

Analiza konstrukcji hydraulicznego penetrometru otworowego i jego modernizacja dla zwiększenia zakresu pomiarowego

Analysis of hydraulic design of downhole penetrometer and his modernization in order to increase the measuring range



Dr hab. inż. Andrzej Nierobisz,
prof. GIG*^{*)}



Dr inż. Jerzy Gawryś**^{*)}



Mgr inż. Krzysztof Bier**^{*)}

Treść: W artykule przedstawiono przegląd konstrukcji penetrometrów otworowych stosowanych w polskim górnictwie węglowym wraz z formułami pozwalającymi na wyznaczanie parametrów mechanicznych skał. Zwrócono uwagę na mankament dotychczasowych rozwiązań polegający na tym, że można badać skały o wytrzymałości do około 100 MPa. W związku z tym opracowano i wykonano badania za pomocą nowego naciskacza o średnicy 3,5 mm. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że wprowadzona modyfikacja konstrukcji naciskacza pozwala na badanie skał o wytrzymałości powyżej 100 MPa.

Abstract: This paper gives an overview of the downhole penetrometers design used in the Polish coal mining industry, along with formulas for determination of mechanical parameters of rock. Attention was paid to the shortcoming of the existing solutions which allow to explore the rocks of strength up to about 100 MPa. Consequently, a study was developed and performed using a new press-spire with a diameter of 3,5 mm. The obtained results indicate that the modification introduced to the press-spire design allows to test the strength of the rocks above 100 MPa.

Słowa kluczowe:

bezpieczeństwo, górnictwo, górotwór, wytrzymałość, wyniki badań

Key words:

safety, mining, rock mass, strength, results

1. Wprowadzenie

Hydrauliczny penetrometr otworowy został opracowany i wdrożony przez Główny Instytut Górnictwa w Katowicach w 1973 r. [4]. Produkcję penetrometrów realizował Zakład Budowy Urządzeń i Aparatury Naukowo-Doświadczalnej przy GIG, który w 1976 r. rozprowadził w kopalniach węgla kamiennego około 90 kompletów tych urządzeń wraz z odpowiednią instrukcją użytkowania i interpretacji wyników [6].

Urządzenie służy do badania parametrów wytrzymałościowych górotworu w warunkach *in situ*. W latach osiem-

dziesiątych i dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku było mało używane w kopalniach, ponieważ nie obowiązywały wymagania związane z koniecznością badania parametrów górotworu.

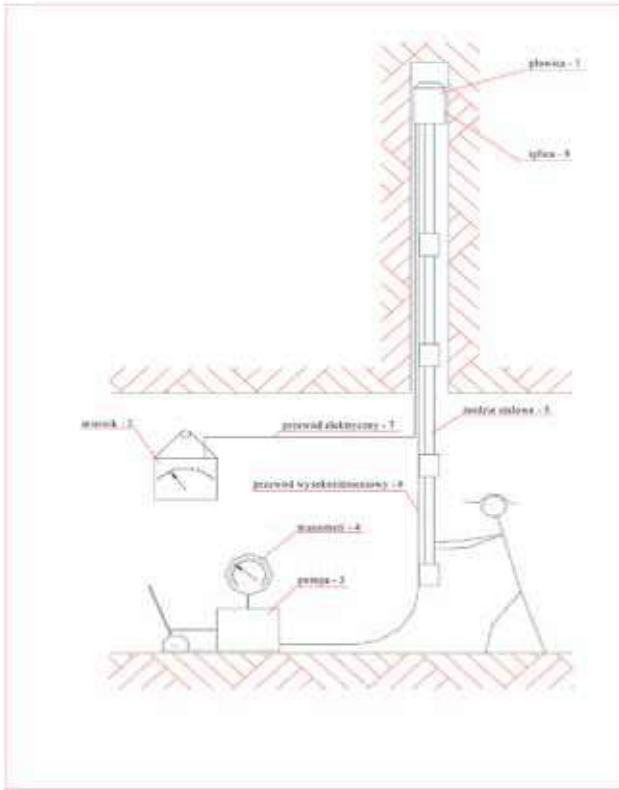
Począwszy od 2002 r. gdy zaczęły obowiązywać nowe przepisy, wzrosło zainteresowanie penetrometrem, ponieważ dobór obudowy wyrobisk podziemnych należało wykonywać w oparciu o wyniki badań własności geomechanicznych górotworu [11].

Artykuł przedstawia rozwój konstrukcji penetrometru oraz najnowsze wyniki badań, których celem jest opracowanie urządzenia pozwalającego badać skały o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie powyżej 100 MPa.

^{*)} *Główny Instytut Górnictwa w Katowicach, ** SiLLog w Zabrze

2. Przegląd konstrukcji penetrometrów stosowanych w polskim górnictwie

Penetrometr składa się z następujących elementów (rys.1): 1 - głowica, 2 - miernik elektryczny wysuwu iglicy, 3 - ręczna pompa hydrauliczna, 4-manometr do mierzenia ciśnienia w układzie hydraulicznym, 5 - żerdzie stalowe do przesuwania głowicy w otworze, 6 - przewód wysokociśnieniowy do podawania ciśnienia do głowicy penetrometru, 7 - przewód elektryczny łączący cewkę umieszczoną w głowicy z miernikiem, 8 - iglica wysuwna.



Rys. 1. Schemat hydraulicznego penetrometru otworowego
Fig. 1. Hydraulic downhole penetrometer diagram

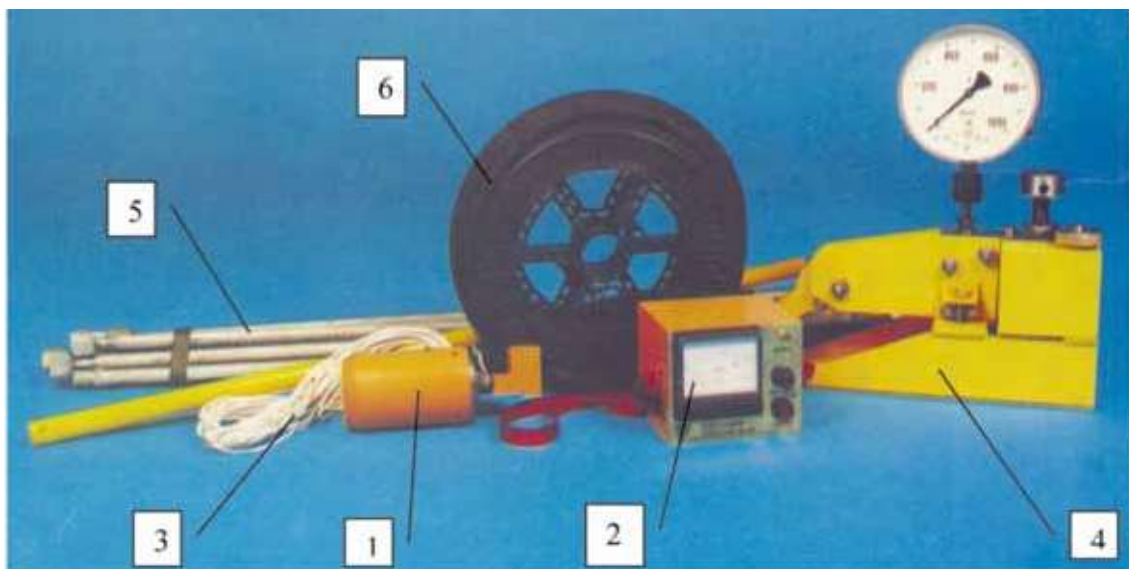
Zasada działania hydraulicznego penetrometru otworowego polega na tym, że do otworu o średnicy 85÷95mm wywierconego w stropie lub spągu wyrobiska wprowadza się głowicę (1), a następnie ręczną pompką hydrauliczną (3), poprzez przewód wysokociśnieniowy podaje się olej (hydrol) do głowicy, powodując wysuw iglicy (8) z płaską powierzchnią czołową o średnicy 5 mm. Iglica ta wciska się (penetruje) w ściankę otworu wiertniczego. Przy określonym ciśnieniu krytycznym, które można odczytać na manometrze pompy(4) następuje zniszczenie ścianki otworu. Głowicę przesuwają wzdłuż otworu z krokiem co 5 lub 10 cm, wykonując pomiary ciśnienia krytycznego wywołującego zniszczenie ścianki otworu. Uzyskane wyniki nanosi się na wykres, gdzie na osi odciętych odmierza się ciśnienie krytyczne, a na osi rzędnych głębokość, na której został wykonany pomiar.

Penetrometr w postaci przedstawionej na rys. 2 był produkowany przez Zakład Budowy Urządzeń i Aparatury Naukowo-Doświadczalnej od 1976 do 2008 r. Począwszy od 1976 r. pracownicy Głównego Instytutu Górnictwa stosują penetrometr, wykonując badania na zlecenie kopalń oraz w ramach prac własnych. Szacuje się, że przez 39 lat wykonano badania w około 700 otworach penetrometrycznych.

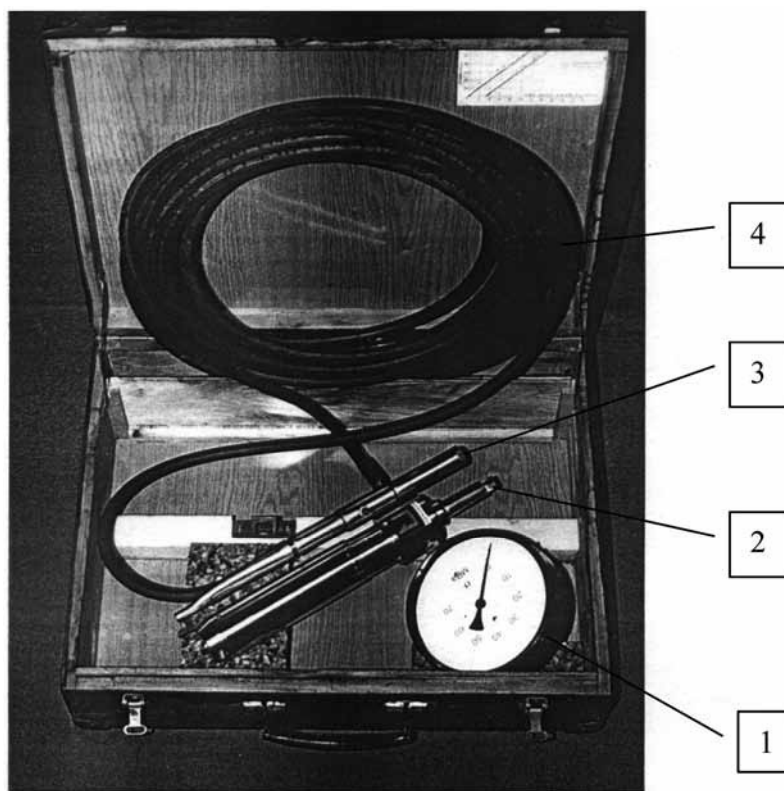
W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Budownictwa Górniczego BUDOKOP opracował urządzenie do szybkiego określania parametrów geomechanicznych skał w warunkach *in situ* [10]. Podstawową zaletą urządzenia były małe gabaryty głowicy penetrometru, umożliwiające pomiary w otworach o średnicy 28 mm oraz niski ciężar w granicach 5 kg (bez rurek przedłużających) (rys.3).

Zasada działania penetrometru polegała na wywieraniu nacisku na iglicę poprzez przesuwający się suwak umieszczony w głowicy. Przemieszczanie suwaka było powodowane ciśnieniem cieczy wywołanym przez generator ciśnienia (rys.4).

Podstawową wadą urządzenia był brak układu pomiarowego pozwalającego uchwycić moment skruszenia ścianki otworu penetrometrycznego. Odbywało się to na wycucie, obserwując wskazówkę manometru. Wątpliwości budził, również sposób współpracy iglicy z suwakiem ze względu na tarcie występujące pomiędzy nimi. Dla porównania wyników uzyskanych za pomocą penetrometru typu PHI-00



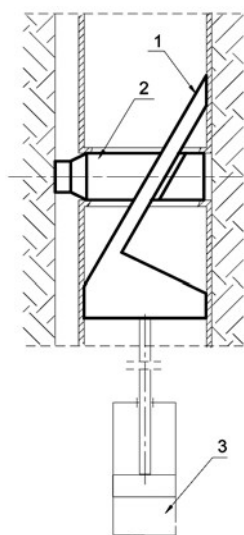
Rys. 2. Widok hydraulicznego penetrometru otworowego typu PHI-00 [7]: 1- głowica, 2 - miernik elektryczny, 3 - przewód elektryczny, 4 - pompa, 5 - żerdzie stalowe, 6 - bęben z nawiniętym przewodem wysokociśnieniowym
Fig. 2. View of PHI-00 hydraulic downhole penetrometer [7]: 1 – head, 2 – electric meter, 3 – electric cable, 4 – pump, 5 – steel rods, 6 – reel with high pressure hydraulic hose



Dopuszczenie WUG - cecha GM-90/95

Rys. 3. Penetrometr otworowy PO-27 [10]: 1 - manometr, 2 - generator ciśnienia, 3 - głowica, 4 - elastyczny przewód hydrauliczny

Fig. 3. PO-27 downhole penetrometer [10]: 1 – pressure gauge, 2 – pressure generator, 3 – head, 4 – flexible hydraulic hose



Rys. 4. Sposób działania penetrometru typu PO-27: 1 - suwak, 2 - iglica, 3 - generator ciśnienia

Fig. 4. PO-27 penetrometer's principle of operation: 1 – slider, 2 – spire, 3 – pressure generator

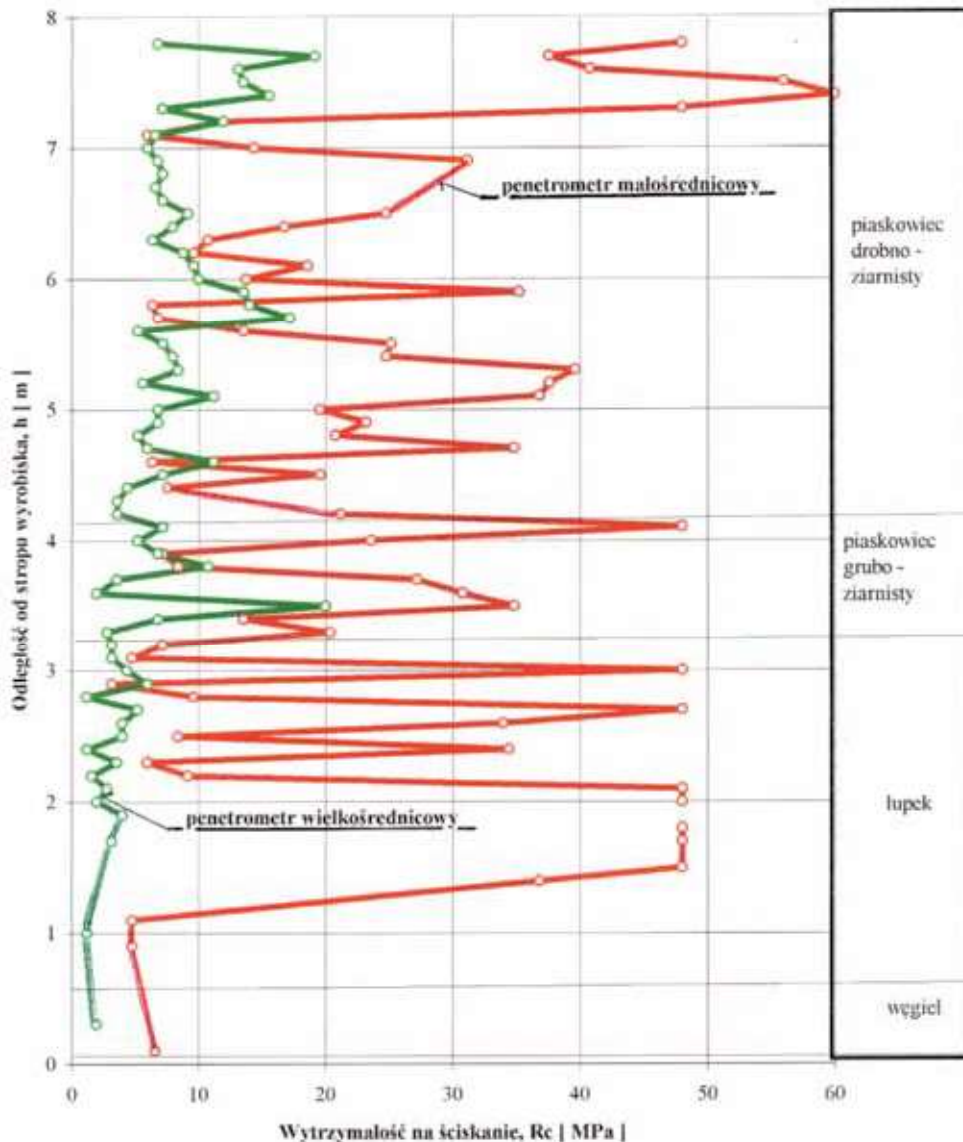
i PO-27 wykonano kilka prób, które polegały na tym, że w stropie wyrobiska chodnikowego w odległości około 1,0 m wykonano dwa otwory, jeden o średnicy 93 mm, a drugi o średnicy 28 mm. Uzyskane wyniki wykazały znaczne różnice we wskazaniach obydwu penetrometrów (rys. 5). W związku z powyższym zrezygnowano w GIG z używania penetrometru typu PO-27.

Zebrane doświadczenia w stosowaniu penetrometru typu PHI-00, pozwoliły na opracowanie w 2006 r. nowej generacji penetrometru typu Pen206 [8]. Nowe rozwiązanie urządzenia eliminuje szereg wad starego rozwiązania. Charakteryzuje się ono następującymi cechami (rys. 6):

- mniejszym ciężarem,
- elektronicznym sposobem rejestracji i obróbki uzyskanych wyników,
- dużą wytrzymałością naciskacza,
- niezawodnym uszczelnieniem głowicy.

Zestaw penetrometru otworowego typu Pen206 przedstawiono na rysunku 6. Jego parametry techniczne są następujące:

- maksymalne ciśnienie w układzie hydraulicznym: 70 MPa,
- możliwość badania skał o wytrzymałości na ściskanie: do 84 MPa,
- całkowita masa: 34 kg,
- średnica głowicy pomiarowej: 85 mm,
- masa głowicy pomiarowej: 5,30 kg,
- maksymalny wysuw naciskacza: 17 mm,
- dokładność przemieszczenia naciskacza: $\pm 0,1$ mm,
- dokładność rejestracji wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie: ± 1 MPa,
- zasięg pomiarowy wgłęb górotworu: do 10 m,
- ciecz robocza w układzie hydraulicznym: płyn hydrauliczny,
- temperatura pracy: 0-700 C,
- średnica końcówki naciskacza: 5 mm,
- rozdzielczość wskazań położenia naciskacza:
 - wskaźnik paskowy 0,2 mm,
 - wskaźnik cyfrowy 0,1 mm,
- automatyczne rozpoznawanie momentu skruszenia skały,



Rys. 5. Porównanie wyników uzyskanych za pomocą penetrometru typu PHI-00 (penetrometr wielkośrednicowy) z wynikami uzyskanymi za pomocą penetrometru typu PO-27 (penetrometr małośrednicowy)

Fig. 5. Comparison of results obtained from PHI-00 (large-diameter) and PO-27 (small-diameter) penetrometers

- łatwe zapisywanie wyników pomiarów do pamięci wewnętrznej pulpitu,
 - wspomaganie komputerowe obróbki danych pomiarowych i generowanie raportów,
 - pamięć wewnętrzna pulpitu: 56 sesji pomiarowych (56 otworów),
 - całkowita liczba poziomów pomiarowych w jednej sesji (w jednym otworze): 130,
 - zasilanie akumulatorowe własne: 3,6 V,
 - czas pracy z całkowicie naładowanym akumulatorem: minimum 10 godzin,
 - klasyfikacja urządzenia ze względu na zagrożenie wybuchem: Grupa I, Kategoria M2, Ex ia I,
 - klasa szczelności: głowica IP54 (pulpit i krosownica IP65),
 - Certyfikat zewnętrznej oceny zgodności CE- Jednostka Certyfikująca GIG Katowice,
 - Certyfikat badania typu WE w zakresie zgodności z Dyrektywą ATEX 94/9/WE: KDB 08ATEX099.
- Pomiary w kopalni wykonuje się zgodnie z zasadami podanymi w dokumentacji techniczno-ruchowej. Wyniki

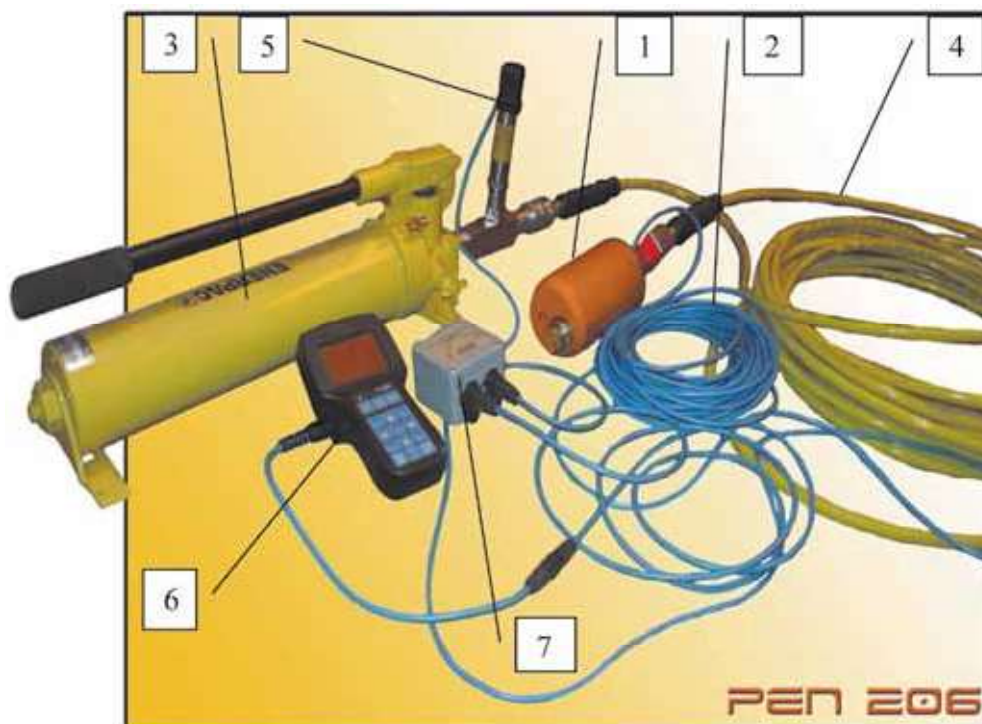
opracowuje się za pomocą specjalnie do tego celu napisanego programu, który generuje raport z pomiarów w formie tabelarycznej i graficznej.

Ostatnim - znanym autorem artykułu - rozwiązaniem konstrukcyjnym penetrometru jest urządzenie opracowane w Zakładzie Budowy Urządzeń i Aparatury Naukowo-Doświadczalnej sp. z. o.o. w Katowicach.

Penetrometr otworowy PHI-09, PHI-09R przeznaczony jest do badania wytrzymałości skał stropowych w celu klasyfikacji stropów wyrobisk, doboru obudowy wyrobisk ścianowych i korytarzowych oraz innych potrzeb związanych z prowadzeniem robót górniczych. Wersja PHI-09 różni się od wersji PHI-09R tym, że nie posiada automatycznego układu rejestracji wyników. Wyniki trzeba notować, a następnie wprowadzać do arkusza kalkulacyjnego.

Zestaw penetrometru otworowego typu PHI-09, PHI-09R przedstawiono na rysunku 7. Jego parametry techniczne są następujące [12]:

- maksymalne ciśnienie w układzie hydraulicznym: 70 MPa,
- średnica sondy: 88 mm,



Rys. 6. Zestaw hydraulicznego penetrometru otworowego typu Pen206: 1 - głowica penetrometru, 2 - przewód elektryczny, 3 - pompa, 4 - przewód wysokociśnieniowy, 5 - czujnik ciśnienia, 6 - pulpit rejestrująco-sterujący, 7 - krosownica

Fig. 6. Set of Pen206 hydraulic downhole penetrometer: 1 - penetrometer's head, 2 - electric cable, 3 - high pressure hydraulic hand pump, 4 - high pressure hydraulic hose, 5 - pressure sensor, 6 - recording and control console, 7 - wiring cross-box

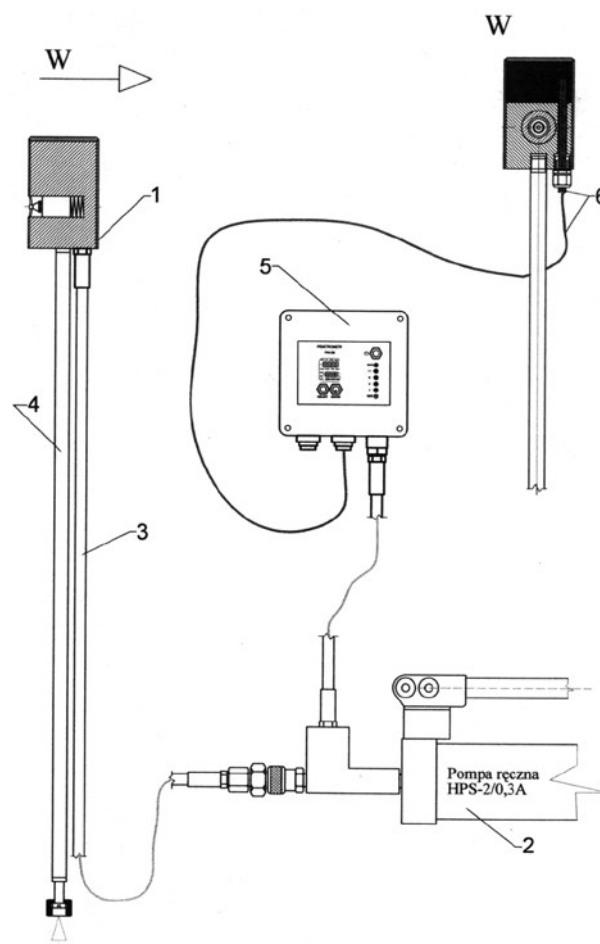
- zasięg pomiarowy sondy: 10 m,
- maksymalny wysuw naciskacza: 15 mm,
- średnica końcówki naciskacza: 5 mm,
- zakres pomiaru wytrzymałości na ściskanie badanych skał: 0÷108 MPa,
- dokładność pomiaru i rejestracji ciśnienia: $\pm 0,1$ MPa,
- całkowity ciężar: około 21,6 kg,
- temperatura pracy: 0÷500 C,
- stopień ochrony obudowy: IP-54,
- wizualizacja położenia naciskacza na panelu pomiarowym przy pomocy diod LED,
- komputerowa obróbka wyników pomiarów.

3. Wyznaczanie parametrów mechanicznych skał na podstawie wskazań penetrometru otworowego

Odczytanie ciśnienia na manometrze pompy w momencie zniszczenia ścianki otworu wiertniczego pozwala na korelacyjne wyznaczenie następujących parametrów skały występującej w danym punkcie górotworu [5]:

Rys. 7. Penetrometr hydrauliczny PHI-09, PHI-09R [12]: 1 - sonda, 2 - ręczna pompa wysokociśnieniowa, 3 - wysokociśnieniowy wąż hydrauliczny, 4 - drąg segmentowy, 5 - panel pomiarowy, 6 - przewód elektryczny

Fig. 7. PHI-09/PHI-09R hydraulic downhole penetrometer [12]: 1 - probe; 2 - high pressure hydraulic hand pump; 3 - high pressure hydraulic hose; 4 - segmented pole; 5 - metering panel; 6 - electric cable



- wytrzymałość na rozciąganie R_r ,
- wytrzymałość na ściskanie R_c ,
- wskaźnik urabialności f ,
- szczelinowatość skały S .

Określenie wymienionych cech dla kolejnych punktów położenia wzdłuż profilu penetrometrycznego, pozwala na wykreślenie ciągłych profili R_r , R_c , f oraz S dla zbadanej penetrometrem serii skalnej.

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono zależność pomiędzy oporem penetracji a wytrzymałością skały na rozciąganie odpowiadającej kierunkowi działania siły rozciągającej prostopadłemu do powierzchni uwarstwienia dla wszystkich podstawowych typów skał karbońskich Górnosląskiego Zagłębia Węglowego. Poprzez opór penetracji rozumie się wartość krytycznego ciśnienia odczytanego na manometrze pompy w momencie punktowego zniszczenia skały przez iglicę penetrometru.

Wykonano to poprzez równoległe badania wytrzymałości na rozciąganie metodą brazylijską oraz badania oporów penetracji dokładnie na tym samym poziomie litologicznym. Badania te prowadzono w następujący sposób:

- pobrano w kopalni próbki blokowe wybranych skał o wymiarach 15x30 cm,
- przecięto na połowę każdy blok za pomocą piły szybkoobrotowej w kierunku prostopadłym do uwarstwienia,
- z jednej połówki bloku wykonano dokładnie zorientowane przestrzennie próbki kostkowe o boku 5 cm a następnie przeprowadzono badania wytrzymałości na rozciąganie metodą brazylijską,
- z drugiej połowy bloku wykonano takie same próbki i umieszczono je odpowiednio zorientowane przestrzennie w bloku z otworem na penetrometr, który zalano betonem,
- w tak przygotowanym bloku betonowo-skalnym wykonano badania oporów penetracji.

Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje liniowa zależność pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie a oporem penetracji skał karbońskich. Minimalną dla danego punktu wartość wytrzymałości na rozciąganie w przypadku działania siły prostopadłej do uwarstwienia skał można określić z zależności

$$R_r = 0,077 \cdot p_m \quad (1)$$

gdzie:

- R_r – wytrzymałość na rozciąganie, MPa,
- p_m – krytyczne ciśnienie penetracji, MPa.

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c określono na podstawie następującego równania empirycznego

$$R_c = 1,2 \cdot p_m \quad (2)$$

Równanie powyższe otrzymano w podobny sposób jak wytrzymałość na rozciąganie, poprzez równoległe badanie laboratoryjne wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz oporów penetracji szeregu skał karbońskich.

Wskaźnik urabialności f w przybliżeniu można określić na podstawie następującego równania empirycznego

$$f = 0,1 \cdot p_m \quad (3)$$

Równanie (3) opracowano na podstawie prac Protodiakonowa, który wykazał istnienie liniowego związku pomiędzy wartością R_c oraz wartością f .

Szczelinowatość skał S określono na podstawie zmian wartości p_m dla danego petrograficznego typu skał. Równanie do obliczania wskaźnika szczelinowatości ma postać

$$S = \sqrt{\frac{A \cdot F}{W \cdot p_{msr}}} \quad (4)$$

gdzie:

- A – amplituda zmian oporów penetracji p_m , MPa,
- F – liczba skokowych zmian oporu penetracji na określonym odcinku długości otworu,
- W – liczba wykonanych cykli badania oporów penetracji (wgniotów) na rozpatrywanym odcinku długości otworu,
- p_{msr} – średnia wartość p_m na odcinku badanej zmienności amplitudy, MPa.

Stosowanie przez wiele lat współczynników przeliczeniowych krytycznego ciśnienia penetracji na wytrzymałość na rozciąganie (0,077) i ściskanie (1,2) wykazało, że w wielu przypadkach zachodzą znaczne odchylenia w ten sposób uzyskanych wyników od wyników badań laboratoryjnych. Wobec powyższego przeprowadzono powtórne próby korelacji, w których uwzględniono zmienność litologiczną skał, ich wilgotność oraz stan spękania. Wykonane badania pozwoliły na sformułowanie następujących najważniejszych wniosków [1]:

1. Wytrzymałość skał, określona dwoma metodami – laboratoryjną i *in situ* – jest uzależniona od:
 - wilgotności (stanu nasycenia kapilarnego lub stanu powietrzno-suchego powodującego spadek wartości wytrzymałości skał w stanie nasycenia kapilarnego w stosunku do wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym o 20÷40%),
 - spękań i powierzchni osłabienia powodujących spadek wartości ciśnienia krytycznego penetracji w stosunku do wytrzymałości w stanie nasycenia kapilarnego o 23÷66% dla piaskowców drobnoziarnistych,
 - spękań i powierzchni osłabienia powodujących spadek wartości ciśnienia krytycznego penetracji w stosunku do wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym o 41÷62% dla iłowców.
2. Współczynnik $b=R_r/p_m$ zależy od typu litologicznego skały. Wynosi on:
 - 0,073 dla piaskowców,
 - 0,055 dla piaskowców z mułowcami,
 - 0,054 dla mułowców,
 - 0,037 dla iłowców.
 Postać równania wyznaczającego wytrzymałość na rozciąganie skał w górotworze proponuje się zdefiniować następująco: $R_r=0,055 \cdot p_m$
3. Współczynnik $a=R_c/p_m$ zależy od typu litologicznego skały i jej wilgotności. Dla skał w stanie powietrzno-suchym uzyskano następujące wartości współczynnika a :
 - 1,18 dla piaskowców,
 - 1,04 dla piaskowców z mułowcami,
 - 0,84 dla mułowców,
 - 0,96 dla iłowców,
 - 0,072 dla węgla błyszczących.
 Dla skał w stanie nasycenia kapilarnego uzyskano następujące wartości współczynnika a :
 - 1,18 dla piaskowców,
 - 1,04 dla piaskowców z mułowcami,
 Mając na uwadze fakt, że w czasie badań penetrometrem otworowym, często trudno jest zidentyfikować na danej głębokości otworu szczegółową odmianę litologiczną występującą tam skały, zaleca się stosowanie ogólnego współczynnika przeliczeniowego $a=1,0$.
4. W wielu przypadkach wyniki badań laboratoryjnych i penetrometrycznych są trudne do porównania, bowiem wilgotność skał w otworach penetrometrycznych nie jest określona, zaś stopień spękania ścianki otworu możliwy jest do określenia tylko w przypadku dysponowania kamerą introskopową.

W zestawie penetrometru otworowego PHI-09, PHI-09R produkowanego w Zakładzie Budowy Urządzeń i Aparatury Naukowo-Doświadczalnej sp. z o.o. w Katowicach zastosowano następujące wzory przeliczeniowe do wyznaczania parametrów skał [11]:

$$R_r = 0,099 \cdot p_m \quad (5)$$

$$R_c = 1,548 \cdot p_m \quad (6)$$

gdzie:

- R_r – wytrzymałość na rozciąganie, MPa,
- R_c – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, MPa,
- p_m – krytyczne ciśnienie penetracji, MPa.

4. Możliwe sposoby adaptacji penetrometru do badania skał o dużej wytrzymałości

Obecna konstrukcja penetrometru Pen206 pozwala na badanie skał o wytrzymałości do 84MPa. Badanie skał o większej wytrzymałości wymaga stosowania większych naprężeń pod końcówką naciskacza. Ten cel można zrealizować na kilka sposobów:

- 1 Wymuszanie większych ciśnień roboczych poprzez użycie pompy oraz węży hydraulicznych wytrzymałych ciśnieniu co najmniej 150 MPa. Takie elementy są produkowane, jednak trudno dostępne w handlu detalicznym. Dodatkowym problemem może okazać się uszczelnienie głowicy, przewidziane dla ciśnień rzędu 70 MPa.
- 2 Zwiększenie średnicy tłoka w głowicy, co powoduje zwiększenie przełożenia wartości ciśnienia manometrycznego penetrometru na naprężenia pod końcówką naciskacza. To rozwiązanie wymaga zaprojektowania i wykonania prototypu nowej głowicy, a wymagane tolerancje poszczególnych elementów wiążą się ze skomplikowaną (a co za tym idzie kosztowną) obróbką mechaniczną.
- 3 Zmniejszenie średnicy naciskacza. Rozwiązanie najłatwiejsze w realizacji, umożliwia wykorzystanie dotychczasowych elementów mechanicznych penetrometru. Zwiększenie przełożenia wartości ciśnienia manometrycznego penetrometru na naprężenia pod końcówką naciskacza uzyskuje się przez wykonanie jednego elementu – samego naciskacza. Należy jednak wziąć pod uwagę wartości naprężeń w samym naciskaczu, co rzutuje na wybór materiału, z którego powinien być wykonany.
- 4 Warianty mieszane. Nie jest wykluczone, że optymalnym docelowym rozwiązaniem powinno być połączenie wymienionych wyżej wariantów. Na etapie badań laboratoryjnych nie jest ono jednak ekonomicznie uzasadnione.

Biorąc pod uwagę wszystkie wady i zalety powyższych rozwiązań, do celów badań laboratoryjnych wybrano opracowanie nowego naciskacza o zmniejszonej średnicy końcówki roboczej. W celu przeprowadzenia badań wykonano 10 naciskaczy o średnicy końcówki zmniejszonej z 5 mm na 3,5 mm.

5. Program i metodyka badań nowej konstrukcji naciskacza

Badania nowej konstrukcji naciskacza podzielone zostały na 4 etapy, a mianowicie:

1. Badanie przygotowawcze polegające na:
 - Wyznaczeniu oporów wysuwu tłoka oraz innych sił zmniejszających nacisk. Do wyznaczenia tej charakterystyki użyto penetrometru Pen206 wraz ze zmodyfikowanym pulpitem, rejestrującym zmiany ciśnienia manometrycznego w funkcji wysuwu naciskacza.

Badanie polegało na zarejestrowaniu przebiegu zmian ciśnienia manometrycznego w układzie hydraulicznym penetrometru podczas swobodnego wysuwu naciskacza od położenia początkowego ($D = 0$ mm) do maksymalnego ($D = D_{max} = 17,4$ mm).

- Wyznaczeniu charakterystyki spadku ciśnienia $-dp$ w układzie hydraulicznym w stosunku do zmiany położenia naciskacza $-dD$. Do wyznaczenia tej charakterystyki użyto penetrometru Pane206 wraz ze zmodyfikowanym pulpitem rejestrującym zmiany ciśnienia manometrycznego w funkcji wysuwu naciskacza. Badanie polegało na zamontowaniu głowicy w przyrządzie umożliwiającym kontrolowanie wysuwu naciskacza, wymuszeniu w układzie hydraulicznym penetrometru określonej wartości ciśnienia, a następnie rejestracji spadku wartości ciśnienia manometrycznego w układzie wywołanego kontrolowanym wysuwem naciskacza. Badanie przeprowadzono dla kilku różnych nominalnych wartości ciśnienia manometrycznego.
 - Wyznaczenie tempa spadku ciśnienia $-dp$ w układzie hydraulicznym w funkcji czasu dt . Do wyznaczenia tej charakterystyki użyto penetrometru Pen206 wraz ze zmodyfikowanym pulpitem, umożliwiającym rejestrację zmian ciśnienia manometrycznego w układzie w funkcji czasu. Badanie polegało na wymuszeniu w układzie hydraulicznym penetrometru określonej wartości ciśnienia i zarejestrowaniu zmian tej wartości w funkcji czasu. Badanie przeprowadzono dla kilku różnych nominalnych wartości ciśnienia manometrycznego.
 - Określenie rzeczywistej charakterystyki penetrometru $R_c = f(p_m)$.
2. Wyselekcjonowanie próbek o wytrzymałości na ściskanie większej, niż możliwa do oznaczenia za pomocą penetrometru Pen206, które wykonano na stanowisku badawczym składającym się z (rys. 8):
 - penetrometru otworowego Pen206 (1) z głowicą umieszczoną w kanale bloku stalowego (2) w taki sposób, aby naciskacz mógł swobodnie wysuwać się poprzez szczelinę pomiędzy kanałami bloku,
 - pulpitu Pen206G (3) ze zmodyfikowanym oprogramowaniem wizualizującym przebieg badania,
 - komputera PC (4) wraz z przetwornikiem NVI_1301_02_EF (5) oraz aplikacją MDNV Data Logger v 2.06 do rejestracji przebiegu badania,
 - kamery cyfrowej do rejestracji wizualizowanego na pulpicie przebiegu badania oraz dokumentacji fotograficznej.

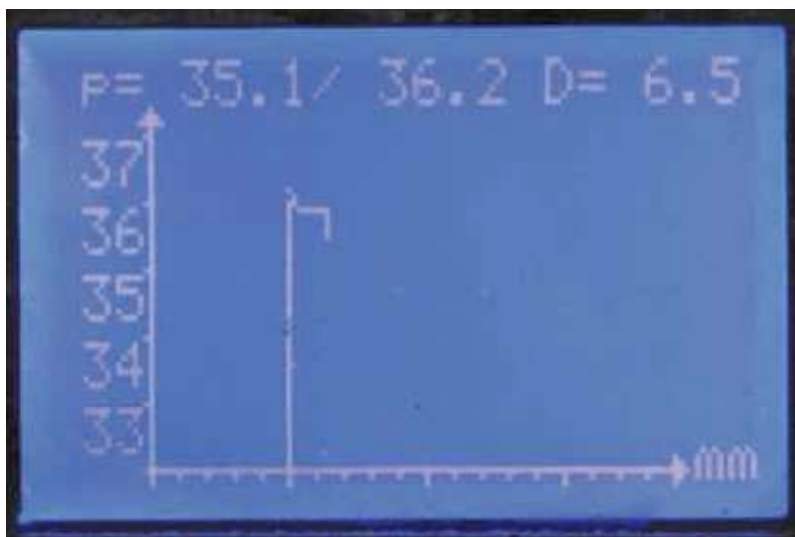
Do odpowiedniego kanału bloku wkładano próbki rdzeni skalnych, następnie za pomocą penetrometru oznaczano wytrzymałość rdzenia na ściskanie, z jednoczesną rejestracją przebiegu badania. Aby zminimalizować wpływ niejednorodności rdzeni na wyniki badań, każdą próbkę zbadano w kilku punktach. Badania przeprowadzono z użyciem standardowego naciskacza oraz naciskacza nowej konstrukcji. Przykładowy przebieg badania wizualizowany na ekranie zmodyfikowanego pulpitu Pen206G przedstawia rys.9.

Zarejestrowane przez komputer PC dla każdego badania przebiegi ciśnienia i wysuwu mogą w przyszłości posłużyć do określenia kryteriów wykrywania momentu skruszenia twardych skał.

3. Przeprowadzenie badań na stanowisku składającym się z (rys.10):
 - przenośnej prasy hydraulicznej PR-0,
 - bloku stalowego umiejscowionego na tłoku, służącego do mocowania rdzeni skalnych,



Rys. 8. Stanowisko do selekcji próbek o dużej wytrzymałości: 1 – penetrometr otworowy Pen206, 2 – blok stalowy do mocowania rdzeni, 3 – zmodyfikowany pulpit Pen206, 4 – komputer PC, 5 – przetwornik NVI_1301_02_EF
 Fig. 8. Laboratory stand for selection of strong rock samples: 1 – Pen206 downhole penetrometer; 2 – steel block for mounting rock cores; 3 – modified Pen206 console; 4 – PC; 5 – NVI_1301_02_EF analog to digital converter

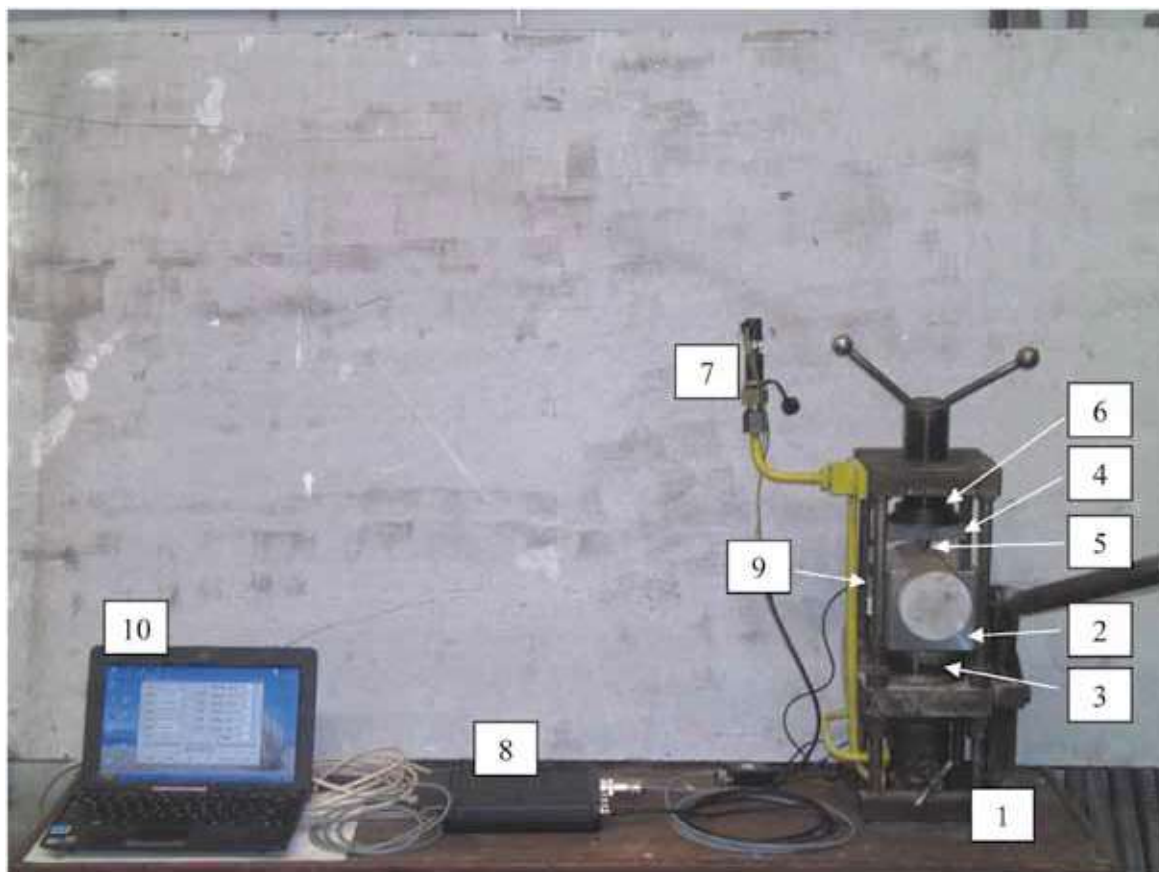


Rys. 9. Przebieg badania wizualizowany na ekranie pulpitu Pen206G. Widoczny moment skruszenia

Fig. 9. Rock sample examination process displayed on the Pen206G console's screen. The crush moment may be observed

- specjalistycznego przyrządu, służącego do mocowania naciskaczy do śruby dociskowej prasy,
- systemu pomiarowo-rejestrującego, składającego się z:
 - elektronicznego przetwornika ciśnienia 250 bar, 4-20 mA, MH-2,
 - wielokanałowego rejestratora cyfrowego MADC-

- 06 (SN:001/008/DL),
- czujnika przemieszczenia liniowego 0-50mm, 0,5% RECTI-P12, MCB,
- komputera PC z oprogramowaniem SBP VIEW v 3.1, służącym do wizualizacji i rejestracji wartości ciśnienia manometrycznego w układzie hydraulicznym prasy oraz wysuwu tłoka.



Rys. 10. Stanowisko badawcze badania naciskaczy: 1 – przenośna prasa hydrauliczna, 2 – blok stalowy do mocowania rdzeni wiertniczych, 3 – tłok prasy, 4 – przyrząd mocujący naciskacz, 5 – naciskacz, 6 – śruba dociskowa, 7 – przetwornik ciśnienia, 8 – rejestrator sygnałów analogowych, 9 – czujnik przemieszczenia liniowego, 10 – komputer PC

Fig. 10. Stand for penetrometer spire's examination: 1 – hydraulic press, 2 – steel block for mounting rock cores, 3 – piston, 4 – penetrometer spire mount, 5 – penetrometer spire, 6 – fixing screw, 7 – pressure transducer, 8 – analog signal recorder, 9 – linear displacement sensor, 10 – PC

Badanie polegało na zamontowaniu w przyrządzie (4) standardowego naciskacza, a następnie umieszczeniu w bloku rdzeni skalnych wyselekcjonowanych podczas badań opisanych w punkcie 2 i oznaczeniu krytycznego ciśnienia manometrycznego, przy którym następuje skruszenie rdzenia. Analogicznie do punktu 2, ciśnienie oznaczano kilkakrotnie w różnych punktach rdzenia, aby zminimalizować wpływ niejednorodności rdzenia na wyniki pomiarów. W następnej kolejności zamontowano w przyrządzie naciskacz o nowej konstrukcji i powtórzone oznaczenie krytycznych ciśnień dla tych samych próbek. Otrzymane wyniki wykorzystano do wyznaczenia korelacji pomiędzy ciśnieniami krytycznymi uzyskanymi w badaniu tych samych próbek różnymi naciskaczami. Zarejestrowane przebiegi zmian wartości ciśnienia manometrycznego oraz wysuwu mogą być wykorzystane w przyszłości do określenia kryteriów wykrywania momentu skruszenia twardych skał.

4. Wyznaczenie wytrzymałości mechanicznej naciskaczy, które polegało na wykonaniu prób kruszenia coraz twardszych materiałów aż do zniszczenia naciskacza. W tym celu wykorzystano stanowisko jak na rys.10, z tą różnicą, że zamiast bloku stalowego z rdzeniem skalnym na tłoku prasy ustawiane były coraz twardsze materiały. W ten sposób przebadano naciskacz standardowej konstrukcji o średnicy części roboczej wynoszącej 5mm, oraz monolityczne naciskacze o zmniejszonej średnicy części roboczej.

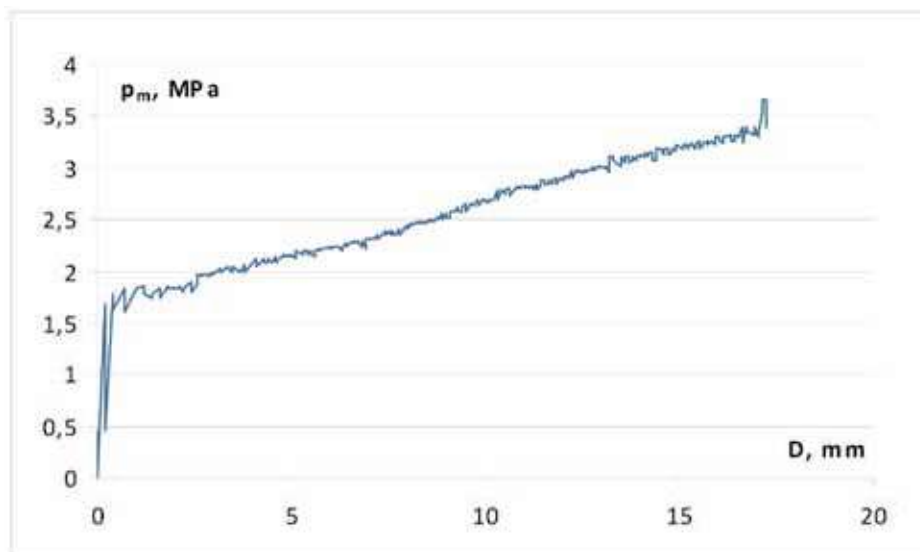
6. Analiza uzyskanych wyników

Badania przygotowawcze pozwoliły na określenie rzeczywistych charakterystyk penetrometru Pen206. Charakterystykę zmian ciśnienia manometrycznego w funkcji wysuwu tłoka przedstawia rysunek 11.

Można na niej zauważyć, że aby ruch tłoka był możliwy, należy pokonać pewne opory, przekładające się na wartość ciśnienia manometrycznego rzędu 2-3,5 MPa. Wartość tych oporów rośnie wraz z wysuwem. Ich źródłem w głównej mierze jest sprężyna odpowiadająca za powrót tłoka do położenia zerowego (stąd wzrost wartości ciśnienia wraz ze wzrostem wysuwu). W mniejszym stopniu oddziałują siły tarcia tłoka o cylinder i uszczelkę. Podczas oznaczania wytrzymałości na ściskanie zmniejszają one siłę nacisku na skałę i powinno się je uwzględniać podczas analizy wyników pomiarów.

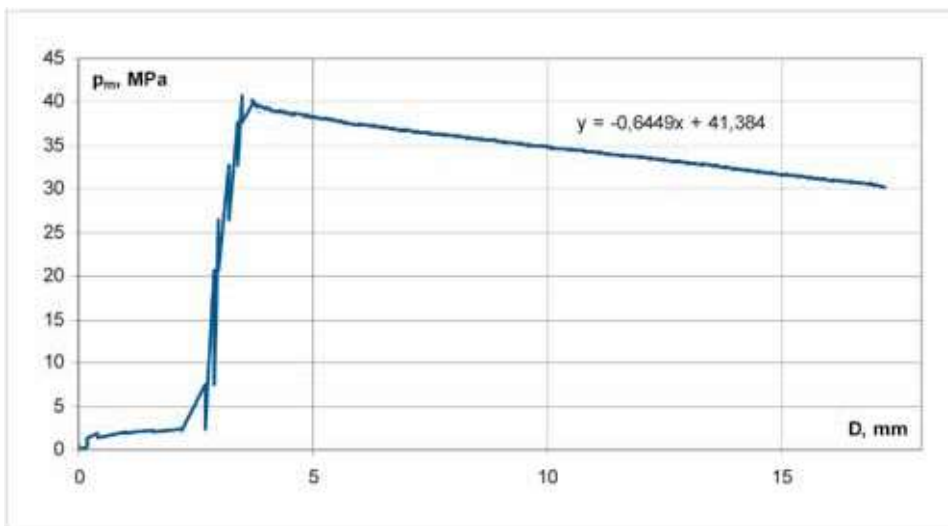
Rysunek 12 przedstawia przebieg zmian ciśnienia manometrycznego w układzie hydraulicznym penetrometru Pen206 w funkcji wysuwu naciskacza. Z przedstawionego wykresu wynika, że nachylenie charakterystyki $-dp/dD$ wynosi o 0,6-0,7 MPa/mm, co oznacza, że jeśli przy skruszeniu skały powstanie krater o głębokości 1 mm, ciśnienie w układzie hydraulicznym spadnie o maksymalnie 0,7MPa.

Rysunek 13 przedstawia zarejestrowane spadki ciśnienia manometrycznego w układzie hydraulicznym penetrometru Pen206 w funkcji czasu. Można na nich zaobserwować, że tempo spadku ciśnienia w układzie jest większe dla wyższych



Rys. 11. Zmiany ciśnienia manometrycznego w układzie hydraulicznym penetrometru w funkcji wysuwu tłoka

Fig. 11. Pressure variations in the penetrometer's hydraulic system in relation to the piston's slide



Rys. 12. Przykładowy wykres przebiegu zmian ciśnienia w układzie hydraulicznym penetrometru w funkcji wysuwu naciskacza

Fig. 12. Hydraulic pressure variations in relation to the penetrometer spire's slide

wartości ciśnienia. Po upływie około 180 s wartość ciśnienia w układzie stabilizuje się. Taki charakter zmian w niezapowietrzonym układzie hydraulicznym może świadczyć o jego sprężystości (giętki wąż hydrauliczny ma długość 15 metrów), ściśliwości medium hydraulicznego oraz o cofaniu się medium do pompy. W związku z tym pożądane jest jak najbardziej jednostajne dostarczanie medium do układu hydraulicznego oraz unikanie długich przerw pomiędzy kolejnymi ruchami pompy. Podczas oznaczania wytrzymałości skał należy być świadomym występowania tego zjawiska i minimalizować jego wpływ poprzez odpowiedni sposób pompowania.

Biorąc pod uwagę wyniki badań przygotowawczych, wytrzymałość skał na jednoosiowe ściskanie wyznaczaną metodą penetrometryczną można opisać wzorem

$$R_c = K \cdot (p_m - p_0) \quad (7)$$

gdzie:

R_c – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,

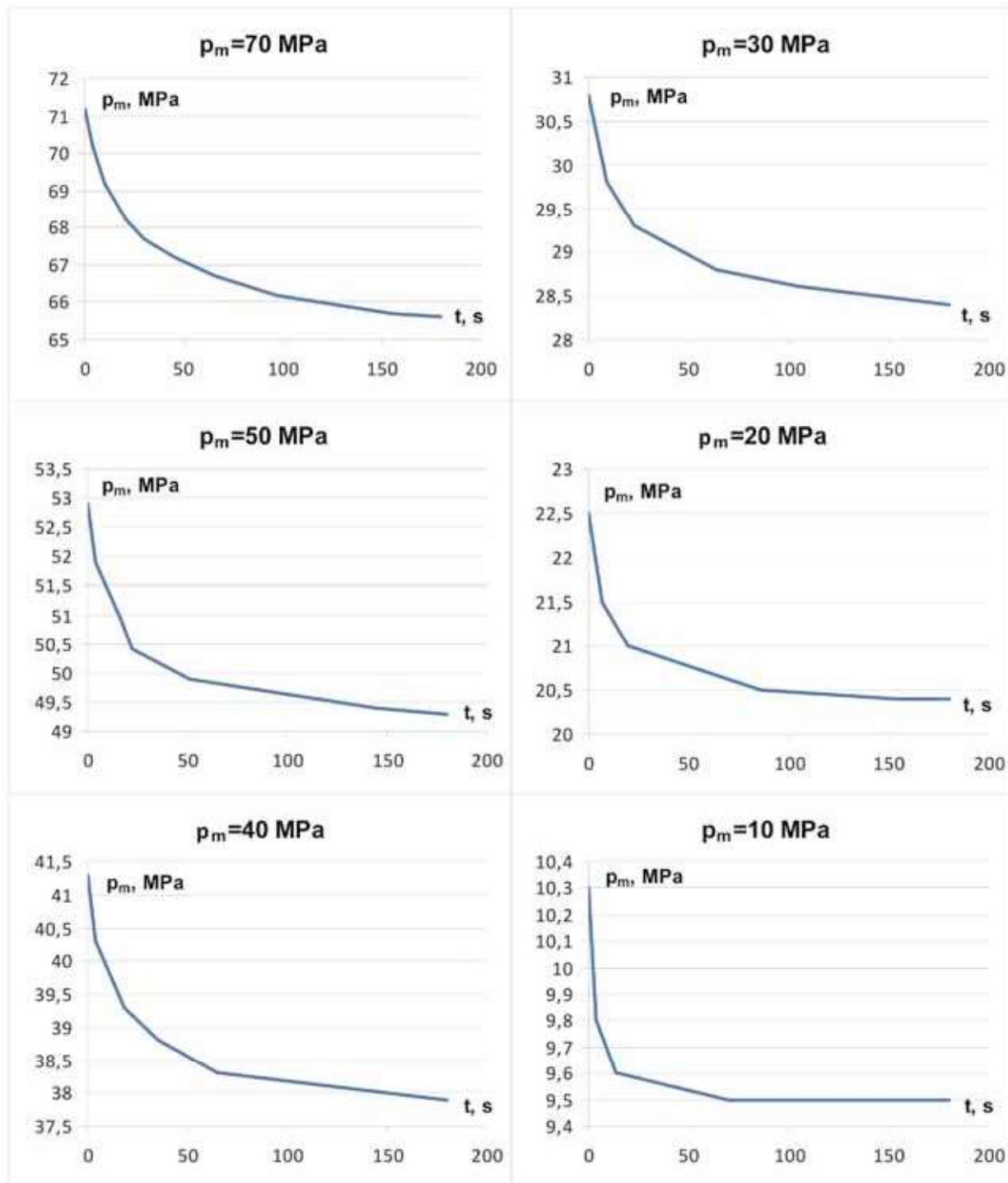
K – współczynnik korelacji, wynikający ze stałej penetrometru (dla penetrometru opisanego w [3] $K=1,2$),

p_m – ciśnienie manometryczne zarejestrowane podczas skruszenia,

p_0 – ekwiwalentne ciśnienie wynikające z oporów głowicy penetrometru.

Według metodyki opisanej w rozdziale 5 wykonano 312 oznaczeń na 93 próbkach rdzeni iłowca, piaskowca i mułowca. W wyniku przeprowadzonych badań 14 próbek rdzeni, których nie udało się skruszyć za pomocą penetrometru ze standardowym naciskaczem, zakwalifikowano do dalszych badań. Zauważono, że w wyniku skruszenia twardych skał (głównie piaskowców drobnoziarnistych) naciskaczem nowej konstrukcji powstają niewielkie zagłębienia („kratery”) o głębokości 1-2 mm (rys.14).

Rysunek 15 przedstawia przebieg kruszenia próbki piaskowca naciskaczem nowej konstrukcji zarejestrowany przez przetwornik NVI_1301_02_EF podłączony do komputera PC. W jego wyniku powstał krater o głębokości 2 mm, a



Rys. 13. Spadki ciśnienia w układzie hydraulicznym penetrometru w funkcji czasu

Fig. 13. Hydraulic pressure drops in relation to time

spadek ciśnienia w układzie wyniósł 1 MPa, co jest zgodne z wynikami badań przygotowawczych. Widać również wahania ciśnienia spowodowane pompowaniem i spadki spowodowane zjawiskami opisanymi w rozdziale 6.

Na próbkach wyselekcjonowanych w badaniach penetrometrem wykonano 107 oznaczeń na prasie hydraulicznej. Rysunek 16 przedstawia przebieg kruszenia tej samej próbki piaskowca naciskaczami różnej konstrukcji. Można zauważyć około dwukrotną różnicę w ciśnieniach potrzebnych do skruszenia skały. Kratery powstałe podczas skruszenia próbki są podobnej wielkości, co podczas badania penetrometrem,

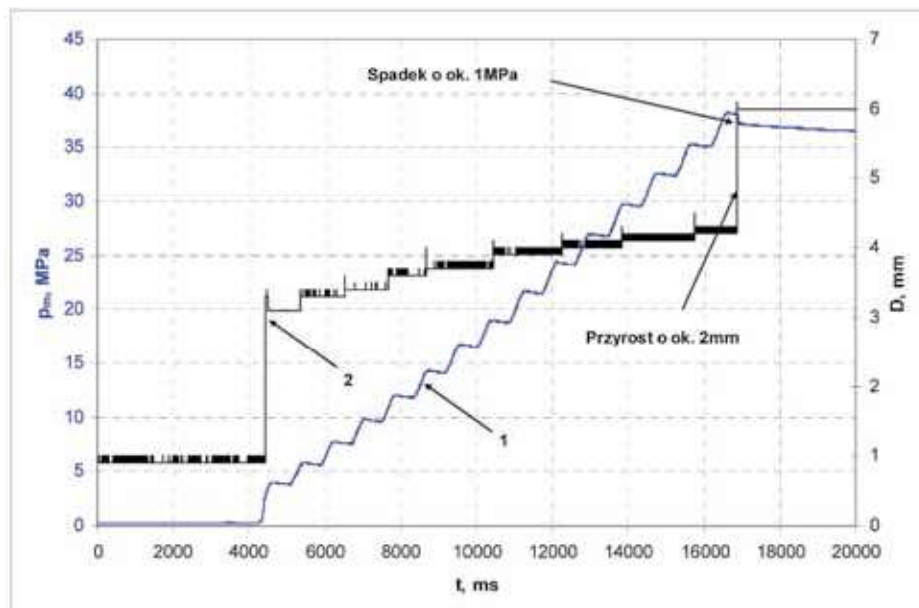
jednak ze względu na mniejszą pojemność układu hydraulicznego prasy oraz fakt, że połączenia hydrauliczne wykonane są sztywnymi przewodami, obserwowane spadki ciśnienia w układzie są znacznie większe, niż w przypadku penetrometru.

Na rysunku 17 przedstawiono naciskacze po próbach niszczących.

Dla oceny korelacji pomiędzy wynikami uzyskanymi za pomocą naciskacza o średnicy 5 mm i naciskacza o średnicy 3,5 mm przyjęto współczynnik dopasowania ciśnienia skruszenia skały „b” wyznaczony z zależności



Rys. 14. Zagłębienia („kratery”) na ścianie rdzenia po działaniu naciskacza
 Fig. 14. Holes („craters”) on rock core’s surface caused by the penetrometer spire



Rys. 15. Przebieg kruszenia skały naciskaczem nowej konstrukcji: 1 - ciśnienie w układzie hydraulicznym, 2 - wysuw naciskacza
 Fig. 15. Rock sample crushing process using modified penetrometer spire: 1 - hydraulic pressure, 2 - spire’s slide

$$b = \frac{P_{\max, f5}}{P_{\max, f3,5}} \quad (8)$$

gdzie:

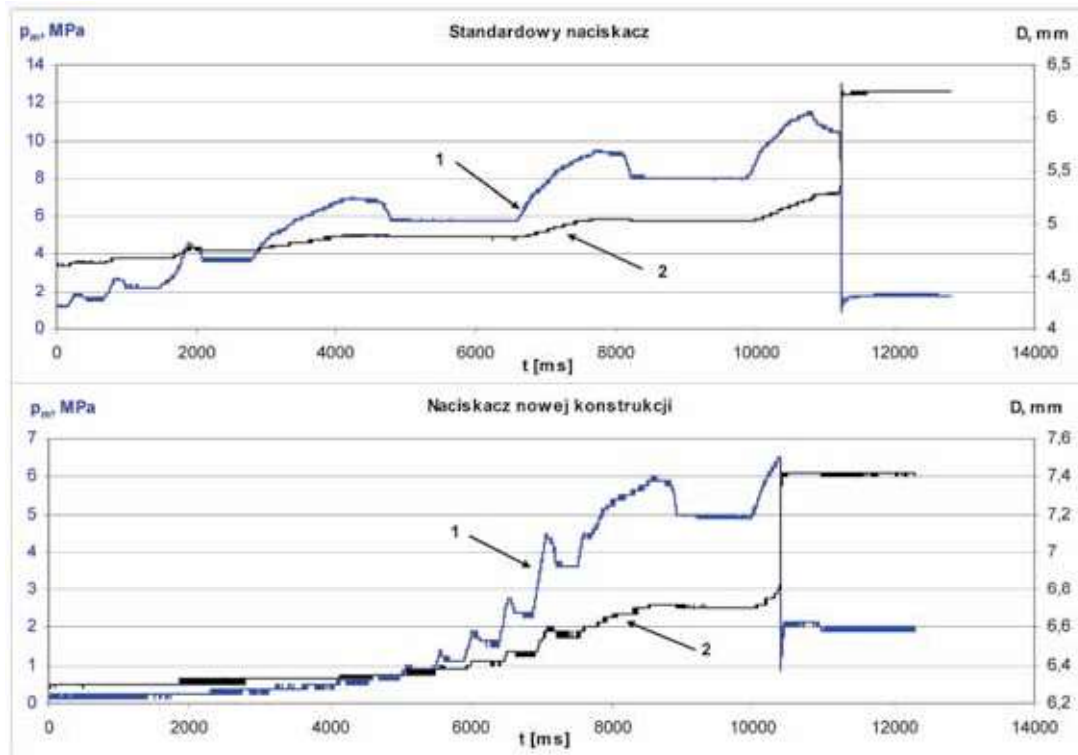
- $P_{\max, f5}$ – maksymalne ciśnienie powodujące skruszenie skały (materiału) przy stosowaniu naciskacza o średnicy 5 mm, MPa,
 $P_{\max, f3,5}$ – maksymalne ciśnienie powodujące skruszenie skały (materiału) przy stosowaniu naciskacza o średnicy 3,5 mm, MPa.

Założono ponadto, że współczynnik dopasowania ciśnienia skruszenia skały „b” spełnia następujące kryterium [2]

$$v = \frac{s}{x} \cdot 100\% \leq 10\% \quad (9)$$

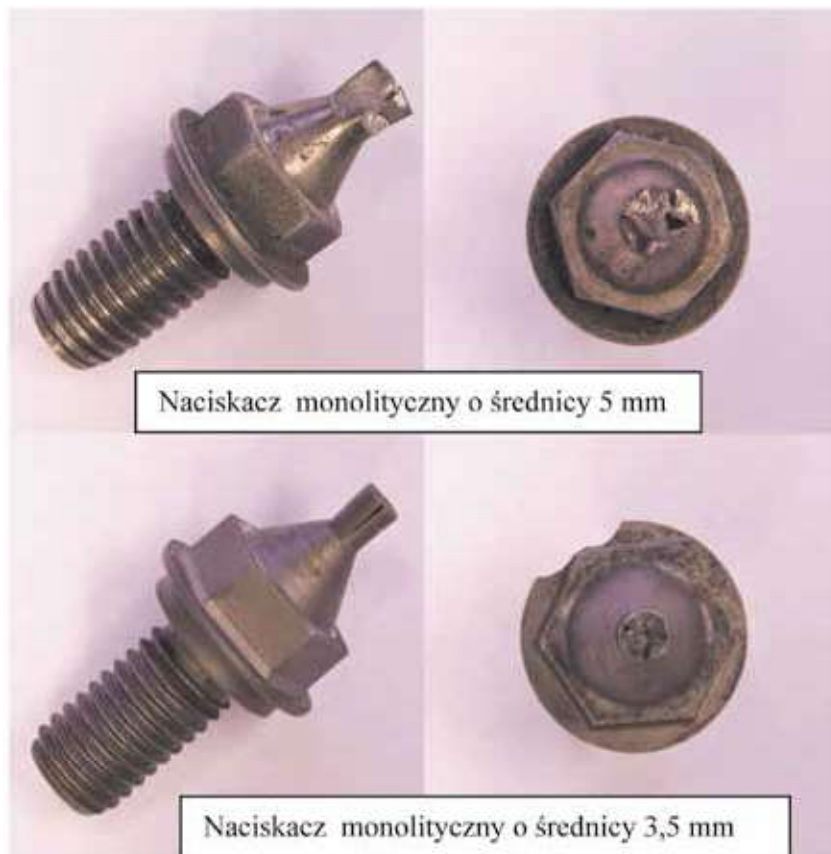
gdzie:

- v – współczynnik zmienności ciśnienia skruszenia skały „b”, %,
 s – odchylenie standardowe z próby,
 x – średnia arytmetyczna z próby.



Rys. 16. Kruszenie tej samej próbki naciskaczami różnej konstrukcji: 1 - ciśnienie w układzie hydraulicznym, 2 - wysuw naciskacza

Fig. 16. Process of crushing of the same rock sample using various types of penetrometer spires: 1 - hydraulic pressure, 2 - spire's slide



Rys. 17. Naciskacze po wykonaniu prób niszczących

Fig. 17. Spires after destructive testing

Uzyskano w ten sposób zbiór wyników (tab.1), który potraktowano jako próbę losową z populacji generalnej, dla której przeprowadzono analizę za pomocą programu Statistica (rys. 18).

Uzyskano następujące wyniki:

- średnia arytmetyczna: 2,000,
- przedział ufności przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$: (1,950-2,050),
- wartość minimalna współczynnika dopasowania: 1,790,
- wartość maksymalna współczynnika dopasowania: 2,350,
- wariancja: 0,016,
- odchylenie standardowe: 0,128,
- współczynnik zmienności: 6,4 %.

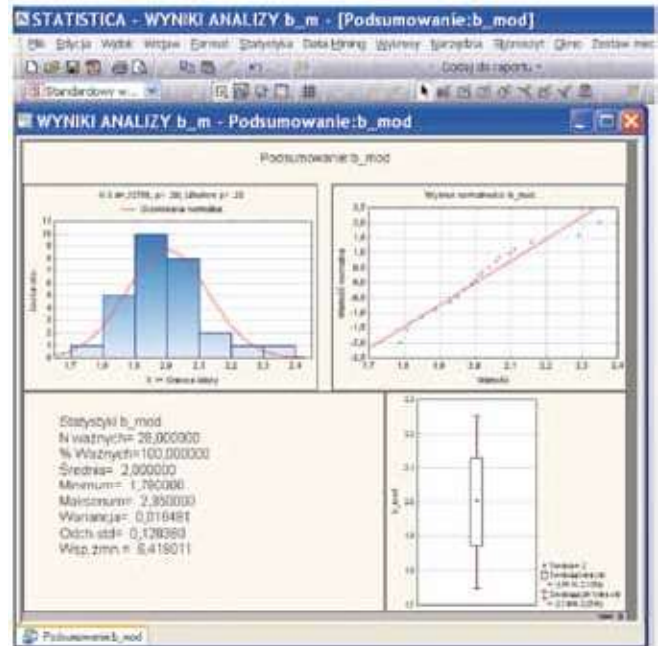
W celu zbadania wiarygodności otrzymanych wyników wyznaczono konieczną liczbę oznaczeń współczynnika dopasowania „b” przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$ i dokładności pomiaru ciśnienia $d=0,1$ MPa z zależności [3]

$$n_k = \frac{t_\alpha^2 \cdot S^2}{d^2} \quad (10)$$

gdzie:

- n_k – konieczna liczba pomiarów,
- t_α^2 – wartość krytyczna rozkładu t-Studenta dla danego stopnia istotności α i liczby stopni swobody r ,
- S^2 – wariancja z próby,
- d – dokładność pomiaru ciśnienia.

Po podstawieniu do wzoru (10) następujących danych [2]: $t_\alpha^2 = 2,900$, $S^2=0,016$ i $d=0,1$ uzyskano konieczną liczbę obserwacji wskaźnika dopasowania „b” wynoszącą $n_k = 5$. Z powyższego wynika, że liczba koniecznych obserwacji jest



Rys. 18. Podsumowanie badań statystycznych
Fig. 18. Summary of statistical research

mniejsza od rzeczywiście wykonanych ($n=28$), więc uzyskane wyniki można uznać za wiarygodne, przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$.

Tablica 1. Zestawienie wyników pomiarów współczynnika dopasowania „b”
Table 1. Summary of measurement results of affinity index “b”

Lp.	Numer rdzenia	Pmax,fi5	Pmax,fi3,5	b	Uwagi
1	48/P1	64,55	35,59	1,81	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
2	48/P1	8,59	4,54	1,89	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
3	48/P2	78,70	40,37	1,95	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
4	48/P2	9,79	4,86	2,02	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
5	58/P1P3	89,32	45,85	1,95	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
6	58/P1P3	11,50	5,73	2,01	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
7	58/P2	119,26	57,73	2,07	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
8	58/P2	14,04	6,65	2,11	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
9	55/P1	76,88	39,84	1,93	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
10	55/P1	8,75	4,38	2,00	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
11	55/P2	92,43	40,42	2,29	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
12	55/P2	11,44	4,86	2,35	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
13	65	73,35	41,06	1,79	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
14	65	9,46	5,11	1,85	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
15	66	70,75	35,93	1,97	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
16	66	9,59	4,69	2,04	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
17	67	72,18	36,71	1,97	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
18	67	11,10	5,44	2,04	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
19	68	76,36	38,33	1,99	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
20	68	11,48	5,56	2,06	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
21	69	102,26	48,66	2,10	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
22	69	13,94	6,46	2,16	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
23	70	74,54	39,2	1,97	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
24	70	9,79	4,80	2,04	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
25	71	80,89	41,82	1,93	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
26	71	10,00	5,00	2,00	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)
27	72	73,46	40,29	1,82	Badania za pomocą Pen206 (rys.10)
28	72	9,34	4,94	1,89	Badania za pomocą prasy hydr.(rys.8)

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwalają na przedstawienie następujących stwierdzeń:

1. Uzyskane w trakcie badań laboratoryjnych wyniki pozwalają stwierdzić, że wprowadzona modyfikacja konstrukcji naciskacza pozwala na badanie o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie powyżej 100 MPa.
2. Badania wykazały, że dla twardych skał „kratery” powstałe po skruszeniu są niewielkie. Z tej obserwacji oraz wyznaczonej charakterystyki penetrometru wynika, że przy kruszeniu twardych skał należy spodziewać się niewielkich zmian ciśnienia manometrycznego w układzie hydraulicznym penetrometru, co również zostało potwierdzone w badaniach. Zmiany te mają charakter bardzo szybki, rzędu kilku milisekund.
3. W celu zastosowania penetrometru do oznaczania wytrzymałości na ściskanie twardych skał należy na nowo określić kryteria rozpoznawania momentu skruszenia skały.
4. Dla pewności wykrywania momentu skruszenia skały korzystnie byłoby zmodyfikowanie układu hydraulicznego penetrometru tak, aby jak najmniej wpływał na pomiar ciśnienia. Przydatna byłaby również taka modyfikacja układu pomiarowego, by zdecydowanie szybciej mógł on reagować na zmiany położenia naciskacza.

Artykuł powstał w ramach realizacji pracy statutowej o numerze 11110255-140.

Literatura

1. *Bukowska M., Kidybiński A.*: Wpływ czynników naturalnych masywu skalnego na jego wytrzymałość określaną metodami penetrometryczną i laboratoryjną. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa 2002, nr 1.
2. *Bobrowski D.*: Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1986.
3. *Daniek J.*: Statystyka matematyczna dla potrzeb górnictwa. Skrypt szkoleniowy. Główny Instytut Górnictwa. Katowice 1977.
4. *Kidybiński A., Gwiazda J.*: Hydrauliczny penetrometr otworowy. Urząd Patentowy PRL, zgłoszenie P-162723. 1973.
5. *Kidybiński A., Gwiazda J., Hładysz Z.*: Ocena mechanicznych własności skał oraz stateczności górotworu hydraulicznym penetrometrem otworowym. Prace Głównego Instytutu Górnictwa. Seria Dodatkowa. Katowice 1976.
6. *Kidybiński A.*: Podstawy geotechniki kopalnianej. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1982.
7. *Nierobisz A., Masny W.*: Metoda obliczania wskaźnika szczelinowości RQD za pomocą badań hydraulicznym penetrometrem otworowym. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa 2004, nr 4.
8. Opracowanie i przygotowanie produkcji nowej generacji penetrometru otworowego do badań parametrów wytrzymałościowych skał dla potrzeb górnictwa. Projekt celowy NOT nr ROW-II-085/2006.
9. Penetrometr hydrauliczny PHI-00. Oferta handlowa. Zakład Budowy Urządzeń i Aparatury Naukowo-Doświadczalnej Sp. z o.o.
10. Penetrometr otworowy PO-27. Oferta handlowa. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Budownictwa Górniczego BUDOKOP.
11. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28.06.2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz.U. Nr 139 poz. 1169 oraz z 2006 r. Nr 124, poz. 863).
12. Zakład Budowy Urządzeń i Aparatury Naukowo-Doświadczalnej Sp. z o.o. Dokumentacja techniczna penetrometru otworowego PHI-09, PHI-09R.