

Michał RESZKE<sup>1</sup>, Marlena ŚRODULSKA<sup>1</sup>, Jarosław PALUCH<sup>2</sup>, Krzysztof JASIK<sup>3</sup>, Hubert OKŁA<sup>1,3</sup>, Jadwiga GABOR<sup>1</sup>, Marta ŁĘŻNIAK<sup>1</sup>, Beata SWINAREW<sup>4</sup>, Andrzej S. SWINAREW<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Uniwersytet Śląski, Instytut Nauki o Materiałach, ul. 75 Pułku Piechoty 1A, 41-500 Chorzów.

<sup>2</sup> Zakład i Klinika Laryngologii, Śląski Uniwersytet Medyczny, ul. Francuska 20/24, 40-027 Katowice.

<sup>3</sup> Zakład Badań Strukturalnych Skóry, Wydział Farmaceutyczny z Oddziałem Medycyny Laboratoryjnej w Sosnowcu, Uniwersytet Medyczny w Katowicach, ul. Kasztanowa 3, 41-200 Sosnowiec.

<sup>4</sup> Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników, Oddział Farb i Tworzyw w Gliwicach, ul. Chorzowska 50A, 44-100 Gliwice

## Próba rekonstrukcji krtani przy użyciu technik prototypowania 3D z wykorzystaniem poliwęglanu Makrolon® 2600

**Streszczenie.** Nowotwór krtani jest najczęstszym, po nowotworze płuc, rodzajem nowotworu dróg oddechowych na świecie. Zajmuje siódme miejsce pod względem częstości występowania wśród mężczyzn w Polsce. Głównymi czynnikami etiologicznymi powodującymi chorobę nowotworową są palenie papierosów oraz spożywanie wysokoprocentowego alkoholu. Ponadto szczególnie narażone na zachorowanie są osoby mające kontakt z chemikaliami i oparami związków mutagennych. Podstawowe leczenie bazuje na radioterapii oraz chemioterapii pacjenta. Przeprowadzana jest również laryngektomia częściowa lub, w przypadku zaawansowanej postaci choroby, całkowita.

Obecnie na świecie przeprowadza się przeszczepy krtani od zmarłych dawców, jednakże wiąże się to z dużym ryzykiem odrzucenia przeszczepu przez pacjenta. Znacznie większą szansę powodzenia mają operacje odbudowy krtani z wykorzystaniem autoprzeszczepu. W tym celu od pacjenta wycina się zdrowy fragment tkanek, z których modeluje się nową krtani. Największy problem w tego typu operacjach stanowi rekonstrukcja chrząstek krtani: chrząstek pierścieniowatej i tarczowatej.

Przedstawiona praca zawiera informacje na temat doboru materiału polimerowego, który może posłużyć do budowy chrząstek krtani. Ponadto w pracy przedstawiono próbę wykonania modelu krtani z wykorzystaniem technik modelowania przestrzennego.

### MODERN MATERIALS FOR RAPID PROTOTYPING

**Abstract.** This study is an attempt to create a project of novel polymeric synthetic material which may be biocompatible with human organism and may replace malignant larynx cartilages. Laryngeal and lung cancers are the most frequent types of tumor of the respiratory tract. Laryngeal cancer takes seventh place regarding the incidence among men in Poland. The main etiologic factors causing cancer are smoking of cigarettes and consumption of alcohols. What is more, people who have contact with vapours of chemicals are in high-risk group. Basic treatment of laryngeal cancer is based on the radiation and chemotherapy. Severely affected patients may require complete or partial laryngectomy.

Larynx transplantation based on organ donors, is related to high-risk organ failure. Nowadays surgeons try to recreate larynx using technique of autotransplantation. The biggest challenge for them is the reconstruction of cartilages: thyroid and cricoid.

Study contains information about the selection of polymeric material, which could be used in construction of laryngeal cartilages as well as, an attempt of construction of larynx model based on three-dimensional modeling techniques.

## WSTĘP

Krtąń jest częścią układu oddechowego człowieka zlokalizowaną pomiędzy czwartym i szóstym kręgiem szyjnym. Zbudowana jest z chrząstek, mięśni oraz błony śluzowej. Najważniejszymi funkcjami jakie pełni krtąń w organizmie są: funkcja obronna, oddechowa oraz fonacyjna.

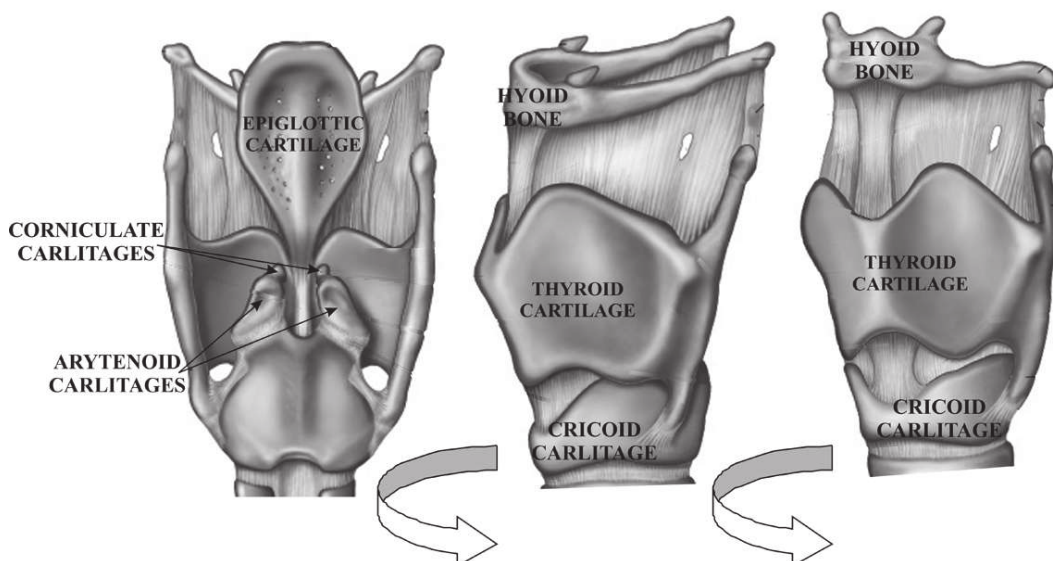
Krtąń zbudowana jest z kości gnykowej oraz kilku chrząstek. Kość gnykowa jest kością w kształcie podkowy znajdującą się w linii środkowej szyi pomiędzy podbródkiem a chrząstką pierścieniową. W stanie spoczynku jej przód leży w poziomie podstawy żuchwy, a tył – trzeciego kręgu szyjnego [1,2].

Szkielet krtani składa się z dwóch rodzajów chrząstek (Rys.1): trzech chrząstek parzystych i trzech chrząstek nieparzystych. Do chrząstek parzystych należą chrząstki nalewkowate, mające wpływ na położenie i napięcie fałdów głosowych, chrząstki różkowate oraz klinowate. Wśród chrząstek nieparzystych wyróżniamy chrząstkę tarczową, tworzącą u mężczyzn jabłko Adama, chrząstkę pierścieniową, mającą kształt sygnetu, oraz nagłośniową. Chrząstki różkowate, klinowe, chrząstka nagłośniowa oraz wierzchołki chrząstek nalewkowatych są zbudowane z elastycznej, włók-

nistej chrząstki z niewielką tendencją do zwapnienia. Chrząstka pierścieniowa, tarczowa oraz większość chrząstek nalewkowatych są chrząstkami szklistymi, które mogą ulegać nakrapianemu zwapnieniu w miarę starzenia, począwszy od dwudziestego piątego roku życia w przypadku chrząstki tarczowej i później w przypadku chrząstki pierścieniowej i nalewkowatych [1,2].

Rak krtani jest jedną z najczęściej występującej choroby układu oddechowego człowieka. Liczba zachorowań na ten typ nowotworu wyniosła w Polsce, w 2011 roku, ponad 2,5 tysiąca. Ponad 85% wszystkich przypadków dotyczyło mężczyzn [3]. Głównym czynnikiem etiologicznym jest palenie papierosów. Zgodnie z danymi [4] ryzyko śmierci spowodowane rakiem krtani jest 20 razy większe dla palaczy niż dla ludzi niepalących. Innymi czynnikami ryzyka, które mogą przyczynić się do choroby nowotworowej są: nadużywanie alkoholu oraz bezpośredni kontakt ze związkami chromu, niklu i pyłu azbestowego.

Leczenie nowotworu krtani bazuje na radioterapii, chemioterapii oraz na operacjach chirurgicznych. Główną zasadą leczenia jest całkowite usunięcie nowotworu z zachowaniem funkcji jakie pełni organ. Istnieją dwa typy laryngektomii: całkowita, gdzie dochodzi



Rysunek 1. Model krtani człowieka. Chrząstki klinowate są niewidoczne na diagramie. Według [2]

do usunięcia całego organu oraz częściowa, podczas której usuwany jest jedynie zarażony fragment [5].

Laryngektomia częściowa przeprowadzana jest w przypadku wykrycia nowotworu głośni we wczesnym stadium. W przypadku nawet częściowej laryngektomi niezbędna jest rekonstrukcja usuniętego fragmentu u pacjenta [6-8]. Rekonstrukcja powinna skupiać się nie tylko na umożliwieniu pacjentowi swobodnego przełykania oraz oddychania, ale również na zapewnieniu funkcji wokalnych. Techniki rekonstrukcji muszą spełniać następujące kryteria: odpowiednie zamknięcie głośni podczas mówienia oraz zapewnienie odpowiedniego połączenia pomiędzy organizmem a rekonstruowanym organem. Idealna tkanka użyta do odbudowy krtani musi posiadać odpowiednie ukrwienie zapewniające przepływ krwi oraz lepkosprężystość o parametrach jak najbardziej zbliżonych do natywnej struktury krtani [9,10].

Obecnie istnieje kilka metod rekonstrukcji, jednakże żadna z nich nie została uznana za idealną [11-13].

Przykładem rekonstrukcji krtani jest operacja przeprowadzona w Polsce, w 2012 roku. Zrekonstruowana krtani została stworzona z części kości udowej pacjenta. Główny chirurg, profesor Witold Szyfter powiedział, że najbardziej problematyczną częścią operacji była rekonstrukcja chrząstki tarczowatej i pierścieniowatej [14].

Pierwsze wzmianki na temat technologii druku 3D pojawiły się w literaturze w latach 80, gdzie zostały nazwane Szybkim Prototypowaniem (ang. Rapid Prototyping). Pierwotnie był to sposób na szybkie i bardziej ekonomiczne tworzenie prototypów produktów w przemyśle [15].

## CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA

### Surowce

Materiałem użytym do wydruku modeli 3D był modyfikowany poliwęglan o komercyjnej

nazwie Makrolon® 2600 (ISO 7391-PC,M,(,,)-18-9). Zastosowany materiał charakteryzuje się niespotykaną kombinacją wytrzymałości, twardości oraz sztywności. Ponadto materiał posiada dobrą odporność na korozję oraz biokompatybilność zgodną z normą ISO 10993-1. Materiał ten wykazuje średnią lepkość, jego objętościowy wskaźnik płynięcia (MVR) jest równy 300°C/1,2 kg, a producent zaleca temperaturę 280-320 °C do topienia materiału.

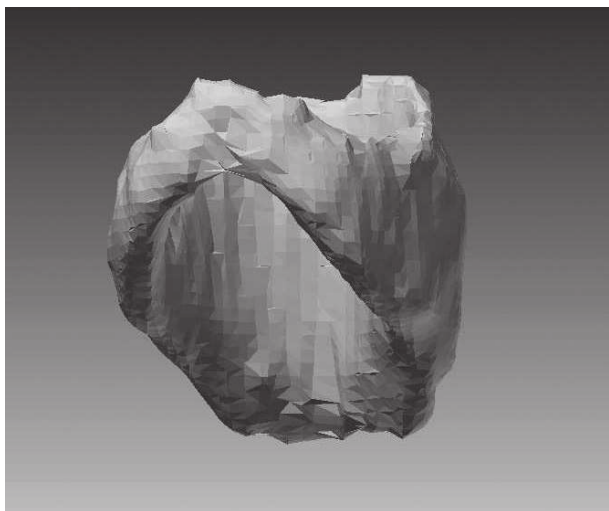
### Protypowanie

Pierwszym krokiem tego procesu jest stworzenie wirtualnego modelu obiektu z wykorzystaniem projektowania CAD (ang. Computer Aided Design), używając programu do modelowania w 3D (do stworzenia kompletnie nowego obiektu) lub za pomocą skanera 3D (do stworzenia modelu istniejącego obiektu). Skaner 3D umożliwia stworzenie cyfrowej kopii skanowanego obiektu.

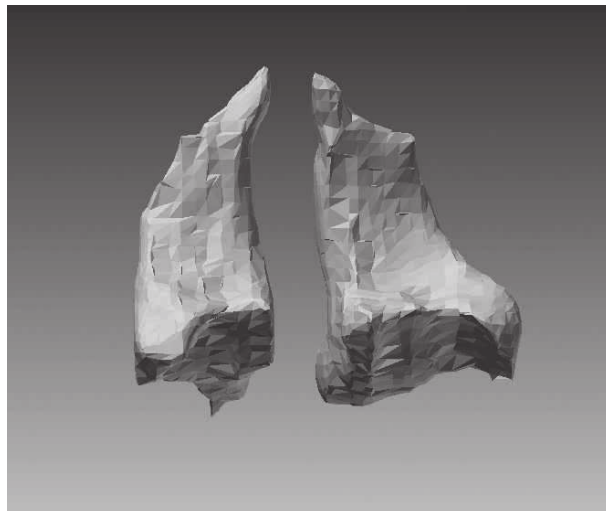
Technologia FDM (ang. Fused Deposition Technology) zastosowana w pracy bazuje na materiale z tworzywa sztucznego odwijanym ze zwoju i dostarczanym do dyszy wytłaczarki. Ekstruder jest nagrzewany do temperatury topnienia materiału oraz bezpośrednio kontrolowany przez oprogramowanie komputerowego wspomaganie wytwarzania (CAM). Obiekt jest wytwarzany poprzez wytłoczenie roztopionego materiału w formie warstwy, materiał utwardza się zaraz po wytłoczeniu. Technologia ta jest najczęściej używana dla ABS (kopolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy) oraz PLA (poli(kwas mlekowy)), ale również dla wielu innych materiałów o odpowiednich właściwościach [16].

Obrazy uzyskane metodą rezonansu magnetycznego (MRI) krtani użyte do stworzenia trójwymiarowych modeli CAD zostały uzyskane bezpośrednio od autorów Magnetic Resonance Images of Human Laryngeal Cartilage MRI scans from Selbie et al. Eric J. Hunter and Scott L. Thomson. 128 skanów MRI zostało zaimportowane, jako obrazy. Do zidentyfikowa-

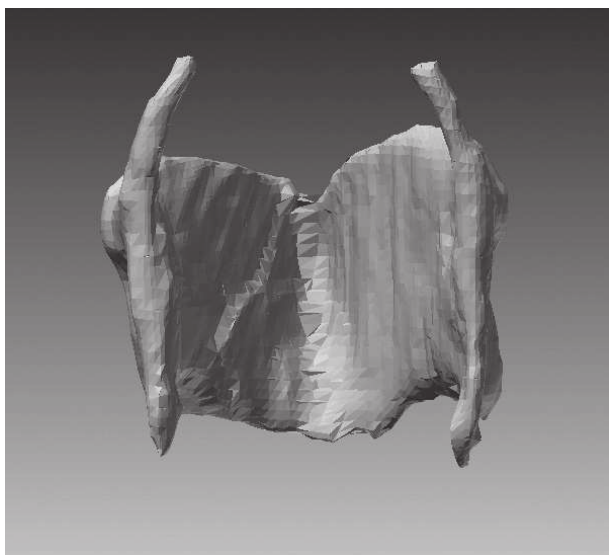




Rysunek 2. Model 3D chrząstki pierścieniowatej.



Rysunek 4. Model 3D chrząstek nalewkowatych.



Rysunek 3. Model 3D chrząstki tarczowatej.

nia i wyodrębnienia trójwymiarowych obrazów chrząstek: pierścieniowatej, tarczowej i nalewkowych zostały użyte techniki progowania skali szarości. Skalowanie obrazów zostało przeprowadzone z danymi z badań [17]. Obrazy i modele zostały wyprowadzone jako pliki STEP. Uzyskane pliki mogły być odtworzone oraz zwizualizowane w programie CAD, na przykład Autodesk Inventor. Uzyskano obrazy 3D chrząstek: pierścieniowatej (Rys. 2), tarczowatej (Rys.3) oraz nalewkowatych (Rys.4), które mogą być wydrukowane za pomocą drukarki 3D [16,18].

## DYSKUSJA WYNIKÓW

Modele 3D chrząstek krtani zostały wydrukowane przy użyciu drukarki RepRap Mendel Max 1,5. Jest to drukarka, która została zaprojektowana przez Maxbots w grudniu 2011 roku na zasadzie otwartego oprogramowania. Głównymi zaletami tej drukarki są nieskomplikowana konstrukcja oraz niski koszt eksploatacji. Największą wadą jest brak możliwości wydruku skomplikowanych modeli 3D bez odpowiednich podpór.



Rys. 5. Drukowanie fragmentu modelu tarczowatej chrząstki krtani za pomocą drukarki RepRap Mendel Max 1.5



Rys. 6. Gotowy model chrząstki tarczowatej.



Rys. 8. Gotowy model chrząstek nalewkowatych



Rys. 7. Gotowy model chrząstki pierścieniowatej.

Wydruk modeli wraz z podporami znacząco wydłużał czas wydruku, dlatego postanowiono podzielić modele krtani na dwa fragmenty. W projekcie zostało wykorzystanych kilka narzędzi.

Proces wydruku chrząstki tarczowatej trwał 2,5 godziny. Największy problem stanowiło wydrukowanie rogów chrząstki: górnego oraz dolnego (Rys. 6). Wydruk chrząstki pierścieniowatej trwał 1,5 godziny (Rys. 7). Chrząstki nalewkowate były najmniejsze (Rys. 8). Użyta drukarka 3D uniemożliwiła odwzorowanie najmniejszych elementów krtani.

W literaturze nie zostały znalezione informacje na temat wydruku modeli 3D z wykorzystaniem tego materiału. Najbardziej problematyczną rzeczą podczas wydruku była niska

jakość drukowanych modeli. Największy problem stanowiło dokładność wydruku.

W dzisiejszych czasach możliwy jest wydruk chrząstek krtani. Bardziej realistyczne jest zastąpienie zarażonego fragmentu krtani niż zastąpienie całej chrząstki wydrukowanym modelem.

## WNIOSKI

Drukowane modele 3D stanowią ciekawą alternatywę w rekonstrukcji i implantologii. Dzięki postępowi techniki, w krótkim czasie można wydrukować dowolne, brakujące fragmenty chrząstek bądź innych struktur tkankowych, co w znacznym stopniu przyczynia się do poprawy jakości życia pacjentów oraz znacząco przyspiesza proces leczenia i rekonwalescencji. Sam proces rekonstrukcji chrząstek łączy w sobie wiele technik. Do stworzenia modelu CAD najczęściej wykorzystuje się obrazy uzyskane podczas rezonansu magnetycznego MRI, przydatne mogą okazać się również skany uzyskane w wyniku obrazowania tomograficznego. Opracowane modele mogą zostać wydrukowane w rzeczywistej wielkości dzięki nowoczesnym i precyzyjnym drukarkom 3D. Ich dynamiczny rozwój sprawia, że modele są coraz dokładniejsze, a czas potrzebny do ich wydrukowania ulega skróceniu. Przeprowadzone badania pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że odpowiednio modyfikowany

poliwęglan Makrolon® 2600 może zostać użyty do rekonstrukcji poszczególnych fragmentów krtani. Jego dobre właściwości – odpowiednia twardość i sztywność, a przede wszystkim dobra odporność na korozję i biokompatybilność, sprawiają, że jest idealnym materiałem, który można stosować na wydruki 3D przeznaczone do implantacji w organizmie ludzkim.

## REFERENCJE

1. **Sobotta, J.** Atlas anatomii człowieka. T. 1, Głowa, szyja, kończyna górna. Urban & Partner, Wrocław, 1994.
2. **Bochenek, A., Reicher, M.** Anatomia człowieka. Vol. 2. PZWL, Warszawa, 2010.
3. **Didkowska, J., Wojciechowska, U., Zatoński, W.** Prognozy zachorowalności i umieralności na nowotwory złośliwe w Polsce do 2025 roku *Krajowy rejestr nowotworów* 2009.
4. **Ridge, J.-A., Glisson, B.-S., Lango, M.-N., et al.** Head and Neck Tumors *Cancer Management: A Multidisciplinary Approach* 11 ed. 2008.
5. **Zaborska, A., Pasek, M.** Interdyscyplinarna opieka nad pacjentem z chorobą nowotworową. Jakość życia chorych z nowotworem krtani leczonych napromieniowaniem. Krakowskie Towarzystwo Edukacyjne, Kraków, 2010
6. **Nibu, K., Kamata, S., Kawabata, K., Nakamizo, M., Nigauri, T., et al.** Partial laryngectomy in the treatment of radiation-failure of early glottic carcinoma *Head & neck* 19 2009: pp. 116-120.
7. **Toma, M., Nibu, K., Nakao, K., Matsuzaki, M., Mochiki, M., et al.** Partial laryngectomy to treat early glottic cancer after failure of radiation therapy *Archives of otolaryngology—head & neck surgery* 128 2002: pp. 909-912.
8. **Yiotakis, J., Stavroulaki, P., Nikolopoulos, T., Manolopoulos, L., Kandiloros, D., et al.** Partial laryngectomy after irradiation failure *Otolaryngology—head and neck surgery* 128 2003: pp. 200-209.
9. **Dursun, G., Ozgursoy, O.-B.** Laryngeal reconstruction by platysma myofascial flap after vertical partial laryngectomy *Head & neck* 27 2005: pp. 762-770.
10. **Ohba, S., Yokoyama J., Fujimaki, M., Ito, S., Ikeda, K.** A Novel Functional Reconstruction Method for Recurrent Laryngeal Cancer after Vertical Partial Laryngectomy *Otology & Rhinology* 2015.
11. **Elo, J., Horvath, E., Kesmarszky, R.** A new method for reconstruction of the larynx after vertical partial resections *European archives of oto-rhino-laryngology* 257, 2000: pp. 212-215.
12. **Jurlina, M., Matulic, Z., Prstacic, R., Janjanin, S.** Composite platysmofascial flap in reconstruction following partial vertical laryngeal resections *The Laryngoscope* 121 2011: pp. 1899-1901.
13. **Luna-Ortiz, K., Campos-Ramos, E., Villavicencio-Valencia, V., Contreras-Buendia, M., Pasche P., et al.** Vertical partial hemilaryngectomy with reconstruction by false cord imbrication. *ANZ journal of surgery* 80 2010: pp. 358-363.
14. **Karpińska, P.** Sukces poznańskich chirurgów – odtworzyli krtań z uda pacjenta, [online: <http://www.natemat.pl>]
15. **Konopacki, J.** Przydatność konsumenckich drukarek 3D w technologii *Przestrzeń i forma* 2012.
16. **Canessa, E., Zennaro, M.** Low-cost 3D printing for science, education & sustainable development *ICTP -The Abdus Salam International Centre of Theoretical Physics* 2013.
17. **Hunter, E.-J., Thomson, S.-L.** Magnetic Resonance Images of Human Laryngeal Cartilage: MRI scans from Selbie et al. *NRLD Technical Memo* 1 2015.
18. **Hunter, E.-J., Thomson, S.-L.** Solid CAD Models of Human Laryngeal Cartilage Created from Selbie et al. *NRLD Technical Memo* 6 2015.