

## ANALIZA WYNIKÓW MONITORINGU WYŁĘŻENIA USTROJU NOŚNEGO KOPARKI KOŁOWEJ

### ANALYSIS OF THE RESULTS OF MONITORING OF BUCKET WHEEL EXCAVATOR'S SUPERSTRUCTURE EFFORT

Jerzy Alenowicz - Poltegor-Instytut IGO, Wrocław

Dionizy Dudek, Mirosław Kwaśniak - Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wroclawska

*W artykule przedstawiono przykładowe wyniki analizy statystycznej rozkładów naprężeń w wybranych punktach ustroju nośnego koparki kołowej. Wyniki uzyskane zostały podczas wielomiesięcznych pomiarów, a więc bez wiadomości o uzyskiwanej wydajności oraz rodzaju urabianych skał. Są te wyniki źródłem ogólnej wiedzy o wyłężeniu ustroju nośnego podczas eksploatacji maszyny, są zatem miarodajne dla oszacowania stopnia jej degradacji.*

**Słowa kluczowe:** maszyny górnictwa odkrywkowego, diagnostyka techniczna, degradacja maszyn

*The paper presents examples of the results of the statistical analysis of stress distribution at selected points of the superstructure of bucket wheel excavator. The results were obtained during several months of measurement, without knowledge of the obtained work load and the type of mined rocks. These results are a source of general knowledge about effort of the superstructure during the operation of the machine. They are therefore meaningful to estimate the degree of machine's degradation.*

**Key words:** open-pit mining machine, technical diagnostics, degradation of machines

#### Wprowadzenie

Cechy charakterystyczne maszyn podstawowych wyraźnie uwypuklają znaczenie ich ustrojów nośnych. Poddawane są one w trakcie eksploatacji losowym procesom obciążeniowym o wysokiej intensywności. To znaczy, że w poszczególnych węzłach ustroju występują liczne cykle zmian naprężeń o znaczącej dla ich wytrzymałości amplitudzie. W takiej sytuacji dominującym procesem degradacyjnym staje się zmęczenie tworzywa.

Strategie oszacowania aktualnego stanu technicznego ustroju można określać jako ciągły lub okresowy pomiar i interpretacje symptomów wskazujących na stan dotychczasowej degradacji obiektu i prowadzić, adekwatnie do stopnia zagrożenia, działania zapobiegawcze przed wystąpieniem uszkodzeń i awarii. W przypadku degradacji zmęczeniowej, w dodatku tak złożonego i odpowiedzialnego obiektu - wytwarzanego *nota bene* jednostkowo - jest to zadanie szczególnie trudne. Ponadto omawiane obiekty przeznaczone są z reguły do długiego, a nawet bardzo długiego okresu eksploatacji, przy jednoczesnej ustawicznej zmianie warunków eksploatacji. Obserwuje się zatem wyraźne tendencje do eksploataowania wyrobu według strategii stanu technicznego [14, 16]. Dotychczasowy stan wiedzy w tym zakresie ujęty został w sposób sformalizowany w aktach prawnych [8, 10, 11]. Jednak mimo tego należy się spodziewać dążenia do ujmowania wyłężenia w konwencji

naprężeń lokalnych, nie zaś jak dotychczas globalnych, za pomocą których wyłężenie można oceniać w sposób bardziej dokładny.

#### Metodyka badań

Narzędziami badawczymi są analityczne metody oceny zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego ustrojów nośnych maszyn działające na zestawach danych o intensywności wyłężenia, otrzymywanych z ciągłych i długoterminowych rejestracji prowadzonych na wybranych obiektach.

Następować może zarówno weryfikacja założeń projektowych, jak i korekta realizowanego przez maszynę zasobu, w konkretnych warunkach eksploatacji. Ponadto, niejako przy okazji, następuje wzbogacanie wiedzy projektanta z zakresu spodziewanych intensywności procesów obciążeniowych. Obciążenie, jego rozpoznanie i opis, są zawsze najsłabszym ogniwem każdego procesu wymiarowania wytrzymałościowego, gdzie oprócz obciążeń ekstremalnych, należy oszacować widmo obciążeń eksploatacyjnych. Dokonanie tego w pełnym horyzoncie czasowym życia maszyny jest niemożliwe bądź staje się bardzo iluzoryczne. Konieczna jest istotna modyfikacja tego stanu.

Akwizycję i przetwarzanie danych pomiarowych - zwłaszcza tych, które nie muszą być analizowane w czasie rzeczywistym - wygodnie jest realizować w dwóch etapach. Etap

pierwszy - wykonywany automatycznie na badanym obiekcie - obejmuje właściwą akwizycję i wstępną selekcję wyników pomiarów, a etap drugi - wykonywany najczęściej w warunkach laboratoryjnych na komputerach stacjonarnych - końcową analizę rezultatów. W zależności od celu prowadzonych badań wybiera się stosowny algorytm wstępnego przetwarzania sygnałów i sposób ich akwizycji. W omawianych tu wynikach badań koparek kołowych zastosowano następującą metodykę:

- oszacowanie przedziałów czasu kwantowania sygnału w zależności od rodzaju maszyny i technologii urabiania;
- próbkowanie sygnału analogowego w tych przedziałach czasowych;
- wyszukiwanie wartości ekstremalnych sygnałów w zaznaczonych przedziałach;
- gromadzenie ciągów uzyskanych wartości ekstremalnych w buforze pamięci automatycznego zestawu akwizycyjno-pomiarowego;
- uzupełnianie wypełnionego bufora danymi kalendarzowymi (miesiąc, dzień, godzina);
- zapis wypełnionego bufora do pamięci stałej zestawu; „zerowanie” bufora z przeznaczeniem do dalszej eksploatacji.

Przy właściwie dobranym przedziale kwantowania sygnałów (1 ÷ 10 min) nawet niewielki bufor pamięci urządzenia pomiarowego wystarcza do ciągłej obserwacji pracy maszyny w dłuższym przedziale czasu. Zastosowana w prowadzonych badaniach pamięć umożliwiała taką ciągłą obserwację w okresie około czterotygodniowym. Zapis wypełnionego bufora do pamięci zewnętrznej trwał około 20 s po czym pomiar był automatycznie kontynuowany. W ten sposób gromadzone były dane z pomiarów tensometrycznych na wszystkich badanych koparkach. Okres ciągłej obserwacji długoterminowej wahał się w granicach 1 ÷ 5 miesięcy, w różnych porach roku i w różnych warunkach geologicznych. Pełne przetwarzanie uzyskanych rezultatów prowadzono zgodnie z metodyką wyznaczania rozkładów ekstremalnych.

### Model liniowy procesu obciążenia ustroju nośnego koparek

Z uwagi na możliwość pomiarowej ortogonalizacji zmiennych składowych siły kopania: zaproponowano dla każdej z tych składowych odrębny model liniowy o jednej zmiennej. Eksperymentalna ortogonalizacja składowych siły kopania wymaga określenia parametrów modelu:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X,$$

gdzie: parametr  $\alpha_0$  jest interpretowany jako poziom zmiennej endogenicznej  $Y$  – tzn. naprężeń statycznych – przy zerowym poziomie zmiennej objaśniającej  $X$  (czyli naprężeń dynamicznych)

#### • Parametr $\alpha_1$ zmiennej objaśniającej $X$

Powszechnie stosowana do oszacowań tego parametru jest *tensometria oporowa*. Nadaje się znakomicie do pomiarów statycznych i ma ogromną dynamikę w badaniach eksploatacyjnych. Przy umiejętnym skonfigurowaniu przetworników pomiarowych mierzone sygnały są ortogonalne, a ponadto konfiguracja ta jest w pełni kalibrowalna. Celem uzyskania jakichkolwiek wskazań jest ustalenie „sztucznego zera”, od którego

zaczyna się obserwację obiektu, procesu jego eksploatacji itp. Tym poziomem jest „maszyna w czasie postoju”. Po prostu, po zainstalowaniu sieci przetworników w zaprojektowaną ich konfigurację i podłączeniu aparatury śledzącej, zatrzymuje się eksploatację i „zeruje” aparaturę. To jest wtedy poziom odniesienia do przyszłych wskazań, **to jest parametr  $\alpha_1$ !**

#### • Parametr $\alpha_0$ zmiennej endogenicznej $Y$

Oszacowanie parametru  $\alpha_0$  wyzerowania zmiennej  $X$ . W przypadku badania stanu naprężeń w ustroju nośnym oznacza to konieczność estymacji tych naprężeń podczas „bezruchu” maszyny, czyli określenia stanu jej naprężeń spoczynkowych – pochodzących głównie od ciężaru własnego. Bardzo dobrze nadaje się do tego metoda tensometryczna *wierconego otworka* wykorzystująca efekt odpuszczania naprężeń (odkształceń) powierzchniowych w bliskiej okolicy wywierconego otworu [17]. Naprężenia redukują się do zera, a tym samym po wyzerowaniu odpowiedniej rozety jest możliwość oceny co było przed nawierceniem otworka. Obecnie stosowane rozety tensometryczne mają bazę 3,5 do 5,0 mm i wymagają nawiercenia otworka  $\varphi = 1,5$  do 2,0 mm na głębokość do 3 mm. Oznacza to, że dla ustrojów nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego są to badania nieniszczące.

### Badania statyczne naprężeń własnych



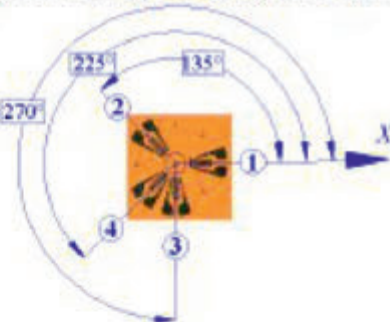

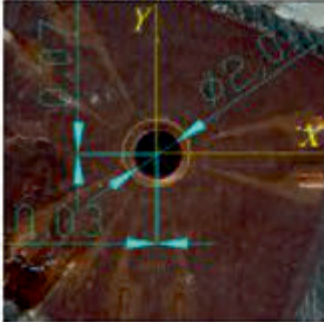
Badania statyczne stanu obciążenia ustroju nośnego wykonano dla koparki SchRs-4000. Przykładowy protokół takich badań przedstawiono na rysunku 1. Nie powinny specjalnie dziwić dosyć niskie wartości uzyskanych naprężeń zredukowanych. Punkty pomiarowe umiejscowiono obok punktów pomiarowych przeznaczonych do badań dynamicznych, a te typowano na podstawie innych przesłanek. We wcześniejszych pomiarach na tej maszynie – w przekrojach gdzie spodziewano się na podstawie analizy wytrzymałościowej – występowania obciążeń maksymalnych – zakres naprężeń statycznych oscylował w przedziale od 120 do 190 MPa. Przy poziomie naprężeń dynamicznych rzędu 50 MPa jest to wartość znacząca. Ustroje nośne koparek kołowych obliczane są ze sporym zapasem bezpieczeństwa. Zapas ten tolerować powinien pewien zbiór uszkodzeń bez konieczności natychmiastowej naprawy.

### Analiza wyników długoterminowych badań dynamicznych

Pomiary wartości amplitud naprężeń dynamicznych mierzono w wielomiesięcznym cyklu pracy koparki. Rejestrowano wartości maksymalne występujące we wcześniej skwantyfikowanych interwałach czasowych. Analizę przykładowo wybranych rezultatów ujęto na rysunkach 2, 3.

Przeanalizowano wybrane punkty pomiarowe, w których amplitudy maksymalne osiągnęły znacząco wysokie wartości (rys. 4 ÷ rys. 6).

Jako wartość progową przyjęto umownie  $\sigma_{dyn} = 50$  MPa, co dla wartości naprężeń własnych  $\sigma_{stat} = 120$  ÷ 190 MPa oznacza bezpieczną pracę w zakresie naprężeń dopuszczalnych.

	Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechnika Wroclawska	Protokół nr 1/9 z badania naprężeń własnych metodą nawiercania otworu	Data: 19. 07. 2011
Zleceniodawca:	Poltegor Wrocław		Nr rys.:
Przedmiot badania: <b>Koparka K45 – wysięgnik przeciwcieżaru</b>			
Miejsce badania: KWB Belchatów, Odkrywka Szczerców		Oznaczenie punktu: TDL	
Stale materiałowe badanej konstrukcji: $E = 205\,000\text{ MPa}$ ; $\nu = 0,30$		Rozeta tensometryczna: TFrw-2/120	
Lokalizacja punktu pomiarowego na wysięgniku przeciwcieżaru: pas wzdłużny dolny – strona lewa			
			
Przyjęty układ współrzędnych: czujnik nr 1 równoległy do osi wzdłużnej wysięgnika X			
  			

Średnica i położenie otworu odciążającego oraz zmierzone odkształcenia:

$D_0$ [mm]	$e_x$ [mm]	$e_y$ [mm]	$\epsilon_1$ [‰]	$\epsilon_2$ [‰]	$\epsilon_3$ [‰]	$\epsilon_4$ [‰]
2,01	0,03	-0,07	-0,075	-0,074	-0,044	-0,044

Kierunki i wartości naprężeń ekstremalnych:

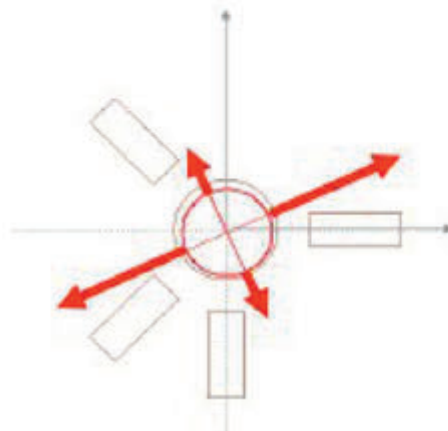
Rozeta	$\alpha$ [°]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_{\text{red}}$ [MPa]
R 1-2-3	26	23	2	22
R 1-2-4	26	22	4	21
R 1-3-4	23	22	3	21
R 2-3-4	23	23	3	22
<b>Średnia</b>	<b>24</b>	<b>23</b>	<b>3</b>	<b>22</b>
95% PU	3	1	1	1

Badający:

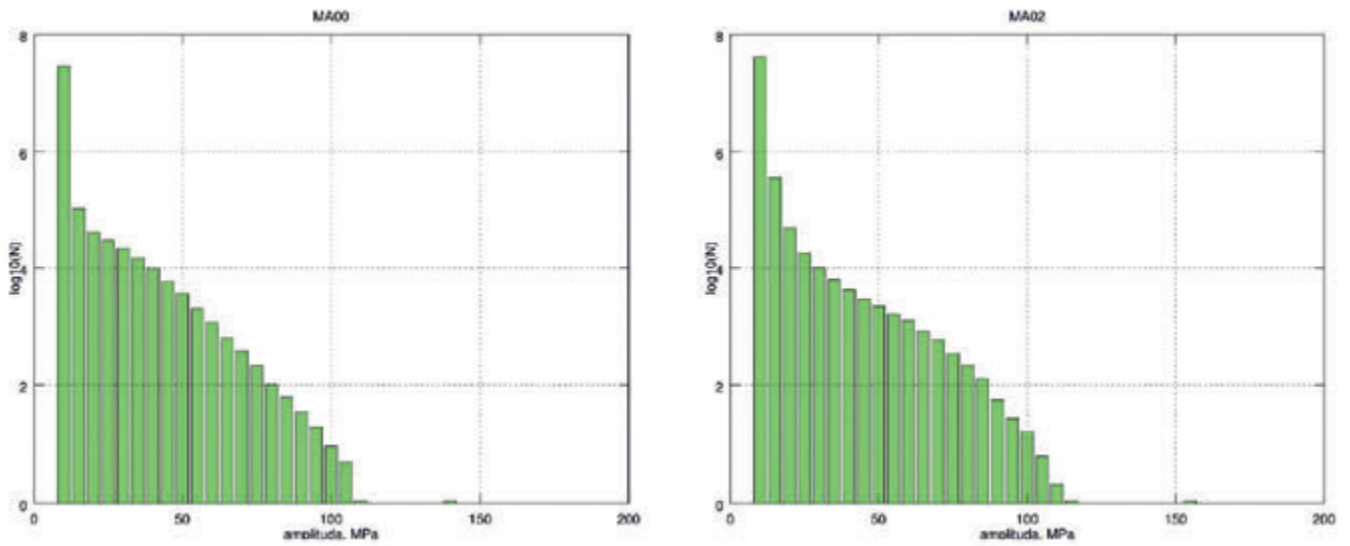
K. Dudek  
A. Figiel

Sprawdził:

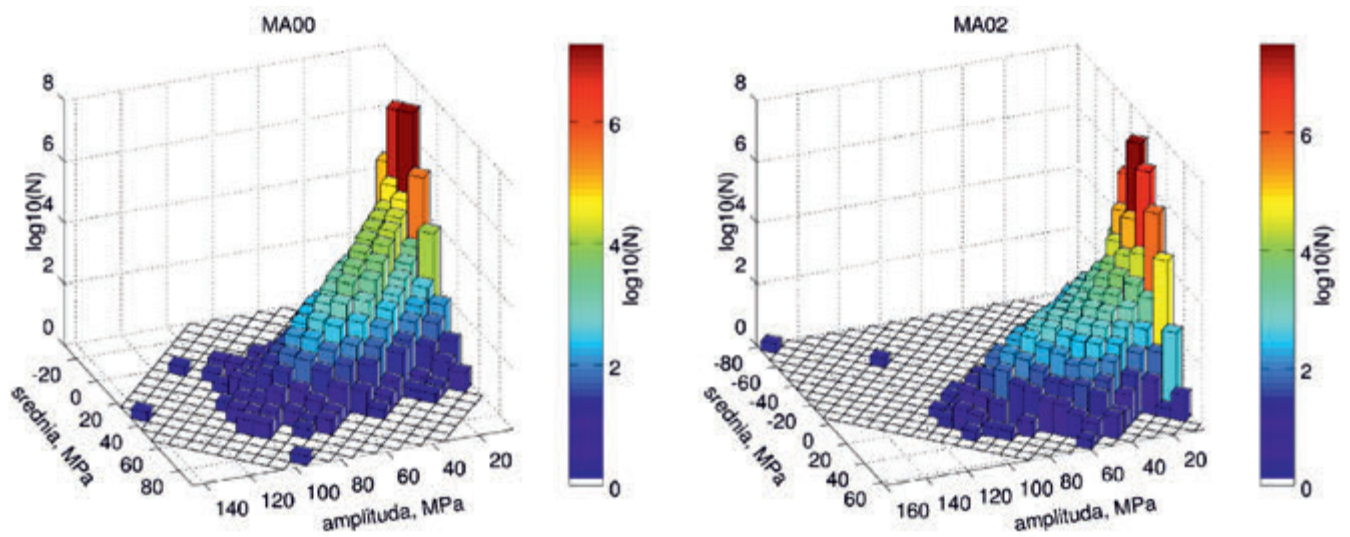
D. Dudek



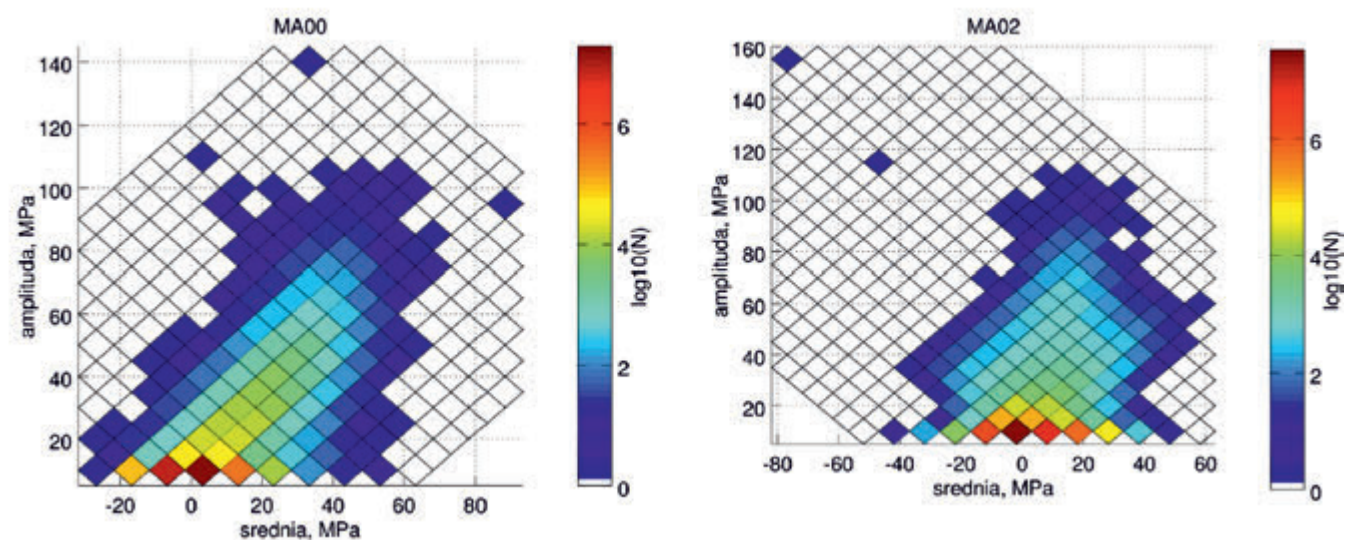
Rys. 1. Protokół pomiarowy pomiaru naprężeń statycznych. Lewy dolny dźwigar wysięgnika przeciwwagi



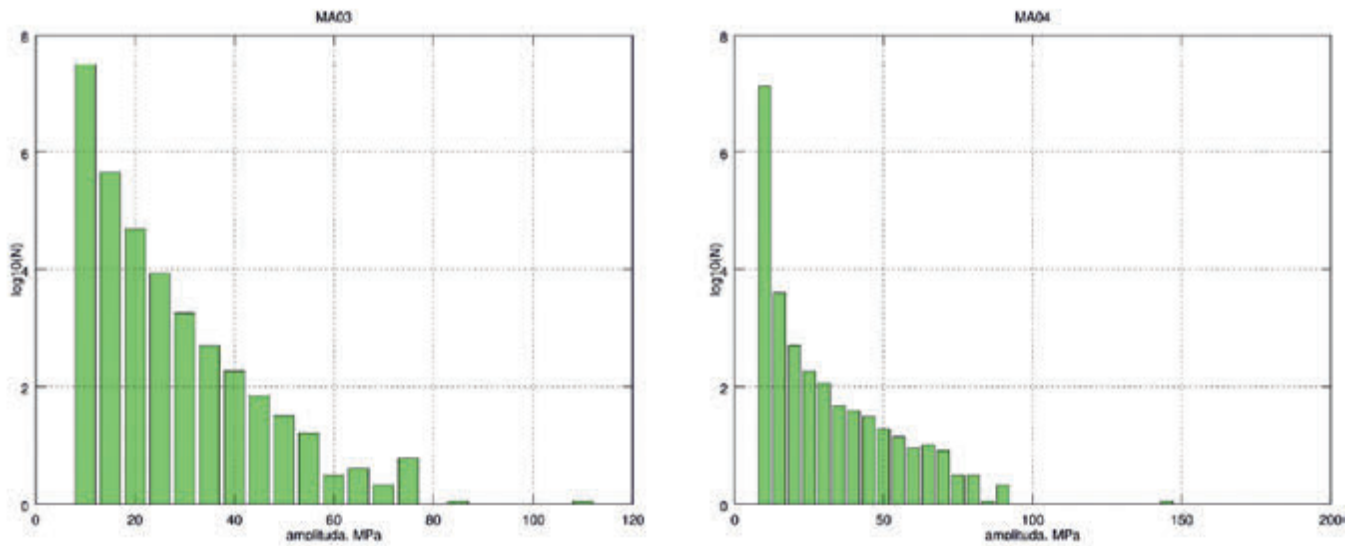
Rys. 2a. Rozkład amplitud maksymalnych (MPa) oraz ich licznosc wystepowania (logN) w czasie trwania badan – punkty MA00 i MA02



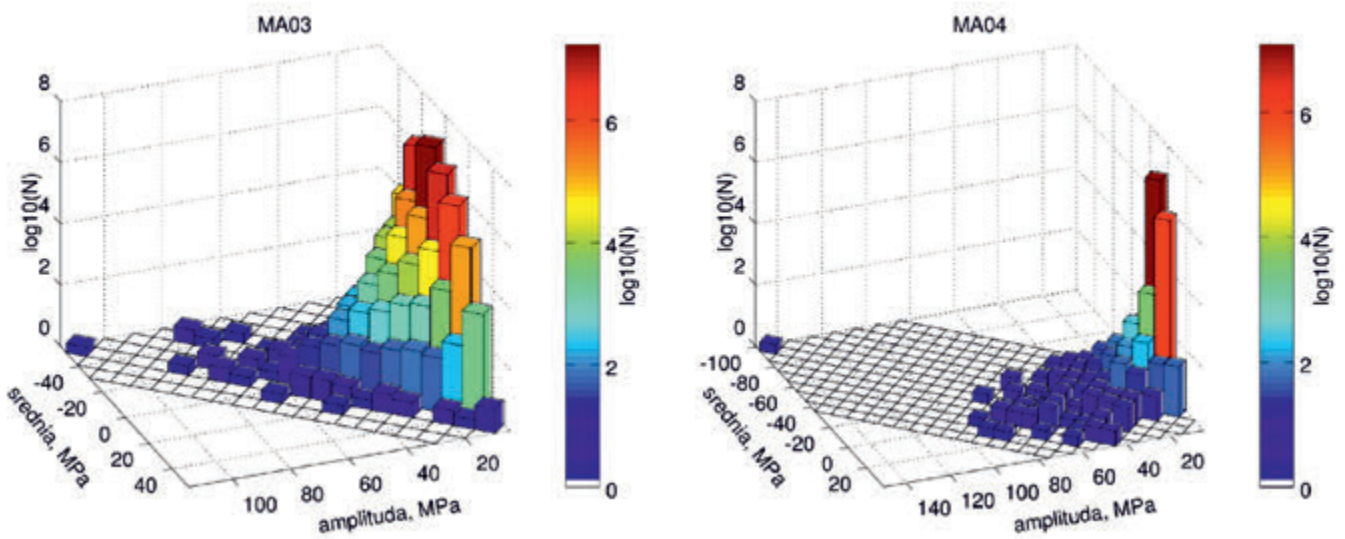
Rys. 2b. Rozklad amplitud maksymalnych (MPa), ich wartosc usredniona (MPa) oraz ich licznosc wystepowania (logN) w czasie trwania badan – punkty MA00 i MA02



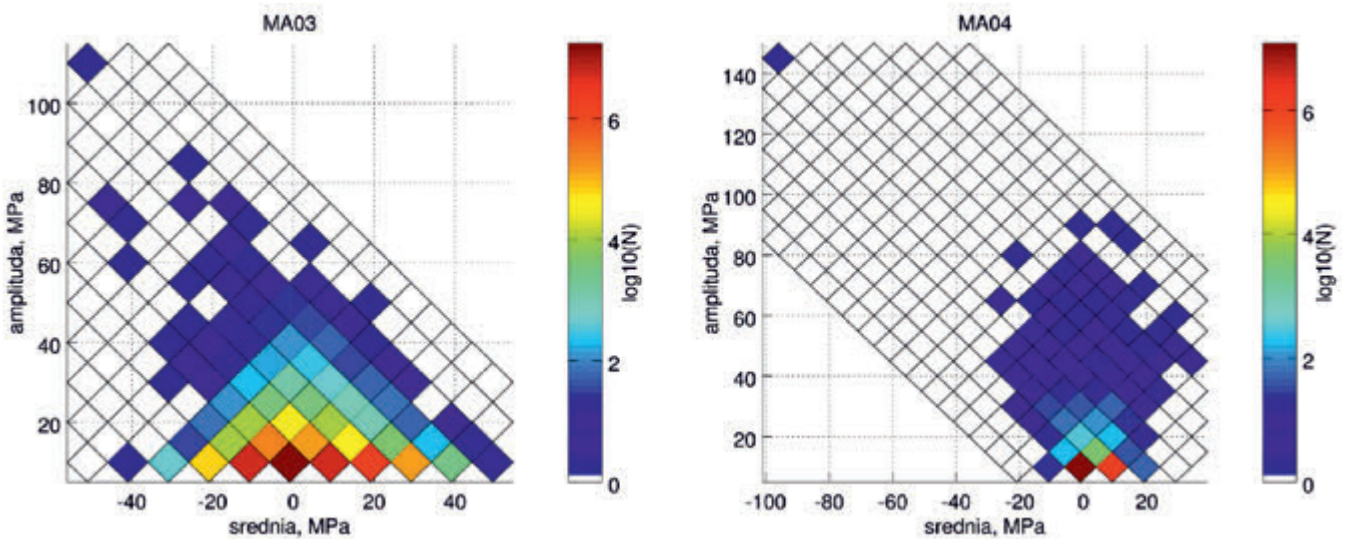
Rys. 2c. Rozklad amplitud maksymalnych w funkcji wartosci srednich – punkty MA00 i MA02



Rys. 3a. Rozkład amplitud maksymalnych (MPa) oraz ich licznosc wystepowania ( $\log N$ ) w czasie trwania badan – punkty MA03 i MA04

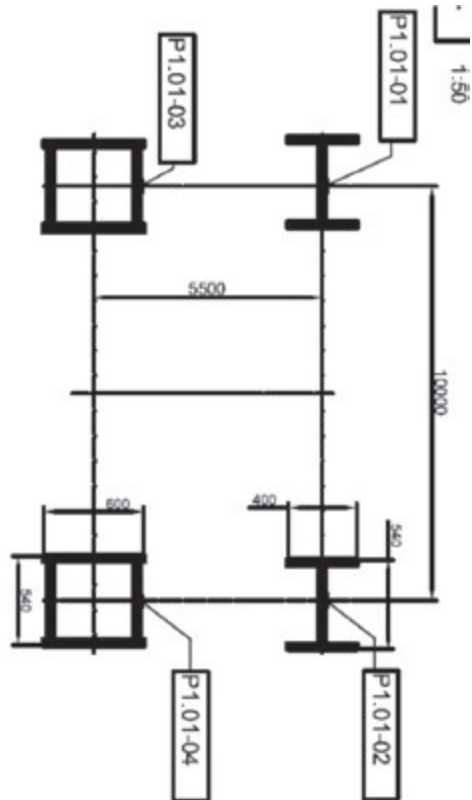


Rys. 3b. Rozklad amplitud maksymalnych (MPa), ich wartosc uśredniona (MPa) oraz ich licznosc wystepowania ( $\log N$ ) w czasie trwania badan – punkty MA03 i MA04



Rys. 3c. Rozklad amplitud maksymalnych w funkcji wartosci srednich – punkty MA03 i MA04

• wysięgnik koła czerpakowego



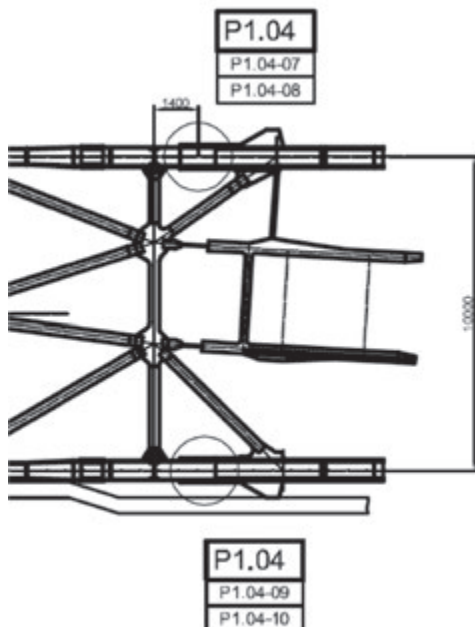
Rys. 4. Przekrój wysięgnika koła czerpakowego w miejscu pomiarów statycznych

Punkt P1.01-01 (lewy górny dźwigar wysięgnika koła)

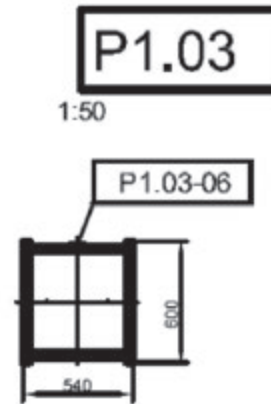
- poziom od 50 do 80 MPa był przekroczony około 100 razy;
- poziom od 80 do 100 MPa był przekroczony około 50 razy;
- w sporadycznych przypadkach (5 do 10 razy) przekroczony był poziom 145 MPa,

Punkt P1.01-03 (lewy dolny dźwigar wysięgnika koła)

- 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,



Rys. 6. Punkty pomiarowe na dźwigarze wysięgnika koła czerpakowego w okolicy przegubu zwodzenia

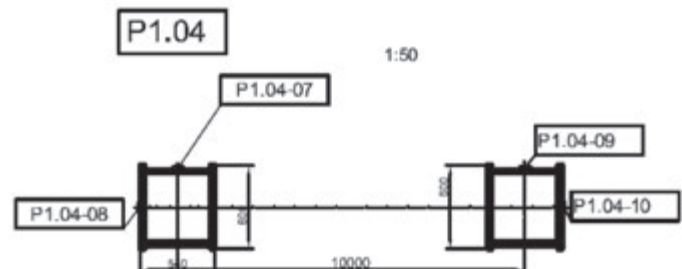


Rys.5. Końcowy fragment lewego dolnego dźwigara wysięgnika koła czerpakowego w okolicy jego podwieszenia

Punkt P1.03-06 (lewy dolny dźwigar wysięgnika koła w okolicy jego podwieszenia)

- poziom od 50 do 80 MPa był przekroczony około 150 razy;
- poziom od 80 do 100 MPa był przekroczony około 100 razy;
- poziom od 100 do 130 MPa był przekroczony około 40 razy;
- w sporadycznych przypadkach (5 do 10 razy) przekroczony był poziom 165 MPa

W analizie statystycznej obciążeń dynamicznych nie ma realnej możliwości oceny czy bloki obciążeń występowały rosnąco – w sensie wartości średniej – czy malejąco. Raczej za pewnik należy przyjąć, że występowały naprzemiennie w sposób zupełnie niedookreślony i tak samo będzie w przyszłości eksploatacyjnej. Nie sposób zatem w sposób pewny mówić o umocnieniu materiału. Jak widać z powyższego zestawienia najbardziej obciążonych punktów granica plastyczności może być przekraczana. W sporadycznych przypadkach od 5 do 10 razy podczas wielomiesięcznego pomiaru – suma naprężeń w dźwigarach wysięgnika koła czerpakowego mogła przekroczyć 360 MPa. Niewiele natomiast wiemy o przeróżnych węzłach. Tu potrzebna jest przyzwoita analiza stanu naprężeń, np. metodą elementów skończonych. Jeżeli bowiem nastąpiło uszkodzenie powierzchniowe, to proces degradacji zmęczeniowej zacznie się nasilać. Wtedy do ruiny maszyny wystarczą już bloki naprężeń o amplitudzie 50 ÷ 80 MPa.



## Literatura

- [1] Szczierbaczienko Ju. M., *Opyt remontu mietalokonstrukcji kranow. Podjemnyje sooruzeniya*. N.2/2005
- [2] Haagenen P., *Improving the fatigue strength of welded joint*. Fatigue Handbook, Tapir, Trondheim, 1985
- [3] DIN 15018. Blat 1 Krane. *Grundsätze für Stahltragwerke Brechnung*, 1974
- [4] PN-79/M 06515. *Dźwignice. Podstawowe zasady wymiarowania stalowych ustrojów nośnych dźwignic*, 1979
- [5] PN-ISO 5049-1. *Urządzenia przejezdne do transportu ciągłego materiałów sypkich. Zasady obliczania konstrukcji stalowych*, 1994
- [6] PN GN 47000-1. *Górnictwo odkrywkowe. Koparki wielonaczyniowe i zwałowarki*
- [7] EN 13001-3-1: 1999. *Cranes – General Design: Limit states and proof of competence of steel structures*
- [8] ISO/CD 20332-1. *Crane. Proof competence of steel structure*, 2005
- [9] Babiarz S., Dudek D., *Kronika awarii maszyn podstawowych w polskim górnictwie odkrywkowym*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007
- [10] PN-87/M 69772. *Spawalnictwo. Klasy jakości złączy spawanych*
- [11] PN-EN 25817: 1997. *Wytyczne do określania poziomu jakości według niezgodności spawalniczych*
- [12] Wiliński L., *podstawy eksploatacji obiektu technicznego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006
- [13] Sobczykiewicz W., *Ewolucja procesu wymiarowania spawanych konstrukcji nośnych dźwignic w zakresie trwałości zmęczeniowej (ujęcia normatywne) (praca niepublikowana)*, Warszawa, 2010.
- [14] Oziemski S., Sobczykiewicz W., *Kształtowanie niezawodności obiektu mechanicznego jako cechy jakości. Etap projektu wstępnego*. [W:] *Podstawy budowy, wymiarowania i badania niezawodności MRC*. Prace Naukowe CPBP - 02.05. Szkoła Niezawodności ,91 - Szczyrk 1991. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1990.
- [15] Sobczykiewicz W., *Wymiarowanie konstrukcji nośnych osprzętów roboczych MRC w zakresie trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem procesu technologicznego wytwarzania i warunków eksploatacji*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej. Prace Naukowe CPBP--02.05. Warszawa 1990.
- [16] Pawliczek R., *Wpływ wartości średniej w obciążeniach blokowych na kształt pętli histerezy przy zginaniu próbek ze stali S355*. [W:] *Przegląd Mechaniczny* nr 2, 2013.
- [17] Dudek D., Dudek K., *Dokładność metody otworkowej w ocenie poziomu naprężeń własnych w elementach ustrojów nośnych maszyn roboczych*. [W:] *Konf. „Problemy maszyn roboczych”*. Zakopane, 2000.

Artykuł zrealizowano w ramach projektu pt. *Mechatroniczny system sterowania, diagnostyki i zabezpieczeń w maszynach górnictwa odkrywkowego, nr umowy UDA-POIG.01.03.01-00-043/08-00, Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka 2007-2013. Projekt 1, Działanie 1.3. Poddziałanie 1.3.1.*

Z cyklu: *Sentymentalne wędrówki po meandrach polskiej myśli techniki górniczej*



Pierwsza polska duża koparka kołowa KWK 1400 pracująca od 1980 r. w KWB Turów

Reprint Renata S-K