

Reinhard KLEEFELD

Institut für Bergbaukunde II
der Rheinisch - Westfalischen
Technischen Hochschule Aachen

BADANIA GÓRNICZYCH STOJAKÓW HYDRAULICZNYCH O RÓŻNEJ PODPORNOŚCI
PODDANYCH OBCIĄŻENIOM DYNAMICZNYM

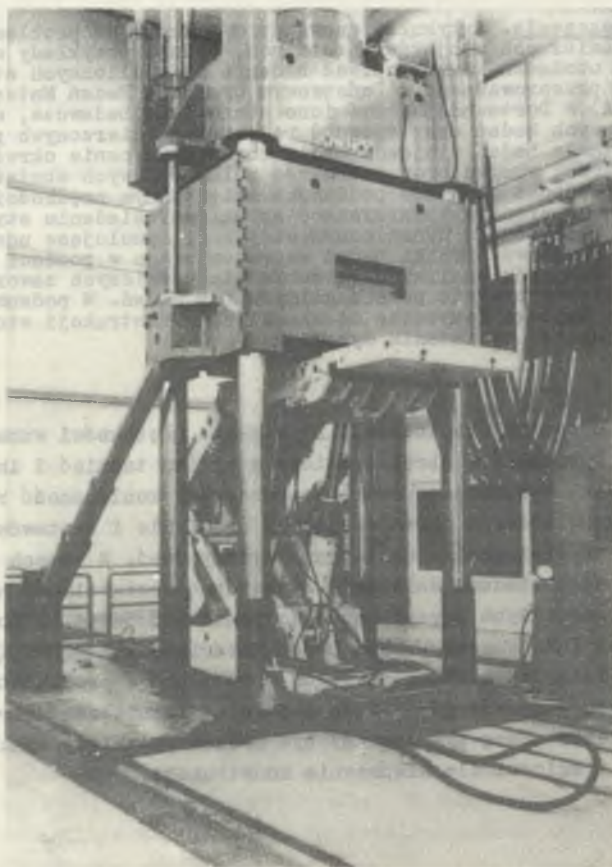
Streszczenie. Artykuł stanowi wprowadzenie do problematyki obciążeń dynamicznych stojaków górniczych, podaje przykłady symulacji tego typu obciążeń. Autor opisał badania hydraulicznych stojaków górniczych przeprowadzone w Państwowym Urzędzie Badań Materiałowych - NRW (MPA) w Dortmundzie. Omówiono stanowiska badawcze, metodykę prowadzonych badań oraz sposoby rejestracji mierzonych parametrów. Na podstawie badań stojaków obciążonych statycznie określono istotne wielkości wpływu oraz szerokość pola możliwych obciążeń. Przeprowadzono badania stojaków poddanych zwiększonym prędkościom zsuwu, symulującym procesy towarzyszące szybkiemu osiadaniu stropu oraz badania obciążeniem dynamicznym stojaków, symulujące uderzeniowe procesy zawałowe. Wyniki badań zaprezentowano w postaci zestawu wykresów. Dokonano analizy zachowania się górniczych zaworów przeciw-tapaniowych w trakcie poszczególnych faz badań. W podsumowaniu przedstawiono wnioski dotyczące udoskonalenia konstrukcji stojaków mogących przenieść obciążenia dynamiczne.

Wraz ze schodzeniem eksploatacji na większe głębokości wzrosło obciążenie obudowy górniczej w obrębie ściany w wyniku tąpnięć i innych obciążeń dynamicznych. Występujące awarie spowodowały konieczność rozwoju stojaków górniczych, zaworów ograniczających ciśnienie i zestawów obudowy, które powinny te ekstremalne obciążenia wytrzymywać. W ramach planu badawczo-rozwojowego zbadano wnikliwie dynamiczną obciążalność hydraulicznych stojaków górniczych przeprowadzając ponad 600 badań za pomocą urządzeń badawczych Państwowego Urzędu Badań Materiałowych - NRW (MPA) w Dortmundzie. Niniejszy artykuł powinien wprowadzić w problematykę obciążeń dynamicznych stojaków górniczych i pokazać istniejącą szerokość pola możliwych obciążeń. Poza tym powinny być podane przykłady symulacji tego typu obciążeń i wnioski dla ulepszenia konstrukcji.

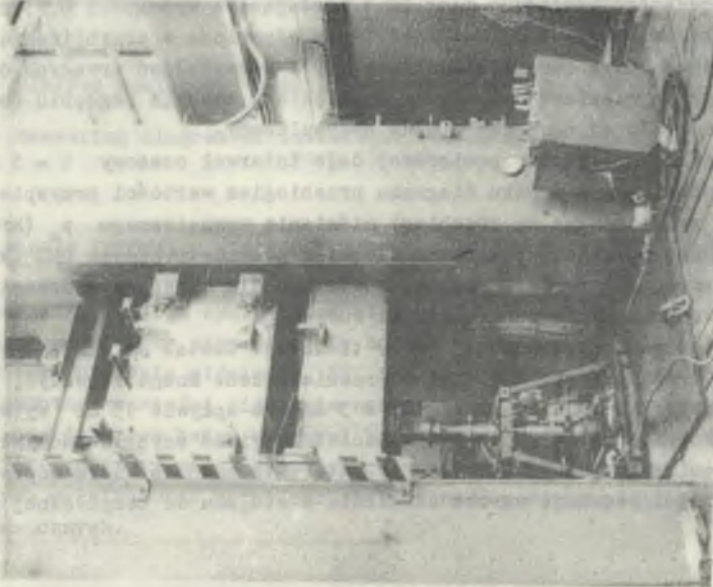
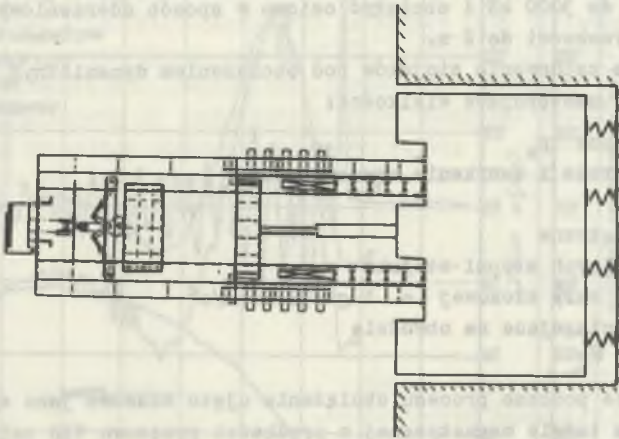
URZĄDZENIA BADAWCZE I POMIAR PARAMETRÓW

Badania obciążeń podjęto na 4-słupowej maszynie badawczej i stanowisku badawczym obciążeń uderzeniowych.

Maszyna badawcza 4-słupowa (rys. 1) - to urządzenie sterowane serwohydrauliczne, w którym osiągnąć można siły pionowe do 6300 kN i równocześnie siły w płaszczyźnie poziomej. Z pomocą zespołu zbiorników i serwowentyla dla wydajności 4000 l/min można było osiągnąć pionową prędkość zsuwu badanych stojaków do 0,5 m/s.



Rys. 1. 4-słupowe stanowisko badawcze
Fig. 1. 4-pillar investigation stand



Rys. 2. Stanowisko badawcze do obciążeń uderowych
Fig. 2. Investigation stand for shock coal

Dla obciążeń uderzeniowych badanych stojaków i siłowników zastosowano kafar ze swobodnie spadającą masą. W tym stanowisku badawczym obciążeń uderzeniowych (rys. 2) można rozeprzeć poprzez trawers elementy badane o podporności do 3000 kN i obciążyć osiowo w sposób uderzeniowy masą 1-20 t spadającą z wysokości do 2 m.

Dla badania zachowania stojaków pod obciążeniem dynamicznym określono i rejestrowano następujące wielkości:

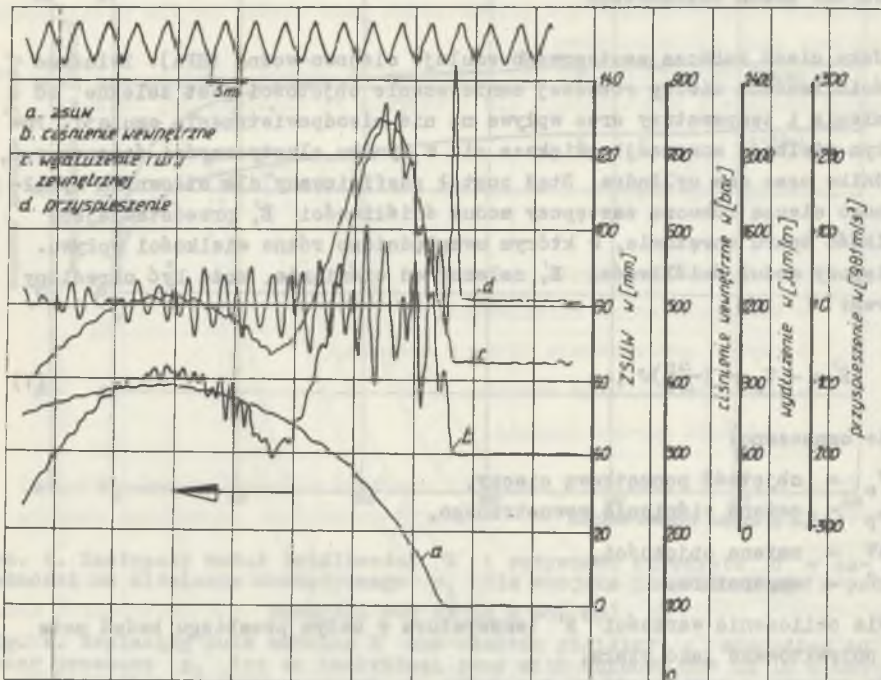
ciśnienie wstępne p_s	[bar]
ciśnienie otwarcia i zamykania zaworu przed i po badaniach	[bar]
ciśnienie wewnętrzne	[bar]
zsuw poszczególnych stopni stojaka s_v	[mm]
przyspieszenie rury tłokowej a $1g = 9,81 \text{ m/s}^2$	[m/s ²]
naprężenie rozciągające na obwodzie rury tłokowej σ_y	[kN/cm ²]

Wielkości te podczas procesu obciążania ujęto czasowo jako sygnały elektryczne na taśmie magnetycznej o prędkości przesuwu 120 cali/s. Wielkości mierzone przedstawiono równocześnie graficznie za pomocą 6-liniowego rejestratora.

Rysunek 3 pokazuje diagram pomiarowy obciążenia jednoteleskopowego stojaka z zaworem tapaniowym o podporności 1400 kN rozpartego ciśnieniem 300 bar, poddanego uderzeniu masą 20 t spadającą z wysokości 0,75 m, tj. pracą uderzenia $W_{20} = 150 \text{ kNm}$. Energia ta odpowiada w przybliżeniu energii tapanięcia, którą określił Budirsky [1] z odkształceń trwałych obudowy ścianowej po największym dotychczas tapanięciu w czeskim zagłębiu Ostrava-Karvina przeliczonej na jeden stojak hydrauliczny.

Sygnał piłowy w głowicy pomiarowej daje interwał czasowy $t = 5 \text{ ms}$. Poza przedstawionym w środku diagramu przebiegiem wartości przyspieszeń (krzywa d) rejestrowane są przebiegi ciśnienia wewnętrznego p_a (krzywa b) mierzonego na dopływie, wydłużenia miernika tensometrycznego DMS (krzywa c) nałożonego na rurze zewnętrznej stojaka dla określenia zewnętrznego naprężenia rozciągającego na obwodzie rury σ_y .

Krzywa a pokazuje zsuw s_v rury tłokowej. Został on określony bezstykowym ultradźwiękowym miernikiem przemieszczeń. Można zauważyć, że przy prędkości początkowej zsuwu rzędu $v = 3 \text{ m/s}$ po upływie 15 ms wytwarza się pik ciśnienia rzędu 750 bar. Jednocześnie widać szybkie zadziaływanie zaworu tapaniowego już po niewielu ms, który to zawór otwiera odpowiednio duży przekrój i redukuje wzrost ciśnienia w stojaku do bezpiecznej wielkości,



Rys. 3. Diagram pomiarowy badania obciążeniem uderowym z pracą uderu 150 kNm

Fig. 3. Measuring diagram of investigations by means shock load with surge work 150 kNm

WYPROWADZENIE ISTOTNYCH WIELKOŚCI WPŁYWU Z BADAŃ OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH

Na początku każdego cyklu badań stojaki i siłowniki poddawano obciążeniu statycznemu, przy czym elementy badano w 4-słupowej maszynie badawczej w zamkniętym obwodzie ciśnienia, tj. bez zaworu upływowego aż do osiągnięcia 1,5-krotnej wartości ciśnienia nominalnego. Stąd da się określić poza ważnymi dla dalszych badań krzywymi kalibrowania również także ważne wielkości, jak zastępczy moduł ściśliwości oraz sztywność sprężystą, za pomocą których wykalkulować można max obciążalność podczas późniejszych obciążeń dynamicznych.

ZASTĘPCZY MODUŁ ŚCISLIWOŚCI

Jako ciecz roboczą zastosowano emulsję olejowo-wodną (HFA). Związane ze ścisłością cieczy roboczej zmniejszenie objętości jest zależne od ciśnienia i temperatury oraz wpływa na nie nieodpowietrzenie emulsji. Poza tym wielkość kompresji zwiększa się w wyniku elastyczności ścianek rur, spodnika oraz dna cylindra. Stąd został zdefiniowany dla siłownika wypełnionego cieczą roboczą zastępczy moduł ścisłości E' , przedstawiający wielkość oporu sprężania, w którym uwzględniono różne wielkości wpływu. Zastępczy moduł ścisłości E' , zależny od ciśnienia, może być określony wzorem:

$$E' = -V_0 - \left(\frac{\Delta p}{\Delta V}\right) \vartheta, \quad (1)$$

gdzie oznaczono:

- V_0 - objętość początkową cieczy,
- Δp - zmiana ciśnienia wewnętrznego,
- ΔV - zmiana objętości,
- ϑ - temperatura.

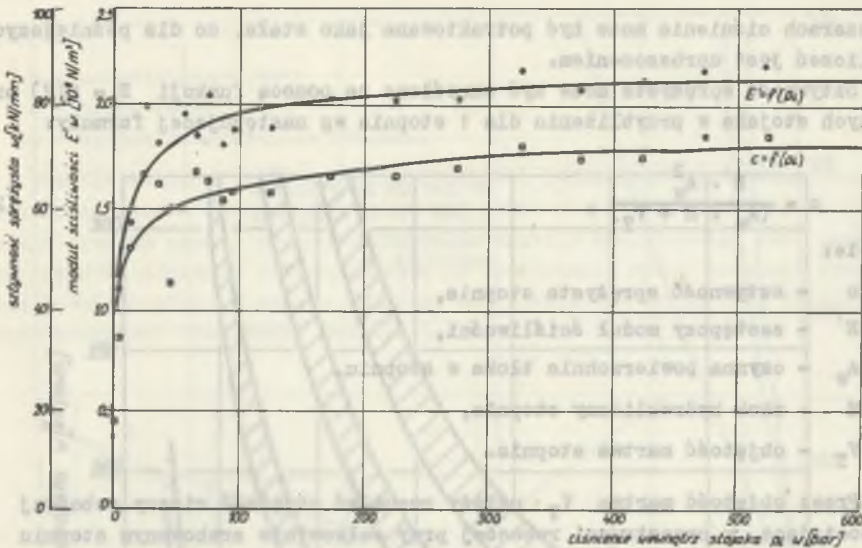
Dla obliczenia wartości E' temperatura w całym przebiegu badań może być potraktowana jako stała.

Na rysunku 4 naniesione są wielkości E wyprowadzone ze statycznych obciążeń stojaka jednoteleskopowego o podporności 800 kN jako funkcja ciśnienia wewnętrznego (w górnym przebiegu krzywej). Podczas gdy w dolnym obszarze ciśnienia $0 = 100$ bar następuje stromy wzrost przebiegu krzywej, co wytłumaczono istnieniem nierozpuszczonych w emulsji cząstek powietrza, to w górnym obszarze ciśnienia można przyjąć wartość stałą.

Na rysunku 5 naniesiono wartości zastępczego modułu ścisłości E' przy 500 bar ciśnienia wewnętrznego w zależności od skoku stojaka. Interesujący jest tu wzrost wartości ze wzrastającym skokiem, niezależnie od powierzchni tłoka i innych uwarunkowanych konstrukcyjnie wielkości wpływu.

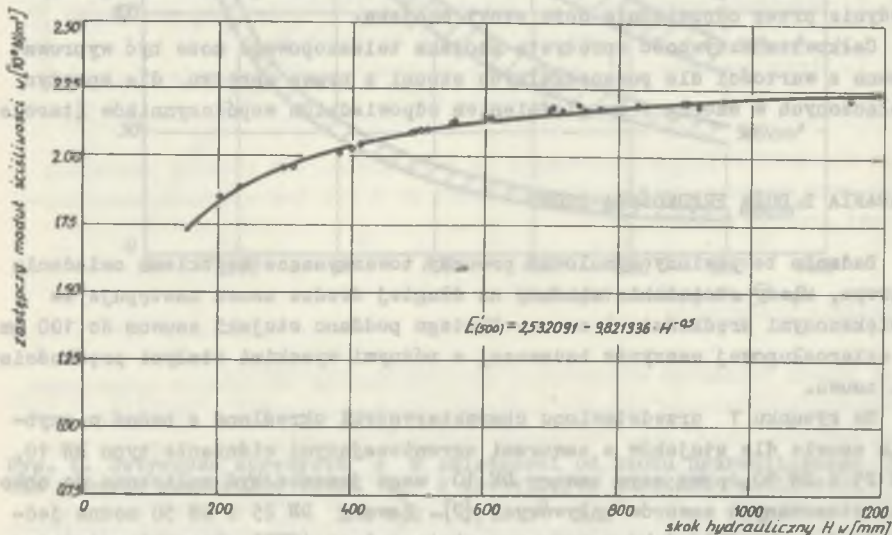
SZTYWNOŚĆ SPRĘŻYSTA

W bezpośredniej zależności od zastępczego modułu ścisłości jest sztywność sprężysta c stojaka, która może być określona z definicji jako iloraz zmiany obciążenia ΔF oraz wypadkowego wydłużenia ΔS z charakterystyki stojaka, wynikającego ze ścisłości cieczy roboczej i plastycznego wydłużenia rury cylindra. Przebieg sztywności sprężystej pod ciśnieniem wewnętrznym p_1 można odtworzyć również na rys. 4 dla już opisanego przebiegu obciążenia. Również tutaj sztywność sprężysta w wyższych



Rys. 4. Zastępczy moduł ściśliwości E' i sztywność sprężysta c w zależności od ciśnienia wewnętrznego p_1 dla stojaka indywidualnego o podporności 800 kN ($H = 689 \text{ mm}$)

Fig. 4. Replacing bulk modulus E' and elastic rigidity c according to inner pressure p_1 for an individual prop with support 800 kN ($H = 689 \text{ mm}$)



Rys. 5. Zastępczy moduł ściśliwości E' w zależności od skoku hydraulicznego dla różnych stojaków przy ciśnieniu wewnętrznym $p_1 = 500 \text{ bar}$

Fig. 5. Replacing bulk modulus E' according to hydraulic jump for different props with inner pressure $p_1 = 500 \text{ bar}$

obszarach ciśnienia może być potraktowana jako stała, co dla późniejszych obliczeń jest uproszczeniem.

Sztywność sprężysta może być określona za pomocą funkcji $E = f(H)$ oraz danych stojaka w przybliżeniu dla 1 stopnia wg następującej formuły:

$$c = \frac{E' \cdot A_w^2}{(A_w \cdot H + V_T)}, \quad (2)$$

gdzie:

- c - sztywność sprężysta stopnia,
- E' - zastępczy moduł ściśliwości,
- A_w - czynna powierzchnia tłoka w stopniu,
- H - skok hydrauliczny stopnia,
- V_T - objętość martwa stopnia.

Przez objętość martwą V_T należy rozumieć objętość cieczy roboczej pozostającą w przestrzeni roboczej przy całkowicie zrabowanym stopniu stojaka.

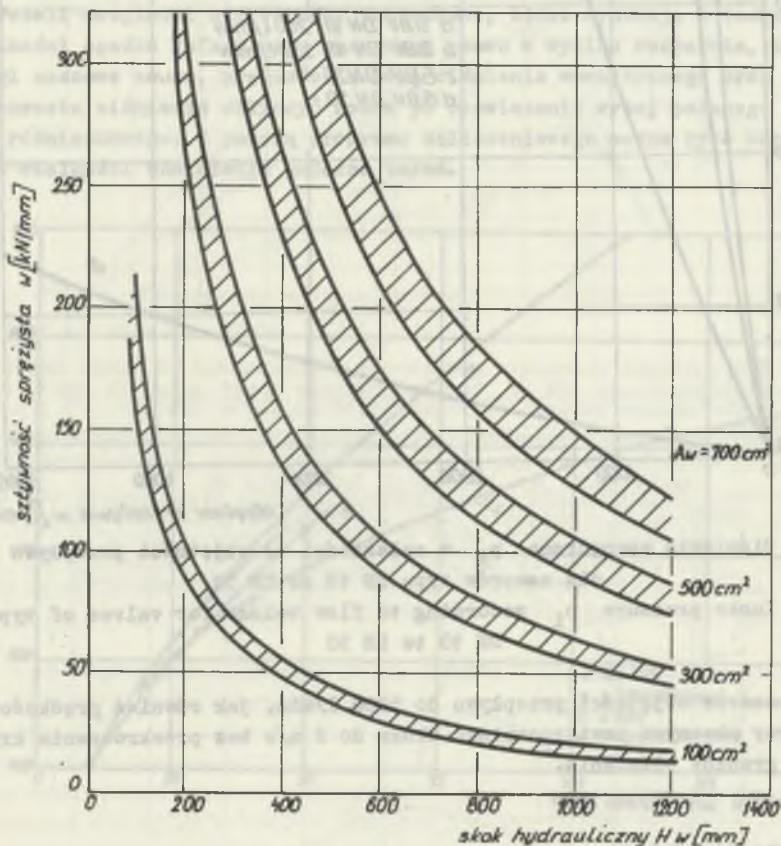
Zależność sztywności sprężystej od skoku hydraulicznego H dla różnych powierzchni czynnych tłoka przedstawiono na rys. 6 dla zastępczych modułów ściśliwości $1,8 \div 2,1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$. Można zauważyć, że zadane przy dużych powierzchniach tłoka wysokie sztywności sprężyste mogą być zmniejszone jedynie przez odpowiednio duże skoki stojaka.

Całkowita sztywność sprężysta stojaka teleskopowego może być wyprowadzona z wartości dla poszczególnych stopni z prawa sprężyn, dla sprężyn połączonych w szereg z uwzględnieniem odpowiednich współczynników (tarcie).

BADANIA Z DUŻĄ PRĘDKOŚCIĄ ZSUWU

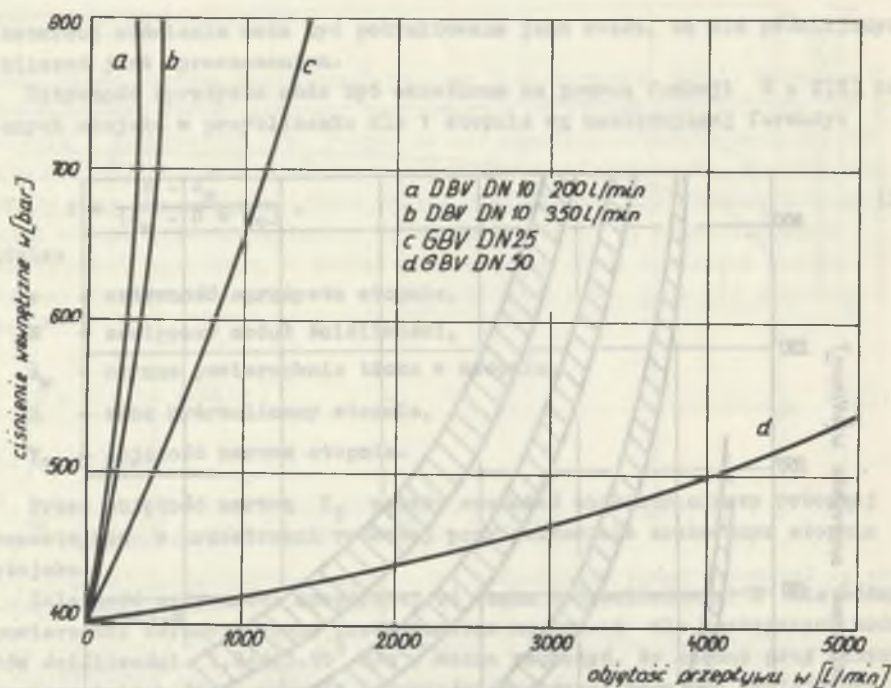
Badania te powinny symulować procesy towarzyszące szybkiemu osiadaniu stropu, kiedy obciążenie obudowy na długiej drodze zsuwu następuje ze zwiększonymi prędkościami zsuwu. Dlatego poddano stojaki zsuwom do 100 mm w czterosekupowej maszynie badawczej z różnymi wysokimi stałymi prędkościami zsuwu.

Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki określone z badań o szybkim zsuwie dla stojaków z zaworami ograniczającymi ciśnienie typu DN 10, DN 25 i DN 50, przy czym zawory DN 10 mogą jeszcze być zaliczone do obecnie stosowanych zaworów upływowych [2]. Zawory DN 25 i DN 50 można jednakże już określić jako zawory przeciwtłapaniowe (GBV). Szeroki, otwarty obszar pomiędzy charakterystykami dotychczas stosowanych zaworów przeciwtłapaniowych DN 25 i DN 50 wskazuje na istniejącą możliwość dalszego rozwoju zaworów w zakresie pomiędzy DN 25 i DN 50. Wyobrazić sobie można



Rys. 6. Sztywność sprężysta c w zależności od skoku hydraulicznego H dla różnych przekrojów tłoka A_w o zastępczych modułach ścisłości $E' = 1,8 - 2,1 \cdot 10^9$ N/m²

Fig. 6. Elastic rigidity c according to hydraulic jump H for different piston sections A_w with replacing bulk modulus $E' = 1,8 - 2,1 \cdot 10^9$ N/m²



Rys. 7. Ciśnienie wewnętrzne p_1 w zależności od objętości przepływu V dla zaworów typu DN 10 do DN 50

Fig. 7. Inner pressure p_1 according to flow volume for valves of type DN 10 to DN 50

w tym obszarze objętości przepływu do 5000 l/min, jak również prędkości zsuwu przy obecnych powierzchniach tłoka do 2 m/s bez przekroczenia krytycznej granicy ciśnienia.

OBCIĄŻENIA DYNAMICZNE

Za pomocą opisanego stanowiska, umożliwiającego obciążenie dynamiczne, symulowano uderzeniowe procesy zawałowe, mogące wystąpić w przypadku nagłych obwałowań, tąpnięć oraz podobnych obciążeń dynamicznych. Przy tym powstały system potraktować można jako mechaniczny system drgający składający się ze stojaka o sztywności sprężystej c , mas kłosa i trawersy m_1 i m_2 . Jeżeli założymy, że wpływ tłumienia na pierwszy okres drgań jest niewielki, to można równanie ruchu układu nietłumionego przedstawić w sposób uproszczony:

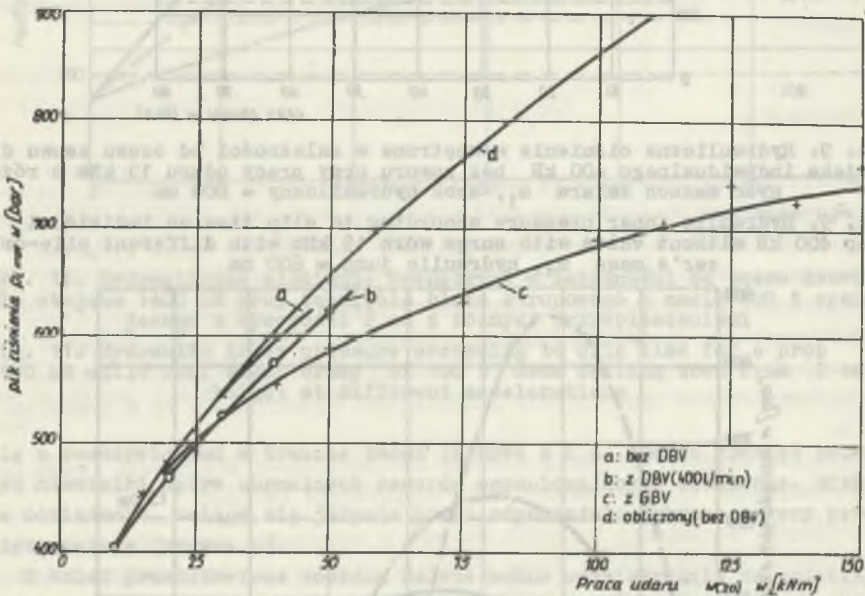
$$m \cdot \ddot{s} + c \cdot s = 0,$$

(3)

gdzie:

- m - uczestniczące masy,
- s - droga zsuwu,
- c - sztywność sprężysta stojaka.

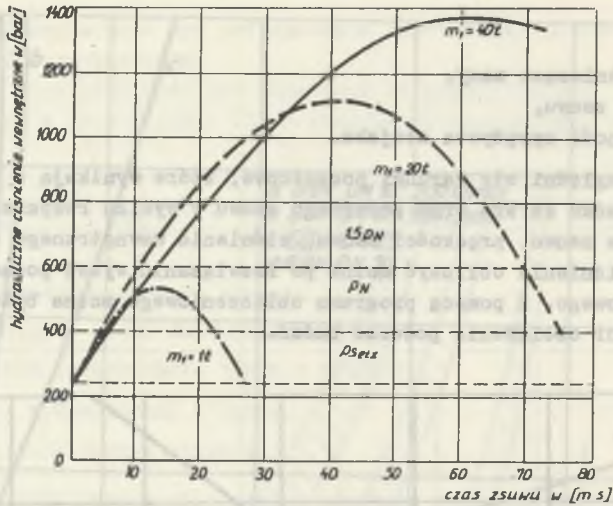
Jeżeli uwzględni się warunki początkowe, które wynikają z teoretycznej prędkości upadku kafara oraz pozornego zsuwu w wyniku rozparcia, to przebiegi czasowe zsuwu, prędkości zsuwu, ciśnienia wewnętrznego oraz prędkości wzrostu ciśnienia obliczyć można po rozwiązaniu wyżej podanego równania różniczkowego. Z pomocą programu obliczeniowego można było określić rząd wielkości obciążenia podczas badań.



Rys. 8. Pik ciśnienia p_{\max} w zależności od pracy udaru w_{20} . Wpływ zastosowanego zaworu ograniczającego ciśnienie

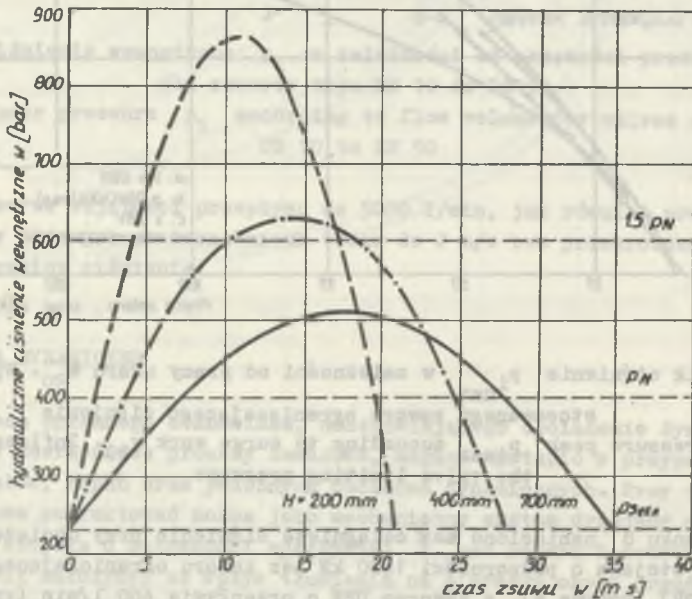
Fig. 8. Pressure peak p_{\max} according to surge work w_{20} . Influence of the valve limiting pressure

Na rysunku 8 naniesiono max osiągnięte ciśnienie przy obciążeniu uderzeniowym stojaka o podporności 1400 kN bez zaworu ograniczającego ciśnienie (DBV) (krzywa a), z zaworem DBV o przepływie 400 l/min (krzywa b), z zaworem przeciwtępaniowym (krzywa c) oraz obliczone teoretycznie bez działania zaworu (krzywa d) w zależności od pracy uderzenia w_{20} (20 t masy kafara). Można zauważyć, że obliczone teoretycznie wartości zgadzają



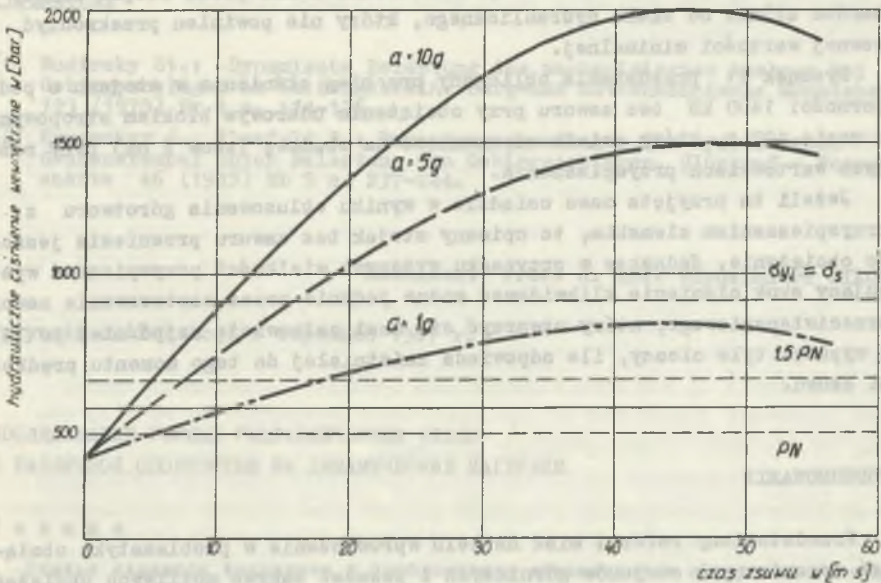
Rys. 9. Hydrauliczne ciśnienie wewnętrzne w zależności od czasu zsuwu dla stojaka indywidualnego 400 kN bez zaworu przy pracy udaru 15 kNm o różnych masach kafara m_1 , skok hydrauliczny = 600 mm

Fig. 9. Hydraulic inner pressure according to slip time an individual prop 400 kN without valve with surge work 15 kNm with different pile-driver's mass m_1 , hydraulic jump = 600 mm



Rys. 10. Hydrauliczne ciśnienie wewnętrzne w zależności od czasu zsuwu przy pracy udaru 15 kNm, $m_1 = 20$ t dla stojaka 1400 kN o różnych skokach hydraulicznych

Fig. 10. Hydraulic inner pressure according to slip time with surge work 15 kNm, $m_1 = 20$ t for a prop 1400 kN with different hydraulic jumps



Rys. 11. Hydrauliczne ciśnienie wewnętrzne w zależności od czasu zsuwu dla stojaka 1400 kN przy tąpnięciu bloku stropowego o masie 100 t spadającego z wysokości 2 cm z różnymi przyspieszeniami

Fig. 11. Hydraulic inner pressure according to slip time for a prop 1400 kN while roof block crump of 100 t mass falling down from 2 cm height at different accelerations

się z rzeczywistymi w trakcie badań (krzywe a i d). Można również zauważyć niewielki wpływ normalnych zaworów ograniczających ciśnienie. Efektywne odciążenie osiąga się jedynie przez odpowiednio dobrane zawory przeciąpaniowe (krzywa c).

Z kolei przedstawione zostaną dalsze ważne oddziaływania na przebieg ciśnienia w stojaku w trakcie pierwszej połowy okresu oscylacji obciążenia uderzeniowego. Przebieg ciśnienia określono za pomocą ww. programu obliczeniowego bez uwzględnienia tłumienia przez zawór. Przedstawione zależności udowodnione zostały przez odpowiednie badania w zakresie tendencji przebiegu.

Rysunek 9 pokazuje oddziaływania różnych mas kafara przy obciążeniu uderzeniowym stojaka indywidualnego o podporności 400 kN z pracą uderzenia $W = 15$ kNm. Taką pracą uderzenia obciążone są w RFN stojaki górnicze w trakcie badań dopuszczeniowych. Praca uderzenia nie przedstawia żadnej właściwości dla opisanego tego uderzenia, ponieważ przy identycznej pracy uderzenia i różnych mas kafara powstają inne profile obciążenia.

Rysunek 10 przedstawia wpływ skoku hydraulicznego stojaka o podporności 1400 kN przy pracy uderzenia $W_{20} = 15$ kNm.

Można zauważyć, że zdolność do przeniesienia udaru przez stojak zależy bardzo silnie od skoku hydraulicznego, który nie powinien przekroczyć pewnej wartości minimalnej.

Rysunek 11 przedstawia obliczony przebieg ciśnienia w stojaku o podporności 1400 kN bez zaworu przy obciążeniu udarowym blokiem stropowym o masie 100 t, który osiada uderzeniowo na obudowę (zsuw 2 cm) przy różnych wartościach przyspieszenia.

Jeżeli ta przyjęta masa osiadzie w wyniku obłuzowania górotworu z przyspieszeniem ziemskim, to opisany stojak bez zaworu przeniesie jeszcze to obciążenie. Jednakże w przypadku wyższych wielkości przyspieszeń występujący skok ciśnienia zlikwidować można jedynie przez zastosowanie zaworu przeciwtapaniowego, który otworzyć się musi całkowicie najpóźniej po 10 ms i wypuścić tyle cieczy, ile odpowiada zaistniałej do tego momentu prędkości zsuwu.

PODSUMOWANIE

Przedstawiony referat miał na celu wprowadzenie w problematykę obciążeń dynamicznych stojaków górniczych i pokazać zakres możliwych obciążeń. O dalszych badaniach obejmujących problemy zawierające wpływ wyrzutów ociosowych podczas procesu obciążenia lub zmieniających się własności wytrzymałościowych materiału rur stojaka z uwagi na zwiększone prędkości wydłużenia w tym miejscu nie mogę poinformować. Dalsze prace badawcze zawierające zachowanie się zaworów ograniczających ciśnienie i zachowanie całego zestawu obudowy przy obciążeniach dynamicznych są w przygotowaniu.

Na zakończenie przedstawię jeszcze raz możliwości zwalczania dynamicznego obciążenia poprzez odpowiednią konstrukcję stojaka:

- utrzymanie minimalnej długości stojaka w wymaganych zakresach lub podniesienie pomiaru cieczy przez otwarcie przestrzeni wewnętrznej rdzenia, przez co zwiększy się droga sprężynowania stojaka,
- zwiększenie oraz korzystna postać przekroju wejściowego dla zaworu ograniczającego ciśnienie,
- zastosowanie szybko działającego zaworu upływowego (przeciwtapaniowego) z efektywnym działaniem podczas otwierania i zamykania przepływu, który w okresie niewiele milisekund otworzy odpowiedni wystarczająco duży przekrój aby utrzymać ciśnienie w dopuszczalnych granicach.

LITERATURA

- [1] Budirsky St.: „Dynamische Belastung des mechanisierten Ausbaus bei Gebirgsschlägen im Kaibongestein. Berg-und Hüttenmännische Monatshefte 123 (1978) Nr 4 s. 114-125.
- [2] Krumacker J., Kleefeld R.: Bemessungsgrundlagen für hydraulische Grubenstempel unter Belastung von Gebirgsschlägen. Glückauf - Forschungshefte 46 (1985) Nr 5 s. 237-244.

Recenzent: Prof. dr inż. Włodzimierz SIKORA

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1987 r.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СТОЕК
С РАЗЛИЧНОЙ ОПОРНОСТЬЮ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

Р е з ю м е

Статья является введением в проблематику динамических нагрузок, влияющих на горные стойки, даны примеры имитации нагрузок этого типа. Автором описаны исследования гидравлических горных стоек, проведённые в Государственном бюро исследований материалов в Дортмунде. Представлены испытательные стенды, методика проводимых исследований и способы регистрации измеряемых параметров. На основании исследований стоек со статической нагрузкой, определены величины, существенно влияющие и определяющие диапазон возможных нагрузок.

Проведены исследования стоек при увеличенных скоростях смещения горных пород, имитирующих ударные процессы завалов. Результаты исследований представлены в виде набора графиков. Проведён анализ поведения горных противоударных клапанов в соответствующих фазах исследований. Представлены предложения по улучшению конструкции стоек, которые могли бы перенести динамические нагрузки.

EXAMINATIONS OF THE HYDRAULIC PROPS WITH DIFFERENT SUPPORT INFLUENCED BY DYNAMIC LOADINGS

S u m m a r y

The article constitutes the introduction to the problem of dynamic loadings of the props, it gives the example of simulation of this type of load.

The author described the examinations of the hydraulic props carried out in the National Department of Material Investigations - NRW/MPA in Dortmund.

Investigation stands, methodology and the ways of registration of the measured parameters were described.

On the basis of the prop examinations that were statically loaded quite important quantities of influence were determined as well as the width of the area of the possible loadings.

The props influenced by greater slip speed were examined simulating the additional processes to the quick sag of roof and the investigations of dynamic load simulating striking fall of roof.

Investigation results were presented on the set of diagrams. The analysis of anti-crump valves behaviour during particular investigation phases was made.

The end of the paper presents the conclusions concerning the prop construction that carry dynamic loadings.