

## Piśmiennictwo

- [1] M. Kikuchi, Y. Koyama, T. Yamada, Y. Imamura, T. Okada, N. Shirahama, Development of guided bone regeneration membrane composed of  $\beta$ -tricalcium phosphate and poly (L-lactide-co-glycolide-co- $\gamma$ -caprolactone) composites, *Biomaterials* Volume: 25, Issue: 28, December, 2004, pp. 5979
- [2] K. Fujihara, M. Kotaki, S. Ramakrishna, Guided bone regeneration membrane made of polycaprolactone/calcium carbonate composite nano-fibers *Biomaterials* Volume: 26, Issue: 19, July, 2005, pp. 4139-4147
- [3] Zhang, Kai; Wu, Xiao Yu., Temperature and pH-responsive polymeric composite membranes for controlled delivery of proteins and peptides *Biomaterials* Volume: 25, Issue: 22, October, 2004, pp. 5281-5291
- [4] S. Gogolewski, L. Pineda, Michael Büsing, Bone regeneration in segmental defects with resorbable polymeric membranes: IV. Does the polymer chemical composition affect the healing process? *Biomaterials* Volume: 21, Issue: 24, December 15, 2000, pp. 2513-2520 Aspects of Artificial Joint Implantation in Lower Limb, *Journal of Theoretical And Applied Mechanics*, 3, 37, 1997, 455-479.

## KONSTRUKCJA WKŁADKI PROTEZY STOPY Z MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

JAN CHŁOPEK\*, ARTUR PRZAŁA\*, ARTUR BOGUCKI\*\*

\*AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ I CERAMIKI, KATEDRA BIOMATERIAŁÓW, AL. MICKIEWICZA 30, 30-059 KRAKÓW

\*\*POLSKIE TOWARZYSTWO ORTOTYKI I PROTETYKI NARZĄDU RUCHU, PREZES PTO I PR.

### Streszczenie

*Celem pracy było wykonanie wkładek protezy stopy z materiałów kompozytowych o kontrolowanych właściwościach na podstawie wyników badań właściwości mechanicznych próbek kompozytowych. Użyto kompozytów o podstawie żywicy epoksydowej modyfikowanych tkaniną węglową oraz hybrydową węglowo - aramidową.*

*Badania wykazały, że kompozyty zawierające tkaninę hybrydową charakteryzują się lepszymi właściwościami mechanicznymi w porównaniu do kompozytów z włóknami węglowymi, które są kruche i wcześniej ulegają zniszczeniu. Protezy wykonane z kompozytów modyfikowanych tkaniną hybrydową węglowo - aramidową powinny bezpiecznie spełniać swoje funkcje biomechaniczne, nie narażając pacjenta na ryzyko ich uszkodzenia podczas codziennej aktywności.*

**Słowa kluczowe:** proteza stopy, kompozyty, włókna węglowe, tkanina hybrydowa

[*Inżynieria Biomateriałów, 54-55,(2006),23-26*]

### Wprowadzenie

Amputacja jest poważnym zabiegiem chirurgicznym, który w wielu wypadkach przynosi ulgę w bólu, cierpieniu i chorobie, a często ratuje życie. Głównym powodem amputacji kończyny dolnej są choroby naczyń obwodowych oraz cukrzyca.

## References

- [5] Ye, Sang Ho; Watanabe, Junji; Takai, Madoka; Iwasaki, Yasuhiko; Ishihara, Kazuhiko, Design of functional hollow fiber membranes modified with phospholipid polymers for application in total hemopurification system, *Biomaterials* Volume: 26, Issue: 24, August, 2005, pp. 5032-5041.
- [6] Krasteva, Natalia; Seifert, Barbara; Albrecht, Wolfgang; Weigel, Thomas; Schossig, Michael; et. al., Influence of polymer membrane porosity on C3A hepatoblastoma cell adhesive interaction and function, *Biomaterials* Volume: 25, Issue: 13, June, 2004, pp. 2467-2476.
- [7] T. Mikołajczyk, J. Domagała, Water-soluble alginate fibers for medical applications, *Fibers and textiles in Eastern Europe*, June-September, 2001, pp. 20-23.
- [8] M.R. Bet, G. Goissis, S.Vargas, H.S.Selistre-de-Araujo, Cell adhesion and cytotoxicity studies over polyanionic collagen surfaces with variable negative charge and wettability *Biomaterials* Volume: 24, Issue: 1, January, 2003, pp. 131-137.
- [9] F. Rupp, L. Scheideler, D. Rehbein, D. Axmann, J. Geis-Gerstorfer, Roughness induced dynamic changes of wettability of acid etched titanium implant modifications *Biomaterials* Volume: 25, Issue: 7-8, March - April, 2004, pp. 1429-1438.

## CONSTRUCTION OF FOOT PROSTHESIS INSERT MADE OF COMPOSITE MATERIALS

JAN CHŁOPEK\*, ARTUR PRZAŁA\*, ARTUR BOGUCKI\*\*

\*AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, FACULTY OF MATERIALS SCIENCE AND CERAMICS, DEPARTMENT OF BIOMATERIALS

\*\*POLISH SOCIETY FOR PROSTHETICS AND ORTHOTICS, PRESIDENT OF NATIONAL COMMITTEE

### Abstract

*The aim of this work was to prepare prosthetic inserts made of composite materials with controlled properties, based on results of examination of mechanical properties of composite samples. Composites with epoxy resin matrix modified with carbon fabric, as well as hybrid carbon-aramid fabric, have been used in this study.*

*The experiments proved that composites containing hybrid fabric have better mechanical properties than composites containing only carbon fibres, which are brittle and subjected to premature damage. Prostheses made of composites modified with hybrid carbon-aramid fabric should safely fulfil their mechanical functions, without exposing patients to risk of damage during every day's activity.*

**Keywords:** foot prosthesis, composites, carbon fibres, hybrid fabric

[*Engineering of Biomaterials, 54-55,(2006),23-26*]

### Introductions

Amputation is a serious surgical procedure, which in many cases relieves the pain, suffering and ailment, and very often saves the life. Major reasons for lower limb amputations are diseases of peripheral vessels and the diabetes.

For most people, particularly the young ones, the loss of limb is a tremendous drama, affecting strongly their psyche. For this reason, it is important to prepare the appropri-

Dla większości ludzi, zwłaszcza młodych, utrata kończyny jest ogromnym dramatem, wpływającym na ich psychikę. Dlatego bardzo ważne jest wytworzenie protezy, która dzięki swojej funkcjonalności, a także estetyce umożliwi szybsze dostosowanie się do nowych warunków oraz łatwiejszą akceptację protezy. Współczesna protetyka dzięki zastosowaniu nowych materiałów i rozwojowi technik wytwarzania elementów, oferuje protezy doskonale imitujące zdrową kończynę.

W konstrukcjach stopy protezowej wykorzystuje się element ruchomego stawu skokowego lub imitację ruchomej stopy dzięki miękkiej stopie typu SACH (solid ankle cushion heel). Jest to najczęściej stosowany typ stopy, który charakteryzuje się prostotą, małym ciężarem, trwałością i niską ceną. Miękka stopa protezowa zapewnia pewien komfort chodzenia, guma dobrze absorbuje siły uderzenia, oszczędzając tym samym kikut, biodro, kręgosłup. Stopy z ruchomym elementem kostki i stopy SACH, szczególnie w niskich amputacjach posiadają pewną wadę: zapadają się, nie sprężynują, nie oddają energii. Dlatego też nowoczesne materiały takie jak kompozyty węglowe lub hybrydowe, kiedyś stworzone dla przemysłu lotniczego i kosmicznego, coraz częściej znajdują zastosowanie w protetyce dzięki swoim właściwościom mechanicznym. W odróżnieniu od tradycyjnych materiałów kompozyty te mają wysoką wytrzymałość właściwą i wysoki moduł sprężystości. Opracowana przez Van Philips'a konstrukcja stopy oparta na sprężynie wykonanej z kompozytu wzmocnianego włóknami węglowymi została powszechnie uznana za najlepsze rozwiązanie z punktu widzenia biomechaniki, ponieważ podczas chodzenia stopa sprężynuje magazynując i oddając energię, przez co poruszanie się na protezie jest znacznie mniej męczące. Jest to szczególnie korzystne dla ludzi aktywnych, uprawiających fizyczną rekreację lub sport.

Wykonana wkładka protezy stopy pełni funkcje mechaniczne (sprężystość, wytrzymałość itp.), natomiast za estetykę odpowiedzialny jest specjalnie wykonany polimerowy profil, przypominający wyglądem stopę ludzką. Profil ten jest w środku pusty, a przestrzeń wewnątrz jest dokładnie wyprofilowana do zamontowania wkładki (RYS. 1).

Profil ten jest zbędny, jeśli mówimy o protezowaniu sportowców, gdzie najważniejszą kwestią jest odpowiednia wytrzymałość i sprężystość, natomiast względy estetyczne są

ate prosthesis, which due to its functionality and aesthetics, would enable faster adaptation to new conditions and easier acceptance of prosthesis. Today's prosthetics, due to application of new materials and development of new manufacturing technologies, offers prostheses perfectly imitating healthy limb.

Constructions of foot prosthesis apply the element of mobile ankle joint or imitation of mobile foot based on soft foot type SACH (solid ankle cushion heel). This is the most common type of artificial foot, which is characterized by simplicity, low weight, durability and low price. Soft prosthesis foot assures full comfort of walking, the rubber absorbs well the impact force, thus saving stump, hip and spine. Feet with mobile ankle element and feet SACH have specific drawbacks in cases of low amputations: they collapse, they do not spring-back, and do not render back the energy.

Therefore modern materials, such as carbon and hybrid composites, time ago developed for avionics and aerospace industries, now more often find use in prosthetics due to their excellent mechanical properties. As opposed to traditional materials, these composites have high specific strength and high modulus of elasticity. Foot construction designed by Van Philips is based on spring made of carbon fibre reinforced composite, and has been commonly recognized as the best solution from biomechanical point of view, since during walking the foot springs back, storing and releasing energy, which makes moving with use of this prosthesis much less tiring. This is particularly advantageous for active people, who practice physical recreation and/or sports.

Foot prosthesis insert fulfils mechanical functions (elasticity, strength, etc.), whereas a specially prepared polymer profile is responsible for aesthetics; it looks very similar to human foot. This profile is empty inside, and the inside space is precisely profiled for mounting the insert (FIG. 1).

This profile is of no importance as far as athlete's prostheses are concerned, where appropriate strength and elasticity are the key issues, and aesthetic considerations are rather negligible (FIG. 2).

The aim of the present work was the preparation of foot



RYS. 1. Przykłady wkładek i protez stóp.  
FIG. 1. Examples of inserts and foot prostheses.



RYS. 2. Protezy stóp stosowane u sportowców.  
FIG. 2. Foot prostheses used by athletes.

pomijane (RYS. 2).

Celem niniejszej pracy było wykonanie wkładki protezy stopy z materiałów kompozytowych o kontrolowanych właściwościach.

## Materiały i metody

Do otrzymania próbek do badań, a następnie wkładki protezy stopy użyto żywicy epoksydowej LH 160, utwardzacza H 147 (Havel-Composites) oraz:

1. tkanin węglowych o gramaturach - 93g/m<sup>2</sup> i 160 g/m<sup>2</sup>
2. tkaniny hybrydowej (węglowo - aramidowej) o gramaturze 165 g/m<sup>2</sup> (Angeloni).

Opracowane wkładki przedstawiono na RYS.3.

W celu otrzymania kompozytu wykorzystano metodę laminowania ręcznego (metodę kontaktową). Próbki doświadczalne o określonej wielkości i kształcie, przesycono żywicą i układano w formie pokrytej separatorem, a następnie umieszczano w prasie połączonej z układem grzewczym. Proces utwardzania kompozytu następował w trzech etapach temperaturowych (50°C/1h; 60°C/1h; 70°C/5h). Do wykonania doświadczalnych próbek do badań wykorzystano podgrzewaną prasę znajdującą się w laboratorium Wydziału Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Do wykonania ostatecznej wkładki protezy posłużyła forma wykonana ze stali.

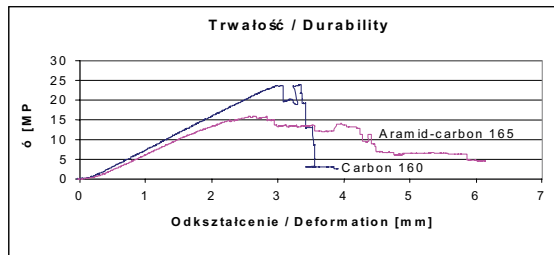
Wykonano wkładki różniące się długością tzw. profile krótkie i długie. Próbki kompozytowe oraz profile spełniające funkcję wkładki w protezie stopy poddano badaniom wytrzymałości na zginanie oraz badaniom zmęczeniowym obejmującym 2x10<sup>5</sup> cykli przy stałym odkształceniu równym 4 mm.

## Wyniki i dyskusja

Na RYS. 4 przedstawiono zależność wytrzymałości na zginanie od odkształcenia dla próbek wykonanych z kompozytów węglowych oraz węglowo-aramidowych. Jak wynika z rysunku, zależność ta dla próbki wykonanej z kompozytu żywica epoksydowa-tkanina węglowa (węgiel 160) ma charakterystyczny przebieg jak dla materiałów kruchych. Odmienne przebieg, zbliżony do pseudoplastycznego, obserwuje się dla kompozytu wzmacnianego tkaniną hybrydową (aramid - węgiel 165). Różnice te wynikają z większej odkształcalności włókien typu Kevlar zawartych w tkaninie hybrydowej.

Proteza wykonana z tego materiału nawet po wystąpieniu pęknięcia będzie więc w stanie przenosić obciążenia, co zabezpiecza pacjenta przed jej nagłym uszkodzeniem lub zniszczeniem.

Kolejne wykresy (RYS. 5 i RYS. 6) przedstawiają zależności naprężenia od odkształcenia oznaczone w próbie trójpunktowego zginania dla opracowanych wkładek protezo-



RYS. 4. Zależność naprężenia od odkształcenia dla badanych próbek

FIG. 4. Stress-strain relationship for examined samples

prosthesis insert from composite materials with controlled gradient properties.

## Materials and methods

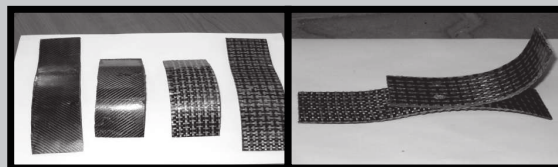
The epoxy resin LH 160 and the hardener H 147 (Havel-Composites) were used for fabrication of experimental samples, together with:

1. carbon fabric of specific weights: 93g/m<sup>2</sup> and 160 g/m<sup>2</sup>
2. hybrid fabric (carbon-aramid) of specific weight 165 g/m<sup>2</sup> (Angeloni).

Designed inserts are shown in FIG. 3.

The hand lamination method (otherwise - contact method) was applied for preparation of the composite. Experimental samples of specific size and shape were saturated with resin and they were laid inside the mould covered with a separator. In the next step, they were placed inside the press connected to heating system. The process of composite hardening took place in three temperature stages (50°C/1h; 60°C/1h; 70°C/5h). Experimental samples for testing were made at the laboratory of Faculty of Materials Science and Ceramics, AGH-UST. The final prosthesis inserts were made using steel mould.

This way inserts of different length were prepared, i.e. short and long profiles. Composite samples and profiles fulfilling foot prosthesis insert function were subjected to bending strength tests and fatigue tests, covering 2x10<sup>5</sup> cycles at constant strain equal to 4 mm.



RYS. 3. Wkładki badane w pracy.

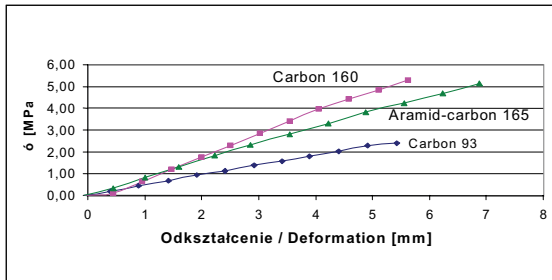
FIG. 3. Inserts examined in this study.

## Results and discussion

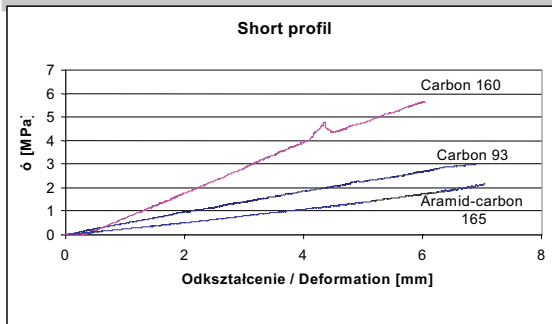
FIG. 4. shows "bending stress-strain" relationship for samples made of carbon and carbon-aramid hybrid composites. As it can be seen from this figure, the examined relationship for sample made of epoxy resin-carbon fabric (carbon 160) composite, has the shape characteristic of brittle materials. Different shape, similar to pseudo-plastic behaviour, can be observed in the case of composite reinforced with hybrid fabric (aramid-carbon 165). These differences result from higher deformability of Kevlar type fibres included in hybrid fabric.

Prosthesis made of this material, even after crack occurrence, will be able to transfer the loads, thus will protect the patient from its sudden damage or destruction. Next figures (FIG. 5 and FIG. 6) show the stress-strain relationship determined during the 3-point bending tests of prosthesis inserts designed.

In the case of prosthetic inserts containing aramid fibres the strain over 10% higher than in the case of pure carbon fibre composites can be observed. Additionally, from comparison of Figs. 5 and 6, it may be observed how the bending strength depends on profile shape. Shorter profile, at assumed strain of 7mm can bear much larger stresses than the longer profile. The fatigue tests performed on short and long profiles did not show any change of stress-strain characteristic within the examined cycles. This is confirmed by



**RYS. 5. Zależność naprężenia od odkształcenia dla protez - krótszych profili.**  
**FIG. 5. Stress-strain relationship for short-profile prostheses.**



**RYS. 7. Zależność siła - odkształcenie dla wkładek wyjściowych.**  
**FIG. 7. Stress-strain relationship for initial inserts.**

wych.

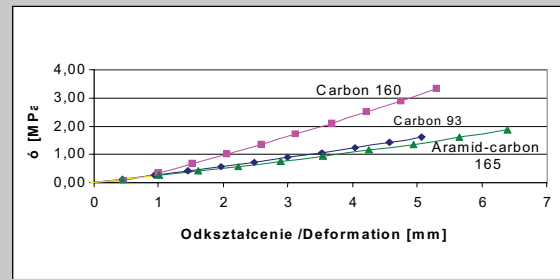
W przypadku wkładek protezowych zawierających włókna aramidowe obserwuje się kilkanaście procent wyższe odkształcenie niż w przypadku czystych kompozytów węglowych. Dodatkowo z porównania rysunków 5 i 6 można zaobserwować jak wytrzymałość na zginanie zależy od kształtu profili. Profil krótszy, przy założonym odkształceniu równym 7 mm jest w stanie przenosić o wiele większe obciążenia niż dłuższy profil. Badania zmęczeniowe przeprowadzone na krótkich i długich profilach w zakresie badanych cykli nie wykazały zmian charakterystyki naprężenie - odkształcenie. Potwierdzają to wyniki przedstawione na RYS. 7 i 8.

## Wnioski

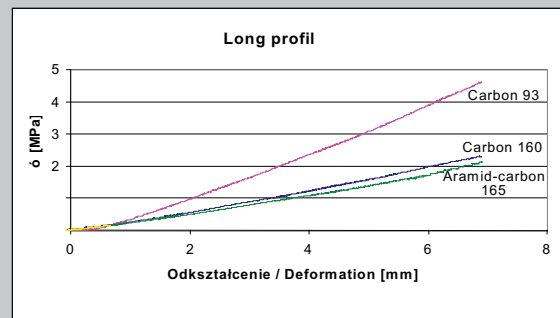
Kompozyty zawierające włókna węglowe są kruche i ulegają zniszczeniu wcześniej niż kompozyty z tkaniną hybrydową. Oba typy próbek wykazują stabilne właściwości mechaniczne w zakresie badanych cykli obciążenia. Ze względu na sposób pęknięcia i wyższe wartości odkształceń wydaje się, że wkładki zawierające tkaniny hybrydowe węglowo - aramidowe są korzystniejsze w konstrukcjach protezy stopy. Protezy wykonane z tego materiału powinny bezpiecznie spełniać swoje funkcje biomechaniczne, nie narażając pacjenta na ryzyko ich uszkodzenia podczas codziennej aktywności.

## Podziękowanie

Praca finansowana z działalności statutowej AGH, nr umowy 11.11.160.116



**RYS. 6. Zależność naprężenia od odkształcenia dla protez - dłuższych profili.**  
**FIG. 6. Stress-strain relationship for long-profile prostheses.**



**RYS. 8. Zależność siła - odkształcenie dla wkładek po 2x10<sup>5</sup> cykli.**  
**FIG. 8. Stress-strain relationship for inserts after 2x10<sup>5</sup> cycles.**

the results shown in FIGs. 7 and 8.

## Conclusions

Composites containing carbon fibres are brittle and subjected to damage earlier than composites with hybrid fabric. Both types of samples show stable mechanical properties within the range of examined loading cycles. Seen the mode of fracture and higher strain values it appears that inserts containing hybrid carbon-aramid fabric are more suitable for foot prosthesis construction. Prostheses made of that material should safely fulfil their biomechanical functions, without exposing patient to risk of their damage during daily activities.

## Acknowledgement

This work was financed from statutory activity of AGH-UST, contract No. 11.11.160.116.

## Piśmiennictwo

- [1] "Biomechanika i Inżynieria Rehabilitacyjna", pod redakcją Romualda Będzińskiego, EXIT, Warszawa, 2004.
- [2] Lechosław B. Dworak: "N iektóre metody badawcze biomechaniki i ich zastosowanie w sporcie, medycynie i ergonomii".
- [3] Krzysztof Konsztowicz "Kompozyty wzmacniane włóknami. Podstawy Technologii", Wyd.AGH, Kraków, 1986.
- [4] Józef Ślęziona: "Podstawy technologii kompozytów", Wyd. Pol.Śląskiej, Gliwice, 1998.
- [5] Gruin Irma: "Materiały polimerowe", PWN, Warszawa, 2003.
- [6] Artur Bogucki: "Współczesne zasady protezowania kończyny dolnej", Konf. Mechanika w medycynie, Rzeszów 2002.
- [7] www.ossur.com

## References