

# METODA OCENY STANU TECHNICZNEGO KONSTRUKCJI NOŚNYCH MASZYN PODSTAWOWYCH GÓRNICTWA ODKRYWKOWEGO PO DŁUGOLETNIJ EKSPLOATACJI

## METHOD OF TECHNICAL STATE ASSESSMENT OF LOAD BEARING STRUCTURES IN BASIC MACHINES FOR OPEN CAST MINING AFTER MANY YEARS OF OPERATION

Jerzy Alenowicz, Marek Onichimiuk, Andrzej Wojtowicz – „Poltegor-Institut” Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław

---

*Przedstawiono specyfikę budowy i użytkowania konstrukcji nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego. Scharakteryzowano obciążenia statyczne i dynamiczne konstrukcji nośnych. Podano przyczyny prowadzenia badań stanu technicznego konstrukcji nośnych po długoletniej eksploatacji. Opisano badania diagnostyczne aktualnego stanu technicznego oraz wskazano na rosnącą rolę badań dotyczących prognozowania trwałości. Opisano szczegółowo „System mechatroniczny ciągłej diagnostyki wytężenia ustroju nośnego maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego” jako skuteczne narzędzie do prognozowania trwałości konstrukcji nośnych.*

*Zestawiono opisane powyżej badania formułując na ich podstawie metodę oceny stanu technicznego konstrukcji nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego po długoletniej eksploatacji.*

**Słowa kluczowe:** *maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego, konstrukcje nośne, stan techniczny, metoda, ocena, badania, trwałość.*

*Specificity of construction and use of load bearing structures in basic machines for open cast mining have been presented in the paper. The static and dynamic loads of load bearing structures have been characterized. The reasons for technical state testing of load bearing structures after many years of operation have been given. The diagnostic tests of the current technical state have been described. The growing importance of the tests aimed at predicting durability have been indicated. „The Mechatronic system for continuous effort diagnostics of load bearing structures in open cast mining machines” as an effective tool for predicting the load bearing structures durability has been described in detail. The tests described above have been set. On their basis the method of technical state assessment of load bearing structures in basic machines for open cast mining after many years of operation has been formulated.*

**Keywords:** *basic machines for open cast mining, load bearing structures, technical state, method, assessment, tests, durability.*

### Wstęp

Konstrukcje nośne maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego (m.p.g.o.) ze względu na poddawanie ich znacznym i długotrwałym obciążeniom (zarówno statycznym jak i dynamicznym), praktyczną niewymienialność podczas całego okresu użytkowania oraz bardzo długi czas trwania tego okresu (30-50 i więcej lat) stanowią najbardziej newralgiczny zespół decydujący o przydatności eksploatacyjnej każdej maszyny podstawowej (rys. 1). Dlatego też konstrukcje te

poddawane są z reguły najbardziej różnorodnym i złożonym badaniom umożliwiającym ocenę ich stanu technicznego. Ocena ta jest bardzo istotna ponieważ zależy od niej w dużej mierze decyzja o dalszym użytkowaniu lub nie całej maszyny, poszczególnych zespołów i części, ustalanie zakresów i harmonogramów remontów, modernizacji czy rekonstrukcji.

Badania konstrukcji nośnych można podzielić na dwa zasadnicze rodzaje:

- a) badania mające za zadanie bieżącą ocenę stanu technicznego,
- b) badania pozwalające na prognozowanie trwałości.

Ze względu na wydłużający się okres eksploatacji m.p.g.o. oraz zaawansowany wiek większości z dotychczas użytkowanych coraz częściej pada pytanie jak długo można jeszcze w bezpieczny sposób użytkować daną maszynę? Stąd też wzrasta znaczenie badań dotyczących prognozowania trwałości.

W poniższym artykule zestawiono prowadzone dotychczas badania diagnostyczne konstrukcji nośnych m.p.g.o. mające na celu ocenę ich stanu technicznego zarówno bieżącego jak i przewidywanej trwałości. Badania te zestawione w chronologiczny sposób tworzą metodę pozwalającą w praktyczny sposób dokonać oceny stanu technicznego każdej konstrukcji nośnej m.p.g.o. W metodzie tej ze względów przytoczonych powyżej szczególnie dużo miejsca poświęcono badaniom dotyczącym prognozowania trwałości. Nie pominięto przy tym badań związanych z bieżącą oceną stanu technicznego jako mających duże znaczenie dla zapewnienia ciągłości eksploatacji maszyn podstawowych i stanowiących niejednokrotnie podstawę do prowadzenia badań dotyczących prognozowania trwałości.

## **Charakterystyka obciążeń statycznych i dynamicznych konstrukcji nośnych**

### ***Obciążenia statyczne***

Duży ciężar własny powoduje większość obciążeń oddziaływujących na konstrukcję nośną. Obciążenia te, zwane dalej statycznymi, są dominującym typem obciążeń konstrukcji nośnych, co stanowi cechę charakterystyczną m.p.g.o. Potwierdzają to obliczenia wytrzymałościowe i badania eksploatacyjne powyższych konstrukcji, gdzie obciążenia statyczne dla większości elementów konstrukcji nośnej podwozi wynoszą ok. 80% wartości wszystkich oddziaływujących obciążeń, a dla konstrukcji nośnej nadwozi dla większości elementów wahają się w granicach 50-80% [1]. Do obciążeń statycznych zaliczamy też obciążenia montażowe (powstałe podczas montażu konstrukcji nośnych), których wartości nie można przewidzieć a jedynie uzyskać z pomiarów.

### ***Obciążenia dynamiczne***

Obciążenia dynamiczne związane są z procesem pracy maszyny. W przypadku koparek składają się na nie głównie obciążenia pochodzące od urabiania, a w mniejszym stopniu obciążenia wywołane transportem urobku, wiatrem, siłami bezwładności, ruchami manewrowymi itp. Obszerny opis obciążeń związanych z procesem urabiania zawarto w wielu opracowaniach [2],[3],[4],[5], stąd nie będzie on tutaj prezentowany. Przedstawiono tylko w skróty sposób obciążenia udarowe i rezonansowe jako mające szczególnie negatywny wpływ na stan konstrukcji nośnych.

W przypadku zwałowarek głównymi obciążeniami są obciążenia urobkiem, wiatrem, pochyleniem i ruchami manewrowymi.

Obciążenia udarowe powstają najczęściej podczas uderzenia czerpakiem o kamienie lub twarde przerosty, które szczególnie często występują w utworach trudno urabialnych. Siła impulsu dynamicznego jest w tym przypadku tak duża, że obciążenia w niektórych elementach konstrukcji nośnej (dotyczy głównie konstrukcji wysięgnika koła czerpakowego) są ok. pięciokrotnie większe od obciążeń normatywnych.

Ponadto przenoszone są one tak szybko na pozostałe

elementy układu urabiania i konstrukcję nośną, że wszelkie urządzenia zabezpieczające (np. sprzęgła) nie są w stanie temu całkowicie zapobiec [2]. Stąd też są one szczególnie niebezpieczne dla konstrukcji nośnych i powodują ich przedwczesne zużycie np. poprzez inicjację pęknięć zmęczeniowych.

Obciążenia rezonansowe powstają głównie w sytuacji, w której częstotliwości drgań własnych konstrukcji nośnych są bliskie lub identyczne z częstotliwościami drgań wywołanych np. pracą koła czerpakowego. W takim przypadku drgania te nakładają się na siebie tworząc potężny impuls dynamiczny mogący doprowadzić do zniszczenia całej konstrukcji nośnej [6].

## **Przegląd aktualnych metod badawczych dotyczących bieżącej oceny stanu technicznego konstrukcji nośnych**

### ***Badania konstrukcji nośnych na zgodność z dokumentacją techniczną***

Badania te są pierwszym etapem oceny konstrukcji nośnych. Polegają one na sprawdzeniu zgodności z dokumentacją techniczną: wymiarów gabarytowych oraz rozmieszczenia poszczególnych podzespołów i elementów nośnych w tych podzespołach, rozmieszczenia i kompletności najważniejszych połączeń w poszczególnych węzłach konstrukcyjnych, rozmieszczenia i kompletności urządzeń zabezpieczających konstrukcje nośne przed uszkodzeniami, kolizjami itp. Ponadto kontroli podlegają Instrukcje Kontroli Stanu Technicznego i prowadzone w nich zapisy dotyczące dotychczasowych przeglądów i badań konstrukcji nośnych, a także książki ruchu maszyny, które powinny zawierać informacje o wszelkich zmianach dokonywanych w obrębie konstrukcji nośnych, informacje dotyczące ewentualnych awarii, napraw i wykonanych modernizacji, remontów itp.

### ***Badania wizualne***

Badania te należą do najprostszych ale równocześnie bardzo skutecznych sposobów oceny stanu technicznego konstrukcji nośnej [7]. Polegają na obserwacji okiem nieuzbrojonym lub uzbrojonym (lupa, lornetka) stanu połączeń: sworzniowych, nitowych, śrubowych, spawanych, stanu węzłów, poszczególnych prętów oraz powłok antykorozyjnych, a także kontroli przy pomocy młotka i szczelinomierza stanu wszystkich połączeń. Badania te pozwalają na wykrycie początkowych pęknięć blach, prętów, połączeń oraz powstałych luzów śrub i nitów. Stwierdzone w trakcie badań nieprawidłowości stanowią podstawę do zastosowania dokładniejszych metod oceny, np. badań defektoskopowych.

### ***Badania defektoskopowe***

Badania defektoskopowe należą do grupy badań nieniszczących i mają za zadanie wykrycie i ocenę wad mających charakter nieciągłości materiału (pęcherze, wtrącenia, rozwarstwienia, pęknięcia itp.). Dobór miejsc (elementów) do badań należy przeprowadzić: wykorzystując wyniki badań wizualnych, wyniki obliczeń wytrzymałościowych badanej konstrukcji nośnej wybierając miejsca występowania maksymalnych naprężeń, ponadto należy standardowo zbadać wszystkie połączenia (węzły), których uszkodzenie może spowodować utratę stateczności badanej konstrukcji oraz elementy, które w przeszłości uległy uszkodzeniom.

W praktyce do oceny stanu konstrukcji nośnych, spośród

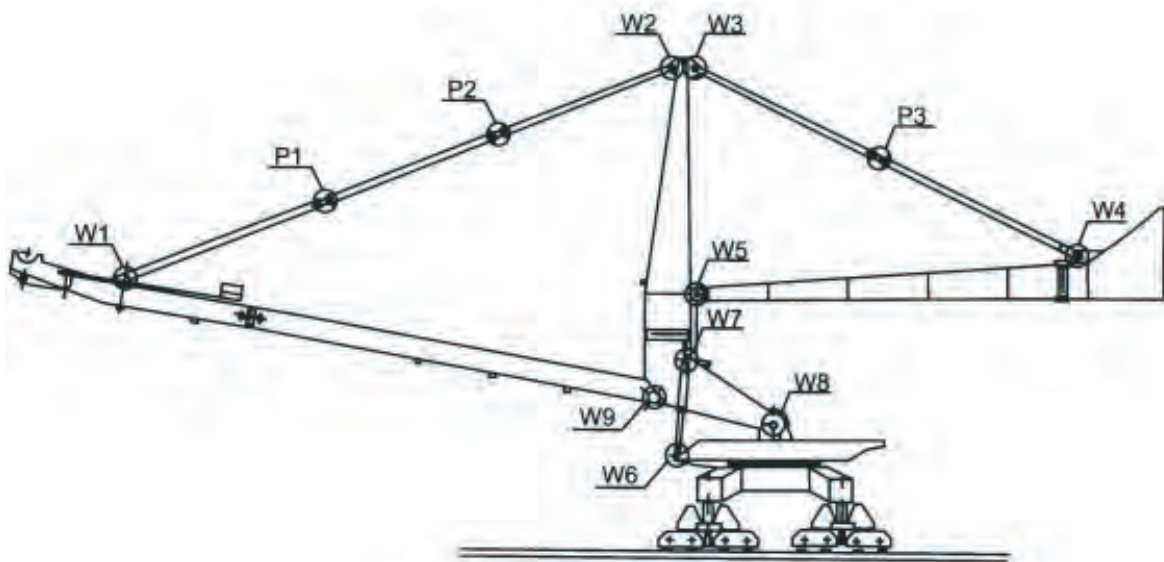


Rys. 1. Konstrukcja nośna koparki SchRs 4000 w KWB Belchatów  
Fig. 1. The load bearing structure of BWE SchRs 4000 at open cast mine Belchatow

można podać wykonane przez Poltegor-Instytut badania konstrukcji nośnych ładowarko-zwałowarek typu ŁZKS – 500 [10]. Na rysunku 2 przedstawiono schemat konstrukcji nośnej ładowarko-zwałowarki z oznaczonymi węzłami do badań defektoskopowych, a na rysunku 3 przykład wyników badań ultradźwiękowych. Poza badaniami węzłów połączeń przeprowadzono pomiary ubytków korozyjnych całej konstrukcji nośnej. Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono zakres i wykonano remonty główne wyżej wymienionych maszyn.

#### ***Badania stanu skorodowania i właściwości mechanicznych tworzywa konstrukcyjnego***

W poprzednim rozdziale wspomniano o badaniach ubytków korozyjnych materiału metodą ultradźwiękową. Problemy związane z korozją oraz starzeniem się materiału konstrukcyjnego są na tyle istotne, że wymagają oddzielnego omówienia.



Rys. 2. Schemat ładowarko - zwałowarki ŁZKS 500 - węzły do badań defektoskopowych  
Fig. 2. The stacker-reclaimer ŁZKS - 500 - nodes for defectoscopic tests

kilku różnorodnych metod powyższych badań, stosowane są najczęściej dwie tj. badania ultradźwiękowe i magnetyczno-proszkowe. W badaniach ultradźwiękowych wykorzystywane są zjawiska związane z rozchodzeniem się fal o częstotliwościach ultradźwiękowych (ponad 16000 Hz) w badanym materiale [8]. Badania prowadzone są za pomocą specjalnego urządzenia tzw. defektoskopu ultradźwiękowego.

Badania te umożliwiają dokładną lokalizację wad wewnętrznych i zewnętrznych oraz pomiar grubości elementów jednostronnie dostępnych.

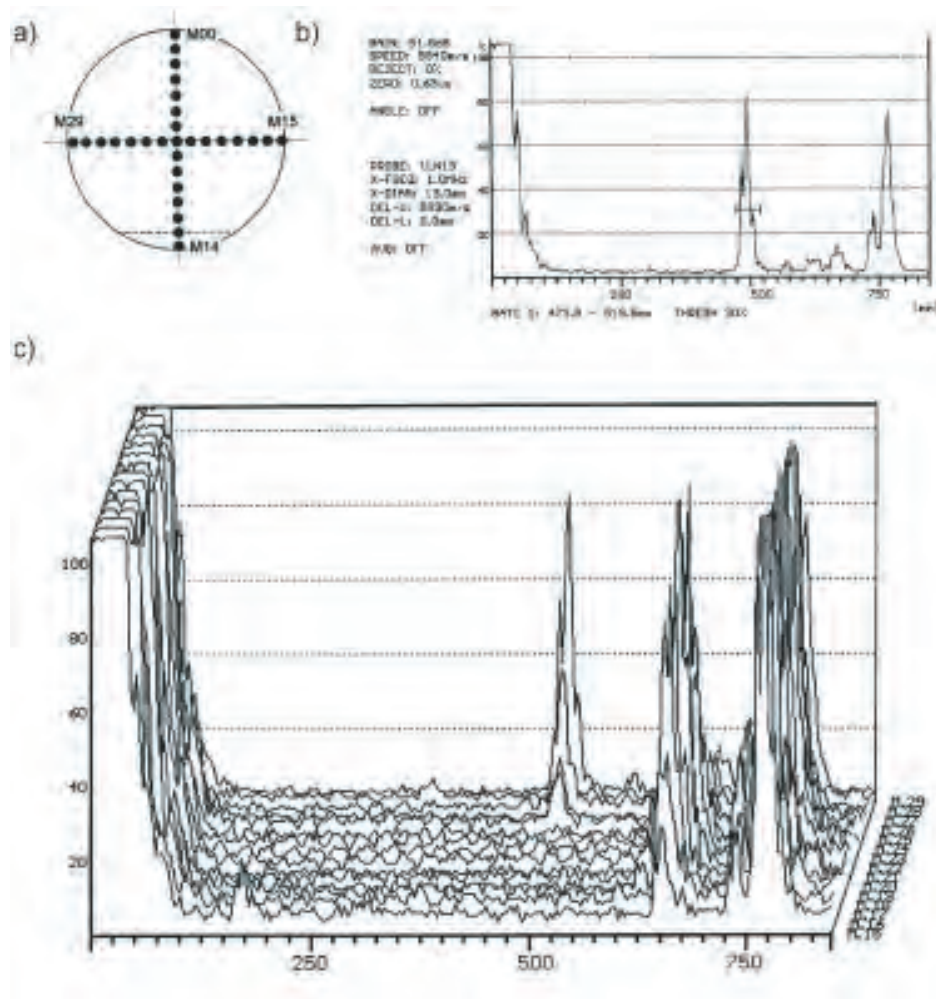
W badaniach magnetyczno-proszkowych wykorzystywane jest zjawisko rozproszenia pola magnetycznego, lub zmiany przenikalności magnetycznej w miejscach występowania wad. Mogą być zatem stosowane wyłącznie do badania elementów z materiałów ferromagnetycznych tzn. wszystkich stali konstrukcyjnych, oprócz stali wysokostopowych austenitycznych. Badania prowadzone są za pomocą defektoskopu magnetycznego.

Badania te wykorzystywane są do lokalizacji i oceny wad powierzchniowych i podpowierzchniowych [9].

Jako przykład kompleksowych badań defektoskopowych

Materiały (stale), z których zbudowane są konstrukcje nośne, pod wpływem długoletniego użytkowania podlegają procesowi starzenia się. Starzenie się materiału spowodowane jest zarówno obciążeniami zewnętrznymi jak i wewnętrznymi oraz oddziaływaniem środowiska naturalnego i ogólnie rzecz ujmując polega na zmianach struktury materiału, co z kolei powoduje obniżenie właściwości wytrzymałościowych. Stąd też należy w miarę możliwości pobrać próbki z elementów długotrwale użytkowanej konstrukcji nośnej do badań właściwości mechanicznych, w tym właściwości zmęczeniowych [11].

W celu określenia rzeczywistego wpływu korozji na właściwości mechaniczne materiału nie wystarczy stwierdzić wielkości ubytków korozyjnych jak podano w poprzednim rozdziale. Należy również przeprowadzić badania metalograficzne pobranych próbek w celu określenia rzeczywistej struktury materiału i oceny jej wpływu na wartości wielkości mechanicznych. Badania tego typu można wykonać w specjalistycznym laboratorium metalograficznym.



Rys. 3. Przykłady wyników badań ultradźwiękowych sworznia w węźle W9 z prawej strony

- a) rozmieszczenie punktów na płaszczyźnie czołowej sworznia  
b) echogram w punkcie M29

Fig. 3. Examples of ultrasonic tests of a pin in a node 9

- a) distribution of points in the pin frontal plane  
b) echogram in point M29  
c) V-SCAN diagram for points from M9 to M29

### **Badania naprężeń od obciążeń statycznych**

Charakterystykę obciążeń statycznych przedstawiono w rozdziale dotyczącym obciążeń konstrukcji nośnych. Ze względu na z reguły statyczną niewyznaczalność konstrukcji nośnych m.p.g.o. metoda obliczeniowa naprężeń od obciążeń statycznych jest niepewna, zwłaszcza dla konstrukcji poddanej długoletniej eksploatacji, gdzie część elementów mogła ulec odkształceniom trwałym, lub została wymieniona bez wstępnych napięć, co może radykalnie zmienić rozkład naprężeń w poszczególnych elementach w stosunku do wartości uzyskanych z obliczeń statycznych.

Badania obejmują zarówno konstrukcje maszyn nowych, jak i poddanych już długoletniej eksploatacji. Badania prowadzone są z wykorzystaniem tensometrii elektrooporowej i polegają na pomiarach przyrostów naprężeń w dwóch stanach: odciążonym i obciążonym [1]. Dla maszyn nowo budowanych wykorzystuje się możliwość naklejenia czujników tensometrycznych przed zmontowaniem konstrukcji nośnej, gdy nie występują jeszcze obciążenia od ciężaru własnego. Dla maszyn już eksploatowanych jako stan odciążony przyjmuje się podparcie wysięgników powodujące zluźnienie lin (ciągów) układu zwodzenia oraz lin (ciągów) zawieszenia wysięgnika przeciwwagi, lub wykorzystuje się metodę wierconego otworu [2].

Badania te umożliwiają ocenę poprawności montażu i zgodności rzeczywistego stanu wyężenia konstrukcji ze stanem przyjętym w obliczeniach. Ponadto, w praktyce eksploatacyjnej często występują sytuacje, w których zachodzi potrzeba doświadczalnego stwierdzenia faktycznych naprężeń w konstrukcji nośnej wywołanych ciężarem własnym. Przede wszystkim zachodzi to przy usuwaniu skutków awarii, modernizacji czy przebudowie, jak również przy nieprzewidzianych zmianach warunków pracy maszyn. W Poltegor-Institut wykonano dotychczas wiele badań dotyczących pomiarów naprężeń od obciążeń statycznych m.in. na trzech koparkach KWK 1500 w KWB Turów, jednej koparce KWK 1500 w KWB Adamów, koparce SchRs (KWK) 800 w KWB Konin, koparce SRs 2000 w KWB Bełchatów, koparce SRs 1200 w KWB Konin, zwałowarce ZGOT 15400 w KWB Bełchatów, zwałowarce ZGOT 5500 w KWB Bełchatów, zwałowarce ZGOT 6300 w KWB Turów [1].

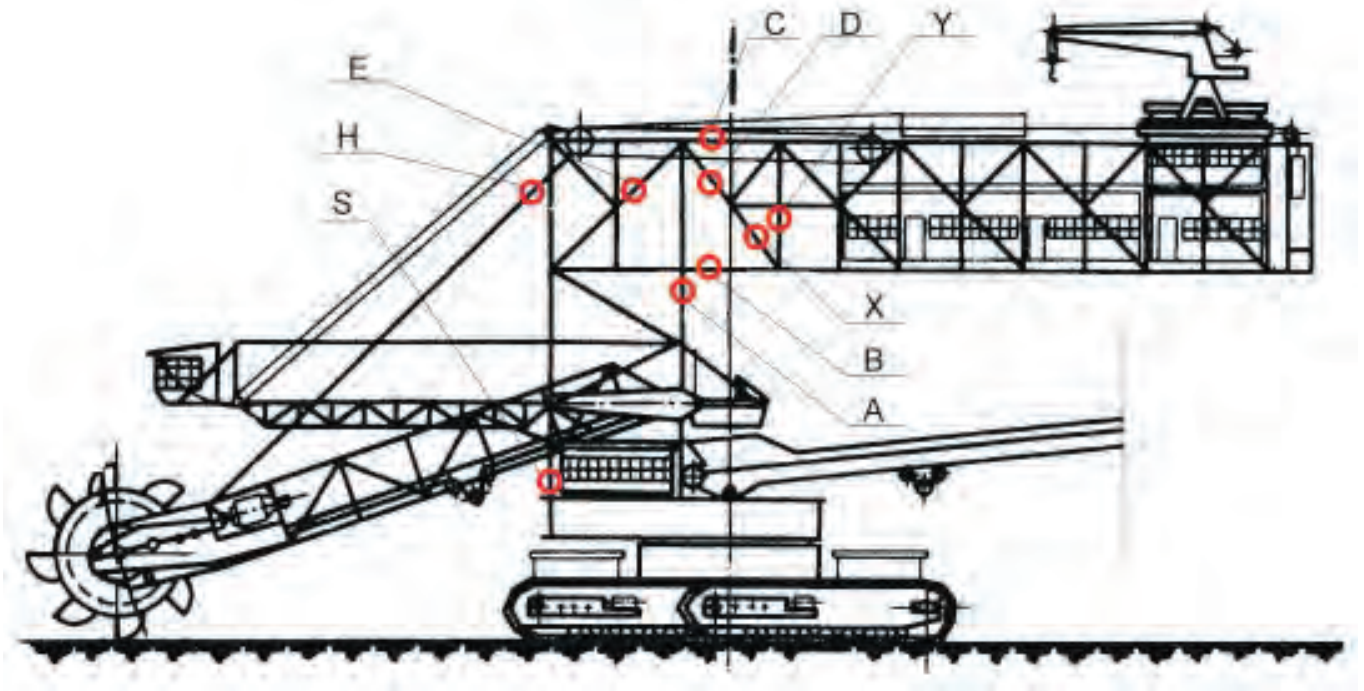
### **Badania naprężeń od obciążeń dynamicznych**

Charakterystykę obciążeń dynamicznych przedstawiono w rozdziale dotyczącym obciążeń konstrukcji nośnych. Do badań można wykorzystać te same układy pomiarowe, które

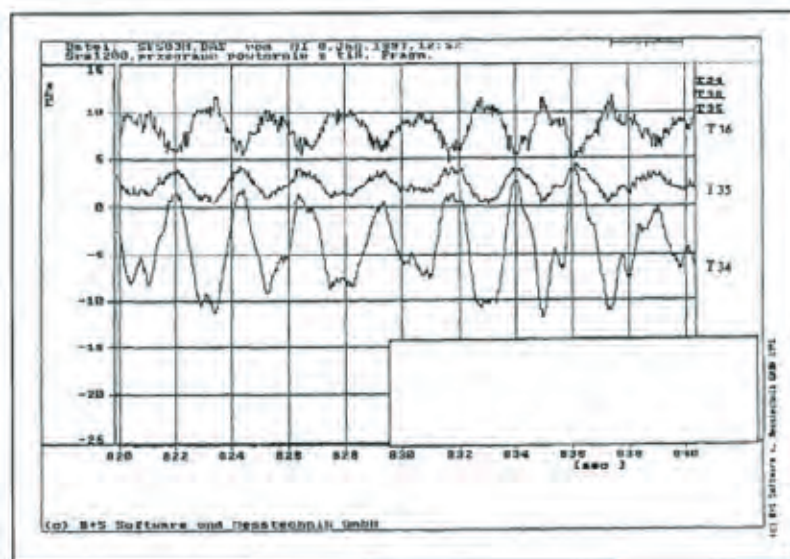
były stosowane do badań naprężeń od obciążeń statycznych. Dla uzyskania prawidłowych wyników tensometryczne układy pomiarowe wymagają zerowania. Dokonuje się tego w czasie okresowych postojów maszyn w ich ściśle określonym położeniu (bez urobku na przenośnikach) w jakim były odczytywane naprężenia od obciążeń statycznych.

Badania, tak jak w przypadku badań naprężeń od obciążeń statycznych, dotyczą maszyn nowych, jak i już eksploatowanych [7]. Prowadzone są one w czasie normalnej eksploatacji i obejmują pomiary przebiegów i przyrostów naprężeń w wybranych elementach konstrukcji nośnej, w określonych warunkach pracy. Badania powinny odbywać się w warunkach reprezentatywnych dla dalszej eksploatacji maszyny. Pożądane jest więc, by uwzględniały również najtrudniejsze warunki (w przypadku koparek - skały najtrudniej urabialne, głazy

narzutowe itp.). Pomiary naprężeń prowadzone są z wykorzystaniem tensometrii elektrooporowej. Wyniki przetwarzane są w układach cyfrowych za pomocą specjalnych systemów pomiarowych, umożliwiających dalszą obróbkę komputerową. Badania umożliwiają porównanie rzeczywiście występujących obciążeń zewnętrznych z normatywnymi stosowanymi w obliczeniach wytrzymałościowych oraz określenie naprężeń dynamicznych i wypadkowych (wraz z wartościami naprężeń statycznych od ciężaru własnego). Określenie rzeczywistych naprężeń wypadkowych pozwala na dokonanie oceny trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcji nośnej oraz wyselekcjonowanie elementów narażonych na utratę właściwości wytrzymałościowych. Badania umożliwiają również opracowanie zaleceń i uwarunkowań dotyczących sposobów dalszej bezpiecznej eksploatacji maszyn. W Poltegor-Instytut



Rys. 4. Schemat konstrukcji nośnej koparki SRs - 1200 - przekroje poddane badaniom  
Fig. 4. The load bearing structure diagram of BWE SRs - 1200 - tested cross-section



Rys. 5. Oscylogramy przyrostów naprężeń dynamicznych w przekroju C-C konstrukcji nośnej koparki SRs - 1200  
Fig. 5. Oscillograms of dynamic stresses in the C-C section of BWE's load bearing structure

wykonano dotychczas wiele tego typu badań m.in. na czterech nowobudowanych koparkach typu KWK 1500 w KWB „Turów” i KWB „Adamów”, zwałowarkach typu ZGOT 6300, ZGOT 5500 i ZGOT 15400 w KWB „Turów” i KWB „Bełchatów” oraz na zmodernizowanej koparce typu KWK 800 i koparce typu SRs - 1200 w KWB „Konin” [12]. Na rysunku 4 przedstawiono schemat konstrukcji nośnej koparki typu SRs – 1200 z zaznaczonymi przekrojami najbardziej wyťažonych elementów podanych badaniom, a na rysunku 5 przykład uzyskanych oscylogramów przyrostów naprężeń w przekroju C-C .

#### **Badania drgań**

Do badań dynamicznych zalicza się też badania drgań. Badania te obejmują pomiary częstości drgań własnych wywołanych obciążeniami impulsowymi oraz pomiary drgań wymuszonych pracą koparki [12]. Pozwala to na oszacowanie konstrukcyjnego zabezpieczenia przed drganiami rezonansowymi oraz określenia maksymalnych naprężeń wywołanych drganiami (co jest tylko w bardzo przybliżony sposób ustalane w obliczeniach wytrzymałościowych) dla różnych warunków urabiania. Do prowadzenia badań wykorzystywane są indukcyjne czujniki przyspieszeń oraz układy tensometryczne.

Liczba elementów konstrukcji wybrana do pomiarów naprężeń zarówno od obciążeń statycznych jak i dynamicznych jest ograniczona możliwościami technicznymi. Dlatego wybór tych elementów powinien się opierać na podstawach, które przedstawiono w rozdziale dotyczącym badań defektoskopowych.

#### **Badania i ocena stateczności**

Ocena stateczności nie dotyczy bezpośrednio badań stanu technicznego konstrukcji nośnych, jednak ma duży wpływ na ich bezpieczeństwo pracy, ponadto niezachowanie jej warunków może powodować dodatkowe obciążenia i awarie konstrukcji nośnych. Stąd też badania stateczności należy wykonywać przy kompleksowej ocenie stanu technicznego powyższych konstrukcji.

Badania prowadzone są zarówno na maszynach nowych jak i poddanych długiej eksploatacji.

Maszyny w czasie eksploatacji poddawane są często modernizacji, przebudowie itp. wskutek czego dochodzi do zmiany wartości i rozkładu mas własnych, a tym samym wynikowego położenia środka ciężkości. Stan ten może powodować naruszenie warunków równowagi statycznej, a w konsekwencji prowadzić do zniszczenia całej maszyny. Ponadto zmiana rozkładu i wartości mas nadwozia powoduje wzrost nierównomierności obciążeń bieżni obrotnicy, co pociąga za sobą jej deformację i szybsze zużycie. Dlatego też badania te mają bardzo duże znaczenie dla zachowania bezpieczeństwa i wymaganej trwałości maszyn podstawowych.

Badania prowadzone są w oparciu o rzeczywiste współrzędne środka ciężkości maszyny, które można uzyskać jedynie w wyniku pomiarów [13].

Stateczność określana jest w oparciu o normy ISO 5049/1 [14], lub DiN 22261-2 [15]. Powyższe badania pozwalają na przeprowadzenie korekty stateczności w przypadku niespełnienia wymagań norm.

Stosowane są różnorodne metody korekty stateczności m.in.: obciążanie przeciwwagi dodatkowym ciężarem, skracanie wysięgników roboczych, ograniczanie wysuwu.

W przypadku maszyn nowych badania prowadzone są po zakończeniu montażu, przed oddaniem maszyny do ruchu. Wynika to z faktu, że w przypadku tak złożonych konstrukcyjnie obiektów jakimi są m.p.g.o. zwykle zachodzi potrzeba korekty rzeczywistego położenia środka ciężkości do jego położenia obliczeniowego.

W ostatnich czterdziestu latach Poltegor-Instytut wykonał badania stateczności wszystkich typów maszyn podstawowych eksploatowanych w KWB Konin, KWB Turów i KWB Adamów [13].

#### **Przegląd dotychczasowych metod i najnowszych badań i doświadczeń dotyczących oceny i prognozowania trwałości konstrukcji nośnych m.p.g.o.**

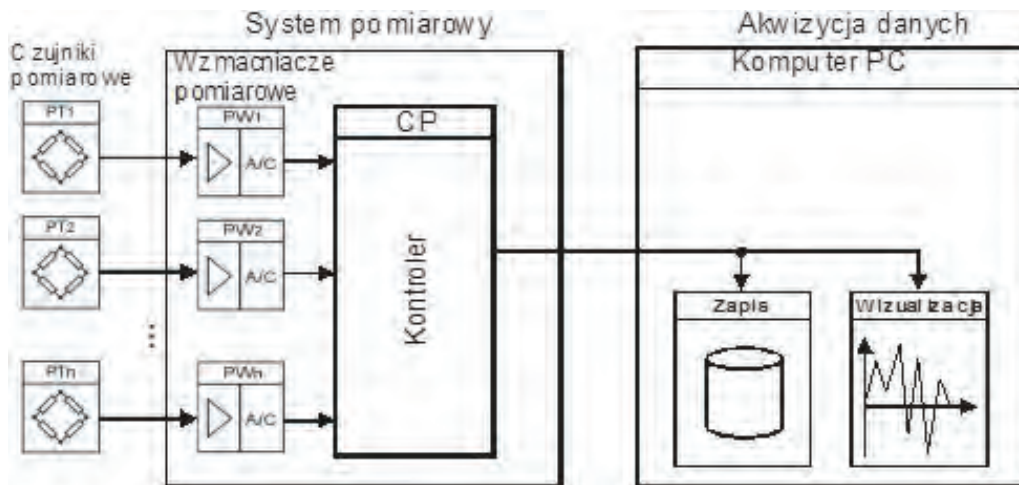
##### **Stan dotychczasowy**

Jak podano w poprzednich rozdziałach konstrukcje nośne m.p.g.o. poddawane są długotrwałym obciążeniom dynamicznym o charakterze losowym i wartościach chwilowych często kilkakrotnie przekraczających wartości normatywne. Ponadto pracują one w trudnych warunkach, co sprzyja powstawaniu korozji, a zwłaszcza korozji międzykrystalicznej na granicach ziaren metalu. Czynniki te powodują w praktyce powstawanie i rozwój pęknięć zmęczeniowych, co prowadzi często do awarii, a nawet katastrof konstrukcji nośnych, a tym samym całych maszyn. Stąd też, zarówno w Polsce jak i na świecie, prowadzi się szereg prac dotyczących oceny stanu wyężenia konstrukcji nośnych, zwłaszcza w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej.

Badania realizowane są głównie z wykorzystaniem tensometrii elektrooporowej, chociaż coraz częściej stosuje się inne metody, takie jak metoda elastooptyczna, czy coraz bardziej rozwijająca się metoda termowizyjna [2],[7]. Wyniki przetwarzane są w układach cyfrowych za pomocą specjalnych systemów pomiarowych umożliwiających dalszą obróbkę komputerową.

Typowy układ do tensometrycznych badań stanu wyężenia konstrukcji nośnych maszyn górnictwa odkrywkowego przedstawiono na rysunku 6 [16]. Składa się on z tensometrycznych czujników pomiarowych PT1...PTn naklejonych na elementach konstrukcji nośnej. Sygnały z czujników pomiarowych wprowadzone są przewodami pomiarowymi do systemu pomiarowego. System pomiarowy składa się ze wzmacniaczy pomiarowych PW1...PWn, które są wyposażone w przetworniki analogowo-cyfrowe A/C zamieniające sygnał analogowy na dane cyfrowe. Nadzór nad przekazywaniem danych pełni kontroler pomiarowy CP.

Dane z czujników pomiarowych pozyskiwane przez system pomiarowy przekazywane są bezpośrednio do komputera zewnętrznego PC, w którym dane pomiarowe są zapisywane lub prezentowane na ekranie. Tradycyjne układy pomiarowe nie wykonują przetwarzania danych na bieżąco, a służą do zapisu zmierzonych wartości. Obróbka i analiza danych następuje dopiero po ich akwizycji i zakończeniu cyklu pomiarów i dopiero po przeprowadzonych badaniach wyciągane są wnioski dotyczące na przykład aktualnego stanu wyężenia danej konstrukcji nośnej maszyny podstawowej. Cykle badań dla typowych pomiarów wyężenia konstrukcji nośnych prowadzone są w okresach od kilku dni do kilku miesięcy w zależności od potrzeb [2],[7],[11]. Badania te, jakkolwiek bardzo przydatne, w zakresie oceny



Rys. 6. Schemat układu do tensometrycznych badań stanu wyężenia konstrukcji nośnych  
Fig. 6. The system diagram for the strain gauge effort tests of load bearing structures

bieżącego stanu wyężenia konstrukcji nośnych, ze względu na specyfikę zjawiska zmęczenia nie pozwalają w pełni na jego dalszą prognozę.

Przykładem są tu badania opisane w rozdziale dotyczącym badań naprężeń pochodzących od obciążeń dynamicznych. Polegają one na pomiarze naprężeń od obciążeń statycznych i obciążeń dynamicznych, wyznaczeniu na tej podstawie naprężeń wypadkowych i porównaniu ich wartości z dopuszczalnymi naprężeniami zmęczeniowymi zawartymi w normach. Zatem badania te pozwalają na określenie bieżącego stanu wyężenia w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej, nie umożliwiają one jednak dokonania prognozy postępującego zmęczenia.

Specyfika zmęczenia polega na tym, że zachodzi ono w stosunkowo długim czasie. Dlatego też jego ocena musi zachodzić na podstawie długoterminowych badań cykli naprężeń dynamicznych jakim poddawana jest konstrukcja nośna. Badania te, mówiąc w skrócie, polegają na zliczaniu dotychczasowej liczby cykli przeniesionych przez konstrukcję, obliczeniu maksymalnej ilości cykli jaką konstrukcja może przenieść, a różnica pomiędzy ilością cykli maksymalną, a dotychczas przeniesioną pokazuje ile rzeczywiście cykli zmęczeniowych może jeszcze przenieść konstrukcja. Tworzy to zasób pozostałej trwałości konstrukcji nośnej tzw. trwałość resztkową [17].

Powyższe zadanie spełnia opracowany w IGO Poltegor „Mechatroniczny system ciągłej diagnostyki wyężenia ustroju nośnego (konstrukcji nośnej) m.p.g.o.” [16].

### Opis systemu

Podstawowym zadaniem systemu jest ocena stanu wyężenia konstrukcji nośnych zarówno w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej jak i doraźnej. Ocena prowadzona jest w sposób ciągły, a wyniki są przekazywane na bieżąco do użytkownika, co umożliwi odpowiednio wczesne podejmowanie działań zapobiegających ewentualnym awariom na skutek wyczerpywania się zasobu trwałości zmęczeniowej lub przekroczenia warunku wytrzymałości doraźnej.

System ten składa się z czterech modułów rozmieszczonych na badanej konstrukcji nośnej. Są to moduł pomiarowy D, obliczeniowy O, dystrybucji wyników DW i zasilania Z (rys. 7) [16].

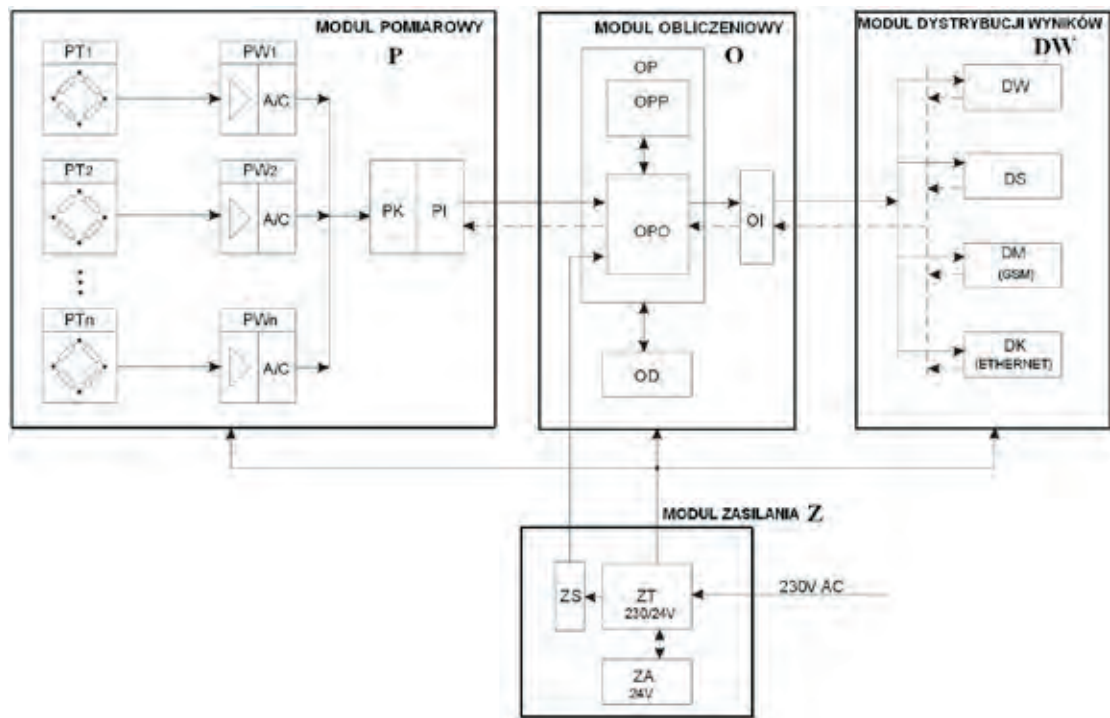
Zadaniem modułu pomiarowego P jest zbieranie informacji o naprężeniach z punktów diagnostycznych, wstępne ich

przygotowanie i zamiana na postać cyfrową umożliwiającą ich dalsze przetwarzanie. Moduł pomiarowy składa się z czujników pomiarowych  $PT_1 \dots PT_n$ , urządzeń wzmacniających  $PW_1 \dots PW_n$ , przesyłających i dopasowujących sygnały pomiarowe  $AC_1$ , PK, PI oraz układów cyfryzacji.

Jako czujniki pomiarowe do pomiaru wartości naprężeń używane są tensometry elektrooporowe, które mocowane są bezpośrednio na konstrukcji, mogą też być użyte tensometry światłowodowe. Następnie sygnały w postaci cyfrowej są wprowadzane do modułu obliczeniowego.

Moduł obliczeniowy O składa się z komputera OP wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie podstawowe OPP i obliczeniowe OPO, urządzeń (baz) gromadzenia danych OD oraz interfejsów komunikacyjnych OI. Oprogramowanie podstawowe to system uruchomieniowy i zarządzający procesami obliczeniowymi. Zadaniem tego systemu jest uruchomienie startowe i po przywróceniu zasilania, rozruch i nadzór pracy oprogramowania obliczeniowego i innego niezbędnego do zarządzania systemem monitorowania. Oprogramowanie obliczeniowe stanowią programy przetwarzające i analizujące dane pomiarowe i są one opracowane w ramach systemu ciągłego monitoringu. Głównym zadaniem modułu obliczeniowego jest ocena zasobu trwałości zmęczeniowej na podstawie przekształconych sygnałów z układu pomiarowego. W tym celu zliczane są cykle zmienne (zmęczeniowe) naprężeń, wyznaczone są widma amplitud naprężeń i na podstawie uzyskanych widm dokonywana jest ocena trwałości zmęczeniowej. Do zliczania cykli zmęczeniowych oraz tworzenia odnośnych widm naprężeń zastosowano metodę dwuparametrowego zliczania cykli „Rain Flow”. Natomiast oceny trwałości zmęczeniowej dokonano w oparciu o hipotezę kumulacji uszkodzeń Palmgrena - Minera [17]. Zliczane cykle zmienne są gromadzone w tablicy (bazie) widma obciążeń zmiennych.

Dla maszyn już eksploatowanych system monitorowania został wyposażony w tablicę widma obciążeń pierwotnych. Tablica ta jest opracowywana jednorazowo dla każdej monitorowanej konstrukcji nośnej przed uruchomieniem systemu, po przeprowadzeniu odpowiednich pomiarów i analiz zgodnie z opracowaną w ramach systemu metodą wyznaczania widma obciążeń pierwotnych. Jest to bardzo istotne dla maszyn poddanych długoletniej eksploatacji ponieważ umożliwia w ocenie wytrzymałości zmęczeniowej uwzględnienie dotych-



Rys. 7. Schemat systemu ciągłej diagnostyki wyężenia ustrojów nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego  
 Fig. 7. Diagram of the system for continuous effort diagnostics of load bearing structures in open cast mining machines

czasowej liczby cykli naprężeń przeniesionych przez badaną konstrukcję nośną.

Po uwzględnieniu widma obciążeń zmiennych i obciążeń pierwotnych, oraz rodzaju karbu i właściwości materiałowych, wyznaczany jest zasób trwałości zmęczeniowej konstrukcji nośnej jako czas pracy do wystąpienia awarii. Wartość tego czasu jest wyprowadzana z systemu monitorowania jako podstawowa informacja wyjściowa. Jest ona wartością najmniejszej trwałości dla całej konstrukcji nośnej maszyny. Dodatkowo w zależności od ewentualnych konkretnych aplikacji, system może generować inne informacje np. dotyczące kolizji maszyny, okresowych przeciążeń konstrukcji, czasie zaistnienia awarii itp.

Zadaniem modułu dystrybucji wyników DW jest przekazywanie informacji wyjściowych o stanie wyężenia konstrukcji nośnej do użytkownika lub obsługi maszyny. Informacje te mogą być przekazywane za pomocą wyświetlaczy, sygnalizatorów, modemów (np. GSM) lub sieci komputerowych (np. Ethernet).

Zadaniem modułu zasilania Z jest dostarczenie energii elektrycznej do poszczególnych modułów systemu. Składa się on z zasilacza 230/24 V i urządzenia do podtrzymania zasilania w razie przerw w dopływie energii.

Powyższy system jest również przeznaczony do oceny stanu wyężenia konstrukcji nośnej w zakresie wytrzymałości doraźnej. Spowodowane jest to specyfiką pracy maszyn górnictwa odkrywkowego, gdzie w praktyce dochodzi nierzadko do przekroczenia wartości naprężeń od obciążeń doraźnych (np. w wyniku kolizji wysięgników: roboczych, przeciwwagi i załadowniczych ze skarpą, kolizji poszczególnych zespołów roboczych pomiędzy sobą, kolizji poszczególnych maszyn współpracujących ze sobą w ciągu technologicznym), które mogą spowodować odkształcenia plastyczne lub zniszczenie elementów konstrukcji nośnej. Do oceny stanu wyężenia w zakresie wytrzymałości doraźnej wykorzystywane są te same układy pomiarowe, jak w przypadku oceny wytrzyma-

łości zmęczeniowej. Sygnały pomiarowe po ich obróbce i przekształceniu na postać cyfrową są wprowadzane do modułu obliczeniowego, gdzie po korekcie o wartość wstępnego sprężenia konstrukcji obliczane są naprężenia zastępcze i porównywane z wartościami naprężeń dopuszczalnych. W przypadku możliwości przekroczenia wartości naprężeń dopuszczalnych z systemu monitorowania wyprowadzany jest sygnał ostrzegawczy. Sygnał ten jest przesyłany do użytkownika i obsługi maszyny. Zastosowana została trzystopniowa skala sygnału ostrzegawczego.

Ponadto w przypadku uszkodzeń poszczególnych elementów konstrukcji nośnej może w niektórych punktach pomiarowych wystąpić gwałtowna zmiana naprężeń lub brak (zanik) zmian tych naprężeń. Sytuacje takie lub podobne mogą świadczyć o uszkodzeniu elementów układu pomiarowego lub elementów monitorowanych. Stąd też system ten posiada również możliwość sygnalizowania wystąpienia takich sytuacji.

System posiada wiele zalet w bieżącej eksploatacji m.p.g.o. do których można zaliczyć:

- podejmowanie działań zapobiegawczych awariom zmęczeniowym konstrukcji nośnej w postaci odpowiedniego wcześniejszego planowania remontów lub wymian określonych jego elementów i zespołów,
- podejmowanie natychmiastowych działań zapobiegawczych awariom konstrukcji nośnej na skutek przekroczenia wytrzymałości doraźnej poprzez sygnalizację alarmową przesyłaną do użytkownika i obsługi maszyny, co z kolei pozwala np. na szybkie wyłączenie zasilania mechanizmów itp.,
- otrzymywanie przez użytkownika maszyny informacji o różnorodnych lokalnych przekroczeniach dopuszczalnego poziomu wytrzymałości doraźnej konstrukcji nośnej np. podczas różnego rodzaju kolizji maszyn ze skarpą, poszczególnymi zespołami roboczymi itp.
- uzyskanie odczuwalnego w skali kopalni wzrostu trwałości konstrukcji nośnych maszyn podstawo-



wych, a tym samym obniżki kosztów związanych z ich eksploatacją (np. obniżenie kosztów i skrócenie czasu remontów, ograniczenie czasu i ilości postojów z powodu awarii),

- uzyskanie informacji o rzeczywistym poziomie naprężeń w konstrukcji nośnej, co może być wykorzystane przy różnego rodzaju ocenach stanu technicznego, modernizacjach, przebudowach itp., a także planowaniu technologii i przyszłych frontów pracy maszyn,
- uzyskanie wzrostu bezpieczeństwa pracy obsługi maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego.

### *Weryfikacja doświadczalna systemu na obiekcie rzeczywistym*

System po przejściu cyklu badań laboratoryjnych, gdzie sprawdzono jego poprawność działania został zamontowany na konstrukcji nośnej koparki SchRs 4000 w KWB Bełchatów pracującej na nadkładzie [16]. Na rysunku 8 przedstawiono usytuowanie punktów pomiarowych (tensometry elektrooporowe) na konstrukcji nośnej koparki, a na rysunkach 9, 10 pokazano przykład rozmieszczenia tych punktów na poszczególnych elementach badanej konstrukcji. System w tym przypadku składa się z dwóch osobnych modułów



Rys. 8. Koparka SchRs 4000 z zaznaczonymi punktami pomiarowymi  
Fig. 8. BWE SchRs 4000 with marked measuring points



Rys. 9. Przykłady rozmieszczenia punktów pomiarowych na konstrukcji nośnej badanej koparki  
Fig. 9. Examples of the measurement points distribution on the tested excavator load bearing structure



Rys. 10. Przykłady rozmieszczenia punktów pomiarowych na konstrukcji nośnej badanej koparki  
Fig. 10. Examples of the measurement points distribution on the tested excavator load bearing structure

pomiarowo-obliczeniowych. Pierwszy z nich, moduł podstawowy, zamontowany jest na nadwoziu koparki (ozn. na rys. 8 jako P1...P4, kolejne dwie cyfry oznaczają numer przekroju, a ostatnie dwie numer punktu pomiarowego) i obejmuje 23 punkty pomiarowe, drugi, dodatkowy, zamontowany został na moście podawarki (ozn. na rys. 8 jako P5) i obejmuje 8 punktów pomiarowych.

Jako przykład działania systemu przedstawiono wyniki badań punktów pomiarowych konstrukcji nośnej koparki rozmieszczonych: na pasie górnym i dolnym wysięgnika koła czerpakowego, punkty P1.01-1, P1.01-3. Schematy rozmieszczenia tych punktów przedstawiono na rysunku 11 (wskazanie któregośkolwiek z indykatorów na rys. 8 powoduje zmianę ekranu na schemat przedstawiający położenie wybranego punktu pomiarowego).

Badania obejmowały ciągłe pomiary wartości przyrostów naprężeń dynamicznych zarejestrowanych podczas ośmiu miesięcy pracy koparki. Przykładowe przebiegi zarejestrowanych wartości przyrostów naprężeń przedstawiono na rysunku 12.

Wyniki badań naprężeń zaprezentowano w formie wykresów przedstawiających wartości amplitud naprężeń maksymalnych i liczności ich występowania.

Na rysunkach 13, 14, 15 pokazano rozkład amplitud maksymalnych i liczności ich występowania punktów P1.01.01 (lewy górny dźwigar wysięgnika koła czerpakowego, rys. 8.21), i P1.01.03 (lewy dolny dźwigar wysięgnika koła czerpakowego).

Powyższe przykładowe rozkłady amplitud przeanalizowano w zakresie osiągniętych wartości przyjmując jako wartość progową  $\sigma_{\alpha}=50\text{MPa}$ . A zatem w odniesieniu do

poszczególnych punktów pomiarowych amplitudy naprężeń przyjmowały następujące wartości:

#### Punkt P1.01.01

- poziom od 50 ÷ 80 MPa był przekroczony ok. 100 razy,
- poziom od 80 ÷ 100 MPa był przekroczony ok. 50 razy.
- w sporadycznych przypadkach (5 do 10 razy) przekroczony był poziom 145 MPa.

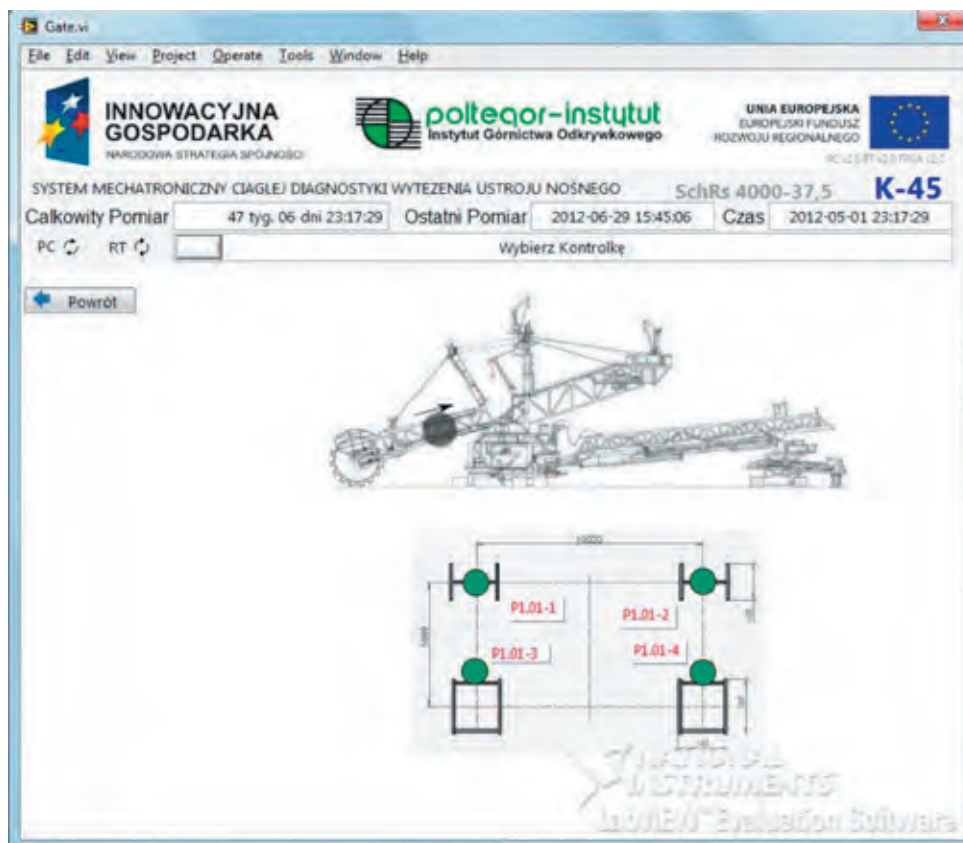
#### Punkt P1.01.03

- poziom od 50 do 80 MPa był przekroczony około 100 razy,
- poziom od 80 do 100 MPa był przekroczony około 50 razy,
- w sporadycznych przypadkach (5 do 10 razy) przekroczony był poziom 155 MPa.

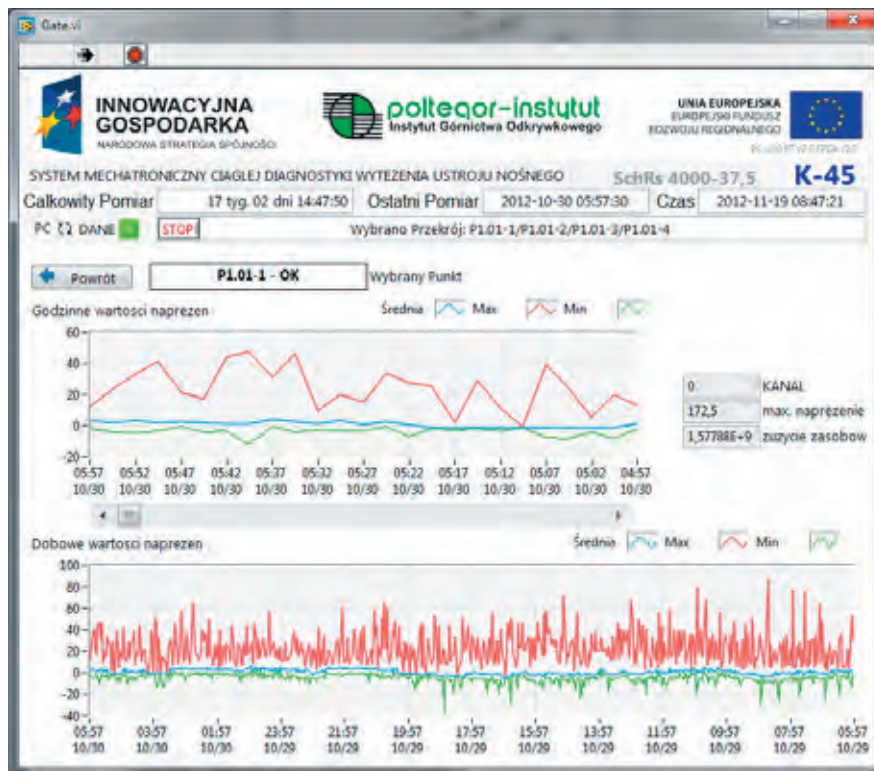
Na podstawie przeprowadzonych badań, zarówno laboratoryjnych jak i doświadczalnych na konstrukcji nośnej koparki stwierdzono, że system działa prawidłowo realizując założone cele [16],[18].

### **Ostateczne sformułowanie i opis metody oceny stanu technicznego konstrukcji nośnych m.p.g.o. po długoletniej eksploatacji**

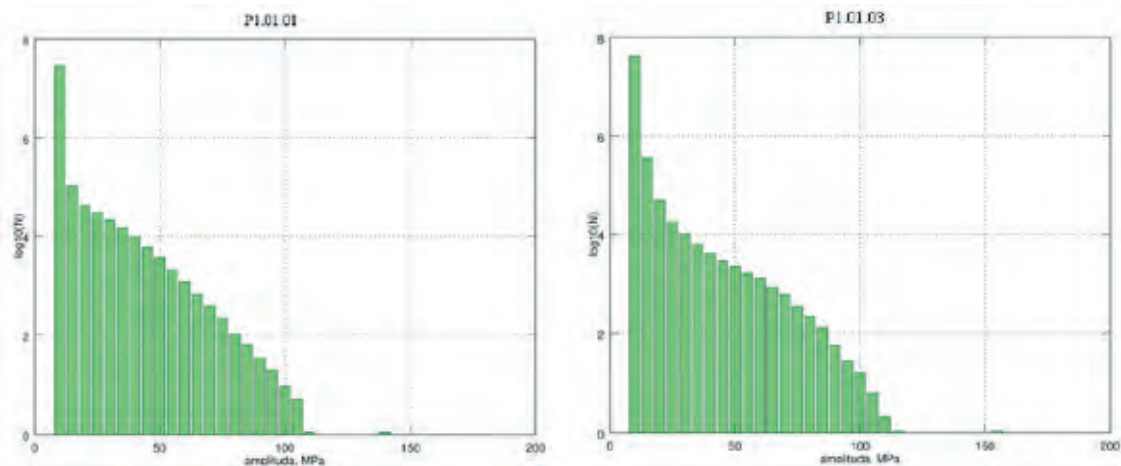
Ze względu na złożoną budowę i wyjątkowo skomplikowany stan obciążeń konstrukcji nośnych m.p.g.o. (niespotykany w innych maszynach roboczych ciężkich), proces oceny ich stanu technicznego nie jest sprawą prostą i wymaga wykonania szeregu badań opisanych w niniejszym artykule.



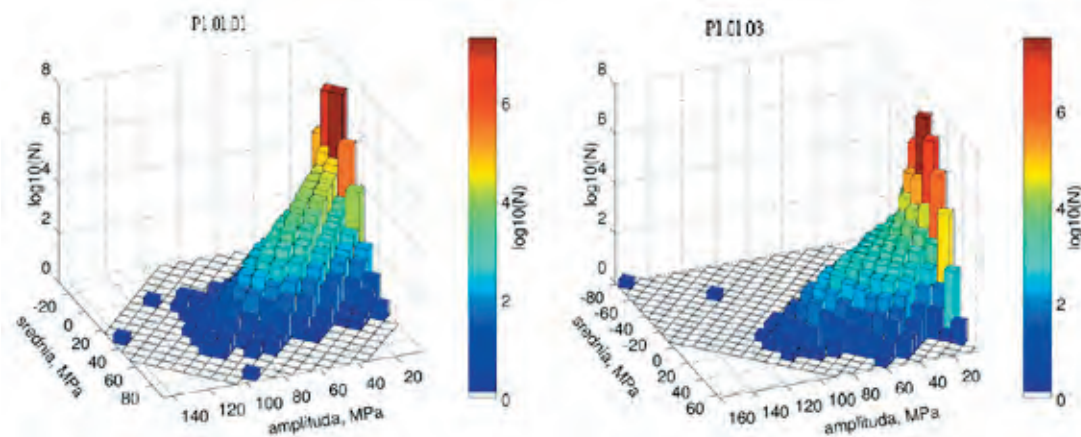
Rys. 11. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na wysięgniku koła czerpakowego  
Fig. 11. Diagram of the measuring points distribution on the bucket wheel boom



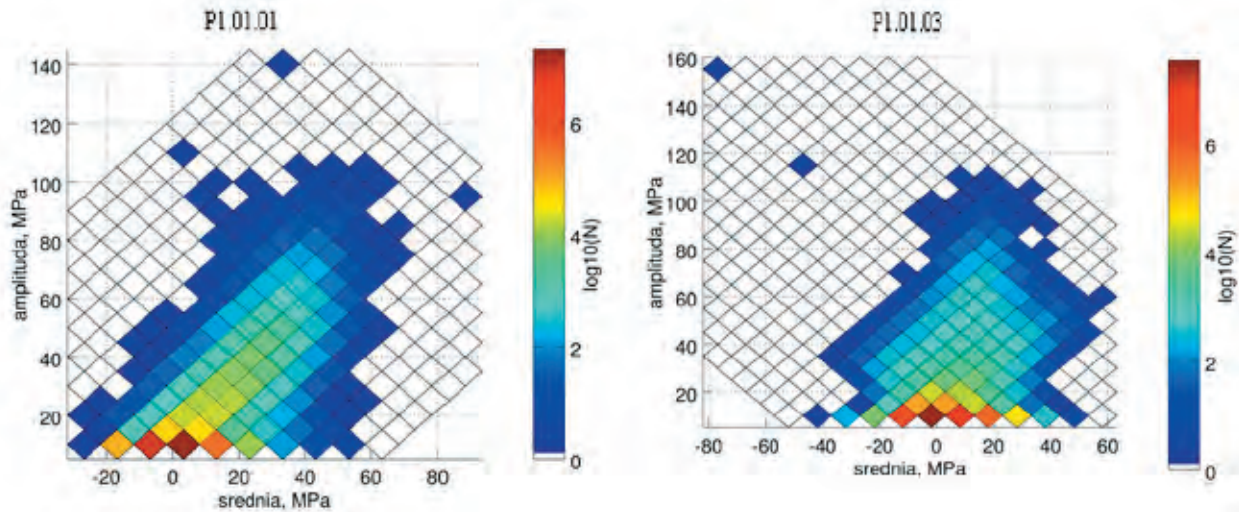
Rys. 12. Przykładowe przebiegi zarejestrowanych wartości przyrostów naprężeń dynamicznych na wysięgniku koła czerpakowego - punkt pomiarowy P1.01.01  
 Fig. 12. Example waveforms of recorded values of dynamic stresses on the bucket wheel boom-measuring point P1.01.01



Rys. 13. Rozkład amplitud maksymalnych (MPa) oraz ich licznosc występowania (logN) w czasie trwania badań – punkty P1.01.01 i P1.01.03  
 Fig. 13. Distribution of maximum amplitudes and their occurrence frequency during the tests - points P1.01.01 and P1.01.03



Rys. 14. Rozkład amplitud maksymalnych (MPa), ich wartość uśredniona (MPa) oraz ich licznosc występowania (logN) w czasie trwania badań – punkty P1.01.01 i P1.01.03  
 Fig. 14. Distribution of maximum amplitudes, their average value and their occurrence frequency during the tests - points P1.01.01 and P1.01.03



Rys. 15. Rozkład amplitud maksymalnych w funkcji wartości średnich – punkty P1.01.01 i P1.01.03  
 Fig. 15. Distribution of maximum amplitudes as a mean values function - points P1.01.01 and P1.01.03

Badania te zestawiono poniżej w kolejności wykonania.

Etap I - Badania konstrukcji nośnych na zgodność z dokumentacją techniczną.

Badania te są pierwszym, a zarazem bardzo istotnym etapem ponieważ poza stwierdzeniem zgodności wykonania z dokumentacją techniczną dostarczają niezbędnych informacji o przebiegu dotychczasowej eksploatacji maszyny, przebytych awariach, naprawach, remontach, modernizacjach itp.

Etap II - Badania wizualne

Badania prowadzone są podczas wizji lokalnej bezpośrednio na maszynie i pomimo braku specjalistycznego oprzyrządowania pozwalają wykryć większość uszkodzeń powierzchniowych zarówno elementów konstrukcyjnych jak i połączeń oraz wytypować miejsca do badań defektoskopowych.

Etap III - Badania defektoskopowe

Badania prowadzone są również bezpośrednio na maszynie przy pomocy specjalistycznego wyposażenia, przy czym najczęściej stosowana jest metoda ultradźwiękowa i magnetyczno-proszkowa. Badania ultradźwiękowe umożliwiają wykrycie wad wewnętrznych, natomiast badania magnetyczno-proszkowe wad powierzchniowych i podpowierzchniowych w materiale konstrukcyjnym.

Etap IV - Badania stanu skorodowania i właściwości mechanicznych tworzywa konstrukcyjnego

Badania są szczególnie ważne dla konstrukcji nośnych maszyn poddanych długoletniej eksploatacji ponieważ w takim przypadku materiał konstrukcyjny ulega starzeniu, co powoduje obniżenie jego właściwości wytrzymałościowych. Stąd też należy w miarę możliwości wykonać badania właściwości mechanicznych materiału konstrukcyjnego. W przypadku korozji należy poza oceną ubytków materiałowych poddać materiał konstrukcyjny badaniom w celu określenia rzeczywistej struktury materiału i jej wpływu na wielkości wartości mechanicznych.

Etap V - Badania i ocena stateczności

Badania umożliwiają ocenę i korektę stateczności m.p.g.o., dlatego mają duży wpływ na bezpieczeństwo pracy jak i trwałość konstrukcji nośnych tych maszyn.

Etap VI - Badania naprężeń od obciążeń statycznych

Badania umożliwiają ocenę poprawności montażu i zgodności rzeczywistego stanu wyęźnienia konstrukcji nośnej ze stanem przyjętym w obliczeniach.

Etap VII - Badania naprężeń od obciążeń dynamicznych

Badania umożliwiają ocenę bieżącego stanu wyęźnienia konstrukcji w zakresie wytrzymałości zarówno doraźnej jak i zmęczeniowej, nie umożliwiają jednak prognozy dalszej trwałości. Ponadto badania umożliwiają porównanie rzeczywistych obciążeń zewnętrznych z obciążeniami normatywnymi stosowanymi w obliczeniach konstrukcji nośnych, oraz ocenę zabezpieczenia przed drganiami rezonansowymi.

Etap VIII - Ocena i prognozowanie trwałości konstrukcji nośnych m.p.g.o.

Ze specyfiki zjawiska zmęczenia wynika, że jedynie długoterminowe badania przebiegów dynamicznych oraz wykorzystanie hipotez zmęczeniowych mogą stanowić podstawę do określenia pozostałego w konstrukcji nośnej zasobu trwałości zmęczeniowej - tzw. trwałości resztkowej. Zadanie to spełnia opracowany przez Poltegor-Institut i wdrożony do działania „Mechatroniczny system ciągłej diagnostyki wyęźnienia ustrojów (konstrukcji) nośnych m.p.g.o.”.

## Podsumowanie

Konstrukcje nośne m.p.g.o. ze względów przytoczonych w powyższym artykule są najistotniejszymi zespołami decydującymi o trwałości, przydatności eksploatacyjnej oraz bezpieczeństwie pracy tych maszyn. Jednocześnie są one narażone na szczególnie szybką degradację do całkowitego zniszczenia włącznie, przy czym dominują tu połączone procesy korozji i zmęczenia. Stąd też konstrukcje nośne poddawane są różnorodnym badaniom mającym na celu ocenę ich stanu technicznego jako czynnika mającego istotny wpływ na przedłużenie okresu ich eksploatacji.

W artykule zebrano i usystematyzowano dotychczasowe badania konstrukcji nośnych m.p.g.o. prowadzone w okresie ostatnich 40 lat przez Poltegor-Institut (dawniej COBPGO - Poltegor). Badania te mają na celu zarówno ocenę bieżącego stanu technicznego jak i prognozowanie trwałości konstrukcji nośnych. W sumie tworzą one metodę, która w kompleksowy sposób umożliwia ocenę stanu technicznego konstrukcji nośnych m.p.g.o. po długoletniej eksploatacji. Ze względu na przytoczone w opracowaniu uwarunkowania coraz większe zainteresowanie ze strony eksploatorów (kopalń odkryw-

kowych) wzbudza odpowiedź na pytanie: jak długo można jeszcze w bezpieczny sposób użytkować daną konstrukcję nośną? Dlatego też sporą część artykułu poświęcono badaniom umożliwiającym prognozowanie trwałości.

Ze specyfiki zjawiska zmęczenia oraz dotychczasowych doświadczeń autorów niniejszego artykułu wynika, że jedynie długoterminowe badania przebiegów dynamicznych oraz wykorzystanie hipotez zmęczeniowych mogą stanowić podstawę do określenia pozostałego w konstrukcji nośnej zasobu trwałości zmęczeniowej - tzw. trwałości resztkowej. Zadanie

to spełnia opracowany przez Poltegor-Institut i wdrożony do stosowania „Mechatroniczny system ciągłej diagnostyki wyłączenia ustroju (konstrukcji nośnej) nośnego m.p.g.o.”.

System ten został zastosowany na konstrukcji nośnej koparki SchRs 4000 eksploatowanej ponad trzydzieści lat w KWB Bełchatów, w większości w utworach trudno urabialnych. Z dotychczasowych badań wynika, że system działa prawidłowo realizując założone cele.

## Literatura

- [1] Alenowicz J., Onichimiuk M., Wygoda M., Wojtowicz A.: *Szacowanie stanu naprężeń statycznych ustrojów nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego*. Górnictwo Odkrywkowe nr 4/2010
- [2] Dudek D.: *Elementy dynamiki maszyn górnictwa odkrywkowego*. Wyd. Oficyna Wydawnicza P.Wr. 1994
- [3] Alenowicz J.: *Statystyczny model obciążeń procesu skrawania gruntów trudno urabialnych koparkami kołowymi górnictwa odkrywkowego*. Problemy Maszyn Roboczych. Z. 27/2006
- [4] Hawrylak H., i in.: *Analiza procesu ciągłego urabiania skał zwięzłych narzędziami roboczymi o ruchu złożonym*. Prace naukowe CPBO 02.05. Wyd. P.W Warszawa 1990
- [5] Alenowicz J., Musiał Wł.: *Ocena trwałości zmęczeniowej konstrukcji nośnych m.p.g.o. na podstawie pomiarów naprężeń w wybranych elementach ustroju nośnego*. Górnictwo Odkrywkowe nr 5-6/1998
- [6] Dudek D.: *Kronika awarii i katastrof maszyn podstawowych w polskim górnictwie odkrywkowym*. Oficyna Wyd. P.Wr. 2007
- [7] Alenowicz J.: *Badania diagnostyczne konstrukcji nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego*. Górnictwo Odkrywkowe nr 2/2004
- [8] Lipnicki M.: *Badania ultradźwiękowe*. Ośrodek Szkoleniowo-Egzaminacyjny i Laboratorium Badań Nieniszczących. Koli Sp. z o.o. Gdańsk 1998
- [9] Sozański I., Pelc W.: *Badania nieniszczące w kontroli maszyn podstawowych kopalń odkrywkowych*. Górnictwo Odkrywkowe nr 3/1986
- [10] Szepietowski W., Wygoda M.: *Ocena stanu technicznego ładowarko-zwałowarki ŁZKS 500*. Oprac. IGO Poltegor, nr archiw. 4111/IGO, Wrocław 1998. Praca nie publik
- [11] Augustynowicz J., Dudek D.: *Prognozowanie okresu bezpiecznej eksploatacji maszyn górniczych*. Wyd. Górnictwo i Geoinżynieria Rok 31. AGH Kraków 2007
- [12] Alenowicz J., Musiał Wł.: *Badania naprężeń w ustroju nośnym dla oceny trwałości zmęczeniowej konstrukcji koparek w oparciu o pomiary wykonane w warunkach eksploatacyjnych*. Węgiel Brunatny Wyd. Specjalne 2000
- [13] Alenowicz J.: *Stateczność nadwozi koparek i zwałowarek górnictwa odkrywkowego*. Górnictwo Odkrywkowe nr 6/2009
- [14] Norma ISO 5049-1. Urządzenia przejezdne do transportu ciągłego materiałów sypkich. Cz. 1. Wytyczne do obliczeń stalowych konstrukcji nośnych
- [15] Norma DiN 22261-2. Koparki, zwałowarki i maszyny pomocnicze w kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego. Cz. 2. Podstawy obliczeniowe
- [16] Alenowicz J., Onichimiuk M., Wygoda M.: *System mechatroniczny ciągłej diagnostyki wyłączenia ustroju nośnego m.p.g.o.* Monografia, Wyd. Poltegor-Institut 2013
- [17] Kocańda St., Szala J.: *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*. PWN Warszawa 1991
- [18] Alenowicz J., Onichimiuk M., Wygoda M.: *Weryfikacja doświadczalna systemu ciągłej diagnostyki wyłączenia ustrojów nośnych m.p.g.o.* Górnictwo Odkrywkowe nr 3-4/2012