

# WYMAGANIA STAWIANE USTROJOM NOŚNYM KOPAREK WIELONACZYNIOWYCH KOŁOWYCH EKSPLOATOWANYCH W UTWORACH TRUDNO URABIALNYCH

## REQUIREMENTS FOR LOAD CARRYING STRUCTURES OF BWE OPERATING IN HARD MINEABLE SOILS

Jerzy Alenowicz, Robert Rosik - „Poltegor – Instytut” Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław

*Przedstawiono specyfikę budowy i użytkowania ustrojów nośnych koparek wielonaczyiniowych kołowych eksploatowanych w utworach trudno urabialnych. Podano zasady wymiarowania tych ustrojów. Wskazano na przyczyny powstawania pęknięć zmęczeniowych powyższych ustrojów i ich skutki. Podano sposoby zapobiegania tym niekorzystnym zjawiskom. Przedstawiono przykłady ustrojów nośnych koparek przystosowanych do pracy w utworach trudno urabialnych. Zaprezentowano wykaz wymagań jakie powinny spełniać ustroje nośne koparek wielonaczyiniowych kołowych eksploatowanych w utworach trudno urabialnych.*

**Słowa kluczowe:** koparki wielonaczyiniowe kołowe, ustroje nośne, utwory trudno urabialne, eksploatacja, wymagania

*Specificity of construction and use of load carrying structures of BWE operating in the hard mineable soils has been presented in the paper. Regulations of load carrying structures dimensioning have been discussed. Reasons of fatigue failure in these structures and their consequences have been indicated. Methods of these unfavorable phenomena prevention have been given. Examples of load carrying structures of excavators adapted to operate in hard mineable soils have been placed. List of requirements for load carrying structures which should be met by BWE operating in hard mineable soils has been presented.*

**Keywords:** bucket wheel excavators BWE, load carrying structures, hard mineable soils, operation, requirements

### Wstęp

Ustrój nośny koparki kołowej jest najważniejszym zespołem decydującym o trwałości, przydatności eksploatacyjnej oraz bezpieczeństwie pracy tych maszyn (rys. 1). Składa się na to: jego przeważający udział masowy i wymiarowy dochodzący do 80% masy własnej maszyny, praktyczna niewymienialność podczas całego okresu eksploatacji, który jest bardzo długi i wynosi w granicach 30-50 lat, duża masa własna dochodząca do kilkunastu tysięcy ton, duże wysięgi zespołów roboczych ze znacznymi obciążeniami umieszczonymi w ich końcowych odcinkach (zespół urabiania, zespół przeciwwagi), przeniesienie wspomnianych już dużych obciążeń dynamicznych o wartościach często znacznie przekraczających wartości normatywne, praca na otwartej przestrzeni w zmiennych warunkach atmosferycznych często znacznym zapyleniu i dużej wilgotności. Wobec powyższych faktów ustroje nośne koparek kołowych, szczególnie pracujących w utworach trudno urabialnych podlegają stosunkowo szybkiej degradacji przy czym dominującym procesem ich niszczenia jest proces zmęczenia [1][2][3][4][5][6].

Przy tak dużych obiektach, jakimi są koparki kołowe, prowadzić to może do poważnego uszkodzenia poszczególnych elementów ustroju nośnego i w efekcie końcowym do katastrofy w postaci całkowitego zniszczenia tych maszyn, co

z kolei stanowi oprócz ogromnych strat finansowych poważne zagrożenie życia ludzkiego.

Sytuacja ta w ostatnich latach ulega jeszcze pogorszeniu ze względu na schodzenie z wydobywaniem węgla brunatnego do coraz niższych poziomów, co związane jest z koniecznością urabiania skał zwięzłych o wzrastających twardościach oraz ze względu na przekroczenie wieku normatywnej pracy przewidzianej przez producenta większości aktualnie eksploatowanych koparek kołowych w krajowych kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego [7].

### Wymiarowanie ustrojów nośnych koparek wielonaczyiniowych kołowych

Ustroje nośne koparek kołowych górnictwa odkrywkowego wymiarowane są na trwałość zmęczeniową głównie w oparciu o normę DIN 22261-2 [8] oraz normy PN-G-47000-1 [9] i ISO-5049-1 [10].

Według powyższych norm do obliczeń przyjmowane są wzorcowe intensywności obciążeń eksploatacyjnych określonych przez grupy natężenia pracy definiowane za pomocą statystycznego rozkładu obciążeń (wartość obciążeń i liczba ich realizacji) [5][11]. Dla złączy spawanych przyjmowane są karby wzorcowe zawarte w powyższych normach i na tej podstawie przyjmowane są naprężenia dopuszczalne. Ogólnie mówiąc

obliczenia wytrzymałościowe skupiają się tu na wyznaczeniu zakresu zmienności naprężeń wynikającego z ekstremalnego skojarzenia poszczególnych obciążeń obliczeniowych. Kojarzenie obciążeń, wybór najbardziej niekorzystnych ich przypadków i na tej podstawie wymiarowanie ustroju nośnego odbywa się za pomocą specjalistycznych programów komputerowych [12][13]. Ustrój nośny przed wystąpieniem nadmiernych ugięć i odkształceń jest zabezpieczony na etapie projektowania przez odpowiedni dobór struktury konstrukcji, zastosowanych profili i materiału, z którego są one wykonane oraz zastosowanie urządzeń zabezpieczających głównych mechanizmów przed przeciążeniem, a także urządzeń zabezpieczających przed kolizją poszczególnych zespołów roboczych jak i całych maszyn pomiędzy sobą w ciągu technologicznym. Następnie tak ukształtowany i zwymiarowany ustrój nośny jest wytwarzany i montowany na placu montażowym użytkownika, a następnie rozpoczyna się etap eksploatacji. Etap montażu, a szczególnie łączenia poszczególnych elementów i zespołów za pomocą spawania podlega ścisłej kontroli według norm i przepisów warsztatowych ponieważ od jego jakości zależy w dużej mierze trwałość tak ukształtowanej konstrukcji. Tak zaprojektowany i wykonany ustrój nośny w większości przypadków zapewnia stosunkowo długotrwałe i bezpieczne użytkowanie koparek kołowych górnictwa odkrywkowego przy założonych przez projektanta normowych wartościach obciążeń [5][11].



Rys. 1. Ustrój nośny koparki SchRs 4000 firmy Orenstein & Koppel zbudowanej w 1984 roku  
Fig. 1. The load carrying structure of BWE Type SchRs 4000 (built in 1984 by O&K/LMG)

### Przyczyny powstawania pęknięć zmęczeniowych ustrojów nośnych i sposoby ich zapobiegania

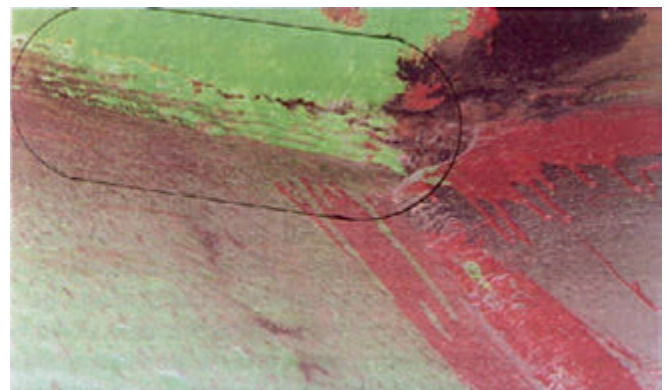
Jednak wartości obciążeń na skutek pracy koparek w utworach trudno urabialnych są znacznie większe od przyjętych wartości normowych, co w połączeniu ze zjawiskiem korozji międzykryształicznej na granicach ziaren metalu będącej ogniskiem powstawania dodatkowych pęknięć zmęczeniowych powoduje, że w praktyce (pomimo istniejących zabezpieczeń) dochodzi jednak do przekroczenia warunku wytrzymałości zmęczeniowej.

Przekroczenie tego warunku powoduje powstawanie pęknięć zmęczeniowych (rys. 2, rys. 3) [2][14], których stopniowy rozwój skutkuje zniszczeniem poszczególnych elementów ustroju nośnego. Podobnie jest w przypadku nadmiernych drgań konstrukcji. Są one wynikiem rezonansu konstrukcji z obciążeniami cyklicznie zmiennymi [1]. Dlatego na etapie projektowania przeprowadza się odpowiednią analizę drgań własnych. Zmiana

częstotliwości drgań własnych konstrukcji jest skutkiem zmiany jej sztywności, tłumienia lub masy jej zespołów lub elementów. Dlatego wystąpienie tego typu zjawiska będzie również związane z degradacją elementów konstrukcji lub ich połączeń [1][2]. Nie dotyczy to zmian modernizacyjnych, które mogą zakłócić dotychczasową strukturę lub sztywność konstrukcji i wymagają przeprowadzenia ponownych obliczeń wytrzymałościowych. Stąd też jednym ze sposobów zapobieżenia tym niekorzystnym zjawiskom jest wprowadzenie eksploatacji koparek kołowych według strategii stanu technicznego [5][11]. Strategię stanu technicznego można określić jako ciągły lub okresowy pomiar i interpretację danych - symptomów wskazujących na stan - stopień degradacji obiektu i posiadając tę wiedzę prowadzić adekwatne do stopnia zagrożenia, działania zapobiegawcze przed wystąpieniem uszkodzeń, awarii, katastrof, generalnie powodując wydłużenie zasobu eksploatacyjnego, w tym przypadku ustroju nośnego. Jest to zadanie dosyć skomplikowane przede wszystkim ze względu na dużą zmienność i stochastyczny charakter obciążeń dynamicznych koparek (szczególnie pracujących w utworach tzw. trudno urabialnych) oraz ze względu na nie do końca poznane i zdefiniowane zjawisko zmęczenia metali (skutkuje to m.in. istnieniem wielu hipotez i metod oceny tego zjawiska, które w praktyce dają całkowicie odmienne wyniki) [15][16].

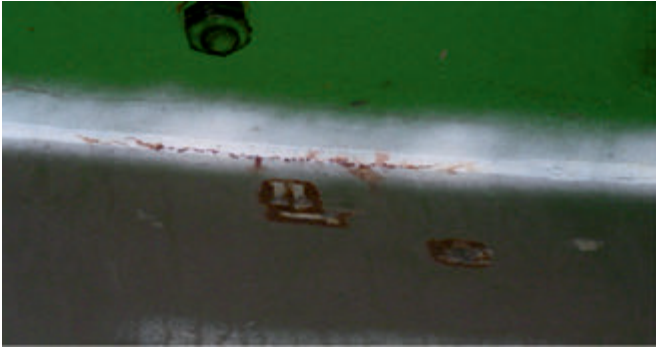
Strategię stanu technicznego można zastosować m.in.

poprzez ciągły monitoring i ocenę stanu wyężenia badanego ustroju nośnego. Przykładem jest tu opracowany w „Poltegor-Instytut” doświadczalny układ pomiaru naprężeń ustrojów



Rys. 2. Pęknięcia zmęczeniowe elementów ustroju nośnego koparki wielonaczyniowej kołowej[2]

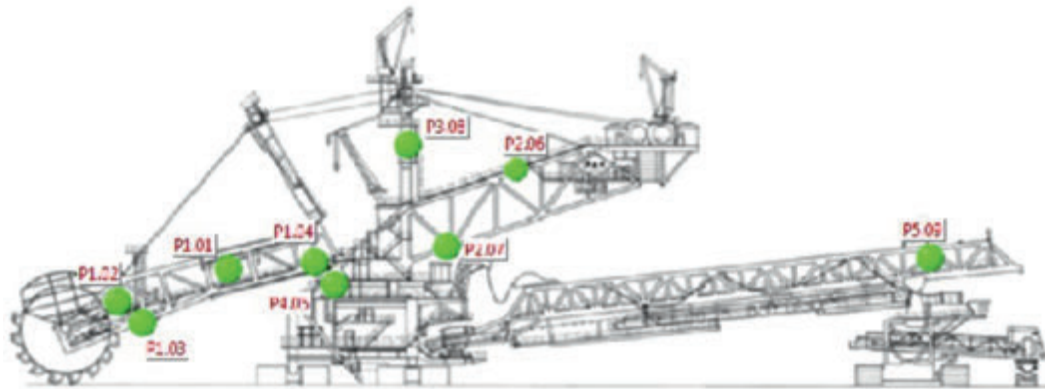
Fig. 2. Fatigue failures of BWE load carrying structure elements



Rys. 3. Pęknięcia zmęczeniowe elementów ustroju nośnego koparki wielonaczyniowej kołowej [14]

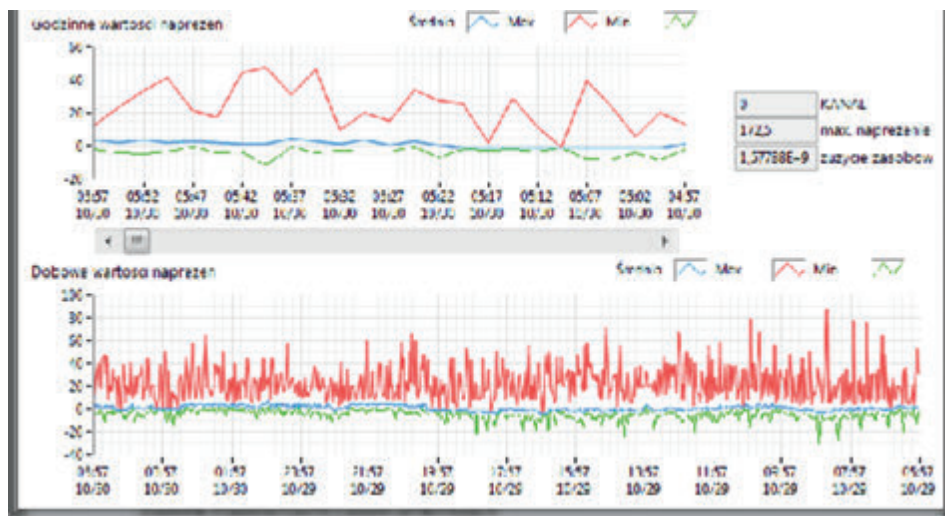
Fig. 3. Fatigue failures of BWE load carrying structure elements

tego układu jest bieżąca modyfikacja parametrów siłowych głównych mechanizmów koparki decydujących o wartościach i rozkładzie naprężeń w ustroju nośnym w celu zapewnienia pożądanej trwałości projektowej. Intensywność eksploatacji koparki mierzona wartościami i rozkładem naprężeń w konstrukcji jest ściśle powiązana z możliwościami siłowymi głównych mechanizmów i parametrami nastaw ich zabezpieczeń. W przypadku koparki KWK 910 główne mechanizmy takie jak, mechanizm napędu koła czerpakowego, mechanizm obrotu nadwozia i mechanizm zwodzenia wysięgnika koła czerpakowego zostały wyposażone w czujniki tensometryczne umożliwiające prowadzenie rejestracji wartości obciążeń eksploatacyjnych i ustalenie wartości szczytowej obciążenia w momencie zadziałania zabezpieczenia danego mechanizmu.



Rys. 4. Przekroje podstawowych podzespołów ustroju naośnego koparki SchRs 4000 z zainstalowanymi układami pomiarowymi [17]

Fig. 4. Cross sections of the BWE Type SchRs 4000 load carrying structure main subassemblies with installed meter circuits



Rys. 5. Przykład zarejestrowanych przebiegów wartości przyrostów naprężeń dynamicznych na wysięgniku koła czerpakowego – punkt pomiarowy P1.01.01 [17]

Fig. 5. The example of recorded waves of dynamic stresses growth on the bucket wheel boom – the measurement point P1.01.01

nośnych zamontowany na koparce SchRs 4000 w KWB Bełchatów (rys. 4)[17]. Układ ten oparty jest na ciągłym pomiarze wartości naprężeń dynamicznych w wybranych punktach diagnostycznych (rys. 5).

W założeniu, głównym zadaniem układu jest ocena zasobu trwałości zmęczeniowej wyrażona w godzinach efektywnej pracy maszyny do możliwości wystąpienia awarii poszczególnych elementów ustroju nośnego. Umożliwia to wykrycie potencjalnych uszkodzeń z odpowiednim wyprzedzeniem, tak aby można było podjąć natychmiastowe działania zapobiegawcze ewentualnym awariom. Kolejnym przykładem zastosowania strategii stanu technicznego jest układ pomiaru naprężeń zamontowany na koparce KWK 910 w KWB Turów (rys. 6)[18]. Zadaniem

Mierzone przez nie wartości naprężeń wprowadzane są do układu sterownika koparki i na ich podstawie wyznaczane jest rzeczywiste obciążenie konstrukcji nośnej (rys. 7). W momencie osiągnięcia naprężeń odpowiadających wartościom przyjętym jako graniczne w obliczeniach trwałościowych, następuje zmniejszenie prędkości działania głównych mechanizmów, a tym samym ograniczenie obciążeń konstrukcji nośnej. W ten sposób precyzyjnie określono wartości obciążeń działających na konstrukcję nośną, nie w oparciu o możliwości siłowe mechanizmów, a w oparciu o skutki działania obciążeń w postaci naprężeń.

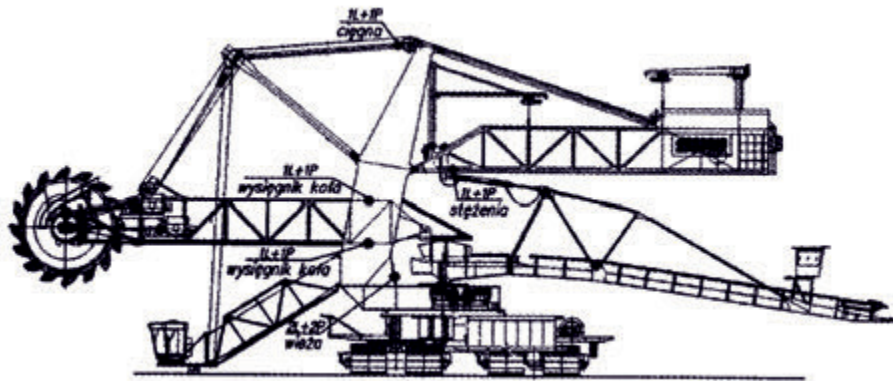
### Ustroje nośne koparek przystosowanych do pracy w utworach trudno urabialnych

W utworach bardzo trudno urabialnych (o jednostkowych liniowych oporach urabiania  $k_L \geq 150 \text{ kN/m}$ ) znalazły zastosowanie koparki kompaktowe o budowie znacznie odbiegającej od koparek tradycyjnych. Koparki te charakteryzuje (rys. 8) [20][21]:

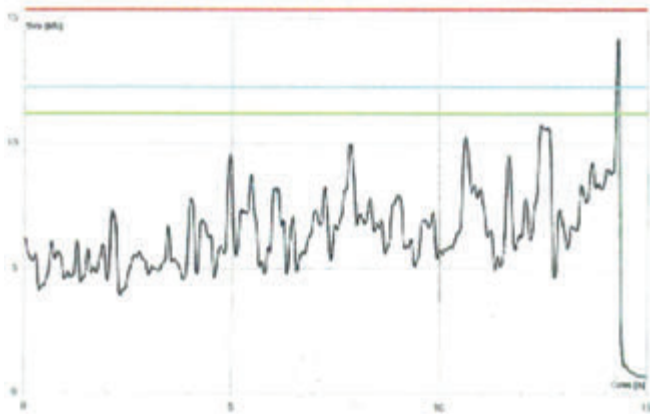
- relatywnie krótki wysięgnik koła czerpakowego - stosunek długości wysięgnika  $L$  do średnicy koła czerpakowego  $D$  wynosi  $L/D \leq 2$  podczas gdy dla koparek o budowie

tradycyjnej  $L/D = 3 \div 4$ ,

- hydrauliczny mechanizm zwodzenia wysięgników koła czerpakowego i przenośnika załadunkowego, zamiast mechanizmów wciągarkowych stosowanych w koparkach tradycyjnych, co z kolei pozwala zlikwidować maszty w ustroju nośnym,
- platforma obrotowa przedłużona do tyłu wraz z zintegrowanym pomieszczeniem wyposażenia elektrycznego i przeciwwagą, co pozwala na likwidację wysięgnika przeciwwagi w ustroju nośnym i obniżenie środka ciężkości nadwozia,



Rys. 6. Przekroje w podstawowych zespołach ustroju nośnego koparki KWK 910 z zainstalowanymi układami pomiarowymi [18]  
Fig. 6. Cross sections of the BWE Type KWK 910 load carrying structure main subassemblies with installed meter circuits



Rys. 7. Przebieg zmian wartości sił w czujniku siły przy przeciążeniu mechanizmu urabiania aż do wyłączenia napędu [18]

Fig. 7. Forces value wave changes in the force sensor at the mining mechanism overload until the drive off



Rys. 8. Koparka kompaktowa SANDVIK PE100 [20]  
Fig. 8. Compact BWE Type PE 100 (built by Sandvik)



Rys. 9. Koparka KWK-910 w KWB Turów [19]

Fig. 9. BWE Type KWK 910 (built by SKW Zgorzelec) in Turów Mine

- podwozie dwugąsienicowe zamiast podwozia wielogąsienicowego w koparkach tradycyjnych,
- stosunkowo duża średnica koła czerpakowego o zwiększonej liczbie czerpaków i mocy napędu.

Dzięki takiej budowie koparki te charakteryzuje znacznie mniejsza masa (o 40-60%) w stosunku do koparek tradycyjnych, większa odporność ustroju nośnego na obciążenia dynamiczne (a szczególnie mniejsza podatność na powstanie różnego rodzaju drgań w tym rezonansowych), zwiększona manewrowość (możliwość jazdy po większych pochyłościach 1:11 ÷ 1:18 w stosunku do 1:20 ÷ 1:33 dla koparek tradycyjnych i mniejszy promień skrętu), stosunkowo duża wartość siły kopania. Natomiast do wad tego typu koparek należy ograniczenie możliwości technologicznych warunków pracy (mniejsza wysokość urabianych pięter i mniejsza szerokość zabierek).

Do eksploatacji w utworach bardzo trudno urabialnych zaprojektowano i zbudowano koparkę specjalnego przeznaczenia KWK 910 projekt firm SKW Zgorzelec i „Poltegor Instytut” (rys. 9)[19]. Moc napędu koła czerpakowego wynosi 1000 kW (2 x 500 kW), jednostkowy liniowy opór urabiania  $k_L = 200 \text{ kN/m}$ , koło posiada 16 czerpaków, promień skrętu gąsienic wynosi 25 m, dopuszczalne pochylenie wzdłużne koparki wynosi 1:20 podczas pracy i 1:15 podczas przejazdów, wysokość urabiania 21,6 m, średnica koła czerpakowego 10,2 m, wysokość załadunku 11,3 m.

Konstrukcja stalowa nadwozia wsparta jest na platformie ułożyskowanej na specjalnym (dostosowanym do wymogów większych pochyłości przy transporcie i urabianiu) dwurzędowym skośnym łożysku kulowym. Konstrukcja nośna nadwozia została zaprojektowana w sposób umożliwiający osiągnięcie wysokiej trwałości zmęczeniowej i prowadzenie jej eksploatacji według konkretnego zasobu projektowego w zakresie trwałości. Węzły konstrukcyjne zostały ukształtowane w taki sposób, aby uniknąć spiętrzenia naprężeń w rejonie złączy spawanych. W punktach połączeń głównych zespołów konstrukcyjnych wprowadzono przeguby eliminujące szkodliwe oddziaływanie momentów gnących w miejscach skokowej zmiany sztywności. Sylwetka koparki została ukształtowana w taki sposób, aby uzyskać pożądaną charakterystykę dynamiczną ograniczającą zjawisko rezonansu w wyniku procesu urabiania. Układ transportowy charakteryzuje się małą wysokością przesypu środkowego, uszczelnieniem przesypów i prostoliniowym biegiem taśm. Środek ciężkości nadwozia znajduje się stosunkowo nisko.

## Podsumowanie

Reasumując powyższy opis ustrój (konstrukcja) nośny koparek pracujących w gruntach trudno urabialnych powinien:

- być kształtowany w oparciu o modelowanie w środowisku 3D, tak aby uzyskać pożądaną charakterystykę dynamiczną ograniczającą zjawiska rezonansu powstające głównie w procesie urabiania,
- charakteryzować się połączeniami spawanymi, z minimalną ilością połączeń śrubowych. Połączenia spawane powinny być poddane szczegółowej analizie przy zastosowaniu technik komputerowych i laboratoryjnych w celu ograniczenia zjawiska powstawania spiętrzeń naprężeń,
- sztywność konstrukcji stalowej podwozia jak i nadwozia powinna być szczególnie dobrze skojarzona ze względu na trwałość łoża kulowego. Dla trudnych warunków urabiania i transportu mogą następować większe nachylenia konstrukcji. Samo łożo kulowe powinno charakteryzować się zwiększoną średnicą i być raczej dwurzędowe. Wyklucza się stosowanie zamiast łoża kulowego wózków jezdnych,
- węzły konstrukcyjne powinny być ukształtowane w taki sposób, aby uniknąć spiętrzenia naprężeń w rejonie złączy spawanych,
- w punktach połączeń głównych zespołów konstrukcyjnych należy zastosować przeguby eliminujące szkodliwe oddziaływanie momentów gnących w miejscach skokowej zmiany sztywności,
- ze względu na występowanie nadmiernych obciążeń dynamicznych o charakterze udarowym należy szczególnie zadbać o stateczność koparki poprzez odpowiednie rozłożenie mas konstrukcji nośnej jak i mechanizmów oraz jak już wspomniano wyżej poprzez zwiększoną średnicę łoża kulowego,
- układ transportowy, a co za tym idzie konstrukcja nośna powinna być tak ukształtowana, aby zapewnić małą wysokość przesypów (które powinny być uszczelnione) i prostoliniowy przebieg taśm, ilość przesypów powinna być możliwie jak najmniejsza,
- środek ciężkości nadwozia powinien być położony w możliwie najniższym miejscu,
- ustrój nośny powinien być dodatkowo zabezpieczony przed nadmiernym działaniem obciążeń (naprężeń) dynamicznych poprzez układ ciągłego monitoringu i oceny stanu wytrzymałości jego elementów oraz w miarę możliwości w układ do bieżącej modyfikacji parametrów siłowych głównych mechanizmów koparki.

*Pracę zrealizowano w ramach Funduszu Badawczego Węgla i Stali nr RFCR-CT-2015-00003 (BEWEXMIN).*

## Literatura

- [1] Dudek D.: *Elementy dynamiki maszyn górnictwa odkrywkowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 1994
- [2] Babiarczyk S., Dudek D.: *Kronika awarii i katastrof maszyn podstawowych w polskim górnictwie odkrywkowym*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2007
- [3] Alenowicz J.: *Badania diagnostyczne konstrukcji nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego*. Górnictwo Odkrywkowe nr 2, 2004

- [4] Rusiński E., Czmochoowski J., Pietrusiak D.: *Selected problems in designing and constructing surface mining machinery*. FME Transactions 2012, vol. 40 No 4
- [5] Kowalczyk M., Sobczykiewicz W.: *Problemy realizacji projektu eksploatacyjnego PEX konstrukcji nośnej maszyn górnictwa odkrywkowego w zakresie trwałości zmęczeniowej*. Górnictwo Odkrywkowe nr 3-4, Wrocław 2011
- [6] Huss W.: *Problems of bucket wheel excavators body in hardy - workable grounds in Polish open pit mines*. W: Proceedings of the 12th International Symposium Continuous Surface Mining -Aachen 2014, Ed. Christian Niemann - Delius Cham, Springer cop. 2015
- [7] Alenowicz J., Wygoda M.: *Modernizacja maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego*. Górnictwo Odkrywkowe nr 6/2008
- [8] DIN 22261 Bagger, *Absetzer und Zusatzgeräte in Braunkohlentagebauen*. Deutsches Institut für Normung, 1998
- [9] Norma PN-GN-47000-2. *Koparki wielonaczyniowe i zwalowarki*. Cz. 2. Podstawy obliczeniowe
- [10] Norma PN-ISO 5049.1. *Urządzenia przejezdne do transportu ciągłego materiałów sypkich*. Cz. 1. Wytyczne do obliczeń stalowych konstrukcji nośnych.
- [11] Kowalczyk M. Sobczykiewicz W. *Realizacja zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego konstrukcji nośnych MRC*. Ujęcie zintegrowane. Górnictwo Odkrywkowe nr 4-5, Wrocław 2009
- [12] Rusiński E.: *Metoda elementów skończonych systemu COSMOS/M*. Wydawnictwo KiŁ 1994
- [13] Rusiński E., Czmochoowski J., Smolnicki T.: *Zaawansowana metoda elementów skończonych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [14] Augustynowicz J., Dudek K., Rosik R.: *Przyczyny degradacji ustrojów nośnych wielonaczyniowych koparek kołowych*. Górnictwo Odkrywkowe, nr 5-6, 2006
- [15] Kocańda St., Szala J.: *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*. PWN Warszawa 1991
- [16] Alenowicz J., Musiał W.: *Ocena trwałości zmęczeniowej konstrukcji nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego na podstawie pomiarów naprężeń w wybranych elementach ustroju nośnego*. Górnictwo Odkrywkowe nr 5-6/1998, str. 56-62
- [17] Alenowicz J., Onichimiuk M., Wygoda M.: *Ocena zasobu trwałości zmęczeniowej ustrojów nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego*. Górnictwo i Geoinżynieria. Rok 35. Zeszyt 3/1. AGH Kraków 2011, str. 43-53
- [18] Kowalczyk M., Sobczykiewicz W.: *Sterowanie intensywnością obciążeń eksploatacyjnych konstrukcji nośnej*. Górnictwo Odkrywkowe nr 6/2009
- [19] Wocka N.: *Pierwsza polska koparka KWK 910 do pracy w utworach trudno urabialnych*. Górnictwo i Geoinżynieria. Rok 33. Zeszyt 2. 2009
- [20] [mining.sandvik.com](http://mining.sandvik.com)
- [21] Kasztelewicz Z.: *Koparki wielonaczyniowe i zwalowarki taśmowe*. Technologia pracy. Monografia AGH Kraków 2012



Fot. Renata S-K

Z cyklu: „Pustka na granicy nicości”