

Poznań, 16.06.2025

OCENA WŁAŚCIWOŚCI ORTEZ STAWU SKOKOWEGO WYTWARZANYCH PRZYROSTOWO Z KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH

Autor: mgr inż. Justyna RYBARCZYK

Promotor: dr hab. inż. Filip GÓRSKI, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Wiesław KUCZKO

STRESZCZENIE

Rozprawa doktorska poświęcona została ocenie właściwości ortez stawu skokowego (AFO) wytwarzanych metodami przyrostowymi z termoplastycznych tworzyw kompozytowych. Głównym celem pracy było opracowanie metodyki projektowania i produkcji spersonalizowanych ortez przy wykorzystaniu technologii druku 3D metodą FDM oraz przeprowadzenie ich kompleksowej analizy materiałowej, mechanicznej i użytkowej. Istotnym aspektem badań było zbadanie wpływu rodzaju materiału oraz parametrów wytwarzania na właściwości końcowego wyrobu, co ma kluczowe znaczenie w kontekście indywidualizacji zaopatrzenia ortopedycznego.

W ramach pracy wytworzono znormalizowane próbki oraz ortozy z ośmiu materiałów – czterech bazowych polimerów (PLA, PETG, ABS, PA12) oraz ich wersji wzmacnianych włóknem węglowym. Próbki poddano analizie pod kątem właściwości mechanicznych (rozciąganie, zginanie), mikroskopowej (badanie przełomów) i chropowatości powierzchni. Ortezy z kolei poddano badaniom wytrzymałościowym na specjalnie opracowanym stanowisku. Zbadano także chropowatość powierzchni i dokładność wymiarową (porównanie modeli CAD z wynikami skanowania 3D), a także przeprowadzono symulacje numeryczne z użyciem metody elementów skończonych (MES). Uwzględniono również aspekty technologiczne – ocenę stabilności procesu druku, powtarzalność, czas i koszt wytwarzania oraz jakość odwzorowania modeli anatomicznych.

Wyniki badań na próbkach wykazały, że materiały wzmacniane włóknem węglowym, w szczególności PETG-CF i PA12-CF, cechują się zwiększoną wytrzymałością mechaniczną, akceptowalną jakością powierzchni oraz większą stabilnością wymiarową w porównaniu do tworzyw niemodyfikowanych, jednak badania na pełnych ortezach wykazały, że te

z kompozytów termoplastycznych nie osiągają – w ujęciu makroskopowym – lepszych parametrów wytrzymałościowych i sztywności niż ich odpowiedniki z materiałów niemodyfikowanych. W pracy wykazano, że zastosowanie technologii FDM (ang. *Fused Deposition Modelling*), przy odpowiedniej konfiguracji parametrów druku, pozwala na uzyskanie funkcjonalnych i trwałych ortez stawu skokowego, które spełniają wymagania kliniczne i normatywne., ale jest problem z uzyskaniem ortez o odpowiednio wysokiej wytrzymałości dla aktywnych osób dorosłych.

Opracowana w pracy innowacyjna metodyka oceny ortez – uwzględniająca autorskie stanowisko badawcze oraz procedurę oceny o poziomie kompleksowości niespotykanym w istniejącej literaturze – może być wykorzystana do wdrażania indywidualnego zaopatrzenia ortotycznego w warunkach klinicznych i przemysłowych. Wyniki pracy stanowią istotny wkład w rozwój spersonalizowanej medycyny, wspierając tworzenie nowoczesnych, efektywnych rozwiązań w zakresie rehabilitacji, ortotyki i protetyki.

***EVALUATION OF THE PROPERTIES OF ANKLE ORTHOSES
MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING OUT OF POLYMER
COMPOSITES***

ABSTRACT

The doctoral dissertation was dedicated to the evaluation of the properties of ankle-foot orthoses (AFOs) manufactured additively from thermoplastic composite materials. The main objective of the work was to develop a methodology for designing and producing personalized orthoses using Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing technology, and to conduct a comprehensive analysis of their material, mechanical, and functional characteristics. A key aspect of the study was to examine the influence of the material type and manufacturing parameters on the properties of the final product, which is crucial in the context of personalized orthopedic care.

As part of the research, standardized test specimens and orthoses were fabricated from eight materials—four base polymers (PLA, PETG, ABS, and PA12) and their carbon fiber-reinforced variants. The specimens were analyzed in terms of mechanical properties (tensile and bending tests), microscopic characteristics (fractography), and surface roughness. The orthoses were subjected to strength testing using a custom-designed testing setup, and further evaluated for surface roughness, dimensional accuracy (by comparing CAD models with 3D scan data), and numerically analyzed using the Finite Element Method (FEM). Technological aspects were also addressed, including the assessment of printing process stability, repeatability, production time and cost, and the accuracy of anatomical model reproduction.

The results of the specimen testing indicated that carbon fiber-reinforced materials—particularly PETG-CF and PA12-CF—exhibit improved mechanical strength, acceptable surface quality, and greater dimensional stability compared to their unmodified counterparts. However, tests on full-scale orthoses revealed that those made from thermoplastic composites do not demonstrate superior strength and stiffness parameters on the macroscopic level when compared to orthoses made from unmodified materials. The study demonstrated that the use of FDM technology, when properly configured, enables the fabrication of functional and durable ankle-foot orthoses that meet clinical and regulatory requirements. However, challenges remain in achieving orthoses with sufficiently high strength for active adult users.

The innovative orthosis evaluation methodology developed in this dissertation—which includes a custom-designed testing station and an assessment protocol of unprecedented

complexity in existing literature—can be applied in clinical and industrial settings for the implementation of individualized orthotic solutions. The findings contribute significantly to the advancement of personalized medicine, supporting the development of modern and effective solutions in rehabilitation, orthotics, and prosthetics.

Justyna Rybakajt