

Jerzy Gawryś, Danuta Krzysztoń***

ANALIZA EMISJI AKUSTYCZNEJ ZAREJESTROWANEJ PODCZAS ŚCISKANIA PRÓBEK PIASKOWCA I WĘGLA

1. Wprowadzenie

Ściskanie próbek skalnych w sztywnej maszynie wytrzymałościowej prowadzono w jednoosiowym stanie naprężenia i w konwencjonalnym trójosiowym stanie naprężenia. Parametrem eksperymentu w jednoosiowym ściskaniu była zazwyczaj prędkość odkształcenia podłużnego próbki skalnej, a w trójosiowym stanie naprężenia — ciśnienie okólne. Celem badań było określenie wpływu parametru eksperymentu na przedkrytyczne i pokrytyczne własności mechaniczne skał. Wyniki uzyskanych badań odnoszono do zagadnień praktycznych, jak np. określenie wpływu prędkości odkształcenia na wskaźniki skłonności skał do tępiań [2] czy określenie nośności filarów oporowych w stanie pokrytycznym na podstawie trójosiowego ściskania karbońskich próbek skalnych [25].

Wieloletnie badania nad właściwościami typowych skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, prowadzone w Laboratorium Geomechaniki Górniczej Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach, wykazały, że w przypadku skał płonnych charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa w części pokrytycznej ma inny kształt niż w przypadku węgla.

W skałach płonnych charakterystyka opada w sposób ciągły do naprężenia resztkowego, natomiast w węglu występują cykliczne zmiany naprężenia charakteryzujące drgania cierne [12, 24].

Następne badania skoncentrowano nad pokrytycznymi własnościami skał w warunkach zmiennych prędkości odkształcenia i ciśnień okólnych [3]. W badaniach tych uwzględniono pomiar emisji akustycznej podczas ściskania próbek skalnych w całym zakresie charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej [13]. Parametrami eksperymentu były prędkość

* Główny Instytut Górnictwa, Katowice

** Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

odkształcenia podłużnego próbki skalnej o wartości rzędu 10^{-4} i 10^{-2} s^{-1} oraz ciśnienie okólne o wartości $p = 0, 10, 20, 30$ i 50 MPa .

Wyniki pomiarowe uzyskano w postaci wykresów całkowitej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej i rejestracji emisji akustycznej podczas całego procesu ściskania badanej próbki. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki uzyskane z badań piaskowca drobnoziarnistego i węgla. Aktywność akustyczną określono skumulowaną liczbą impulsów, a energię skumulowaną sumą kwadratów amplitud w odniesieniu do czasu trwania eksperymentu. Przeprowadzono również analizę widmową dla wybranych impulsów zarejestrowanych podczas ściskania próbek piaskowca i węgla, przy różnych wartościach ciśnienia okólnego i prędkości odkształcenia. W wyniku uzyskano interesujący efekt, że wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego i wzrostem prędkości odkształcenia aktywność akustyczna w piaskowcu wzrasta, podczas gdy w węglu ulega zmniejszeniu. Zaznacza się również większy wpływ prędkości odkształcenia niż ciśnienia okólnego na otrzymane wyniki.

2. Stanowisko pomiarowe i metodyka badań

Celem przeprowadzonych badań było zarejestrowanie zjawisk akustycznych zachodzących w cylindrycznych próbkach, o wymiarach: $\Phi = 30 \text{ mm}$ i $h = 60 \text{ mm}$, podczas ściskania w sztywnej maszynie wytrzymałościowej. Aparaturą rejestrującą była aparatura firmy duńskiej Bruel & Kjaer.

Do przetwarzania drgań wywołanych procesem pękania próbek w czasie ich jednoosiowego ściskania zastosowano piezoelektryczny przetwornik drgań typu 4343, oraz w przypadku ściskania trójosiowego czujniki typu 7374. Są to przetworniki (akcelerometry), w których napięcie na wyjściu jest proporcjonalne do wartości przyspieszenia drgań.

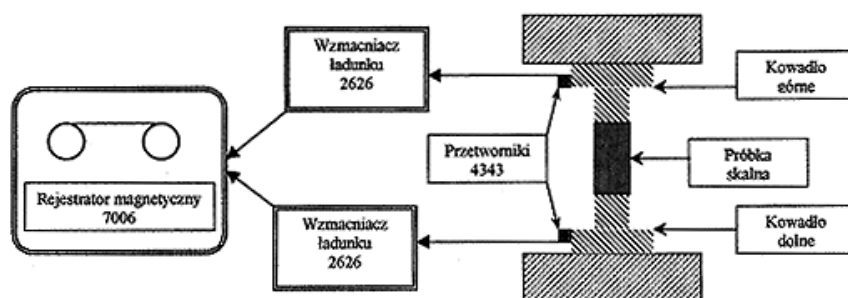
Badania prowadzono według schematów przedstawionych na rysunkach 1 i 2.

Stanowisko pomiarowe tworzyły następujące elementy:

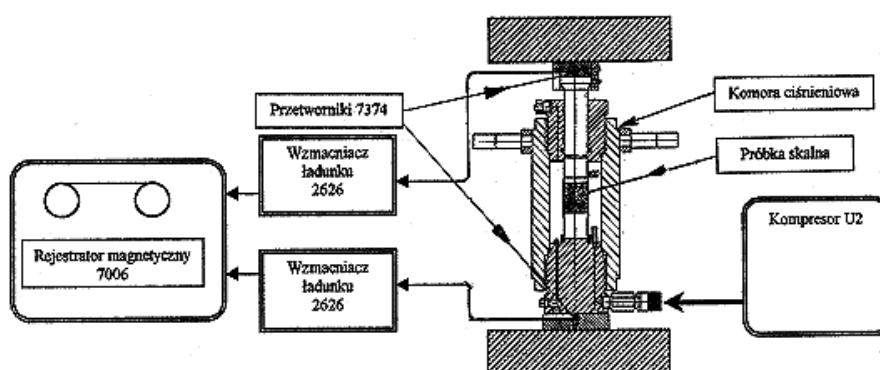
- maszyna wytrzymałościowa MTS-810 New wraz z konsolą sterującą połączoną z komputerem do automatycznej rejestracji przebiegów obciążenia w układzie: siła — przemieszczenie, czas;
- kowadła do mocowania przetworników i przenoszenia obciążenia na próbki w jednoosiowym ściskaniu;
- zestaw do badania próbek skalnych w trójosiowym ściskaniu, składający się z komory ciśnieniowej typu KTK i kompresora U2;
- aparatura do rejestracji zjawisk akustycznych, w jej skład wchodziły piezoelektryczne przetworniki (akcelerometry) drgań połączone elektrycznie ze wzmacniaczami ładunków typu 2626, które z kolei były połączone z wejściami dwóch kanałów rejestratora magnetycznego 7006.

Przebieg eksperymentu był następujący. Przy ciśnieniu okólnym 0 MPa (jednoosiowe ściskanie) próbkę umieszczano między płytami maszyny wytrzymałościowej za pośrednic-

twem kowadeł, do których były mocowane przetworniki drgań. Podczas ściskania trójosiowego próbkę zabezpieczoną przed kontaktem z olejem osłonkami gumowymi, uszczelkami i osłoną z tworzywa termokurczliwego, wkładano do komory wysokociśnieniowej, którą po napełnieniu olejem i zamknięciu ustawiano pomiędzy płytami obciążającymi maszyny wytrzymałościowej. Za pośrednictwem pompy wysokociśnieniowej zwiększano ciśnienie oleju w komorze do zadanej wartości ciśnienia okólnego, stabilizowanego podczas trwania eksperymentu. Zamocowane w górnej i dolnej części komory ciśnieniowej przetworniki drgań podłączano do wzmacniaczy ładunku. Eksperyment rozpoczynano po przygotowaniu za pośrednictwem konsoli sterującej maszyny wytrzymałościowej odpowiedniego programu obciążania próbki, uwzględniającego zadaną wartość prędkości przesuwu tłoka (prędkość odkształcenia podłużnego próbki). Podczas realizacji programu obciążania próbki skalnej, komputerowej rejestracji podlegał przebieg procesu obciążenia w układzie „siła — przemieszczenie, czas”, z jednoczesnym zapisem na taśmie rejestratora magnetycznego przebiegu zjawisk akustycznych w czasie trwania eksperymentu.



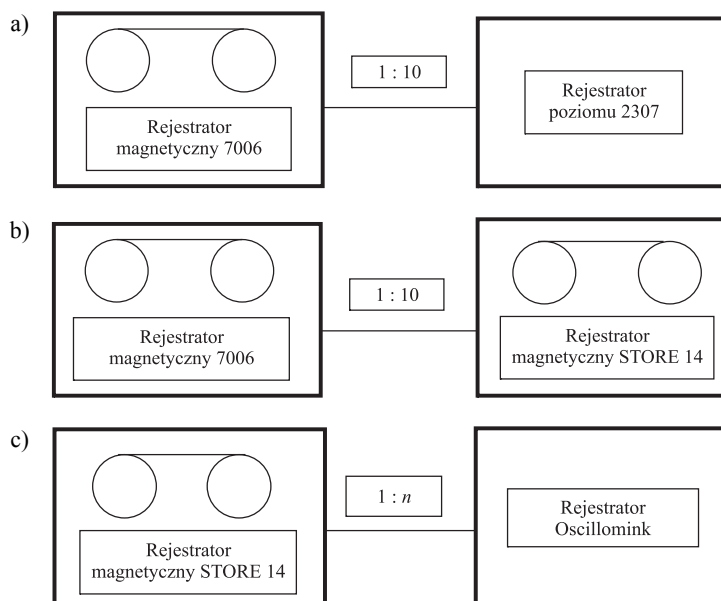
Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego do rejestracji emisji akustycznej podczas jednoosiowego ściskania



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego do rejestracji emisji akustycznej podczas trójosiowego ściskania

3. Aparatura do odtwarzania zjawisk akustycznych zachodzących w próbkach skalnych i opis wykresu rejestracji emisji akustycznej

Rysunek 3 przedstawia zestawy aparaturowe zastosowane do odtwarzania zarejestrowanych na taśmie magnetycznej zjawisk sejsmoakustycznych zachodzących w czasie ściskania i pęknięcia próbek skalnych [26].



Rys. 3. Zestawy aparaturowe do odtwarzania zapisów z taśmy magnetycznej
Objaśnienia w tekście

Zestawy te składają się z trzech układów.

- Układ do przepisywania całego procesu ściskania próbki z 10-krotną transformacją prędkości na rejestratorze poziomym za pomocą szafirowego rysika na papierze woskowanym (rys. 3a).
- Układ do przegrywania wybranych odcinków zapisów, w tym również pojedynczych impulsów, na drugi rejestrator magnetyczny, przy zastosowaniu 10-krotnej transformacji prędkości, w celu późniejszego dokładnego odtworzenia zarejestrowanego zjawiska (rys. 3b).
- Układ do przepisywania wybranych odcinków zapisu w tym również pojedynczych impulsów na rejestratorze Oscillomink z n -krotną transformacją prędkości odtwarzania. W efekcie otrzymuje się $10 - n$ razy zwolniony przebieg w stosunku do czasu rzeczywistego. Przy odtwarzaniu zapisów stosowano $n = 8, 16, 32$ oraz 64 (rys. 3c).

Na podstawie przeprowadzonej próbnej serii eksperymentalnej [26] dobrano najbardziej optymalną czułość kanałów pomiarowych wynoszącą 0,1 V/g. Czułość ta jest wystarczająca do rejestracji zjawisk do momentu intensywnego pęknięcia próbki, natomiast sam proces rozpadu próbki powoduje przesterowanie kanałów, mimo 50 dB dynamiki.

Przed przystąpieniem do pomiarów obydwa kanały aparatury rejestrującej zostały skalibrowane za pomocą wzorcowego wzbudnika drgań.

Zjawiska akustyczne zachodzące w czasie całego procesu ściskania próbek skalnych rejestrowano na dwóch kanałach rejestratora magnetycznego. Zarejestrowane na taśmie magnetycznej zjawiska odtwarzano następnie na rejestratorze poziomym (schemat blokowy aparatury przedstawiony na rys. 3b), uzyskując zapis zarejestrowanych przebiegów na papierze woskowanym. Każde zjawisko akustyczne zapisane jest w postaci pionowej kreski o wysokości zależnej od amplitudy sygnału. Skala pozioma jest skalą logarytmiczną. Odległość między dwoma sąsiednimi liniami wynosi 10 dB. Cała skala zapisu na rejestratorze poziomym wynosi 50 dB. Oś pozioma jest osią czasu. Długość zapisu, poprzez odpowiednie ustawienie prędkości przesuwu papieru w rejestratorze poziomym oraz końcowe powiększenie lub pomniejszenie otrzymanego zapisu, dostosowano do długości wykresu uzyskanego z maszyny wytrzymałościowej. Duża liczba zjawisk akustycznych zachodzących w procesie ściskania próbek wykreślona na krótkim odcinku papieru w czasie dochodzącym do kilkuset sekund spowodowała zaciemnienie rysunków.

Charakter uzyskanych zapisów (np. zmiany amplitudy oraz zagęszczenie zapisów) daje jednak ogólne wyobrażenie o liczbie i amplitudzie zjawisk emisji akustycznej. Silniejsze odprężenia zachodzące w próbkach zaznaczone są na wykresie w postaci impulsów o wysokiej amplitudzie.

Wykresy rejestracji emisji akustycznej umieszczono pod odpowiadającym im komputerowymi wykresami ściskania próbki otrzymanymi z maszyny wytrzymałościowej.

W niektórych próbkach nie zarejestrowano wyraźnych silniejszych zjawisk akustycznych. Powodem może być albo zbyt niskie pasmo aparatury rejestrującej, lub raczej, próbka emituje ogromną liczbę małych impulsów akustycznych przypuszczalnie na skutek zaciskania się szczelin, które w efekcie składają się na „szum akustyczny” [26].

4. Sposób interpretacji zapisów zjawisk akustycznych

Pochodzenie emisji akustycznej w skałach jest ściśle związane z procesami odkształceń mechanicznych. Proces ściskania próbek skalnych można ogólnie podzielić następująco [21]:

1. Proces zamykania mikropęknięć początkowych w skale.
2. Sprężyste odkształcanie się skały.
3. Rozpoczęcie procesu niszczenia skały.
4. Zaawansowany proces niszczenia skały, stabilna propagacja mikropęknięć.
5. Niestabilna propagacja pęknięć prowadząca do zniszczenia próbki.

Podział ten odpowiada różnym stadiom deformacji przedkrytycznej (wg Pinińskiej [22]):

1. Deformacja nieliniowa.
2. Deformacja liniowa.
3. Inicjalne pękanie.
4. Deformacja nieliniowa ze stabilnym pękaniem.
5. Niestabilne pękanie.

Dodatkowo wprowadza się jeszcze:

6. Stadium stanu pokrytycznego [22] lub rezydualnego [6].

Procesowi zamykania mikropęknięć towarzyszy zjawisko emisji akustycznej w postaci „szumu akustycznego”, stopniowo narastającego do pewnej wartości wraz ze wzrostem naprężenia. Powstanie silniejszego odprężenia może powodować zmniejszenie poziomu szumu akustycznego. W szumie mogą być ukryte impulsy pochodzące z odprężeń, co obserwuje się w niektórych badanych próbkach. Zidentyfikowanie takich impulsów wymaga dokładniejszego odtworzenia wybranych fragmentów rejestracji, np. przez rozciągnięcie w czasie, lub dokonanie analizy częstotliwościowej wybranych odcinków rejestracji.

W skałach o wysokiej wytrzymałości (np. piaskowce drobnoziarniste) nie zawsze występują wyraźne odprężenia. Zapis akustyczny w postaci „szumu” może utrzymywać się aż do czasu zniszczenia próbki. Procesowi zniszczenia próbki z reguły zawsze towarzyszy wystąpienie silnych odprężeń.

W skałach o małej wytrzymałości (np. piaskowiec gruboziarnisty) często proces zamykania się szczelin nie jest uwidoczny, ponieważ już przy małych obciążeniach następuje proces pękania próbki. Wysoka aktywność akustyczna, czyli liczba impulsów w jednostce czasu pojawia się praktycznie od samego początku ściskania. W zapisie objawia się to w postaci impulsów o wysokiej amplitudzie znacznie przewyższających poziom szumu akustycznego.

5. Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarowe przedstawiają wykresy całego procesu ściskania próbki skalnej w sztywnej maszynie wytrzymałościowej wraz z rejestracją emisji akustycznej. Wykresy przebiegu emisji akustycznej umieszczano pod komputerowymi wykresami uzyskanymi z maszyny wytrzymałościowej.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki uzyskane z badań piaskowca drobnoziarnistego i węgla.

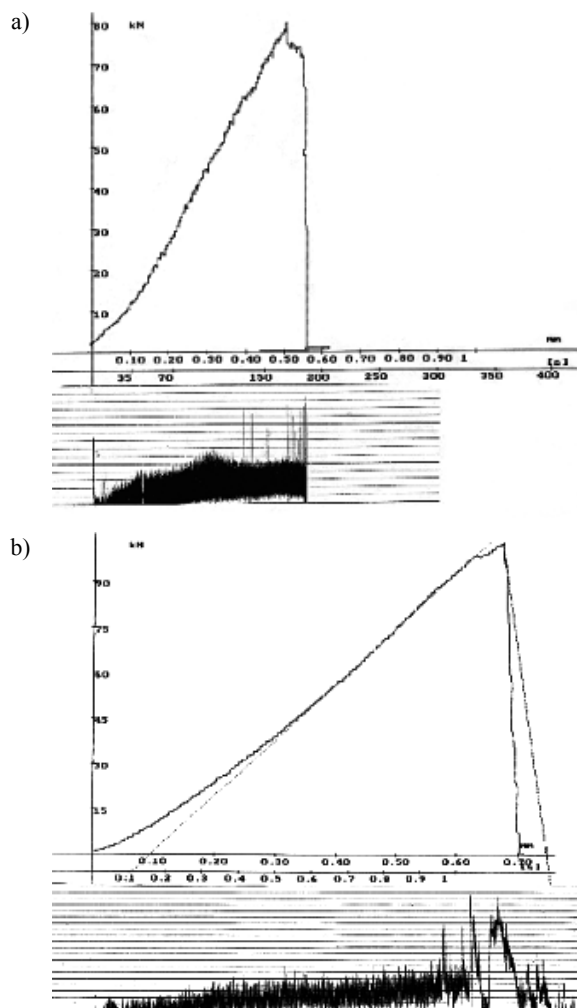
5.1. Piaskowiec drobnoziarnisty

Próbki ściskane jednoosiowo ($p = 0$)

Prędkość odkształcenia 10^{-4} s^{-1} — próbka 1/1.

Prędkość odkształcenia 10^{-2} s^{-1} — próbka 1/2b.

Przykładowo przedstawiono wykresy dla próbek 1/1 i 1/2b (rys. 4).



Rys. 4. Wykres jednoosiowego ściskania próbki piaskowca i rejestracja aktywności akustycznej:
a) $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ — próbka 1/1; b) $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ — próbka 1/2b

Przyjmując poziom zapisu akustycznego na początku ściskania (w chwili $t = 0$) za poziom szumów własnych układu pomiarowego, można oszacować, jak kształtowała się aktywność akustyczna w czasie całego procesu ściskania.

W próbce 1/1 (rys. 4a) w początkowej fazie ściskania pojawia się pewna liczba impulsów przekraczających poziom szumu o około $6 \div 8 \text{ dB}$. Następne impulsy o wyższej amplitudzie pojawiają się przy obciążeniu 60 kN , co stanowi $0,75$ maksymalnego obciążenia. Większa aktywność występuje w ostatniej fazie procesu ściskania przy obciążeniu 80 kN . Występują tu impulsy

sy o wysokiej amplitudzie. Na krzywej ściskania uwidocznione to jest nagłym spadkiem obciążenia o około 5 kN, następnie dalszym stopniowym spadkiem i rozpadem próbki.

Na ogół każdemu większemu impulsowi sejsmoakustycznemu towarzyszy spadek przyrostu obciążenia lub wręcz spadek obciążenia. Jest to wyraźnie uwidocznione w przebiegu krzywej obciążenia w próbce 1/1, oraz obserwowane w próbkach, dla których ciśnienie okólne jest różne od zera. Amplituda szumu akustycznego dla piaskowców drobnoziarnistych wzrasta praktycznie od momentu rozpoczęcia procesu ściskania aż do przejścia w fazę odkształceń sprężystych, w czasie których utrzymuje się w przybliżeniu na jednakowym poziomie lub po osiągnięciu pewnej wartości maksymalnej, następuje spadek o około 3÷4 dB i utrzymywanie się na tym poziomie do końca procesu ściskania (próbka 1/1).

Przy dużych prędkościach odkształcenia (próbka 1/2b — rys. 4b) eksperyment trwał około 1,2 s. Z postępowaniem procesu ściskania następuje stopniowy wzrost szumu akustycznego. Impulsy akustyczne o wyższej amplitudzie pojawiają się przy obciążeniu zbliżonym do obciążenia krytycznego. W próbce 1/2b silne odprężenia wystąpiły przy obciążeniu 100 kN, po których nastąpił spadek prędkości przyrostu obciążenia, a później rozpad próbki. Impulsy o wysokiej amplitudzie wystąpiły przed samym rozpadem próbki. Od samego początku procesu ściskania następował stopniowy wzrost poziomu szumu akustycznego.

Próbki ściskane trójosiowo

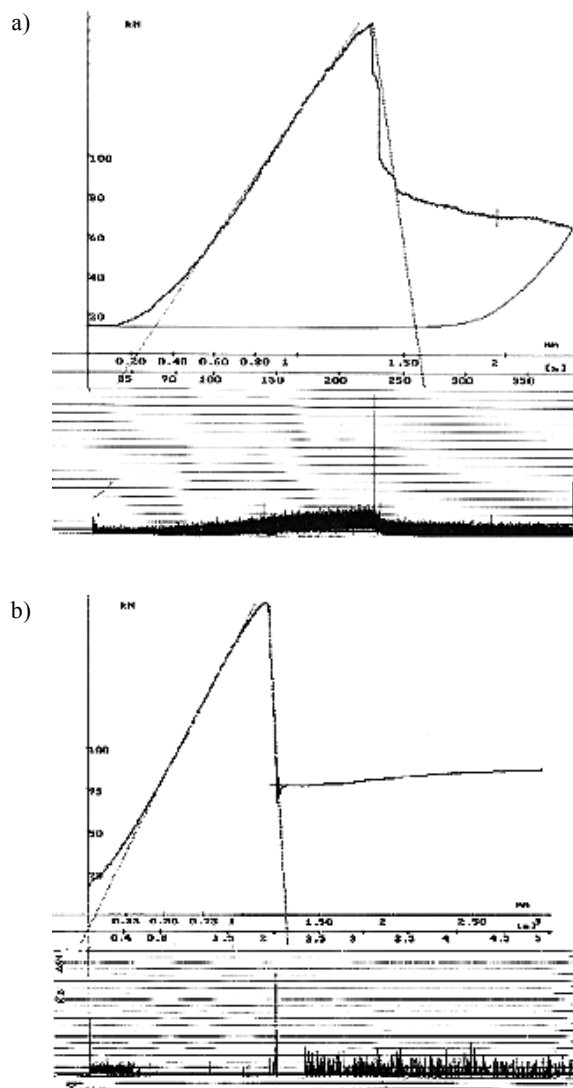
W przypadku próbek ściskanych trójosiowo czas eksperymentu zależy od wartości ciśnienia okólnego. Przy wzroście ciśnienia okólnego w zakresie od 10 do 50 MPa czas trwania eksperymentu dla próbek piaskowca wzrasta od 300 do 600 s przy prędkości odkształcenia 10^{-4} s^{-1} oraz od 2 do 8 s przy prędkości odkształcenia 10^{-2} s^{-1} .

W próbkach piaskowca ściskanych z prędkością odkształcenia 10^{-4} s^{-1} obserwowano następujące przebiegi emisji akustycznej:

- Emisja nie występowała do czasu maksymalnego obciążenia. W chwili osiągnięcia maksymalnego obciążenia nastąpiło silne odprężenie do wartości ok. 50% maksymalnego obciążenia, sygnalizowane impulsem o amplitudzie przekraczającej 40 dB. W dalszym procesie ściskania obciążenie utrzymywało się przez pewien czas na jednakowym poziomie przy wzmożonej aktywności akustycznej (amplituda impulsów była poniżej wartości 6 dB), a następnie nastąpił rozpad próbki, któremu towarzyszył impuls akustyczny o amplitudzie 12 dB ponad poziom szumu.
- Szum akustyczny rejestrowany jest od początku eksperymentu do maksymalnego obciążenia, przy którym występuje silne odprężenie i spadek szumu (rys. 5a).
- Przy liniowym wzroście obciążenia występuje mała aktywność akustyczna, która ulega zwiększeniu w pobliżu punktu przegięcia charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej.

Zwiększenie prędkości odkształcenia próbek piaskowca spowodowało wyraźne zwiększenie aktywności akustycznej zarówno w fazie sprężystego odkształcenia, jak i w fazie rozpadu próbki.

Przykładowo załączono wykresy trójosiowego ściskania próbek piaskowca (rys. 5), gdy ciśnienie okólne wynosiło 20 MPa, a prędkość odkształcenia podłużnego była równa 10^{-4} s^{-1} (rys. 5a) i 10^{-2} s^{-1} (rys. 5b).



Rys. 5. Wykres trójosiowego ściskania próbek piaskowca ($p = 20 \text{ MPa}$) i rejestracja aktywności akustycznej: a) $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ — próbka 20/1; b) $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ — próbka 20/4

W procesie ściskania piaskowców drobnoziarnistych występuje z reguły mała liczba impulsów o amplitudzie przekraczającej poziom szumu akustycznego.

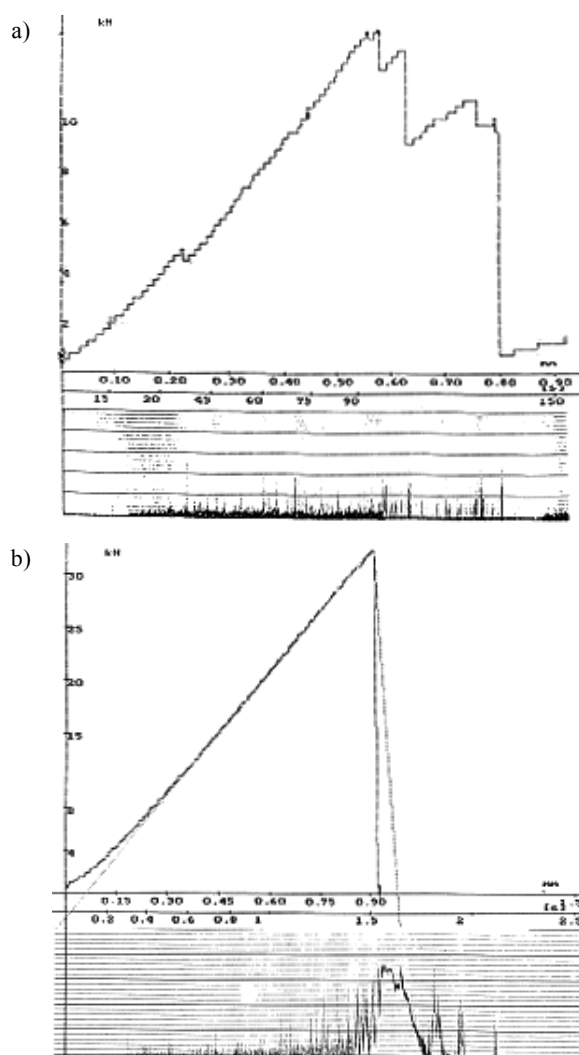
5.2. Węgiel

Próbki ściskane jednoosiowo ($p = 0$)

Prędkość odkształcenia 10^{-4} s^{-1} — próbka 0/1.

Prędkość odkształcenia 10^{-2} s^{-1} — próbka 4/1b.

Wykresy jednoosiowego ściskania próbek węgla i rejestracji emisji akustycznej przedstawia rysunek 6, dla prędkości odkształcenia 10^{-4} s^{-1} (rys. 6a) i prędkości odkształcenia 10^{-2} s^{-1} (rys. 6b).



Rys. 6. Wykres trójosiowego ściskania próbek węgla ($p = 0 \text{ MPa}$) i rejestracji aktywności akustycznej:
a) $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ — próbka 0/1; b) $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ — próbka 4/1b

W obydwu próbkach 0/1 i 4/1b przebieg aktywności akustycznej w czasie procesu ściskania przedstawia się niemal identycznie. Od samego początku eksperymentu następuje stopniowy wzrost aktywności akustycznej oraz amplitudy impulsów wraz ze wzrostem obciążenia. W próbce 0/1 przy obciążeniu 5 kN impuls o amplitudzie 25 dB powyżej poziomu szumów, powoduje mały spadek obciążenia. Dalszy proces ściskania powoduje narastanie obciążenia, aż do wartości maksymalnej 14 kN, przy utrzymywaniu się wysokiej aktywności akustycznej. Serie impulsów o wysokiej amplitudzie powodują kolejne spadki obciążenia najpierw o około 2 kN, a następnie o 4 kN. Po każdym spadku następuje pewien wzrost obciążenia, wyzwalając kolejne impulsy o wysokiej amplitudzie, doprowadzając w końcu do zniszczenia próbki.

W próbce 4/1b liniowe narastanie obciążenia utrzymywało się przez cały proces ściskania, aż do rozpadu próbki, przy stopniowo narastającej wysokiej aktywności i amplitudzie impulsów akustycznych.

Próbki ściskane trójosiowo

W próbkach ściskanych trójosiowo obserwuje się niższą aktywność akustyczną niż w próbkach ściskanych jednoosiowo.

W badaniach eksperymentalnych prowadzonych z prędkością odkształcenia 10^{-4} s^{-1} obserwowano następujące zjawiska:

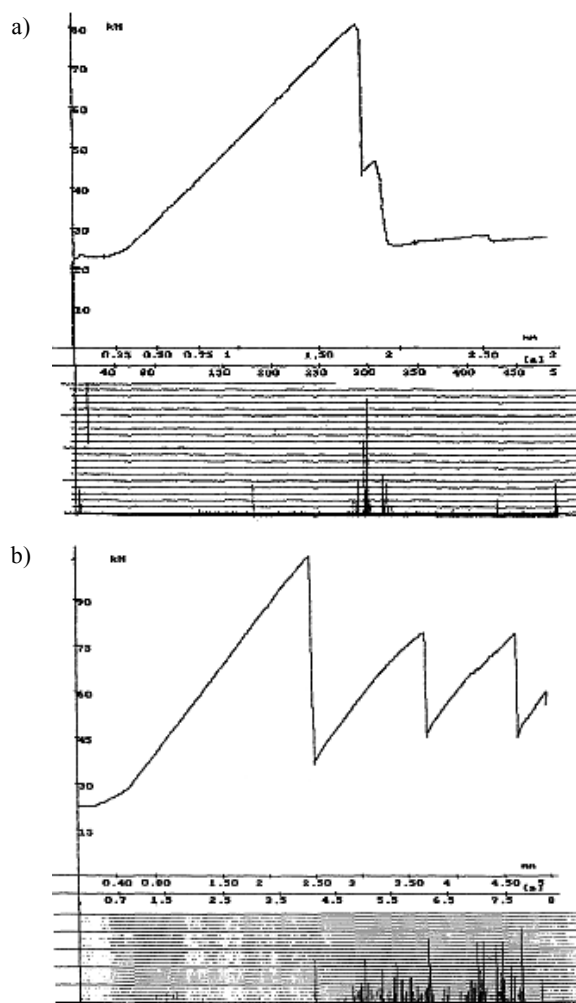
- Przy ciśnieniu okólnym równym 10 MPa wzrost aktywności akustycznej występuje w pobliżu 0,6 obciążenia niszczonego, amplituda impulsów przekracza poziom szumów średnio o 10 dB.
- Przy wyższych ciśnieniach okólnych (20, 30, 50 MPa) w zakresie liniowego wzrostu obciążenia nie rejestruje się zwiększonej aktywności akustycznej, z wyjątkiem kilku pojedynczych impulsów. Po osiągnięciu maksymalnego obciążenia występuje wysoka aktywność, w której impulsy o poziomie ponad 40 dB powodują kolejne spadki obciążenia i utrzymywanie się podwyższonej aktywności do końca procesu ściskania. W części pokrytycznej nie stwierdza się podwyższonej aktywności z wyjątkiem kilku pojedynczych impulsów.

Przy większej prędkości odkształcenia równej 10^{-2} s^{-1} wysoka aktywność akustyczna występuje po osiągnięciu maksymalnego obciążenia i dalej zmienia się cyklicznie wraz z kolejnymi wzrostami i spadkami obciążenia.

W przypadku węgla wykresy trójosiowego ściskania znacznie się różnią dla różnych prędkości odkształcenia próbki. Przykładowo przedstawiono wyniki badań dla próbki ściskanej z prędkością odkształcenia 10^{-4} s^{-1} (rys. 7a) i z prędkością odkształcenia 10^{-2} s^{-1} (rys. 7b).

Dla większej prędkości odkształcenia (rys. 7b) występują cykliczne zmiany siły pokrytycznej, które mogą wynikać z tarcia ciernego pokruszonego węgla. W rejestracji akustycznej w części przedkrytycznej charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych występuje kilka impulsów o amplitudzie równej kilku dB. Dopiero przy osiągnięciu granicy wytrzy-

małości liczba impulsów szybko wzrasta, a ich amplituda osiąga wartości przekraczające 30 dB. W części pokrywającej charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych węgla występuje duża ilość impulsów, których amplituda przewyższa wartość 10 dB.



Rys. 7. Wykres trójosiowego ściskania próbek węgla ($p = 30$ MPa) i rejestracji aktywności akustycznej: a) $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ — próbka 30/1; b) $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ — próbka 30/2

Większość impulsów o amplitudzie przekraczającej 10 dB daje się przyporządkować widocznym spadkom obciążenia (odprężeniom) na charakterystyce naprężeniowo-odkształceniowej. Impulsy o największych wartościach amplitudy na wszystkich charakterystykach naprężeniowo-odkształceniowych występują w chwili przekraczania granicy wytrzymałości [20, 22].

6. Skumulowana liczba impulsów i skumulowana suma kwadratów amplitud

Zjawiska akustyczne zarejestrowane na taśmie magnetycznej zostały przetworzone za pomocą algorytmu detekcji Allena według opracowanego programu komputerowego dla wczytania przebiegów akustycznych z taśmy do komputera [27].

Na podstawie tego programu dla każdego eksperymentu zapisanego na taśmie magnetycznej rejestratora wyodrębniono (zliczono) wszystkie impulsy akustyczne przekraczające poziom szumów, oraz odpowiadające im wartości maksymalnej amplitudy. Obliczono również energie impulsów w jednostkach umownych jako kwadrat maksymalnej amplitudy.

Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach skumulowanej sumy impulsów i skumulowanej sumy kwadratów amplitud w odniesieniu do czasu trwania eksperymentu.

Przykładowo przedstawiono uzyskane wykresy dla piaskowca drobnoziarnistego:

- próbka 1/1 $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $p = 0 \text{ MPa}$, czas eksperymentu = 200 s (rys. 8a);
- próbka 20/4 $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $p = 20 \text{ MPa}$, czas eksperymentu = 5,0 s (rys. 8b).

Analogiczne wykresy dla próbek węgla przedstawia rysunek 9:

- próbka 0/1 $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $p = 0 \text{ MPa}$, czas eksperymentu = 200 s (rys. 9a);
- próbka 20/2 $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $p = 20 \text{ MPa}$, czas eksperymentu = 5,0 s (rys. 9b).

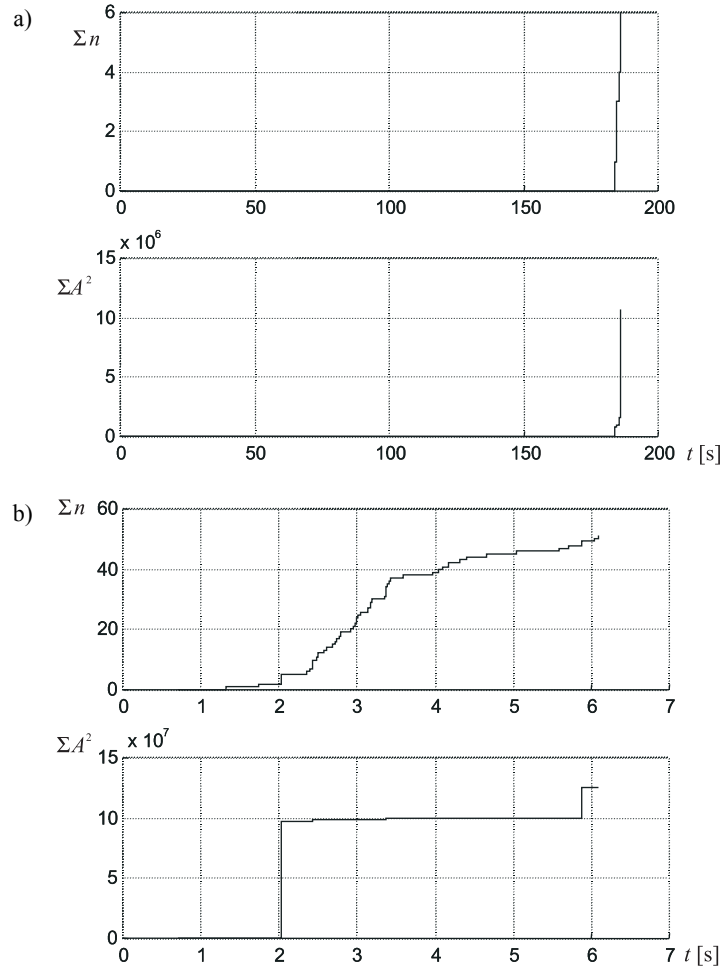
W przypadku jednoosiowego ściskania próbki 1/1 z prędkością odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (rys. 8a) podczas całego eksperymentu trwającego 200 sekund zarejestrowano tylko sześć impulsów akustycznych, które pojawiły się w chwili osiągnięcia przez obciążenie wartości krytycznej.

Natomiast w procesie trójosiowego ściskania próbki 20/4 z prędkością odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (rys. 8b), zachodzącego w czasie 6 sekund, impulsy akustyczne występowały już w pierwszej sekundzie eksperymentu i liczba ich wzrastała, osiągając na końcu eksperymentu skumulowaną liczbę 49 impulsów.

Wykresy skumulowanej sumy kwadratów amplitud emisji akustycznej odpowiadają wykresom skumulowanej liczby impulsów, jednakże wartości na końcu eksperymentu znacznie się różnią. W przypadku jednoosiowego ściskania, przy prędkości odkształcenia próbki 10^{-4} s^{-1} (próbka 1/1), końcowa wartość skumulowanej energii umownej wynosi $11 \cdot 10^6$, natomiast trójosiowe ściskanie ($p = 20 \text{ MPa}$) próbki 20/4, przy prędkości odkształcenia 10^{-2} s^{-1} , wywołuje emisję akustyczną o wartości energii równej $13 \cdot 10^7$ jednostek umownych.

Na ogół dla małej prędkości odkształcenia próbki ściskanej jednoosiowo przyrost liczby impulsów występuje dopiero w stadium krytycznym obciążenia.

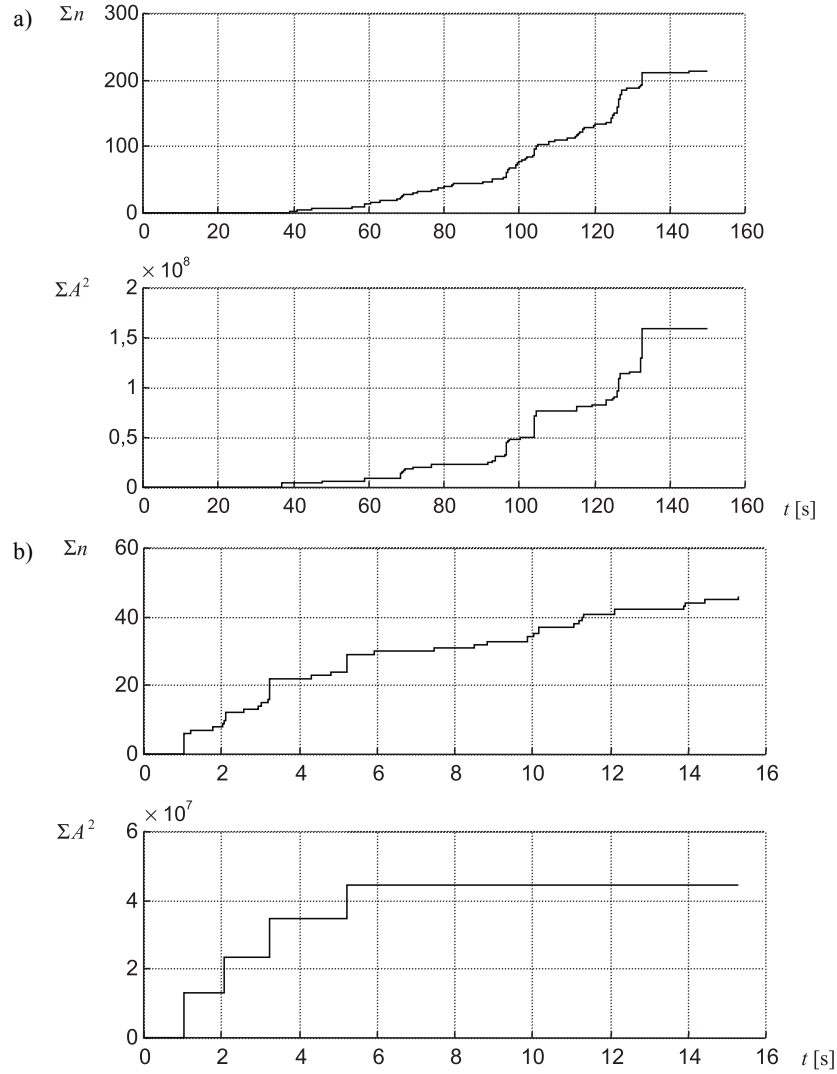
Natomiast dla próbek ściskanych w trójosiowym stanie naprężenia, przy dużym ciśnieniu okólnym i dużej prędkości odkształcenia, impulsy (zjawiska akustyczne) występują praktycznie w całym zakresie obciążenia, a ich liczba wzrasta zarówno ze wzrostem prędkości obciążenia, jak i ze wzrostem ciśnienia okólnego. Podobny przebieg mają skumulowane sumy kwadratów amplitud, jednakże występują różnice w wartościach skumulowanej energii.



Rys. 8. Skumulowana liczba impulsów i skumulowana suma kwadratów amplitud emisji dla próbki piaskowca: a) próbka 1/1 ściskana jednoosiowo przy prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; b) próbka 20/4 ściskana trójosiowo ($p = 20 \text{ MPa}$) przy prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

W przypadku jednoosiowego ściskania próbki węgla (rys. 9a) emisja akustyczna rejestrowana jest podczas całego eksperymentu, począwszy od ok. 40% obciążenia krytycznego. Wzrost prędkości odkształcenia wpływa na wzrost zakresu występowania emisji akustycznej, która rejestrowana jest zarówno w części przedkrytycznej, jak i pokrytycznej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej (rys. 9b).

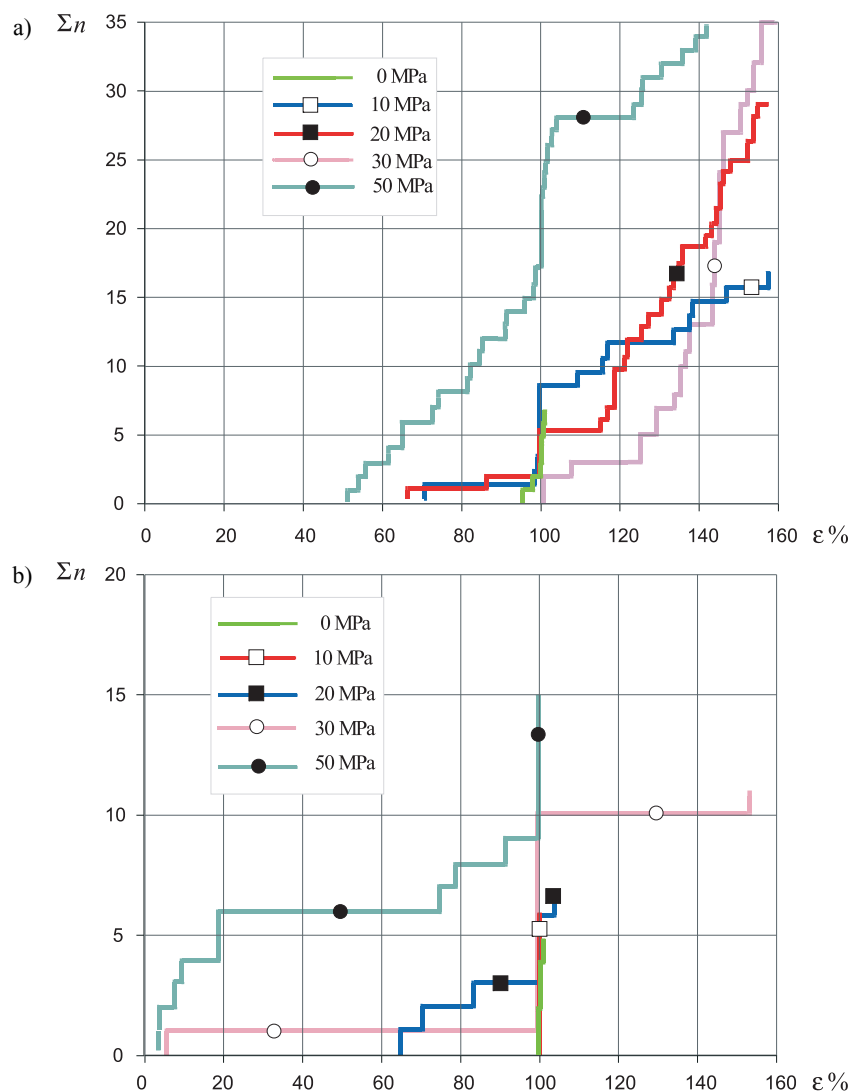
Skumulowane wartości impulsów i umownej energii można odnosić również do odkształcenia próbki przy założeniu, że 100% odkształcenia odpowiada wartości krytycznej obciążenia [8]. Wówczas analiza przejawów emisji akustycznej jest odnoszona do odkształcenia krytycznego.



Rys. 9. Skumulowana liczba impulsów i skumulowana suma kwadratów amplitud emisji dla próbki węgla: a) próbka 0/1 ściskana jednoosiowo przy prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; b) próbka 20/2 ściskana trójosiowo ($p = 20 \text{ MPa}$) przy prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

Na rysunku 10 przedstawiono skumulowaną liczbę impulsów dla różnych wartości ciśnienia okólnego ($p = 0, 10, 20, 30, 50 \text{ MPa}$) dla próbek piaskowca, dla których prędkość odkształcenia wynosiła:

- $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (rys. 10a),
- $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (rys. 10b).



Rys. 10. Skumulowana liczba impulsów dla próbek piaskowca dla różnych wartości ciśnienia okólnego ($p = 0, 10, 20, 30, 50$ MPa): a) prędkość odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; b) prędkość odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

Piaskowiec (prędkość odkształcenia rzędu 10^{-4} s^{-1} — rys. 10a)

Dla ciśnienia okólnego 0 MPa (jednoosiowe ściskanie) zarejestrowano tylko pięć impulsów przy przekraczaniu granicy wytrzymałości próbki. Wzrost ciśnienia okólnego do 20 MPa powodował, że pierwsze impulsy rejestrowano przy 65% odkształcenia krytycznego, a przy ciśnieniu okólnym 50 MPa pojawiały się już na początku obciążania. Praktycznie

przejawy emisji zanikały po przekroczeniu odkształcenia krytycznego. Liczba impulsów ze wzrostem ciśnienia okólnego wzrastała, dochodząc do 15 przy ciśnieniu okólnym 50 MPa (rys. 10a — dla pięciu wartości ciśnienia okólnego). Praktycznie cała energia wyzwalała się przy odkształceniu krytycznym.

Piaskowiec (prędkość odkształcenia rzędu 10^{-2} s^{-1} — rys. 10b)

Przy małej wartości ciśnienia okólnego emisja uwidaczniała się na granicy wytrzymałości próbki. Wzrost ciśnienia okólnego powodował, że przejawy emisji obserwowano przy wartościach odkształcenia niższych od krytycznego, a przy ciśnieniu okólnym o wartości 50 MPa pierwsze impulsy rejestrowano przy 65% odkształcenia krytycznego. Również liczba impulsów (liczona do 150% odkształcenia krytycznego) ze wzrostem ciśnienia okólnego wzrastała od 7 przy $p = 0$ MPa, do 35 przy $p = 50$ MPa (rys. 10b — dla pięciu wartości ciśnienia okólnego).

Po przekroczeniu odkształcenia krytycznego również obserwowano emisję akustyczną, gdzie liczba impulsów wzrastała ze wzrostem ciśnienia okólnego.

W przypadku próbek węgla skumulowane wartości liczby impulsów i sumy kwadratów amplitudy mają inny przebieg niż dla skał płonnych.

Na rysunku 11 przedstawiono uzyskane wykresy dla próbek węgla, dla których prędkość odkształcenia wynosiła:

— $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (rys. 11a),

— $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (rys. 11b).

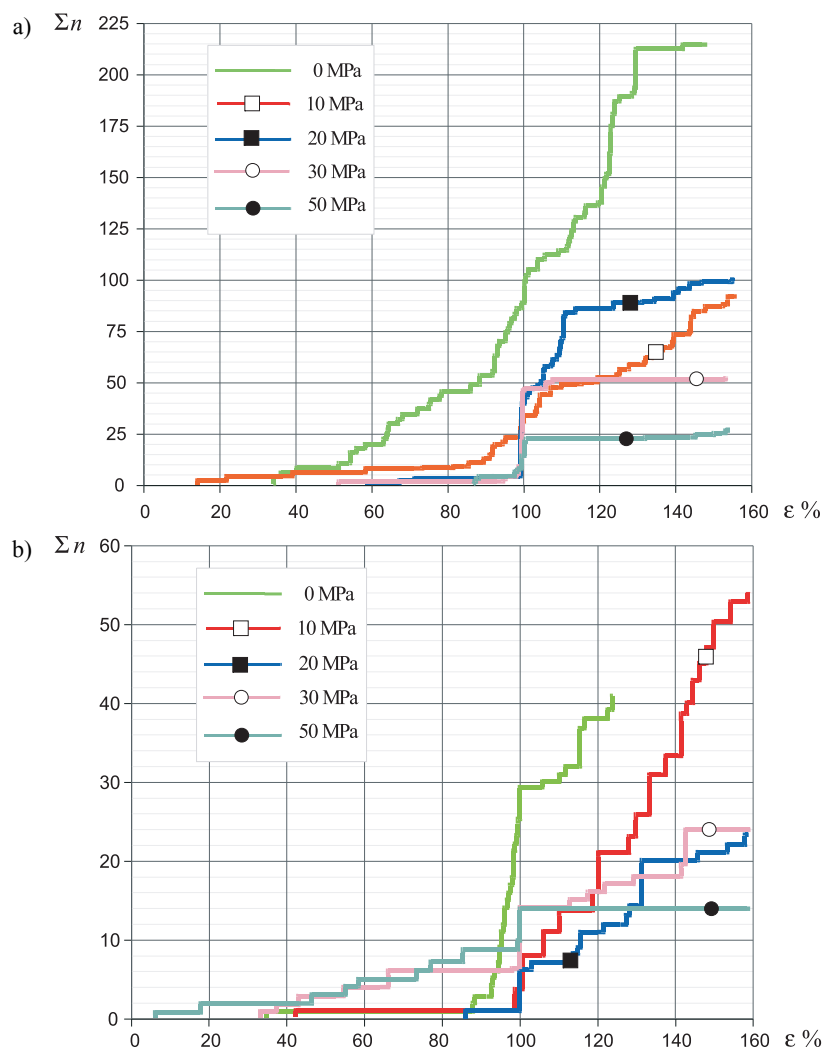
Węgiel (prędkość odkształcenia rzędu 10^{-4} s^{-1} — rys. 11a)

Przy ciśnieniu okólnym 0 MPa (jednoosiowe ściskanie) podczas całego eksperymentu zarejestrowano 214 impulsów, pierwsze już przy około 40% odkształcenia krytycznego. Emisja akustyczna była rejestrowana przez czas trwania eksperymentu, również na części pokrytycznej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej. Ze wzrostem ciśnienia okólnego generalnie zmniejszała się liczba rejestrowanych impulsów, a emisja uwidaczniała się przy odkształceniach coraz bliższych odkształceniu krytycznemu. W rezultacie przy ciśnieniu okólnym 30 i 50 MPa ponad 80% impulsów zarejestrowano przy przekraczaniu odkształcenia krytycznego.

Węgiel (prędkość odkształcenia rzędu 10^{-2} s^{-1} — rys. 11b)

Przy małej wartości ciśnienia okólnego emisja rozpoczynała się przed granicą wytrzymałości próbki i kończyła po jej przekroczeniu. Wzrost ciśnienia okólnego powodował, że emisja rozpoczynała się przy coraz niższych odkształceniach i występowała również na części pokrytycznej. Liczba impulsów (liczona do 150% odkształcenia krytycznego) ze wzrostem ciśnienia okólnego zmniejszała się od 41 przy $p = 0$ MPa do 14 przy $p = 50$ MPa. Praktycznie większa część energii wyzwalała się przy przekraczaniu granicy wytrzymałości, gdy eksperyment rozpatrywano do 150% odkształcenia krytycznego. Kontynuacja ekspe-

rymentu do momentu gdy $\epsilon = 300\div 400\%$ odkształcenia krytycznego wykazała, że emisja zachodzi nadal, a zwiększone emisje energii identyfikowane są z kolejnymi odprężeniami na części pokrytycznej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej.

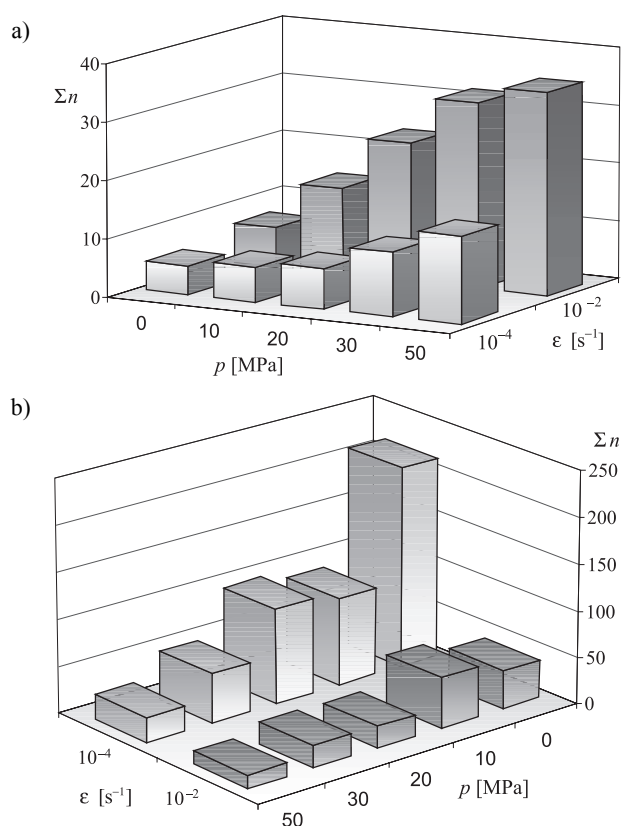


Rys. 11. Skumulowana liczba impulsów dla próbek węgla dla różnych wartości ciśnienia okólnego ($p = 0, 10, 20, 30, 50 \text{ MPa}$): a) prędkość odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; b) prędkość odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

Przedstawione wyniki obserwacji dla dwóch różnych typów litologicznych skał (piaskowca drobnziarnistego i węgla) w procesie trójosiowego ściskania pozwalają wnioskować o wpływie prędkości odkształcenia i ciśnienia okólnego na zmianę aktywności akustycznej.

Parametry charakteryzujące emisję akustyczną (liczba i amplituda impulsów akustycznych oraz ich rozkład względem charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej) dla danego typu litologicznego skały zależą od wartości ciśnienia okólnego i od prędkości odkształcenia.

Rozkład skumulowanej liczby impulsów w zależności od ciśnienia okólnego i prędkości odkształcenia przedstawiono za pomocą trójwymiarowych histogramów (rys. 12) dla próbek piaskowca (rys. 12a) i próbek węgla (rys. 12b).



Rys. 12. Przestrzenne histogramy skumulowanej liczby impulsów zależnej od ciśnienia okólnego i prędkości odkształcenia: a) dla próbek piaskowca; b) dla próbek węgla

Z przeprowadzonych obserwacji wynika, że w piaskowcu, dla porównywalnej wartości odkształcenia krytycznego (150%), liczba impulsów akustycznych wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego przy obu prędkościach odkształcenia. Zwiększenie prędkości odkształcenia o dwa rzędy wielkości powoduje niewielki przyrost liczby impulsów przy niskich wartościach ciśnienia okólnego. Przy wyższych wartościach ciśnienia przyrost liczby impulsów jest bliski 300% (rys. 12a). Na tej podstawie, traktując aktywność akustyczną jako liczbę impulsów w jednostce czasu, można stwierdzić, że w piaskowcach aktywność

akustyczna rośnie wraz ze wzrostem zarówno ciśnienia okólnego, jak i ze wzrostem prędkości odkształcenia [28].

Natomiast w węglu liczba impulsów akustycznych dla porównywalnej wartości odkształcenia krytycznego generalnie zmniejszała się wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego oraz prędkości odkształcenia (rys. 12b). Stąd aktywność akustyczna w węglu zmniejsza się zarówno ze wzrostem ciśnienia okólnego, jak i ze wzrostem prędkości odkształcenia.

7. Analiza widmowa wybranych impulsów

Wykresy skumulowanej liczby impulsów w odniesieniu do czasu trwania eksperymentu i do charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej stanowią bazę do wyboru odpowiedniego impulsu do analizy widmowej.

Analizę widmową według algorytmu szybkiego przekształcenia Fouriera przeprowadzono dla impulsów akustycznych zarejestrowanych podczas ściskania próbek piaskowca i węgla [15].

Dla stosowanych parametrów eksperymentu: prędkości odkształcenia (10^{-4} i 10^{-2} s $^{-1}$) oraz ciśnienia okólnego (0, 10, 20, 30, 50 MPa) wybrano tylko po jednej próbce do analizy widmowej, tzn. 10 próbek piaskowca (tab. 1) i 10 próbek węgla (tab. 2).

Analizowany sygnał przedstawiony jest na dwóch wykresach. Pierwszy wykres przedstawia amplitudę przyspieszenia A [ms $^{-2}$] badanego impulsu w funkcji czasu t [ms]. Na drugim wykresie podano znormalizowane widmo amplitudowe — względem maksymalnej wartości uzyskanej w badanym przedziale częstotliwości — w funkcji częstotliwości. Ze względu na to, że częstotliwość próbkowania wynosiła 100 kHz, zakres wyznaczonego widma jest w przedziale 0÷50 kHz (do częstotliwości Nyquista).

Dokumentacja graficzna dla każdej próbki składa się z następujących wykresów:

- wykres komputerowy ściskania próbki i rejestracja emisji akustycznej;
- wykres aktywności skumulowanej i skumulowanej sumy kwadratów amplitud emisji akustycznej zarejestrowanych w czasie ściskania próbki.
- widmo amplitudowe wybranych impulsów zapisu akustycznego.

Przykładowo przedstawiono (rys. 13 na wklejce) dokumentację graficzną dla próbki piaskowca 50/3 badanej przy ciśnieniu okólnym $p = 50$ MPa i prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ s $^{-1}$.

Z wykresu aktywności skumulowanej i wykresu z maszyny wytrzymałościowej wynika, że wybrane impulsy do analizy widmowej: nr 5, 8, 13 występują odpowiednio w strefie sprężystej, przedkrytycznej i pokrytycznej. Dla poszczególnych impulsów uzyskano odpowiednie wielkości amplitudy widma, dominującej częstotliwości i czasu trwania impulsu (tab. 1).

Uzyskane z analizy widmowej wielkości dla impulsów rejestrowanych w próbkach piaskowca i węgla zestawiono w tabelach 1 i 2. W tabelach tych podano również skumulowaną liczbę impulsów i skumulowaną sumę kwadratów amplitud dla rozważanych próbek.

TABELA 1

Wyniki analizy widmowej wybranych impulsów akustycznych dla próbek piaskowca

Numer próbki	p [MPa]	Σn [–]	ΣA^2 [j. umowne]	n [–]	A [ms ⁻²]	f [kHz]	τ [ms]
$\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$							
1/2	0	5	$1,8 \cdot 10^8$	2	40,95	18,75	2,34
				5	302,00	12,89	65,81
10/9	10	6	$2,9 \cdot 10^8$	–	–	–	–
20/1	20	7	$1,4 \cdot 10^8$	3	18,90	0,39	0,48
				4	595,00	7,42	7,75
				7	35,35	35,94	0,37
30/1	30	11	$2,9 \cdot 10^8$	4	185,80	1,95	8,06
50/3	50	15	$4,4 \cdot 10^8$	5	37,45	41,02	0,30
				8	276,20	23,05	2,37
				13	207,80	1,95	3,29
$\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$							
1/1b	0	7	$3,8 \cdot 10^8$	7	534,10	18,36	8,20
10/1	10	15	$3,5 \cdot 10^8$	2	174,00	25,00	2,85
				12	111,00	31,25	1,08
20/4	20	24	$1,3 \cdot 10^8$	3	539,30	1,95	3,70
				49	507,20	22,66	3,87
30/3	30	32	$2,0 \cdot 10^8$	1	22,40	26,56	0,32
				21	87,15	29,69	0,88
50/5	50	35	$7,0 \cdot 10^7$	3	24,85	30,06	0,59
				8	49,35	26,95	0,48
				9	16,80	27,73	0,25

Oznaczenia: p — ciśnienie okólne; Σn — skumulowana suma impulsów; ΣA^2 — skumulowana suma kwadratów amplitud; n — numer impulsu; A — amplituda widma; f — częstotliwość dominująca; τ — czas trwania impulsu.

TABELA 2

Wyniki analizy widmowej wybranych impulsów sejsmoakustycznych dla próbek węgla

Numer próbki	p [MPa]	Σn [-]	ΣA^2 [j. umowne]	n [-]	A [ms ⁻²]	f [kHz]	τ [ms]
$\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$							
0/1	0	214	$1,6 \cdot 10^8$	33	286,30	31,64	1,97
				58	605,50	31,25	3,80
				113	50,40	37,50	0,80
10/1	10	93	$2,5 \cdot 10^7$	45	127,70	26,56	1,12
				59	122,20	28,52	1,40
				85	38,50	28,91	0,39
20/1	20	102	$6,2 \cdot 10^8$	5	128,10	39,84	1,32
30/1	30	53	$3,2 \cdot 10^8$	17	44,45	29,30	1,03
				46	132,60	33,20	1,10
				3	93,45	28,91	1,00
$\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$							
4/1b	0	41	$3,7 \cdot 10^9$	8	108,80	36,72	0,63
10/3	10	54	$6,6 \cdot 10^8$	26	428,00	32,42	7,11
				8	40,60	13,28	0,46
20/2	20	23	$4,5 \cdot 10^7$	10	51,80	0,39	0,44
				14	53,20	7,03	1,83
				18	345,80	6,64	7,80
				24	37,80	33,98	0,84
30/2 50/2	30 50	24 14	$2,2 \cdot 10^8$ $4,3 \cdot 10^8$	5	632,80	6,64	12,41
				17	471,70	6,64	10,80
				12	30,10	1,56	3,18

Oznaczenia: p — ciśnienie okólne; Σn — skumulowana suma impulsów; ΣA^2 — skumulowana suma kwadratów amplitud; n — numer impulsu; A — amplituda widma; f — częstotliwość dominująca; τ — czas trwania impulsu.

Z analizy widmowej poszczególnych impulsów uzyskano trzy wielkości wpływające na wielkość energii sejsmicznej wstrząsów [7, 10]: maksymalną amplitudę widma, częstotliwość dominującą i czas trwania impulsu. Wartości tych wielkości zestawiono w tabelach 1 i 2. Ze względu na małą liczbę eksperymentów poddanych analizie widmowej, można tylko ogólnie scharakteryzować wpływ parametrów eksperymentu na wyznaczone wielkości akustyczne.

Na ogół zmiana ciśnienia okólnego nie wywołuje monotonicznych zmian rozpatrywanych wielkości akustycznych. Natomiast zaznacza się wpływ prędkości odkształcenia [28]. W całym zakresie stosowanego ciśnienia okólnego (0÷50 MPa) uzyskano następujące rozstępy poszczególnych wielkości akustycznych (po odrzuceniu maksymalnych i minimalnych wartości):

Prędkość odkształcenia 10^{-4} s^{-1} :

- Piaskowiec:
 - $A_{\max} = 35 \div 302 \text{ m/s}^2$,
 - $f_{\max} = 2 \div 36 \text{ kHz}$,
 - $\tau = 0,5 \div 8 \text{ ms}$.
- Węgiel:
 - $A_{\max} = 38 \div 550 \text{ m/s}^2$,
 - $f_{\max} = 26 \div 37 \text{ kHz}$,
 - $\tau = 0,9 \div 3,8 \text{ ms}$.

Prędkość odkształcenia 10^{-2} s^{-1} :

- Piaskowiec:
 - $A_{\max} = 22 \div 534 \text{ m/s}^2$,
 - $f_{\max} = 18 \div 31 \text{ kHz}$,
 - $\tau = 0,32 \div 3,9 \text{ ms}$.
- Węgiel:
 - $A_{\max} = 38 \div 632 \text{ m/s}^2$,
 - $f_{\max} = 1,6 \div 34 \text{ kHz}$,
 - $\tau = 0,5 \div 12 \text{ ms}$.

Wzrost prędkości odkształcenia wpływa na wzrost amplitudy impulsu zarówno w piaskowcu, jak i w węglu. Natomiast inne relacje zachodzą dla częstotliwości i czasu trwania impulsu. Przy większej prędkości odkształcenia dominująca częstotliwość w piaskowcu wzrasta a czas trwania impulsu ulega zmniejszeniu, podczas gdy w węglu częstotliwość zmniejsza się, a czas trwania impulsu znacznie wzrasta.

8. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że zjawiska akustyczne występujące podczas niszczenia próbek skalnych mają różny przebieg w skałach płonnych (piaskowce, mułowiec, iłowiec) i w węglu [17, 19, 20].

Analiza wyników uzyskanych dla piaskowca drobnoziarnistego i węgla wykazała, że na aktywność akustyczną mają wpływ zarówno ciśnienie okólne [5, 16] jak również prędkość odkształcenia próbki [28].

Zmiana aktywności akustycznej odpowiada rozwojowi deformacji skał zarówno w części przedkrytycznej [4, 17, 18] jak i w części pokrytycznej [1, 5, 6, 22].

Na podstawie wykresów skumulowanych wartości liczby impulsów i umownej energii wykazano, że w jednoosiowym ściskaniu piaskowca przejawy emisji akustycznej występowały na granicy wytrzymałości próbki i cała energia sejsmiczna wyzwalała się przy obciążeniu krytycznym.

Wzrost ciśnienia okólnego powodował, że emisja akustyczna w piaskowcu występowała w coraz większym zakresie fazy przedkrytycznej, jednakże większość energii sejsmicznej wyzwalała się przy obciążeniu krytycznym.

Natomiast wzrost prędkości odkształcenia nie tylko zwiększał aktywność sejsmiczną w pobliżu maksymalnego obciążenia, ale również przy dużym ciśnieniu okólnym ($p = 50$ MPa) wywoływał zjawiska akustyczne w fazie pokrytycznej.

W przypadku węgla zjawiska akustyczne w trójosiowym stanie naprężenia dla obydwu prędkości odkształcenia występowały również w fazie pokrytycznej.

Interesującym wynikiem badań jest wskazanie, że wzrost ciśnienia okólnego i wzrost prędkości odkształcenia wpływa na wzrost skumulowanej liczby impulsów w piaskowcu i na zmniejszanie się skumulowanej liczby impulsów w węglu (rys. 12a i b). Zaznacza się również większy wpływ prędkości odkształcenia niż ciśnienia okólnego na otrzymane wyniki.

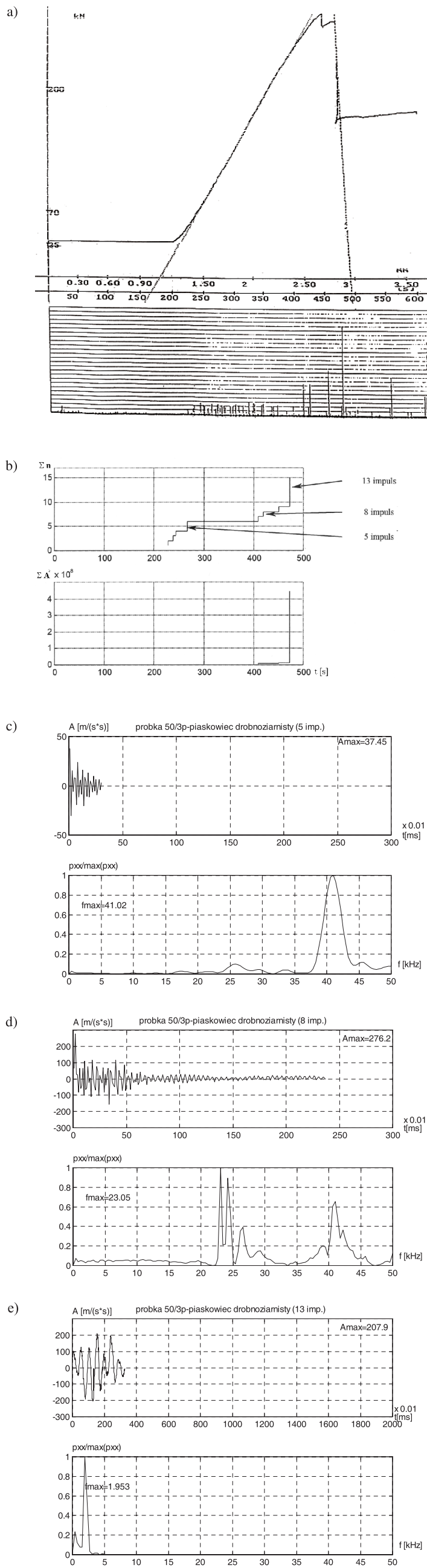
Analiza widmowa wykazała, że wzrost prędkości odkształcenia wpływa na wzrost amplitudy widma zarówno w piaskowcu jak i w węglu. Natomiast różne relacje zachodzą dla częstotliwości dominującej i czasu trwania impulsu. Zwiększeniu prędkości odkształcenia towarzyszy wzrost częstotliwości dominującej i zmniejszanie się czasu trwania impulsu w piaskowcu, i przeciwnie w węglu częstotliwość dominująca ulega wówczas zmniejszeniu a czas trwania impulsu znacznie wzrasta.

Ogólnym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonych badań jest, że wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego i wzrostem prędkości odkształcenia podłużnego ściskanych próbek skalnych aktywność akustyczna w piaskowcu wzrasta, natomiast w węglu ulega zmniejszeniu. Wniosek ten wymaga potwierdzenia w dalszych badaniach.

LITERATURA

- [1] *Amitrano D., Hantz D.*: Acoustic emission of jointed and intact granite during triaxial compression test. *Mechanics of jointed and faulted rock*. Rossmanith (ed.), Balkema, Rotterdam, 1998, 375–380
- [2] *Bukowska M.*: The influence of strain rate on indices of rock bump susceptibility. *Archives of Mining Sciences* 45, 1, 2000, 23–45
- [3] *Bukowska M.*: Własności pokrytyczne skał karbońskich Górnosląskiego Zagłębia Węglowego w warunkach zmiennych prędkości odkształcenia i ciśnień okólnych. *Archiwum Górnictwa*, vol. 48, nr 4, 2003, 561–575

- [4] *Buben J., Kozak J.*: Acoustic emission in loaded sandstone specimens as a precursor of sudden failure. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., M-22* (310), 1999, 347–350
- [5] *Butt S.D., Calder P.N.*: Experimental procedures to measure volumetric changes and microseismic activity during triaxial compression tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 35, 1998, 249–254
- [6] *Cox S.J.D., Meredith P.G.*: Microcrack formation and material softening in rock measured by monitoring acoustic emission. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol. 30, No 1, 1993, 11–24
- [7] *Dubiński J., Wierzchowska Z.*: Pomiary aktywności mikrosejsmologicznej w aspekcie odprężania górotworu i przewidywania tąpnięć. *Problem Uczelniany* Nr 7.1, część I, AGH Kraków, 1980, 134–182
- [8] *Gawryś J.*: Aktywność sejsmoakustyczna w procesie ściskania próbek skalnych. *Materiały Sympozjum WARSZTATY 2002 z cyklu „Zagrożenie naturalne w górnictwie”*. Kraków, Wyd. IGSMiE PAN, 2002
- [9] *Heo J.S., Chjo H.K., Lee C.I.*: Measurement of acoustic emission and source location considering anisotropy of rock under triaxial compression. *Rock Mechanics — a Challenge for Society*. Sarkka & Eloranta (eds.), Swets & Zeitlinger Lisse, 2001, 91–96
- [10] *Kornowski J.*: Podstawy aktywnych sejsmoakustycznych metod oceny zagrożenia lokalnym zniszczeniem górotworu. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa*, No. 793, Katowice, 1994
- [11] *Krzysztoń D.*: Frequency analysis of ultrasonic waves propagated in jointed rock block. *Archiwum Górnictwa*, t. 31, z. 2, 1986, 359–382
- [12] *Krzysztoń D., Sanetra U., Szedel D.*: Krytyczne i pokrytyczne własności próbek skalnych badanych w konwencjonalnym trójosiowym ściskaniu w sztywnej maszynie wytrzymałościowej. *Prace Naukowe GIG, Seria Konferencje*, nr 26, 1998, 69–80
- [13] *Krzysztoń D., Bukowska M., Gawryś J., Sanetra U., Wadas M.*: Pokrytyczne własności skał w trójosiowym stanie naprężenia sygnalizowane emisją akustyczną. Projekt badawczy KBN, nr 9T12A033 18, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, 2002
- [14] *Krzysztoń D.*: The influence of friction force on the post-critical failure of rock samples subjected to triaxial compression. *Archives of Mining Sciences* 50, Issue 4, 2005, 517–536
- [15] *Kurzeja J.*: Analiza widmowa wybranych impulsów sejsmoakustycznych. *Laboratorium Sejsmoakustyki Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice 2002* (niepublikowana)
- [16] *Majewska Z., Marcak H.*: Przepuszczalność i emisja akustyczna węgla i skał towarzyszących w trójosiowym stanie naprężenia. *Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Tom II*, Wyd. Kraków AGH, 1990, 233–246
- [17] *Majewska Z.*: Zmiany emisji akustycznej w procesie rozwoju deformacji skał. XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, Katedra Geomechaniki Górniczej i Geotechniki, Kraków AGH, 2000, 291–307
- [18] *McCabe W.M.*: Acoustic emission in coal: a laboratory study. *Proceedings Second Conference on acoustic emission/microseismic activity in geological structures and materials*. Ed. H. Reginald Hardy, Frederick W. Leighton, Trans.Tech.Publications, USA, 1980, 35–51
- [19] *Minh V.C.*: Energy analysis of deformation and fracture of rocks. *Rozprawa habilitacyjna*. Wydział Geologii Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 1989
- [20] *Nordlund E., Li C.*: Acoustic emission and Kaiser effect in rock materials. *Rock Mechanics Contributions and Challenges*, Balkema, Rotterdam, 1990, 1043–1050
- [21] *Opilski A., Witos F.*: Możliwości zastosowania emisji akustycznej w górnictwie. *Problemy współczesnej akustyki*. Red. Ranachowski, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 1991
- [22] *Pinińska J.*: Emisja akustyczna ośrodków skalnych w stanach naprężeń pokrytycznych. *Przegląd Geologiczny*, vol. 40, nr 12, 1992, 727–733
- [23] *Pinińska J.*: Wskaźnik mobilizacji emisji akustycznej jako efekt degradacji wytrzymałości skały. XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, Katedra Geomechaniki Górniczej i Geotechniki AGH, Kraków, 2000, 355–362
- [24] *Sanetra U.*: Wpływ ciśnienia bocznego na własności mechaniczne skał Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w warunkach trójosiowego ściskania. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej*, nr 65, seria Konferencje, nr 33, 1994, 183–191
- [25] *Sanetra U.*: Określenie nośności filarów oporowych w stanie pokrytycznym na podstawie badań trójosiowego ściskania karbońskich próbek skalnych. *Praca doktorska*. Główny Instytut Górnictwa, Katowice, 2004
- [26] *Sokołowski H.*: Obserwacje sejsmoakustyczne próbek skalnych — sprawozdanie z przeprowadzonych badań. *Laboratorium Sejsmoakustyki Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice, 2001* (niepublikowana)
- [27] *Waśko A.*: Opracowanie programu komputerowego dla wczytania przebiegów sejsmoakustycznych z taśmy do komputera. *Laboratorium Sejsmoakustyki Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice, 2002*, (niepublikowana)
- [28] *Zuberek W. M.*: Wykorzystanie efektu emisji sejsmoakustycznej w geotechnice. *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences M-11* (214), PWN Warszawa, 1988



Rys. 13. Dokumentacja graficzna dla próbki piaskowca 50/3 przy ciśnieniu okólnym $p = 50$ MPa i prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$:
a) wykres komputerowy ściskania próbki piaskowca i rejestracja aktywności akustycznej; b) skumulowana liczba impulsów i skumulowana suma kwadratów amplitud emisji akustycznej; c) widmo amplitudowe impulsu nr 5; d) widmo amplitudowe impulsu nr 8; e) widmo amplitudowe impulsu nr 13