

OCENA STANU TECHNICZNEGO MASZYN GÓRNICTWA ODKRYWKOWEGO PO WIELOLETNIEJ EKSPLOATACJI WSPOMAGANA METODAMI NUMERYCZNO-EKSPERYMENTALNYMI

TECHNICAL CONDITION ASSESSMENT OF SURFACE MINING MACHINERY WITH THE USE OF NUMERICAL AND EXPERIMENTAL METHODS

Eugeniusz Rusiński, Jerzy Czmochocki, Marcin Kowalczyk, Przemysław Moczko, Grzegorz Przybyłek – Katedra Konstrukcji i Badań Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska

Na przykładzie badań koparki wieloczepakowej SRs-2000 przedstawiono procedurę oceny stanu technicznego ustroju nośnego tej maszyny po wieloletniej eksploatacji z wykorzystaniem metod numerycznych i eksperymentalnych. Za pomocą MES z uwzględnieniem aktualnych norm, co do obciążeń, zidentyfikowano miejsca najbardziej wyczerpane. Metodami eksperymentalnymi zmierzono rzeczywiste oddziaływania dynamiczne podczas procesu urabiania węgla. Przedstawiono wybrane wyniki symulacji komputerowych i badań eksperymentalnych.

Based on investigations of bucket wheel excavator SRs-2000, a procedure covering numerical and experimental methods for technical condition assessment of the superstructure of the machine, after many years of exploitation is presented. Using FEM with regard to loads obtained from current standards, areas indicating higher effort were identified. Experimental methods enabled to measure the actual dynamic loads during the process of coal excavation. Selected results of computer simulations and experimental studies are presented in the paper.

Wprowadzenie

Maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego węgla brunatnego są eksploatowane przez kilkadziesiąt lat. Po przekroczeniu ok. 30 lat eksploatacji w maszynach tych obserwuje się zjawiska zmęczenia materiału w postaci pęknięć, często bardzo odpowiedzialnych elementów nośnych [1]. Przykładem tutaj może być zerwanie cięgna podwieszenia wysięgnika przeciwwagi koparki KWK-1400 w KWB Turów (rys. 1) [7], pęknięcia słupów podporowych koparki SRs-2000 (rys. 2) [13], pęknięcie osi w układzie gąsienicowym zwałowarki A₂RsB-12500 (rys. 3) [17], pęknięcie głowicy wysięgnika koła czerpakowego koparki SchRs-4600 [15] w KWB Bełchatów. Po tak długim okresie eksploatacji maszyny tego typu powinny być poddane gruntownej ocenie stanu technicznego, celem identyfikacji miejsc zagrożonych, ocenie rzeczywistych obciążeń oraz oszacowania trwałości resztkowej [2, 9, 11, 18].

W kopalni zrozumiano to zagrożenie i podjęto działania mające na celu sprawdzenie aktualnego stanu technicznego ustrojów nośnych maszyn urabiających, w tym szczególnie

koparek wieloczepakowych. Aby ten cel osiągnąć przeprowadza się kompleksowy cykl badań zgodnie z wypracowanymi i sprawdzonymi procedurami [11]. Poniżej przedstawiono badania jednej z koparek eksploatowanych w KWB Bełchatów, tj. koparki SRs-2000. Zgodnie z metodyką opracowaną w Katedrze Konstrukcji i Badań Maszyn Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej wykonano:



Rys. 2. Pęknięcia słupów podporowych koparki SRs-2000



Rys. 1. Awaria koparki KWK-1400



Rys. 3. Pęknięcie osi w gąsienicowym układzie jazdy zwałowarki A₂RsB-12500



Rys. 4. Pęknięcie głowicy wysięgnika koła czerpakowego koparki SchRs-4600x30

- analizę awarii i napraw, jakim poddawany był ustrój nośny koparki,
- analizę dotychczasowych modyfikacji ustroju nośnego,
- długoterminowe pomiary rzeczywistych oddziaływań dynamicznych podczas procesu urabiania,
- pomiary drgań nadwozia koparki,
- obliczenia wytrzymałościowe MES,
- badania defektoskopowe nieniszczące miejsc najbardziej wyciężonych,
- zalecenia, co do okresowej kontroli miejsc najbardziej narażonych na pęknięcia zmęczeniowe.

Takie kompleksowe podejście do zagadnienia pozwala w wiarygodny sposób ocenić rzeczywisty stan techniczny ustroju nośnego maszyny [11, 14, 16].

Pomiary rzeczywistych oddziaływań dynamicznych

Jednym z ważniejszych etapów oceny możliwości dalszej eksploatacji maszyny są pomiary rzeczywistych oddziaływań dynamicznych, którym poddawany jest ustrój nośny. W tym celu opracowano autonomiczny układ pomiarowy (rys. 5) pozwalający rejestrować zmiany obciążeń występujących na kole czerpakowym w dłuższym okresie czasu [5]. Siły występujące podczas urabiania określono w sposób pośredni poprzez pomiary tensometryczne na belce momentowej układu napędowego



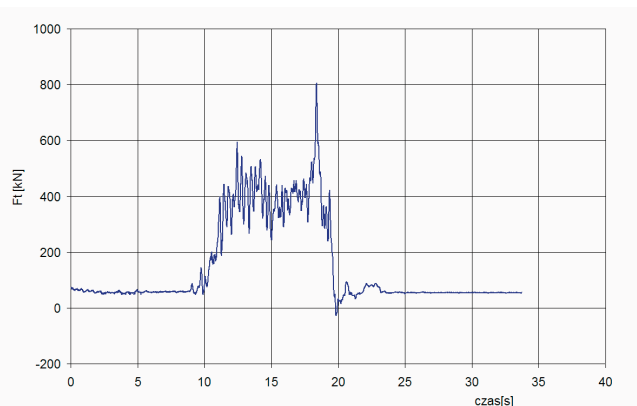
Rys. 5. Autonomiczny rejestrator dwukanałowy z pomiarów tensometrycznych

koła czerpakowego. Przeprowadzone 15-dniowe pomiary pozwoliły określić prawdopodobieństwo występowania przeciążeń o określonej wartości oraz liczbę ich wystąpień, co może być podstawą do określenia trwałości. W okresie rejestracji maksymalny współczynnik przeciążenia osiągnął 1,55 (rys. 6). Przypadki przeciążenia powyżej 1,3 stanowiły ok. 1,5% wszystkich przypadków przeciążenia tj. ok. 0,04% czasu pracy, a wszystkie przeciążenia występowały przez ok. 3% całego okresu rejestracji. W całym okresie rejestracji wystąpiło 17 przypadków przekroczenia współczynnika przeciążeniowego 1,3, w których następowało wyłączenie napędu głównego.

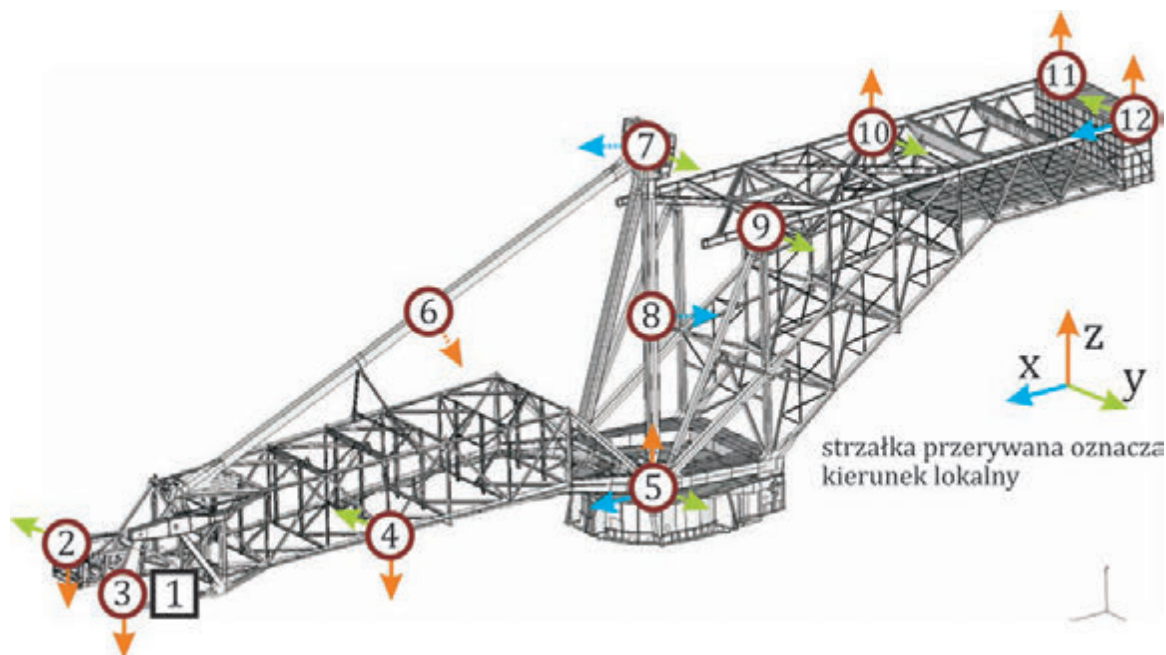
Pomiary drgań nadwozia koparki

W celu weryfikacji poziomu drgań koparki podczas pracy i zestawienia ich z przyjmowanymi współczynnikami obciążenia dynamicznego od sił bezwładności, przeprowadzono pomiary przyspieszeń ustroju nośnego nadwozia [3, 6, 8]. Punkty pomiarowe dobrano na całej konstrukcji w taki sposób, aby uzyskać jak najbardziej miarodajne wyniki (rys. 7). Wyznaczono 4 punkty na wysięgniku koła czerpakowego, jeden punkt na belce łączącej maszt z wysięgnikiem koła, trzy punkty na maszcie oraz cztery punkty na przeciwwadze. Dodatkowo, równolegle dokonywano na belce momentowej pomiaru obciążenia wynikającego z sił urabiania [10].

Na podstawie pomiarów drgań określono wartości skuteczne przyspieszeń zarejestrowanych w poszczególnych punktach pomiarowych i porównano z wartościami normowymi [4]



Rys. 6. Przebieg zmian obciążeń na kole czerpakowym, przeciążenie o wartości 807 kN



Rys. 7. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na nadwoziu koparki

przyjmowanymi do obliczeń ustrojów nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego. Stwierdzono przekroczenia wskaźnika obciążeń dynamicznych D dla wszystkich podstawowych zespołów nadwozia koparki. Te zmierzone wartości wskaźników dynamicznych uwzględniono w odpowiednich kojarzeniach obciążeń podczas obliczeń wytrzymałościowych.

Obliczenia wytrzymałościowe MES

Obliczenia wytrzymałościowe MES są w tym projekcie kluczowe, gdyż umożliwiają zidentyfikować najbardziej obciążone węzły konstrukcyjne. W przypadku tak złożonych obiektów, jakimi są konstrukcje nośne koparek, jest to zagadnienie niezmiernie trudne. W celu osiągnięcia zamierzonego celu, jakim jest określenie wyężenia węzłów konstrukcyjnych podjęto próbę opracowania modelu powłokowego (rys. 9). W modelu takim każda blacha (płyta, powłoka) modelowana jest za pomocą powierzchni środkowej, na której generowane są elementy skończone powłokowe niosące informację o zastosowanej grubości blachy [12]. Model geometryczny ustroju nośnego nadwozia koparki SRs-2000 złożony z powierzchni opracowano na podstawie dokumentacji dostarczonej przez

Zleceniodawcę z uwzględnieniem wcześniejszych modernizacji i zmian konstrukcyjnych.

Do dyskretyzacji powierzchni płaskich zastosowano elementy powłokowe typu SHELL, natomiast zespoły nie nośne, a stanowiące obciążenie ustroju nośnego pochodzące np. od zespołów napędowych, przenośników, zbroczy, bębnow linowych czy taśmowych, koło czerpakowe, wały itp. wprowadzono do modelu poprzez elementy masowe. Do budowy modelu dyskretnego zastosowano również wiele innych elementów skończonych takich jak: elementy belkowe BEAM3D, elementy CONSTRAINT, RIGID, SPRING modelujące połączenia zespołów, tak aby osiągnąć model, odzwierciedlający analizowany obiekt (rys. 10).

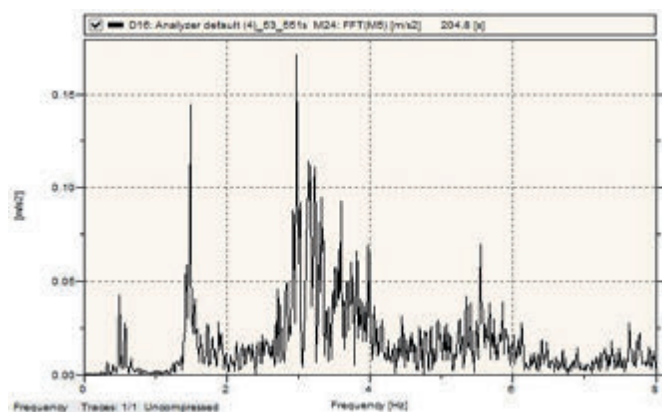
Podstawą do określenia obciążeń i ich kojarzeń jest norma [6] i dowód stateczności, w którym wyszczególnione są wszystkie masy i ich położenie w przestrzeni. Obciążenia od urabiania określone są na podstawie mocy i momentów zastosowanych napędów, skorygowane zgodnie z rzeczywistymi pomiarami na koparce.

Do oceny wyężenia obliczane są naprężenia zastępcze według Hubera-Misesa dla określonych zestawów obciążeń i zakresy zmian naprężeń do oceny wytrzymałości zmęczeniowej. Przykładowy rozkład naprężeń zredukowanych pokazano na rysunku 11 i zakres zmian naprężeń na rys. 12.

W wyniku obliczeń MES zlokalizowano miejsca, gdzie zostały przekroczone wartości dopuszczalne. Rejony te są potencjalnymi miejscami wyczerpania trwałości skutkujące potencjalnymi uszkodzeniami. Zostały one zdokumentowane, jako miejsca do okresowej kontroli i w ramach tej oceny stanu technicznego zostały zbadane metodami defektoskopowymi nieniszczącymi.

Badania defektoskopowe nieniszczące

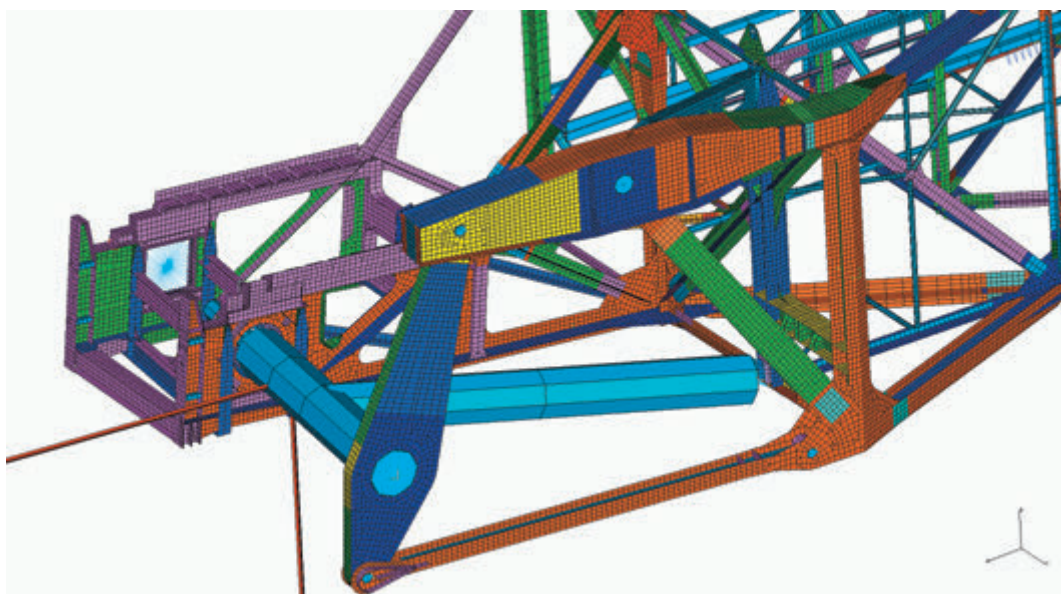
Celem pracy było wykrycie metodą nieniszczącą ewentualnych nieciągłości materiałowych powstałych w wyniku eksploatacji maszyny (w złączach spawanych), w wyznaczonych wcześniej węzłach konstrukcyjnych. Szczególną uwagę



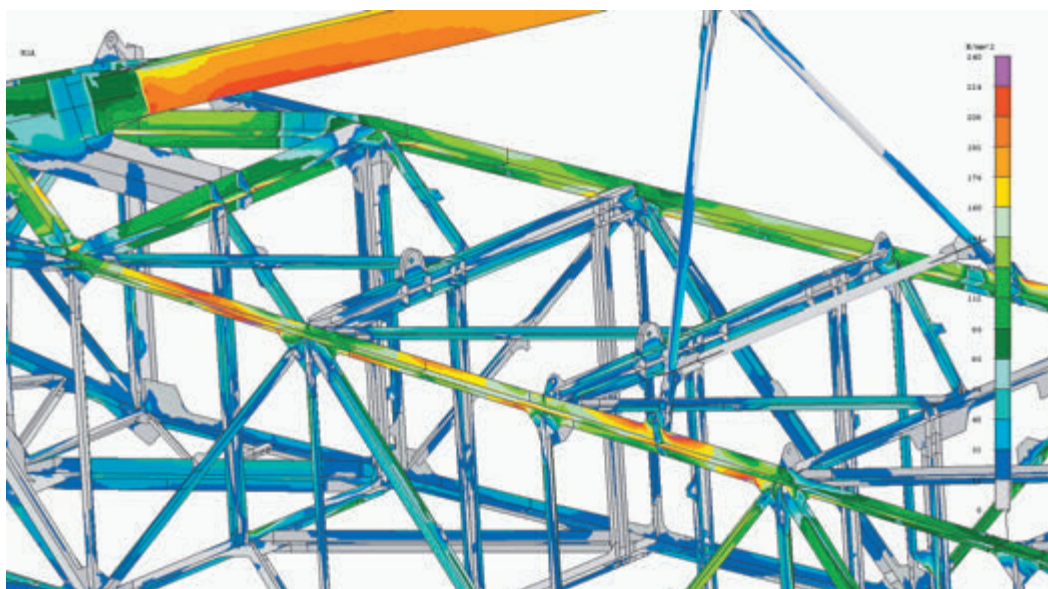
Rys. 8. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszeń pionowych w punkcie 4



Rys. 9. Model geometryczny powierzchniowy ustroju nośnego nadwozia koparki SRs-2000



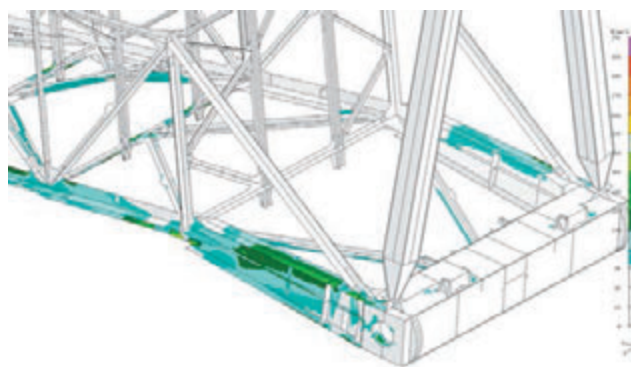
Rys. 10. Fragment modelu dyskretnego powłokowo-belkowego przedniej części wysięgnika koła czerpakowego koparki SRs-2000



Rys. 11. Rozkład naprężeń zredukowanych w środkowej części wysięgnika koła czerpakowego

skupiono na wysięgniku koła czerpakowego, który podczas pracy poddany jest znacznym obciążeniom dynamicznym. Rutynowo przeprowadza się oględziny pozostałych miejsc, szczególnie poprawności wykonania połączeń spawanych, które są najczęściej miejscami inicjacji pęknięć.

Podczas badań zastosowano metodę magnetyczno-proszkową mokrą z magnesowaniem magnesem stałym. Do wykrywania rozproszonego pola magnetycznego użyto proszku magnetycznego w aerozolu, który nanoszono na badany element w trakcie magnesowania. Miejsca badania odfuszczano oraz pomalowano farbą podkładową w celu polepszenia czytelności defektografów proszkowych. W badanej konstrukcji zlokalizowano nieliczne miejsca, w których zaobserwowano pęknięcia i ślady produktów korozji będące efektem braku odpływu wody z opadów atmosferycznych (rys. 13).



Rys. 12. Zakres zmian naprężeń w wysięgniku koła czerpakowego



Rys. 13. Badania defektoskopowe nieniszczące: a) pęknięcie w konstrukcji wyrzutnika kamieni, b) produkty korozji, będące efektem braku odpływu wody

Podsumowanie

W ramach badań ustrojów nośnych maszyn podstawowych przeprowadzono kompleksowe badania ustroju nośnego nadwozia koparki SRs-2000. Badania te przeprowadzono zgodnie z procedurą stosowaną dla tego typu maszyn opracowaną w Katedrze Konstrukcji i Badań Maszyn na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. W ramach badań maszyn

po długoletniej eksploatacji, tj. po okresie 30-letnim, należy przeprowadzić badania mające na celu zidentyfikowanie miejsc potencjalnie narażonych na pęknięcia zmęczeniowe. W tym celu zastosowano metody eksperymentalne i numeryczne, które nawzajem się uzupełniają, dając pełny obraz rzeczywistych obciążeń i wyężenia kluczowych elementów ustroju nośnego maszyny górnictwa węgla brunatnego.

Literatura

- [1] Babiarz S., Dudek D.: *Kronika awarii i katastrof maszyn podstawowych w polskim górnictwie odkrywkowym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007
- [2] Czmochowski J., Przybyłek G.: *Numeryczno-eksperymentalna identyfikacja pęknięć ustrojów nośnych maszyn górnictwa węgla brunatnego* W: Podstawy konstrukcji maszyn - kierunki badań i rozwoju : [monografia]. T. 2, [pod red. nauk. Michała Wasilczuka]. Gdańsk : Wydział Mechaniczny. Politechnika Gdańska, 2011. s. 384-392
- [3] Czmochowski J.: *Identyfikacja modeli modalnych maszyn urabiających w górnictwie węgla brunatnego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008
- [4] DIN 22261-2:2006 – *Bagger, Absätzer und Zusatzgeräte in Braunkohlentagebauen* (PN-G-47000-2:2011)
- [5] Kowalczyk M., Czmochowski J., Rusiński E.: *Construction of diagnostic models of the states of developing fault for working parts of the multi-bucket excavator*. Maintenance and Reliability. 2009, No 2, p. 17-24
- [6] Muchaczow J., Czmochowski J.: *Doświadczalnie numeryczna metoda estymacji obszarów rezonansowych w ustrojach nośnych maszyn roboczych*, Górnictwo Odkrywkowe. 2010, R. 51, nr 4, s. 283-288
- [7] Rusiński E., Czmochowski J., Iluk A., Kowalczyk M.: *An analysis of the causes of a BWE counterweight boom support fracture*. Engineering Failure Analysis, 2010, Vol. 17, No 1, p. 179-191

- [8] Rusiński E., Czmochoowski J., Pietrusiak D.: *Problems of steel construction modal models identification*, Maintenance and Reliability. 2012, Vol. 14, No 1, p. 54-61
- [9] Rusiński E., Czmochoowski J., Pietrusiak D.: *Selected problems in designing and constructing surface mining machinery* FME Transactions. 2012, vol. 40, nr 4, s. 153-164
- [10] Rusiński E., Czmochoowski J., Smolnicki T., Kowalczyk M., Moczko P., Pietrusiak D., Przybyłek G., Dobosz T., Maślak P., Odyjas P.: *Badanie ustrojów nośnych maszyn podstawowych, Cz. 1. Badanie koparki SRs-2000/K-40*, Raport IKiEM, Ser. SPR nr 70/2013, 176 s.
- [11] Rusiński E., Czmochoowski J.: *Metodyka oceny stanu maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego po wieloletniej eksploatacji*, Górnictwo Odkrywkowe, 2010, R. 51, nr 4, s. 168-72
- [12] Rusiński E., Czmochoowski J., Smolnicki T.: *Zawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [13] Rusiński E., Grabkowski I., Iluk A., Klimek A., Kowalczyk M., Moczko A., Moczko P., Smolnicki T., Stańco M.: *Opracowanie metody tymczasowej naprawy słupa podpory ruchomej koparki SRs 2000*, Raport IKiEM PWr Ser. SPR nr 107/2007
- [14] Rusiński E., Moczko P., Czmochoowski J.: *Numerical and experimental analysis of a mine's loader boom crack*. Automation in Construction. 2008, Vol. 17, No 3, p. 271-277
- [15] Rusiński E., Smolnicki T., Czmochoowski J., Stańco M., Działak P.: *Określenie przyczyn awarii koparki K-42 i określenie sposobu naprawy*, Raport IKiEM, Ser. SPR nr 67/2012, 92 s.
- [16] Rusiński E., Smolnicki T., Kowalczyk M., Stańco M.: *Identyfikacja wpływu zmian modernizacyjnych zespołu urabiającego koparek SRs-2000 na obciążenie konstrukcji wysięgnika urabiającego*, Raport IKiEM PWr serii SPR nr 100/2008, Wrocław 2008
- [17] Rusiński E., Smolnicki T., Stańco M., Przybyłek G., Kowalczyk M., Maślak P., Sozański L., Pietrusiak D.: *Analiza przyczyn złamania osi pojazdów sterujących zwalowarki A2RsB 12500*, Raport IKiEM PWr Ser. SPR nr 23/2010
- [18] *Strategia utrzymania w ruchu maszyn i urządzeń górnictwa odkrywkowego o wysokim stopniu degradacji technicznej*, pod red. prof. Dionizego Dudka. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013

