

## ZAŁĄCZNIK nr 5

dr inż. Krzysztof Dudzik  
Katedra Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów  
Wydział Mechaniczny  
Uniwersytet Morski w Gdyni



### Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych

Jako osiągnięcie odpowiadające wymaganiom z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. wskazuję jednotematyczny cykl publikacji pod tytułem:

#### **WYKORZYSTANIE EMISJI AKUSTYCZNEJ DO MONITOROWANIA PROCESÓW WYTWARZANIA ORAZ DIAGNOSTYKI KONSTRUKCJI I INSTALACJI OKRĘTOWYCH**

Do jednotematycznego cyklu publikacji zaliczyłem 20 publikacji spośród wymienionych w wykazie prac po doktoracie, (zał. 4).

W jednotematycznym cyklu publikacji przedstawiłem aspekty związane z eksploatacją konstrukcji okrętowych, w zakresie:

- doboru technologii spajania stopów aluminium stosowanych w budownictwie okrętowym (AW-5083, AW-5059, AW-7020 oraz nowego stopu AW-7020M) [1 – 10],
- zastosowanie stosunkowo nowej metody zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału zgrzeiny (Friction stir welding – FSW), jako alternatywy dla powszechnie stosowanych metod spawania łukowego w osłonie gazów obojętnych (MIG, TIG),
- zastosowanie spajania hybrydowego (połączenia metody FSW i MIG) [8],
- dobór materiałów dodatkowych i parametrów spawania jak również zgrzewania FSW, zapewniający prawidłowe wykonanie złączy,
- dobór parametrów zgrzewania FSW blach z różnoimiennych stopów – spajanie stopu 5083 ze stopem 7020 [10],
- badania wpływu metody i parametrów spajania na właściwości mechaniczne badanych stopów oraz ich złączy spajanych,
- badania wpływu metody i parametrów spajania na właściwości korozyjne w środowisku wody morskiej, określane nowoczesnymi metodami (elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej – EIS) [6, 7],
- zastosowanie metody monitorowania poprawności prowadzenia procesu zgrzewania FSW w czasie rzeczywistym – wykorzystanie emisji akustycznej [9 – 10],
- zastosowanie emisji akustycznej do monitorowania stanu instalacji okrętowych: wodnej, paliwowej i sprężonego powietrza [11 – 13],
- zastosowanie emisji akustycznej do monitorowania procesów obróbkowych: toczenia, frezowania [14, 15],

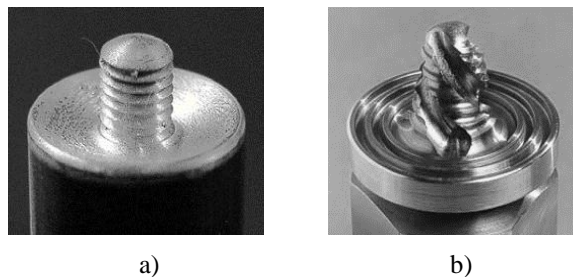
- zastosowanie emisji akustycznej i statycznej próby rozciągania do określania właściwości mechanicznych – Re stopów aluminium stosowanych w okrętownictwie [16],
- zastosowanie emisji akustycznej i statycznej próby rozciągania do określania naprężeń odpowiadających kolejnym etapom degradacji materiałów kompozytowych, które mogą być pomocne w pracach projektowych związanych również z przemysłem stoczniovym [17 – 20].

Każda z wybranych publikacji jest oznaczona numerem odpowiadającym jej kolejności w cyklu, a ich treść scharakteryzowano poniżej.

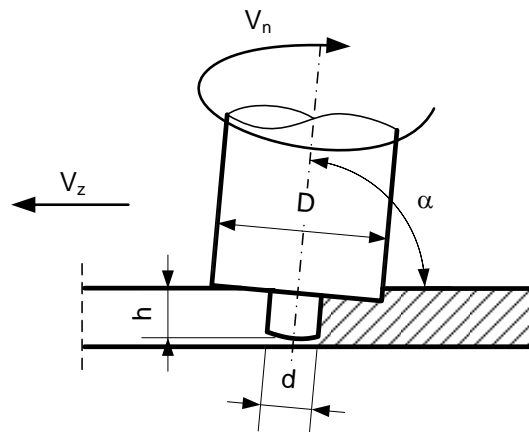
**1. Dudzik K., Charchalis A.: Fractography analysis of AW-7020 alloy joints welded by FSW. Journal of KONES Powertrain and Transport; 2014; Vol. 21/ No. 1, str. 67-74.**

*K. Dudzik - pomysłodawca koncepcji pracy, współudział w opracowaniu technologii zgrzewania metodą FSW blach ze stopu 7020, wykonawca badań udarowych i mikroskopowych, przegląd literatury, współudział w opracowaniu wyników, sformułowanie wniosków i redakcja artykułu.*

Przeprowadzono próby zgrzewania blach o grubości 12 mm ze stopu AW-7020 metodą FSW, na stanowisku zbudowanym na bazie frezarki uniwersalnej FYF32JU2. Wykorzystano dwa rodzaje narzędzi (rys.1) o różnych wymiarach (tab. 1). Wszystkie złącza zgrzewano dwustronnie stosując takie same parametry. Schemat zgrzewania przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Narzędzia do zgrzewania FSW:  
a) z trzpieniem prostym, b) z trzpieniem typu TRI-FLUTE



Rys. 2. Schemat zgrzewania FSW

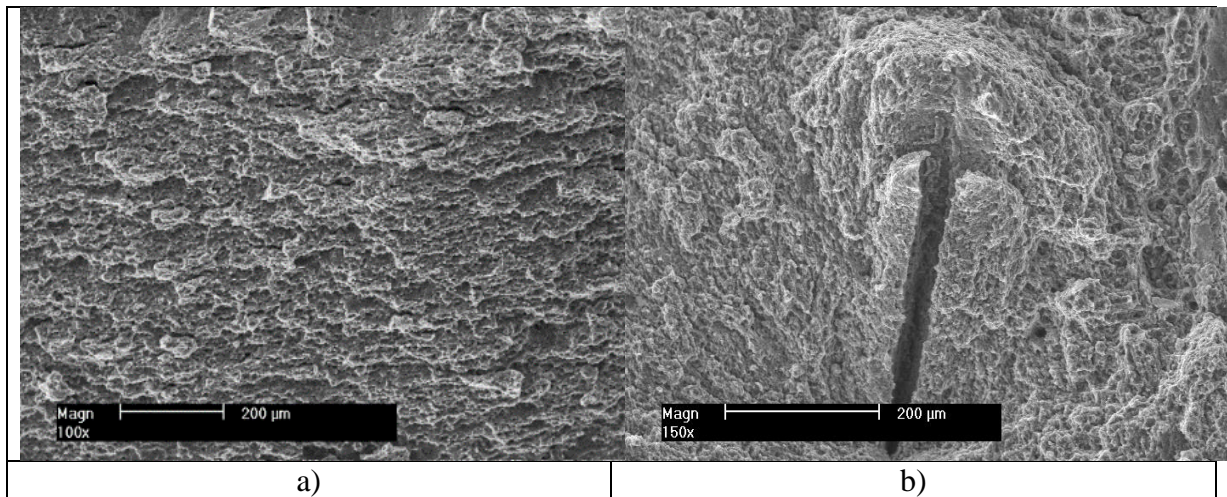
Podczas badań zmieniano parametry zgrzewania:

- Prędkość obrotową narzędzia  $V_n$  [obr/min]: 440; 450; 560; 710; 900,
- Prędkość liniową zgrzewania  $V_z$  [mm/min]: 140; 180; 224,
- Kąt nachylenia narzędzia  $\alpha$  [°]: 88 i 88,5.

Tab. 1. Wymiary narzędzi stosowanych w badaniach

rodzaj narzędzia	średnica wieńca oporu D [mm]	średnica trzpienia d [mm]	długość trzpienia h [mm]
trzczeń prosty	20,0	6,0	3,0
	20,0	6,0	6,0
	20,0	6,0	8,6
	26,0	9,0	8,6
TRI-FLUTE	25,0	10,0	5,8

Badania udarności przeprowadzono metodą Charpy'ego zgodnie z PN-EN ISO 148-1:2010. Przełomy próbek poddano analizie fraktograficznej z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego Philips XL-30. Widok przykładowych przełomów przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Przełom próbki: a) bez wad, b) z pęknięciem

Analiza powierzchni przełomów próbek zgrzewanych różnymi narzędziami z różnymi parametrami pozwoliła wybrać kombinację rodzaju i wymiarów narzędzia i parametrów zgrzewania zapewniających wykonanie złączy wolnych od wad. Najlepsze efekty osiągnięto dla narzędzia z trzczeniem typu TRI-FLUTE i parametrach:  $V_n = 450$  obr/min,  $V_z = 180$  mm/min,  $\alpha_z = 88.5^\circ$ .

2. **Dudzik K., Charchalis A.: Mechanical properties of 5083, 5059 and 7020 aluminium alloys and their joints welded by FSW. Journal of KONES Powertrain and Transport; 2013; Vol. 20/ No. 2, str. 69-73.**

*K. Dudzik - pomysłodawca koncepcji pracy, współudział w opracowaniu technologii zgrzewania metodą FSW blach ze stopów 5083, 5059, 7020, wykonawca badań mechanicznych, przegląd literatury, współudział w dyskusji wyników, sformułowanie wniosków i redakcja artykułu.*

Dobrano parametry zgrzewania FSW zapewniające poprawność wykonania złączy dla wszystkich wybranych stopów: AW-5083, AW-5059 i AW-7020. Stosowano zgrzewanie dwustronne z zastosowaniem tych samych parametrów. Parametry przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Parametry zgrzewania FSW blach ze stopów 7020, 5083 and 5059

Wymiary narzędzia			Kąt nachylenia narzędzia $\alpha$ [°]	Prędkość obrotowa trzpienia $V_n$ [obr/min]	Prędkość liniowa zgrzewania $V_z$ [mm/min]
D [mm]	d [mm]	h [mm]			
25,0	10,0	5,8	88,5	450	180

Poprawność wykonania złączy potwierdzono metodą radiograficzną, która wykazała brak wad.

Badania właściwości mechanicznych przeprowadzono na próbkach płaskich wyciętych prostopadle do kierunku walcowania w statycznej próbie rozciągania wg PN-EN ISO 4136:2011 oraz PN-EN ISO 6892-1:2010.

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Właściwości mechaniczne stopów 7020, 5083, 5059 i ich złączy zgrzewanych FSW

Stop	Metoda spajania	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]
7020	Materiał rodzimy	373	317	14,2
	FSW	367	314	13,8
5083	Materiał rodzimy	346	270	19,7
	FSW	322	238	10,4
5059	Materiał rodzimy	401	280	16,2
	FSW	367	278	12,7

Wyniki badań wykazały, że stop 7020 charakteryzuje się wyższymi właściwościami wytrzymałościowymi niż stopy 5083 i 5059 ale niższą plastycznością.

W przypadku złączy zgrzewanych metodą FSW zarówno właściwości wytrzymałościowe jak i plastyczne są najwyższe dla stopu 7020. Wszystkie złącza wykonane metodą FSW charakteryzowały się dostateczną ciągliwością ze względu na wymagania przemysłu okrętowego – wg towarzystw klasyfikacyjnych (np. PRS – Polski Rejestr Statków) minimalna wartość wydłużenia musi przekraczać 10%.

3. **Dudzik K., Czechowski M.: Influence of joining method for mechanical properties of 5083, 5059 and 7020 aluminium alloys joints. Solid State Phenomena, Trans Tech Publications, Switzerland, Mechatronic Systems and Materials VI, 2015, str. 583-588.**

*K. Dudzik - pomysłodawca koncepcji pracy, współudział w opracowaniu technologii zgrzewania metodą FSW blach ze stopów 5083, 5059, 7020, wykonawca badań mechanicznych, przegląd literatury, współudział w dyskusji wyników, sformułowanie wniosków i redakcja artykułu.*

Dobrano parametry zgrzewania FSW zapewniające poprawność wykonania złączy dla wszystkich wybranych stopów: AW-5083, AW-5059 i AW-7020. Stosowano zgrzewanie dwustronne z zastosowaniem tych samych parametrów (tab. 2). Opracowano technologię spawania wspomnianych stopów metodą MIG. Blachy ze stopu 7020 przygotowano na Y (60°) z progiem 2 mm, podczas gdy blachy ze stopów 5083 i 5059 na X (70°) bez progu. Do spawania blach ze stopu 7020 użyto drut spawalniczy Nertalic AG5 SAF – stop AlMg5 (5356). Do spawania stopu 5083 wykorzystano drut ze stopu 5383 natomiast do 5059 drut ze stopu 5183. Jako gaz osłony użyto argonu o czystości 99,99%. Parametry spawania przedstawiono w tabeli 4.

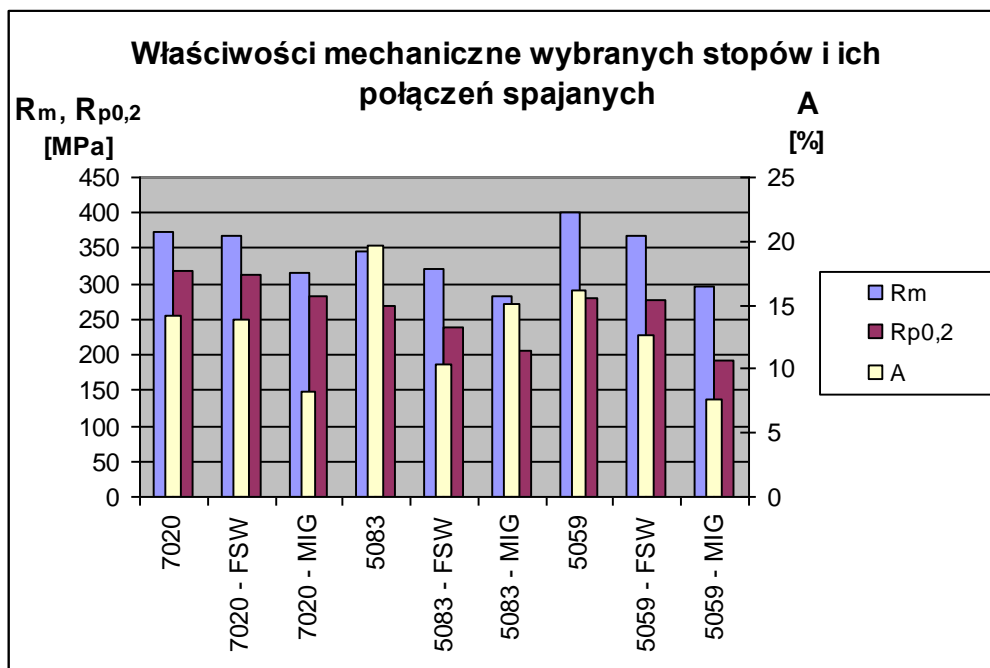
Tab. 4. Parametry spawania MIG blach ze stopów 7020, 5083, 5059

Spawany stop	Średnica drutu elektrodowego [mm]	Natężenie prądu spawania [A]	Napięcie łuku [V]	Liczba warstw	Zużycie argonu [m <sup>3</sup> /h]
7020	1,6	190 - 230	28	4 + podpawanie	16 - 18
5083	1,6	240-260	28	1 od strony lica + 1 od strony grani	18-20
5059	1,2	210	28	1 od strony lica + 1 od strony grani	16

Wszystkie złącza spawane zostały wykonane w jednej z firm produkujących konstrukcje morskie ze stopów aluminium – stoczni Wisła Aluminium International Ltd. W Gdańsku. Preparatyka złączy spawanych została wykonana zgodnie z procedurami wymaganymi przez przemysł okrętowy. Poprawność wykonania złączy spawanych potwierdzono metodą radiograficzną.

Badania właściwości mechanicznych przeprowadzono za pomocą statycznej próby rozciągania wg PN-EN ISO 4136:2011 oraz PN-EN ISO 6892-1:2010.

Wyniki badań przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Porównanie właściwości mechanicznych stopów: 7020, 5083, 5059 i ich złączy spajanych metodami FSW i MIG

Właściwości wytrzymałościowe złączy spawanych metodą MIG we wszystkich rozpatrywanych przypadkach są zdecydowanie mniejsze w porównaniu do materiału rodzimego. Złącza zgrzewane metodą FSW mają zbliżone właściwości do samych stopów. Największą różnicę zaobserwowano w przypadku właściwości plastycznych gdzie wydłużenie dla złączy spawanych blach ze stopów 7020 i 5059 nie osiągnęło wymaganego przez przemysł okrętowy poziomu 10%.

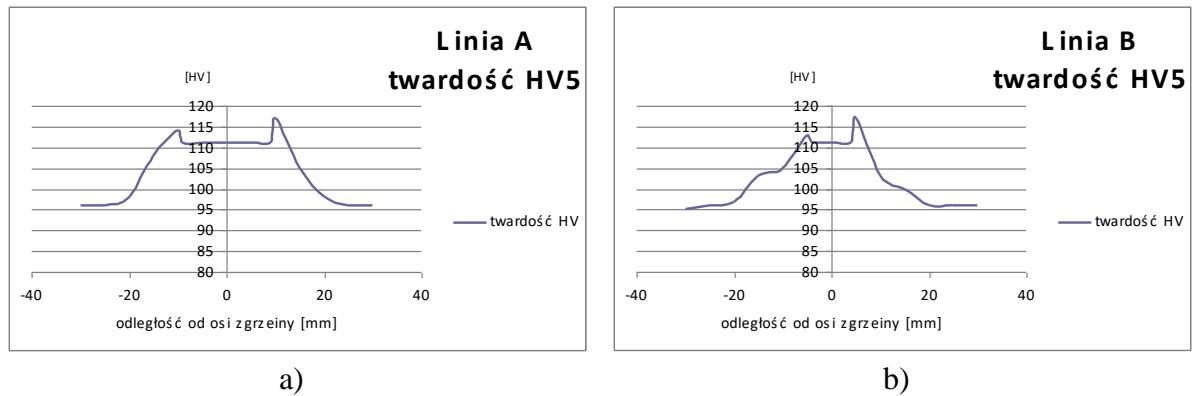
Badania właściwości mechanicznych pokazały, że metoda zgrzewania FSW może być z powodzeniem stosowana do łączenia konstrukcji okrętowych.

**4. Dudzik K., Charchalis A.: Influence of Friction Stir Welding on Hardness Distribution in Joints of AlZn5Mg1 Alloy. Solid State Phenomena. Trans Tech Publications, Switzerland, Mechatronics Systems and Materials V, 2013, str. 430-435.**

*K. Dudzik - pomysłodawca koncepcji pracy, współudział w opracowaniu technologii zgrzewania metodą FSW blach ze stopu 7020, wykonawca badań twardości metodą Vickers'a, przegląd literatury, współudział w dyskusji wyników, sformułowanie wniosków i redakcja artykułu.*

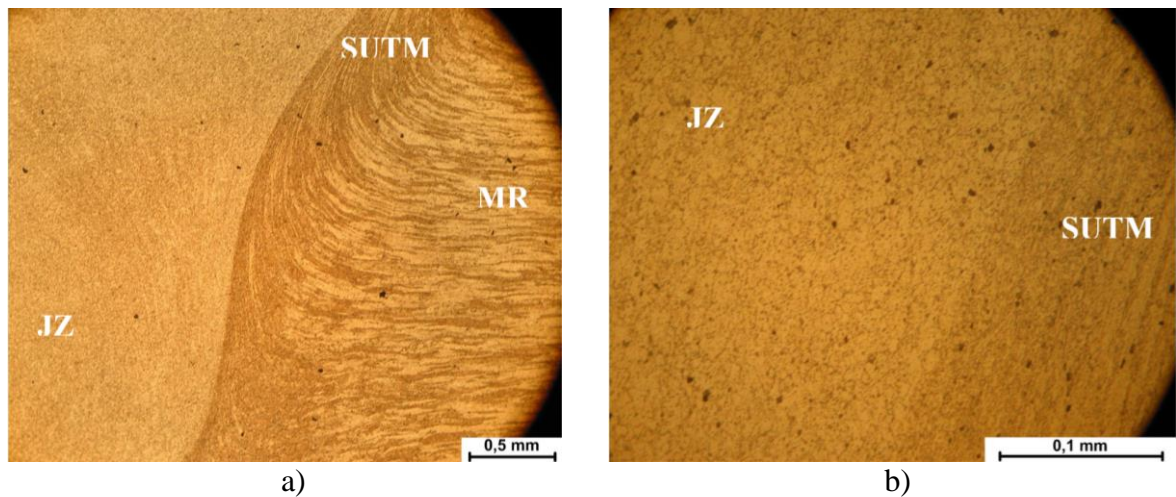
Badania twardości przeprowadzono metodą Vickers'a HV5 zgodnie z wymaganiami PN-EN 1043-1:2000. Obciążenie wgłębnika wynosiło 49 N. Twardość mierzono w trzech równoległych rzędach, od środka spoiny, poprzez strefę wpływu ciepła SWC, aż do materiału rodzimego. Linia „A” i „C” jest umieszczona w odległości 2 mm od krawędzi próbki. Linia „B” znajduje się pośrodku próbki. Wyniki dla linii „A” i „C” są prawie identyczne.

Rozkład twardości w złączu spawanym metodą FSW stopu 7020 zaprezentowano w formie graficznej na rysunku 5.



Rys. 5. Rozkład twardości w złączu zgrzewanym metodą FSW: a) przy krawędzi, b) w środku

W celu określenia wpływu zgrzewania na zmiany struktury materiału wykonano badania metalograficzne (rys. 6).



Rys. 6. Mikrostruktura złącza FSW: a), b) różne powiększenia gdzie: JZ- jądro zgrzeiny, SUTM – strefa uplastycznienia termo-mechanicznego, MR – materiał rodzimy

Aby określić przyczyny zróżnicowania twardości na przekroju poprzecznym złącza zgrzewanego wyznaczono wielkości ziaren w poszczególnych strefach (tab. 5).

Tab. 5. Średnie wartości wielkości ziaren w poszczególnych strefach złącza FSW

Strefa złącza	Materiał rodzimy	SUTM	Jądro zgrzeiny
wielkość ziarna [μm]	13 - 20	2 - 6	6 - 11

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że większą twardość uzyskano na całej powierzchni zgrzeiny w porównaniu do materiału rodzimego. Związane jest to prawdopodobnie z umocnieniem materiału spowodowanym mechanicznym oddziaływaniem narzędzia uplastyczniającego na materiał łączony.

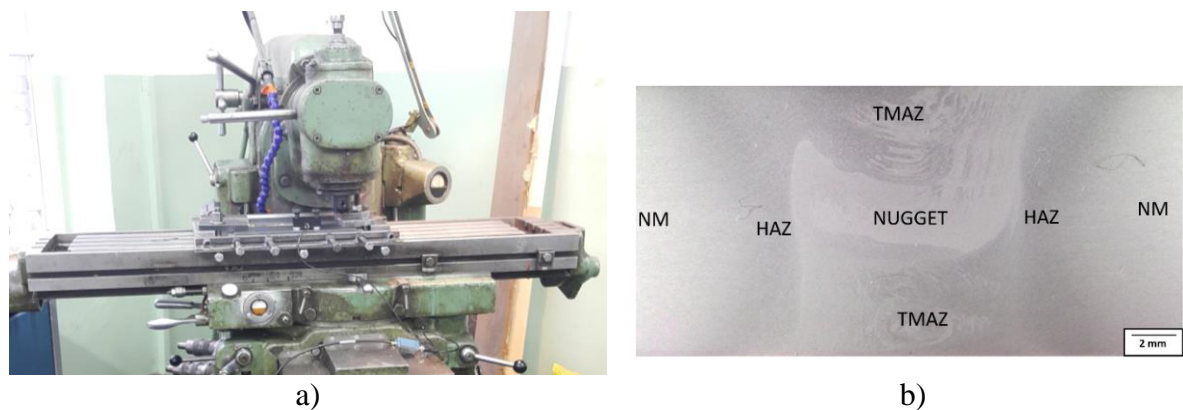
Porównanie średniej wielkości ziaren na przekroju poprzecznym złącza wykazało, że największe ziarna występują w materiale rodzimym, co zgodnie z równaniem Halla-Petcha, potwierdza uzyskane wyniki twardości.

**5. Dudzik K., Januskiewicz J.: Influence of welding parameters of FSW on hardness distribution in joints of AW-5083 alloy. Journal of KONES Powertrain and Transport; 2018; Vol. 25/ No. 2, str. 105-112; DOI: 10.5604/01.3001.0012.2783.**

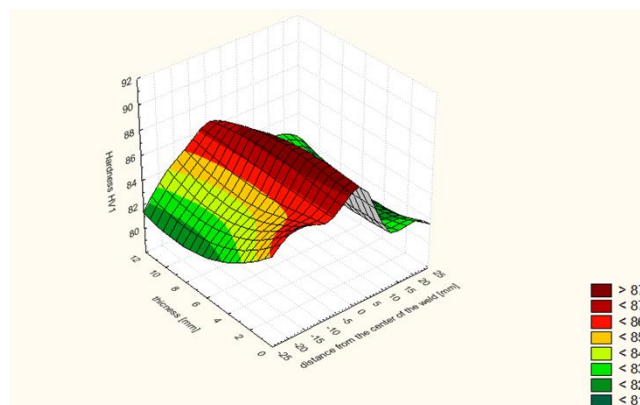
*K. Dudzik - pomysłodawca koncepcji pracy, opracowanie technologii zgrzewania metodą FSW blach ze stopu 5083, współwykonawca badań twardości metodą Vickers'a, opracowanie wyników, przegląd literatury, sformułowanie wniosków i redakcja artykułu.*

Opracowano technologię zgrzewania blach ze stopu 5083 przy użyciu narzędzia z trzpieniem stożkowym o regulowanej długości. Proces zgrzewania przeprowadzono na stanowisku zbudowanym na bazie frezarki uniwersalnej FWA-31 (rys. 7a), ze specjalnie zaprojektowanym i wykonanym oprzyrządowaniem do sztywnego mocowania łączonych blach. Wykonano złącza blach o grubości 12 mm zgrzewane dwustronnie dla różnych prędkości zgrzewania: 52; 84; 104; 138 mm/min. Badania twardości przeprowadzono metodą Vickers'a HV1. Odległość między punktami pomiarowymi wynosiła 1 mm. W celu określenia poszczególnych obszarów złącza przekrój poprzeczny wypolerowano i trawiono odczynnikami Keller'a (rys. 7b).

Przykładowy wykres przedstawiający rozkład twardości w złączy zgrzewanym pokazano na rys. 8.



Rys. 7. Widok stanowiska do zgrzewania FSW (a) oraz makrostruktura złącza (b); gdzie: NUGGET – jądro, HAZ – strefa wpływu ciepła, TMAZ – strefa uplastycznienia termomechanicznego, NM – materiał rodzimy.



Rys. 8. Przykładowy rozkład twardości w złączy FSW

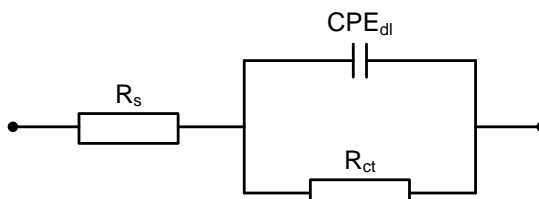
Największą średnią twardość dla badanych próbek zarejestrowano w jądrze zgrzeiny a najmniejszą w materiale rodzimym. Wzrost twardości względem materiału rodzimego dla



jądra zgrzeiny wynosił średnio 5,5%, dla strefy uplastycznienia termo-mechanicznego 4,7% a dla strefy wpływu ciepła 1,1%. Charakter rozkładu twardości w badanych złączach jest podobny, niezależnie od zmian prędkości zgrzewania w zakresie rozpatrywanym w badaniach.

**6. Dudzik K.: Corrosive properties distribution in AW-7020 alloy joints welded by FSW. Journal of KONES Powertrain and Transport; 2014; Vol. 21/ No. 4, str. 79-85.**

Przeprowadzono badania odporności na korozję elektrochemiczną złączy spajanych metodą FSW i MIG blach ze stopu AW-7020. W badaniach wykorzystano metodę elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej (Electrochemical Impedance Spectroscopy – EIS) z wykorzystaniem trzech elektrod: próbka, elektroda pomocnicza (polaryzacyjna) z tytanu oraz platynowa elektroda odniesienia (elektroda kalomelowa nasycona), które zostały umieszczone w zbiorniku z 3,5% wodnym roztworem NaCl. Do badań zastosowano potencjostat Atlas 0531EU & IA. Pomiar elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej przeprowadzono przy potencjale korozyjnym. Amplituda sygnału napięciowego zmieniała się w zakresie  $\pm 10$  mV, a zakres zmian to częstotliwość sygnału: 100 kHz – 0,1 Hz. Wyznaczenie parametrów procesu korozyjnego przeprowadzono w programach komputerowych: AtlasLab 2.0 i EIS Spectrum Analyzer. Dla badanego obiektu dobrano model równoważny w postaci elektrycznego obwodu zastępczego (rys. 9). Wyniki badań poszczególnych obszarów złącza przedstawiono w tabeli 6.



Rys. 9. Wybrany elektryczny obwód zastępczy układu korozyjnego

Tab. 6. Parametry elektrycznego obwodu zastępczego układu korozyjnego stopu 7020 zgrzewanego FSW

obszar złącza	$R_s$ [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	odch. Std.	$R_{ct}$ [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	odch. Std.	$CPE_{dl}$ [ $\mu\text{F} / \text{cm}^2$ ]	odch. Std.	$n_{dl}$ [-]	odch. Std.
materiał rodzimy	0,98	0,21	876,83	126,13	44,23	14,08	0,94	0,01
strona natarcia SWC	0,87	0,12	802,08	96,64	51,26	9,17	0,94	0,02
strona natarcia	1,03	0,08	601,47	64,83	70,38	13,11	0,92	0,03
złącze	1,14	0,15	558,11	85,74	79,87	18,72	0,96	0,02
strona spływu	0,91	0,34	868,69	77,38	46,65	6,88	0,91	0,01
strona spływu SWC	0,99	0,27	822,12	52,40	63,92	11,43	0,95	0,02

Analiza wyników wykazała, że złącze zgrzewane FSW i strona natarcia są mniej odporne niż materiał rodzimy na korozję elektrochemiczną w środowisku wody morskiej. Wartość rezystancji przenoszenia ładunku przez warstwę podwójną  $R_{ct}$  dla próbki z materiału rodzimego osiągnęła o około 57% wyższą wartość niż złącze zgrzewane metodą FSW. Wysoka wartość współczynnika  $n_{dl}$  dla wszystkich próbek wskazuje jednorodność procesu korozyjnego a tym samym wysoką odporność na korozję punktową w całym obszarze złącza.

7. **Dudzik K., Jurczak W.: Influence of friction stir welding (FSW) on mechanical and corrosion properties of AW-7020M and AW-7020 alloys. Polish Maritime Research, No. 3 (91) 2016 Vol.23, pp. 86-90; DOI: <https://doi.org/10.1515/pomr-2016-0036>. (100pkt. wg listy 2021)**

*K. Dudzik - pomysłodawca koncepcji pracy, wykonawca badań mechanicznych i korozyjnych, współudział w dyskusji wyników, przegląd literatury, sformułowanie wniosków i redakcja artykułu.*

Opracowano nowy stop AW-7020M i dobrano parametry obróbki cieplnej (stan T651). Do porównania wybrano powszechnie dostępny stop AW-7020. Dla blach o grubości 10 mm z obu stopów dobrano parametry zgrzewania metodą FSW. W celu określenia właściwości mechanicznych blach wykonanych ze stopów 7020 i 7020M oraz ich złączy zgrzewanych metodą FSW, przeprowadzono statyczną próbę rozciągania (tab. 7).

Tab. 7. Właściwości mechaniczne stopu 7020M i 7020 oraz ich złączy zgrzewanych FSW

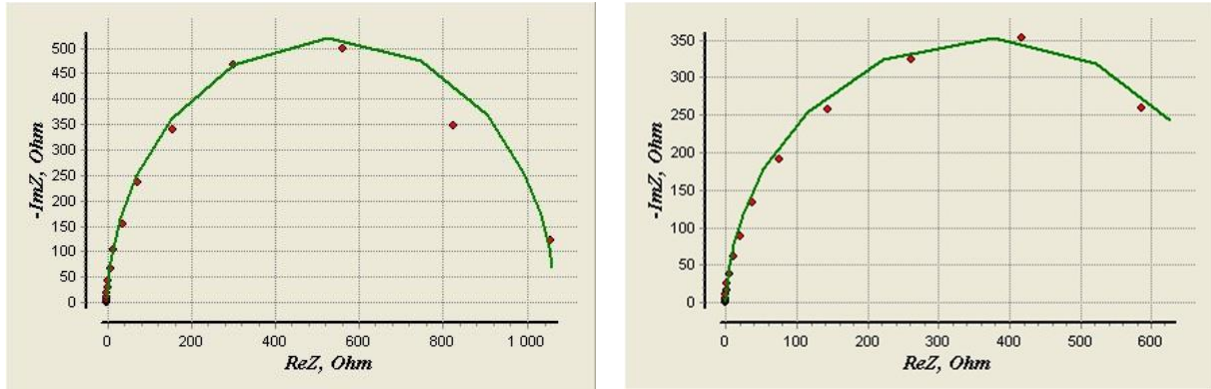
próbka	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]
7020M	443	397	9,8
7020M - FSW	437	393	10,2
7020	372	317	16,0
7020 - FSW	370	314	15,4

Pomiar odporności na korozję elektrochemiczną wykonano metodą elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej (Electrochemical Impedance Spectroscopy - EIS) zgodnie z ASTM G 3 i ASTM G 106. Badania przeprowadzono w zastępczej wodzie morskiej (3,5% wodny roztwór NaCl). Wyniki zarejestrowane w trakcie badań poddano analizie przy użyciu programu EIS Spectrum Analyser.

Wyniki badań spektroskopii impedancyjnej przedstawiono w formie tabelarycznej (tab. 8) oraz w formie graficznej na wykresach Nyquist'a (rys. 10), wraz z dopasowaną do nich krzywą teoretyczną.

Tab. 8. Parametry elektrycznego obwodu zastępczego układu korozyjnego stopów 7020M oraz 7020 i ich złączy spajanych metodą FSW

Próbka	$R_s$ [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	$R_{ct}$ [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	$\text{CPE}_{dl}$ [ $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ]	$n_{dl}$ [-]
7020M	0,28	1241,4	8,6	0,984
7020M - FSW	0,45	614,7	10,6	0,996
7020	0,42	773,01	29,13	0,941
7020 - FSW	0,66	524,55	21,02	0,965



a)

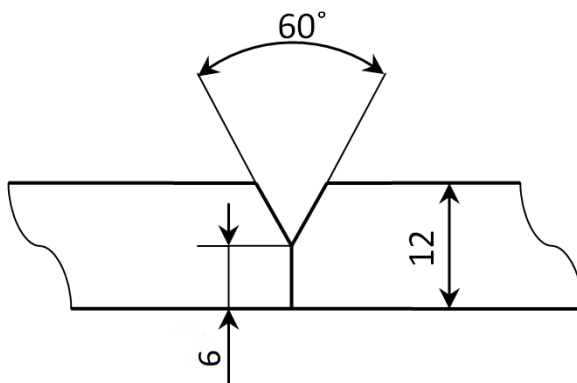
b)

Rys. 10. Przykładowe wykresy Nyquist'a dla próbki:  
a) z materiału rodzimego 7020M, b) zgrzewanej FSW stopu 7020M

Badania właściwości mechanicznych wykazały, że stop o zmienionym składzie chemicznym (7020M) charakteryzuje się większą wytrzymałością i mniejszą plastycznością w porównaniu do stopu bazowego (7020). Złącza zgrzewane metodą FSW obu badanych stopów charakteryzują się prawdopodobnie wyższymi właściwościami wytrzymałościowymi niż materiał rodzimy. Potwierdza to miejsce występowania pęknięcia w odległości ok. 10 mm od spoiny. Analiza uzyskanych w badaniach spektroskopii impedancyjnej danych wykazała, że próbki zgrzewane metodą FSW wykazują mniejszą odporność na korozję elektrochemiczną w porównaniu do próbek z materiału rodzimego, przy czym większą różnicę w wynikach zarejestrowano w przypadku stopu 7020M.

**8. Dudzik K.: Mechanical properties of AW-5083 alloy joints welded by hybrid method – FSW and MIG. Journal of KONES Powertrain and Transport; 2019; Vol. 26/ No. 4, str. 47-52; DOI: 10.5604/01.3001.0012.2783.**

Dobrano parametry spawania MIG i zgrzewania FSW blach o grubości 12 mm ze stopu AW-5083. Wykonano eksperymentalne złącza z jednej strony spawane a z drugiej zgrzewane. Schemat przygotowania blach do spawania MIG przedstawiono na rys. 11. Na rys 12 pokazano narzędzie z trzpieniem stożkowym użyte do zgrzewania FSW przeciwnej strony złącza. Parametry spawania MIG przedstawiono w tabeli 9.



Rys. 11. Schemat przygotowania brzegów blach do spawania MIG



Rys. 12. Widok narzędzia do zgrzewania metodą FSW

Tab. 9. Parametry spawania MIG blach ze stopu 5083

nr ściegu	Natężenie [A]	Napięcie [V]	zużycie gazu [l/min]	prędkość spawania [m/min]	temperatura międzyściegowa [°C]
1	191	24,3	20	7,5	52
2	171	23,1	20	6,4	82
3	178	23,6	20	6,8	88

Przeciwną stronę złącza do spawanego wykonano metodą FSW stosując parametry:

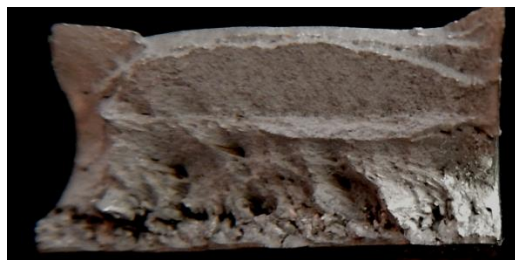
- Prędkość obrotową narzędzia  $V_n$  [obr/min]: 150 – 750,
- Prędkość liniową zgrzewania  $V_z$  [mm/min]: 52 – 180,
- Kąt nachylenia narzędzia  $\alpha$  [°]: 88 i 88,5,
- Długość trzpienia  $h$  [mm]: 7,5.

Złącza przygotowane wg opracowanej technologii poddano statycznej próbie rozciągania z wykorzystaniem uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell MPMD P10B. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 10.

Tab. 10. Właściwości mechaniczne złączy spajanych hybrydowo (MIG + FSW)

nr próbki.	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
1	149,77	245,91	9,4
2	154,09	252,53	10,9
3	152,65	248,87	9,9
<b>średnia</b>	<b>152,17</b>	<b>249,10</b>	<b>10,07</b>
<b>materiał rodzimy</b>	<b>162,91</b>	<b>309,92</b>	<b>21,88</b>

Rysunek 13 przedstawia przełom próbki po statycznej próbie rozciągania. Dolna część próbki (zgrzewana metodą FSW) ma bardziej plastyczny charakter pęknięcia w porównaniu z górną częścią spawaną metodą MIG.



Rys. 13. Przełom próbki po statycznej próbie rozciągania

Wytrzymałość na rozciąganie złącza była niższa o około 20% w porównaniu z materiałem rodzimym 5083. Średnia wartość granicy plastyczności była zbliżona. Największą zmianę zaobserwowano w przypadku właściwości plastycznych. Badania właściwości mechanicznych stopu AW-5083 i jego złączy spawanych metodą hybrydową – FSW wraz z tradycyjną MIG pozwalają stwierdzić, że zastosowanie tych dwóch metod łącznie jest możliwe do budowy konstrukcji w przemyśle stoczniowym.

9. **Dudzik K.: The possibility of application acoustic emission method for controlling friction stir welding of AW-5083 aluminium alloy sheets. In METAL 2017: 26th International Conference on Metallurgy and Materials. Ostrava: TANGER, 2017; str. 1695-1700.** (indeksowane w WoS)

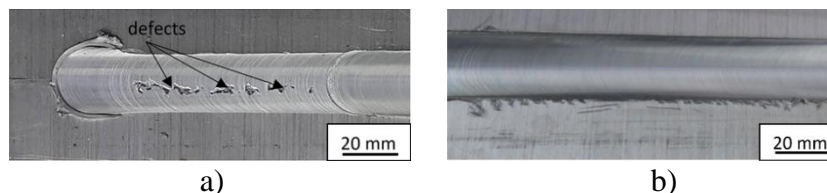
Dobrano zakresy zmian parametrów zgrzewania FSW blach ze stopu AW-5083. Blachy zgrzewano z dwóch stron, narzędziami z trzpieniem stożkowym, stosując takie same parametry (tab. 11).

Tab. 11. Parametry zgrzewania FSW blach ze stopu 5083

Wymiary narzędzia			Kąt nachylenia narzędzia $\alpha$ [°]	Prędkość obrotowa trzpienia $V_n$ [obr/min]	Prędkość liniowa zgrzewania $V_z$ [mm/min]
D [mm]	d [mm]	h [mm]			
20,0	6,0 - 10,0	7,5	88,5 – 89,5	150 – 750	52 - 180

Badania emisji akustycznej (EA) towarzyszącej procesowi zgrzewania przeprowadzono przy użyciu zestawu firmy Vallen Systeme. System zawierał moduł rejestracji danych oraz oprogramowanie do rejestracji i analizy danych EA. Czujnik został zamontowany na powierzchni osprzętu mocującego łączone blachy za pomocą uchwyty magnetycznego dedykowanego do zastosowanego czujnika.

Stosowanie nieprawidłowych parametrów zgrzewania skutkowało powstawaniem złączy, w których występowały wady (rys. 14a). Zastosowanie prawidłowych parametrów powodowało powstawanie złączy wolnych od wad (rys. 14b).



Rys. 14. Przykłady złączy zgrzewanych FSW:

- a) nieprawidłowe parametry – widoczne wady złączy, b) prawidłowe parametry – brak wad

W czasie badań rejestrowano wiele parametrów EA, z których wybrano do dalszej analizy te o największym znaczeniu diagnostycznym (tab. 12).

Tab. 12. Średnie wartości parametrów sygnału EA zarejestrowanych podczas badań

Prawidłowość procesu FSW	Amplituda [dB]	RMS [ $\mu$ V]
Nieprawidłowe parametry	97,2	177,2
Prawidłowe parametry	77,3	36,0

Badania wykazały, że metoda emisji akustycznej umożliwia monitorowanie on-line procesu zgrzewania metodą FSW. Analiza parametrów rejestrowanych podczas badań, pozwala określić poprawność prowadzonego procesu. W przypadku łączenia blach ze stopu AW-5083, emisja akustyczna emitowana podczas zgrzewania, przy nieprawidłowych parametrach w stosunku do parametrów prawidłowych, spowodowała zwiększenie amplitudy sygnału z 77 dB do 97 dB oraz prawie pięciokrotne zwiększenie średniej wartości skutecznej sygnału.

**10. Dudzik K.: Monitoring of FSW process using acoustic emission method. In METAL 2018: 27th International Conference on Metallurgy and Materials. Ostrava: TANGER, 2018; str. 1085-1090. (indeksowane w WoS)**

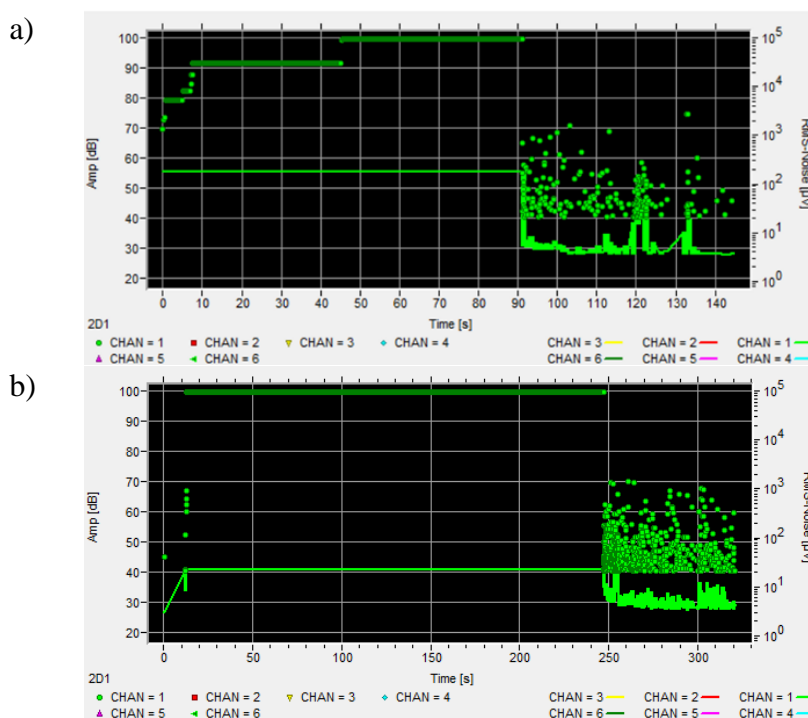
Uzyskanie prawidłowego połączenia materiałów różnoimiennych (np. stopów serii 5xxx i 7xxx) przy użyciu konwencjonalnych metod spawania jest bardzo trudne. Taką możliwość daje zastosowanie metody FSW. Dobrano zakresy zmian parametrów zgrzewania FSW złączy różnoimiennych - blach ze stopów AW-5083 i AW-7020. Do rejestracji sygnałów EA towarzyszącej procesowi zgrzewania zastosowano zestaw firmy Vallen Systeme.

Podobnie jak we wcześniej opisaney pracy stosowanie nieprawidłowych parametrów zgrzewania skutkowało powstawaniem złączy, w których występowały wady w formie porów i nieciągłości.

W czasie badań rejestrowano parametry EA, które poddano analizie. Średnie wartości parametrów sygnału AE zarejestrowanych podczas badań przedstawiono w tabeli 13. Przykładowe wykresy zmian sygnału EA podczas zgrzewania FSW przedstawiono na rys. 15.

Tab. 13. Średnie wartości parametrów sygnału EA zarejestrowanych podczas badań

Prawidłowość procesu FSW	Amplituda [dB]	Zliczenia [-]	RMS [ $\mu\text{V}$ ]
Nieprawidłowe parametry	97,2	10918	177,2
Prawidłowe parametry	99,9	10542	22,2



Rys. 15. Wykresy zmiany amplitudy sygnału EA w funkcji czasu podczas:

a) zgrzewania z nieprawidłowymi parametrami, b) zgrzewania z prawidłowymi parametrami

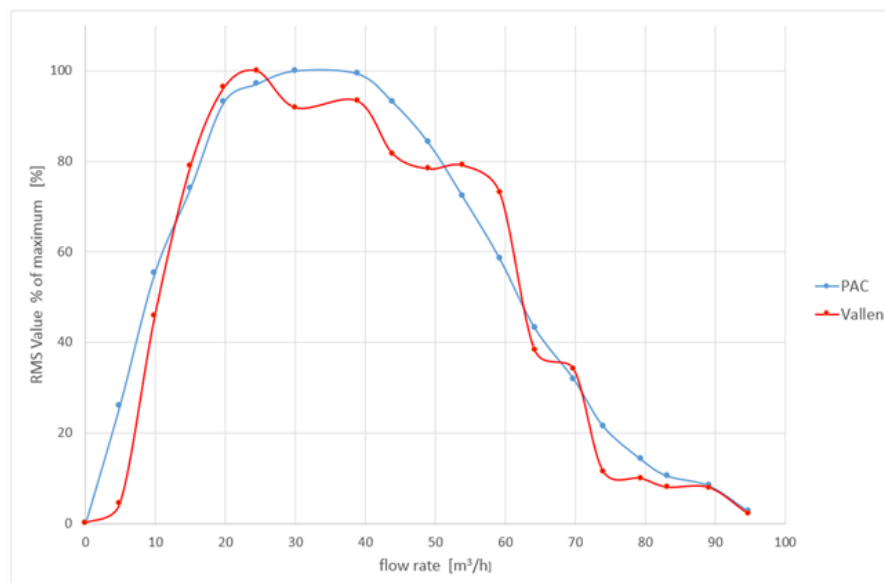
W przypadku łączenia blach ze stopów AW-5083 i AW-7020 emisja akustyczna emitowana podczas zgrzewania o nieprawidłowych parametrach w stosunku do parametrów prawidłowych, spowodowała wzrost RMS sygnału z 22,2  $\mu\text{V}$  do 177,2  $\mu\text{V}$ . W przypadku parametrów nieprawidłowych zarejestrowano identyczne wyniki zarówno dla samego stopu 5083 (wyniki we wcześniejszej pracy) i dla złączy różnoimiennych 5083 z 7020.

**11. Dudzik K., Ziegler B.: The possibility of application the acoustic emission method for monitoring flow of water within a ball valve. Journal of KONES Powertrain and Transport; 2016; Vol. 23/ No. 4, str. 87-92.**

*K. Dudzik - pomysłodawca koncepcji pracy, współwykonawca badań emisji akustycznej, współudział w dyskusji wyników, przegląd literatury, sformułowanie wniosków i redakcja artykułu.*

W badaniach rejestrowano sygnały emisji akustycznej generowanej przez przepływ wody przez zawór kulowy przy różnych stopniach jego otwarcia. Badania prowadzono przy stałych obrotach pompy 1395 obr/min. Pomiary emisji akustycznej zarejestrowano przy zmianie natężenia przepływu wody około 5 m<sup>3</sup>/h. Wykorzystano dwa systemy pomiarowe: Vallen Systeme i Physical Acoustics Corporation (PAC).

Do analizy wybrano średnie wartości RMS sygnałów emisji akustycznej. Wyniki te uzyskano przy różnym kącie otwarcia zaworu, a co za tym idzie różnym natężeniu przepływu wody. Średnie wartości RMS sygnału generowanego przez przepływ wody uzyskane z dwóch systemów AE są różne ze względu na inne parametry wzmocnienia sygnału w przedwzmacniaczach oraz różne funkcje przenoszenia dwóch torów pomiarowych AE. Ponieważ wartości RMS z obu systemów nie były na tym samym poziomie, porównano tylko procentowe wartości maksymalnego RMS. Biorąc to pod uwagę, kształty krzywych uzyskanych przez dwa układy były podobne. Porównanie kształtów sygnałów AE przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Porównanie wyników badań AE uzyskanych z systemów PAC i Vallen Systeme

Najbardziej użytecznym parametrem w zakresie wszystkich parametrów zarejestrowanych podczas testu była wartość RMS sygnału AE. Około 80% maksymalnych zarejestrowanych przez oba systemy wartości RMS było generowane w przypadku, gdy przepływ wody mieścił się w zakresie od 15 do 55 m<sup>3</sup>/h. Przepływ ten nastąpił przy kącie otwarcia zaworu kulowego w zakresie 40 – 60°. Maksymalne wartości RMS zarejestrowane przez oba systemy AE były prawdopodobnie spowodowane przepływem turbulentnym, separacją przepływu, wirami i kawitacją w zaworze kulowym. Oba systemy emisji akustycznej mogą być wykorzystane do monitorowania przepływu wody w instalacji hydraulicznej.

**12. Dudzik K.: Analysis of the possibility of using acoustic emission for monitoring technical condition of the fuel injector in 3AL25/30 engine. New Trends in Production Engineering – Volume 1, issue 1, 2018, pp. 419-425; DOI: 10.2478/ntpe-2018-0052.**

Badania emisji akustycznej (AE) towarzyszącej procesowi wtrysku paliwa w badaniu wtryskiwacza przeprowadzono przy użyciu zestawu firmy Vallen Systeme. Stanowisko badawcze składało się z: zbiornika paliwa, pompy tłokowej, manometru, przewodu paliwowego wysokiego ciśnienia oraz wtryskiwacza z silnika laboratoryjnego 3AL25/30. W badaniach stosowano dwie końcówki wtryskiwaczy (rozpylacze). Pierwszy z nich był w pełni sprawny, natomiast w drugim 2 z 9 otworów były zaślepione (symulacja zakoksovania wtryskiwacza).

Wyniki badań wtryskiwacza sprawnego i uszkodzonego w postaci średnich wartości wybranych parametrów sygnałów AE przedstawiono w tabeli 14.

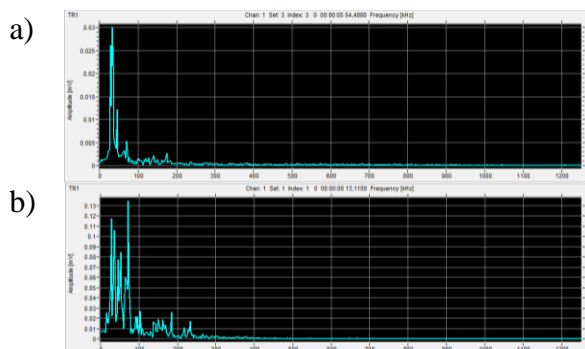
Tab. 14. Średnia wartość parametrów AE rejestrowana podczas badań wtryskiwaczy na stanowisku laboratoryjnym

wtryskiwacz	Amplituda [dB]	RMS [ $\mu$ V]	Czas wtrysku [s]
sprawny	60,88	8,65	0,787
uszkodzony	79,51	2,93	1,126

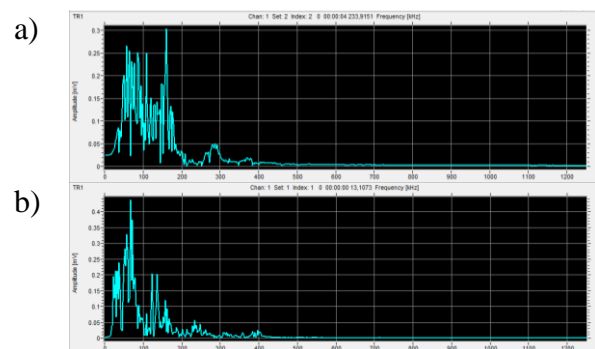
Analiza wyników badań wykazała wyraźnie dłuższy czas całkowity wtrysku w przypadku wtryskiwacza uszkodzonego w porównaniu do wtryskiwacza sprawnego. Amplituda sygnału była większa, jednakże RMS sygnału osiągnęła około 3-krotnie mniejszą wartość dla wtryskiwacza z zakoksovanym rozpylaczem. Oznacza to niższą jakość rozpylania paliwa.

Wyniki badań laboratoryjnych porównano z sygnałami zarejestrowanymi na wtryskiwaczach zainstalowanych w silniku podczas normalnej pracy. W badaniach zastosowano 3-cylindrowy średnioobrotowy silnik o zapłonie samoczynnym 3AL25/30 napędzający generator.

W celu identyfikacji sygnałów AE generowanych przez wtryskiwacz sprawny i uszkodzony poddano je analizie FFT. Porównanie sygnałów częstotliwościowych zarejestrowanych na stanowisku badawczym i w silniku dla wtryskiwacza sprawnego i uszkodzonego przedstawiono na rysunkach 17 i 18.



Rys. 17. Sygnał AE po analizie FFT dla wtryskiwacza sprawnego:  
a) na stanowisku lab., b) w silniku



Rys. 18. Sygnał AE po analizie FFT dla wtryskiwacza uszkodzonego:  
a) na stanowisku lab., b) w silniku

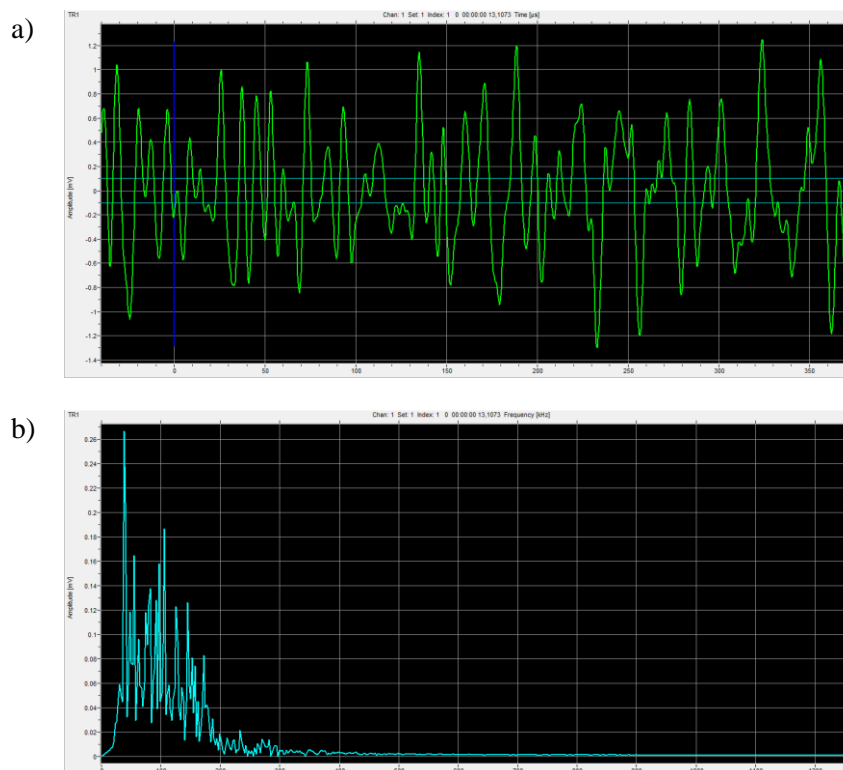


W przypadku sprawnego wtryskiwacza zakres częstotliwości sygnału wynosi od 25 do 75 kHz. W przypadku wtryskiwacza z symulowanym zakoksovaniem 2 otworów zakres częstotliwości sygnału zawierał się w granicach 35 - 185 kHz. Porównanie charakterystycznych sygnałów rejestrowanych na wtryskiwaczach zamontowanych w silniku podczas normalnej pracy z tymi uzyskanymi na stanowisku badawczym pozwala określić ich stan techniczny.

- 13. Dudzik K., Charchalis A.: Possibility analysis of using acoustic emission for monitoring technical condition of compressed air installation of 3AL25/30 engine (Analiza możliwości zastosowania emisji akustycznej do monitorowania stanu technicznego instalacji sprężonego powietrza silnika 3AL25/30). Journal of KONBiN, 2019, Vol. 49, Issue 3, pp. 1-15. (40pkt. wg listy 2021)**

*K. Dudzik - pomysłodawca koncepcji pracy, wykonawca badań diagnostycznych z wykorzystaniem emisji akustycznej, wybór parametrów AE do analizy, współudział w dyskusji wyników, przegląd literatury, sformułowanie wniosków i redakcja artykułu.*

Przedstawiono metodykę oraz wyniki badań monitorowania systemu startowego sprężonego powietrza silnika 3AL25/30 za pomocą zestawu do rejestracji i analizy emisji akustycznej Vallen Systeme. Badania przeprowadzono podczas normalnej pracy układu. Ciśnienie powietrza w zbiorniku wynosiło 3 MPa. Łącznie wykonano 6 pomiarów. Czujnik umieszczano dwukrotnie w pozycjach: blisko dna, w środku zbiornika oraz w pobliżu jego głowicy. Przykładowe wykresy sygnału AE zarejestrowanego podczas badań przedstawiono na rys. 19.



Rys. 19. Przykładowy sygnał zarejestrowany podczas nieszczelności systemu - amplituda sygnału AE: a) w funkcji czasu, b) w funkcji częstotliwości

Analiza wyników badań emisji akustycznej generowanej podczas monitorowania stanu technicznego zbiornika sprężonego powietrza wykazała, że parametrami AE o największym znaczeniu diagnostycznym były: amplituda, wartość skuteczna RMS i liczba przekroczeń progu dyskryminacji – liczba zdarzeń.

Zarejestrowany ciągły sygnał o stałej, amplitudzie (ok 67 dB) i stosunkowo niskiej częstotliwości (40 - 185 kHz) może świadczyć o nieszczelności w instalacji. Na podstawie badań AE przeprowadzono inspekcję głowicy zbiornika gdzie ujawniono uszkodzenie zaworu. Wykryta usterka zaworu umożliwiła podjęcie odpowiednich działań naprawczych a tym samym wyeliminowanie nieszczelności w układzie sprężonego powietrza.

**14. Dudzik K., Labuda W.: The possibility of applying acoustic emission and dynamometric methods for monitoring the turning process. Materials, 13(13), 2926, 2020, doi.org/10.3390/ma13132926. (140pkt. wg listy 2021)**

*K. Dudzik - współwykonawca badań, odpowiedzialny za część związaną z emisją akustyczną, współudział w dyskusji wyników, przegląd literatury, sformułowanie wniosków, przygotowanie manuskryptu, odpowiedzi na uwagi recenzentów.*

Celem pracy było porównanie wybranych metod diagnostycznych: pomiaru emisji akustycznej i sił, do monitorowania zużycia narzędzia skrawającego podczas toczenia. Badania przeprowadzono na tokarce uniwersalnej (typu CU500MRD) przy użyciu dynamometru Kistler z zamontowanym nożem składanym z płytką CCET09T302R-MF firmy DIJET. Proces toczenia przeprowadzono na wale o średnicy 60 mm wykonanym ze stali nierdzewnej 304L. Badania AE zostały przeprowadzone za pomocą zestawu Physical Acoustics Corporation. Na podstawie zaleceń producenta narzędzi dobrano parametry skrawania:

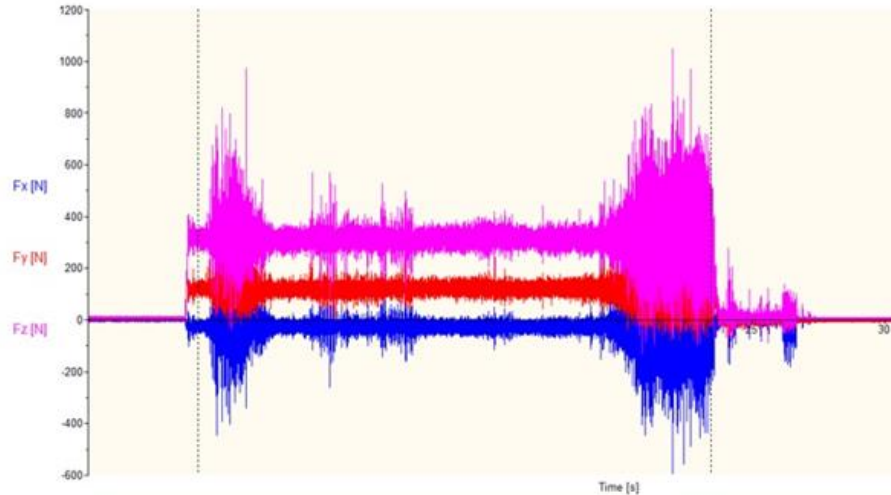
- prędkość skrawania  $V_c$  [m/min] – 250;
- posuw  $f$  [mm/obr] – 0,05; 0,075; 1,0;
- głębokość skrawania  $a_p$  [mm] – 1,0; 1,5; 2,0.

Naróżne narzędzia skrawającego przed i po każdym etapie badań było kontrolowane za pomocą mikroskopu pomiarowego Zeiss Smartzoom 5. Widok narzędzia w różnych stadiach zużycia przedstawiono na rys. 20.

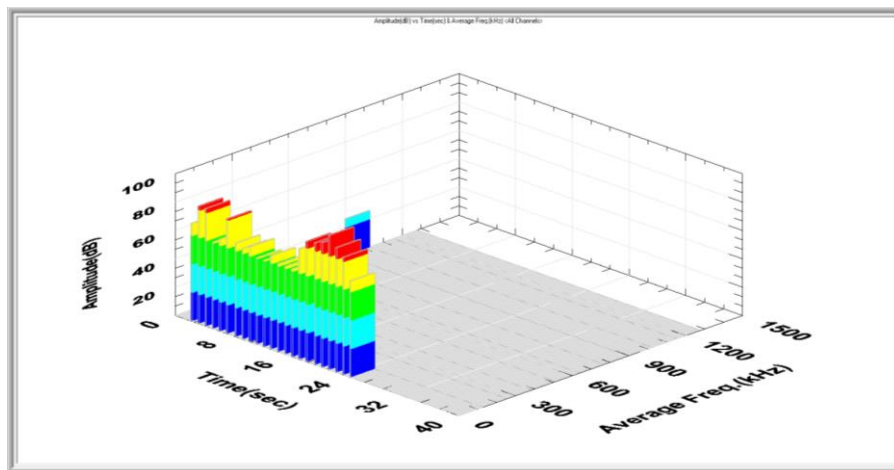


Rys. 20. Widok narzędzia w kolejnych stanach zużycia

Przykładowe wykresy zmiany sił skrawania podczas toczenia przedstawiono na rys. 21. Zmiany parametrów sygnału emisji akustycznej dla tych samych warunków toczenia zaprezentowano na rys. 22.



Rys. 21. Siły skrawania podczas toczenia:  $a_p=2,0$  mm,  $f=0,05$  mm/obr



Rys. 22. Parametry sygnału AE podczas toczenia:  $a_p = 2,0$  mm,  $f = 0,05$  mm/obr

Pomiar sił podczas toczenia umożliwia monitorowanie procesu skrawania. Szerokie zastosowanie siłomierzy może być jednak ograniczone ze względu na wysoki koszt ich zakupu oraz problem z montażem na tokarkach konwencjonalnych.

Alternatywę może stanowić metoda emisji akustycznej. Wyraźna zmiana RMS sygnałów AE (wzrost o ok. 100%) może wskazywać na uszkodzenie krawędzi noża tokarskiego. Wzrost ten odnotowano przy parametrach toczenia:  $a_p = 2,0$  mm,  $f = 0,05$  mm/obr. Maksymalna wartość RMS osiągnęła  $111 \mu\text{V}$  natomiast podczas toczenia z nową płytką, parametr ten był na poziomie  $20 \mu\text{V}$ . W przypadku toczenia ze zużytą płytką rejestrowany sygnał charakteryzował się nie tylko wyższą wartością RMS, ale także większą niestabilnością.

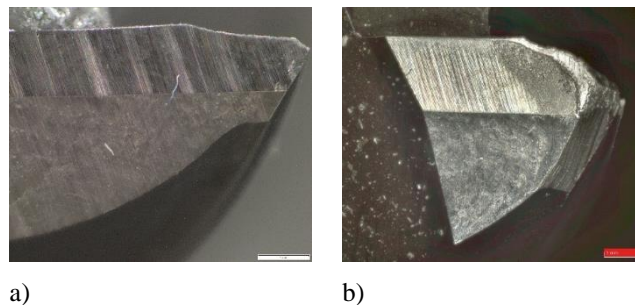
Wyniki badań toczenia przy tych samych parametrach skrawania, z nową płytką w porównaniu do zużytej, wykazały, że stan techniczny narzędzia ma istotny wpływ na generowany sygnał AE, a nie parametry skrawania. Wskazuje to na celowość monitorowania jego stanu. Badania wykazały, że obie rozważane metody diagnostyczne: emisja akustyczna oraz pomiar sił skrawania mogą być przydatne podczas normalnej eksploatacji do wykrywania nadmiernego zużycia narzędzia.

15. Dudzik K.: The possibility of applying acoustic emission method to optimize determination of milling parameters. WSEAS Transactions on Systems and Control, Vol. 15, Art. #31, 2020, str. 302-310, DOI: 10.37394/23203.2020.15.31. (40 pkt. wg listy 2021)

Badania przeprowadzono na uniwersalnej frezarce FUW3157 III z wykorzystaniem frezów palcowych ze stali szybko tnącej. Frezy palcowe o średnicy 20 mm były stosowane w trzech stopniach zużycia: nowym, tępym i lekko stępionym ze złamanym jednym z czterech ostrzy. Proces frezowania prowadzono bez chłodzenia. Jako przedmiot obrabiany zastosowano blachę ze stopu aluminium AW-7020. Proces frezowania monitorowano metodą emisji akustycznej za pomocą zestawu Physical Acoustics Corporation. Stosowano następujące parametry frezowania:

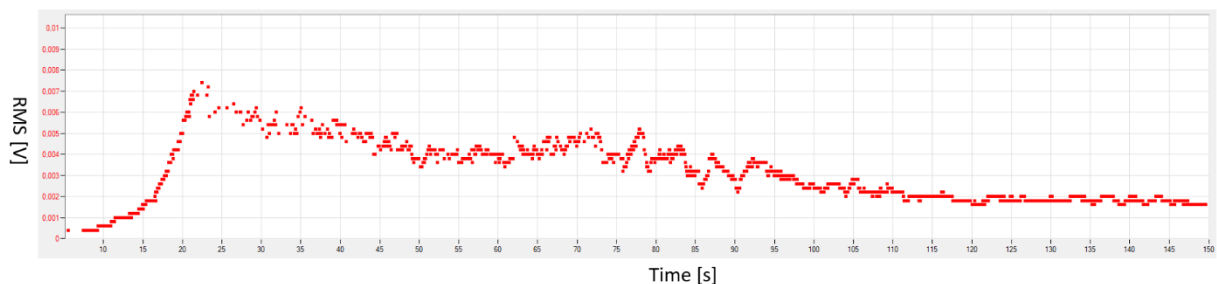
- prędkość obrotowa  $n$  [obr/min] – 400;
- głębokość skrawania  $a_p$  [mm] – 3; 5;
- posuw  $f$  [mm/min] – 25; 30; 35.

Widok krawędzi skrawających narzędzi przedstawiono na rys. 23.



Rys. 23. Widok krawędzi skrawających frezów: a) narzędzie nowe, b) narzędzie stępione

Przykładowy wykres zmian RMS sygnału AE w funkcji czasu zarejestrowany podczas frezowania narzędziem nowym przedstawiono na rys. 24.



Rys. 24. Zmiana RMS sygnału AE w funkcji czasu podczas frezowania nowym narzędziem z parametrami:  $a_p=3$  mm,  $f=25$  mm/min

Zmiany wybranych parametrów skrawania powodowały zmiany w sygnale emisji akustycznej, generowanym podczas obróbki. Kryterium doboru parametrów frezowania na podstawie parametrów sygnału AE zastosowano „im mniej tym lepiej”, świadczące o stabilnych warunkach obróbki. Najniższe wartości amplitudy, RMS i liczby zdarzeń AE zarejestrowano przy parametrach: głębokość skrawania  $a_p = 3$  mm i posuw  $f = 30$  mm/min. Parametrem o najwyższych możliwościach diagnostycznych był RMS. We wszystkich rozpatrywanych stanach narzędzia wykorzystanie wspomnianych wcześniej parametrów generowało sygnały o najmniejszej energii. W przypadku nowego narzędzia i przy złamanym

jednym ostrzu odpowiedni dobór parametrów skutkowało około dwukrotną redukcją sygnału RMS. W przypadku tępego narzędzia zaobserwowano 25% spadek RMS.

W trakcie badań zaobserwowano, że w pierwszej fazie frezowania nowym narzędziem generowany sygnał emisji akustycznej był wyraźnie wyższy w porównaniu z późniejszą fazą normalnej pracy. Wynikało to prawdopodobnie z procesu docierania się narzędzia.

Nowością w tym artykule są konkretne wartości wybranych parametrów opisujących sygnał AE generowany podczas frezowania.

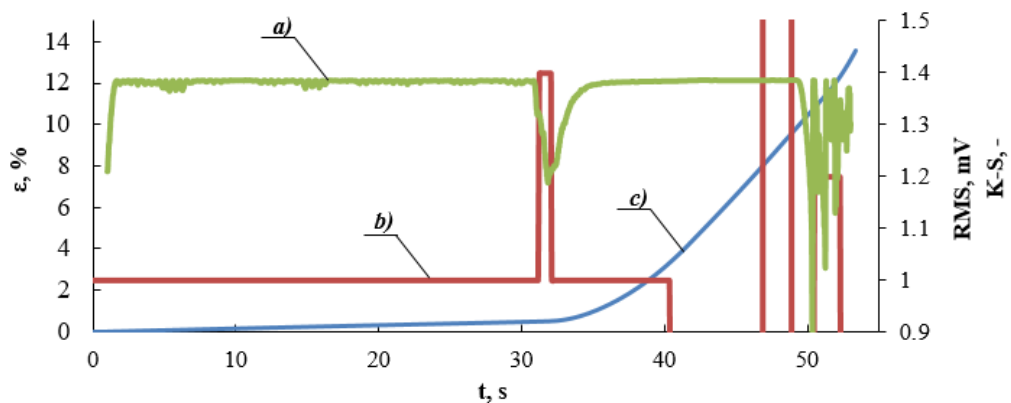
- 16. Panasiuk K., Kyzioł L., Dudzik K., Hajdukiewicz G.: Application of the Acoustic Emission Method and Kolmogorov-Sinai Metric Entropy in Determining the Yield Point in Aluminium Alloy. Materials, 13, 1386, 2020, doi.org/10.3390/ma13061386. (140pkt. wg listy 2021)**

*K. Dudzik - współwykonawca badań, odpowiedzialny za część związaną z emisją akustyczną, współudział w dyskusji wyników, przegląd literatury, sformułowanie wniosków, weryfikacja manuskryptu, wsparcie przy odpowiedziach dla recenzentów.*

Celem badań było określenie rzeczywistej granicy plastyczności stopu AW-7020 i porównanie tej wartości z umowną granicą plastyczności. Próbkę okrągłą o średnicy 8 mm, wyciętą prostopadle do kierunku walcowania, poddano statycznej próbie rozciągania. Badania przeprowadzono przy użyciu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Zwick&Roell MPMD P10B oraz oprogramowania TestXpert II, ver. 3.61. Dodatkowo zastosowano ekstensometr Epsilon 3542 w celu precyzyjnego pomiaru wydłużenia podczas testu. Dane zarejestrowane przez maszynę wytrzymałościową zostały wykorzystane do obliczeń entropii metrycznej metodą Kołmogorow – Sinai.

Podczas rozciągania próbek rejestrowano sygnał emisji akustycznej, generowanej w materiale w wyniku zmian obciążenia, za pomocą dwóch zestawów: Physical Acoustics Corporation i Vallen Systeme. Uzyskane wyniki z obu systemów były ze sobą zbieżne, dlatego do dalszej analizy wykorzystano tylko te zarejestrowane za pomocą systemu PAC. Spośród parametrów AE do analizy wybrano: amplitudę sygnału, RMS oraz liczbę zliczeń. Parametrem o największym znaczeniu diagnostycznym był RMS sygnału.

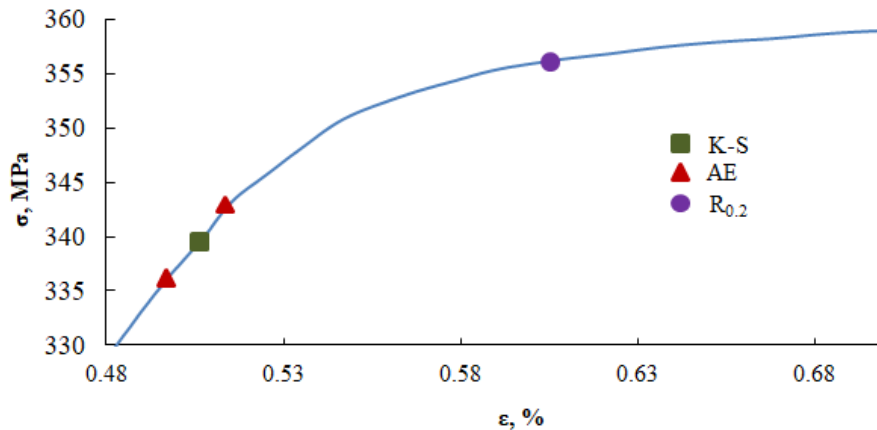
Wartości wydłużenia bezwzględne zarejestrowane podczas statycznej próby rozciągania posłużyły jako dane wejściowe do obliczenia entropii metrycznej metodą Kołmogorow-Sinai. Wykres zmian wartości entropii metrycznej K-S oraz RMS sygnału AE nałożony na zmianę odkształcenia podczas statycznej próby rozciągania przedstawiono na rys. 25.



Rys. 25. Wykres zmian w funkcji czasu: (a) entropii metrycznej K-S, (b) RMS sygnału AE, (c) odkształcenia  $\epsilon$ .

Wyraźny wzrost wartości RMS sygnału AE (o 40%) odpowiada odkształceniu  $\varepsilon = 0,496\%$ , co odpowiada naprężeniu  $\sigma = 336$  MPa. Rozpatrując wyniki entropii metrycznej K-S, zidentyfikowano lokalne minimum (1,18765) przy odkształceniu  $\varepsilon = 0,508\%$ , co odpowiada wartości naprężenia  $\sigma = 340$  MPa. Wyznaczone w ten sposób wartości świadczą o zmianie charakteru odkształceń ze sprężystych w plastyczne, a tym samym określeniu rzeczywistej granicy plastyczności.

Porównanie wyników wyznaczania granicy plastyczności dla stopu AW-7020 rozpatrywanymi metodami przedstawiono na rys. 26.



Rys. 26. Fragment wykresu zmiany naprężenia w funkcji wydłużenia z zaznaczonymi wartościami granicy plastyczności wyznaczonymi metodami: entropii metrycznej K-S; emisji akustycznej; statycznej próby rozciągania (umowna granica plastyczności)

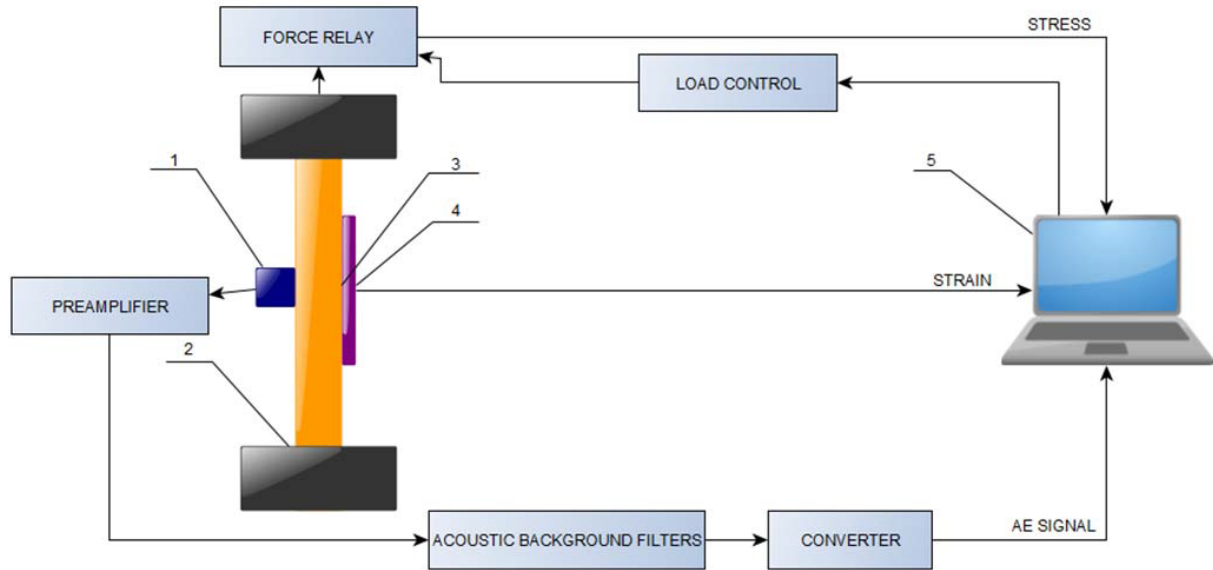
Wartość granicy plastyczności określona metodą entropii metrycznej K-S wynosi  $R_e = 340$  MPa, metodą emisji akustycznej w mieści się w zakresie  $R_e = 336 - 344$  MPa (dla początkowego i końcowego lokalnego maksimum RMS), a na podstawie wykresu rozciągania  $R_{0.2} = 356$  MPa.

**17. Panasiuk K., Kyzioł L., Dudzik K.: The use of acoustic emission signal (AE) in mechanical tests. Przegląd Elektrotechniczny, 2019, R. 95 NR 11/2019, str. 8-11, doi:10.15199/48.2019.11.03. (70 pkt. wg listy 2021)**

*K. Dudzik - współpomysłodawca koncepcji pracy, przegląd literatury, współudział w dyskusji wyników i formułowaniu wniosków, weryfikacja manuskryptu.*

Celem badań było sprawdzenie możliwości wykorzystania rejestracji sygnałów pochodzących jednocześnie z dwóch systemów pomiarowych – z maszyny wytrzymałościowej i systemu emisji akustycznej. Badania przeprowadzono podczas statycznej próby rozciągania próbek kompozytowych polimerowo szklanych. Wykorzystano uniwersalną maszynę wytrzymałościową. Dodatkowo w celu dokładnego pomiaru wydłużenia próbek podczas badań zastosowano ekstensometr. Do rejestracji i analizy sygnałów emisji akustycznej wybrano zestaw Physical Acoustics Corporation. Ze względu na amagnetyczność próbek zastosowanie dedykowanego do czujnika AE uchwytu magnetycznego nie było możliwe. W celu pewnego zamocowania i jednoczesnego zapewnienia stałego docisku czujnika do próbki zastosowano taśmę elastyczną, a jako środek sprzęgający wybrano smar silikonowy.

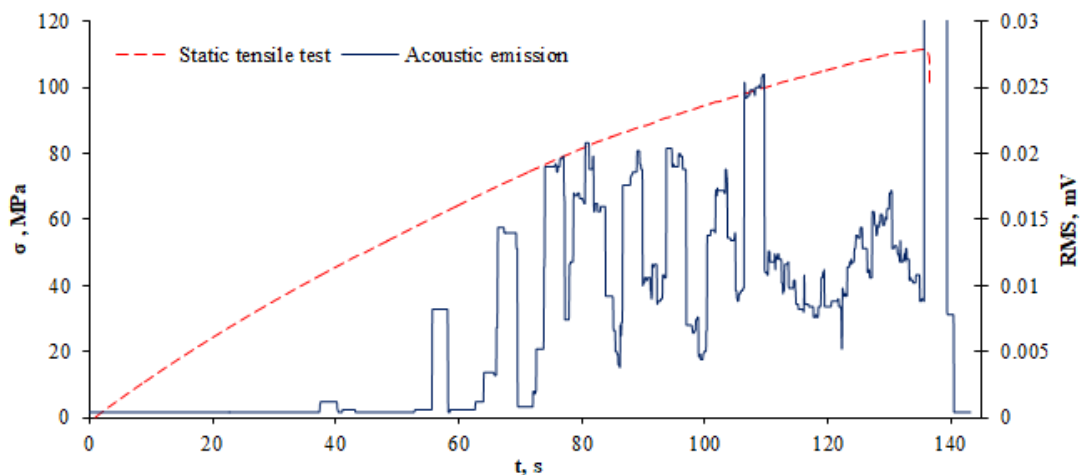
Schemat blokowy stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 25.



Rys. 25. Schemat blokowy stanowiska do analizy sygnału emisji akustycznej w badaniach mechanicznych: 1 – czujnik AE, 2 – uchwyt, 3 – próbka, 4 – ekstensometr, 5 – komputer

Rejestrowano i następnie analizowano parametry charakteryzujące właściwości mechaniczne pochodzące z maszyny wytrzymałościowej: naprężenie, wydłużenie oraz parametry opisujące sygnał emisji akustycznej towarzyszącej zjawisku obciążania próbki, między innymi: amplitudę sygnału EA i jego wartość skuteczną RMS.

Przykładowy wykres zmian RMS sygnału EA podczas badań nałożony na wykres rozciągania przedstawiono na rys. 26.



Rys. 26. Wykres zmian wartości skutecznej sygnału EA w funkcji czasu wykreślony na wykresie rozciągania dla próbki materiału kompozytowego

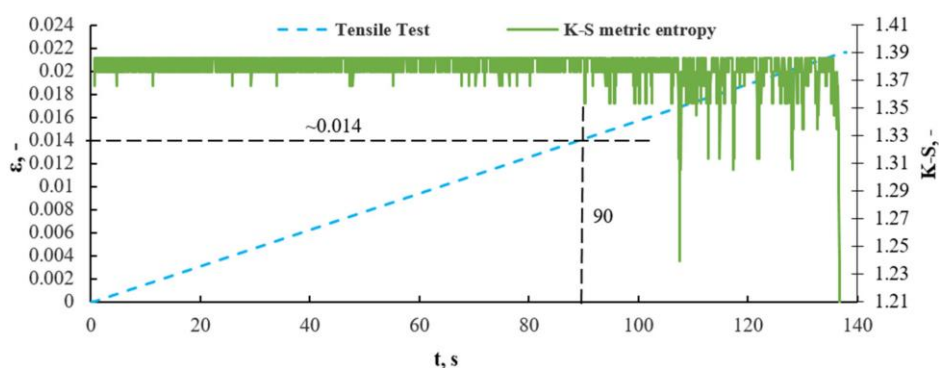
Zaobserwowano zmiany parametrów sygnału EA towarzyszące procesowi niszczenia próbki podczas badań właściwości mechanicznych. Zmiany te mogą wskazywać na charakter niszczenia i jego poszczególne etapy, takie jak: pęknięcie osnowy, delaminacja, pęknięcie zbrojenia. Uzyskane wyniki potwierdzają słuszność jednoczesnego wykorzystania statycznej próby rozciągania i emisji akustycznej oraz wskazują kierunek prowadzenia dalszych badań w tym kierunku.

18. 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, doi.org/10.3390/s21010145. (100 pkt. wg listy 2021)

*K. Dudzik - współwykonawca badań, odpowiedzialny za część związaną z emisją akustyczną, współdziałal w dyskusji wyników i formułowaniu wniosków, przegląd literatury, weryfikacja manuskryptu, wsparcie przy odpowiedziach dla recenzentów.*

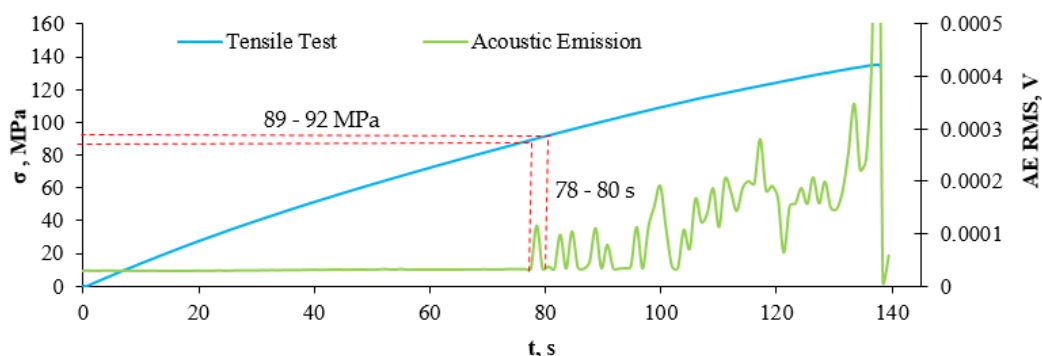
Materiały kompozytowe wykonano metodą laminowania ręcznego, których osnowę stanowiła żywica poliestrowa POLIMAL 109 A, natomiast zbrojeniem było 12 warstw mat z włókna szklanego. Przygotowano laminaty z i bez dodatku recyklatu pochodzącego z utylizacji zużytej konstrukcji pokładu statku wykonanego z kompozytów polimerowo szklanych. Recyklat uzyskano w wyniku kruszenia metodą mechaniczną a następnie przesiewaniem przez sito o średnicy oczek wynoszącej 1,2 mm. Dodatek recyklatu o wynosił 10% (wag.).

Przeprowadzono badania statycznej próby rozciągania próbek płaskich z jednoczesną rejestracją sygnału EA oraz precyzyjną rejestracją wydłużenia za pomocą ekstensometru. Wyniki badań zarejestrowane przez maszynę wytrzymałościową i ekstensometr pozwoliły na przeprowadzenie obliczeń entropii metrycznej K-S. Wykres zmian entropii metrycznej dla próbki bez dodatku recyklatu przedstawiono na rys. 27.



Rys. 27. Wykres entropii metrycznej naniesiony na wykres odkształceń w funkcji czasu dla próbki kompozytu bez recyklatu

Wyniki analizy sygnałów emisji akustycznej rejestrowanej podczas badań również naniesiono na wykres odkształcania. Przykładowy wykres zmian RMS sygnału EA i zmian naprężenia w funkcji czasu przedstawiono na rys. 28.



Rys. 28. Wykres zmiany RMS sygnału EA naniesiony na wykres zmiany naprężenia w funkcji czasu dla kompozytu bez recyklatu



Wyniki badań entropii metrycznej K-S i emisji akustycznej pozwoliły określić naprężenie odpowiadające punktowi przejścia materiału ze stanu sprężystego w sprężysto-lepkoplastyczny (tab. 15).

Tab. 15. Podsumowanie wyników dla analizowanych próbek uzyskanych metodą EA i entropii metrycznej K-S

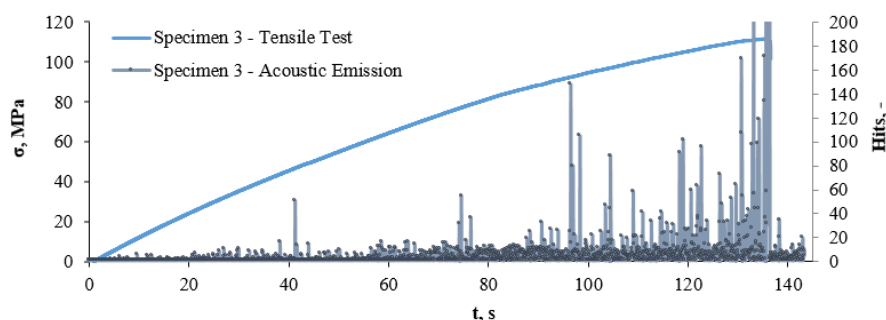
zawartość recyklatu [%] (wag.)	Naprężenie przejścia ze stanu sprężystego w sprężysto-lepkoplastyczny [MPa]	
	metoda K-S	metoda EA
0	100	89-92
10	93	68-74

Przedstawione w artykule dwie metody badawcze, mające na celu określenie przejścia materiału od fazy sprężystej do fazy sprężysto-lepkoplastycznej, wykazały ich praktyczną przydatność. Zaproponowane metody stanowią uzupełnienie klasycznej statycznej próby rozciągania i danych rejestrowanych tylko przez maszynę wytrzymałościową. Różnica między wynikami uzyskanymi, przy użyciu tych metod wynosi ok. 10-20%, co wskazuje na konieczność dopracowania metody entropii metrycznej K-S.

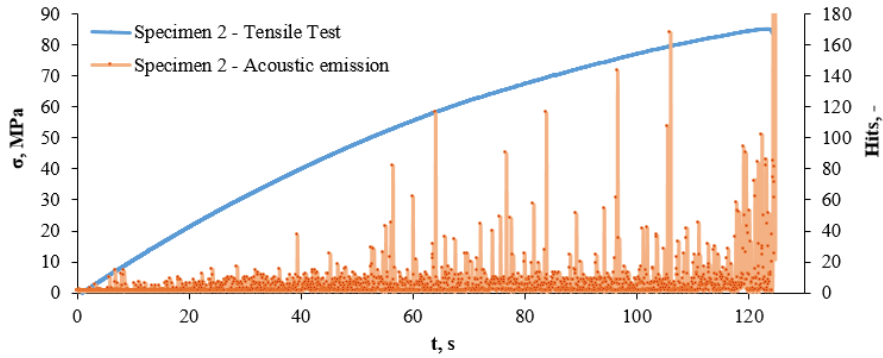
**19. Panasiuk K., Dudzik K., Hajdukiewicz G.: Acoustic Emission as a method for analyzing changes and detecting damage in composite materials during loading. Archives of Acoustics, Vol. 46, No. 3, str. 399–407 (2021), doi: 10.24425/aoa.2021.138133. (100 pkt. wg listy 2021)**

*K. Dudzik - współpomysłodawca koncepcji pracy, współwykonawca badań, odpowiedzialny za część związaną z emisją akustyczną, współudział w dyskusji wyników i formułowaniu wniosków, przegląd literatury, weryfikacja manuskryptu, wsparcie przy odpowiedziach dla recenzentów.*

Badania stanowiły kontynuację próby określenia przejścia ze stanu sprężystego w sprężysto-lepkoplastyczny materiałów kompozytowych. Testowano laminaty poliestrowo szklane bez dodatku recyklatu oraz z dodatkiem 10% wag. recyklatu, o parametrach opisanych we wcześniejszej pracy. Materiały były przygotowane w ten sam sposób, natomiast zmieniono żywicę na POLIMAL 1094 AWTP. W badaniach skupiono się tylko na rejestracji emisji akustycznej i danych rejestrowanych przez maszynę wytrzymałościową. Korzystano z tego samego wyposażenia laboratoryjnego, które było opisane we wcześniejszej pracy. Analizowano między innymi liczbę zdarzeń dla próbki kompozytu bez dodatku recyklatu (rys. 29) i z dodatkiem 10% wag. recyklatu (rys. 30).



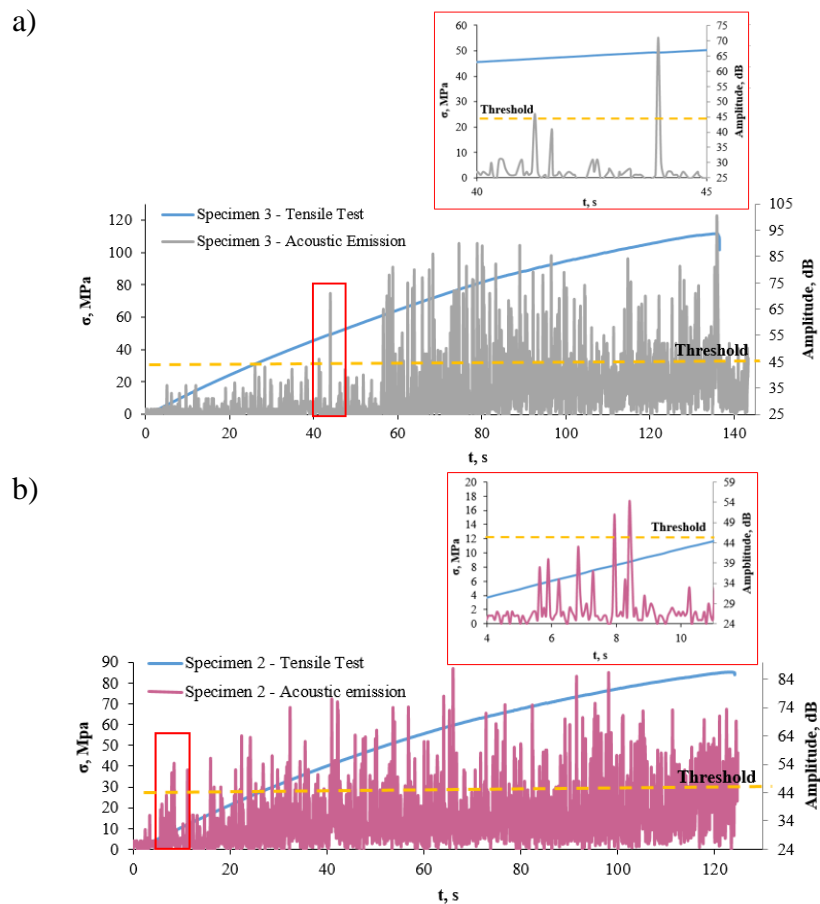
Rys. 29. Wykres naprężeń i liczby zdarzeń EA w funkcji czasu dla wybranej próbki bez recyklatu



Rys. 30. Wykres naprężeń i liczby zdarzeń EA w funkcji czasu dla wybranej próbki z dodatkiem recyklatu

Pierwsze znaczące zmiany liczby zdarzeń emisji akustycznej, w obu rozpatrywanych przypadkach, zaobserwowano przy naprężeniu ok 40 MPa. W przypadku kompozytu bez recyklatu kolejny wzrost liczby zdarzeń EA następuje przy naprężeniu ok. 80 MPa, natomiast w przypadku próbki z 10% zawartością recyklatu zjawisko to zarejestrowano po przekroczeniu naprężenia ok. 50 MPa.

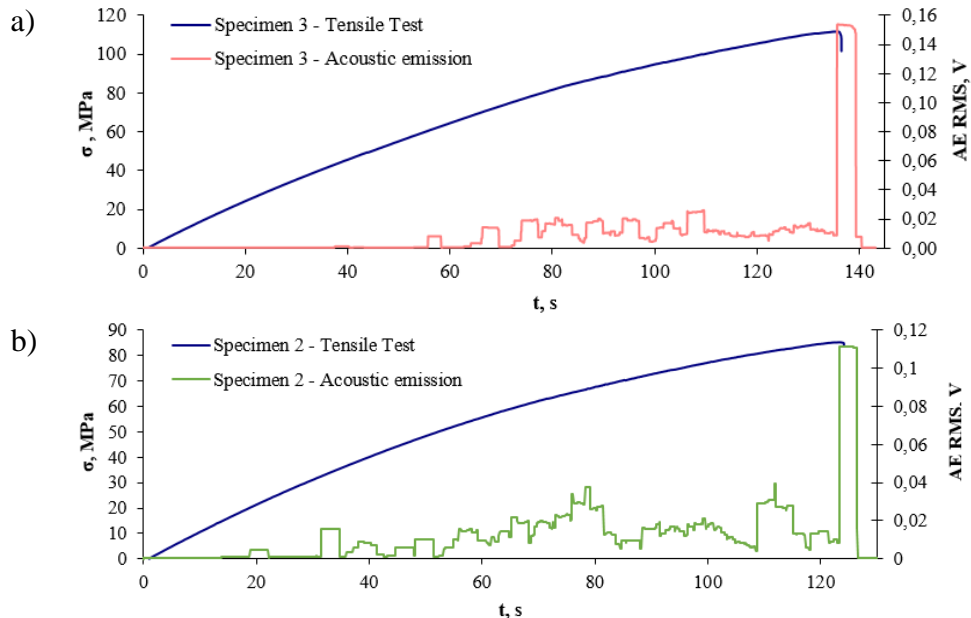
Kolejnym parametrem opisującym sygnał EA rejestrowanym w czasie nadań była jego amplituda. Na podstawie literatury i własnych doświadczeń wyznaczono próg dyskryminacji na poziomie 45 dB. Na rysunku 31 przedstawiono wykres naprężenia i amplitudy sygnału EA w funkcji czasu dla próbki bez recyklatu oraz z dodatkiem 10% recyklatu.



Rys. 31. Wykres naprężeń i amplitudy sygnału EA w funkcji czasu: a) próbka bez dodatku recyklatu, b) próbka z 10% zawartością recyklatu poliestrowo-szklanego

Pierwsze przekroczenie amplitudy powyżej przyjętego progu w przypadku próbki bez dodatku recyklatu zarejestrowano przy naprężeniu ok 40 MPa, natomiast dla próbki z dodatkiem recyklatu przekroczenie wystąpiło przy ok 10 MPa.

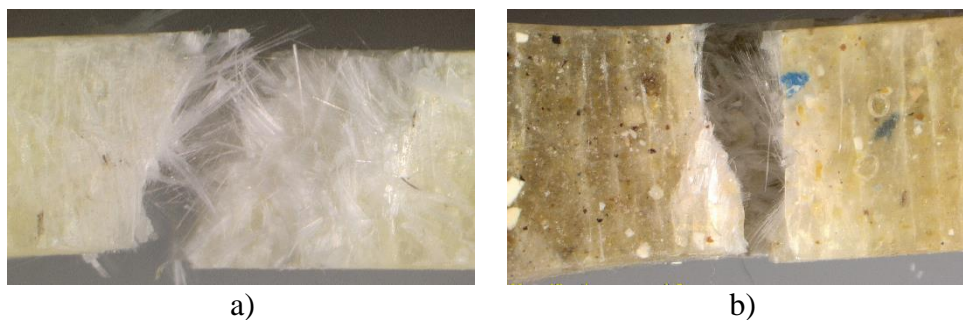
Ponieważ zmiany wartości amplitud oraz liczba zdarzeń EA mogą charakteryzować zjawiska przypadkowe i niemające wpływu na ogólny charakter zmian w materiale analizie poddano dodatkowo wartość skuteczną sygnału EA. Wykresy zmian w czasie RMS sygnału EA przedstawiono na rys. 32.



Rys. 32. Wykres naprężenia i RMS sygnału EA w funkcji czasu: a) próbka bez dodatku recyklatu, b) próbka z 10% zawartością recyklatu poliestrowo-szklanego

W przypadku próbek bez recyklatu znaczny wzrost RMS zarejestrowano po przekroczeniu naprężenia ok. 60 MPa, co wskazuje na początek procesu destrukcji materiału. Dla próbek z 10% zawartością recyklatu istotny wzrost wartości RMS wystąpił przy naprężeniu ok. 35 MPa.

Dodatek recyklatu do osnowy powoduje zmianę charakteru pęknięcia na bardziej kruchy. Potwierdza to widok pęknięcia próbek po badaniach statycznej próby rozciągania (rys. 33).



Rys. 33. Widok próbek po statycznej próbie rozciągania: a) próbka bez recyklatu, b) próbka z 10% zawartością recyklatu

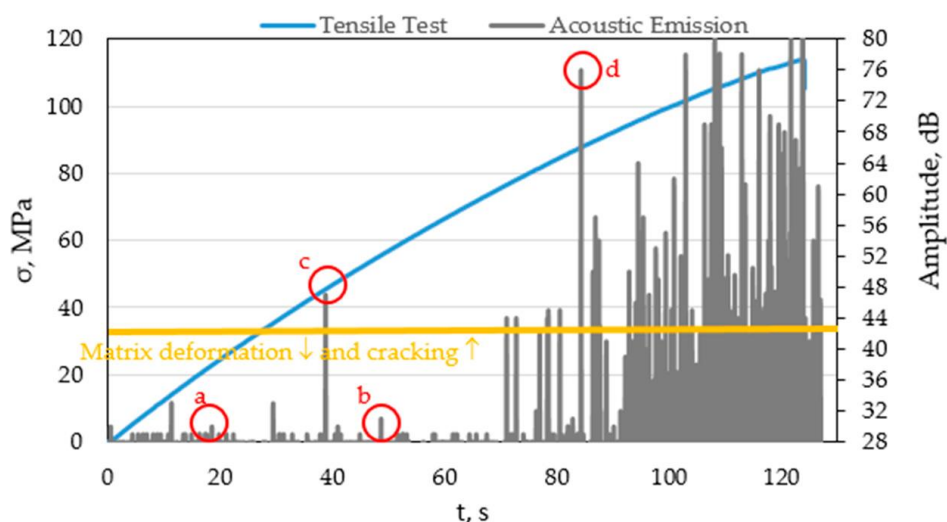
**20. Panasiuk K., Dudzik K.: Determining the Stages of Deformation and Destruction of Composite Materials in a Static Tensile Test by Acoustic Emission. Materials, 2022, 15, 313, doi.org/10.3390/ma15010313. (140pkt. wg listy 2021)**

*K. Dudzik - współwykonawca badań, odpowiedzialny za część związaną z emisją akustyczną, współudział w dyskusji wyników i formułowaniu wniosków, przegląd literatury, weryfikacja manuskryptu, współudział w przygotowaniu odpowiedzi dla recenzentów.*

Celem badań była ocena charakteru procesu niszczenia materiału kompozytowego. Metodą laminowania ręcznego wykonano materiał kompozytowy, którego osnowę stanowiła żywica poliestrowa, natomiast zbrojeniem było włókno szklane o gramaturze 350 g/m<sup>2</sup> (10 warstw). Dla porównania wytworzono materiał na bazie samej żywicy poliestrowej bez zbrojenia.

W badaniach rejestrowano i analizowano sygnały emisji akustycznej podczas statycznej próby rozciągania materiałów kompozytowych zbrojonych włóknem szklanym. Skupiono się na wyodrębnieniu sygnałów AE, których źródłem były takie zjawiska jak: pękanie osnowy, delaminacja, pękanie na granicy osnowa – zbrojenie, pękanie włókien zbrojenia.

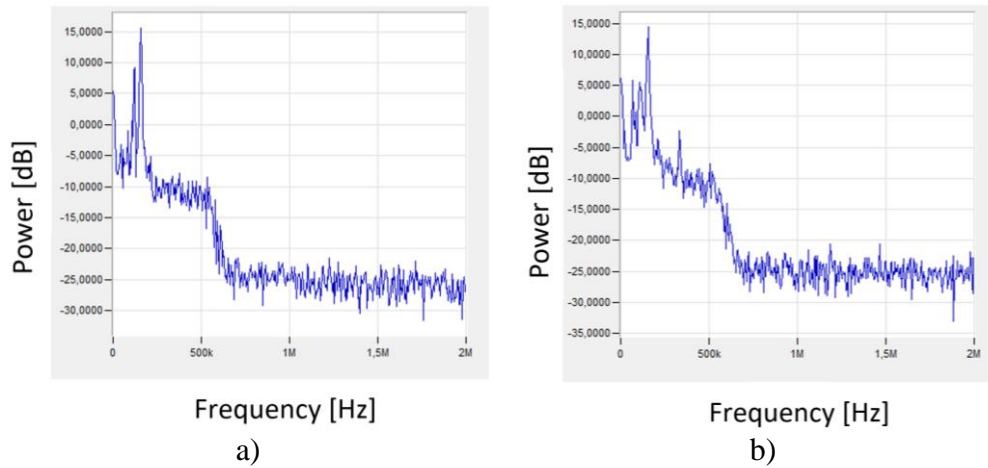
Wykres zmian amplitudy sygnału emisji akustycznej naniesiony na wykres rozciągania próbki zarejestrowany w czasie statycznej próby rozciągania przedstawiono na rys. 34.



Rys. 34. Wykresy amplitudy sygnału AE naniesione na wykres rozciągania w funkcji czasu dla wybranej próbki na bazie żywicy poliestrowej zbrojonej włóknem szklanym: (a,b) deformacja osnowy, (c) pękanie osnowy, (d) pękanie włókien

Analiza sygnałów emisji akustycznej zarejestrowanych podczas badań pozwala określić wartości amplitud charakterystycznych dla mechanizmów niszczenia rozpatrywanych materiałów kompozytowych. Sygnały o amplitudzie w zakresie 30 – 41 dB mogą świadczyć o odkształceniach plastycznych osnowy. Sygnały o amplitudzie w zakresie 42 – 50 dB wskazują na pęknięcia osnowy z towarzyszącą temu zjawisku delaminacją włókien. Sygnały o amplitudach większych niż 50 dB wskazują na pękanie włókien.

W celu porównania widm częstotliwościowych sygnałów charakterystycznych dla poszczególnych etapów niszczenia poddano je analizie FFT. Przykładowe widma charakterystyczne dla odkształcenia osnowy, zarejestrowane dla próbki z czystej żywicy i zbrojonej włóknem szklanym, przedstawiono na rys. 35. Można zaobserwować podobny charakter sygnału w przypadku próbek z czystej żywicy i próbek zbrojonych.



Rys. 35. Przykładowe sygnały, po analizie FFT, charakterystyczne dla odkształcenia osnowy:  
a) czysta żywica, b) kompozyt

Dla zdefiniowanych sygnałów AE odpowiadających poszczególnym etapom zniszczenia próbki określono wartości naprężeń. Wyniki przedstawiono w tabeli 16.

Tab. 16. Wartości amplitudy sygnału AE oraz naprężenia dla poszczególnych etapów niszczenia próbek z kompozytu polimerowo – szklanego

etap niszczenia	Amplituda [dB]	Naprężenie [MPa]
odkształcenie osnowy	31 ÷ 41	10 ÷ 40
pękanie osnowy, delaminacja	42 ÷ 50	40 ÷ 50
pękanie włókien	>50	51 ÷ 110

Rejestracja zmiany siły i wydłużenia, czyli parametrów uzyskanych z maszyny wytrzymałościowej, z jednoczesną rejestracją sygnałów emisji akustycznej umożliwia określenie parametrów charakteryzujących poszczególne etapy procesu niszczenia materiałów kompozytowych.

*Krzysztof Dudzik*  
.....  
(podpis wnioskodawcy)