

**mgr inż. Kamil Dydek**

## **Wpływ kopoliamidowych włókien z nanorurkami węglowymi na właściwości polimerowych kompozytów wzmacnianych włóknami węglowymi**

### **STRESZCZENIE**

Przedmiotem badań w niniejszej pracy są polimerowe kompozyty wzmacniane włóknami węglowymi, modyfikowane poprzez wprowadzenie do ich struktury kopoliamidowych włókien domieszkowanych nanorurkami węglowymi. Podjęta w pracy modyfikacja miała za zadanie poprawę przewodności elektrycznej polimerowych kompozytów węglowych przy zachowaniu ich właściwości mechanicznych. Badania miały również na celu określenie czynników, wpływających na poprawę przewodności elektrycznej materiałów kompozytowych.

W ramach pracy wytworzono włókniny domieszkowane nanorurkami węglowymi na bazie trzech kopoliamidów różniących się lepkością oraz temperaturą topnienia. Następnie włókniny były implementowane do struktury kompozytu z włóknem węglowym za pomocą dwóch technik wytwarzania: worka próżniowego oraz infuzji.

Pracę podzielono na cztery etapy.

W pierwszym etapie pracy sprawdzono wpływ metody wytworzenia kopoliamidowych włókien domieszkowanych nanorurkami węglowymi na właściwości kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym. Przetestowano włókniny wytwarzane metodą pneumatyczną oraz metodą wytłaczania i prasowania. Metoda pneumatyczna cechuje się bardzo wysoką wydajnością, powtarzalnością i jakością włókien, jednakże występują ograniczenia procesowe związane z brakiem możliwości rozdmuchu stopu zawierającego nanorurki węglowe powyżej 3.0% mas. Metoda wytłaczania i prasowania pozwala wytwarzać nanokompozytowe włókna nawet o zawartości 10% mas. nanorurek węglowych oraz uzyskiwać włókniny o bardzo małych gramaturach. Na podstawie wyników uzyskanych w tym etapie zdecydowano, że ze względu na możliwość wprowadzenia większej ilości nanorurek węglowych do struktury włókniny, będą one wytwarzane metodą wytłaczania włókien i ich prasowania.

W drugim etapie pracy dokonano oceny wpływu rodzaju kopoliamidu, z którego wytwarzano włókniny, na przewodność elektryczną, wybrane właściwości mechaniczne oraz mikrostrukturę polimerowych kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym. Wytworzono włókniny o zawartości 7.0% mas. nanorurek węglowych na bazie trzech różnych kopoliamidów.

Przeprowadzone badania wykazały, że włókniny na bazie kopoliamidu charakteryzującego się temperaturą topnienia na poziomie 120°C i zawartości 7.0% mas. nanorurek węglowych pozwoliły na poprawę skrośnej przewodności elektrycznej o 184% w porównaniu do laminatu referencyjnego, jednocześnie nie pogarszając jego właściwości mechanicznych. Stąd też w dalszych pracach wytwarzano włókniny na bazie kopoliamidu, który charakteryzował się temperaturą topnienia 120°C oraz na jego bazie wytworzono nanokompozytowe włókna o największej średniej średnicy wynoszącej 294,7  $\mu\text{m}$ .

W trzecim etapie pracy przeanalizowano wpływ powierzchniowego udziału włókien we włókninie domieszkowanej nanorurkami węglowymi oraz ilości wprowadzonych nanorurek węglowych. Wytworzono włókniny o powierzchniowym udziale włókien we włókninie w zakresie 18.0-28.5% oraz zawartości nanorurek węglowych 7 i 10% mas. Przeprowadzono pomiary przewodności elektrycznej i wybranych właściwości mechanicznych, które wykazały, że włókniny o średnim powierzchniowym udziale włókien we włókninie wynoszącym 23,1% oraz zawartości 7 i 10% mas. nanorurek węglowych pozwalają na poprawę skrośnej przewodności elektrycznej do wartości  $4,8 \pm 0,53$  oraz  $3,93 \pm 0,36$  S/m, w kierunku poprzecznym do grubości laminatu. Do dalszych prac wytypowano te dwa rodzaje włókien.

W czwartym etapie pracy wytworzono laminaty epoksydowo-węglowe techniką infuzji, oceniając wpływ wstępnego prasowania tkaniny węglowej z włókninami oraz procesu starzenia na właściwości elektryczne i mechaniczne kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym. Przeprowadzone badania wykazały, że wstępne prasowanie pozawala na poprawę skrośnej przewodności elektrycznej w kierunku poprzecznym do grubości laminatu o 69.6% w porównaniu do kompozytów nieprasowanych, jak też poprawę o 104.8% w porównaniu do laminatu referencyjnego. Jest to efekt utworzenia ścieżek przewodzących pomiędzy sąsiednimi warstwami wzmocnienia węglowego. Potwierdzono, że proces starzenia wpływa na degradację osnowy polimerowej, jak też odspojenia na granicy faz, co przekłada się na znaczący spadek właściwości mechanicznych oraz w mniejszym stopniu na spadek właściwości elektrycznych. Przeprowadzono również badania właściwości użytkowych tj. skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego. Testy wykazały, że opracowana w ramach niniejszej pracy modyfikacja polimerowych kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym charakteryzuje się lepszymi właściwościami użytkowymi.

**Słowa kluczowe:** kompozyty polimerowe wzmacniane włóknami węglowymi, kopoliamidowe włókniny, nanorurki węglowe, przewodność elektryczna

# **Effect of copolyamide nonwovens doped with carbon nanotubes on the properties of Carbon Fiber Reinforced Polymers**

## **ABSTRACT**

The subject of this thesis is carbon fiber reinforced polymers modified by introducing copolyamide nonwovens doped with carbon nanotubes into their structure. The modification undertaken in the study was aimed at improving the electrical conductivity of carbon fiber reinforced polymers while preserving their mechanical properties. The research was also aimed at determining the factors affecting the improvement of electrical conductivity of the composite materials.

In this work, carbon nanotube-doped nonwovens based on three copolyamides differing in viscosity and melting point were fabricated. After that, the nonwovens were implemented into the carbon fiber composite structure using two fabrication techniques: vacuum bagging and infusion.

The work was divided into four steps.

In the first stage of the work, the effect of the manufacturing method of copolyamide nonwovens doped with carbon nanotubes on the properties of carbon fiber reinforced polymers was examined. Nonwovens produced by melt-blown method or by extrusion and thermopressing technique were tested. The melt-blown method is characterized by very high productivity and reproducibility and quality of nonwovens, however, there are process limitations related to the inability to blow melts containing more than 3.0wt% of carbon nanotubes. The extrusion and thermopressing enables to produce nanocomposite fibers even with 10 wt% of carbon nanotubes and to obtain nonwovens with small areal weights. Based on the results obtained at this stage, it was decided that due to the possibility of introducing more carbon nanotubes in the nonwoven structure, extrusion and thermopressing would be used to produce them.

In the second phase of the work, the effect of the copolyamide used to produce nonwovens on the electrical conductivity, selected mechanical properties and microstructure of carbon fiber reinforced polymers was evaluated. Three different copolyamides were used to produce nonwoven fabrics with 7.0 wt% carbon nanotubes. The study showed that copolyamide-based nonwovens characterized by a melting point of 120°C and a content of 7.0 wt.% of carbon nanotubes allowed improving the electrical conductivity by 184% compared to the reference laminate, while not deteriorating their mechanical properties. Hence, in further work, a nonwoven based on copolyamide G1566 was produced, which was characterized by the mentioned properties.

In the third step of the work, the effect of the surface area of nanocomposite fibers in the nonwoven doped with carbon nanotubes and the amount of carbon nanotubes introduced was analyzed. Nonwovens with the surface area of nanocomposite fibers in the nonwoven in the range of 18.0-28.5% and the content of carbon nanotubes 7.0 and 10.0wt% were produced. Electrical conductivity and selected mechanical properties were measured, which showed that nonwovens with an average surface fiber share in the nonwoven fabric of 23.1% and carbon nanotube contents of 7.0 and 10.0 wt% allowed for improved electrical conductivity. These two types of nonwovens were selected for further work.

In the fourth stage of the work, epoxy-carbon laminates were produced using the infusion technique, and the effects of using a different manufacturing technique, pre-pressing the carbon fabric with nonwovens and the aging process on the electrical and mechanical properties of the carbon fiber reinforced composites were examined. The study showed that pre-pressing allows for an improvement of 69.6% in electrical conductivity compared to unpressed composites, as well as an improvement of 104.8% compared to a reference laminate. This is due to the formation of conductive paths between adjacent layers of carbon reinforcement. It was confirmed that the aging process affecting the degradation of the polymer matrix, as well as the debonding at the interface, affects a significant decrease in mechanical properties and a slight decrease in electrical properties. Tests were also carried out on functional properties, i.e. electromagnetic field shielding effectiveness. The tests carried out showed that the modification of carbon fiber reinforced polymer composites developed in the present work has enhanced functional properties.

**Keywords:** carbon fibre reinforced polymers, copolyamide nonwovens, carbon nanotubes, electrical conductivity