

Jerzy CZMOCHOWSKI*
Grzegorz PRZYBYŁEK
Eugeniusz RUSIŃSKI

PROBLEMY OCENY STANU TECHNICZNEGO MASZYN GÓRNICHTWA WĘGLA BRUNATNEGO PO DŁUGOLETNIJ EKSPLOATACJI

Z uwagi na występujące awarie maszyn górnictwa odkrywkowego nadal aktualny staje się problem oceny ich stanu technicznego, w tym szczególnie stanu ustroju nośnego. Obecnie w kopalniach węgla brunatnego eksploatowane są maszyny, których rodowód sięga lat sześćdziesiątych. Zdarza się również, że awarie dotyczą maszyn produkowanych w latach osiemdziesiątych. Przedstawiono metodykę oceny stanu tych maszyn, która bazuje na metodach doświadczalnych i numerycznych. Metodykę zaprezentowano na przykładzie oceny stanu jednej z koparek wieloczerpakowych.

Słowa kluczowe: stalowe konstrukcje nośne, koparki wieloczerpakowe, identyfikacja pęknięć zmęczeniowych, metoda elementów skończonych

WSTĘP

W kopalniach węgla brunatnego eksploatowane są maszyny, których okres eksploatacji dochodzi, a czasem nawet przekracza 50 lat [1, 16]. Pomijając aspekty ekonomiczne, użytkownicy tych maszyn stawiają sobie pytanie, czy eksploatacja tych maszyn jest nadal bezpieczna i jakie stwarzają zagrożenia. Ostatnio pojawiają się awarie, które pociągają za sobą duże straty materialne [1, 2]. Przykładem może być awaria koparki KWK-1400 wyprodukowana w latach 80. ubiegłego wieku [11]. Awaria nastąpiła w wyniku zerwania jednego z cięgien podtrzymujących wysięgnik przeciwwagi (rys. 1). Jak wykazały dalsze badania, zerwanie nastąpiło w wyniku pęknięcia zmęczeniowego, które z kolei było efektem błędu konstrukcyjnego i technologicznego [11]. Innym przykładem są pęknięcia zmęczeniowe osi lub półosi w układzie jazdy maszyny (rys. 2). W większości przypadków awarie są wynikiem

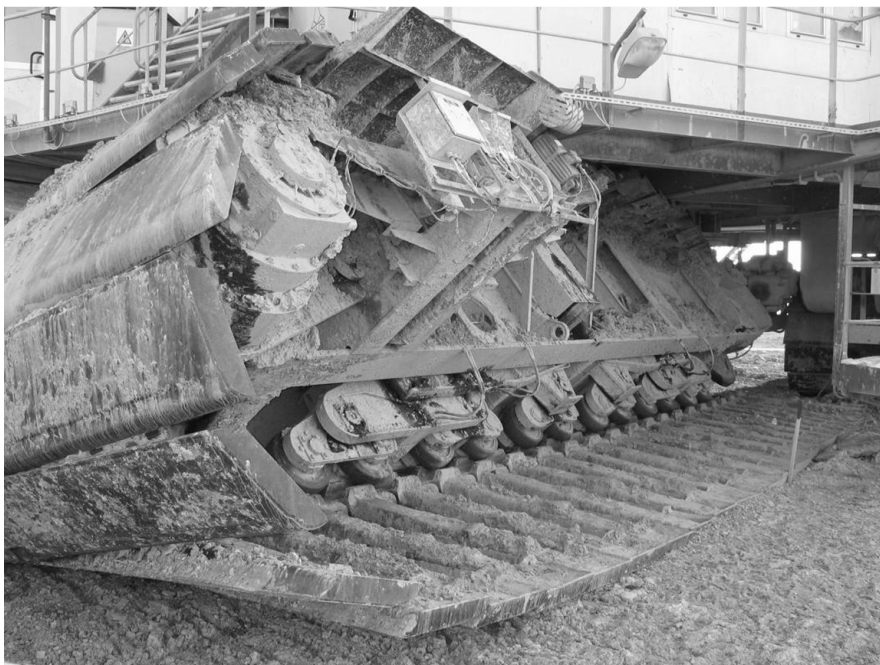
* dr hab. inż. Jerzy CZMOCHOWSKI, prof. nadzw. PW, dr inż. Grzegorz PRZYBYŁEK, prof. dr hab. inż. Eugeniusz RUSIŃSKI – Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej

zjawiska zmęczenia materiału, wskutek błędów konstrukcyjnych lub technologicznych [1, 14, 15].



Rys. 1. Awaria koparki KWK-1400

Źródło: Opracowanie własne



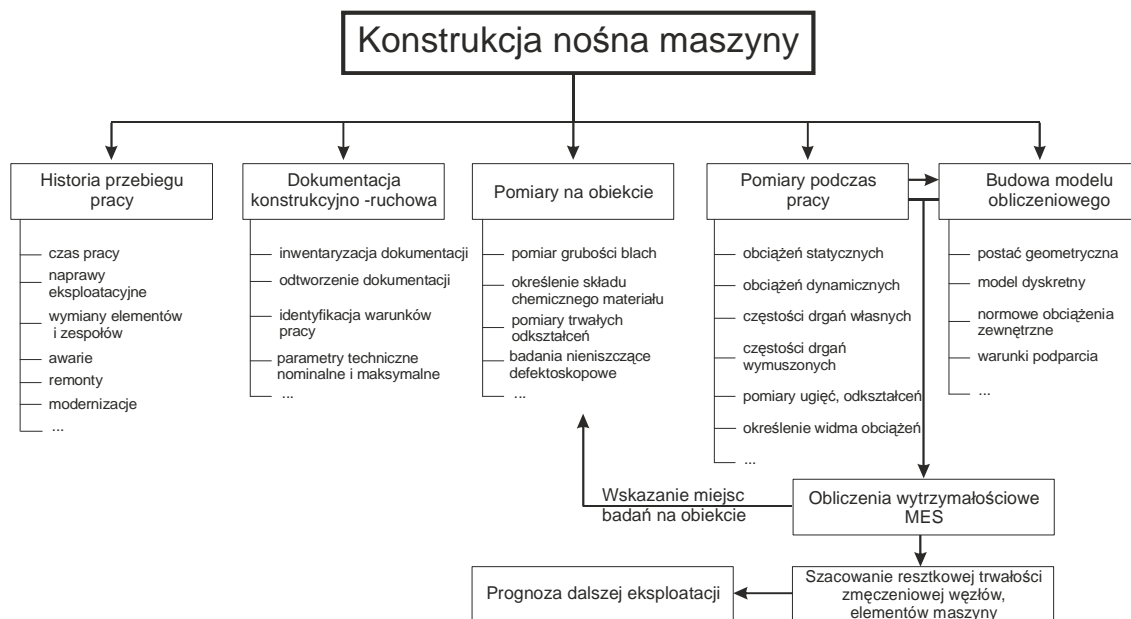
Rys. 2. Awaria wózka kierowanego zwałowarki ZGOT-11500.100

Źródło: Opracowanie własne

1. METODYKA OCENY STANU TECHNICZNEGO

W celu określenia stopnia degradacji koparek i zwałowarek (maszyn podstawowych dla górnictwa odkrywkowego) oraz ich stanu technicznego została opracowana kompleksowa metodyka badań. Istotną częścią tej metodyki jest poznanie historii przebiegu pracy, tj. eksploatacyjnej historii obiektu. Maszyny te są eksploatowane w różnych warunkach geologicznych, w związku z tym są poddawane różnym obciążeniom. W trakcie eksploatacji przeprowadza się planowe remonty główne, które mają na celu odnowę obiektu, zespołu lub elementu przed osiągnięciem stanu granicznego spowodowanego procesami zużycia i starzenia. Mimo to pomiędzy naprawami głównymi obserwuje się występowanie pęknięć doraźnych lub zmęczeniowych, które mogą być wynikiem nagłych przeciążeń. Analiza historii tych zdarzeń jest podstawą do zmian konstrukcyjnych lub modernizacji całych zespołów.

Uzupełnieniem obrazu wyęźnienia ustroju nośnego są obliczenia MES [12] przeprowadzane dla obciążeń, stanów obciążeń określonych według aktualnych norm [5]. W związku z tym jednym z ważniejszych etapów oceny stanu technicznego są obliczenia wytrzymałościowe MES, które pozwalają na weryfikację przyjętych przekrojów i lokalizację miejsc najbardziej wyęźzonych. Miejsca te są następnie przedmiotem badań obiektu fizycznego, np. badań nieniszczących defektoskopowych, pomiarów grubości blach, pomiarów odkształceń.



Rys. 3. Schemat metodyki badania stanu technicznego konstrukcji nośnej

Źródło: Opracowanie własne

Istotne dla symulacji numerycznych są również pomiary drgań, tj. ich częstotliwości, amplitud przemieszczeń, odkształceń i przyspieszeń [3]. Wartości otrzymane z tych pomiarów, o ile przekraczają wartości normowe, powinny być uwzględnione w modelach obciążeń. Z uwagi na brak danych pomiarowych z całego okresu użytkowania obiektu, przeprowadza się możliwie długotrwały pomiar naprężeń eksploatacyjnych, a uzyskane wyniki ekstrapoluje na przeszły i przyszły okres eksploatacji obiektu. Podejście takie stosowane jest powszechnie we wszystkich

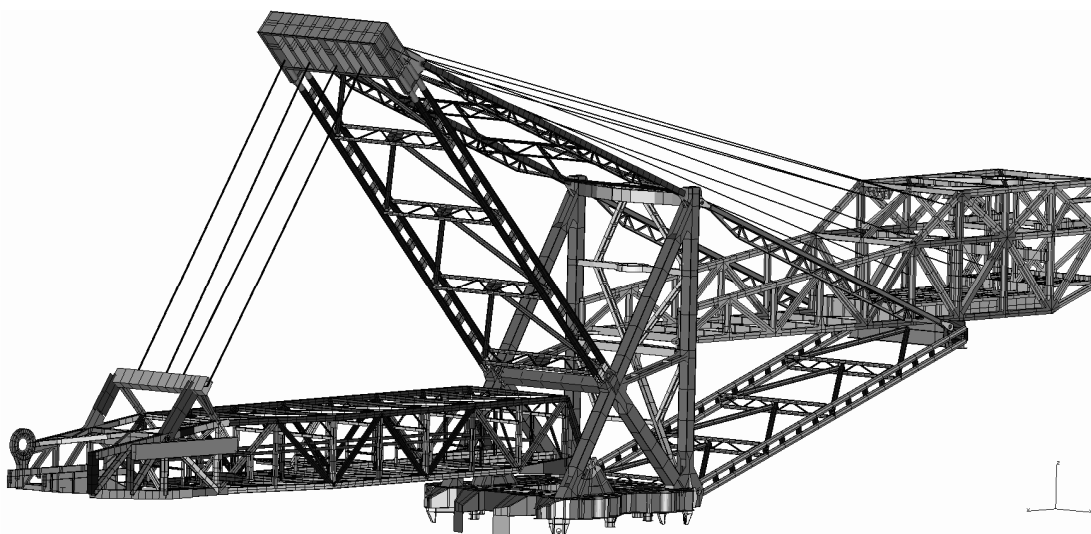
dziedzinach eksploatacji spawanych konstrukcji poddanych obciążeniom zmiennym: maszynach górnictwa odkrywkowego [6 ÷ 8, 13], maszynach budowlanych [9], dźwignicach, konstrukcjach mostów [4].

Określenie stanu degradacji maszyny podstawowej i szacowanie jej dalszego okresu eksploatacji wymaga przeprowadzenia kompleksowych badań doświadczalno-numerycznych, które zostały wymienione w schemacie blokowym (rys. 3).

2. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA KONSTRUKCJI NOŚNEJ MASZyny

Jednym z ważniejszych etapów w metodyce badań maszyn podstawowych jest określenie stanu wyęczenia ustroju nośnego, który jest zespołem spinającym pozostałe zespoły i mechanizmy. W tym celu budowany jest trójwymiarowy model dyskretny 3-D zespołu nośnego lub całej maszyny, który poddawany jest numerycznym symulacjom pracy przy wykorzystaniu metody elementów skończonych (MES) [12].

Przykładowe obliczenia wytrzymałościowe metodą elementów skończonych [10] wykonano z wykorzystaniem modelu powłokowo-belkowego (rys. 4). Do budowy modelu platformy obrotowej, przeciwwagi i wieży, oraz częściowo wysięgnika koła czerpakowego zastosowano powłokowe elementy dwuwymiarowe. Natomiast budowę modelu pozostałych elementów konstrukcyjnych nadwozia oparto na elementach jednowymiarowych. Do budowy elementów pomocniczych skorzystano z elementów ciągnowych, masowych, sztywnych, sprężystych oraz bryłowych. Zastosowano modele belkowe, które wprawdzie pozbawiają dostępu do wiedzy o lokalnych polach naprężeń w sąsiedztwie połączeń elementów konstrukcyjnych, jednakże nadają się do weryfikacji ustroju nośnego wg PN-G-47000-2 [5].

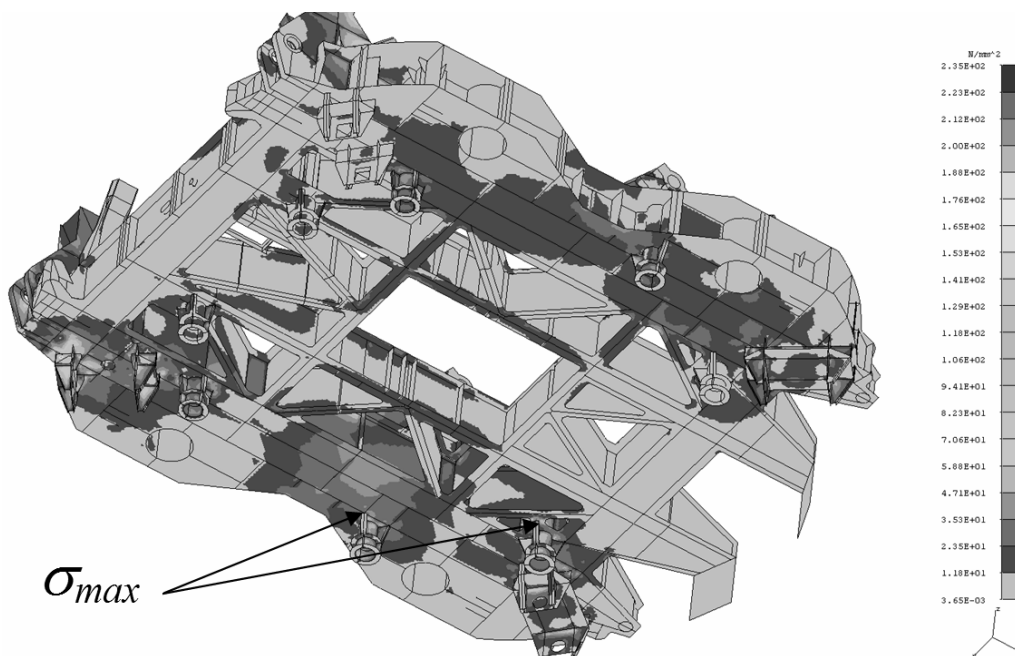


Rys. 4. Model geometryczny nadwozia koparki KWK-1500 do obliczeń statycznych

Źródło: Opracowanie własne

Obliczenia wykonano dla przypadków obciążeń określonych w normie DIN 22261-2. Wyniki obliczeń uzyskano na drodze kojarzenia cząstkowych przypadków obciążenia. Są one przemnożone przez wartości współczynników bezpieczeństwa częściowego, dlatego należy je porównywać z wartością nośności elementów konstrukcyjnych – w przypadku stali S355 i grubości do 40mm z naprężeniem 360MPa – z wyjąt-

kiem przypadku H1b, który ma zastosowania do oceny wytrzymałości zmęczeniowej [10]. Przykładowe wyniki z obliczeń wytrzymałościowych platformy nadwozia koparki dla normowego przypadku obciążeń HZ3 pokazano na rysunku 5. Stwierdzono przekroczenie naprężeń dopuszczalnych. Oględziny i badania nieniszczące tego miejsca wykazały, że miejsce to było wielokrotnie naprawiane, a i tak po pewnym czasie obserwowano występujące w tym miejscu pęknięcie.



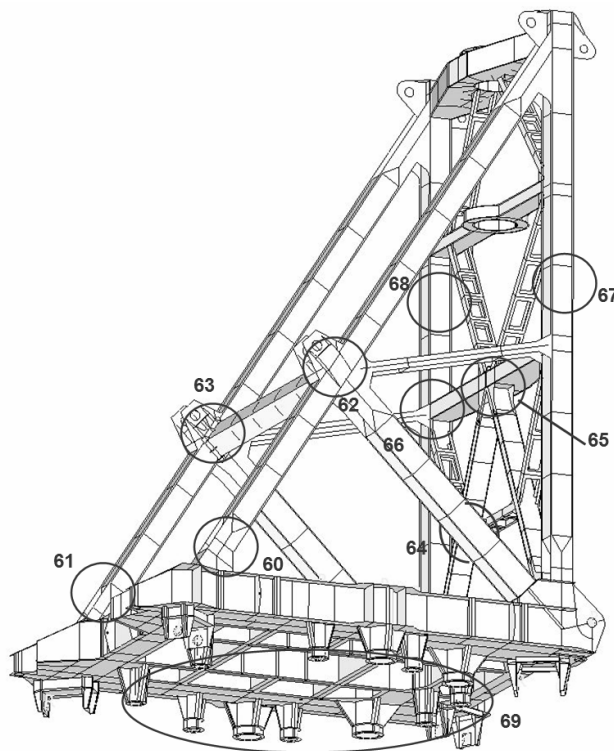
Rys. 5. Warstwy naprężeń zredukowanych HMH w przypadku obciążenia HZ3 [5] - model powłokowy platformy nadwozia

Źródło: Opracowanie własne

Numeryczna symulacja pracy maszyn podstawowych MES daje możliwość oszacowania stanu wyężnienia całej konstrukcji nośnej i tym samym otrzymuje się informacje o najbardziej wyężzonych węzłach. W następnym kroku miejsca najbardziej wyężnione bada się metodami eksperymentalnymi na obiekcie fizycznym, są to najczęściej badania nieniszczące defektoskopowe lub badania tensometryczne. Sprawdza się czy nie ma pęknięć (mikropęknięć) zmęczeniowych oraz mierzy się odkształcenia w celu określenia przyrostów naprężeń.

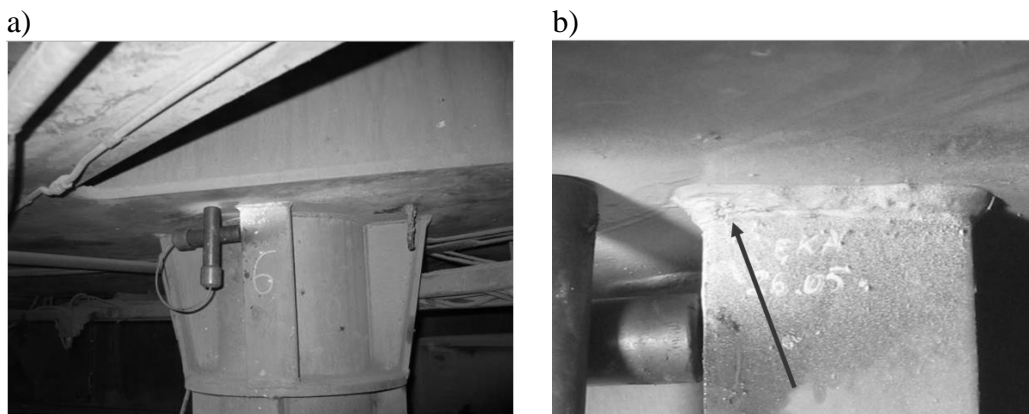
3. BADANIA NIENISZCZĄCE DEFECTOSKOPOWE

Ustroje nośne, które narażone są na obciążenia zmienne, czy rezonans, ich węzły poddaje się badaniom nieniszczącym defektoskopowym. Na przykład w koparce kołowej takimi zespołami są wysięgnik koła czerpakowego, wysięgnica, wieża, ciągnia i wysięgnik przeciwwagi. Platforma obrotowa wraz z wieżą są najistotniejszymi elementami koparki kołowej. Odpowiedzialne są nie tylko za ruch obrotowy maszyny, ale również za prawidłowe posadowienie wysięgników przeciwwagi, koła czerpakowego oraz wysięgnicy. Wyznaczone miejsca badań przedstawiono na rysunku 6. Podczas wykonywania badań nieniszczących węzłów konstrukcyjnych wysięgnicy zastosowano metodę magnetyczno-proszkową.



Rys. 6. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na nadwoziu

Źródło: Opracowanie własne



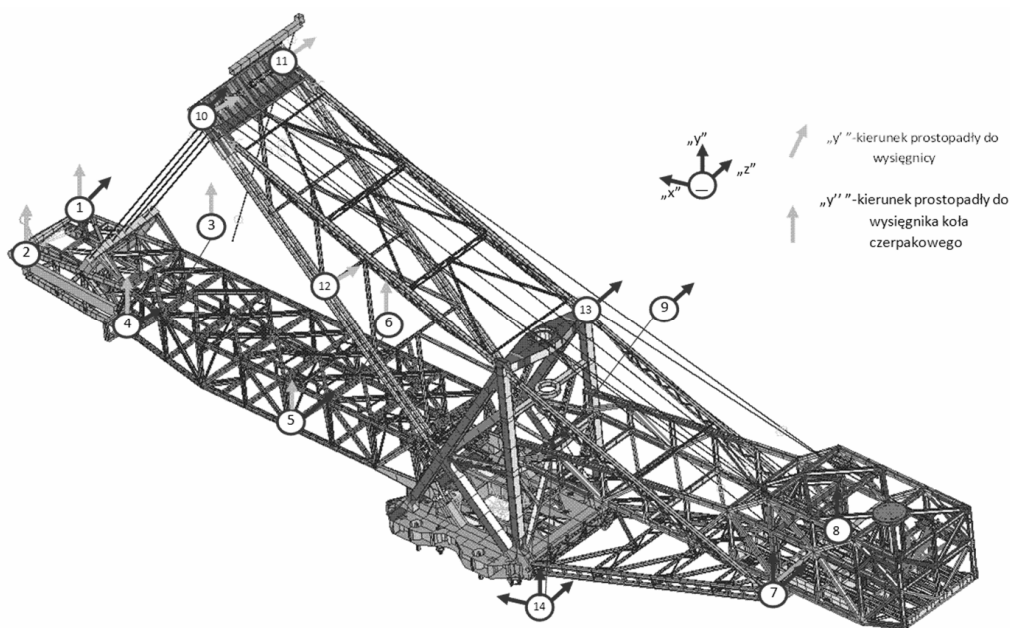
Rys. 7. Węzeł badany nr 69, widoczne pęknięcie zmęczeniowe przy spoinie wspornika rolki prowadzącej mechanizmu obrotu głównego koparki: a) widok ogólny, b) zbliżenie

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono występowanie wad w postaci pęknięć w konstrukcji wsporników rolek prowadzących mechanizmu obrotu głównego koparki (rys. 7). Element ten jest bardzo istotny w zapewnieniu stabilności całego nadwozia. W przypadku pęknięcia na wskroś takich wsporników całe nadwozie może zjechać z szyny mechanizmu obrotu i spowodować poważną katastrofę.

4. POMIARY ODDZIAŁYWAŃ DYNAMICZNYCH

Kolejnym ważnym etapem w ocenie stanu technicznego maszyn są pomiary drgań. Pomiary wykonywano, wykorzystując czujniki przyspieszeń i układy tensometryczne. Rozmieszczenie punktów pomiarowych pokazano na rysunku 8. W punktach pomiarowych występowały 1, 2 lub 3 tory pomiarowe odpowiadające odpowiednim kierunkom. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów otrzymywano widma amplitudowe przyspieszeń (rys. 9), w najistotniejszym paśmie częstości drgań konstrukcji nośnej. Spośród analizowanych przebiegów wytypowano te, w których wartości średnie przyspieszeń były największe. Wyniki odnoszą się do przypadku urabiania węgla lub nadkładu.



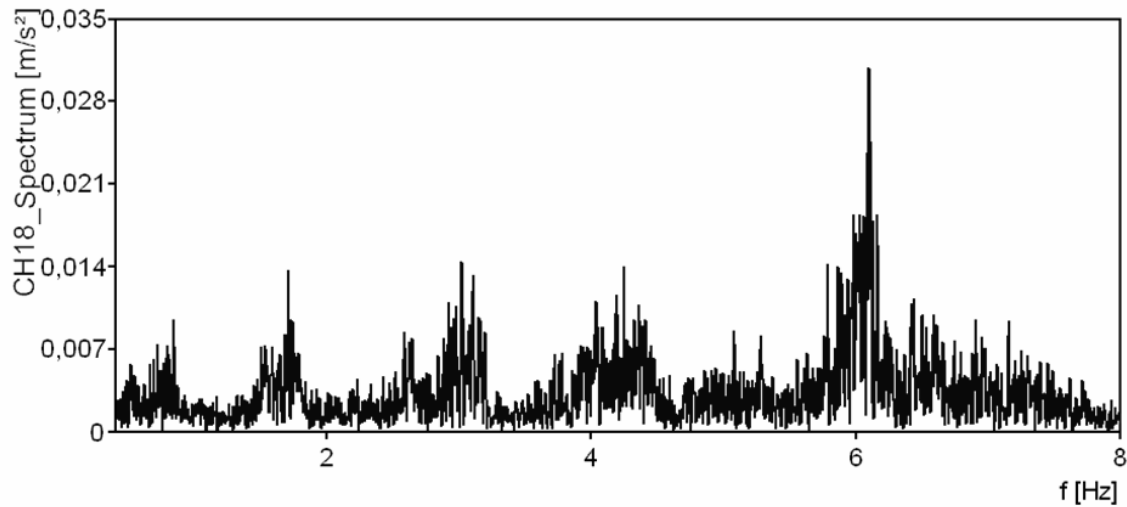
Rys. 8. Lokalizacje i kierunki pomiaru przyspieszeń na konstrukcji nośnej koparki KWK-1500

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przebiegu w tensometrycznym punkcie pomiarowym wyznaczono podstawową częstotliwość wymuszeń f_0 wynoszącą ok. 1,04Hz. Z pomiarów przyspieszeń w punktach pomiarowych na ustroju nośnym koparki obliczono wartość średnią kwadratową a_{RMS} . Wartości a_{RMS} posłużyły do obliczenia współczynników dynamicznych istotnych z punktu trwałości ustroju nośnego wg następującej zależności $D = a_{RMS}/g$, gdzie $g = 9,81\text{m/s}^2$.

Średnie wartości przyspieszeń obliczono na podstawie przebiegów drgań w paśmie częstości do 8Hz, w którym mieszczą się drgania własne i wymuszone ustroju nośnego istotne z punktu trwałości ustroju nośnego. Pozyskane z pomiarów wartości współczynników dynamicznych [10] w większości punktów pomiarowych są mniejsze od typowych ich odpowiedników wg PN-47000-2 [5]. Wyróżnia się wartość współczynnika dynamicznego $D = 1/24$ dla punktu 13 (rys. 8) wyznaczonego na podstawie przebiegu, którego widmo amplitudowe przedstawiono na rysunku 9. Dominuje w nim częstotliwość o wartości ok. 6,1 Hz występująca również podczas przejazdu maszyny i obrotu nadwozia. Otrzymana wartość jest większa od wartości, którą przyjmuje się

według normy. Wartości te uwzględniono w obliczeniach wytrzymałościowych MES ustroju nośnego.



Rys. 9. Widmo amplitudowe przyspieszeń w punkcie pomiarowym 13 podczas urabiania nadkładu

Źródło: Opracowanie własne

WNIOSKI

Podsumowując, można stwierdzić, że na podstawie tak zaproponowanej metodyki badań można określić, w jakim stanie technicznym jest dana maszyna podstawowa (koparka, zwałowarka). Miejsca najbardziej wyężone wyznaczone metodą elementów skończonych, pozwoliły określić miejsca do badań metodami nieniszczącymi. Węzły, w których naprężenia przekroczyły wartości dopuszczalne, zalecono do okresowej kontroli. Metodyka ta daje możliwość oszacowania trwałości resztkowej najbardziej wyężonych węzłów i elementów ustrojów nośnych maszyn podstawowych.

Otrzymane informacje z badań obiektów fizycznych oraz wyniki z numerycznych symulacji pracy tych maszyn w zakresie statycznym i dynamicznym, pozwalają oszacować ich trwałość eksploatacyjną. W niektórych przypadkach wnioski końcowe dają kopalniom informacje, że w tym stanie degradacji maszyna podstawowa lub jej zespół np. platforma, portal nie będzie mogła być użytkowana do końca eksploatacji odkrywki kopalni. Otrzymane wyniki i podsumowania dają bardzo cenne wskazówki przy długoterminowym planowaniu modernizacji i uzupełnianiu maszyn w kopalniach odkrywkowych.

LITERATURA

- [1] Babiarz S., Dudek D., *Kronika awarii i katastrof maszyn podstawowych w polskim górnictwie odkrywkowym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
- [2] Bosnjak S., Zrnić N., Simonović A., Momcilović D., *Failure analysis of the end eye connection of the bucket wheel excavator portal tie-rod support*, [in:] "Engineering Failure Analysis", 16 (2009), pp. 740-750.

- [3] Czmochowski J., Identyfikacja modeli modalnych maszyn urabiających w górnictwie węgla brunatnego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [4] Czudek H., Pietraszek T., Trwałość stalowych konstrukcji mostowych przy obciążeniach zmiennych, WKiŁ, Warszawa 1980.
- [5] DIN 22261-2: 1998-01 *Bagger, Absetzer und Zusatzgeräte in Braunkohlentagebauen*, Teil 2: Berechnungsgrundlagen (polski odpowiednik PN-G-47000-2).
- [6] Kowalczyk M., Czmochowski J., Rusiński E., Construction of diagnostic model of the states of developing fault for working part of the multi-bucket excavator, [in:] "Maintenance and reliability", nr 2 (42)/2009, pp. 17-24.
- [7] Kowalczyk M., *Wymiarowanie spawanych konstrukcji nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego w zakresie trwałości zmęczeniowej*, Raport serii PRE 1/2010, Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
- [8] Kowalewski J., Assessment of Remaining Fatigue Life for Surface Mining Equipment, [in:] "Surface Mining", 53(2001) No. 4.
- [9] Malinowski J., Myśliwiec J., *Evaluation of Fatigue Life and Strength of Chosen Sub-Assemblies of Bucket Loader*, [in:] 1st Conference Off-Road Machines and Vehicles in Theory and Practice, Wrocław 1996, pp. 273- 279.
- [10] Rusiński E. i zespół, Badania, ekspertyzy i diagnostyka maszyn podstawowych KWK-1500s, KWK-1200M, SchRs-1200, cz. 3. Badania koparki KWK-1500, Raport serii SPR nr 092/2009, IKiEM, PWr, Wrocław 2009.
- [11] Rusiński E., Czmochowski J., Iluk A., Kowalczyk M., *An analysis of the causes of a BWE counterweight boom support fracture*, [in:] "Engineering Failure Analysis", 17 (2010), pp. 179-191.
- [12] Rusiński E., Czmochowski J., Smolnicki T., Advanced finite element method for load-carrying structures of machines (in Polish), *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [13] Rusiński E., Moczko P., Kanczewski K., *Numeryczno-doświadczalne prognozowanie trwałości elementów ustrojów nośnych maszyn*, [w:] „Transport Przemysłowy”, 4/2003, s. 25-29.
- [14] Rusiński E., *Design Principles for Supporting Structures of Self-Propelled Vehicles*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [15] Sobczykiewicz W., Kowalczyk M., *Realizacja zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego konstrukcji nośnych MRC*, [w:] „Górnictwo Odkrywkowe”, 4-5/2009.
- [16] Wocka N., Maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego o dużym stażu eksploatacyjnym – przedłużenie trwałości czy likwidacja, [w:] „Górnictwo Odkrywkowe”, XXXVI 4(1994).

PROBLEMS OF SURFACE MINING MACHINES DIAGNOSIS AFTER LONG TIME OF OPERATION

Summary

Due to frequent breakdowns of surface mining machinery, it is necessary to constantly control and diagnose it. A number of such machines were produced in the sixties or even the eighties. The methodology of evaluating the technical condition of load-carrying structures was presented. The procedure of a complete numerical and experimental diagnosis was shown on the basis of a bucket wheel excavator.

Key words: *steel load-carrying structures, bucket wheel excavators, identification of fatigue cracks, finite elements method*

Artykuł recenzował: dr hab. inż. Tadeusz SMOLNICKI, prof. nadzw. PWr