dało też efekt w postaci zawyżenia tempa wzrostu uszkodzenia (rys. 7a). Obraz macierzy naprężeń dla tego okresu (rys. 8a) – zasadniczo skupiony prawidłowo wzdłuż przekątnej – ujawnia pewne odseparowane grupy cykli, co przemawia za możliwością pojawienia się krótkotrwałego epizodu szumów. Nie da się też wykluczyć, że jest to odpowiedź konstrukcji na wystąpienie grupy nietypowych dla pracy maszyny wymuszeń dynamicznych. Nie widać żadnych przesłanek odnośnie trwałych nieprawidłowości sprzętowych.

W kolejnych okresach rejestracji nie występują takie zaburzenia (macierze naprężeń w dalszej rejestracji są w tej kwestii w pełni wiarygodne, jako budowane po wyzerowaniu).

Uwzględniając spostrzeżenie, że zwiększenia przyrostu uszkodzenia w tym okresie doznał również siostrzany PSOT 7 oraz założenie, że te zaburzenia tylko w niewielkim stopniu wpływają na wyznaczane uszkodzenie zmęczeniowe podjęto decyzję o uwzględnieniu rzeczywiście zarejestrowanego przebiegu naprężeń w obliczeniach uszkodzenia zmęczeniowego.

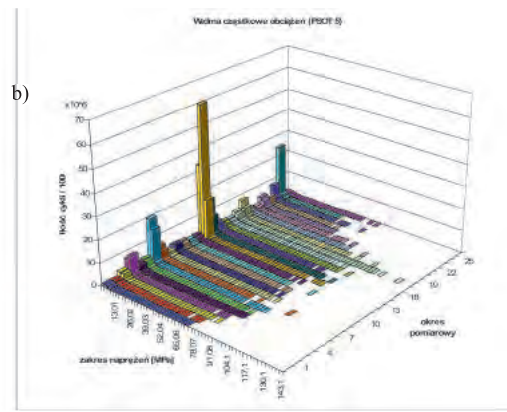
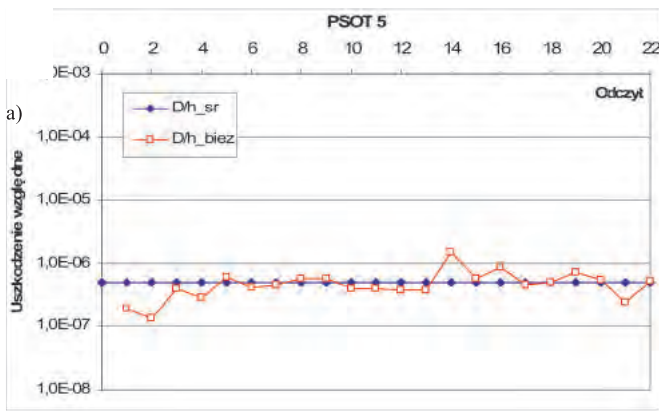
Węzeł konstrukcyjny nr 7 jest siostrzanym dla węzła 5 PSOT-em, umieszczonym symetrycznie względem osi głównej maszyny. Podobnie, jak w węźle 5, w 14. okresie nastąpiło wyraźne zwiększenie tempa przyrostu uszkodzenia, które w tym okresie jest ok. 60% szybsze niż przeciętne we wcześniejszych okresach rejestracji (rys. 9a). Na widmach obciążeń nie widać jednak istotnego przyrostu liczby cykli na jednostkę czasu

w tym okresie (rys. 9b). Za to graficzna reprezentacja macierzy naprężeń wskazuje na pojawienie się w tym okresie zjawiska podobnego do opisywanego w PSOT 5 (rys. 8b).

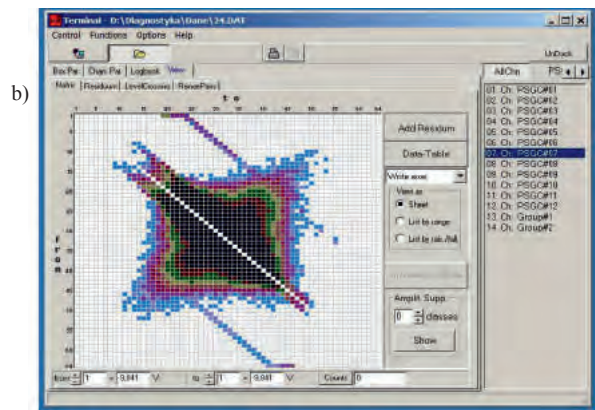
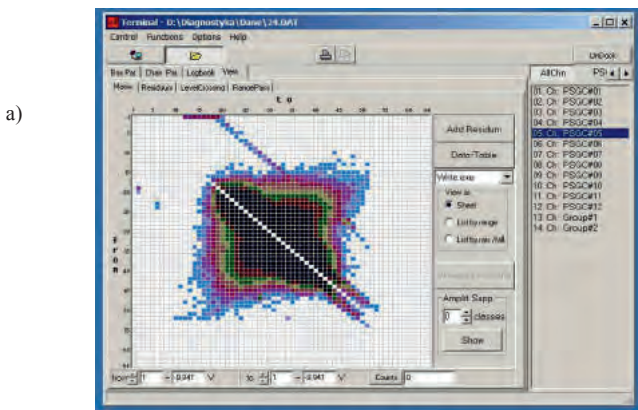
Zbieżność ta zwiększa nieco prawdopodobieństwo przedstawionego powyżej domysłu, że powodem tego było wystąpienie nietypowego zdarzenia eksploatacyjnego, choć mając na uwadze charakterystykę pracy maszyny, nadal bardziej prawdopodobne jest wystąpienie przypadkowych krótkookresowych szumów. Zarejestrowane dane obciążeniowe pomimo pewnej niejednoznaczności zostaną tu uznane za prawidłowe i wykorzystane do obliczeń zmęczeniowych. Nieco wyższe niż przeciętne tempo przyrostu uszkodzenia (zbliżone do tego w okresie 14) wystąpiło też w okresach 16. (zrzut danych po 15,917h) oraz 17. (zrzut danych po 18,846h), w mniejszym stopniu także w 19. (zrzut danych po 21,515h). Analiza widm naprężeń potwierdza zwiększone liczby zarejestrowanych cykli w najniższych i niskich zakresach naprężeń dla wymienionych okresów. Macierze naprężeń nie wskazują jednak na żadne nieprawidłowości, obrazy są prawidłowo skupione względem głównej przekątnej. Dane obciążeniowe uzyskane w okresach 16, 17 i 19 uznano zatem, jako zarejestrowane prawidłowo.

PSOT 6 zanotował, podobnie jak para węzłów 5-7 w 14. okresie (zrzut danych po 13,223h) nieco zwiększone tempo przyrostu uszkodzenia zmęczeniowego. Sytuacja powtórzyła się następnie w 16. okresie rejestracji (zrzut danych po 15,917h). Istnieje tu wyraźnie zbieżne z węzłami 5 i 7 zachowanie. Wykres skumulowanego uszkodzenia zmęczeniowego nie wykazuje jednak istotnego zejścia z linii trendu w tych okresach. Podobnie bezwzględna liczba zarejestrowanych cykli nie wskazuje na istotnie większe (w stosunku do sąsiednich okresów) nasilenie pracy lub pojawienie się dużej liczby szumów w najniższych zakresach naprężeń. Ocena macierzy naprężeń dla PSOT 6 w omawianych okresach uwidacznia natomiast całkowicie prawidłowy obraz. Tym samym uznano, że rejestracja obciążeń tego węzła konstrukcyjnego w całej dotychczasowej eksploatacji była realizowana bez zaburzeń.

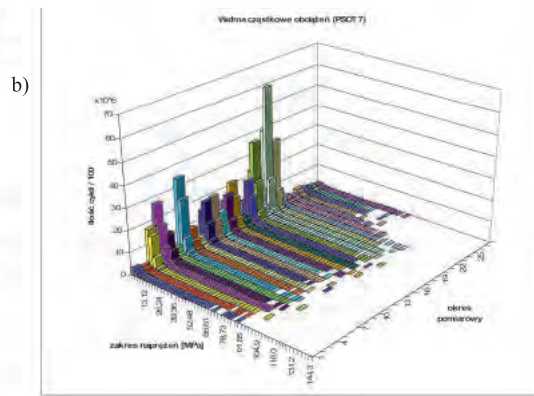
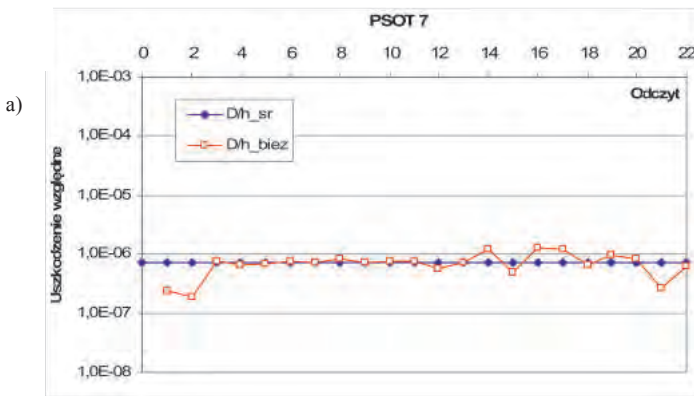
Węzeł konstrukcyjny nr 8, siostrzany do PSOT 6 w 14. okresie zanotował zwiększone (2-krotnie w stosunku do przeciętnego dotychczas) tempo przyrostu uszkodzenia zmęczeniowego (rys. 10a). Sytuacja powtórzyła się następnie w 16. okresie rejestracji (zrzut danych po 15,917h), gdzie tempo



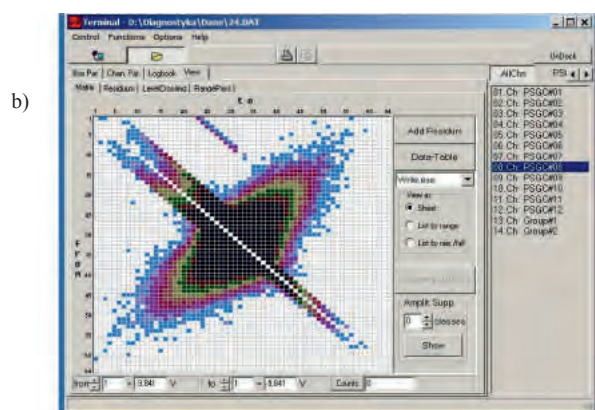
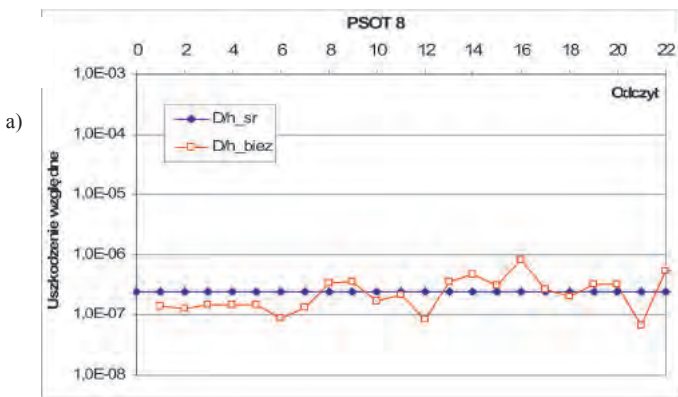
Rys. 7. PSOT 5 a) Tempo przyrostu uszkodzenia w danych okresach rejestracji [D/h] b) Widmo częstotkowe, względne (cykle/1000h)  
 Fig. 7. PSOT 5 a) Fatigue damage growth rate for particular data acquisition periods [D/h] b) Load spectrum for particular data acquisition periods (cycles/1000h)



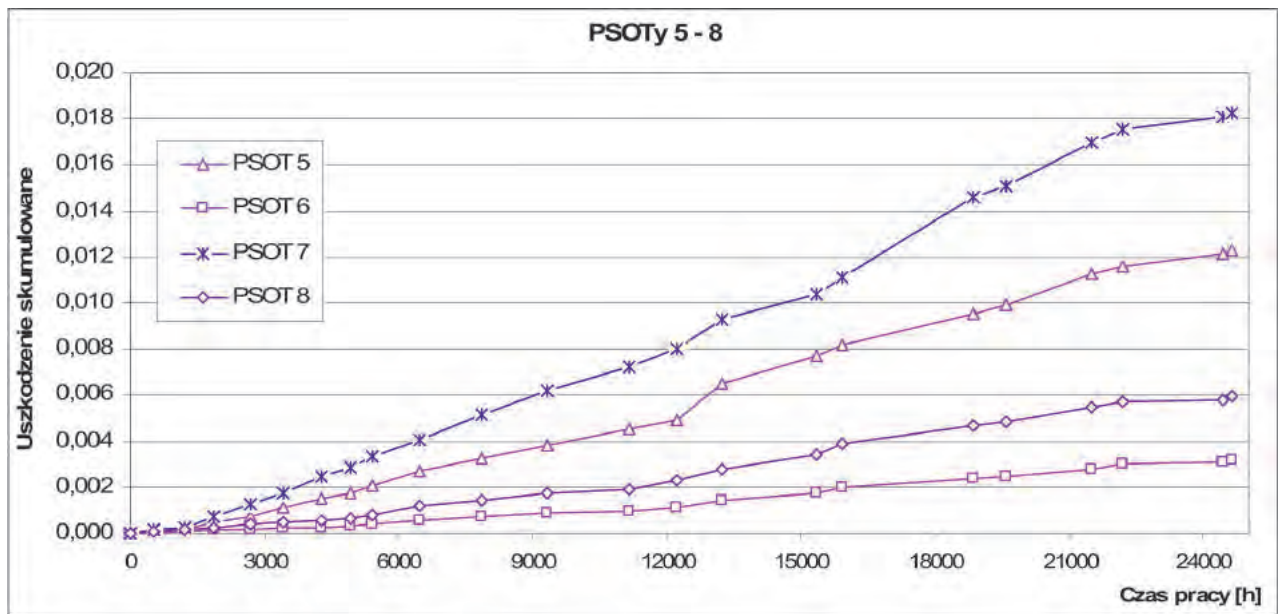
Rys. 8. Macierze naprężeń, okres rejestracji nr 14 (do 13,223h) a) PSOT 5, b) PSOT 7  
 Fig. 8. Stress matrices - 14th data acquisition period (up to 13.223h) a) PSOT 5, b) PSOT 7



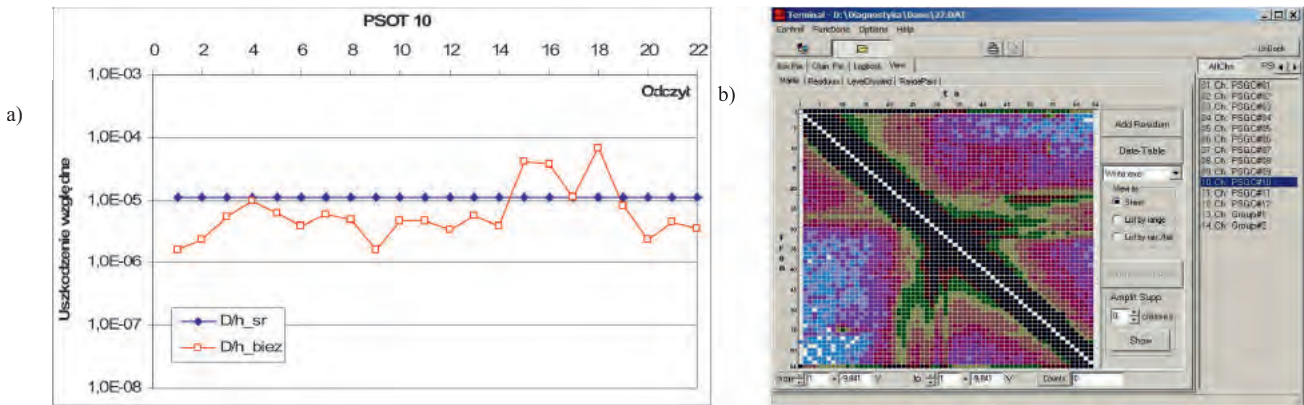
Rys. 9. PSOT 7 a) Tempo przyrostu uszkodzenia w danych okresach rejestracji [D/h] b) Widmo częstotkowe, względne (cykle/1000h)  
 Fig. 9. PSOT 7 a) Fatigue damage growth rate for particular data acquisition periods [D/h] b) Load spectrum for particular data acquisition periods (cycles/1000h)



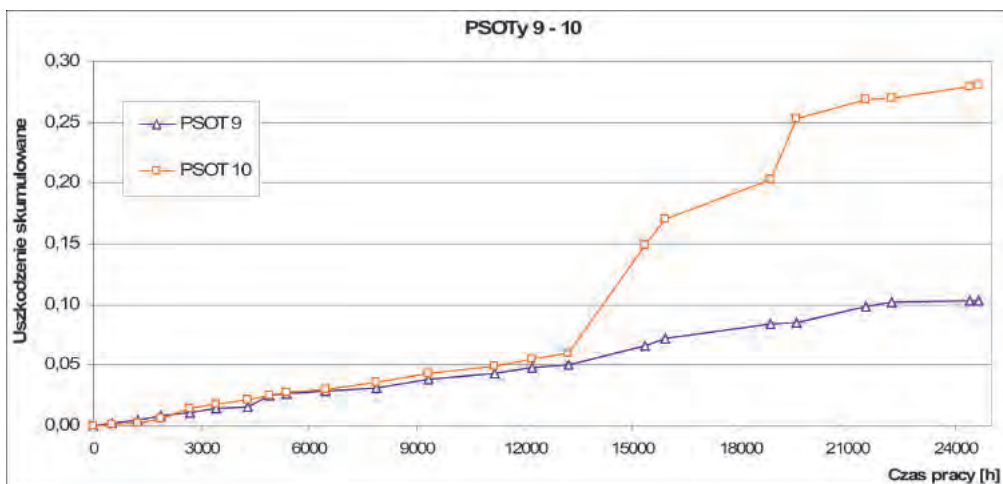
Rys. 10. PSOT 8 a) Tempo przyrostu uszkodzenia w danych okresach rejestracji [D/h] b) Macierz naprężeń, okres rejestracji nr 14 (do 13,223h)  
 Fig. 10. PSOT 8 a) Fatigue damage growth rate for particular data acquisition periods [D/h] b) Stress matrix - 14th data acquisition period (up to 13.223h)



Rys. 11. Uszkodzenia skumulowane liczone na podstawie oryginalnych danych z rejestracji naprężeń - PSOT 5-8  
 Fig. 11. Cumulative damages calculated on the basis of original data acquired from measurement system - PSOT 5-8



Rys. 12. PSOT 10 a) Tempo przyrostu uszkodzenia w danych okresach rejestracji [D/h] b) Macierz naprężeń - okres rejestracji nr 15 (do 15,367h)  
 Fig. 12. PSOT 10 a) Fatigue damage growth rate for particular data acquisition periods [D/h] b) Stress matrix - 15th data acquisition period (up to 15.367h)



Rys. 13. Uszkodzenia skumulowane liczone na podstawie oryginalnych danych z rejestracji naprężeń - PSOT 9-10  
 Fig. 13. Cumulative damages calculated on the basis of original data acquired from measurement system - PSOT 9-10

przyrostu uszkodzenia było jeszcze wyższe. Wykres uszkodzenia skumulowanego wykazuje jednak jedynie w 16. okresie nieco wyraźniejszą niż w węźle 6 dynamikę konsumpcji zasobu eksploatacyjnego (rys. 11).

Ponadto, podobnie jak w węźle 6 można zaobserwować

w widmie obciążeń zwiększoną ilość odnotowanych cykli w najniższych zakresach naprężeń. Tu także nie przekłada się to na istotną zmianę tempa wzrostu w tym okresie. Macierze naprężeń z aparatury rejestrującej dla węzła 8 wskazują na podobne zjawiska w 14. okresie rejestracji, jak w przypadku



PSOT-ów 5 i 7 (rys. 10b). Nie jest możliwe jednak rozstrzygnięcie czy w tym okresie miało miejsce zdarzenie o charakterze raczej eksploatacyjnym, czy związanym z chwilowymi niedomogami rejestracji (np. szumy, czy uszkodzenia układu pomiarowego).

W kolejnych okresach macierze naprężeń wyglądają całkowicie prawidłowo (są wiarygodne, po zerowaniu). Tym samym decyzja, aby wykorzystać zarejestrowane dane w 14. okresie rejestracji, we wszystkich węzłach tej grupy wydaje się uzasadniona. Dane z 16. okresu rejestracji, niezależnie od wymienionych wyżej czynników, postanowiono uznać, jako wiarygodne.

Zwraca uwagę bardzo podobny (z różnicami w wartościach) przebieg wykresów przyrostu skumulowanego uszkodzenia zmęczeniowego dla węzłów 5-8 (wysięgnik koła czerpakowego). Nawet w okresach, które budzą pewne wątpliwości ze względu na przyspieszone tempo przyrostu uszkodzenia, zjawiska te powtarzają się w tej grupie PSOT-ów w tych samych okresach (rys. 11).

### Grupa węzłów 9-10 (PSOT-y 9-10)

Węzły konstrukcyjne nr 9 i 10, to zastrzały stężeń dolnych wysięgnika przeciwwagi. PSOT 9 w sensie prowadzonej rejestracji nie sprawiał żadnych problemów. Przebieg wykresu uszkodzenia skumulowanego posiada stabilny trend dla całej dotychczasowej eksploatacji (rys. 13). Istnieją jedynie dwa okresy, w których nieco wyższe jest tempo przyrostu uszkodzenia – 7. okres (zrzut danych po 4,915h) oraz 16. okres (zrzut danych po 15,917h). W okresach tych widmo względne potwierdza nieco większą liczbę zliczonych cykli naprężeń na jednostkę czasu w najniższych zakresach naprężeń. Graficzna reprezentacja macierzy naprężeń w tych okresach nie wskazuje jednak na żadne nietypowe zdarzenia. Obraz macierzy jest prawidłowo skupiony względem głównej przekątnej.

Natomiast węzeł konstrukcyjny nr 10 pracował poprawnie do końca 14. okresu rejestracji (zrzut danych po 13,223h). W następnych okresach 15. (zrzut danych po 15,367h) i 16. (zrzut danych po 15,917h) zanotowano istotny wzrost prędkości przyrostu uszkodzenia. Podobna sytuacja wystąpiła w okresie 18. (zrzut danych po 19,594h) (rys. 12a). Na graficznej reprezentacji macierzy naprężeń dla tych okresów widoczne jest skokowe pojawienie się szumów o dużej amplitudzie wykraczającej poza zakres pomiarowy. Praktycznie cała macierz jest wypełniona zliczeniami cykli (rys. 12b). Okresy 17, 19, 20 rejestracji, co prawda nie wykazują szybszego tempa przyrostu

uszkodzenia, ale ich macierze naprężeń dają podobny obraz, jak w okresach wyżej opisywanych (z uwagi na kumulatywny charakter wypełniania macierzy oraz to, że wszystkie te okresy mieszczą się w czasie pomiędzy zerowaniami, nie jest możliwe w oparciu jedynie o nie ocenić poprawność rejestracji). Tym samym dane obciążeniowe we wszystkich okresach z przedziału 15 - 20 muszą być uznane za niewiarygodne.

Uszkodzenie zmęczeniowe będzie tu liczone metodami zastępczymi.

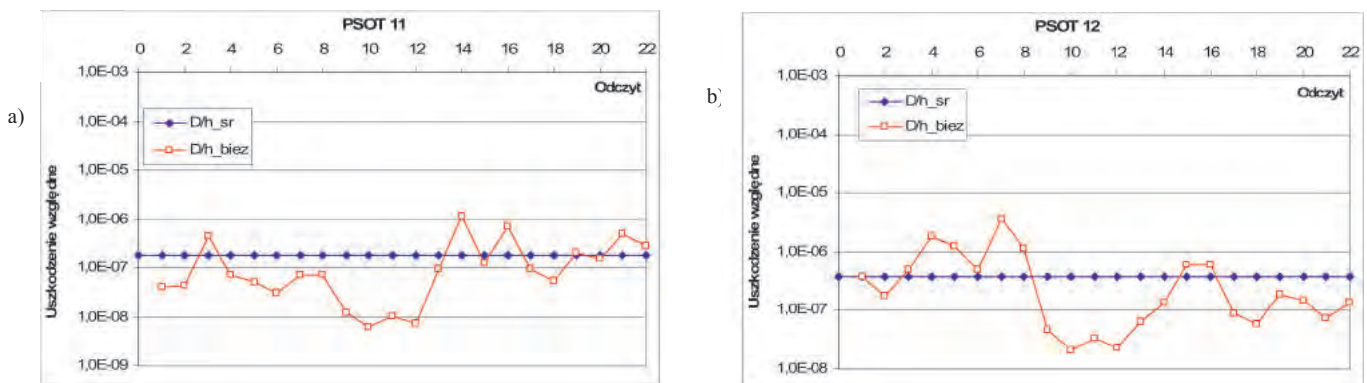
Po tym okresie czujnik został wymieniony na nowy i w kolejnych (okresy 21, 22) rejestracja na tym węźle konstrukcyjnym wydaje się pracować prawidłowo. Wykres uszkodzenia skumulowanego (rys. 13) wyraźnie uwidacznia (w tle siostrzanego węzła nr 9) w przypadku PSOT 10 okresy, w których wystąpiły problemy z rejestracją.

### Grupa węzłów 11-12 (PSOT-y 11-12)

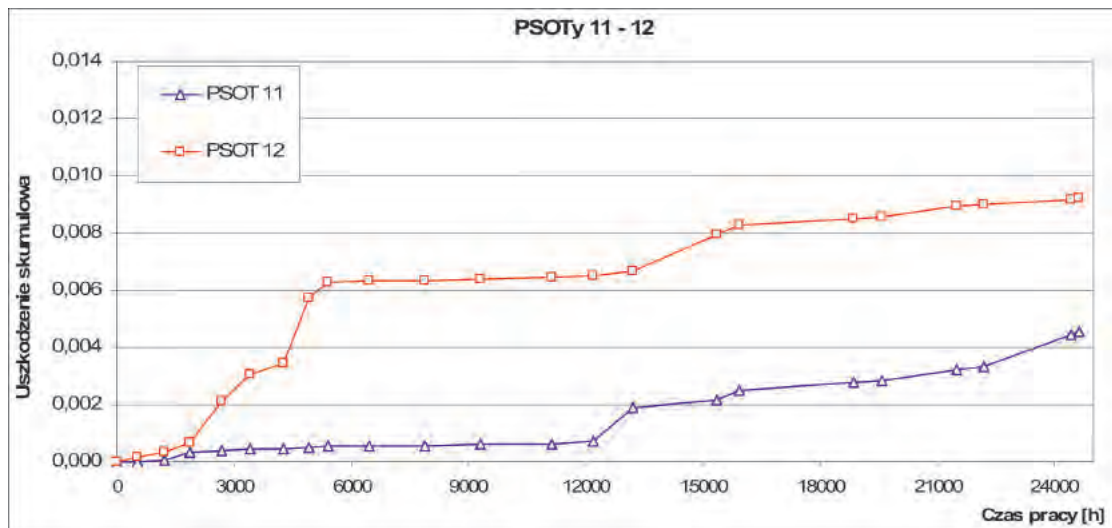
Węzły konstrukcyjne nr 11 i 12 (ciągną przednie, utrzymujące wysięgnik z zespołem urabiającym) pracowały poprawnie do końca 8. okresu rejestracji (zrzut danych po 5,403h). Następnie zdiagnozowano uszkodzenie toru pomiarowego tych węzłów, ale ze względu na ciągłą eksploatację maszyny i fakt, że rejestracja na pozostałych węzłach nie budziła żadnych zastrzeżeń wymiany czujników dokonano dopiero po 14. okresie eksploatacji (zrzut danych po 13,223h). Od tamtej pory pracują prawidłowo. Pliki wyjściowe z rejestratora były (nawet w wymienionych okresach) zapisane prawidłowo w sensie elektronicznym, nie mniej jednak od razu zwracały uwagę jedynie pojedyncze zarejestrowane cykle obciążeń. Można stwierdzić, że w tych okresach właściwie niemal nic się nie rejestrowało. Poza okresami 13 i 14, gdzie w prawie pustej macierzy naprężeń PSOT 11 pojawiło się po kilkadziesiąt cykli o największych zakresach naprężeń (co sztucznie podbiło obliczeniowe uszkodzenie zmęczeniowe), dawało to prawie zerowy lub bardzo niski przyrost uszkodzenia zmęczeniowego (rys. 14). W PSOT 12 ogólna zasada jest taka sama, z nieco mniejszym widocznym efektem w okresach 13 i 14.

W tych węzłach naturalne są większe różnice w intensywności eksploatacji pomiędzy poszczególnymi okresami. Element jest wrażliwy na zmiany warunków urabiania, co skutkuje większą zmiennością liczności i charakteru rejestrowanych cykli obciążeń.

Nie zmienia to faktu, że pozostałe okresy, poprzedzające awarię, jak i te po jej usunięciu wydają się być rejestrowane prawidłowo. Skumulowane uszkodzenie tych węzłów obliczone w oparciu o rzeczywiście zarejestrowane dane wyjściowe



Rys. 14. Tempo przyrostu uszkodzenia w danych okresach rejestracji [D/h] a) PSOT 11 b) PSOT 12  
Fig. 14. Fatigue damage growth rate for particular data acquisition periods [D/h] a) PSOT 11 b) PSOT 12



Rys. 15. Uszkodzenia skumulowane liczone na podstawie oryginalnych danych z rejestracji naprężeń - PSOT 11-12  
 Fig. 15. Cumulative damages calculated on the basis of original data acquired from measurement system - PSOT 11-12

Tab. 1. Zestawienie oceny poprawności zarejestrowanych danych obciążeniowych  
 Tab. 1. Load data acquired from measurement system – validation

Nr odczytu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Nr pliku DAT	9	11	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	27	28	29	30	31	32	33	34	36	37	38	39	40	
Całkowity czas pracy [h]	528	1216	1878	2684	3428	4282	4915	5403	6456	7876	9328	11156	12200	13223	15367	15917	18846	19594	21515	22209	24414	24645	24654	24661	24669	24676	24725	
Nr węzła (PSOT)																												
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	+	!	!	!	!	!	!	!	---	---	---	---	---
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	!	x	x	x	+	x	x	x	x	x	x	x	x
4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	!	!	!	x	!	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	+	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	+	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	+	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
11	x	x	x	x	x	x	x	x	!	!	!	!	!	!	!	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12	x	x	x	x	x	x	x	x	!	!	!	!	!	!	!	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Uwagi:	x prawidłowy      ! nieprawidłowy      po zerowaniu      --- do oceny w późniejszym czasie + niejednoznaczny, ale liczony normalnie (zachowawczo)																											

z układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 15.

Widoczne niemal poziome przebiegi (śladowy przyrost uszkodzenia obciążeniowego) w okresach, gdy uszkodzone były czujniki tych węzłów. W tabeli 1 przedstawiono syntetyczne zestawienie poprawności zarejestrowanych danych obciążeniowych w ostatecznej (decyzyjnej) formie.

**PODSUMOWANIE**

W długotrwałej eksploatacji maszyn, których konstrukcje nośne podlegają degradacji zmęczeniowej i są obiektem

nadzoru eksploatacyjnego należy się liczyć z awariami lub przejściowymi perturbacjami w pracy aparatury pomiarowej i rejestrującej. Identyfikacja nieprawidłowości w rejestracji naprężeń ma charakter ekspercki i opiera się na realiach eksploatacyjnych maszyny (ocena warunków pracy maszyny w analizowanym okresie) oraz prawdopodobnych przyczynach zaburzeń rejestracji (zakłócenia, mechaniczne uszkodzenia przewodów lub czujników). W przypadku pozyskiwania danych obciążeniowych na potrzeby obliczeń zmęczeniowych oznacza to konieczność wyznaczania zużycia zasobu eksploatacyjnego metodami zastępczymi.

*Autorzy dziękują Kopalni Węgla Brunatnego Turów za umożliwienie wykorzystania w niniejszej publikacji danych pochodzących z systemu diagnostyki koparki KWK - 910/K - 17.*

## Literatura

- [1] Jakubczak Hieronim, Jankowiak Artur, Sobczykiewicz Wojciech, Kowalczyk Marek. *Metoda oceny zasobu eksploatacyjnego i ryzyka – MOZER. Pierwsze rezultaty zastosowania*. Górnictwo Odkrywkowe, 2011, 3-4: 80-91, ISSN 0043-2075
- [2] Kowalczyk Marek, Sobczykiewicz Wojciech. *Problemy realizacji projektu eksploatacyjnego – PEX konstrukcji nośnej maszyn górnictwa odkrywkowego w zakresie trwałości zmęczeniowej*. Górnictwo Odkrywkowe, 2011, 3-4: 71-79, ISSN 0043-2075
- [3] Rusiński Eugeniusz, Moczko Przemysław, Kanczewski Krzysztof. *Numerycznie – doświadczalne prognozowanie trwałości elementów ustrojów nośnych maszyn*. *Transport Przemysłowy*, 2003, 4(14): 25-29. ISSN 1640-5455
- [4] ISO 20332-1, *Cranes – Proof of competence of steel structures – Part 1: General*, 2005

## NOWOŚCI WYDAWNICZE - Z GÓRNICZEJ PÓŁKI



Na przełomie lat 2017 i 2018 nakładem Wydawnictwa Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie ukazała się dwutomowa monografia nosząca tytuł „Kopaliny towarzyszące w złożach węgla brunatnego”. Autorami pierwszego tomu „Geologiczno-surowcowe aspekty zagospodarowania kopaliny towarzyszących” są Tadeusz Ratajczak i Elżbieta Hycnar. Treść drugiego dotyczy „Prawno-ekonomicznych i górniczych aspektów zagospodarowania kopaliny towarzyszących”. Jego autorem jest Ryszard Uberman.

Monografia dotyczy kopaliny towarzyszących zalegających w złożach węgla brunatnego na terenie całej Polski. Wykonano ją w przypadku złóż i nagromadzeń tej kopaliny stosując podział na eksploatowane, perspektywiczne, satelitarne, lokalne oraz aktualnie nieprzydatne do wydobywania.

Z eksploatacją węgla brunatnego metodą odkrywkową nierozzerwalnie związany jest problem zalegających w ich nadkładzie i w podłożu kopaliny towarzyszących. Od dawna budziły one zainteresowanie surowcowe. Olbrzymi jest kilkudziesięcioletni dorobek naukowo-badawczy dotyczących tych zagadnień. Nie doczekał się on jednak jak dotąd kompleksowego, pełnego, monograficznego podsumowania. Ambicją autorów było lukę tę wypełnić.

Pierwszy tom monografii dotyczy aspektów geologiczno-złożowo-surowcowych kopaliny towarzyszących. Jego treść obejmuje rozpoznanie warunków zalegania tych kopaliny, ich wieku, litologii, składu mineralnego i chemicznego, wielkości zasobów, identyfikacji właściwości surowcowych uwarunkowanych ich rodzajem i jakością. Te ostatnie, obok zasobów, są podstawowymi kryteriami determinującymi możliwość praktycznego wykorzystania. Omówiono aktualną skalę ich zastosowania w różnych technologiach a także poddano analizie perspektywy zagospodarowania.

W drugim tomie scharakteryzowano stosowane w kopalnictwie węgla brunatnego metody eksploatacji i przeróbki tych kopaliny, a także obowiązujące w ich przypadku w Polsce podstawy prawne oraz uwarunkowania ekonomiczno-finansowe. Zaakcentowano potrzebę zabezpieczenia wydobywania i wykorzystania ich w przyszłości poprzez budowę złóż antropogenicznych. Podkreślono konieczność niezbędnych działań dla zwiększenia stopnia wykorzystania tych kopaliny i stopnia ich udziału w krajowym bilansie zasobów surowców mineralnych.

Stanowiące treść monografii zagadnienia reprezentują ważny element, w przypadku, którego istnieje potrzeba uwzględnienia ich zarówno w trakcie planowania jak i prowadzenia działalności górniczej. Mieszczą się w obszarach problemów obejmujących kompleksowe wykorzystanie wszystkich zasobów kopaliny w złożach węgla brunatnego.

Z treścią monografii można się zapoznać na stronie internetowej Wydawnictwa Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN pod adresem:

<https://min-pan.krakow.pl/wydawnictwo/wp-content/uploads/sites/4/2018/02/Ratajczak-Hycnar-2017.pdf> (I tom)  
oraz

<https://min-pan.krakow.pl/wydawnictwo/wp-content/uploads/sites/4/2018/02/UBERMAN-2017-tom-II.pdf> (II tom).