

Rafał STANIK\*, Andrzej CZULAK, Bartłomiej PRZYBYSZEWSKI, Maik GUDE

TU Dresden Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Germany

\* e-mail: rafal.stanik@tu-dresden.de

## Integracja układów elektronicznych w strukturze materiału kompozytowego

**Streszczenie.** Integracja układów elektronicznych w materiałach kompozytowych pozwala na wytworzenie materiału posiadającego cechy materiałów konstrukcyjnych o wysokich własnościach wytrzymałościowych, wysokiej odporności na warunki atmosferyczne, jak i cechy funkcjonalne zależne od zastosowanego układu elektronicznego. Wytwarzanie takich kompozytów w produkcji wielkoseryjnej umożliwia technologia Resin Powder Moulding (RPM) opracowana przez Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH (LZS) oraz Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik TU Dresden w kooperacji z New Era Materials Sp. z o.o. (NEM). Krytycznymi parametrami w podanym procesie produkcyjnym, ze względu na wrażliwy układ elektroniczny, jest ciśnienie procesu prasowania, temperatura procesu oraz czas. W artykule zaprezentowano proces wytwarzania materiału kompozytowego wzmacnianego włóknami ciągłymi ze zintegrowanym układem elektronicznym, z wykorzystaniem technologii RPM, wraz z określeniem wpływu materiału kompozytowego na własności użytkowe układu elektronicznego.

### INTEGRATION OF ELECTRONIC SYSTEMS IN TEXTILE-REINFORCED COMPOSITES

**Summary.** Integration of electronic circuits in composite materials allows to manufacture product connecting features of both structural and functional materials with high durability properties, resistance for atmospheric conditions and wide functionality according to field of work of used electric circuit. Massive production of this type of composite materials is possible with Resin Powder Moulding (RPM) technology, developed by Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH (LZS) in cooperation with New Era Materials Sp. z o.o. (NEM). Critical parameters in technology mentioned before is temperature, pressure of pressing and time of process. Electronics are very sensitive and can be easily damaged or broken during fast production process. In the following article is presented production process of composite material with integrated electronic circuit. Composite was produced with RPM technology. Also influence of composite material on electronics was defined.

### 1. WSTĘP

Poprzez integrację układów elektronicznych w strukturze materiałów kompozytowych powstają tzw. inteligentne struktury, których głównym zastosowaniem jest monitorowanie elementu oraz rozpoznawanie stanu obciążeń oddziałujących na badany obiekt [8][9]. Zintegrowany układ elektroniczny może mieć zastosowanie w pomiarze zarówno naprężeń wewnętrznych struktury, obciążeń zewnętrznych, jak i innych zadań, ściśle uzależnionych od charakterystyki zastosowanego układu

elektronicznego. Kolejną zaletą takiego rozwiązania jest ochrona układów elektronicznych przed warunkami zewnętrznymi takimi jak wilgoć oraz chemiczne lub mechaniczne uszkodzenia.

Coraz większe zapotrzebowanie na inteligentne struktury, dyktowane przez konieczność spełnienia narastających wymagań ekonomicznych oraz ekologicznych wymusza adaptację istniejących technologii wytwarzania materiałów kompozytowych do integracji układów elektronicznych w ich strukturze. W związku z tym wiele technologii wytwarza-

nia materiałów kompozytowych zostało zmodyfikowanych oraz dostosowanych w celu integracji sensorów oraz układów elektronicznych [1]-[4]. W przypadku integracji układów elektronicznych w materiale kompozytowym w technologii Resin Powder Moulding (RPM) oraz Thermoset Sheet Forming (TSF) bazujących na materiale wzmocnienia w postaci tkaniny, wprowadzenie układów w strukturę kompozytu wiąże się z rozwiązaniem wielu problemów natury technologicznej. Z powodu charakteru struktury tkaniny, podczas procesu prasowania powstaje pod wpływem ciśnienia oraz temperatury prasowania, nierównomierne rozkład nacisku na poszczególne elementy układu elektronicznego. W związku z tym, bardzo istotnym etapem w procesie integracji układów elektronicznych w strukturze materiału kompozytowego jest odpowiedni dobór komponentów układu elektronicznego jak i dostosowanie parametrów procesu wytwarzania.

Celem niniejszego artykułu było pokazanie możliwości integracji układów elektronicznych w strukturze materiału kompozytowego z wykorzystaniem nowatorskiej technologii wytwarzania materiałów kompozytowych z wykorzystaniem systemu żywic epoksydowych A.S.SET. W tym celu przeanalizowano wpływ parametrów procesu wytwarzania na podstawowe elementy układów elektronicznych takich jak diody, rezystory czy też same połączenia lutowane. W kolejnym kroku przeprowadzono doświadczenia mające na celu określenie wpływu materiału kompozytowego na sposób działania zintegrowanego układu elektronicznego. W przypadku rezystorów bardzo istotną kwestią była temperatura pracy, natomiast w przypadku diod sposób tłumienia czy rozpraszania generowanego światła przez materiał kompozytowy.

## 2. PROCES WYTWARZANIA

Technologia RPM została opracowana przez LZS oraz ILK TUD w kooperacji z NEM i bazuje na jednokomponentowej żywicy epo-

ksydowej A.S.SET Powder 01 opracowanej przez NEM.

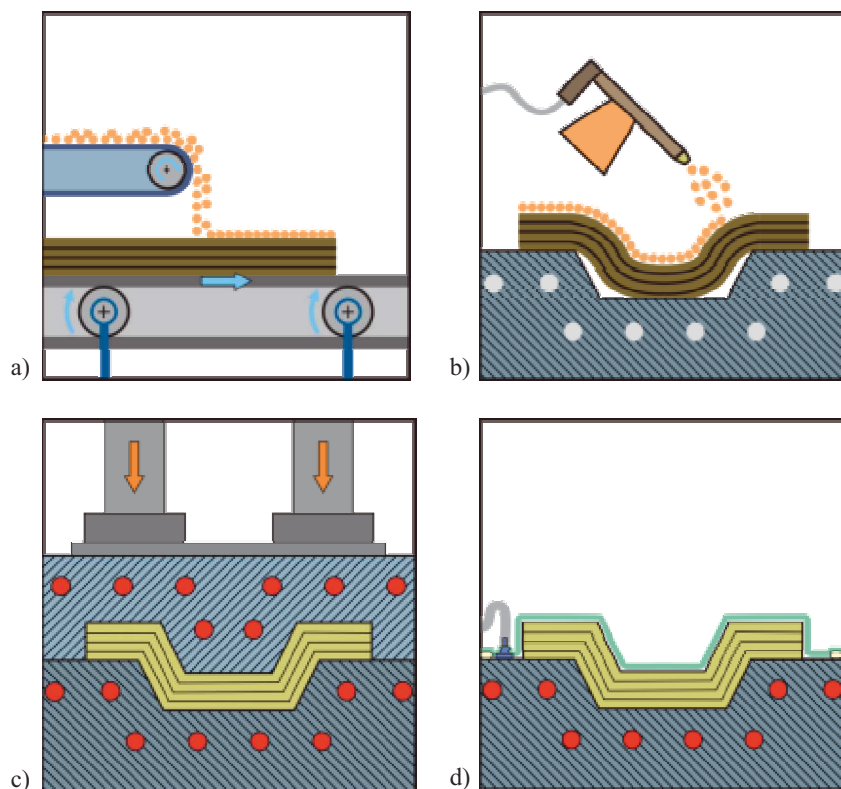
RPM jest nową, wysokowydajną technologią w produkcji termoutwardzalnych kompozytów bazujących na wzmocnieniach z włókien ciągłych. W RPM wykorzystuje się sproszkowaną żywicę epoksydową (A.S.SET Powder), która w temperaturze pokojowej zachowuje stan stały. A.S.SET to jednokomponentowy produkt predestynowany do formowania przy użyciu pras, który podczas podgrzewania (>80 °C) przechodzi w stan ciekły. Przekroczenie temperatury 120°C powoduje rozpoczęcie procesu sieciowania i utwardzenia materiału. Żywica A.S.SET może być również stosowana w konwencjonalnych technologiach, takich jak VARI lub technologia autoklawowa. Idea technologii RPM została przedstawiona na rysunku 1.

W procesie RPM używa się sproszkowanej żywicy epoksydowej oraz materiału wzmocnienia najczęściej w postaci tkaniny włóknistej. Po odpowiednim przygotowaniu zbrojenia, jak i żywicy następuje proces formowania, uzyskując w ten sposób finalny produkt. Przygotowanie zbrojenia oraz żywicy odbywa się poza formą. Formowanie oraz utwardzanie materiału zachodzi w formie prasy, która nadaje końcowy kształt produkowanego elementu.

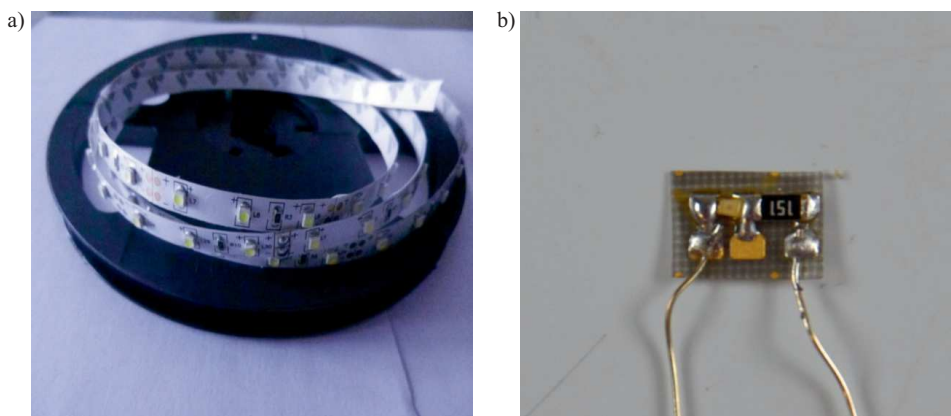
Proces formowania z wykorzystaniem technologii RPM odbywa się w temperaturze utwardzania żywicy epoksydowej, z tego względu predystynowana do tego celu jest prasa z podgrzewaną formą. Sproszkowana żywica epoksydowa zostaje nałożona za pomocą pistoletu proszkowego na materiał zbrojenia. W kolejnym kroku zostaje umieszczony układ elektroniczny w odpowiednio przygotowane wycięcie w tkaninie. Następnie tak przygotowane komponenty umieszcza się w formie prasy, gdzie w kolejnym kroku przeprowadza się proces prasowania.

## 3. BADANE MATERIAŁY

Badaniu poddane zostały dwa rodzaje układów elektronicznych (Rys. 2):



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie procesu RPM: a), b) aplikacja żywicy, c) utwardzanie z wykorzystaniem prasowania, d) utwardzanie z wykorzystaniem metody infuzji (VARI)



Rys. 2. Zastosowane układy elektroniczne: a) taśma LED, b) układ lutowany ręcznie

- taśma LED zasilana prądem stałym o napięciu 12 V. Pojedyncze segmenty posiadały wymiar 50 mm × 10 mm. W skład pojedynczego segmentu wchodziły trzy diody SMD 3528 o napięciu zasilania 3,2 V oraz jeden rezystor SMD o rezystancji 150 Ω.
- układ lutowany lutownicą, składający się z diody SMD 0603 o napięciu zasilania 3,6 V

oraz opornika SMD o rezystancji 420 Ω, umieszczonych na wyspach lutowniczych o wymiarach 10 mm × 15 mm.

Integracji poddano dwa rodzaje układów elektronicznych. Pierwszy z nich to komercyjnie dostępne oraz tanie rozwiązanie w postaci taśmy LED. Drugi wariant to układ składający się z diod SMD o wysokiej mocy charakteryzujący

**Tabela 1. Badane próbki**

Lp.	Nazwa próbki	Osnowa	Wzmocnienie	Układ elektroniczny	Liczba próbek
1	LED_GFRP_01	A.S.SET 01	Tkanina z włókna szklanego	Taśma LED	3
2	LED_GFRP_02	A.S.SET 01	Tkanina z włókna szklanego	Układ lutowany lutownicą	3
3	LED_01			Taśma LED	1
4	LED_02			Układ lutowany lutownicą	1

się znacznie mniejszymi wymiarami. Zastosowanie układu elektronicznego o mniejszych wymiarach spowodowałoby znacznie mniejszą ingerencję w strukturę materiału kompozytowego, co pozwoliłoby zmniejszyć prawdopodobieństwo powstawania defektów czy też delaminacji poszczególnych warstw wzmocnienia.

W tabeli 1 przedstawiono próbki wykorzystane w niniejszej pracy. Przy użyciu procesu RPM wytworzono kompozyty o osnowie polimerowej wzmocniane włóknom szklanym ze zintegrowanymi układami elektronicznymi. Wykonano dwie płyty o wymiarach 300 mm × 300 mm, w których w jednej zintegrowano trzy segmenty taśmy LED, natomiast w drugiej trzy układy lutowane ręcznie. Następnie z tych płyt wycięto próbki zawierające układy elektroniczne o wymiarach 250 mm × 20 mm. Ponadto, jako próbki referencyjne wykorzystano niezintegrowaną taśmę LED oraz układ lutowany ręcznie (Tabela 1).

Ze względu na użyty układ elektroniczny konieczne było zastosowanie transparentnego materiału zbrojenia. Do tego celu wykorzystano siedem warstw tkaniny z włókna szklanego o gramaturze 390 g/m<sup>2</sup> i kącie ułożenia włókien 0/90°. W pięciu wewnętrznych warstwach zbrojenia zostały wykonane wycięcia o wymiarach odpowiadających wymiarom układów elektronicznych. Zastosowany proces RPM wymagał użycia 15 g sproszkowanej żywicy epoksydowej A.S.SET 01, którą rozprowadzono pomiędzy warstwami zbrojenia. Przygotowane komponenty zostały umieszczone w formie nagrzanego do temperatury 120 °C, gdzie z ciśnieniem 0,11 MPa przeprowadzono proces prasowania. Czas trwania

procesu wynosił 480s, po czym gotowe próbki zostały wyjęte z formy, bez konieczności jej chłodzenia.

#### 4. ANALIZA USZKODZEŃ UKŁADU ELEKTRONICZNEGO

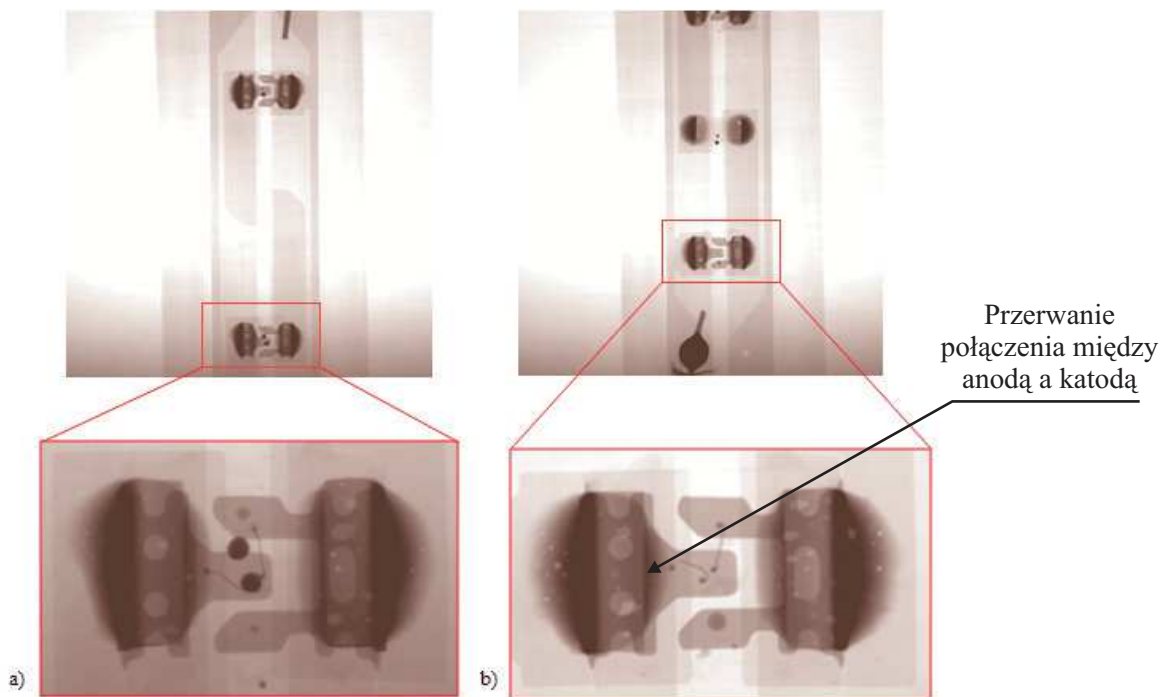
Otrzymane w procesie prasowania próbki ze zintegrowanymi układami elektronicznymi poddano weryfikacji doświadczalnej, która polegała na podłączeniu układów elektronicznych do zasilania. Wśród wytworzonych próbek zaobserwowano uszkodzenie dwóch układów elektronicznych, jednego w próbce z taśmą LED oraz jednego lutowanego kolbą ręczną.

W celu identyfikacji przyczyny uszkodzenia przeprowadzono badanie z wykorzystaniem tomografii komputerowej, która pozwala na analizę struktury wewnętrznej badanej próbki, a dzięki temu identyfikację obszarów uszkodzenia układu elektronicznego (Rys. 3).

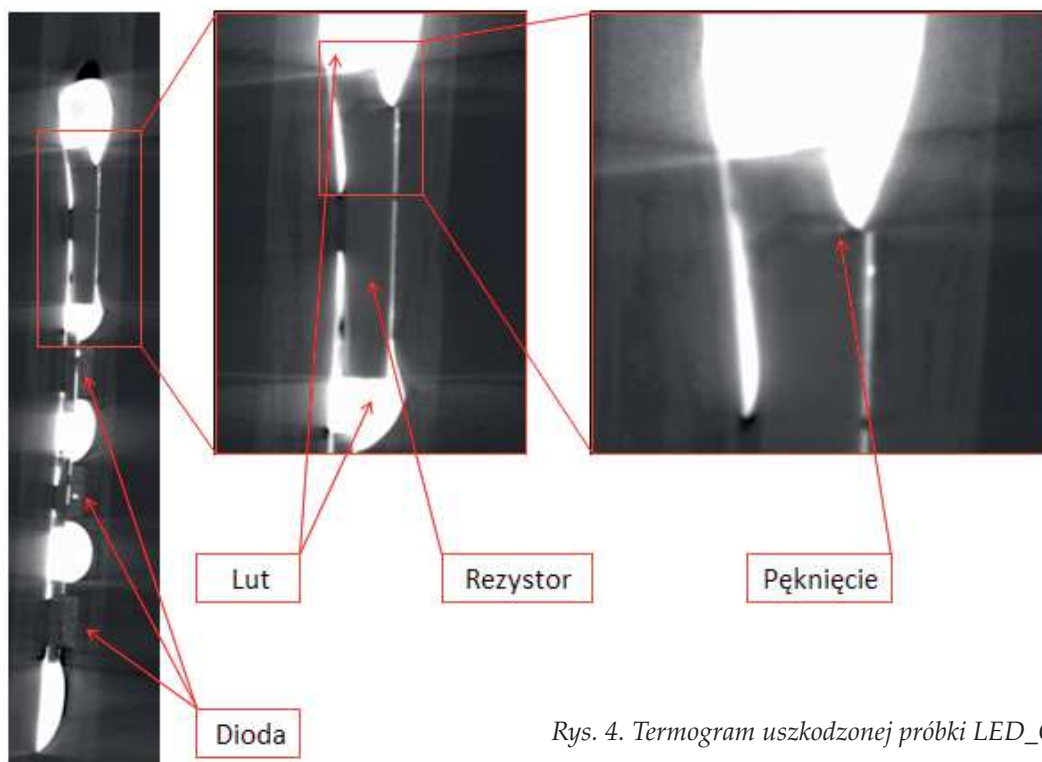
Badanie z wykorzystaniem tomografii komputerowej umożliwiło dokładną obserwację przerwania połączenia między katodą, a anodą w uszkodzonej diodzie. Uszkodzenie to zostało spowodowane przeniesieniem zbyt dużego naprężenia na elementy elektroniki. Dla uszkodzonej próbki, zawierającej diody lutowane ręcznie w próbce LED\_GFRP\_02 (Rys. 4), uszkodzenie nastąpiło w miejscu połączenia rezystora z lutem. W górnej części opornika widać pęknięcie, które spowodowało przerwę w obwodzie. Uszkodzenie opornika spowodował najprawdopodobniej zbyt duże naprężenie przeniesione przez lut na rezystor.

Wykonane badania potwierdziły, iż główną przyczyną uszkodzenia elektroniki w czasie





Rys. 3. Tomogramy uszkodzonej taśmy LED w próbce LED\_GFRP\_01: a) nieuszkodzona dioda, b) uszkodzona dioda



Rys. 4. Termogram uszkodzonej próbki LED\_GFRP\_02

procesu prasowania była zbyt wysoka siła prasowania. Zniszczenie mogło być spowodowane zbyt małą liczbą warstw wewnętrznych

wzmocnienia, które zapobiegają bezpośredniemu przeniesieniu naprężeń na elementy elektroniki. W przypadku układu wytworzo-

nego w sposób ręczny (LED\_02), newralgicznym punktem okazały się wrażliwe połączenia lutowane, które bezpośrednio wpłynęły na obniżenie jakości oraz powtarzalności procesu integracji układów elektronicznych w materiale kompozytowym.

Ze względu na liczne uszkodzenia w próbkach z zintegrowanymi układami lutowanymi lutownicą, kolejne badania przeprowadzono wyłącznie na próbkach LED\_GFRP\_01 oraz LED\_01.

## 5. WYNIKI BADAŃ

### 5.1. Badanie emisji ciepła

W celu określenia sposobu oddziaływania zarówno układu elektronicznego na materiał kompozytowy, jak i materiału kompozytowego na układ elektroniczny przeprowadzono szereg badań.

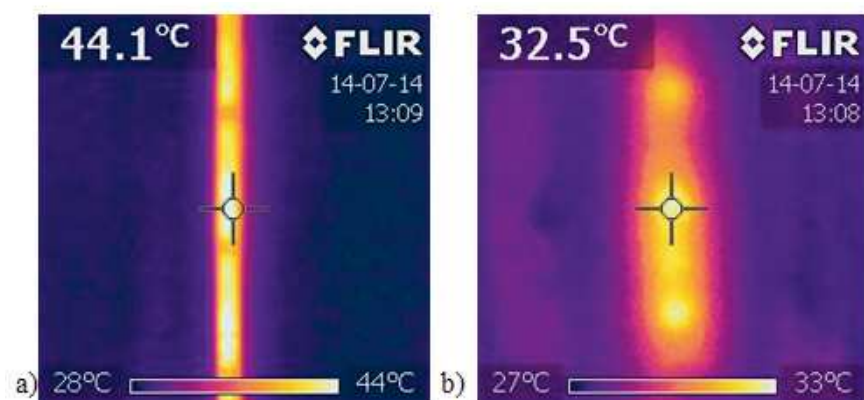
W pierwszej kolejności sprawdzono sposób wymiany ciepłej między poszczególnymi komponentami w trakcie pracy układu elektronicznego, z wykorzystaniem pomiaru temperatury za pomocą kamery termowizyjnej. Temperatura pracy poszczególnych elementów elektronicznych bezpośrednio wpływa na ich żywotność, dlatego też bardzo istotną kwestią było zbadanie sposobu wymiany oraz odprowadzenia ciepła.

Celem badania było porównanie temperatury pracy układu zintegrowanego, jak i nie-

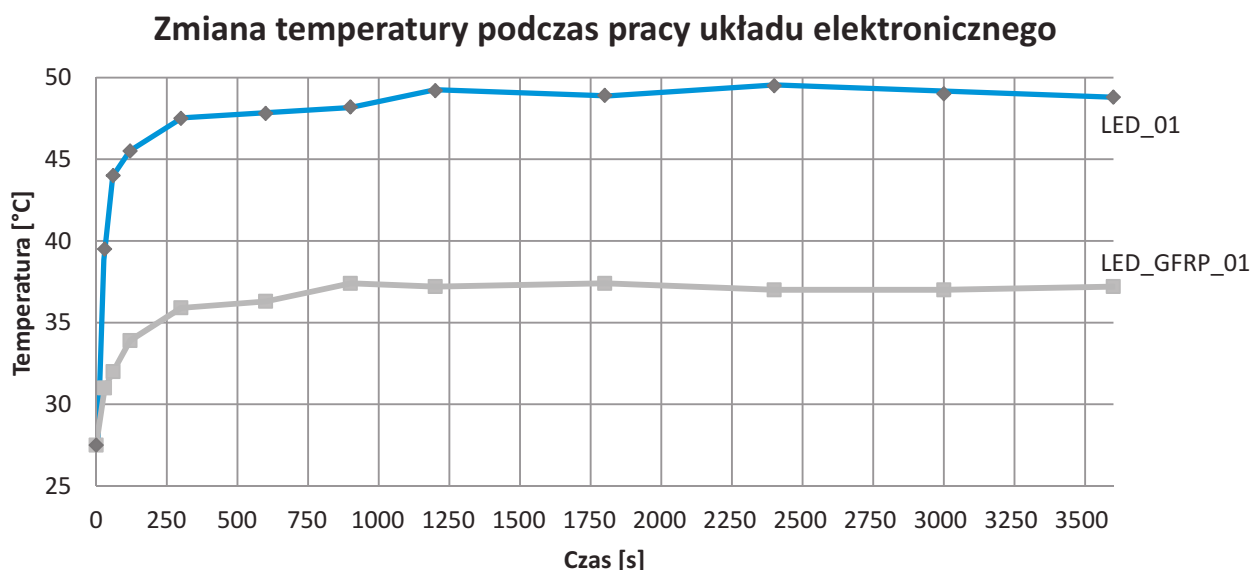
zintegrowanego przy zachowaniu stałych warunków badania dla obu przypadków (prąd zasilania, rodzaj podłoża, temperatura otoczenia). W pierwszym kroku dokonano pomiaru temperatury układu elektronicznego przy wyłączonym zasilaniu. Temperatura diod próbki LED\_01, jak i diod układu zintegrowanego w próbce LED\_GFRP\_01 wyniosła 27,5°C. Po podłączeniu zasilania dokonywano pomiaru przez godzinę, lecz już po 20 minutach nie zaobserwowano zmian temperatury wszystkich próbek. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe termogramy uzyskane w trakcie pomiaru.

Pomiar przeprowadzono dla wszystkich próbek LED\_GFRP\_01 a następnie została obliczona wartość średnia. Wyniki pomiaru zostały przedstawione w postaci wykresu na rysunku 6.

Z otrzymanych wyników można wywnioskować, iż materiał kompozytowy bardzo dobrze odprowadza ciepło, co przejawia się obniżeniem temperatury pracy układu elektronicznego o średnio 12,2 °C. Zarówno układ niezintegrowany jak i układ zintegrowany w materiale kompozytowym osiągnęły swoją maksymalną temperaturę pracy po około 15 minutach od włączenia zasilania. Wzrost temperatury w przypadku próbki LED\_01 zachodzi w sposób skokowy tzn. układ w bardzo krótkim czasie nagrzewa się do temperatury 45°C, po czym następuje powolne nagrzanie do maksymalnej temperatury pracy, która wyniosła



Rys. 5. Termogram uzyskany po 60 sekundach od włączenia zasilania: a) próbka LED\_01, b) próbka LED\_GFRP\_01



Rys. 6. Wykres zmiany temperatury podczas pracy próbki LED\_GFRP\_01 oraz LED\_01

49 °C. W przypadku próbki LED\_GFRP\_01 wzrost temperatury pracy zachodzi w sposób łagodniejszy, czego przyczyną jest lepsze odprowadzenie ciepła przez materiał kompozytowy. Maksymalna temperatura zanotowana w przypadku tej próbki wyniosła 37,5 °C.

## 5.2. Badanie natężenia światła

Kolejnym badaniem, które zostało przeprowadzone w celu określenia wpływu materiału zbrojenia i osnowy na właściwości użytkowe układu elektronicznego było badanie natężenia światła luksomierzem. Badanie to pozwoliło na określenie, w jakim stopniu materiał kompozytowy rozprasza bądź tłumii światło generowane przez diody.

Wykonany pomiar miał charakter porównawczy. Warunki (natężenie światła zewnętrznego, rodzaj podłoża, na którym znajdowały się badane próbki, parametry prądu zasilania), w jakich zostało przeprowadzone badanie były identyczne dla obu pomiarów. W tabeli 2 przedstawiono wyniki sześciu serii pomiarów natężenia światła z wykorzystaniem luksomierza oraz uśredniony wynik dla każdej próbki.

Wyniki badania ukazały nieznaczny wpływ materiału kompozytowego na natężenie świa-

ła generowane przez diody. Różnica mierzonego natężenia światła między próbką LED\_GFRP\_01 a próbką LED\_01 wynosiła średnio 98 luksów, zatem tłumienie oraz rozpraszanie światła przez materiał kompozytowy wynosiło 15,7%.

Tabela 2. Wyniki pomiaru natężenia światła

	Nazwa próbki	
	LED_01	LED_GFRP_01
Natężenie światła [lx]	643	511
	625	518
	616	547
	632	532
	621	519
	612	528
Średnia wartość natężenia światła [lx]	624±11	526±13

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Integracja układów elektronicznych w materiale kompozytowym umożliwia wytworzenie inteligentnych struktur, których właściwości będą nie tylko zależeć od użytego materiału wzmocnienia i osnowy, ale również od zastosowanego układu elektronicznego. Wy-

korzystanie technologii RPM oraz żywicy A.S.SET pozwala na efektywne, oraz bardzo szybkie wytwarzanie struktur kompozytowych ze zintegrowanymi układami elektronicznymi. Najistotniejszym parametrem procesu, ze względu na użyty układ elektroniczny było ciśnienie procesu prasowania. Przeprowadzone badania ukazały jedynie uszkodzenia wynikające z działania zbyt dużego ciśnienia procesu prasowania, natomiast nie zaobserwowano uszkodzeń elementów układów elektronicznych spowodowanych temperaturą 120 °C. W przypadku użytych, komercyjnie dostępnych taśm LED, zbyt duży nacisk powodował uszkodzenie poszczególnych komponentów elektronicznych. Dzięki wykonanym badaniom można było zaobserwować uszkodzenie diody w postaci zerwania połączenia pomiędzy anodą i katodą. W przypadku układów lutowanych kolbą ręczną newralgicznym punktem okazały się luty, które wskutek zbyt dużego nacisku uległy pęknięciu.

Badanie z wykorzystaniem kamery termowizyjnej umożliwiło określenie sposobu oddziaływania materiału kompozytowego na temperaturę pracy układu elektronicznego oraz sposobu odprowadzania ciepła przez kompozyt. W wyniku integracji układu elektronicznego obniżono temperaturę pracy układu elektronicznego w porównaniu z taśmą niezintegrowaną o średnio 12,2 °C, co z pewnością wpłynie na żywotność integrowanych układów. W przypadku układów elektronicznych zawierających komponenty generujące światło, bardzo ważnym aspektem było tłumienia oraz rozpraszanie światła poprzez materiał kompozytowy. Wyniki badań z wykorzystaniem luksomierza pokazały, iż materiał kompozytowy tłumi oraz rozprasza światło generowane przez zintegrowane diody w 15,7% w porównaniu z diodami niezintegrowanymi.

Na podstawie otrzymanych wyników badań wyciągnięto następujące wnioski:

- RPM jest wysokowydajnym, szybkim procesem pozwalającym wytwarzać materiały kompozytowe ze zintegrowanymi układami elektronicznymi o wysokiej jakości,

- ciśnienie procesu prasowania ma newralgiczny wpływ na jakość wytwarzanych kompozytów oraz trwałość układów elektronicznych integrowanych w materiale kompozytowym,
- proces integracji układów elektronicznych w materiale kompozytowym nie obniża ich właściwości użytkowych, a pozwala ochronić je przed działaniem czynników zewnętrznych.

## LITERATURA

- [1] K. Schaaf, B. Cook, F. Ghezzi, A. Starr, S. Nemat-Nasser, „Mechanical properties of composite materials with integrated embedded sensor networks, in *Proceedings of SPIE*, M. Tomizuka, Ed., vol. 5765 no. 1. SPIE, 2005, pp. 781-785.
- [2] A. Javidinejad and S. P. Joshi, „Autoclave reliability of MEMS pressure and temperature sensors embedded in carbon fiber composites, *Journal of Electronic Packaging*, vol. 123, no. 1, pp. 79-82, March 2001.
- [3] M. Lin and F.-K. Chang, „The manufacture of composite structures with a built-in network of piezoceramics, *Composites Science and Technology*, vol 62, no. 7-8, pp. 919-939, 2002.
- [4] S. M. Yang, C. C. Hung, and K. H. Chen, „Design and fabrication of a smart layer module in composite laminated structures, *Smart Materials and Structures*, vol 14, no. 2, pp. 315-320, 2005.
- [5] Gajda, T., Przybyszewski, B., Pilawka, R., Hilse, H., Czulak, A., Gude, M., Hufenbach, W.: Application of novel ASSET epoxy resin in bath manufacturing process of CFRP. 18th Symposium „COMPOSITES 2014 – Theory and practice” (Poraj, Poland, 23-25 April 2014).
- [6] Möbius, T., Krahl, M., Helwig, M., Adam, F., Modler, N., Starke, E., Sauer, S., Fischer, W.-J.: Analyses of Boundary Conditions for Process Integration of Sensor Elements in Complex Fibre-reinforced Thermoplastic Spacer Structures. Materials Science Forum Vols. 825-826M in 2015, In proceedings of 20th symposium on composites (Tagung “Verbundwerkstoffe” Juli 2015).
- [7] Hufenbach, W., Modler, N., Winkler, A.: Integration of thermoplastic compatible piezoceramic



- modules into fibre reinforced components. 4th Scientific Symposium of the CRC/Transregio 39 (PT-PIESA) „Leichtbaudurch Funktionsintegration“ (Nuremberg, 26./27. März 2013)
- [8] Hufenbach, W., Fischer, W.-J., Gude, M., Geller, S., Tyczynski, T.: Processing studies for the development of a manufacture process for intelligent lightweight structures with integrated sensor systems and adapted electronics. DGM (Veranst.): Materials Science Engineering : MSE 2012 (Darmstadt, 25-27 September 2012).
- [9] Hufenbach, W., Träger, O., Dannemann, M., Winkler, A., Heber, T.: Advanced functionalities of fiber-reinforced thermoplastic composites by material-adapted embedding of piezo-ceramic fibers using robust manufacturing technologies. 8th Seminar on Experimental Techniques and Design in Composite Materials: ETDCM 8 (Costa Rei, Italy, 3-6 October 2007).
- [10] Hufenbach, W., Adam, F., Winkler, A., Heber, T., Körner, I., Kupfer, R.: Mechanical and electrical joining of function-integrative textile-reinforced thermoplastic composites. International Conference „Polymer Composites 2011“ (Plzen, 27-28 April 2011).