

ANALIZA ZAGROZEŃ DZIAŁAJĄCYCH NA OPERATORÓW SAMOJEZDNYCH MASZYN GÓRNICZYCH

WORKSITE HAZARD ANALYSIS OF SELF-PROPELLED MACHINE OPERATORS

Jacek Karliński, Mariusz Ptak, Paulina Działak – Katedra Konstrukcji i Badań Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska
Krzysztof Kulakowski – Katedra Maszyn i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

W artykule zaprezentowano dane dotyczące wypadkowości w kopalniach KGHM Polska Miedź S.A. W analizie bezpieczeństwa i zagrożeń w górnictwie rud miedzi skupiono się na operatorach samojezdnych maszyn górniczych. Obecnie stosowane konstrukcje chroniące operatorów maszyn spełniają wymagania stawiane im w Dyrektywie Maszynowej 2006/42/WE. Kryteria oceny tego typu konstrukcji są identyczne jak w przypadku maszyn budowlanych. Istotnym wyróżnikiem w przypadku maszyn górniczych jest stosowanie w ocenie bezpieczeństwa normy PN-G-59001, w której obciążenia działające na ustrój nośny są znacznie większe niż w przypadku powszechnie stosowanej normy PN EN ISO 3449 (FOPS). W artykule przedstawiono zjawiska nie ujęte w ustawodawstwie, których oddziaływanie jest istotne dla bezpieczeństwa operatorów maszyn górniczych.

The paper presents data on accidents in the mines of KGHM Polska Miedź SA. The analysis of safety and hazards in copper ore mining focused on operators of self-propelled mining machines. The currently used structures to protect machine operators comply with the requirements of the Machinery Directive 2006/42/EC. The criteria for assessing this type of construction are the same as in the case of construction machinery. However, an important differentiator for mining machines is to use the safety regulation PN-G-59001, in which the loads acting on the superstructure are much larger than in the commonly used standard BS EN ISO 3449 (FOPS). The paper presents the phenomenon which was not included in the legislation, yet essential for the safety of machine operators.

Wprowadzenie

Prowadzenie prac górniczych polegających na wydobyciu rud miedzi w KGHM Polska Miedź S.A. oraz innych kopalniach podziemnych surowców mineralnych prowadzi do naruszenia naturalnego stanu równowagi w utworach skalnych. Skutkiem takiej działalności są wstrząsy górnicze, którym towarzyszą drgania sejsmiczne rozprzestrzeniające się od źródła wstrząsu we wszystkich kierunkach w górotworze. Zjawiska te są rejestrowane, a następnie analizowane celem określenia wpływu, jaki mają na otoczenie kopalni. Ważnym aspektem jest wypracowana profilaktyka oraz metody przeciwdziałania skutkom wstrząsów.

Obecnie opracowane rozwiązania profilaktyczne, tąpaniowe i zawałowe pozwalają, w coraz trudniejszych warunkach eksploatacyjnych wynikających ze zwiększającej się głębokości położenia wyrobiska, prowadzić stosunkowo bezpieczną eksploatację. Stale doskonalone są metody oceny zagrożeń oraz opracowywane są nowe metody profilaktyczne. Eksploatacja prowadzona na dużych głębokościach i wynikające z tego obserwacje wskazują, że możliwe jest, iż składowa pozioma naprężenia w górotworze jest kilkukrotnie większa od składowej pionowej [1]. Staje się to przyczyną występowania zjawisk dynamicznych oddziałujących na operatorów samojezdnych maszyn górniczych.

Głównym czynnikiem wpływającym na zagrożenia związane z procesem wydobywczym w podziemnych kopalniach surowców mineralnych są oddziaływania związane z wpływem tąpnięć, będących najczęściej skutkiem wstrząsów sejsmicznych.

Dynamika tych zjawisk, ich skutki oraz brak możliwości przeciwdziałania sprawiają, że jest to jeden z najważniejszych czynników wpływających na zagrożenia związane z utratą zdrowia lub życia. Z tego punktu widzenia celowe i istotne jest podjęcie wszelkiego rodzaju działań mających zmniejszyć skutki zaistnienia sytuacji wypadkowej. Aby działania te były skuteczne, konieczna jest identyfikacja oraz znajomość obciążeń wywołanych tąpnięciami. W górnictwie rud miedzi oraz innych surowców mineralnych w Polsce i na świecie powszechna jest mechanizacja prac. Najczęściej stosowanymi w tego typu przypadkach maszynami są maszyny kołowe – tj. wiertnice, kotwiarki, ładowarki, wozy odstawcze. Zgodnie z obecnie obowiązującymi aktami prawnymi (Dyrektywa Maszynowa 2006/42/WE) maszyny takie są obligatoryjnie wyposażane w konstrukcje chroniące operatora podczas wywrócenia (ROPS – PN-EN ISO 3471) oraz przed spadającymi przedmiotami (FOPS – PN EN ISO 3449) i jedynie w Polsce w konstrukcję chroniącą operatora przed obwałami skał (RSPS – PN-G-59001) [2,3]. Mimo że zarówno konstrukcje FOPS, jak i RSPS są badane i poddawane ocenie przy obciążeniach dynamicznych (uderzenie obciążnikiem), to jedynym kryterium oceny jest nienaruszenie makiety DLV (Deflection-Limiting Volume PN-EN ISO 3164). Wpływ obciążeń dynamicznych na organizm ludzki jest pomijany. W wielu przypadkach takie ujęcie problemu zapewnienia bezpieczeństwa jest wystarczające. Jednak w przypadku maszyn górniczych, obserwowanym w ostatnich latach problemem jest stały wzrost ilości, jak i energii tąpnięć, a tym samym wzrost wpływu obciążeń dynamicznych w kopalniach podziemnych.

Analiza zagrożeń

Eksploracja podziemna złóż związana jest z szeregiem zagrożeń. Przeanalizowane dane, dotyczące aktywności sejsmicznej górotworu dowodzą, że 100% wydobycia rud miedzi pochodzi z rejonów zagrożonych wstrząsami i tąpnięciami [4]. Bezpośrednim skutkiem wstrząsu górotworu jest nagłe i gwałtowne wyzwolenie energii, uprzednio skumulowanej w określonym jego obszarze. Energia ta, z chwilą tąpnięcia wywołuje nagłą utratę stateczności wyrobiska. Dodatkowym efektem wywołanym wstrząsem górotworu jest dająca się zmierzyć energia sejsmiczna w postaci drgań otaczającego górotworu. Utrata stateczności wyrobiska podziemnego, drgania otaczającego wyrobisko masywu górotworu i nagły wzrost ciśnienia powietrza, stanowią olbrzymie zagrożenie dla zdrowia i życia górników oraz są przyczyną znacznych strat materialnych. Skutkiem zaistniałego wstrząsu górotworu jest wyzwolenie uprzednio nagromadzonej energii, któremu to zjawisku towarzyszą drgania i dynamiczne przemieszczenia konturów wyrobisk. Skutki tąpnięcia w decydującym stopniu zależą od wielkości energii zakumulowanej w górotworze.

Pomiar prędkości wyrzutu w warunkach eksploatacyjnych jest bardzo trudny do wykonania, stąd wiele rozbieżności w określaniu jej wartości. Przykładowo, dla tąpnięć w kopalniach kanadyjskich przyjmuje ona wartości rzędu 2-4 m/s, podczas gdy niektórzy badacze twierdzą, że może ona wynosić nawet 80 m/s. W Polsce zakłada się, że prędkość mas skalnych wyrzucanych do przestrzeni roboczej wyrobisk w trakcie tąpnięcia wynosi pomiędzy 5 a 15 m/s [4]. Można więc określić średnią prędkość mas wyrzutowych na poziomie 10 m/s. Ciężar objętościowy skał w kopalniach podziemnych wynosi około 25 kN/m³. Na tej podstawie otrzymano energię kinetyczną na poziomie 125 kJ.

Średnia prędkość początkowa V_0 jest czynnikiem, który decyduje o wielkości energii kinetycznej. Badania laboratoryjne oraz oszacowania eksperymentalne prowadzone w Polsce oceniają [4], że minimalna wartość prędkości początkowej, przy której przemieszczenia górotworu mają charakter tąpnięcia wynosi: $V_0 \min \geq 10$ m/s.

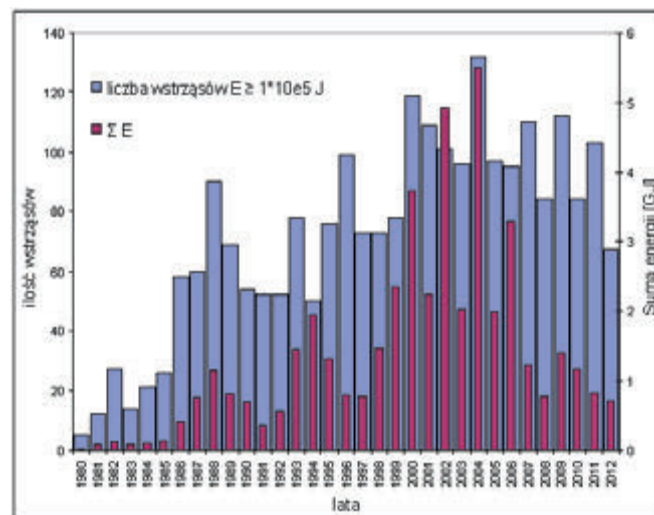
Szacuje się ponadto, na podstawie obserwacji i pomiarów, że wskutek wstrząsu górotwór doznaje drgań o częstotliwości w granicach od 3 do 14 Hz i amplitudzie od 0,03 do 21 mm. Wywołane wstrząsem górotworu przemieszczenia konturów wyrobiska, głównie jego stropu, ocenia się na od 20 mm do 550 mm [4].

Dokonano przeglądu wypadków w kopalniach rud miedzi, selekcjonując te, w których brali udział operatorzy maszyn. Obserwuje się stale rosnącą ilość tąpnięć, w których energia wstrząsu jest wyższa od 10⁵ J (rys. 1÷4). Szczególnym pod tym względem był rok 2010 (tab. 1 i 2).

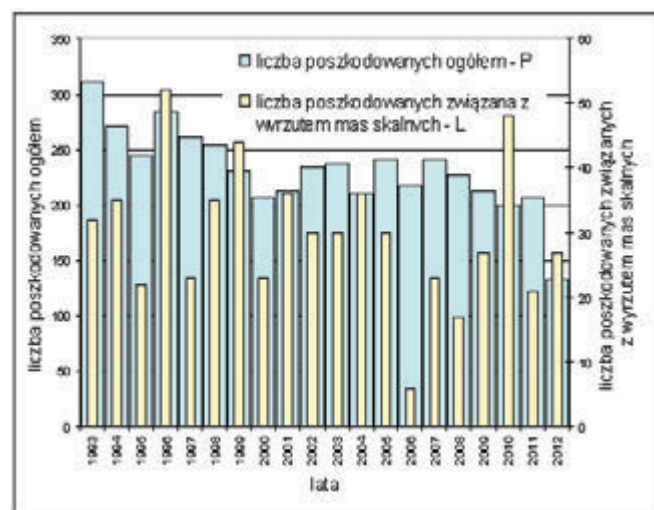
Analiza danych statystycznych (rys. 1÷4) dotyczących wypadków w górnictwie podziemnym oraz ich głównych

Tab. 2. Wypadki, w których obrażeń doznali operatorzy maszyn w kopalniach miedzi w Polsce [4, 5]

LICZBA WYPADKÓW				
2008	2009	2010	2011	2012
3	7	7	5	5



Rys. 1. Liczba i energia wstrząsów w latach 1980-2012



Rys. 2. Liczba uszkodzonych w latach 1993-2012

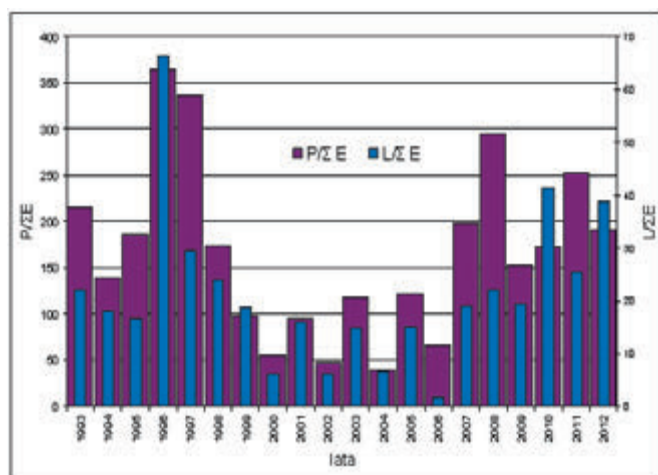
przyczyn pozwoliła na identyfikację zagrożeń oddziałujących na górników podczas wypadków. Ustalono, że główną przyczyną wypadków z udziałem operatorów maszyn górniczych są oddziaływania dynamiczne związane z tąpnięciami.

Przykład wypadku

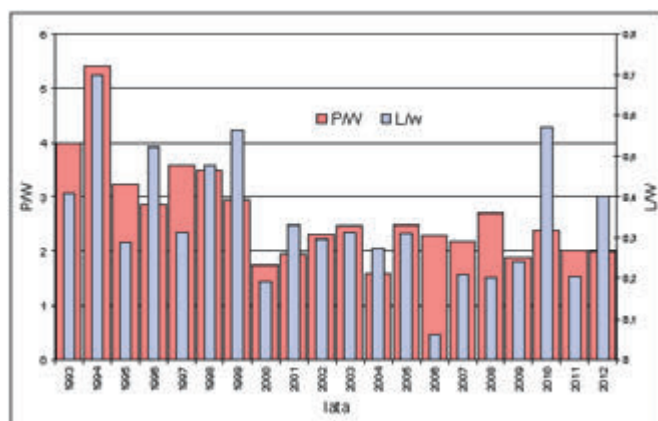
Oprócz typowych sytuacji zagrażających zdrowiu i życiu operatorów maszyn, do których dochodzi podczas tąpnięcia,

Tab. 1. Liczba tąpnięć i zawałów w kopalniach miedzi i związane z nimi wypadki w latach 2008–2012 [4, 5, 6]

	LICZBA ZDARZEŃ					LICZBA WYPADKÓW				
	2008	2009	2010	2011	2012	2008	2009	2010	2011	2012
Zawały	2	5	2	6	4	1	1	0	4	1
Tąpnięcia	7	5	10	5	2	45	17	61	12	6
RAZEM	25	28	26	22	18	91	78	63	30	9



Rys. 3. Liczba uszkodzonych w funkcji energii wstrząsów [GJ] w ZG Rudna (P – liczba uszkodzonych ogółem, L – liczba uszkodzonych związana w wyrzutem mas skalnych)



Rys. 4. Stosunek liczby uszkodzonych do liczby wstrząsów o energii $> 10^5$ J (P – liczba uszkodzonych ogółem, L – liczba uszkodzonych związana w wyrzutem mas skalnych)

polegających na obвале skał stropowych lub ich wyrzuceniu ze spągu lub ociosu, dochodzi również do groźniejszych w swoich skutkach sytuacji. Analizie poddano jeden z wypadków, różniący się znacząco od pozostałych, do którego doszło w dniu 9 lutego 2010 r., o godz. 15:20 w ZG Rudna. W wyniku tąpnięcia, spowodowanego wystąpieniem w polu eksploatacyjnym X/1 oddziału G-5 KGHM Polska Miedź S.A. O/ZG "Rudna" samoistnego wstrząsu górotworu o energii $4,1 \cdot 10^7$ J, doszło do wypadku zbiorowego. Wypadek ten został bardzo dobrze udokumentowany, zarówno pod względem skutków [7], jak materiałów dotyczących uszkodzeń jakich doszło m.in. w ładowarce, w której zginął operator. Epicentrum wstrząsu zostało zlokalizowane w caliznie przed frontem rozcinkowym, na wysokości projektowanego pasa P-28 pomiędzy komorą K-15 a K-16, w odległości kilkudziesięciu metrów od miejsca wypadku. Energia wstrząsu oraz odległość od epicentrum pozwoliła określić skrajne wartości obciążeń działających podczas tąpnięcia. Skutkami wstrząsu były między innymi:

1. Urobienie i wyrzucenie do wyrobisk, spągów piaskowcowych, w obszarze zawartym między czołami przodków komór K-12a÷K-17 i pasem P-24a oraz w obszarze zawartym między czołami przodków komór K-18÷K-22 i pasem P-25a. W wyniku tego prześwit wyrobisk ograniczony został do wysokości $0,2 \div 2,2$ m.

2. Wypiętrzenie spągów, bez wyrzutu skał, w obszarze lewego skrzydła strefy roboczej, na odcinku od zrobów do komory K-20 oraz do wysokości pasów P-20, P-21 licząc od rozcinaanej calizny. W wyniku tego prześwit wyrobisk ograniczony został do wysokości $2,5 \div 3,0$ m oraz zniszczonych zostało 19 stojaków hydraulicznych, 7 kasztów drewnianych i licznik trzasków MLT.

Podczas wypiętrzenia spągu, ładowarka została wyrzucona w górę z pewną prędkością, w wyniku czego doszło do zderzenia kabiny ze stropem, a w następnej kolejności po zniszczeniu mocowania kabiny, pozostała część maszyny uderzyła w strop. W wyniku zderzenia zostały odkształcone elementy konstrukcyjne maszyny w jej górnej części. Dużym deformacjom uległo mocowanie na maszynie z prawej strony kabiny operatora. Mocowanie kształtowe w postaci sworzni o średnicy 70 mm, zamocowane do konstrukcji za pomocą wsporników spawanych do ramy maszyny, nie uległo zniszczeniu. W tylnej części deformacje były znacznie większe niż w przedniej, co wynika z niższej sztywności elementów konstrukcyjnych w porównaniu z przednią częścią maszyny. Mała deformacja elementów przedniej części maszyny wynika przede wszystkim ze sztywności wysięgnika roboczego. Stwierdzono, iż w wyniku uderzenia, część energii kinetycznej związanej z ruchem maszyny została dyssypowana w postaci odkształceń plastycznych w części konstrukcji ramy maszyny. Zdjęcia z wypadku przedstawiają maszynę w osypanym wyrobisku (rys. 5 i 6) oraz zniszczoną kabinę (konstrukcję chroniącą) operatora (rys. 7 i 8).



Rys. 5. Widok wyrobiska po zdarzeniu



Rys. 6. Ładowarka w wyrobisku po wypadku



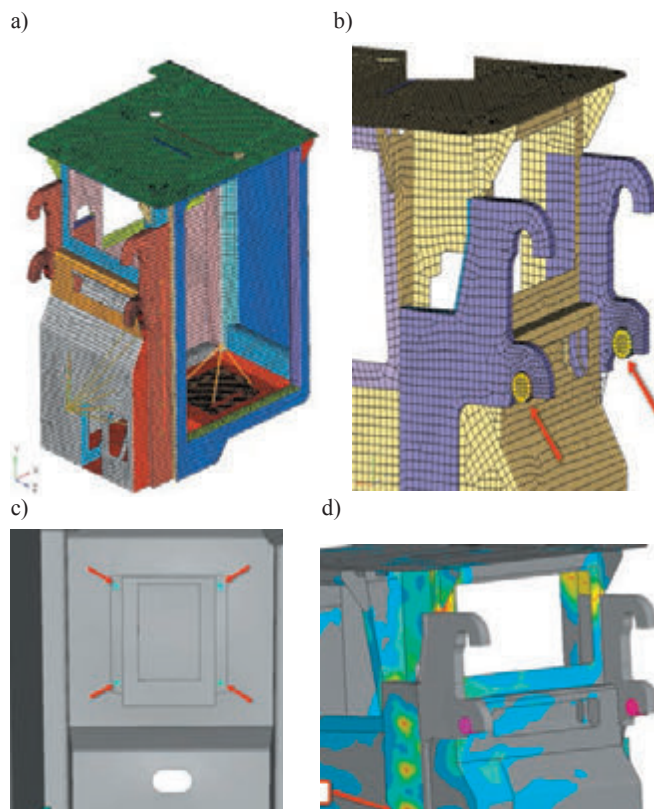
Rys. 7. Kabina operatora oddzielona na skutek uderzenia od ustroju nośnego maszyny



Rys. 8. Zniszczenia wewnątrz kabiny

Wyznaczenie wartości obciążeń powodujących określone skutki jest zadaniem skomplikowanym. W takiej analizie niezbędna jest znajomość charakterystyk zachodzących zjawisk, zarówno określających wartości jak i charakter zmian poszczególnych parametrów. W przypadku analizowanego wypadku, do oceny wartości obciążeń dynamicznych posłużyły jedynie parametry opisujące deformację elementów (opis odkształceń plastycznych) lub zniszczenie określonych elementów (nieciągłość materiału). Nie były znane żadne parametry kinematyczne zdarzenia. Analiza wytrzymałościowa pozwoliła ustalić minimalne wartości obciążeń, które to mogły wywołać skutki w postaci deformacji plastycznych i zniszczeń [8,9]. Obciążenia te wywołane są opóźnieniem, które wystąpiło w momencie uderzenia maszyny o strop. Ich wartość zależała od prędkości uderzenia i sztywności konstrukcji. Sztywność ta, w przypadku kabiny operatora, została uwzględniona w opisie modelu numerycznego przy użyciu metody elementów skończonych (rys. 9) – poprzez opis geometrii za pomocą elementów powłokowych oraz opis materiału.

Elementy konstrukcyjne ustroju nośnego, dla których możliwe było określenie wartości obciążeń powodujących ich zniszczenie (utrata ciągłości) to mocowanie fotela operatora oraz mocowanie kabiny do ramy maszyny. Należy jednak zaznaczyć, iż określono minimalne wartości obciążeń powodujących określone skutki, nie wykluczając ich wyższych wartości, niż te wyznaczone na podstawie symulacji komputerowej. Ponieważ zniszczenie elementów maszyny wynikało z



Rys. 9. a) model obliczeniowy; b) połączenie kształtowe; c) mocowanie fotela; d) odkształcenia plastyczne w analizowanej kabine operatora

wypiętrzenia spągu na skutek ruchu górotworu, poszukiwanym obciążeniem było wymuszenie kinematyczne w postaci prędkości początkowej zderzenia.

W badaniu sprawdzającym przeprowadzono szereg symulacji komputerowych, w których zmiennym parametrem była prędkość uderzenia o strop. Ustalono, iż początek zniszczenia mocowania fotela (zerwanie pierwszej śruby w mocowaniu) następuje przy prędkości zderzenia równej 2,6 m/s. Wywołana tym wartość opóźnień wyznaczona w środku ciężkości fotela osiąga 1350 m/s². Zniszczenie wszystkich śrub zachodzi, gdy kabina uderza z prędkością 3,4 m/s, wartość przyspieszeń sięga 1600 m/s², co przy uwzględnieniu masy fotela, która wynosiła 52 kg skutkuje chwilową dynamiczną siłą o wartości 83 200 N.

Drugim elementem konstrukcyjnym pozwalającym na ocenę działających obciążeń, jest jej mocowanie do ramy maszyny za pomocą śrub oraz połączenia kształtowego. Przeprowadzono szereg symulacji, w których poddano analizie mocowanie kabiny do ramy maszyny i jego zniszczenie, przy uwzględnieniu właściwości wytrzymałościowych śrub, haków mocujących kabinę oraz właściwości dynamicznych materiału. Ustalono, że prędkość, przy której dochodzi do zniszczenia połączenia wynosi 3,3 m/s. Całkowita energia kinetyczna, jaką posiada maszyna w tym przypadku wynosi około 163 kJ. Część energii kinetycznej została dyssypowana w wyniku zniszczenia śrub. Energia, która została dyssypowana w wyniku odkształcenia plastycznego konstrukcji (energia pochłonięta przez haki oraz odkształcenia plastyczne kabiny) wynosi w przybliżeniu 102 kJ. Należy stwierdzić, że konstrukcja ochronna nie uległa deformacji, która naruszyłaby przestrzeń chronioną zdefiniowaną makietą DLV, przy energii uderzenia wynoszącej 102 kJ.

Wyznaczone wartości prędkości początkowej uderzenia są oszacowaniem z dołu, po niewielkiej modyfikacji sposobu

połączenia fotela z podłogą uzyskano zniszczenie mocowania fotela przy prędkości początkowej 8 m/s. Podczas analizy zagrożeń określono możliwą prędkość wyrzutu skał (wypiętrzenia spągu) na 10 m/s i taką wartość wymuszenia kinematycznego przyjęto do dalszych rozważań.

Podsumowanie

Eksploracja złóż na coraz większych głębokościach powoduje ciągły wzrost niekontrolowanych zjawisk zachodzących wewnątrz górotworu, stanowiących znaczne zagrożenie dla gór-

ników pracujących w kopalniach podziemnych. Dotychczasowe badania konstrukcji chroniących w aspekcie bezpieczeństwa operatorów maszyn biorą pod uwagę jedynie dwie sytuacje wypadkowe, tj. przewrócenie się maszyny oraz spadające z góry przedmioty, podczas gdy w górotworze zachodzi także wiele innych zjawisk dynamicznych, równie, bądź nawet bardziej niebezpiecznych dla operatorów maszyn. Przeanalizowane zagadnienia wskazują na potrzebę włączenia do badań obligatoryjnych konstrukcji chroniących testów dynamicznych, które uwzględniłyby znacznie więcej zjawisk zagrażających zdrowiu oraz życiu górników.

Praca została zrealizowana w ramach projektu INNOTECH nr umowy INNOTECH-K2/IN2/30/182199/NCBR/12

Literatura

- [1] Butra J., Debkowski R., Pawlus D., Szpak M.: *Wpływ naprężeń pierwotnych na stateczność wyrobisk górniczych*, Cuprum nr 1 (58) 2011 str. 43-70
- [2] PN-EN ISO 3471:2009, Earth-Moving Machinery. Roll-Over Protection Structures. Laboratory Tests and Performance., 25.08.2009
- [3] Karliński J., Rusiński E., Smolnicki T., *Protective structures for construction and mining machine operators*, Automation in Construction, Vol. 17, pp. 232-244, 2008
- [4] Kleczek, Z., *Geomechanika górnicza*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice, Poland, 1994
- [5] Gogolewska, A., Bernat M., *Aktywna profilaktyka tąpniowa stosowana w wybranym oddziale eksploatacyjnym o/zg "Rudna" KGHM Polska Miedź latach 2001-2003*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały 113.31 (2005): 47-62
- [6] Kleczek, Z. *Grupowe strzelanie przodków jako element profilaktyki tąpniowej w kopalniach rud miedzi LGOM*, Górnictwo i Geoinżynieria 28, 2004
- [7] Wyższy Urząd Górniczy, Departament Warunków Pracy, OWP-2/gg-01/2010, 2010
- [8] Clark B., Perera N., Thambiratnam D., *Enhancing the impact energy absorption in roll over protective structures*, International Journal of Crashworthiness, Volume 13, No. 2, Taylor & Francis Ltd., 2008
- [9] Karliński J., Ptak M., Działak P., *Simulation tests of roll-over protection structure*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, pp. 57-63, 2013

