

Typ artykułu: eksperymentalny

<https://doi.org/10.7494/miag.2024.2.558.13>

Analiza degradacji oleju hydraulicznego w koparce gąsienicowej Doosan 380 LC-5 na podstawie badań czystości oleju metodą laserowo-optyczną

Piotr Kipczak Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków, Polska, kipczak@agh.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę stanu i jakości oleju hydraulicznego stosowanego w koparce gąsienicowej Doosan 380 LC-5 eksploatowanej w kopalni surowców skalnych. Celem badań była analiza zmian jakościowych oleju hydraulicznego Orlen Hydrol L-HV 46 w funkcji ilości przepracowanych motogodzin oraz jej ocena do określania stanu oleju hydraulicznego w układzie. Badaniom poddano pięć próbek oleju, w tym jedną zawierającą olej świeży. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem mobilnego analizatora OPCom Portable Oil Lab, umożliwiającego ocenę czystości oleju metodą laserowo-optyczną zgodnie z normą PN-EN ISO 4406:2021. Uzyskane wyniki potwierdzają postępującą degradację oleju wraz z czasem eksploatacji oraz zasadność systematycznego monitoringu jego czystości.

Słowa kluczowe: olej hydrauliczny, czystość oleju hydraulicznego, diagnostyka tribologiczna

Laser-optical analysis of hydraulic oil degradation in a Doosan 380 LC-5 Excavator

Abstract. This paper presents an analysis of the condition and quality of hydraulic oil used in a Doosan 380 LC-5 crawler excavator operated under real working conditions. The objective of the study was to investigate qualitative changes in Orlen Hydrol L-HV 46 hydraulic oil as a function of operating hours and to assess the applicability of oil cleanliness analysis as a diagnostic tool for hydraulic systems. Five oil samples were analyzed, including one fresh oil sample. The tests were conducted using a mobile OPCom Portable Oil Lab analyzer manufactured by ARGO-HYTOS, enabling laser-optical oil cleanliness measurements in accordance with PN-EN ISO 4406:2021. The results confirm the progressive degradation of the hydraulic oil with increasing operating time and highlight the importance of systematic oil cleanliness monitoring.

Keywords: hydraulic oil, hydraulic oil cleanliness, tribological diagnostics

© 2024 Autor(-rzy). Jest to publikacja ogólnodostępna, którą można wykorzystywać, rozpowszechniać i kopiować w dowolnej formie zgodnie z licencją Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowa (CC BY 4.0)

<https://www.miag.agh.edu.pl/>

ISSN 2449-6421

1. Wprowadzenie

Układy hydrauliczne stanowią podstawowy zespół roboczy większości maszyn stosowanych w górnictwie odkrywkowym, budownictwie oraz przemyśle wydobywczym. Ich niezawodność oraz trwałość w znacznym stopniu zależą od jakości oleju hydraulicznego, który pełni funkcję medium przenoszącego energię, środka smarnego oraz czynnika odprowadzającego ciepło. W warunkach długotrwałej eksploatacji olej hydrauliczny podlega stopniowej degradacji, spowodowanej m.in. oddziaływaniami mechanicznymi, podwyższoną temperaturą pracy, utlenianiem oraz zanieczyszczeniami stałymi pochodzącymi z procesów zużycia elementów układu (Chalamoński, 2004; Jędrzykiewicz i in., 2016).

Zanieczyszczenia stałe obecne w oleju hydraulicznym stanowią jedną z głównych przyczyn przyspieszonego zużycia pomp, zaworów rozdzielających oraz elementów wykonawczych. Szacuje się, że ponad 70% awarii układów hydraulicznych spowodowanych jest zanieczyszczeniami obecnymi w oleju hydraulicznym (Kotwica i in., 2017; Ng i in., 2017). Nawet niewielki wzrost liczby cząstek o określonych rozmiarach może prowadzić do intensyfikacji procesów abrazyjnych oraz erozyjnych, skracając żywotność podzespołów hydraulicznych (PN-EN ISO 4406:2021; Władzielczyk & Kipczak, 2019). Z tego względu coraz większe znaczenie w praktyce eksploatacyjnej zyskują metody diagnostyki olejowej, pozwalające na ocenę stanu medium roboczego bez konieczności unieruchomienia maszyny roboczej (PN-ISO 4406:2021; Totten, 2006).

Jednym z podstawowych parametrów diagnostycznych oleju hydraulicznego jest jego czystość, określana zgodnie z międzynarodowymi normami klasyfikacyjnymi (PN-EN ISO 4406:2021). Analiza czystości oleju umożliwia nie tylko ocenę stopnia jego degradacji, lecz również pośrednią ocenę stanu technicznego układu hydraulicznego (Novak et al., 2020). Celem niniejszego artykułu jest ocena stopnia degradacji oleju hydraulicznego w koparce gąsienicowej Doosan 380 LC-5 na podstawie badań czystości oleju wykonanych metodą laserowo-optyczną według normy PN-EN ISO 4406:2021.

2. Obiekt badań

W kopalniach surowców skalnych koparki jednoznaczyniowe stosowane są do wykonywania szeregu robót związanych nie tylko z załadunkiem urobionego materiału skalnego na środki transportu, ale również do czyszczenia spągu, wyrównywania ociosu, jako nośnik młotów hydraulicznych do rozbijania brył nadgabarytowych itp. Z tego powodu są one zaliczane do maszyn podstawowych w technologicznym ciągu pozyskiwania surowców skalnych.

Obiektem badań była koparka gąsienicowa Doosan 380 LC-5, zaliczana do klasy koparek jednoznaczyniowych o dużych masach, pracująca w zakładzie pozyskiwania kruszywa skalnego. Koparka ta wyposażona jest w rozbudowany układ hydrauliczny napędzający jej wszystkie podukłady robocze. Pracowała ona przy zmiennych obciążeniach dynamicznych (załadunek kruszywa, czyszczenie spągu, rozbijanie brył nadgabarytowych za pomocą młota hydraulicznego). Należy także podkreślić, że środowisko pracy badanej koparki charakteryzowało się dużymi wahaniami temperatury wynoszącymi nawet 12°C, wysoką wilgotnością, spowodowaną znacznymi opadami atmosferycznymi oraz dużym zapyleniem, co przyspiesza procesy zużywania się oleju hydraulicznego.

W układzie hydraulicznym zastosowano olej Orlen Hydrol L-HV 46 o klasie lepkości ISO VG 46, przeznaczony do pracy w wysoko obciążonych układach hydraulicznych i charakteryzujący się podwyższonym wskaźnikiem lepkości ($VI = 145$). Olej spełnia wymagania normy PN-EN ISO 6743-4:2015, co potwierdza jego przydatność do stosowania w nowoczesnych układach hydraulicznych maszyn roboczych o wysokich wymaganiach eksploatacyjnych (PN-EN ISO 11158:2025). Olej ten został poddany szczegółowej analizie diagnostycznej.

Badaniom poddano pięć próbek oleju hydraulicznego Hydrol L-HV 46. Jedną próbkę stanowił olej świeży, pobrany bezpośrednio z oryginalnego opakowania producenta, natomiast cztery kolejne próbki pochodziły z układu hydraulicznego koparki i zostały pobrane po określonej liczbie przepracowanych przez nią motogodzin (co około 200 mth). Tak dobrany materiał badawczy umożliwił porównanie stanu oleju nowego z olejem eksploatowanym oraz ocenę dynamiki zmian jakościowych oleju zachodzących w trakcie użytkowania koparki.

3. Metodyka badań

Badania czystości oleju hydraulicznego przeprowadzono z wykorzystaniem mobilnego analizatora OPCOM Portable Oil Lab firmy ARGO-HYTOS (rys. 1), przeznaczonego do diagnostyki olejowej układów hydraulicznych maszyn roboczych w warunkach eksploatacyjnych. Zastosowanie urządzenia mobilnego umożliwiło wykonywanie pomiarów bezpośrednio na obiekcie badań (rys. 2), bez konieczności transportu próbek do laboratorium, co istotnie ograniczyło ryzyko wtórnego zanieczyszczenia oleju oraz wpływu czynników zewnętrznych na wyniki pomiarów.



Rys. 1. Urządzenie pomiarowe OPCOM Portable Oil Lab ARGO-HYTOS

Analizator OPCOM Portable Oil Lab wykorzystuje laserowo-optyczną metodę zliczania cząstek, umożliwiającą precyzyjne określenie liczby cząstek stałych zawartych w oleju w określonych przedziałach wielkości. Metoda ta polega na rejestracji zmian natężenia promieniowania laserowego przechodzącego przez próbkę oleju, wywołanych obecnością cząstek zanieczyszczeń. Na podstawie zarejestrowanych sygnałów określana jest liczba oraz rozkład cząstek w poszczególnych klasach wymiarowych, co stanowi podstawę do dalszej klasyfikacji czystości oleju.

Próbki oleju hydraulicznego pobierano bezpośrednio ze zbiornika oleju koparki gąsienicowej Doosan 380 LC-5 przy zachowaniu zaleceń producenta aparatury pomiarowej.



Rys. 2. Pobieranie oleju hydraulicznego bezpośrednio ze zbiornika koparki Doosan 380 LC-5

Oceny czystości oleju hydraulicznego dokonano zgodnie z normą PN-EN ISO 4406:2021, która stanowi obecnie podstawowy i powszechnie stosowany standard klasyfikacji czystości cieczy roboczych w układach hydraulicznych. Norma ta umożliwia ilościową ocenę liczby cząstek stałych zawartych w oleju w trzech przedziałach wymiarowych, tj. $\geq 4 \mu\text{m}$, $\geq 6 \mu\text{m}$ oraz $\geq 14 \mu\text{m}$, mających kluczowe znaczenie dla zużycia podstawowych elementów układu hydraulicznego, takich jak pompy, główny zawór sterująco-rozdzielający, zawory przelewowe itp.

Wyniki pomiarów rejestrowano i archiwizowano w pamięci analizatora OPCOM Portable Oil Lab, a następnie poddano analizie porównawczej w funkcji liczby przepracowanych motogodzin maszyny. Tak przyjęta metodyka badawcza umożliwiła ocenę dynamiki zmian czystości oleju hydraulicznego w czasie oraz identyfikację tendencji degradacyjnych zachodzących w trakcie eksploatacji koparki Doosan 380 LC-5.

4. Analiza i omówienie wyników badań

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały wyraźną zależność pomiędzy liczbą przepracowanych motogodzin koparki Doosan 380 LC-5 a stopniem zanieczyszczenia oleju hydraulicznego. Analiza próbek oleju pobieranych na kolejnych etapach eksploatacji potwierdziła postępujący charakter degradacji medium roboczego, wyrażający się wzrostem liczby cząstek stałych, pogorszeniem klasy czystości oleju oraz zmianami parametrów fizykochemicznych, takich jak wilgotność i przewodność elektryczna.

Zestawienie wyników dotyczących klas czystości oleju oraz zawartości wilgoci w funkcji liczby przepracowanych motogodzin przedstawiono w tabeli 1.

Olej świeży (0 mth) charakteryzował się najwyższą klasą czystości, odpowiadającą poziomowi wymaganemu dla nowych lub niedawno uruchomionych układów hydraulicznych. Wartości uzyskane dla oleju świeżego wskazują na prawidłowy stan początkowy medium roboczego oraz brak istotnych zanieczyszczeń wprowadzonych na etapie napełniania układu hydraulicznego olejem.

Tabela 1. Porównanie wielkości cząstek zanieczyszczeń według klasy czystości ISO z liczbą przepracowanych motogodzin wraz z wilgotnością względną

Liczba przepracowanych motogodzin [mth]	Klasa czystości ISO				Wilgotność [%]
	ISO > 4 μm	ISO > 6 μm	ISO > 14 μm	ISO > 21 μm	
0	19	16	14	11	26,2
195	20	17	14	12	31,2
380	20	18	14	13	38,3
560	21	19	14	13	45,3
700	22	19	15	14	56,7

Analiza danych zawartych w tabelach 1 i 2 wskazuje na systematyczny wzrost liczby cząstek stałych w oleju wraz z czasem eksploatacji koparki. Szczególnie widoczny jest wzrost klas czystości dla cząstek o średnicach $\geq 4 \mu\text{m}$ oraz $\geq 6 \mu\text{m}$, które są uznawane za najbardziej krytyczne z punktu widzenia zużycia elementów układu hydraulicznego. Wzrost tych klas o kilka poziomów świadczy o intensyfikacji procesów zużycia mechanicznego oraz stopniowym gromadzeniu się produktów eksploatacyjnych w oleju.

Równocześnie zaobserwowano wyraźny wzrost zawartości wilgoci w oleju hydraulicznym, która zwiększyła się z poziomu 26,2% dla oleju nowego do 56,7% po 700 mth pracy koparki. Taki przyrost wilgotności może wskazywać na przedostawanie się wody do układu hydraulicznego na skutek kondensacji pary wodnej, nieszczelności układu lub niewystarczającej skuteczności systemów filtracyjno-odpowietrzających zbiornika oleju.

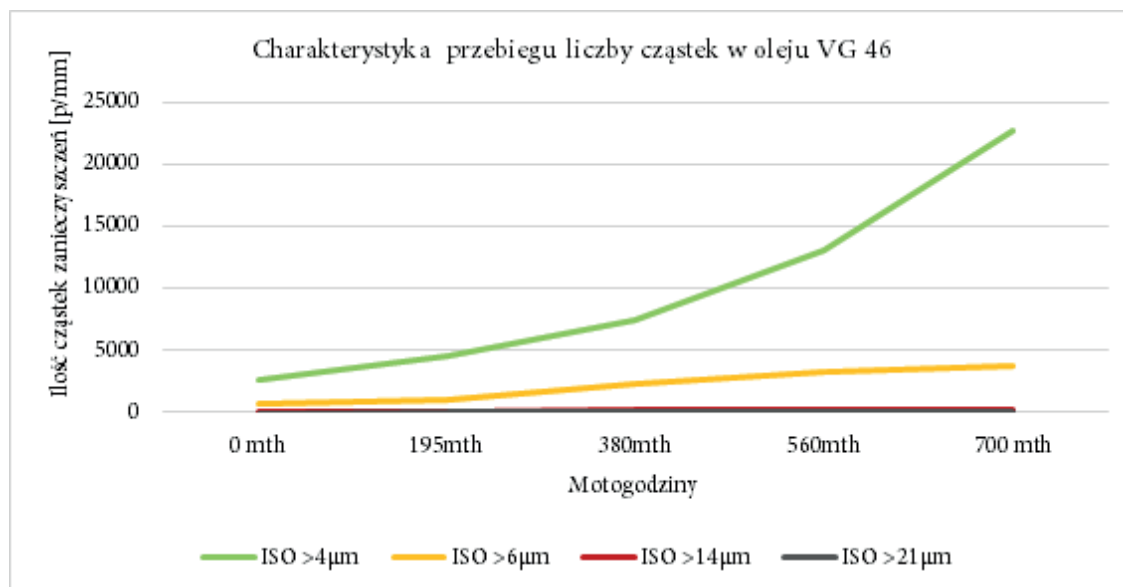
W tabeli 2 przedstawiono szczegółowe zestawienie liczby cząstek zanieczyszczeń w poszczególnych przedziałach wielkości oraz zmiany przewodności elektrycznej oleju w funkcji liczby przepracowanych motogodzin.

Tabela 2. Porównanie ilości cząstek zanieczyszczeń z liczbą przepracowanych motogodzin wraz z przewodnością dielektryczną

Liczba przepracowanych motogodzin [mth]	Klasa czystości ISO				Przewodność dielektryczna [$\mu\text{S}/\text{m}$]
	ppm > 4 μm	ppm > 6 μm	ppm > 14 μm	ppm > 21 μm	
0	2610	766	46	17	350
195	4791	1134	139	33	378
380	7523	2285	136	67	399
560	13 421	3214	158	74	406
700	22 653	3749	214	89	463

Graficzną interpretację zmian liczby cząstek zanieczyszczeń w funkcji czasu eksploatacji przedstawiono na rysunku 3.

Najbardziej dynamiczne zmiany zaobserwowano w przypadku cząstek o większych średnicach, co może wskazywać na nasilające się procesy zużycia elementów roboczych układu hydraulicznego w miarę wydłużania czasu eksploatacji oleju. Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają, że analiza czystości oleju hydraulicznego stanowi skuteczne narzędzie wczesnej diagnostyki stanu technicznego układu hydraulicznego oraz może być podstawą do podejmowania decyzji dotyczących terminów wymiany oleju i filtrów.



Rys. 3. Ilość cząstek zanieczyszczeń w oleju hydraulicznym zastosowanym w koparce Doosan 380 LC5

Systematyczny monitoring czystości oleju umożliwia identyfikację momentu, w którym dalsza eksploatacja medium roboczego może prowadzić do nadmiernego zużycia podzespołów, a w konsekwencji do wzrostu kosztów eksploatacyjnych i ryzyka awarii koparki.

5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza próbek oleju hydraulicznego pobranych z układu hydraulicznego koparki Doosan 380 LC-5 na różnych etapach eksploatacji wykazała jednoznacznie, że stan oleju ulega stopniowemu pogorszeniu wraz ze wzrostem liczby przepracowanych motogodzin. Uzyskane wyniki potwierdzają, że degradacja oleju hydraulicznego jest procesem złożonym, uwarunkowanym jednoczesnym oddziaływaniem czynników mechanicznych, fizycznych oraz chemicznych, charakterystycznych dla intensywnej eksploatacji koparek w zakładach pozyskiwania surowców skalnych.

Najistotniejsze zmiany zaobserwowano w zakresie klasy czystości oleju, zawartości wody oraz właściwości elektrostatycznych. Wraz z czasem eksploatacji koparki odnotowano systematyczny wzrost liczby zanieczyszczeń cząstkami stałymi, co wskazuje na postępujące zużycie elementów układu hydraulicznego oraz ograniczoną skuteczność procesów filtracji w długim okresie użytkowania. Szczególnie niekorzystnym zjawiskiem był wzrost liczby cząstek o średnicach powyżej 4 µm oraz 6 µm, które mają istotny wpływ na intensyfikację procesów zużycia abrazyjnego w pompach, zaworach i siłownikach hydraulicznych.

Równolegle zaobserwowano wzrost zawartości wody w oleju hydraulicznym – z poziomu 26,2% dla oleju świeżego do 56,7% po około 700 mth eksploatacji. Obecność wody w oleju stanowi istotne zagrożenie eksploatacyjne, gdyż sprzyja korozji wewnętrznych elementów układu hydraulicznego, przyspiesza procesy utleniania oleju oraz prowadzi do pogorszenia jego właściwości smarnych. W konsekwencji może to skutkować obniżeniem lepkości oleju, wzrostem oporów ruchu oraz zwiększonym ryzykiem uszkodzeń elementów współpracujących.

Analiza zmian przewodności elektrycznej oleju wykazała jej wzrost z poziomu około 350 pS/m do 452 pS/m, co wskazuje na zachodzące zmiany chemiczne w strukturze oleju. Zjawisko to może świadczyć o degradacji dodatków uszlachetniających oraz obecno-

ści produktów utleniania, które sprzyjają powstawaniu osadów i szlamów. Tego rodzaju zanieczyszczenia mogą negatywnie wpływać na pracę zaworów, pomp oraz siłowników hydraulicznych, prowadząc do ich nieprawidłowego działania lub przedwczesnych awarii.

Szczególnie istotnym wskaźnikiem degradacji oleju była zmiana klasy czystości według normy PN-EN ISO 4406:2021. W trakcie eksploatacji maszyny odnotowano pogorszenie klasy czystości z poziomu 19/17/14/11 dla oleju nowego do 22/19/15/14 po około 700 mth pracy badanej koparki. Jednoznacznie wskazuje to na narastającą liczbę cząstek zanieczyszczeń, co bezpośrednio przekłada się na zwiększone ryzyko uszkodzeń układu hydraulicznego oraz obniżenie jego niezawodności.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski końcowe:

1. Stan oleju hydraulicznego pogarsza się wraz ze wzrostem liczby przepracowanych motogodzin, co jest procesem naturalnym, jednak jego tempo może być istotnie przyspieszone przez niekorzystne warunki eksploatacyjne oraz niewystarczające procedury konserwacyjne.
2. Zanieczyszczenia w postaci cząstek stałych stanowią główny czynnik degradacji oleju i w dłuższym okresie mogą prowadzić do uszkodzeń pomp, zaworów oraz siłowników hydraulicznych.
3. Gwałtowny wzrost liczby cząstek o średnicach 4 μm oraz powyżej 14 μm wskazuje na konieczność intensyfikacji kontroli czystości oleju oraz regularnej wymiany elementów filtracyjnych.
4. Obecność wody w oleju ma istotny wpływ na pogorszenie jego właściwości smarnych oraz przyspieszenie procesów utleniania, dlatego monitoring wilgotności oleju powinien stanowić stały element diagnostyki eksploatacyjnej.
5. Podwyższona przewodność elektryczna oleju świadczy o jego stopniowej degradacji chemicznej i może prowadzić do powstawania osadów oraz zatykania kanałów hydraulicznych.
6. Na podstawie uzyskanych wyników zaleca się skrócenie okresów pomiędzy wymianą oleju oraz filtrów w koparce Doosan 380 LC-5, gdyż standardowe interwały serwisowe mogą być niewystarczające w analizowanych warunkach pracy.
7. Zastosowanie dodatkowych systemów filtracji oraz bardziej rygorystycznej kontroli jakości oleju może istotnie zwiększyć niezawodność funkcjonowania układu hydraulicznego koparki i wydłużyć jego trwałość, prowadząc do obniżenia kosztów eksploatacyjnych i konserwacyjnych.

W obszarze eksploatacji koparek jednonaczyniowych w górnictwie skalnym uzyskane wyniki badań stanu oleju stanowią istotną wskazówkę dla operatorów koparek oraz służb serwisowych. Systematyczna analiza parametrów oleju hydraulicznego oraz szybkie reagowanie na pierwsze oznaki jego degradacji pozwalają ograniczyć ryzyko poważnych awarii i znacząco wydłużyć trwałość kluczowych podzespołów układu hydraulicznego.

Finansowanie, podziękowania: Źródło finansowania przedstawionych w artykule badań – grant Narodowego Centrum Nauki 2021/05/X/ST8/01458.

Literatura

- Chalamoński, M. (2004). Podatność diagnostyczna układów hydrauliki maszynowej. *Zeszyty Naukowe/ Akademii Morskiej w Szczecinie*, 1(73), 117–127.
- Jędrzykiewicz, Z., Stojek, J., & Rosikowski, P. (2016). *Napęd i sterowanie hydrostatyczne*. Vist Sp. z o.o.
- Kotwica, K., Mendyka, P., Bołoz, Ł., Kulinowski, P., Kasza, P., Feliks, J., Tomach, P., Władzielczyk, K., Zarzycki, J., & Stopka, G. (2017). *Wybrane problemy urabiania, transportu i przeróbki skał trudnourabialnych* (t. 2). Wydawnictwa AGH.
- Ng, F., Harding, J. A., & Glass, J. (2017). Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 83, 176–193. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.06.006>

- Novak, N., Trajkovski, A., Kalin, M., & Majdič, F. (2023). Degradation of Hydraulic System due to Wear Particles or Medium Test Dust. *Applied Sciences*, 13(13), 7777. <https://doi.org/10.3390/app13137777>
- PN-EN ISO 6743-4:2015. *Środki smarowe, oleje przemysłowe i produkty podobne (klasa L) – Klasyfikacja – Część 4: Grupa H (Układy hydrauliczne)*.
- PN-EN ISO 4406:2021. *Napędy i sterowania hydrauliczne – Ciecze robocze – Metoda kodowania poziomu zanieczyszczeń w postaci cząstek stałych*.
- PN-EN ISO 11158:2025. *Środki smarowe, oleje przemysłowe i produkty podobne (klasa L) – Grupa H (układy hydrauliczne) – Specyfikacje dla olejów kategorii HH, HL, HM, HV i HG*.
- Totten, G.E. (Ed.). (2006). *Handbook of Lubrication and Tribology: Volume I: Application and Maintenance*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420003840>
- Władzielczyk, K., & Kipczak, P. (2019). Ageing process of hydraulic oil in single-bucket excavators in rock mining. *New Trends in Production Engineering*, 2(1), 130–139. <https://doi.org/10.2478/ntpe-2019-0014>