



Tomasz Lusa<sup>1</sup>, Krystian Paradowski<sup>2</sup>, Marcin Ciesielski<sup>3</sup>, Danuta Witemberg-Perzyk<sup>4</sup>, Krzysztof J. Kurzydłowski<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 5</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Zakład Projektowania Materiałów, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa, Poland

<sup>4</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Mechaniki i Konstrukcji, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, Poland

\* Corresponding author. E-mail: tlusa@inmat.pw.edu.pl

Otrzymano (Received) 20.02.2008

## ZASTOSOWANIE EMISJI AKUSTYCZNEJ DO MONITOROWANIA DEGRADACJI KOMPOZYTÓW WŁÓKNISTYCH

Przedstawiono badania wpływu szybkości odkształcenia na degradację kompozytu włóknistego za pomocą pomiarów emisyjności akustycznej na przykładzie kompozytów o osnowie poliwęglanowej wzmocnionych tkaniną szklaną. Charakterystyka sygnałów emisji akustycznej (EA) zbieranych podczas prób rozciągania wykazała różnice w typach zjawisk zachodzących w strukturze materiału podczas odkształcania z różną szybkością, związane z efektem historii odkształcenia. Przyczyną tego efektu są procesy zachodzące z różną szybkością i przy różnych wartościach naprężeń na poziomie mikrostrukturalnym. Dodatkowym celem badań, oprócz opisanego efektu historii odkształcenia, było określenie możliwości badania zjawisk zachodzących w kompozycie włóknistym przy różnym sposobie obciążania metodą EA.

Słowa kluczowe: emisja akustyczna, degradacja, kompozyt włóknisty

## APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE TO MONITORING OF DEGRADATION OF FIBER REINFORCED COMPOSITES

The paper presents investigations of tensile strain rate influence on structural degradation of glass fabric reinforced polycarbonate composite with acoustic emission (AE) technique. Tests were carried out with two different types of applied load. AE characteristics of signals acquired during tensile tests showed differences in types of phenomena occurring in material's structure during deformation. These phenomena are related to an effect of material deformation history. Causes of this effect are processes taking place with different rate and with different value of stresses in microscale. Analysis of AE parameters in three ranges of the material plastic deformation showed an occurrence of two damage mechanisms which is clearly visible as high peaks at different frequencies. Samples under tension load according to A scheme showed large amount of signals with frequencies 150+205 kHz. In the case of samples under tension load according to B scheme showed, domination of signals with frequencies 150+250 kHz, moreover there occur much more signals with frequencies from range 300+550 kHz. Based on differences in frequencies of acquired signals, was found that that for investigated material occur two damage mechanisms related with type of load scheme. Analysis of Acoustic Emission signals for samples related to different types of load scheme, showed that effect of material deformation history has significant influence on its tensile strength. Estimation of Acoustic Emission changes for composite materials produced by plastic deformation give possibility to assume temporary stage of microstructure degradation. These results confirmed possibility of structural degradation monitoring of fiber reinforced composites using AE technique.

Keywords: acoustic emission, degradation, fibre reinforced composite

## WPROWADZENIE

W trakcie eksploatacji konstrukcji wytworzonych z materiałów kompozytowych niezwykle ważną jest możliwość wykrywania ewentualnych defektów powstających pod działaniem obciążeń. W skład kompozytu wchodzi zwykle komponenty o diametralnie różnych właściwościach, co skutkuje powstawaniem złożonych stanów naprężeń, głównie na granicach faz, sprzyjając tworzeniu się różnego rodzaju defektów strukturalnych, prowadzących do delaminacji, pęknięcia włókien i pęknięcia osnowy.

Ponieważ rozwój pęknięć w kompozytach może w krótkim czasie doprowadzić do zniszczenia konstrukcji, a co za tym idzie, spowodować znaczne straty (materiałowe, środowiskowe, ludzkie), niezbędne są okresowe badania metodami nieniszczącymi pod kątem oceny stopnia ich degradacji strukturalnej. Doskonałą metodą jest, w tym kontekście, emisja akustyczna, pozwalająca badać elementy konstrukcyjne bez potrzeby wyłączenia ich z eksploatacji, a często w rzeczywistych warunkach pracy.

Emisja akustyczna (EA) powstaje jako chwilowa fala sprężysta generowana w materiale na skutek lokalnej, dynamicznej zmiany w jego strukturze, w miejscach zwanych źródłami EA. Źródłami EA mogą być różnego rodzaju defekty strukturalne rozwijające się w materiale pod wpływem przyłożonego bodźca zewnętrznego. Fala sprężysta generowana ze źródła propaguje do powierzchni, gdzie może być rejestrowana przez odpowiednie czujniki. Parametry sygnałów akustycznych, takie jak energia, amplituda, tempo zliczeń lub zakres częstotliwości zbieranych sygnałów, pozwalają ocenić aktywność lokalizowanych źródeł EA, dając w ten sposób cenne informacje o stopniu degradacji materiału.

Celem pracy było zbadanie możliwości zastosowania EA do rejestracji degradacji struktury kompozytu podczas działania obciążeń mechanicznych, a zwłaszcza możliwości wykrywania różnic mechanizmów niszczenia tych materiałów związanych z różnym przebiegiem obciążania w czasie, czyli efektami historii odkształcenia.

## METODYKA BADAŃ

Badanym materiałem był kompozyt o osnowie termoplastycznej (poliwęglan) wzmacniany symetryczną tkaniną szklaną. Wyprodukowany został metodą statycznego prasowania w postaci płyt wykonanych z ośmiu warstw tkaniny typu 8H-Satin style 7581 ułożonych w jednym kierunku i przełożonych warstwami folii poliwęglanowej typu Macrofol. Udział objętościowy włókien w kompozycie wynosił 55%. Próbkę wycięte z płyt w kierunku włókien miały kształt pasków o wymiarach 160×15×2 mm. W miejscach uchwytów próbek zastosowano przyklejane nakładki kompozytowe o wymiarach 40×15×2 mm.

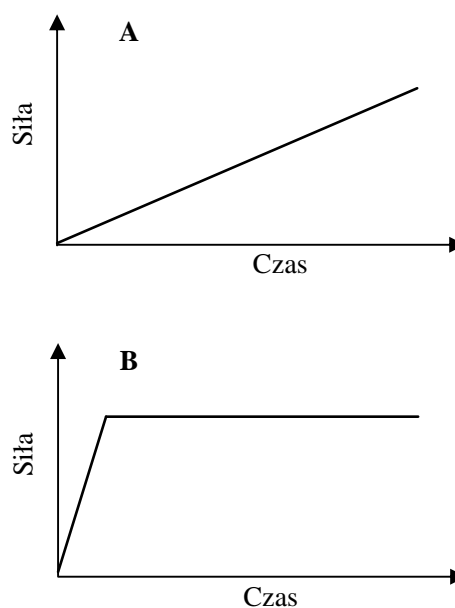
Próby wytrzymałościowe jednoosiowego rozciągania zostały wykonane na dynamicznej, hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej MTS 858 Table Top System, przy zastosowaniu następujących parametrów: maksymalny zakres siły - 25 kN, maksymalny zakres skoku - 60 mm, dopuszczalny błąd maszyny - 0,5%. Jako zmienną sterującą zastosowano prędkość przesuwu tłoka.

Emisję akustyczną rejestrowano podczas prób przeprowadzonych wg dwóch programów obciążenia, pokazanych schematycznie na rysunku 1. Program wg schematu A polegał na rozciąganiu próbki do zerwania z małą (0,05 mm/min), stałą prędkością przemieszczania trawersy maszyny, zaś wg schematu B - na szybkim obciążeniu do określonego poziomu siły (10 kN) i pełzaniu do zerwania.

Do badań metodą EA użyto wielokanałowego systemu AMSY-5 firmy Vallen. Do detekcji sygnałów użyto dwóch typów czujników:

- VS150-RIC o wzmacnieniu 34 dB,
- WD-40 o wzmacnieniu 40 dB.

Użycie dwóch rodzajów czujników dawało możliwość rozpoznania, czy poszczególne mechanizmy niszczenia badanego materiału są źródłem sygnałów o różnej częstotliwości.



Rys. 1. Schematy obciążeń, w trakcie których rejestrowano emisję akustyczną: A) rozciąganie do zerwania z szybkością 0,05 mm/min, B) rozciąganie do obciążenia 10 kN z szybkością 5 mm/min, a następnie wytrzymanie do zerwania

Fig. 1. Different types of applied tension load: A) constant displacement rate 0.05 mm/min until failure, B) constant displacement rate 5 mm/min up to 10 kN, and holding until failure

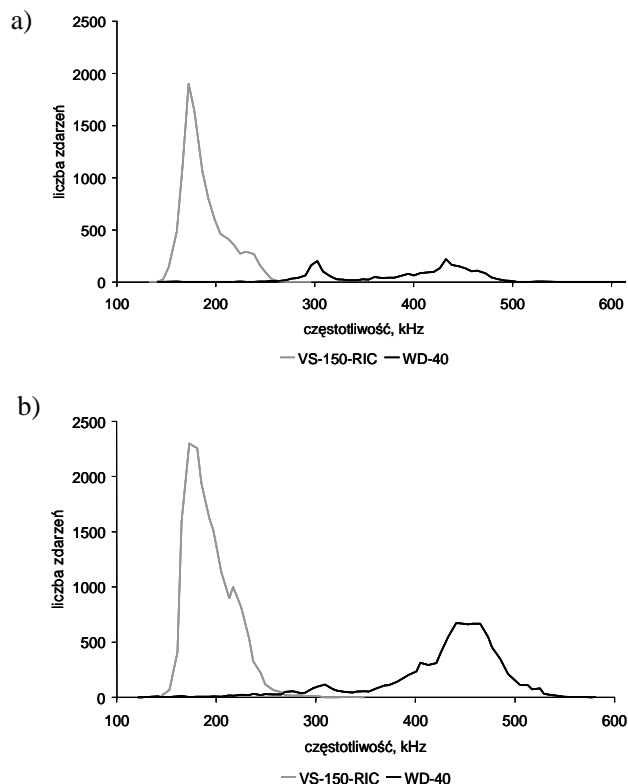
## OPIS WYNIKÓW

Analiza zapisów emisji akustycznej pozwoliła na wytypowanie dwóch parametrów opisujących sygnały: liczby zdarzeń w funkcji częstotliwości i tempa zliczeń w funkcji odkształcenia, których porównanie pozwoliło na ocenę zmian emisyjności akustycznej badanego materiału pod wpływem obciążenia.

Wykresy rozkładu liczby zdarzeń w funkcji częstotliwości dla próbek rozciąganych według dwóch założonych schematów (rys. 1) przedstawiono na rysunku 2.

Analizując wykres przedstawiony na rysunku 2a, można zauważyć, że podczas powolnego rozciągania znaczny udział w rejestrowanych zdarzeniach EA mają sygnały o zakresie częstotliwości od 150 do 250 kHz. Rysunek 2b przedstawia wyniki dla próbki rozciąganej z szybkością 5 mm/min do obciążenia 10 kN, która następnie została wytrzymana przy tym obciążeniu do zerwania. W tym przypadku próbka również generuje sygnały z zakresu częstotliwości od 150 do 250 kHz, jednakże dodatkowo występuje znaczny wzrost ilości zdarzeń z zakresu 300÷550 kHz. Na podstawie wykresów zaprezentowanych na rysunku 2 oraz przy założeniu, że zdarzenia o różnych częstotliwościach są efektem występowania różnego rodzaju źródeł EA, stwier-

dzono, że dla badanego materiału występują różne mechanizmy zniszczenia, zależne od sposobu przyłożonego obciążenia (czasu, szybkości itp.).



Rys. 2. Wykres liczby zdarzeń w funkcji częstotliwości: a) próbka rozciągana według schematu A; b) próbka rozciągana według schematu B

Fig. 2. Counts vs frequency diagrams: a) specimen under tension load according to A scheme; b) specimen under tension load according to B scheme

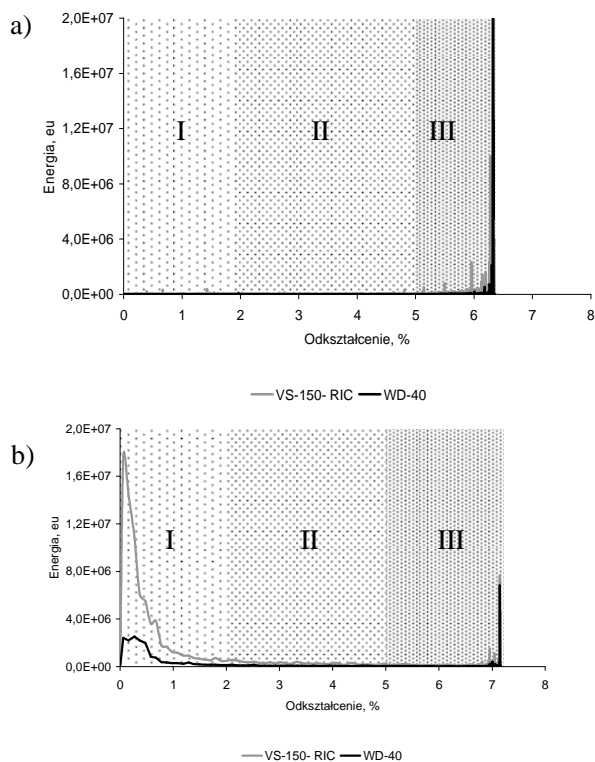
Na rysunku 3 przedstawiono zależność energii rejestrowanych sygnałów w funkcji odkształcenia umownego, obliczanego jako stosunek skoku trawersy maszyny do długości roboczej próbki (długości próbki pomiędzy częściami uchwytyowymi).

W obydwu przypadkach zaobserwowano podobną, maksymalną, chwilową wartość energii sygnałów EA. W przypadku próbki rozciąganej według schematu A wartość ta wystąpiła w chwili zerwania próbki. Dla próbki poddanej obciążeniu według schematu B maksymalne wartości wystąpiły w zakresie pierwszych 2% odkształcenia. Fakt ten potwierdza ogólną zasadę mówiącą, że wraz ze wzrostem szybkości (prędkości) odkształcenia wzrasta intensywność (energia) sygnałów.

Uzyskane wyniki zostały podzielone na następujące zakresy:

- I - zakres 2% odkształcenia,
- II - zakres od 2 do 5% odkształcenia,
- III - zakres od 5% odkształcenia do zerwania próbki.

W celu dokładniejszej oceny dokonano analizy wyników w poszczególnych zakresach.



Rys. 3. Wykres energii w funkcji odkształcenia: a) próbka rozciągana według schematu A; b) próbka rozciągana według schematu B

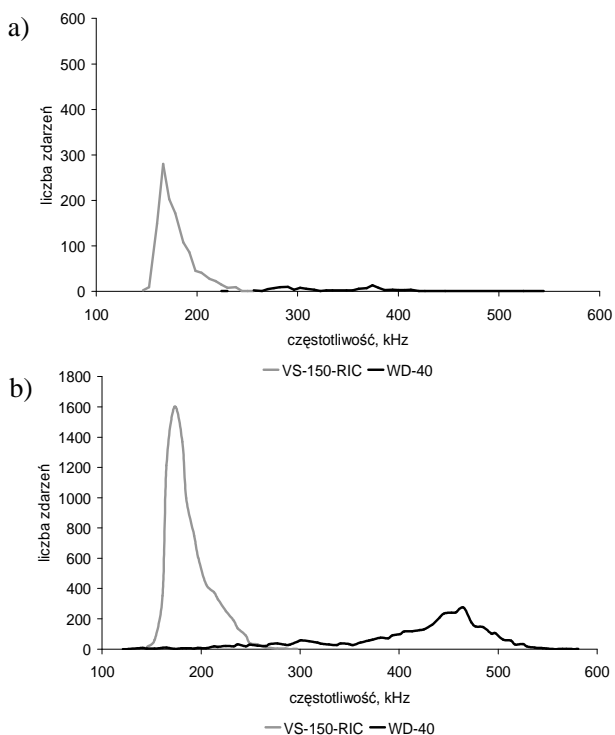
Fig. 3. Energy vs strain diagrams: a) specimen under tension load according to A scheme; b) specimen under tension load according to B scheme

### Zakres I

W zakresie pierwszych 2% odkształcenia dla próbek, które odkształcono z większą szybkością (schemat B), zarejestrowano kilkakrotnie więcej sygnałów w porównaniu z próbkami odkształcanymi według schematu A. Różnica w liczbie zdarzeń potwierdza, że materiał odkształcany z większą szybkością w tym samym zakresie odkształcenia ulega większej degradacji. Wyniki przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

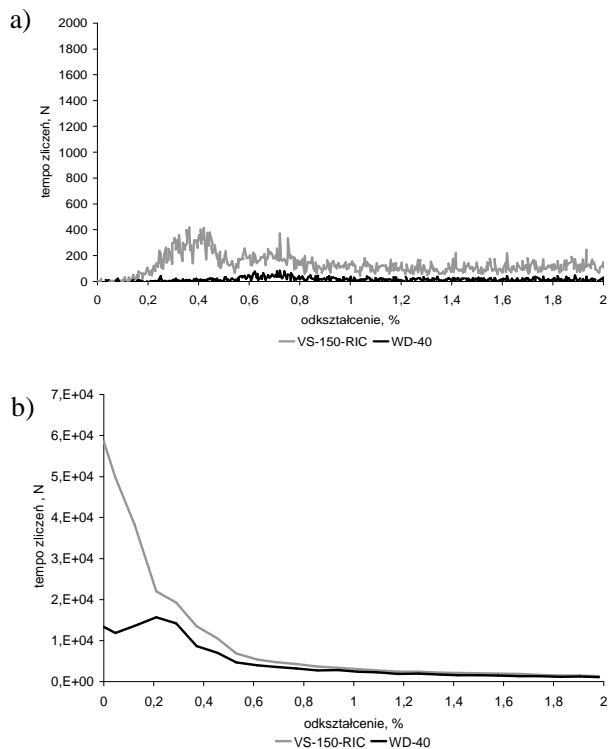
W przypadku próbek rozciąganych z szybkością 0,05 mm/min (rys. 4a) w pierwszym etapie obciążenia można rozpoznać jeden mechanizm zniszczenia (zwany dalej mechanizmem typu 1), charakteryzujący się emisją akustyczną w zakresie 150÷200 kHz. Wyniki zarejestrowane dla próbek rozciągniętych z szybkością 5 mm/min wskazują na występowanie dwóch odrębnych mechanizmów zniszczenia (typu 1 i 2) charakteryzujących się emisją akustyczną w zakresach 150÷200 i 300÷550 kHz (rys. 4b). Wydaje się jednak, że mechanizm dominujący (typu 1) jest taki sam dla obu serii próbek.

Wykres tempa zliczeń (rys. 5a) dla próbki rozciąganej z szybkością 0,05 mm/min (dalej nazywaną próbką A) pokazuje wzrost intensywności EA we wstępnym etapie obciążenia. Źródłem wzrostu emisyjności mogą być zjawiska zachodzące na granicy włókno-osnowa, w tym tarcie.



Rys. 4. Wykres liczby zdarzeń w funkcji częstotliwości. Zakres I: a) próbka rozciągana według schematu A; b) próbka rozciągana według schematu B

Fig. 4. Hits vs frequency diagrams in range I: a) specimen under tension load according to A scheme; b) specimen under tension load according to B scheme



Rys. 5. Wykres tempa zliczeń w funkcji odkształcenia. Zakres I: a) próbka rozciągana według schematu A; b) próbka rozciągana według schematu B

Fig. 5. Counts vs strain diagrams in range I: a) specimen under tension load according to A scheme; b) specimen under tension load according to B scheme

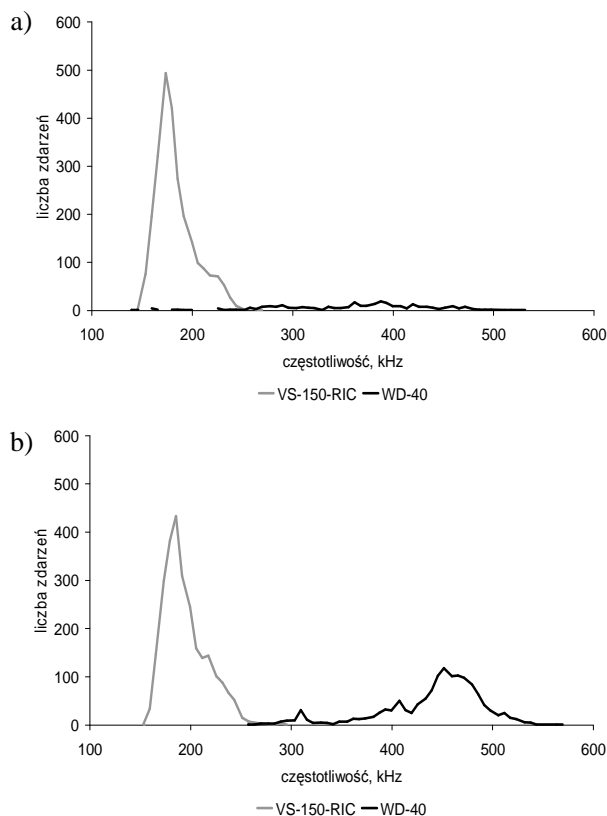
Wyniki uzyskane dla próbki rozciąganej według schematu B (dalej nazywaną próbką B) wskazują na skrajnie odmienny charakter rejestrowanych zmian. Na rysunku 5b widoczny jest natychmiastowy wzrost tempa zliczeń sygnałów, którego maksymalna wartość jest większa o kilka rzędów wielkości od wyników uzyskanych dla próbki A. Jest to kolejny przykład występowania w próbce B istotnego mechanizmu zniszczenia, niezauważanego na tym etapie w próbce A.

**Zakres II**

Zakres II obejmował odkształcenie z przedziału 2÷5%. Na rysunku 6a zaobserwować można wzrost liczby zdarzeń w przypadku próbki A, których źródłem są zmiany mikrostrukturalne wywołane grupą mechanizmów zniszczenia typu I.

Liczba zdarzeń EA z zakresu częstotliwości 150÷250 kHz dla próbki B uległa zmniejszeniu i stała się tym samym porównywalna z liczbą zdarzeń dla próbki A. Zwiększył się natomiast udział zdarzeń o częstotliwościach od 300 do 550 kHz.

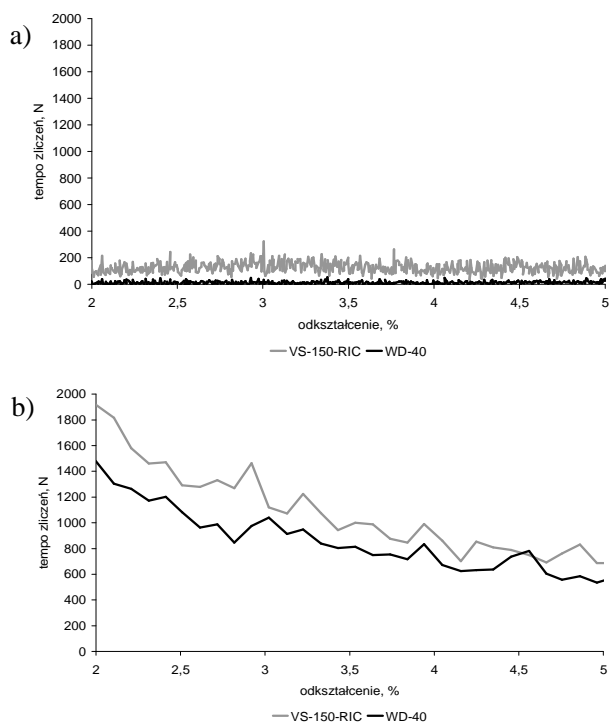
Tempo zliczeń sygnałów EA dla próbki A (rys. 7a) w całym zakresie II utrzymywało się na stałym poziomie, porównywalnym z wartościami zarejestrowanymi dla zakresu I.



Rys. 6. Wykres liczby zdarzeń w funkcji częstotliwości. Zakres II: a) próbka rozciągana według schematu A; b) próbka rozciągana według schematu B

Fig. 6. Hits vs frequency diagrams in range II: a) specimen under tension load according to A scheme; b) specimen under tension load according to B scheme

Wyniki otrzymane podczas stałego obciążenia próbki B potwierdzają, że mikrostruktura materiału uległa degradacji na skutek wstępnego obciążenia. Na wykresie tempa zliczeń w funkcji odkształcenia (rys. 7b) widoczny jest spadek emisyjności akustycznej wraz ze wzrostem odkształcenia, jednak wartości te są znacznie wyższe w porównaniu z próbką A.



Rys. 7. Wykres tempa zliczeń w funkcji odkształcenia. Zakres II: a) próbka rozciągana według schematu A; b) próbka rozciągana według schematu B

Fig. 7. Counts vs strain diagrams in range II: a) specimen under tension load according to A scheme; b) specimen under tension load according to B scheme

### Zakres III

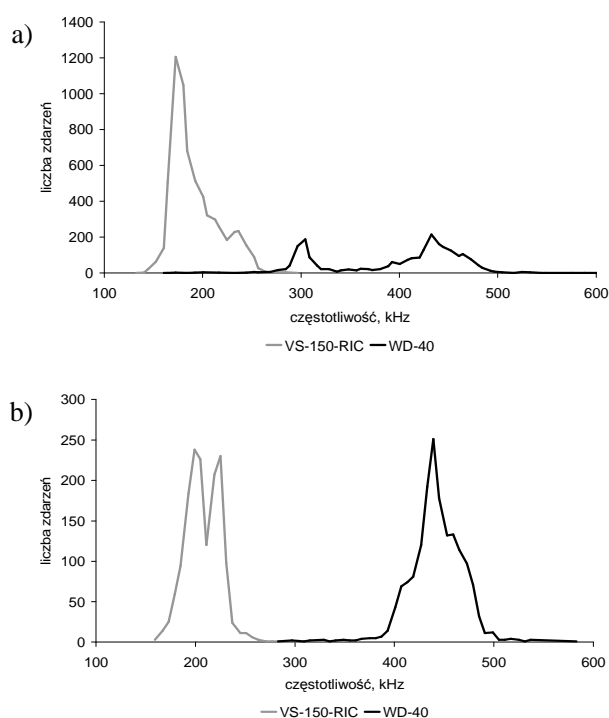
Zakres III obejmował odkształcenie próbek od poziomu 5% do zerwania. Liczba zdarzeń EA zarejestrowana dla próbki A w końcowym etapie obciążenia jest porównywalna z ilością zarejestrowaną dla próbki B w I zakresie odkształcenia. Na uwagę zasługuje fakt wystąpienia dwóch różnych pików częstotliwościowych zarejestrowanych przez czujnik szerokopasmowy (rys. 8a). Może to świadczyć o wystąpieniu dwóch nowych mechanizmów zniszczenia materiału.

Liczba zdarzeń dla próbki A w końcowym etapie obciążenia jest porównywalna z ilością zarejestrowaną dla próbki B w I zakresie.

W przypadku próbki B zaobserwowano kolejny wzrost udziału zdarzeń spowodowanych mechanizmem zniszczenia typu 2. Przypuszczać należy, że dla tego poziomu odkształcenia stał on się mechanizmem dominującym.

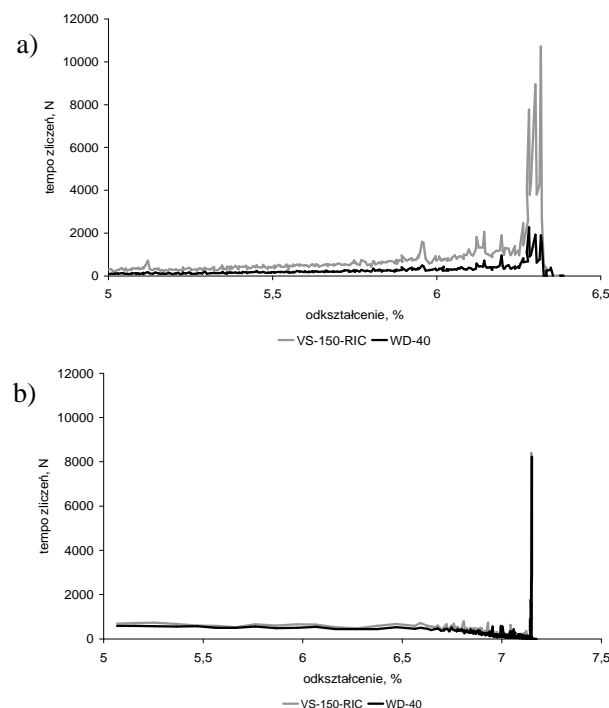
Analiza tempa zliczeń sygnałów EA zarejestrowanych dla próbki A w III zakresie wskazuje, że zmiany mikrostrukturalne decydujące o zniszczeniu materiału

miały swój początek po przekroczeniu ok. 5,5% odkształcenia, co zaobserwować można na rysunku 9a.



Rys. 8. Wykres liczby zdarzeń w funkcji częstotliwości. Zakres III: a) próbka rozciągana według schematu A; b) próbka rozciągana według schematu B

Fig. 8. Hits vs frequency diagrams in range III: a) specimen under tension load according to A scheme; b) specimen under tension load according to B scheme



Rys. 9. Wykres tempa zliczeń w funkcji odkształcenia. Zakres III: a) próbka rozciągana według schematu A; b) próbka rozciągana według schematu B

Fig. 9. Counts vs strain diagrams in range III: a) specimen under tension load according to A scheme; b) specimen under tension load according to B scheme

Charakter zniszczenia próbki B pod względem emisyjności akustycznej skrajnie różnił się od charakteru zniszczenia próbki A. Podczas zerwania nie zaobserwowano gwałtownego wzrostu żadnego z parametrów EA wykorzystanych do analizy.

## WNIOSKI

Próbki rozciągane według schematu A charakteryzowały się zwiększonym udziałem zdarzeń EA o częstotliwościach z zakresu od 150 do 250 kHz. W przypadku próbek rozciągniętych według schematu B zaobserwowano dominujący charakter sygnałów z zakresu częstotliwości od 150 do 250 kHz, z jednoczesnym większym udziałem liczby zdarzeń z zakresu 300÷550 kHz. Na podstawie różnic w zakresach częstotliwości rejestrowanych sygnałów stwierdzono, że dla badanego materiału występują różne mechanizmy zniszczenia, zależne od sposobu przyłożonego obciążenia. Przeanalizowane wyniki EA dla dwóch serii próbek poddanych różnym schematom obciążenia wykazały, że istotny wpływ na wytrzymałość badanego materiału ma historia jego obciążenia. Ocena zmian emisyjności akustycznej materiałów kompozytowych wywołanych naprężeniem pozwala określić chwilowy stopień degrada-

cji mikrostruktury. Obecnie trwają prace nad scharakteryzowaniem mikrostruktury próbek po procesach odkształcania w kontekście oceny stopnia ich degradacji.

## LITERATURA

- [1] Witemberg-Perzyk D., Boczkowska A., Pakieła Z., Influence of loading course on failure stress of glass fabric reinforced polycarbonate composite, *Kompozyty (Composites)* 2005, 5, 1, 51-55.
- [2] Witemberg-Perzyk D., Perzyk M., Boczkowska A., Strain history effect on failure stress of glass fabric reinforced polycarbonate composite, *Proc. Advancing with Composites 2005*, ed. C. Visconti, Naples.
- [3] Witemberg-Perzyk D., Paradowski K., Baran I., Analiza wpływu historii odkształcenia na wytrzymałość kompozytu włóknistego z wykorzystaniem emisji akustycznej, *Czasopismo Techniczne*, z. 6-M/2006, Rok 103, 517-520, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- [4] Witemberg-Perzyk D., Boczkowska A., Perzyk M., Paradowski K., Sprawozdanie z projektu badawczego nr 4 T08E052 24.
- [5] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S., *Kompozyty*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.