

**Agnieszka DOBRZELECKA**, Koło Naukowe „Bio-Med”, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

**Adam MAZURKIEWICZ**, Zakład Inżynierii Biomedycznej, Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

## PRZEGLĄD MATERIAŁÓW STOSOWANYCH DO PRODUKCJI SZTUCZNYCH ŚCIĘGIEN I WIĘZADEŁ

**Streszczenie:** W pracy omówiono zagadnienie biomateriałów stosowanych w ortopedii i traumatologii narządu ruchu do produkcji protez ścięgien i więzadeł. Dokonano opisu ich charakterystyki poprzez przegląd dostępnej literatury oraz badań naukowych.

**Słowa kluczowe:** biomateriały, chirurgia narządu ruchu, implanty, polimery, protezy ścięgien i więzadeł, włókno węglowe

### 1. WSTĘP

Ścięgna i więzadła w aparacie ruchowym człowieka mają za zadanie utrzymanie kości w stawie, umożliwiając jednocześnie ich stabilność i ruchomość. Urazy, nadmierne przeciążanie wysiłkiem fizycznym, spadek właściwości struktur wraz z wiekiem oraz inne czynniki są przyczyną częstych uszkodzeń ścięgien i więzadeł. Zabiegi rekonstrukcyjne mają na celu odtworzenie właściwości i funkcji zniszczonej tkanki [1].

Zastąpienie naturalnych włókien sztucznym materiałem stanowi wyzwanie dla lekarza oraz inżyniera. Istnieje potrzeba szukania nowych rozwiązań i udoskonalania istniejących tak, aby stosowana proteza mogła jak najlepiej zastąpić uszkodzone struktury w ludzkim organizmie, przyczyniając się do powrotu pacjenta do pełnej sprawności. Jest to zadanie trudne ze względu na specyficzne wymagania, które należy spełnić, a które omówiono w dalszej części pracy. W artykule dokonano przeglądu wybranych spośród istniejących materiałów stosowanych do produkcji protez.

### 2. WŁAŚCIWOŚCI IDEALNEJ PROTEZY

Aby lepiej zrozumieć trudność, jaka staje przed inżynierem projektującym materiał do produkcji protez ścięgien i więzadeł, należy poznać warunki i właściwości, które charakteryzują idealną protezę. Po pierwsze, idealny implant to taki, który ma własności mechaniczne jak najbardziej zbliżone do naturalnego ścięgna lub więzadła: cechuje się odpowiednią wytrzymałością statyczną i zmęczeniową, sztywnością, elastycznością. Wybór określonego materiału zaledwie pod względem jego własności mechanicznych i wytrzymałościowych nie jest zbyt trudny. Istnieje jednak szereg innych właściwości, na które należy dodatkowo zwrócić uwagę, decydując się na konkretny materiał do produkcji protezy. Idealna proteza powinna cechować się także obojętnym zachowaniem w tkankach, nie wywoływać odczynów alergicznych, nie ulegać zmianom pod wpływem czasu, działania płynów ustrojowych i czynników mechanicznych, dawać się łatwo zespolić ze ścięgnem,





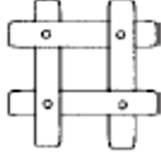
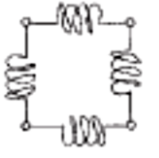

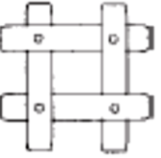
mięśniami lub kośćmi. Istotną jest również odporność na biokorozję. Co więcej, obecność płynów ustrojowych może wpływać na ich szybszą degradację, zmieniając także ich trwałość i stabilność, tym samym materiały używane do protezowania muszą cechować się podwyższoną trwałością w środowisku biologicznym. Idealne sztuczne ścięgno powinno także stanowić swego rodzaju rusztowanie dla tkanek, by te mogły wrastać w szczepioną strukturę i budować nowe, naturalne ścięgno, z czasem zastępując sztuczny wszczep, który uległby degradacji [2-4].

Wciąż poszukiwany jest materiał, który miałby wszystkie cechy idealnej protezy. Do momentu jego wynalezienia należy więc stosować takie tworzywa, spełniają jak najwięcej czynników opisywanych powyżej. Te właśnie cechy wpłynęły na wybór poniżej opisanych materiałów jako tych, które znajdą zastosowanie w rekonstrukcji ścięgien i więzadeł.

### 3. PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH ROZWIĄZAŃ

Współcześnie do produkcji omawianych protez wykorzystuje się polimery naturalne lub syntetyczne. Spośród gamy materiałów stosuje się: UHMWPE, PP, PET, PTFE, PU, Kevlar 49, włókno węglowe, włókna kolagenowe oraz fibroinę jedwabiu. Zaletą polimerów naturalnych jest brak reakcji zapalnych, gdyż swą strukturą przypominają naturalną tkankę, nie są jednak tak wytrzymałe jak polimery syntetyczne. Materiały syntetyczne cechuje zaś dobra kontrola nad własnościami i strukturą podczas produkcji. Właściwa staje się też produkcja kompozytów, gdyż łącząc w sobie materiały o różnorodnych własnościach, tworzą materiał o właściwościach unikalnych, potrzebnych w konkretnych zastosowaniach [1,13].

**Tabela 1. Właściwości w budowie materiałów do produkcji protez [13]**

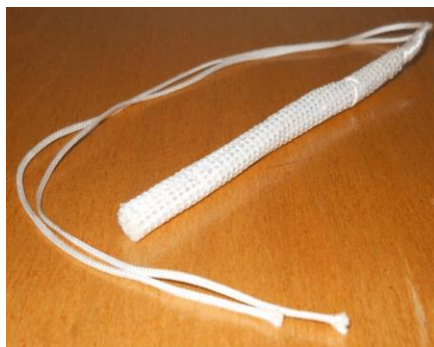
	<b>Tkany</b>	<b>Dziany</b>	<b>Spleciony</b>	<b>Nietkany</b>
<b>Skład</b>	Przędza	Przędza	Przędza	Włókno
<b>Geometria</b>				
<b>Model komórki</b>				
<b>Ruchliwość</b>	ograniczona	olbrzymia	ograniczona	nieznaczną
<b>Porowatość</b>	wysoka	bardzo wysoka	wysoka	wysoka
<b>Przykłady</b>	Leeds-Keio PET graft	Stryker-Dacron PET graft, biodegradowalne rusztowanie	Gore-Tex PTFE graft, biodegradowalne rusztowanie	Elektroprzędzenie

Polimery wykazują różnice w swej strukturze, budowie włókien (tab. 1), właściwościach mechanicznych, co pozwala na szeroki wybór spośród nich pod kątem określonych zastosowań. Ze względu na trudność w opisie wszystkich wymienionych materiałów poniżej dokonano krótkiej charakterystyki wybranych z nich.

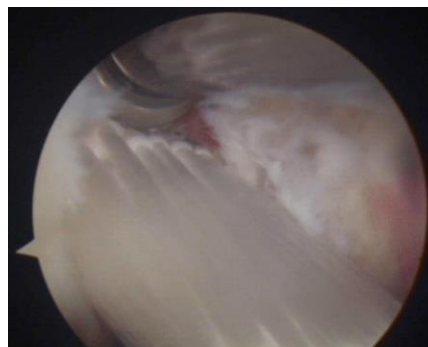
#### 3.1. Politereftalan etylenu (PET)

Politereftalan etylenu (zwany potocznie PET) należy do poliestrów, heterołańcuchowych związków wielkocząsteczkowych. Jest tworzywem o dość wysokiej wytrzymałości na zrywanie (17÷280 MPa) oraz module Younga (2850 MPa). Niestety, obiektywne pomiary

wytrzymałości na zrywanie tych protez wskazują na dwukrotnie niższe wartości w porównaniu do wytrzymałości naturalnych ścięgien. To stanowi wyzwanie dla inżyniera, by znaleźć sposób na zwiększenie własności wytrzymałościowych dla PET. Co więcej, materiał cechuje się dobrą odpornością na zginanie i ścieranie, działanie kwasów, zasad, biokorozję oraz starzenie. Obecnie popularność zyskała proteza LARS (ligament advanced reinforcement system) zbudowana z poliestrowych włókien [5,10-11].



(1)



(2)

Rys. 1. Proteza LARS przed implantacją (1) i po rekonstrukcji więzadła krzyżowego przedniego (2) [11]

Zaletą systemu LARS jest to, że podobnie jak włókno węglowe stanowi podłoże do odbudowy tkanki naturalnej. Ponadto, proteza ta potrafi utrzymać swoje początkowe właściwości zmęczeniowe nawet po 10 milionach cykli badawczych. Dzięki swojej funkcji będącej rusztowaniem dla nowo rosnącej tkanki oraz stosunkowo niewielkich reakcjach zapalnych znajduje współcześnie szerokie zastosowanie w produkcji protez ścięgien i więzadeł [11].

### 3.2. Politetrafluoroetylen (PTFE)

Politetrafluoroetylen to włóknotwórczy polimer termoplastyczny uzyskiwany w wymianie estrowej między teraftalanem metylu a glikolem etylenowym. Jego wytrzymałość na rozciąganie mieści się w zakresie 13÷34 MPa, zaś moduł Younga około 0,5 GPa. Jest on materiałem praktycznie niepochlaniającym wody, odpornym na ścieranie, zaś chemicznie na działanie zwykłych rozpuszczalników organicznych, tym samym także na biologiczną degradację środowisku tkanek i płynów ustrojowych. Występujące w nim trwałe wiązania węgiel – fluor i węgiel przyczyniają się do zwiększonej odporności polimeru na działanie wysokich temperatur. Wyróżniającą cechą PTFE jest jego wysoka biogodność, która pozwala mu stać się jednym z materiałów stosowanych jako sztuczne ścięgna i więzadła [10,12].

### 3.3. Włókna aramidowe

Aramid to związek wielkocząsteczkowy, należący do grupy krystalicznych poliamidów aromatycznych, które powstają w wyniku reakcji diamin aromatycznych z chlorkami aromatycznych kwasów dikarboksylowych. Techniczne włókna aramidowe cechują się dobrymi właściwościami, takimi jak: wysoka wytrzymałość na zerwanie oraz moduł sprężystości, niewielkie wydłużenie, zdolność akumulacji energii, mała gęstość, ponadto są lekkie, odporne na działanie chemikaliów, mają wysoką odporność termiczną (do 360°C) oraz odporność na przebicie, stałość parametrów w wysokich temperaturach. Ich cechą są również dobre właściwości dielektryczne. Tworzywo aramidowe w porównaniu do innych materiałów stosowanych do produkcji sztucznych ścięgien i więzadeł posiada szereg dodatkowych zalet, m.in. wysoką transparentność dla promieni Rentgena czy też znaczne ograniczenie wagi implantu przy jednocześnie wysokiej wytrzymałości (porównywalnej do stali). Przykładem

jest porównanie wartości siły zrywania włókien aramidowych i powszechnie stosowanych w tej dziedzinie włókien poliestrowych (tab. 2). Wyniki przeprowadzonych badań wykazały dwukrotnie wyższą wytrzymałość aramidu w stosunku do poliestru [5].

**Tabela 2. Porównanie wartości siły zrywania [N] włókien aramidowych i poliestrowych po implantacji na okres od 90 do 360 dni („kontrola /0/” oznacza nowe włókno) [5]**

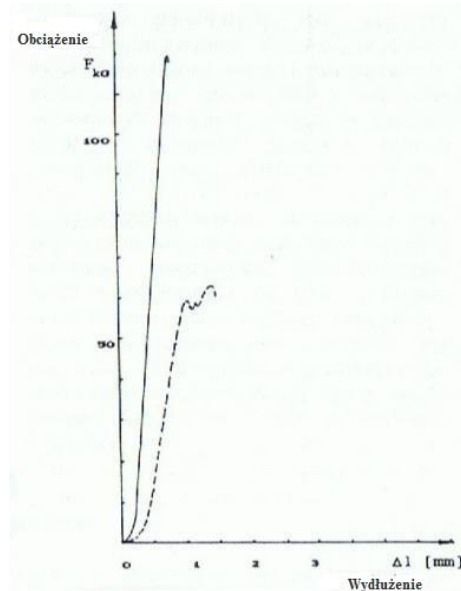
Czas implantacji (w dniach)	Rodzaj włókna		Istotności różnic
	aramid	poliester	
<b>kontrola</b> /0/	<b>41,0</b> ± 14,3	<b>22,2</b> ± 1,48	* p<0,001
<b>90</b>	<b>44,4</b> ± 8,73	<b>23,0</b> ± 1,22	* p<0,001
<b>180</b>	<b>39,1</b> ± 8,95	<b>21,4</b> ± 0,89	* p<0,001
<b>270</b>	<b>48,0</b> ±11,34	<b>22,0</b> ± 1,87	* p<0,001
<b>360</b>	<b>42,0</b> ± 10,17	<b>21,4</b> ± 0,89	* p<0,001

Wciąż prowadzona jest stosunkowo zbyt mała liczba badań włókien aramidowych pod kątem ich przydatności do implantacji w ludzkim ciele, co wpływa na to, że niełatwe staje się określenie ich jednoznacznego oddziaływania biologicznego oraz biostabilności. Nieliczne publikacje mówią o tym, iż materiał ten wywołuje minimalny odczyn tkankowy, porównywalny do materiałów powszechnie używanych jako protezy ścięgien i więzadeł, zarazem nie przyczyniają się do miejscowych oraz ogólnoustrojowych reakcji zapalnych. To powoduje, że materiał ten może znaleźć szerokie zastosowanie [5].

### 3.4. Włókno węglowe

Włókna w węglowe w formie protez zyskały swoją popularność pod koniec lat 70., gdy po raz pierwszy wykazano, że materiał ten stanowi dobre podłoże do narastania tkanki mającej właściwości odpowiadające naturalnym ścięgom. Pomysł zastosowania tego materiału do produkcji implantów powstał po analizie chemicznej żywych tkanek, które w dużej części zbudowane są ze związków węgla. Liczne badania wykazały zdolność wrastania tkanki w protezę węglową oraz odkładania się na jej powierzchni włókien kolagenowych, tym samym stanowiło to istotną różnicę pomiędzy opisywanym włóknom a materiałami stosowanymi dotychczas jako sztuczne ścięgna lub więzadła (m.in. jedwab, teflon, ceramika), gdyż te były zaledwie mechanicznym zamiennikiem uszkodzonej struktury, nie wpływały zaś na odbudowę naturalnej tkanki. Po około 8-12 tygodniach od wszczepienia biomateriału węglowego nowopowstała tkanka przypomina już morfologicznie strukturę, która została wcześniej zniszczona. Włókno ulega w tym czasie stopniowej dezintegracji, stanowiąc jednocześnie rusztowanie dla naturalnej, odbudowywanej tkanki pacjenta [6-7].

Protezy węglowe posiadają szczególne własności fizyczne oraz chemiczne, takie jak: lekkość, dobrą biotolerancję, odporność na biokorozję oraz zmiany temperatury. Mają wysoką wytrzymałość na zerwanie – nawet trzykrotnie wyższą w stosunku do naturalnego więzadła, co ukazuje rys. 1, jednak łatwo ulegają siłom ścinającym i zginającym, przez co często są podatne na uszkodzenia na krawędziach kostnych [8-9].



Rys. 1. Charakterystyki wytrzymałościowe naturalnego więzadła kruczo-obończykowego (linia przerywana) i więzadłowej protezy węglowej (linia ciągła) [9]

Obok licznych doniesień o przydatności włókien węglowych w protezowaniu ścięgien i więzadeł nietrudno odnaleźć liczne badania świadczące o nasilonej reakcji błony maziowej po implantacji, tym samym negujące przydatność opisywanego materiału jako sztucznego ścięgna. Innymi wadami materiały są: praktycznie zerowa zdolność pochłaniania promieniowania rentgenowskiego, kruchość, łamliwość oraz zdolność do fragmentacji. Uznano więc, że włókno węglowe nie nadaje się do rekonstrukcji śródstawowych. To spowodowało zastąpienie włókien węglowych innymi materiałami, które nie powodują tak silnych odczynów tkankowych [7].

#### 4. PODSUMOWANIE

Opisywane powyżej tworzywa zajęły pewne miejsce wśród materiałów do produkcji protez ścięgien i więzadeł. Każdy z nich posiada unikalne, wyróżniające go spośród innych właściwości, które pozwalają na stosowanie go jako sztuczne ścięgno lub więzadło. Żaden jednak nie spełnia wciąż wszystkich poszukiwanych cech idealnej protezy. Szerokie zastosowanie materiałów sztucznych zaczęto od włókna węglowego, które do momentu wynalezienia PTFE oraz PET było powszechnie używane w rekonstrukcji opisywanych struktur narządu ruchu. Istotne wady w budowie i właściwościach tych materiałów spowodowały jednak ich wyparcie przez materiały polimerowe. Co więcej, w przyszłości większe zainteresowanie włóknami aramidowymi być może zaowocuje ich szerszym zastosowaniem do produkcji protez. Cały czas prowadzone są badania w celu znalezienia innowacyjnych rozwiązań, tym samym z pewnością zaowocują one wynalezieniem coraz to doskonalszych materiałów, spełniających w pełni funkcje niesprawnego więzadła lub ścięgna.

#### LITERATURA:

- [1] Teoh S. H.: Engineering materials for biomedical applications. National University of Singapore, Singapore, 2004
- [2] Adamczak T., Kalińska D., Kuś H., Zwinogrodzki J.: Tworzywa sztuczne w medycynie, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1970
- [3] Rosół P.: Określenie trwałości implantów z kompozytów polimerowych, Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Kraków, 2006

- [4] Biomaterials and scaffolds for ligament tissue engineering, Wiley InterScience, 2006 [online], dostęp w: [www.insterscience.wiley.com](http://www.insterscience.wiley.com)
- [5] Żywicka B.: Ocena biogodności włókien o dużej wytrzymałości mechanicznej – skrót rozprawy doktorskiej, Polimery w Medycynie, vol. 3, Wrocław, 2004
- [6] Walaszek R., Kasperczyk T., Chwała W., Staszaków E.: Ocena efektów odległych zabiegu operacyjnego i postępowania usprawniającego u pacjentów po rekonstrukcji zerwanego ścięgna Achillesa materiałem węglowym, Engineering of Biomaterials, vol. 87, Kraków, 2009, s. 13-23
- [7] Górecki A. (i in.): Polskie włókniste materiały węglowe w chirurgii rekonstrukcyjnej narządu ruchu, 15 lat doświadczeń, Engineering of Biomaterials, vol. 1, Kraków, 1997, s. 3-7
- [8] Chirurgia Narządu Ruchu i Ortopedia Polska, supl. 2, Polska, 1994, s. 34-39
- [9] Chirurgia Narządu Ruchu i Ortopedia Polska, T. 58, Polska, 1993, s. 453-458
- [10] Marciniak J.: Biomateriały. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013
- [11] Patrascu J.M., (et al.): Thermographic and microscopic evaluation of LARS knee ligament tearing, Romanian Journal of Morphology and Embryology, 55 (supl. 3), Romania, 2014, p. 1231-1235
- [12] Błażewicz S., Stoch L.: Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000. Tom 4 Biomateriały, Polska Akademia Nauk, Warszawa, 2003
- [13] Biomaterials and scaffolds for ligament tissue engineering, Wiley InterScience ([www.insterscience.wiley.com](http://www.insterscience.wiley.com)), 2006

## THE OVERVIEW OF MATERIALS USED FOR ARTIFICIAL TENDONS AND LIGAMENTS PRODUCTION

**Abstract:** The aim of this article are biomaterials which are used in orthopedics and traumatology for artificial tendons and ligaments production. The paper describes their characteristics received by review of getatable literature and research.