

A. Pilarski, J. Szelażek

**ZASTOSOWANIE METODY
EMISJI AKUSTYCZNEJ
W ADHEZYJNEJ MECHANICE PĘKANIA**

16 / 1982

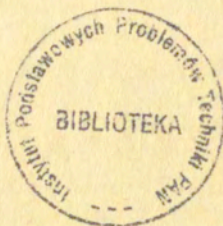
P. 269



WARSZAWA 1982

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 25 lutego 1982 r.

Zarejestrowana pod nr 16/1982



57058



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 140 egz. Ark.wyd. 1. Ark. druk. 1,75
Oddano do drukarni w kwietniu 1982 r.
Nr zamówienia 127/0/82 Z - 97.

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

ZASTOSOWANIE METODY EMISJI AKUSTYCZNEJ
W ADHEZYJNEJ MECHANICE PĘKANIA

1. Wstęp

Ze względu na coraz częstsze stosowanie połączeń adhezyjnych w odpowiedzialnych elementach konstrukcyjnych, problem rozwoju metod kontroli jakości tych połączeń jest wciąż aktualny. Od ponad dwudziestu lat zagadnienie oceny jakości połączeń klejowych znajduje się wśród zastosowań badań nieniszczących. Świadczą o tym liczne publikacje oraz referaty na konferencjach. W ostatnich latach można zaobserwować przeniesienie badań nieniszczących w zakresie kontroli połączeń adhezyjnych jakby na wyższy stopień. Wraz z udoskonaleniem i automatyzacją procesów wykrywania miejsc z brakiem przyczepności wzmożono wysiłki zmierzające do oceny wytrzymałości tych połączeń, zarówno w procesie wytwarzania, jak i w eksploatacji. Przegląd badań nieniszczących, umożliwiających wykrycie braku przyczepności, podali Schlickelmann [1] i Semerdijev [2]. Natomiast próbę usystematyzowania badań nieniszczących stosowanych do oceny wytrzymałości połączeń adhezyjnych przedstawił Pilarski [3].

Do oceny wytrzymałości połączeń adhezyjnych stosowane są nieomal wyłącznie metody akustyczne, wśród których znajduje się również metoda emisji akustycznej. Zastosowanie tej ostatniej do oceny jakości połączeń adhezyjnych uzyskiwanych za pomocą różnych technik wytwarzania /połączenia klejowe, zgrzewane wybuchowo, walcowane itp./ można podzielić na trzy zasadnicze grupy. Do pierwszej zaliczyć należy analizowanie sygnałów emisji akustycznej generujących się w procesie wytwarzania połączenia [4,5]. Do drugiej - quasi-nieniszczący sposób oceny jakości połączeń częściowo lub całkowicie

gotowych, sprowadzający się do zliczania ilości impulsów emisji akustycznej generujących się przy obciążaniu połączenia siłą mniejszą od nominalnej wytrzymałości połączenia [6, 7, 8]. Zazwyczaj większa ilość impulsów emisji akustycznej odpowiada słabszemu połączeniu, co może służyć jako kryterium do wyeliminowania takiego połączenia z dalszej eksploatacji. Wreszcie trzecią grupę stanowi eksploatacyjne monitorowanie pracujących elementów, np. w samolotach [9]. Dodatkowo, zgodnie z sugestią Andersona, Bennetta i De Vries [11], metoda emisji akustycznej zdaje się być przydatna w adhezyjnej mechanice pęknięcia przy wyznaczaniu współczynnika intensywności naprężeń lub współczynnika wyzwolenia energii potencjalnej odkształcenia.

Celem niniejszej pracy jest potwierdzenie słuszności powyższego przypuszczenia oraz ocena korzyści wynikających z zastosowania tej techniki pomiarowej.

2. Ocena wytrzymałości połączeń adhezyjnych

2.1. Adhezyjna mechanika pęknięcia

Adhezyjna mechanika pęknięcia – tak jest nazywany w niektórych publikacjach anglosaskich dział mechaniki pęknięcia dotyczący analizy układów niejednorodnych, a ściślej mówiąc przypadków, w których pęknięcia występują wzdłuż płaszczyzny połączenia dwóch materiałów o odmiennych własnościach mechanicznych [12]. Ta klasa zagadnień obejmuje część technicznie ważnych przypadków np. połączenia bimetaliczne, osłabione przez występowanie wad lub pęknięć na powierzchni granicznej, czy też połączenia klejowe lub lutowane, w których granica "element łączony – spoiwo" zawiera zanieczyszczenia, wady lub pęknięcia.

Z punktu widzenia mechaniki ośrodka ciągłego, zwłaszcza zaś energetycznej koncepcji pęknięcia między kohezijną a adhezyjną mechaniką pęknięcia istnieje znaczne podobieństwo. Również w tej drugiej podstawowe kryteria mechaniki pęknięcia wynikają z oceny stanu naprężeń w sąsiedztwie wierzchołka

pęknięcia, bądź z analizy stanu energetycznego w okolicach pęknięcia. Stąd podstawowymi parametrami w adhezyjnej mechanice pęknięcia pozostają współczynnik intensywności naprężeń K , charakteryzujący pole naprężeń w elemencie w następstwie występowania pęknięcia, oraz współczynnik wyzwalańia energii potencjalnej odkształcenia G /prędkość wyzwalańia energii/, będący miarą wielkości wyzwolonej energii odkształcenia w procesie tworzenia się nowej powierzchni szczeliny na skutek pęknięcia. Aczkolwiek należy odnotować, że krytyczne wartości tych współczynników tym razem nie są wielkościami czysto materiałowymi, ponieważ zależą m.in. od stanu przygotowania powierzchni granicznej.

Oceniając wytrzymałość układów niejednorodnych z punktu widzenia pęknięcia, takich jak np. połączenia klejowe, należałoby stosować dosyć skomplikowaną analizę stanu naprężenia [1]. Stosowanie tej kłopotliwej analizy można pominąć wyznaczając doświadczalnie wartość prędkości wyzwalańia energii, pamiętając jednocześnie, że między wielkościami K i G zachodzą następujące związki:

- dla płaskiego stanu odkształcenia:

$$/1/ \quad G = \frac{1 - \nu^2}{E} K^2,$$

- dla płaskiego stanu naprężenia:

$$/2/ \quad G = \frac{K^2}{E}$$

2.2. Próba "pęcherzykowa"

Wartość prędkości wyzwolenia energii G wyznaczona jest w praktyce w różnych próbach, z których niektóre zbliżone są do znormalizowanych prób wytrzymałościowych, takich jak próba na scinanie, oddzieranie czy odrywanie. I tak np. w próbie na oddzieranie dwóch belek o przekroju prostokątnym $b \times h$ /rys.1/ połączonych warstwą kleju o grubości g , w której

znajduje się wstępne pęknięcie o długości a krytyczną wartość współczynnika wyzwala energii potencjalnej odkształcenia G_{Ia} wyznacza się ze związku [12]

$$/3/ \quad G_{Ia} = 12 P_{kr}^2 \frac{a^2}{Eb^2 h^3}$$

gdzie P_{kr} - wartość krytyczną siły oddzierającej, przy której następuje rozwój pęknięcia. Indeks I informuje, że mamy do czynienia w tej próbie z pierwszym typem odkształcenia powierzchni szczeliny, a mianowicie z normalnym rozwarciem.

Podobnie dla próby na ścinanie dwóch przyklejonych belek o przekroju prostokątnym $b \times h$ otrzymujemy związek

$$/4/ \quad G_{IIa} = \frac{P_{kr}^2}{b^2 hE}$$

Jest to drugi typ odkształcenia powierzchni szczeliny, a mianowicie z poprzecznym ścinaniem.

W praktyce trudno osiągnąć oba przytoczone przypadki w czystej postaci. Zazwyczaj mamy do czynienia z kombinacją dwóch, a niekiedy i trzech typów odkształceń szczeliny. I tak np. w próbie na ścinanie połączenia zakładkowego, ze względu na występowanie oprócz siły ścinającej momentu zginającego próbkę, krytyczna wartość współczynnika wyzwala energii potencjalnej odkształcenia może być zapisana następująco [11]

$$/5/ \quad G_a = a G_{Ia} + b G_{IIa}$$

gdzie a i b , współczynniki charakteryzujące udział pierwszego i drugiego typu odkształcenia powierzchni szczeliny w procesie pęknięcia.

Praktyczną realizacją złożonego stanu naprężeń w złączu jest proponowana przez autorów prac [1 + 12] próba "pęcherzykowa". Próba ta w swej najprostszej wersji, sprowadza się do działania równomiernie rozłożonym ciśnieniem p na płytę połączoną ze sztywnym podłożem za wyjątkiem jej środkowej części o promieniu r /rys.2/. Promień ten utrzymuje się aż do momentu

osiągnięcia krytycznej wartości ciśnienia, przy którym następuje zniszczenie połączenia na powierzchni granicznej. Do tego momentu górna płyta odkształca się na kształt "pęcherzyka". Dla przypadku membrany /cienkiej płyty/ krytyczna wartość prędkości wyzwiania energii G_a związana jest z ciśnieniem krytycznym P_{kr} następująco

$$/6/ \quad G_a = \frac{3(1-\nu^2)}{32} \cdot \frac{r}{E} \cdot \left(\frac{r}{h}\right)^3 \cdot P_{kr}^2$$

Natomiast, dla przypadku izotropowej półprzestrzeni połączonej ze sztywnym podłożem

$$/7/ \quad G_a = \frac{(1+\nu)(3-4\nu) \left[\frac{1}{4} \pi^2 l u^2 (3-4\nu) + 1 \right] l u (3-4\nu) r}{2\pi E (1-2\nu)} P_{kr}^2$$

Na rys.3 przedstawiono analitycznie uzyskane wyniki dla dwóch omówionych przypadków oraz wyniki numerycznej analizy naprężeń dla pośrednich grubości warstwy na podłożu w próbie "pęcherzykowej" [12]. Wartość ciśnienia krytycznego zależna jest od grubości płyty przy ustalonej średnicy obszaru nieprzyklejonego, jednakże zależność ta jest bardziej złożona niżby wynikało z rys.3. Bowiem krytyczna wartość współczynnika wyzwiania energii potencjalnej odkształcenia G_a jest dodatkowo zależna od stosunku h/r . Na rys.4 podano wyniki uzyskane w próbie "pęcherzykowej" dla przypadku warstwy kleju poliuretanowego o nazwie handlowej Solithane 113 naniesionej na podłoże z polimetakrylanu metylu /PMM/. Z wykresu tego wynika, że w skrajnych przypadkach wartość G_a różni się 2,5 - krotnie.

Inna odmiana próby "pęcherzykowej" sprowadza się do przyklejenia płyty górnej do sztywnego podłoża za pomocą warstwy kleju o grubości g . Wówczas dla płaskiego stanu odkształcenia:

$$/8/ \quad G_a = \left(\frac{\omega_1 + 3l^2}{r^2} \right) \frac{r^4}{18D} \cdot P_{kr}^2$$

gdzie:

$$\omega_1 = \frac{1 + 3\sqrt{2} l/r + 3l^2/r^2}{1 + \sqrt{2} l/r},$$

$$l = \left(\frac{D \cdot \delta}{E_{\text{klej}}} \right)^{\frac{1}{2}},$$

oraz D - sztywność zginanej płyty.

We wszystkich wymienionych próbkach doświadczalnych wyznaczenie krytycznej wartości współczynnika wyzwala energii potencjalnej odkształcenia sprowadza się do ustalenia siły lub ciśnienia, przy których następuje rozwój szczeliny. Ponieważ dla większości połączeń adhezyjnych proces niszczenia połączenia odbywa się wolno, dokładne wyznaczenie momentu krytycznego stanowi dodatkową trudność i źródło błędów pomiarowych.

2.3 Wykorzystanie metody emisji akustycznej do ustalania momentu krytycznego.

Ustalanie wartości krytycznej czy też ciśnienia krytycznego z wykresu obciążenia - rozwarcie szczeliny w próbie oddzielenia lub z wykresu ciśnienie - ugięcie środka membrany w próbie "pęcherzykowej" jest niedokładne. W przypadku przezroczystych materiałów łączonych moment krytyczny może być wyznaczony stosunkowo dokładnie za pomocą metod wizualnych, np. poprzez filmowanie próbki w czasie próby. W literaturze brak jest informacji na temat wykorzystania i przydatności w adhezyjnej mechanice pęknięcia elektrycznych metod pośrednich, wykorzystywanych w kohezynnej mechanice pęknięcia do wyznaczania krytycznego rozwarcia dna szczeliny δ_c^* , takich jak metoda potencjału, prądów wirowych czy impedancji. Natomiast Anderson, Bennett i De Vries [1] sugerują możliwość wykorzystania metody emisji akustycznej w celu dokładniejszego ustalenia momentu zainicjowania pęknięcia na granicy połączenia w próbie "pęcherzykowej".

Wyniki pracy Curtisa [7], zmierzającej do wykazania przydatności metody emisji akustycznej do quasi-nieniszczącej

oceny wytrzymałości połączeń klejowych na przykładzie połączenia zakładkowego, wykazały również, że tworzeniu i stopniowemu rozwojowi pęknięć towarzyszy generowanie się wyraźniejszych sygnałów emisji akustycznej zastępujących wcześniejsze niskoamplitudowe, wysokoczęstotliwościowe /ponad 1 MHz/ sygnały emisji akustycznej.

Na możliwość wykorzystania rejestracji sygnałów emisji akustycznej przy określaniu współczynnika intensywności naprężeń wskazują Detkow i Łukaszew [15] na przykładzie kompozytów z tworzyw sztucznych. Stwierdzają oni, że przy rozciąganiu próbek z karbem wykonanych z różnych laminatów w momencie powiększania się szczeliny pojawiają się sygnały emisji akustycznej o zwiększonej intensywności. Wykorzystanie zarejestrowanego momentu skoku intensywności impulsów emisji akustycznej do ustalenia wartości siły krytycznej powoduje, że w ten sposób wyliczony współczynnik intensywności naprężeń różni się od obliczonego tradycyjnie w oparciu o wykres rozciągania średnio o 30 %.

3. Technika doświadczalna

W celu stwierdzenia możliwości zastosowania emisji akustycznej do badania jakości połączeń warstwowych postanowiono przeprowadzić próby "pęcherzykowe" na próbkach modelowych. Ten rodzaj prób wybrano, ponieważ taki sposób wprowadzenia obciążeń w obszar kontrolowany jest stosunkowo najcichszy, to znaczy praktycznie nie powoduje powstania zakłóceń akustycznych. Zakłócenia takie powstające wskutek tarcia, wywołanego obciążeniem próbki, w innych próbach, utrudniają wydzielenie sygnałów emisji akustycznej wywołanych niszczeniem połączenia.

3.1. Stanowisko doświadczalne

Stanowisko do przeprowadzenia prób "pęcherzykowych", schematycznie przedstawione na rys.5, zestawione zostało z gotowych podzespołów. Do wytwarzania ciśnienia hydrostatycznego wewnątrz próbki wykorzystany został manometr obciążnikowy typu MT-250

/3/, który wcześniej służył do skalowania czujnika ciśnienia. W czasie przeprowadzenia prób, cylinder obciążnika pozostawał zamknięty tak, że ruch tłoka powodował wzrost ciśnienia w układzie hydraulicznym. Do pomiaru ciśnienia wykorzystano tensometryczny czujnik ciśnienia /4/ współpracujący z mostkiem tensometrycznym /5/ typu MT-10 produkcji ZD "Techpan".

Próbka 1 połączona była z manometrem przewodem ciśnieniowym /9/, a cały układ hydrauliczny, oprócz próbki, wypełniony był olejem maszynowym.

Zestaw do rejestracji sygnałów emisji akustycznej składał się z czujnika piezoelektrycznego /10/ umocowanego w badanej próbce, przedwzmacniacza /2/ oraz zestawu do emisji akustycznej typu Audimat P. Zestaw ten składa się z aparatu do emisji akustycznej /7/ połączonego z drukarką /11/ i posiada wyjście na rejestrator.

W celu wyeliminowania wpływu zakłóceń takich jak drgania czy szumy hydrauliczne na wyniki pomiarów emisji akustycznej, starannie odizolowano akustycznie próbkę od pozostałych podzespołów, w szczególności od drukarki zestawu Audimat P i manometru. Jako podkładek izolujących akustycznie użyto miękkiej pianki poliuretanowej.

Zmiany ciśnienia i sumaryczna ilość sygnałów emisji akustycznej w funkcji czasu były rejestrowane jednocześnie na dwukanałowym rejestratorze /6/. Natomiast na drukarce /11/ zestawu Audimat P były zapisywane co 1 sekundę, suma oraz ilość sygnałów emisji w tym przedziale czasu /tzw. prędkość emisji akustycznej/. Istniała również możliwość wykonywania w dowolnym momencie zdjęcia fotograficznego próbki /8/.

3.2. Próbki

Próbki stosowane w badaniach są połączeniem adhezyjnym warstwy żywicy epoksydowej z podłożem wykonanym z polimeta-krylanu metylu /PMM/. Materiały te są łatwe w obróbce oraz w nieskomplikowany sposób, we własnym zakresie można z nich wykonać połączenia o różnych wytrzymałościach mechanicznych. Jednocześnie dysponowano wynikami badań ultradźwiękowych

jakości połączenia /wytrzymałości adhezyjnej/ tych dwóch materiałów [16]. Przekrój próbki przedstawiono na rys. 6a. Podłoże /3/ wykonane jest jako krążek z PMM a wylana na nim warstwa /1/ to żywica epoksydowa /epidian 5 z utwardzaczem Z-1/. W podłożu umocowana jest końcówka przewodu ciśnieniowego /5/ oraz czujnik emisji akustycznej /6/.

Sprężenie akustyczne pomiędzy czujnikiem a próbką zapewniała cienka warstwa żywicy bez utwardzacza. Fakt, że obydwie użyte do wykonania próbek materiały są przezroczyste umożliwia obserwację rozwoju szczeliny wzdłuż granicy połączenia warstwa - podłoże /2/ i porównanie tego procesu z rejestrowanymi jednocześnie sygnałami emisji akustycznej. W celu zwiększenia kontrastu obrazu, wewnątrz próbki oraz końcówkę przewodu hydraulicznego wypełniono czarnym tuszem /4/.

Różne stopnie przyczepności warstwy do podłoża uzyskano przez odmienną klasę chropowatości i stopień zatłuszczenia lub odtłuszczenia powierzchni granicznej podłoża. Wytrzymałość na odrywanie tak uzyskanych połączeń "żywica - PMM" badanych próbek nie przewyższała 10 MPa.

Stosunek grubości warstwy /4/ do średnicy /2/ otworu początkowego oszacowano na podstawie danych literaturowych [11] /rys.3 i 4/ a następnie dobrano doświadczalnie tak, aby przy danych wytrzymałościach połączeń uzyskać stosunkowo niskie ciśnienia krytyczne. Potrzeba taka wynikała ze stosunkowo niskiej wytrzymałości na ścinanie żywicy epoksydowej użytej przy wykonywaniu próbek.

Polimetakrylan metylu posiada wysoki współczynnik tłumienia fal ultradźwiękowych /dla częstotliwości 1 MHz wynosi on $\alpha=150$ dB/m co sprzyja wytłumieniu zakłóceń, które powstać mogą w czasie wzrostu ciśnienia na stożku uszczelniającym i gwincie końcówki przewodu ciśnieniowego. Jednocześnie ze względu na małą odległość pomiędzy czujnikiem emisji akustycznej a powierzchnią wzdłuż której rozwija się szczelina, interesujące nas sygnały osłabione były tylko nieznacznie.

Oprócz opisanych powyżej próbek typu warstwa na podłożu wykonano szereg próbek połączeń klejowych. Przekrój takiej próbki pokazano na rys. 6b. Warstwa PMM /7/ przyklejona była

do podłoża wykonanego również z PMM cienką /grubość ok. 0,05mm/ warstwą żywicy epoksydowej. Poziom zakłócających sygnałów emisji akustycznej zbadano na próbce "ślepej", tzn. wykonanej w całości z PMM. Obciążając tę próbkę ciśnieniem od 0 do 20MPa, nie uzyskano przy stosowanych w czasie badań nastawach Audi-matu P, rejestrowalnych sygnałów.

3.3. Czujnik emisji akustycznej

Przed przystąpieniem do badań, porównano przydatność dwóch czujników emisji akustycznej wykonanych do tego celu. Pierwszy z nich to czujnik z niewytłumionym przetwornikiem na fale podłużne o częstotliwości rezonansowej 1 MHz, drugi - z wytłumionym mechanicznie mieszaniną wolframowo żywiczną przetwornikiem na fale podłużne o częstotliwości rezonansowej 4 MHz. Obydwa przetworniki wykonane były z tytanianu baru i posiadały średnicę 7 mm.

Na rys.7 pokazano częstotliwościowe charakterystyki amplitudowe obu opisanych czujników emisji akustycznej. Charakterystyki te uzyskano za pomocą analizatora widma Hewlett Packard. Jako generator impulsów akustycznych zastosowana była szerokopasmowa głowica ultradźwiękowa typu L5K produkcji firmy Krautkrämer współpracująca z aparatem ultradźwiękowym typu DIUS-F produkcji SVUSS /CSRS/. Odbierany przez czujniki impuls przechodził poprzez warstwę PMM o grubości 10 mm. Porównanie przydatności obu czujników przeprowadzono rejestrując ilość sygnałów emisji akustycznej podczas prób pęcherzykowych takich samych próbek - to jest tak samo wykonanych /patrz p.4/. Badania te wykazały większą przydatność czujnika z niewytłumionym przetwornikiem o częstotliwości rezonansowej równej 1MHz. Czujnik ten wybrano do dalszych badań.

3.4. Sposób badania

W czasie badań manometr napędzono ręcznie tak, aby uzyskać proporcjonalny do czasu przyrost ciśnienia. Podłoża pró-

bek wykorzystywano wielokrotnie przetaczając powierzchnię połączenia po wykonaniu próby i po jej przygotowaniu wylewając ponownie nową warstwę żywicy. Łącznie razem z próbami przygotowawczymi, wykonano 33 próby "pęcherzykowe". Badania przeprowadzono przy następujących nastawach aparatu Audimat P:

podstawa czasu - 1 sek.

wzmocnienie przedwzmacniacza - 40 dB

wzmocnienie aparatu - 39 dB

filtr - 0

próg dyskryminatora - 3,57

4. Wyniki

Na rysunku 8 przedstawiono zmiany ciśnienia p i sumy ilości rejestrowanych sygnałów emisji akustycznej $\sum n$ od czasu, uzyskanych dwoma czujnikami. Wyniki te uzyskano podczas prób "pęcherzykowych" tak samo przygotowanych próbek. Były to próbki, których powierzchnia przed wylaniem warstwy żywicy została lekko zatłuszczona smarem stałym. Widoczna jest większa czułość /większa ilość rejestrowanych sygnałów/ czujnika z niewytłumionym przetwornikiem o częstotliwości 1 MHz. Porównania takie przeprowadzono na 4 próbkach z podobnymi rezultatami. Do dalszych prób używano czujnika z niewytłumionym przetwornikiem o częstotliwości rezonansowej 1 MHz.

Na rysunkach 9 + 11 przedstawiono charakterystyczne przebiegi zarejestrowanych zmian ciśnienia p i sumy ilości sygnałów emisji akustycznej $\sum n$ w funkcji czasu dla próbek przygotowanych w różny sposób. I tak z rys.9, na którym podano wyniki próby "pęcherzykowej" dla próbki nieodtłuszczonej chemicznie /zanieczyszczenia usunięto jedynie mechanicznie/, wynika, że pierwsze sygnały emisji akustycznej zarejestrowane zostały przy obciążeniu próbki ciśnieniem niższym od ciśnienia "końcowego" o 16%. Ciśnieniem "końcowym" nazywamy w tym przypadku ciśnienie, przy którym następuje gwałtowny, zauważalny na wykresie p / t / spadek ciśnienia. Dla próbki o dużej

dużej wytrzymałości adhezyjnej, próbki o starannie przygotowanej powierzchni granicznej, ciśnienie krytyczne wyznaczone na podstawie zarejestrowanych sygnałów w emisji akustycznej wynosi odpowiednio 93% ciśnienia "końcowego" /rys.10/. Natomiast w przypadku próbki o małej wytrzymałości adhezyjnej różnica tych ciśnień wzrasta do ponad 40% /rys.11/.

Rysunek 12 zawiera zbiorcze przedstawienie ciśnień krytycznych wyznaczonych na podstawie rejestracji sygnałów emisji akustycznej w odniesieniu do ciśnień "końcowych" dla próbek o różnych wytrzymałościach. Na rysunku tym linią przerywaną zaznaczono średni stosunek ciśnienia krytycznego wyznaczonego za pomocą metody emisji akustycznej do ciśnienia "końcowego". Wynosi on dla 27 próbek 63%.

5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że ciśnienie krytyczne wyznaczone za pomocą metody emisji akustycznej w próbie "pęcherzykowej" jest niższe średnio o około $1/3$ od tzw. ciśnienia "końcowego" ustalonego z wykresu p/t . Powyższy wniosek oznacza, że wyliczone wartości współczynników wyzwolenia energii potencjalnej odkształcenia G /patrz wzór 6/ na podstawie w ten sposób wyznaczonego ciśnienia krytycznego p_{KR} są średnio o 55% niższe niż wyliczone na podstawie ciśnień "końcowych". Należy wszakże podkreślić, że sposób ustalania ciśnienia końcowego" w oparciu o obserwowany spadek ciśnienia na wykresie p/t jest niedokładny, zwłaszcza zaś w przypadku układów hydraulicznych o małych sztywnościach, co miało miejsce w opisanych badaniach.

Wydaje się, że wartość ciśnienia krytycznego wyznaczonego za pomocą emisji akustycznej, tym więcej różni się od ciśnienia "końcowego" im to ostatnie jest niższe, czyli im mniejsza jest wytrzymałość adhezyjna połączenia.

Stwierdzono, że zastosowany w próbie "pęcherzykowej" hydrauliczny sposób obciążania próbki nie powoduje powstawania zakłócających sygnałów akustycznych w zakresie wykorzystywanych obciążeń. Fakt ten umożliwia wyznaczenie momentu zapoczątkowa-

nia procesów niszczenia połączenia, na podstawie rejestracji sygnałów emisji akustycznej, poprzedzającego widoczny, w przypadku materiałów przezroczystych, rozwój szczeliny.

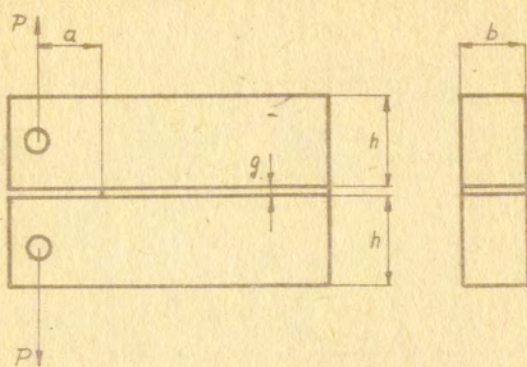
Przy wykorzystanych materiałach próbek oraz układzie hydraulicznym o małej sztywności nie uzyskano stateczności procesu niszczenia połączenia. Raz zapoczątkowany proces pęknięcia adhezyjnego kończył się gwałtownie rozwojem szczeliny aż do krawędzi próbki i utratą jej szczelności. Uniemożliwiło to fotograficzne rejestrowanie procesu rozwoju szczeliny oraz wielokrotne wykorzystanie tej samej próbki.

L i t e r a t u r a

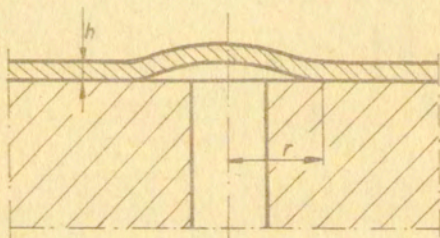
- [1] SCHLICKELMANN R.J.: Nondestructive Testing, 2, 1972, 79-86 i 3, 1972, 144-153.
- [2] SEMERDIJEV S.: Metal-to-Metal Adhesive Bonding, Business Books Limited, London 1970, 89-96.
- [3] PÍLARSKI A.: Ocena wytrzymałości połączeń klejowych za pomocą metod badań nieniszczących, Materiały IX KKBN, Frombork 1979, 37-44, R-4.
- [4] DUNEGAN H.L., HARRIS D.O.: Applications of acoustic emission to industrial problems, Non-Destructive Testing, 6, 1974, 137-144.
- [5] SCHWENK E.B., SHEARER G.D.: Measuring projection weld strength by acoustic emission, Non-Destructive Testing, 2, 1974, 29-33.
- [6] AWIERBUCH I.I., GRACHINAR W.W.: Kontroli procnostnykh charakteristik kompozycyionnykh materialov, 3, 1973, 12-15.
- [7] CURTIS G.J.: Acoustic emission energy relates to bond strength, Non-Destructive Testing, 10, 1975, 249-257.
- [8] HILL R.: The use of acoustic emission for characterising adhesive joint failure, NDT International, 4, 1977, 63-72.
- [9] GIESEKE J.H.: An NDT investigation of the behavior of acoustic emission from a brazed metal to ceramic, ISA Transactions, 24, 1972, 11-16.
- [10] GREEN A.T., DUNEGAN H.L., TETELMAN A.S.: Nondestructive inspection of aircraft structures and materials via acoustic emissions, Dunegan Research Co., Livermore, California 1970.
- [11] ANDERSON G.P., BENNETT S.J., DE VRIES K.L.: Analysis and Testing of Adhesive, Academic Press, 1977.
- [12] BENNETT S.J., DE VRIES K.L., WILLIAMS M.L.: Adhesive fracture mechanics, Int.J. of Fracture, 10, 1, 1974, 33-43.
- [13] ANDERSON G.P., DE VRIES K.L., WILLIAMS M.L.: Mixed mode stress field effect in adhesive fracture, Int.J. of Fracture, 10, 4, 1974, 565-583.
- [14] UPDIKE D.P.: Effect of adhesive layer elasticity on the fracture mechanics of a blister test specimen, Int.J. of Fracture, 12, 6, 1976, 815-825.
- [16] DETKOW A.J., LUKASZEW A.A.: Kontroli stieklóplastikow po registracii akusticzeskoj emisii, Defektoskopia, 2, 1979,

84-92.

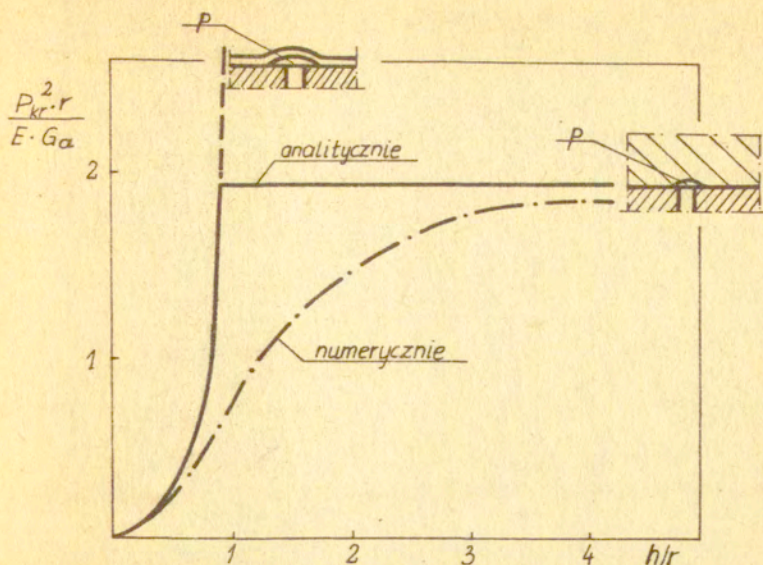
- [16] PILARSKI A.: Ultradźwiękowe kryterium wytrzymałościowe dla dla połączeń adhezyjnych, Materiały X KKBN, Jadwisin 1980, R-45, 163.



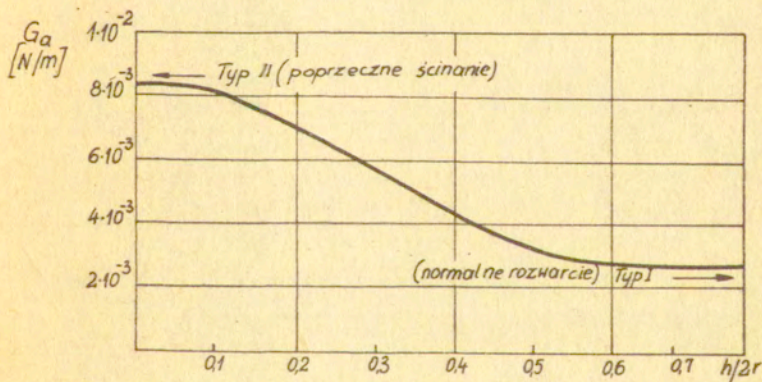
Rys.1. Próba na oddzieranie połączenia klejowego.



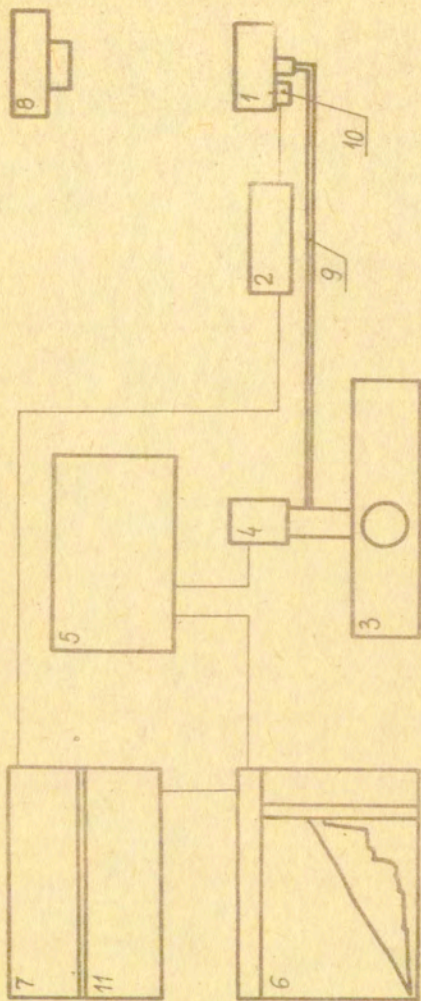
Rys.2. Schemat próby pęcherzykowej.



Rys.3. Analityczne i numeryczne zależności ciśnienia krytycznego od grubości płyty przy ustalonej średnicy obszaru nieprzyklejonego [11].

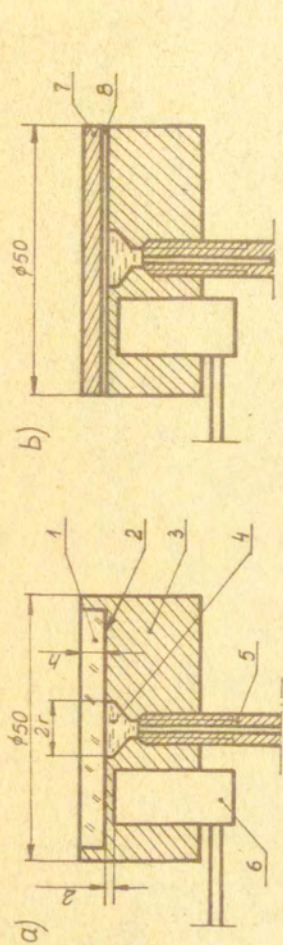


Rys.4. Zależności współczynnika wyzwala energii potencjalnej G_a od stosunku $h/2r$ [11].

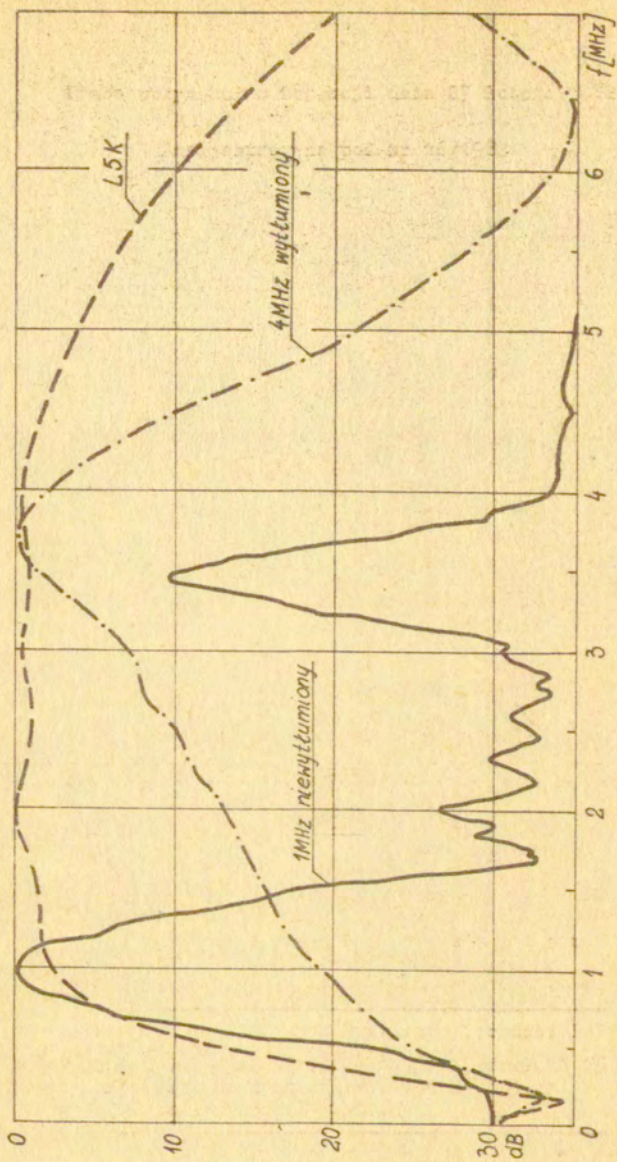


Rys. 5. Schemat stanowiska doświadczalnego:

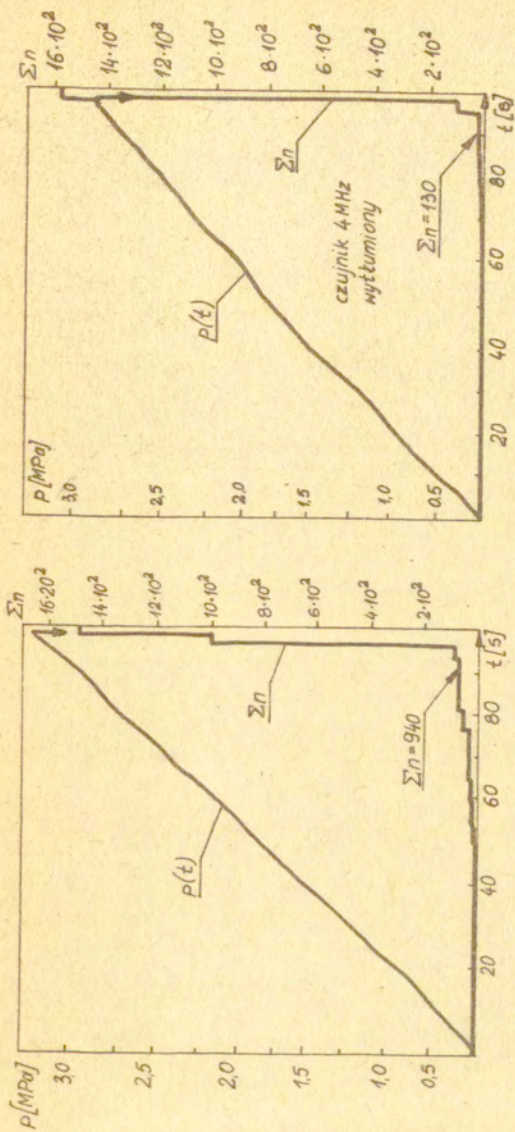
- | | | |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1. Próbka | 5. Mostek tensometryczny | 8. Aparat fotograficzny |
| 2. Przedwzmacniacz | 6. Rejestrator | 9. Przewody hydr. |
| 3. Manometr | 7. Aparat do emisji akustycznej | 10. Czujnik emisji akustycznej |
| 4. Czujnik ciśnienia | | 11. Drukarka |



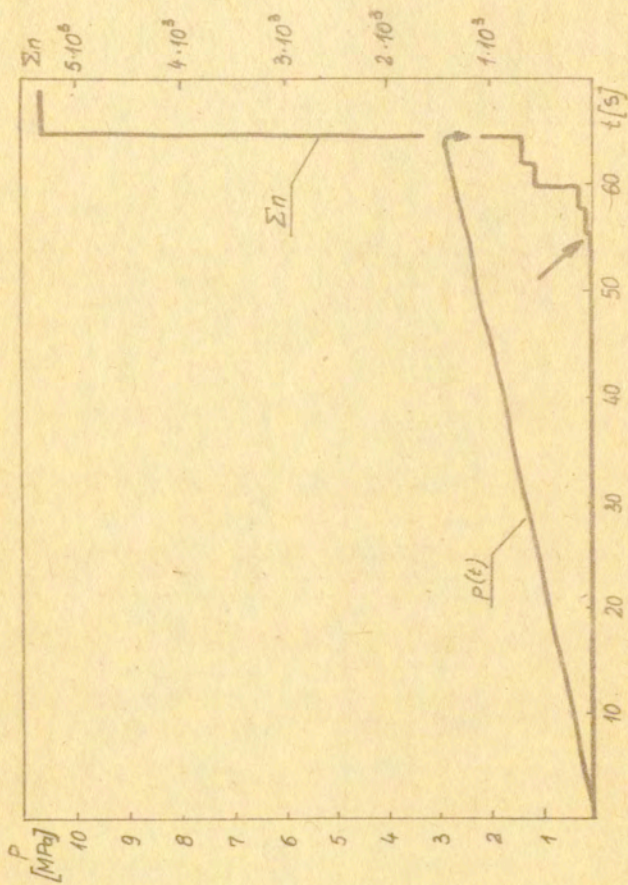
Rys.6. Próbk
 a/ próbka typu "warstwa na podłożu"
 b/ próbka typu "warstwa kleju - podłoże"
 1. Warstwa żywicy
 2. Powierzchnia połączenia
 3. Podłoże
 4. Tusz
 5. Końcówka przewodu hydraulic.
 6. Czujnik emisji akustycznej
 7. Płytk z PMM
 8. Warstwa kleju



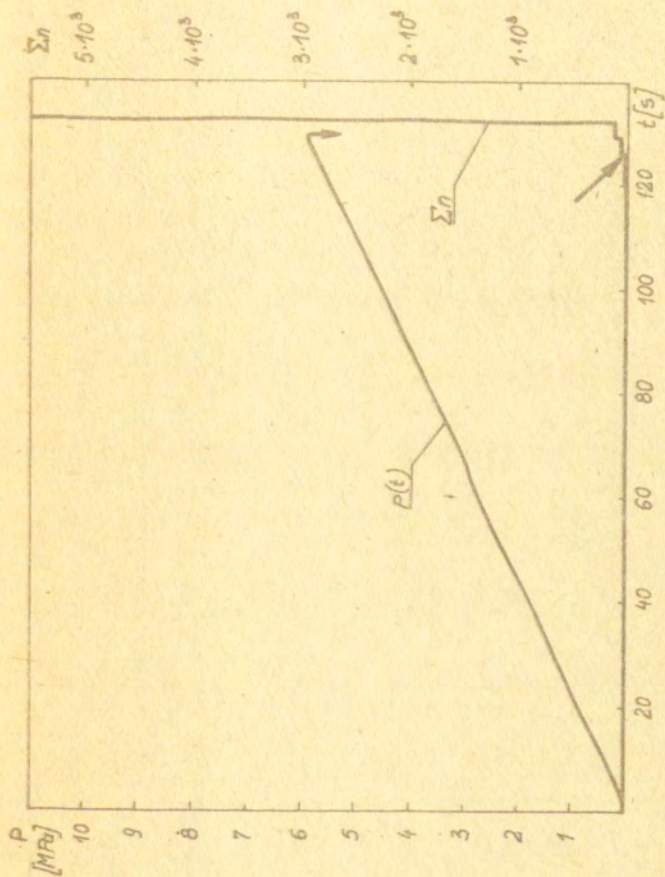
Rys.7. Widma czułości osłuchów emisji akustycznej oraz nadawanej głowicy szerokopasmowej L5K.



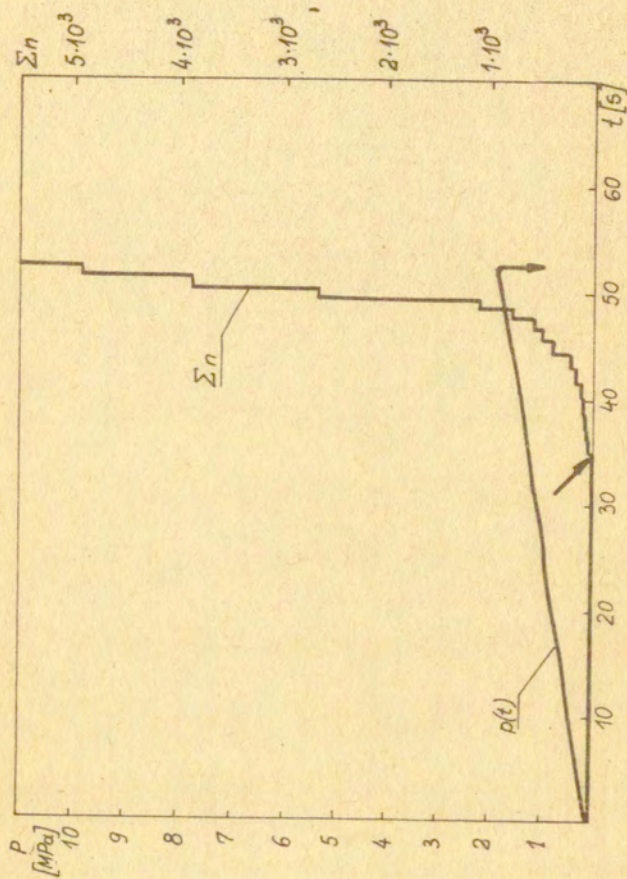
Rys.8. Zależności p/t i $\Sigma n/t$ dla dwóch czujników uzyskane na jedynkowych próbkach.



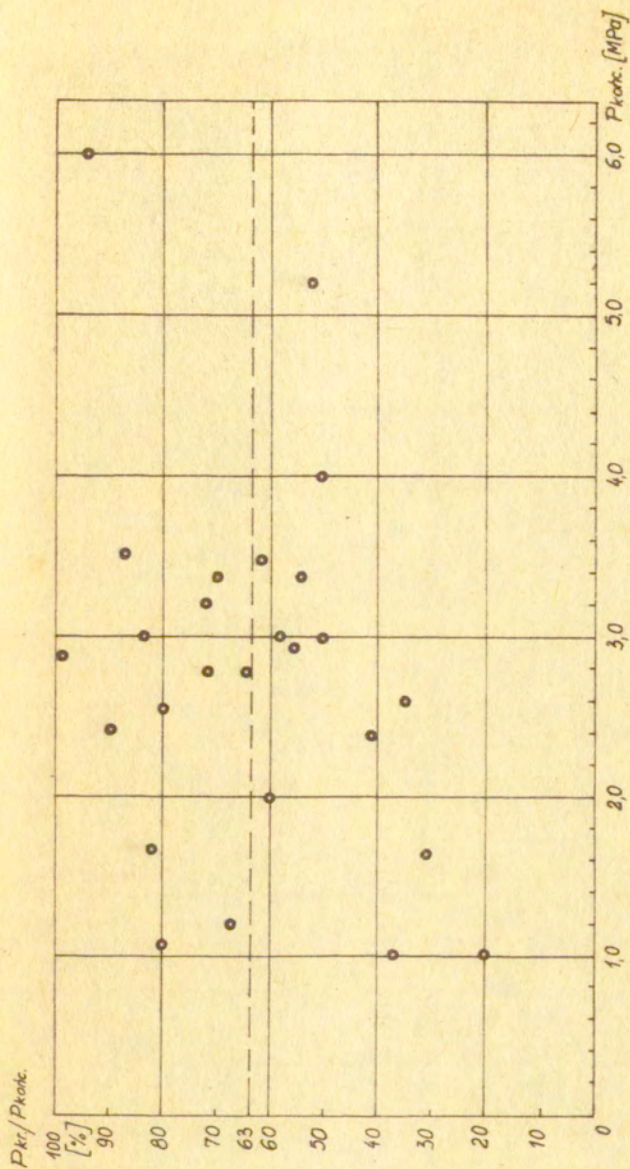
Rys. 9. Przebieg zmian ciśnienia p i sumy sygnałów emisji akustycznej Σn od czasu dla próbki o średniej wytrzymałości.



Rys. 10. Przebieg zmian ciśnienia p i sumy sygnałów emisji akustycznej Σn od czasu dla próbki o dużej wytrzymałości.



Rys. 11. Przebieg zmian ciśnienia P i sumy sygnałów emisji akustycznej Σn od czasu dla próbki o małej wytrzymałości.



Rys. 12. Zestawienie uzyskanych stosunków ciśnienia krytycznego wyznaczonego za pomocą emisji akustycznej od ciśnienia końcowego w zależności od wytrzymałości próbek.