

Krzysztof DUDZIK, Adam CHARCHALIS  
 Gdynia Maritime University (Uniwersytet Morski w Gdyni)

## THE USE OF ACOUSTIC EMISSION TO DETERMINE THE SAFE LOAD RANGE OF GFRP COMPOSITES USED IN SHIP AND AVIATION STRUCTURES

### Zastosowanie emisji akustycznej do wyznaczania bezpiecznego zakresu obciążeń kompozytów polimerowo- szklanych stosowanych w konstrukcjach okrętowych i lotniczych

**Abstract:** *The article presents the methodology and results of strength tests with simultaneous registration of acoustic emission. The subject of the research were glass fibre-reinforced plastics (GFRP) made by hand lamination. The obtained results allows to identify the stresses characteristic of the individual stages of the material failure process. These results can be the basis for determining the safe scope of application of the mentioned materials, especially helpful at the stage of designing ship and aircraft structures. The analysis of the test results allows to determine the safe level of stresses not exceeding about 70 MPa.*

**Keywords:** composite materials, strength tests, acoustic emission, destruction of materials

**Streszczenie:** *W artykule przedstawiono metodykę oraz wyniki badań wytrzymałościowych z jednoczesną rejestracją emisji akustycznej. Przedmiotem badań były materiały kompozytowe polimerowo-szklane wykonane metodą laminowania ręcznego. Uzyskane wyniki pozwalają na identyfikację naprężeń charakterystycznych dla poszczególnych etapów procesu niszczenia badanego materiału. Wyniki te mogą być podstawą do wyznaczania bezpiecznego zakresu stosowania wspomnianych materiałów, szczególnie pomocne na etapie projektowania konstrukcji okrętowych i lotniczych. Analiza wyników przeprowadzonych badań pozwalają określić bezpieczny poziom naprężeń nieprzekraczających ok. 70 MPa.*

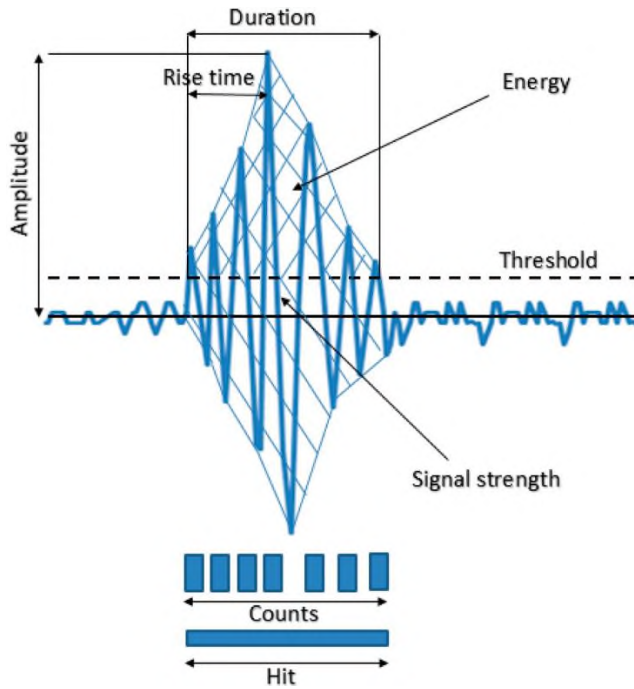
**Słowa kluczowe:** materiały kompozytowe, badania wytrzymałościowe, emisja akustyczna, niszczenie materiałów

## **1. Introduction**

Composite materials are readily used in various industries, including shipbuilding, aviation, automotive, etc. [4]. The reason for their choice by constructors is a relatively good strength-to-weight ratio and resistance to environmental deterioration [10, 13]. An important aspect is also the relatively simple process of manufacturing a given structure and the possibility of changing properties by, for example, changing the amount of reinforcement in its individual parts. One of the most popular composite materials used in the industry are Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP). The growing interest in composites as a construction material forced the adaptation of the methods of testing their mechanical properties in order to determine safe load ranges. It is extremely important in terms of ensuring the safety and reliability of use of the selected structure and forecasting its degradation. Classic methods, such as the static tensile test, allow to determine the stresses of the total failure of the tested composite, but don't provide unambiguous information when this process is initiated, eg matrix cracking, delamination, cracking of single reinforcement fibers, etc. [12, 14].

One of the methods of determining the successive stages of degradation is the combination of the classic tensile test with simultaneous recording of acoustic emission signals (AE- Acoustic Emission) [5, 8, 11, 13, 16]. According to the definition, acoustic emission as a physical phenomenon is a vanishing elastic wave, which is the effect of a sudden release of energy accumulated in a material by propagating micro-damages in the material or by a process (eg friction) [1, 2, 6]. Acoustic emission is also one of the non-destructive testing methods. The AE method is classified as a passive method with a very high sensitivity [9]. The stimulus causing the release of energy and the formation of elastic waves may be: a load, an environment or a change in temperature. The processes accompanied by acoustic emission are both changes in the micro and macro scale, including: cracks, friction, plastic deformation, corrosion, leaks, delamination, cracking of fibers and matrix in composites, etc. [3].

The acoustic emission signal can be characterized by such parameters as: amplitude, frequency, energy, signal rise time, duration of the event, number of crossings of the discrimination threshold - counts, RMS (root mean square), and others [6, 7]. An exemplary AE signal with marked characteristic parameters describing this signal is shown in fig. 1.



**Fig. 1.** An example of acoustic emission signal with marked characteristic parameters describing the signal [15]

The wide use of composite materials, as well as the continuous development in the field of their design, necessitates the development of effective methods for determining safe load ranges depending on the requirements of constructors. Classic methods such as the static tensile test, which is perfect for testing metals, are insufficient for complex materials such as composites. However, supplementing this method with the recording of acoustic emission during the stretching of samples provides a lot of useful information. The analysis of the obtained results allows to determine not only the maximum stress causing damage to the sample, but also to determine the first stages of failure, such as cracking of the matrix and reinforcement fibers.

From the many recorded AE signal parameters, the ones with the greatest diagnostic significance were selected: amplitude, RMS and the number of crossings of the threshold - counts. Other parameters, such as event duration, energy and frequency, were helpful in selecting significant changes in the aforementioned parameters and in separating the signal from the background noise.

## 2. The research methodology

The tested material was a GFRP (glass fibre reinforced plastics) made by hand lamination. 10 layers of glass fiber mat with a weight of 350 g/cm<sup>2</sup> were used as reinforcement. A polyester resin Polimal 1094 AWTP-1 was used as the matrix. Polimal 1094 AWTP-1 is a construction resin, medium-elastic, orthophthalic, accelerated, with low styrene emission and a hardening color indicator system. Metox 50 was used as a hardener in the amount of 2 g for every 100 g of composite. The resin comprised 60% by weight of the composite. The materials were produced by hand lamination with the use of acetyl rollers and brushes. A stainless steel mold was used and covered 3 times with Honey Wax. The proportions of the resin in relation to the reinforcement and the method of production were selected based on the literature and previous experience.

Flat samples were prepared in accordance with PN-EN ISO 527-4\_2000P by the method of water cutting. The measuring length was 50 mm. The static tensile test was carried out with a constant strain rate of 1 mm/min. The grips were crimped at a pressure of 50-70 bar.

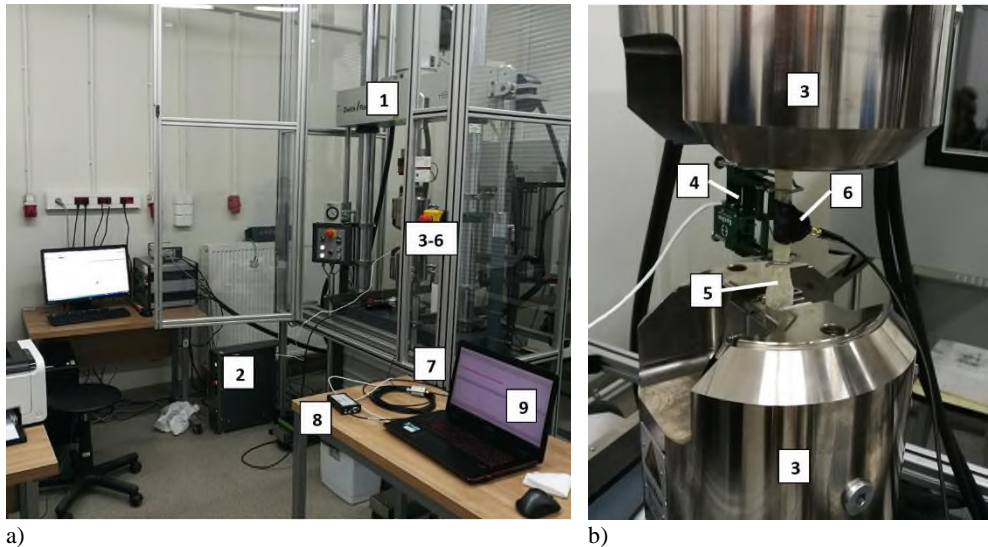
The tests were repeated five times. The view of the samples before and after the test is shown in fig. 2.



**Fig. 2.** View of specimens used in research: a) before, b) after the test

The research was carried out at the universal hydraulic testing machine Zwick&Roell MPMD P10B with dedicated TestXpert II software. Additionally, Epsilon 3542 extensometer was used for measuring elongation during test. Research of acoustic emission during monitoring tensile test of chosen composites was performed using a kit consisting of signal recorder type AE Node 1283USB, 75 kHz-1.1 MHz from Physical Acoustics Corporation. The kit includes pre-amplifier with the strengthening of 26 dB and acoustic emission measurement sensor VS 150M from Vallen Systeme, with a frequency range of 100 - 450 kHz. The device is connected via USB to a computer with AE Win for USB Version E5.30 software used for acquisition and analysing of recorded data.

View of laboratory stand used in research is presented in fig. 3.



**Fig. 3.** The view of the laboratory stand: a) general view of stand, b) view of specimen with sensor:  
1 – tensile stress machine, 2 – tensile stress machine computer, 3 – grips, 4 – extensometer,  
5 – specimen, 6 – AE sensor, 7 - preamplifier, 8 – AE recorder, 9 – AE computer

The sensor was fixed to the surface of the specimen by means of an elastic tape in the middle of it. Between the sensor and the specimen silicone grease was used as a coupling fluid.

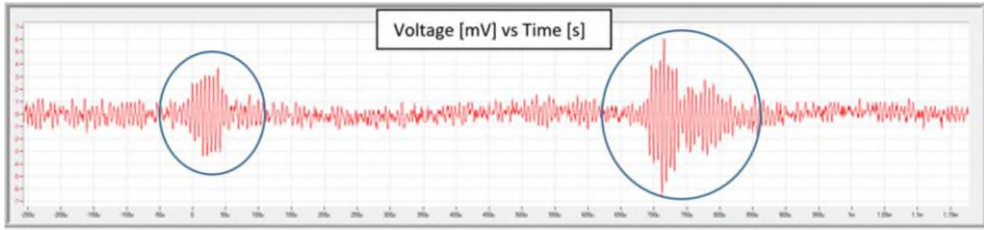
During the study recorded a number of parameters which were analyzed. These parameters were e.g.: amplitude and energy of AE signal, number of events, duration time, RMS of the signal, etc.

Before starting the research, the background noise level was recorded and adopted as the value of the threshold.

### **3. The research results**

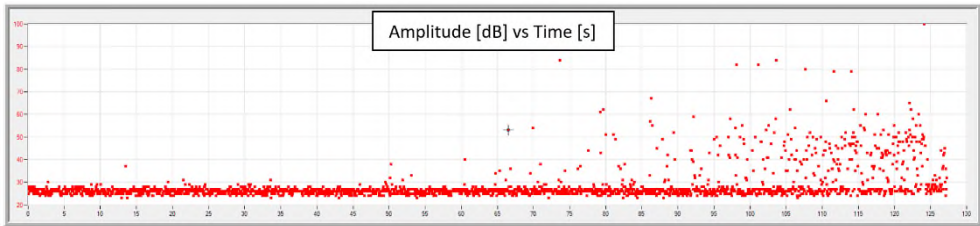
The results of the acoustic emission during the static tensile test of the composite material in the form of selected graphs characterizing the recorded signal are shown in figs. 4, 5, 6.

An exemplary graph showing the changes of signal amplitude in function of time, recorded during sample stretching is shown in fig. 4. Single short-term events (marked with circles) characteristic for cracks are visible – a sudden release of energy, visible as changes in the amplitude of the signal.

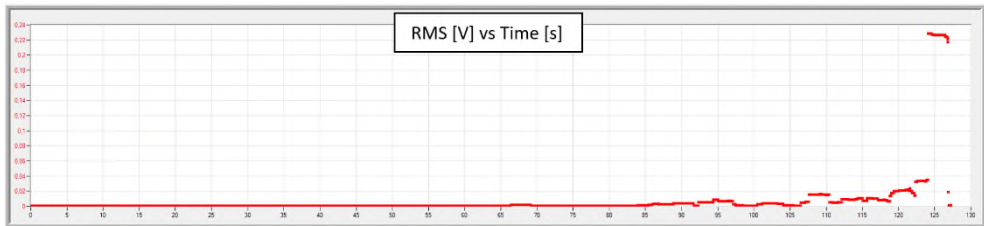


**Fig. 4.** An example of a AE signal recorded during tensile test – AE amplitude in function of time

Figures 5 and 6 show the change of the amplitude and RMS of the recorded signal respectively, as a function of time.



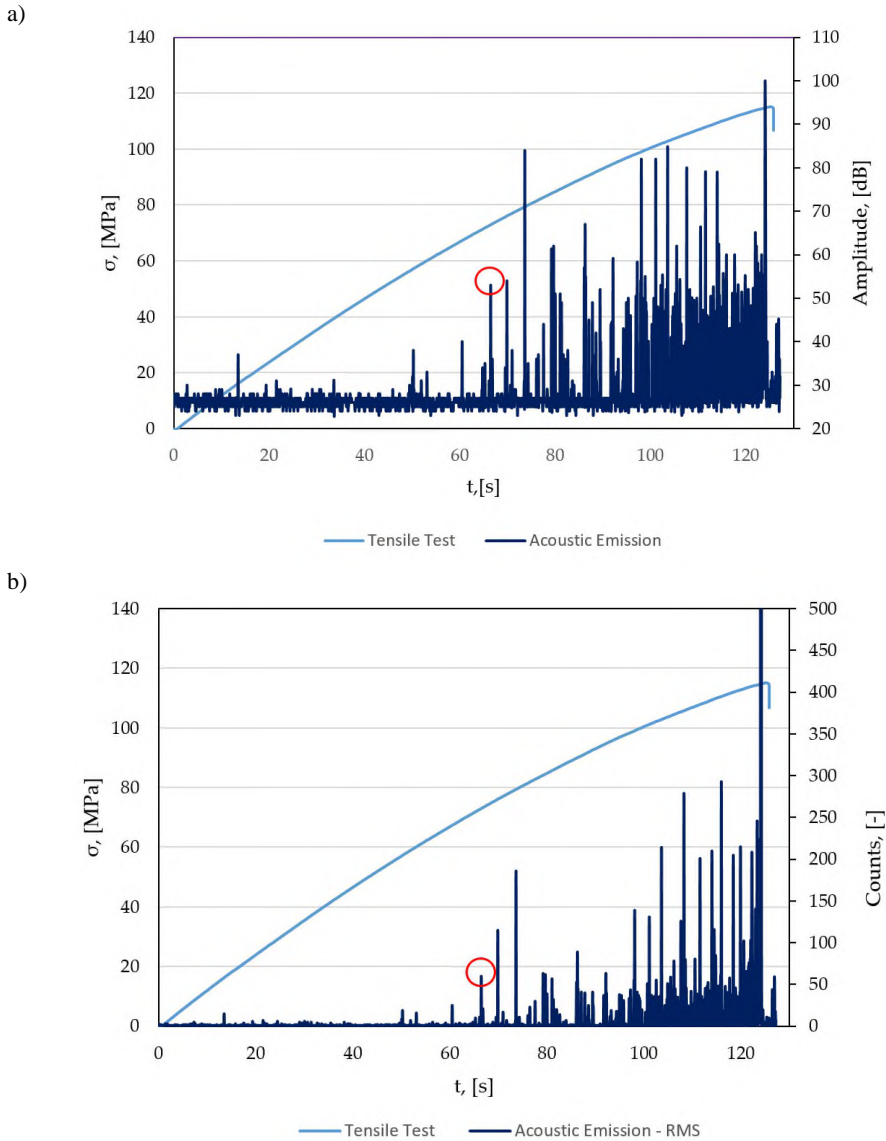
**Fig. 5.** An example of amplitude change in function of time



**Fig. 6.** An example of RMS change in function of time

The cross in fig. 5 shows the first amplitude (53 dB) of the signal, probably generated by a fiber break. Based on previous studies, it was determined that signals exceeding 50 dB are characteristic of this type of failure [10]. At the same time, an increase in the RMS value of the signal is also noticeable.

In order to determine the stresses that accompany the generation of AE signals at individual stages of the sample destruction during the tests, the results of the static tensile test and acoustic emission test were plotted on a joint plot. Figure 7 shows the change in stress and amplitude of AE signal as a function of time.



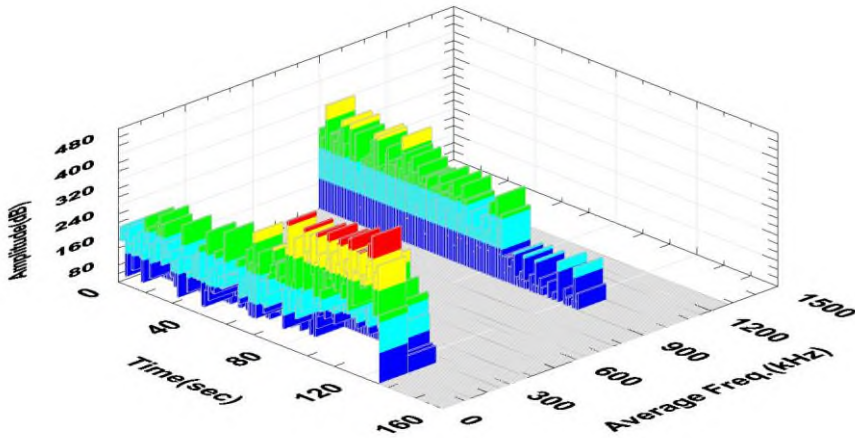
**Fig. 7.** An exemplary diagram of the stress and amplitude of the AE signal (a) and the number of AE counts (b) as a function of time (the circle marks the fiber break)

The first significant changes in the signal generated during the load changing of the tested samples were observed with a sharp increase in amplitude exceeding 53 dB. In the tests, the value of the first fiber breakage amplitude varied in the range of 53–75 dB. This corresponded to the stresses in the range of 69–84 MPa. After exceeding these stress values,



there was a sudden increase in the AE signal parameters generated by the destruction processes of the composite material. Amplitude changes characteristic for matrix cracking, both in the initial phase of the test, where clamping of the grips and as a result of increasing stress, are short-lived, which does not change the RMS of the AE signal. Only breaking the fibers causes the generation of signals with higher energy (marked with a circle in fig. 7). This causes a 2–4 fold increase in RMS (mean RMS value for signals at elastic – nonlinearity transition and matrix fracture is 0.6 mV). A similar nature was observed when considering the number of counts. Fracture of the fibers generates a signal with an average number of 3 times more counts compared to matrix cracking and delamination, and 10 times more than the background noise.

The AE signal was subjected to FFT (Fast Fourier Transform) analysis in order to determine the frequency characteristics of individual phenomena. Figure 8 shows the visualization of frequency and amplitude changes during the tests.



**Fig. 8.** Graph of the amplitude and frequency of the AE signal as a function of time

The analysis showed the complexity of the destruction process of the tested composite, where the high frequency signals characteristic for cracks and the low frequency signals typical for plastic deformation and internal friction between the matrix and the reinforcement fibers overlap.

Fiber breakage is characterized not only by a higher signal amplitude but also by a higher frequency. Signals with a frequency greater than 900 kHz are not relevant and come from background noise. The test results are additionally presented in the form of selected AE parameters and the corresponding stress value. The parameters characteristic for the first crack of the reinforcing fiber are presented in tab. 1.



**Table 1**

**Values of chosen parameters recorded during research**

Parameter	A [dB]	RMS [mV]	Counts [-]	Stress [MPa]
min.	53	1.2	60	69
max.	75	2.4	93	81
average	60	1.9	78	76
std. dev.	8.8	0.5	15	5.5

## 4. Conclusions

The obtained results allowed to determine the value of the amplitude at which the fibers break. In the tests, this value ranged from 53 to 75 dB. Fracture of the fibers causes the generation of signals of greater energy compared to the previously recorded matrix cracks and delamination. This results in a 2-4 fold increase in RMS. Based on the changes in AE parameters, the value of the stress corresponding to the cracking of the reinforcement fibers was determined. The minimum value of stress causing cracking of the first reinforcement fibers was in the range of 69–81 MPa, while it was 76 MPa on average.

The aim of the work was to determine the safe range of loads for the selected composite – GFRP. The results of the tests carried out allow to determine with high probability a safe level of stresses not exceeding about 70 MPa.

The method of combining the static tensile test and acoustic emission shows that it is possible to determine the safety factor of the tested composite materials during mechanical tests, as well as to verify this parameter determined with the use of advanced statistical methods.

## 5. References

1. Dudzik K., Charchalis A.: Possibility analysis of using acoustic emission for monitoring technical condition of compressed air installation of 3AL25/30 engine. *Journal of KONBiN*, Vol. 49, Iss. 3, 2019, DOI 10.2478/jok-2019-0047.
2. Dudzik K., Labuda W.: The Possibility of Applying Acoustic Emission and Dynamometric Methods for Monitoring the Turning Process. *Materials* 2020, 13, 2926.
3. Fotouhi M., Sadeghi S., Jalalvand M., Ahmadi M.: Analysis of the damage mechanisms in mixed-mode delamination of laminated composites using acoustic emission data clustering. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2017, 30.
4. Królikowski W.: *Polimerowe Kompozyty Konstrukcyjne*. PWN, Warszawa, 2012.

5. Kyzioł L., Panasiuk K., Hajdukiewicz G., Dudzik K.: Acoustic Emission and K-S Metric Entropy as Methods for Determining Mechanical Properties of Composite Materials. *Sensors* 2021, 21, 145.
6. Malecki I., Ranachowski J.: *Emisja Akustyczna, źródła, metody, zastosowania*. Pascal Publications, Warszawa 1994.
7. McCrory J.P., Al-Jumaili S.K., Crivelli D., Pearson M.R., Eaton M.J., Featherston C.A., Guagliano M., Holford K.M., Pullin R.: Damage classification in carbon fibre composites using acoustic emission: A comparison of three techniques. *Composites Part B: Engineering*, 2005, 68, 424–430.
8. Nikbakht M., Yousefi J., Hosseini-Toudeshky H., Minak G.: Delamination evaluation of composite laminates with different interface fibre orientations using acoustic emission features and micro visualization. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 113, 185–196.
9. Ono K.: Structural Health Monitoring of Large Structures Using Acoustic Emission—Case Histories. *Applied Sciences*, 2019, 9, 4602.
10. Panasiuk K., Dudzik K.: Determining the Stages of Deformation and Destruction of Composite Materials in a Static Tensile Test by Acoustic Emission. *Materials*, 2022, 15, 313, DOI 10.3390/ma15010313.
11. Panasiuk K., Dudzik K., Hajdukiewicz G.: Acoustic Emission as a Method for Analyzing Changes and Detecting Damage in Composite Materials During Loading. *Archives of Acoustics*, 2021, 46.
12. Saedifar M., Fotouhi M., Ahmadi Najafabadi M., Hosseini Toudeshky H., Minak G.: Prediction of quasi-static delamination onset and growth in laminated composites by acoustic emission. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 85.
13. Šofer M., Cienciala J., Fusek M., Pavlíček P., Moravec R.: Damage Analysis of Composite CFRP Tubes Using Acoustic Emission Monitoring and Pattern Recognition Approach. *Materials* 2021, 14, 786.
14. Wojas G.: Zagadnienia jakości badań nieniszczących. Wymagania ogólne w zakresie kompetencji laboratoriów badawczych]. *Przegląd Spawalnictwa*, 2015, 87.
15. Zaki A., Chai H., Aggelis D., Alver, N.: Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique. *Sensors*, 2015, 15(8), 19069–19101.
16. Zhuang X., Yan X.: Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission. *Composites Science and Technology*, 2006, 66.

# **ZASTOSOWANIE EMISJI AKUSTYCZNEJ DO WYZNACZANIA BEZPIECZNEGO ZAKRESU OBCIĄŻEŃ KOMPOZYTÓW POLIMEROWO- -SZKLANYCH STOSOWANYCH W KONSTRUKCJACH OKRĘTOWYCH I LOTNICZYCH**

## **1. Wprowadzenie**

Materiały kompozytowe są chętnie stosowane w różnych gałęziach przemysłu, m.in. w okrętownictwie, lotnictwie czy motoryzacji [4]. Powodem ich wyboru przez konstruktorów jest stosunkowo dobry stosunek wytrzymałości do masy oraz odporność na niszczenie środowiskowe [10, 13]. Ważnym aspektem jest także relatywnie prosty proces wytwarzania danej konstrukcji i możliwość zmiany właściwości poprzez np. zmianę ilości zbrojenia w poszczególnych jej fragmentach. Jednymi z najpopularniejszych materiałów kompozytowych stosowanych w przemyśle są polimery zbrojone włóknem szklanym (Glass Fibre Reinforced Plastics – GFRP). Wzrost zainteresowania kompozytami jako materiałami konstrukcyjnymi wymusił dostosowanie metod badania ich właściwości mechanicznych w celu określenia bezpiecznych zakresów obciążeń. Jest to niezwykle istotne pod kątem zapewnienia bezpieczeństwa i niezawodności użytkowania wybranej konstrukcji oraz prognozowania jej degradacji. Klasyczne metody, takie jak statyczna próba rozciągania, pozwalają określić naprężenia całkowitego zniszczenia badanego kompozytu, ale nie dają jednoznacznej informacji, kiedy następuje inicjacja tego procesu, np. pęknięcie osnowy, delaminacja, pęknięcie pojedynczych włókien zbrojenia itp. [12, 14].

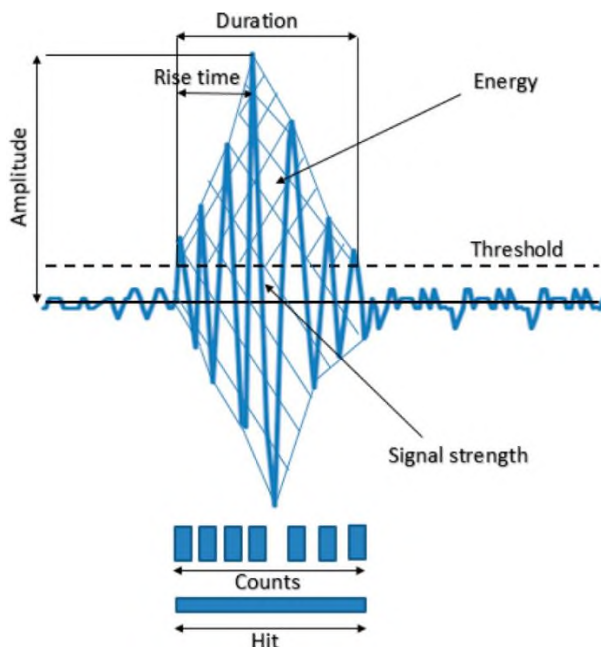
Jedną z metod wyznaczania kolejnych etapów degradacji jest połączenie klasycznej próby rozciągania z jednoczesną rejestracją sygnałów emisji akustycznej (AE – Acoustic Emission) [5, 8, 11, 13, 16]. Zgodnie z definicją emisja akustyczna jako zjawisko fizyczne to zanikająca fala sprężysta, będąca efektem gwałtownego wyzwolenia energii nagromadzonej w materiale przez propagujące mikrouszkodzenia w materiale lub przez proces (np. tarcie) [1, 2, 6].

Emisja akustyczna to także jedna z metod badań nieniszczących. Metoda AE jest zaliczana do metod pasywnych o bardzo wysokiej czułości [9]. Bodźcem wywołującym wyzwolenie energii i powstawanie fal sprężystych może być działanie obciążenia, środowiska czy zmiana temperatury, a procesy, którym towarzyszy emisja akustyczna to zmiany zarówno w skali mikro, jak i makro, m.in.: pęknięcia, tarcie, odkształcenia plastyczne, korozja, nieszczelności, delaminacja, pęknięcie włókien i osnowy w kompozytach [3].

Sygnał emisji akustycznej może być charakteryzowany takimi parametrami jak: amplituda, częstotliwość, energia, czas narastania sygnału, czas trwania zdarzenia, liczba

przekroczeń progu dyskryminacji – liczba zdarzeń, wartość skuteczna sygnału RMS i in. [6, 7].

Przykładowy sygnał AE wraz z zaznaczonymi charakterystycznymi parametrami opisującymi ten sygnał przedstawiono na rys. 1.



**Rys. 1.** Przykładowy wykres przedstawiający dyskretny sygnał AE wraz z zaznaczonymi charakterystycznymi parametrami opisującymi sygnał [15]

Szerokie zastosowanie materiałów kompozytowych, a także ciągły rozwój w zakresie ich projektowania wymusza konieczność opracowania skutecznych metod wyznaczania bezpiecznych zakresów pracy w zależności od wymagań konstruktorów. Klasyczne metody takie jak statyczna próba rozciągania, która doskonale sprawdza się w przypadku badania metali, okazują się niewystarczające w przypadku tak złożonych materiałów jak kompozyty. Jednakże uzupełnienie tej metody o rejestrację emisji akustycznej podczas rozciągania próbek dostarcza wielu przydatnych informacji. Analiza uzyskanych wyników pozwala wyznaczyć nie tylko maksymalne naprężenie powodujące zniszczenie próbki, ale także określić pierwsze etapy niszczenia, takie jak pęknięcie osnowy i włókien zbrojenia.

Z wielu rejestrowanych parametrów sygnału AE wyselekcjonowano te, które charakteryzują się największym znaczeniem diagnostycznym: amplituda, wartość skuteczna RMS i liczba przekroczeń progu dyskryminacji – liczba zdarzeń. Pozostałe parametry, jak np. czas trwania zdarzeń, energia i częstotliwość były natomiast pomocne w wyselekcjonowaniu istotnych zmian we wspomnianych wcześniej parametrach i oddzieleniu sygnału od szumu tła akustycznego.

## 2. Metodyka badań

Badany materiał stanowił kompozyt polimerowo szklany wykonany metodą laminowania ręcznego. Jako zbrojenie zastosowano 10 warstw maty z włókna szklanego o gramaturze 350 g/cm<sup>2</sup>. Jako osnowę zastosowano żywicę poliestrową Polimal 1094 AWTP-1. Polimal 1094 AWTP-1 jest żywicą konstrukcyjną, średnio elastyczną, ortoftalową, przyspieszoną, o niskiej emisji styrenu oraz systemem barwnego wskaźnika utwardzania. Jako utwardzacz zastosowano Metox 50 w ilości 2 g na każde 100 gram kompozytu. Żywica stanowiła 60% wagowo kompozytu. Materiały wytwarzano metodą laminowania ręcznego, z wykorzystaniem wałków acetylowych oraz pędzli. Zastosowano formę ze stali nierdzewnej, którą pokryto trzy razy rozdzielnikiem Honey Wax. Proporcje żywicy względem zbrojenia i sposób wytwarzania dobrano na podstawie literatury oraz wcześniejszych doświadczeń.

Próbki płaskie przygotowano zgodnie z normą PN-EN ISO 527-4\_2000P metodą cięcia wodnego. Długość pomiarowa wynosiła 50 mm. Badania statycznej próby rozciągania przeprowadzono ze stałą prędkością odkształcania 1 mm/min. Szczęki zaciskano z ciśnieniem o wartości 50-70 barów. Badania powtórzono pięciokrotnie. Widok próbek przed i po badaniach przedstawiono na rys. 2.

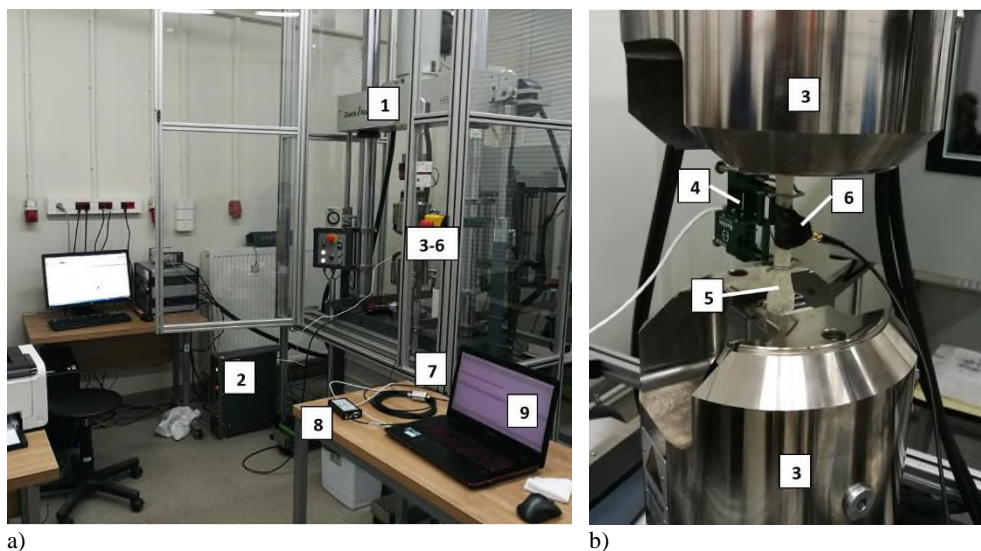


**Rys. 2.** Widok próbek wykorzystanych w badaniach: a) przed testem, b) po teście

Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Zwick&Roell MPMD P10B wraz z dedykowanym oprogramowaniem TestXpert II. Dodatkowo stosowano ekstensometr Epsilon 3542 do pomiaru wydłużenia próbki w czasie badań.

Badania emisji akustycznej (AE) towarzyszącej procesowi monitorowania zmian w próbce kompozytowej podczas statycznej próby rozciągania przeprowadzono za pomocą zestawu składającego się z rejestratora sygnału typu AE Node 1283USB, o zakresie 75 kHz – 1.1 MHz firmy Physical Acoustics Corporation. W skład zestawu wchodzi przedwzmacniacz o wzmocnieniu 26 dB oraz czujnik pomiaru sygnału AE, typu VS 150M firmy Vallen Systeme, o zakresie częstotliwości 100-450 kHz. Urządzenie jest połączone przez USB z komputerem, w którym zainstalowano oprogramowanie AE Win for USB Version E5.30 do rejestracji i analizy danych.

Stanowisko laboratoryjne wykorzystane w badaniach przedstawiono na rys. 3.



**Rys. 3.** Stanowisko laboratoryjne: a) ogólny widok stanowiska, b) widok próbki z czujnikiem:  
1 – maszyna wytrzymałościowa, 2 – komputer maszyny wytrzymałościowej, 3 – uchwyty,  
4 – ekstensometr, 5 – próbka, 6 – czujnik AE, 7 – przedwzmacniacz, 8 – rejestrator AE,  
9 – komputer AE

Czujnik zamontowano do powierzchni próbki za pomocą taśmy elastycznej w połowie jej długości. Pomiędzy czujnikiem a próbką zastosowano smar silikonowy pełniący funkcję cieczy sprzęgającej.

Podczas badań rejestrowano wiele parametrów, które następnie poddano analizie. Tymi parametrami były między innymi: amplituda i energia sygnału AE, liczba zdarzeń, czas trwania zdarzenia, wartość skuteczna sygnału – RMS.

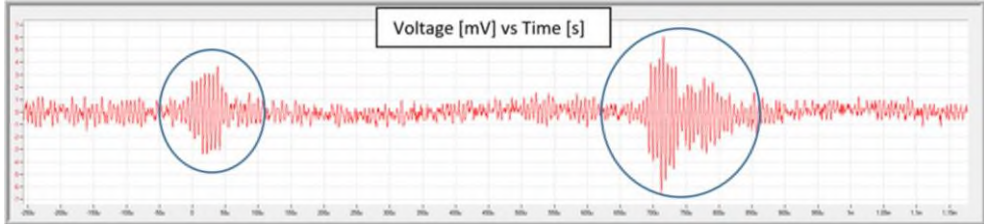
Przed przystąpieniem do badań zarejestrowano poziom szumu tła akustycznego i przyjęto go jako wartość progu dyskryminacji.

### 3. Wyniki badań

Wyniki badań emisji akustycznej podczas statycznej próby rozciągania materiału kompozytowego w formie wybranych wykresów charakteryzujących zarejestrowany sygnał przedstawiono na rys. 4, 5, 6.

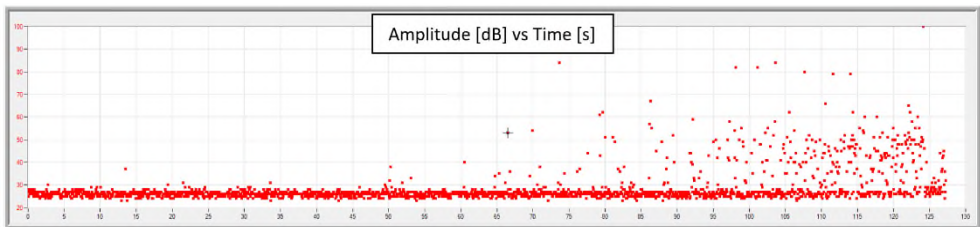
Przykładowy wykres przedstawiający zmianę amplitudy sygnału w funkcji czasu, zarejestrowany podczas rozciągania próbki przedstawiono na rys. 4. Widoczne są

pojedyncze krótkotrwałe zdarzenia (zaznaczone okręgami), charakterystyczne dla pęknięć – gwałtowne uwolnienie energii, widoczne jako zmiany amplitudy sygnału.

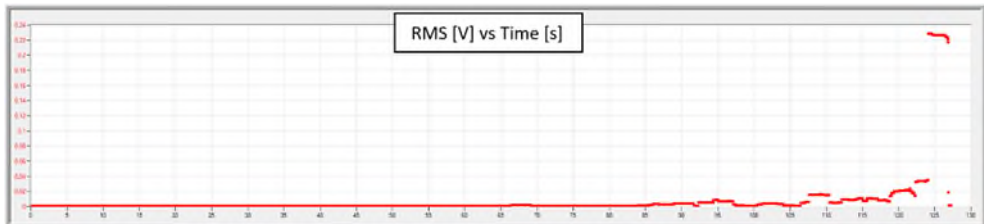


**Rys. 4.** Przykładowy sygnał zarejestrowany podczas rozciągania próbki – amplituda sygnału AE w funkcji czasu

Na rys. 5 i 6 przedstawiono zmianę odpowiednio amplitudy i wartości skutecznej zarejestrowanego sygnału – RMS w funkcji czasu.



**Rys. 5.** Przykładowy wykres zmiany amplitudy sygnału AE w funkcji czasu

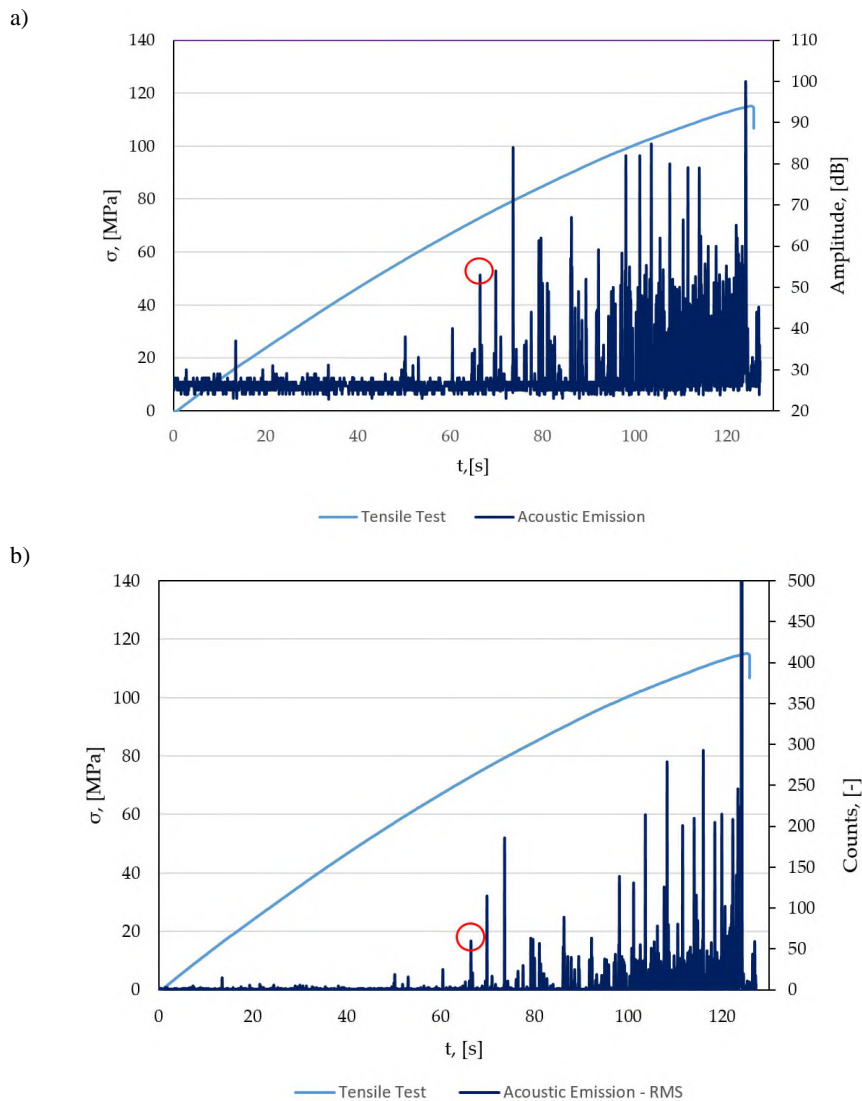


**Rys. 6.** Przykładowy wykres zmiany RMS sygnału AE w funkcji czasu

Krzyżykiem na rys. 5 zaznaczono pierwszą amplitudę (53 dB) sygnału prawdopodobnie wygenerowaną przez pęknięcie włókna. Na podstawie wcześniejszych badań określono, że sygnały przekraczające 50 dB są charakterystyczne dla tego typu zniszczenia [10]. Zauważalny jest także w tym samym momencie wzrost wartości RMS sygnału.

W celu określenia naprężeń, jakie towarzyszą generowaniu sygnałów AE w poszczególnych etapach niszczenia próbki w czasie badań naniesiono wyniki ze statycznej próby rozciągania i emisji akustycznej na wspólny wykres. Na rys. 7 przedstawiono zmianę naprężenia i amplitudy AE w funkcji czasu.





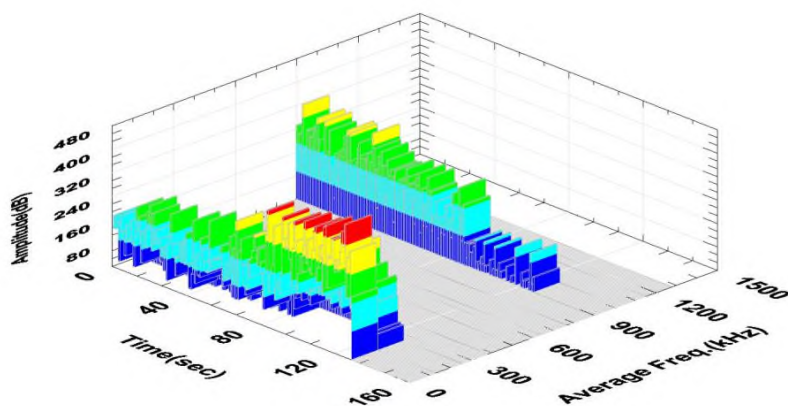
**Rys. 7.** Przykładowy wykres naprężenia oraz amplitudy sygnału AE (a) i liczby zdarzeń AE (b) funkcji czasu (okręgiem zaznaczono pęknięcie włókna)

Pierwsze znaczące zmiany sygnału generowanego podczas zmiany obciążenia badanych próbek zaobserwowano przy gwałtownym wzroście amplitudy, przekraczającym 53 dB. W badaniach wartość amplitudy pierwszego pęknięcia włókna zmieniała się w zakresie 53–75 dB. Odpowiadało to naprężeniom w zakresie 69–84 MPa. Po

przekroczeniu tych wartości naprężeń następował nagły wzrost parametrów sygnałów AE generowanych przez procesy niszczenia materiału kompozytowego.

Zmiany amplitudy charakterystyczne dla pęknięcia osnowy, zarówno w początkowej fazie próby, gdzie prawdopodobnie dochodzi do zaciskania się uchwytów, jak również w wyniku rosnącego naprężenia, są krótkotrwałe, co nie powoduje zmiany RMS sygnału AE. Dopiero pęknięcie włókien powoduje generowanie sygnałów o większej energii (zaznaczono okręgiem na rys. 7). Powoduje to 2–4-krotny wzrost RMS (średnia wartość RMS dla sygnałów przy odkształceniach lepkosprężystych i pękaniu osnowy wynosi 0,6 mV). Podobny charakter zaobserwowano, rozpatrując liczbę zdarzeń. Pęknięcie włókien powoduje generowanie sygnału o średnio trzy razy większej liczbie zdarzeń w porównaniu do pęknięcia osnowy i delaminacji oraz 10-krotnie więcej w porównaniu do szumu tła akustycznego.

Sygnał AE poddano analizie FFT (Fast Fourier Transform) w celu określenia charakterystyk częstotliwościowych poszczególnych zjawisk. Na rys. 8 przedstawiono wizualizację zmian częstotliwości i amplitudy w czasie badań.



**Rys. 8.** Wykres amplitudy i częstotliwości sygnału AE funkcji czasu

Przeprowadzona analiza wykazała złożoność procesu niszczenia badanego kompozytu, gdzie nakładają się na siebie sygnały wysokoczęstotliwościowe, charakterystyczne dla pęknięć, oraz niskoczęstotliwościowe, typowe dla odkształceń lepkosprężystych i tarcia wewnętrznego między osnową i włóknami zbrojenia.

Pęknięcie włókien charakteryzuje się nie tylko większą amplitudą sygnału, ale także wyższą częstotliwością. Sygnały o częstotliwości przekraczającej 900 kHz nie są istotne i pochodzą od szumu tła akustycznego.

Wyniki badań przedstawiono dodatkowo w postaci wybranych parametrów AE i odpowiadającej im wartości naprężenia. Parametry charakterystyczne dla pierwszego pęknięcia włókna zbrojącego przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1

**Wartości wybranych parametrów zarejestrowanych podczas badań**

Parametr	A [dB]	RMS [mV]	Liczba zdarzeń [-]	naprężenie [MPa]
Wartość min.	53	1,2	60	69
Wartość max.	75	2,4	93	81
Wartość średnia	60	1,9	78	76
Odchylenie std.	8,8	0,5	15	5,5

**4. Wnioski**

Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie wartości amplitudy, przy której dochodzi do pęknięcia włókien. W badaniach ta wartość zawierała się od 53 do 75 dB. Pęknięcie włókien powoduje generowanie sygnałów o większej energii w porównaniu do wcześniej rejestrowanych pęknięć osnowy i delaminacji. Powoduje to 2–4-krotny wzrost RMS. Na podstawie zmian parametrów AE określono wartość naprężenia odpowiadającemu zjawisku pęknięcia włókien zbrojenia. Minimalna wartość naprężenia powodującego pęknięcie pierwszych włókien zbrojenia była w zakresie 69–81 MPa, natomiast średnio było to 76 MPa.

Celem pracy było wyznaczenie bezpiecznego zakresu obciążeń dla wybranego kompozytu polimerowo-szklanego. Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają z dużym prawdopodobieństwem określić bezpieczny poziom naprężeń nieprzekraczających ok. 70 MPa.

Metoda polegająca na połączeniu statycznej próby rozciągania i emisji akustycznej wskazuje, że jest możliwe wyznaczenie współczynnika bezpieczeństwa rozpatrywanych materiałów kompozytowych w trakcie badań mechanicznych, jak również weryfikacja tego parametru wyznaczonego z wykorzystaniem zaawansowanych metod statystycznych.

**5. Literatura**

1. Dudzik K., Charchalis A.: Possibility analysis of using acoustic emission for monitoring technical condition of compressed air installation of 3AL25/30 engine. *Journal of KONBiN*, Vol. 49, Iss. 3, 2019, DOI 10.2478/jok-2019-0047.
2. Dudzik K., Labuda W.: The Possibility of Applying Acoustic Emission and Dynamometric Methods for Monitoring the Turning Process. *Materials* 2020, 13, 2926.
3. Fotouhi M., Sadeghi S., Jalalvand M., Ahmadi M.: Analysis of the damage mechanisms in mixed-mode delamination of laminated composites using acoustic emission data clustering. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2017, 30.
4. Królikowski W.: *Polimerowe Kompozyty Konstrukcyjne*. PWN, Warszawa, 2012.

5. Kyzioł L., Panasiuk K., Hajdukiewicz G., Dudzik K.: Acoustic Emission and K-S Metric Entropy as Methods for Determining Mechanical Properties of Composite Materials. *Sensors* 2021, 21, 145.
6. Malecki I., Ranachowski J.: *Emisja Akustyczna, źródła, metody, zastosowania*. Pascal Publications, Warszawa 1994.
7. McCrory J.P., Al-Jumaili S.K., Crivelli D., Pearson M.R., Eaton M.J., Featherston C.A., Guagliano M., Holford K.M., Pullin R.: Damage classification in carbon fibre composites using acoustic emission: A comparison of three techniques. *Composites Part B: Engineering*, 2005, 68, 424–430.
8. Nikbakht M., Yousefi J., Hosseini-Toudeshky H., Minak G.: Delamination evaluation of composite laminates with different interface fibre orientations using acoustic emission features and micro visualization. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 113, 185–196.
9. Ono K.: Structural Health Monitoring of Large Structures Using Acoustic Emission—Case Histories. *Applied Sciences*, 2019, 9, 4602.
10. Panasiuk K., Dudzik K.: Determining the Stages of Deformation and Destruction of Composite Materials in a Static Tensile Test by Acoustic Emission. *Materials*, 2022, 15, 313, DOI 10.3390/ma15010313.
11. Panasiuk K., Dudzik K., Hajdukiewicz G.: Acoustic Emission as a Method for Analyzing Changes and Detecting Damage in Composite Materials During Loading. *Archives of Acoustics*, 2021, 46.
12. Saedifar M., Fotouhi M., Ahmadi Najafabadi M., Hosseini Toudeshky H., Minak G.: Prediction of quasi-static delamination onset and growth in laminated composites by acoustic emission. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 85.
13. Šofer M., Cieniala J., Fusek M., Pavlíček P., Moravec R.: Damage Analysis of Composite CFRP Tubes Using Acoustic Emission Monitoring and Pattern Recognition Approach. *Materials* 2021, 14, 786.
14. Wojas G.: *Zagadnienia jakości badań nieniszczących. Wymagania ogólne w zakresie kompetencji laboratoriów badawczych*. Przegląd Spawalnictwa, 2015, 87.
15. Zaki A., Chai H., Aggelis D., Alver, N.: Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique. *Sensors*, 2015, 15(8), 19069–19101.
16. Zhuang X., Yan X.: Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission. *Composites Science and Technology*, 2006, 66.

