

Wirtualny model kasku ochronnego dla osób oczekujących na zabieg kranioplastyki

Virtual model of a protective helmet for people waiting for cranioplastic treatment

MAREK WYLEŻOŁ
PIOTR FRĄCZEK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.1.8>

W artykule omówiono wirtualny model kasku przeznaczonego dla osób oczekujących na zabieg kranioplastyki. Taki kask powinien ochronić strefę urazową do czasu operacji. Musi też być łatwy w codziennym stosowaniu. Model kasku wykonano na podstawie analizy ergonomicznej i wytrzymałościowej. W pracy wykorzystano system CATIA v5.

SŁOWA KLUCZOWE: kranioplastyka, modelowanie wirtualne

Article refers to discuss the virtual helmet model designed for people waiting for cranioplasty treatment. The helmet should protect the trauma zone until surgery. It should also be easy in everyday use. The model was made using ergonomic and strength analysis. All work was supported by the CATIA v5 system.

KEYWORDS: cranioplasty, virtual modelling

Kranioplastyka to zabieg neurochirurgiczny wykonywany u pacjentów borykających się z wrodzonymi wadami kości czaszki, ubytkami powstałymi w wyniku urazu lub celowego zabiegu chirurgicznego (np. polegającego na usunięciu zmian nowotworowych). W większości przypadków z obrażeniami kości czaszki wiążą się również uszkodzenia mózgu, które mogą prowadzić do kalectwa, a w najgorszych okolicznościach – być bezpośrednią przyczyną śmierci pacjenta [4, 5].

W zależności od wielkości urazu w strukturze czaszki może się on wiązać dla człowieka z oszpecceniem, co stanowi istotny problem natury estetycznej, a także z ograniczeniem możliwości prawidłowego funkcjonowania. W większości przypadków ubytek kości czaszki można z powodzeniem uzupełnić w celu przywrócenia naturalnego kształtu czaszki [4].

Biorąc pod uwagę rozmiar uszkodzenia w czaszce, przyjęto, że w przypadku ubytku o średnicy przekraczającej 5 cm zachodzi konieczność przeprowadzenia operacji kranioplastycznej. Mniejsze ubytki kości czaszki na ogół nie są poddawane rekonstrukcji, chyba że ze względów kosmetycznych [1].

Celem zabiegów kranioplastycznych jest korekcja niekształceń głowy pacjenta, a także uzupełnienie ubytku kostnego, co – ze względów kosmetycznych oraz z uwagi na konieczność zapewnienia wymaganej ochrony mózgu przed dalszymi potencjalnymi uszkodzeniami i urazami mechanicznymi – stanowi w neurochirurgii największy problem.

Jednym z najistotniejszych wymagań dotyczących rekonstrukcji kości czaszki jest zapewnienie odpowiedniej ochrony w miejscu ubytku kostnego – nie tylko przed

zabiegiem, lecz także w czasie rehabilitacji. Ludzki mózg jest delikatną strukturą, więc każde niepożądane działanie sił zewnętrznych może spowodować powiększenie się pierwotnej strefy urazowej i w konsekwencji – pogorszenie stanu neurologicznego pacjenta, a nawet jego śmierć.

Współczesny rynek oferuje szereg rozwiązań ochronnych dla każdej grupy wiekowej pacjentów po urazach czaszkowo-mózgowych. W przypadku operacji kranioplastycznych i leczenia deformacji czaszki większość produktów rehabilitacyjnych wykonuje się na indywidualne zamówienia, co wynika z konieczności dopasowania ochroniacza do kształtu i rodzaju urazu. Procedura związana z doбором indywidualnej ochrony głowy bywa bardzo kosztowna, ponieważ wiąże się na ogół z koniecznością pobrania miar podczas wieloetapowych konsultacji. Niestety, dostępne na rynku uniwersalne kaski i ochraniacze nie zapewniają tak dokładnej ochrony jak wyroby spersonalizowane. Tymczasem zastosowanie takiej dodatkowej, uniwersalnej osłony w strefie braku kostnego czaszki wydaje się konieczne ze względu na długi czas oczekiwania na zabieg kranioplastyki i wysokie koszty takiego zabiegu.

Autorzy wyszli z propozycją uniwersalnego, adaptacyjnego kasku ochronnego. Jego najważniejsze zalety to:

- mniejszy koszt zakupu w porównaniu z personalizowanym ochraniaczem,
- dostępność,
- zapewnienie ochrony znacznej powierzchni czaszki oraz wyeliminowanie specjalistycznych wizyt w celu doboru i regulacji kasku.

Konstrukcja kasku

Przyjęto następujące założenia projektowo-konstrukcyjne:

- kask jest przeznaczony dla osób dorosłych;
- kask musi zapewnić jak najdokładniejszą ochronę strefy urazowej, zlokalizowanej w dowolnym miejscu ciemieniowej lub czołowej części kości czaszki;
- elementy osłonowe powinny eliminować kontakt strefy chronionej z innymi obiektami;
- kask powinien się składać z minimalnej liczby elementów i charakteryzować się małą masą;
- konstrukcja kasku musi umożliwiać łatwe nastawienie osłony (lub osłon) samodzielnie przez użytkownika;
- kask powinien być wyposażony w jedną lub dwie osłony (przyłbice) – w zależności od wielkości strefy chronionej;
- konstrukcja kasku musi zapewniać stabilne ustalenie położenia osłon w pożądanej pozycji;
- dobranie kasku i jego indywidualne dopasowanie nie powinno wymagać wizyt u lekarza specjalisty.

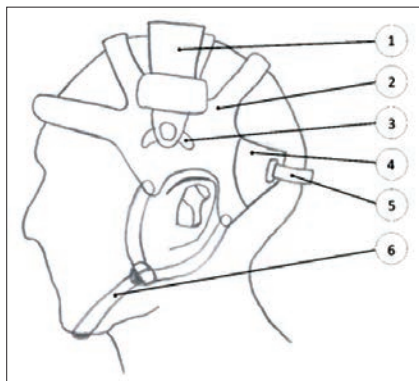
* Dr hab. inż. Marek Wyleżoł, prof. PŚ (marek.wylezol@polsl.pl); mgr inż. Piotr Frączek (piotr.fraczek35@gmail.com) – Politechnika Śląska

Podstawowym problemem, jaki należało rozwiązać podczas opracowywania konstrukcji kasku, było podjęcie decyzji o sposobie zapewnienia ochrony miejsca urazu i regulacji tej ochrony w zależności od wielkości ubytku kostnego. Ostatecznie wybrano koncepcję, która z największym technicznym prawdopodobieństwem powinna spełnić przyjęte założenia.

Zdecydowano, że na konstrukcję kasku będą się składać:

- więźba (szkielet), która będzie się bezpośrednio stykać z głową użytkownika;
- ruchomy element ochronny (osłona, przyłbica), którego podstawowym zadaniem będzie przejęcie ewentualnego nacisku lub uderzenia, częściowe pochłonięcie jego energii, a następnie przekazanie pozostałej części energii na więźbę.

Szkielet 2 (rys. 1) będzie stanowił zewnętrzną część kasku, nadającą mu zasadniczą postać. Przemieszczanie osłony 1 (rys. 1) będzie realizowane przez wykorzystanie kształtu otworu 3, mającego kształt „fasolki”, dzięki czemu użytkownik będzie mógł ustalić jedną z trzech pozycji osłony. Pas spinający 5 (rys. 1) wraz z elastycznymi elementami 4 pozwoli na regulację rozmiaru kasku w celu dokładnego dopasowania go do głowy i zapewnienia wygody podczas codziennego użytkowania. Pasek podbródkowy 6 (rys. 1) będzie pełnił rolę dodatkowego elementu odpowiedzialnego za stabilne osadzenie kasku i zabezpieczenie przed jego spadaniem z głowy użytkownika.



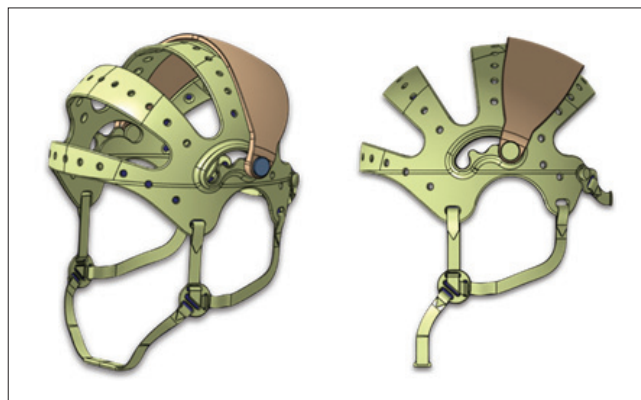
Rys. 1. Szkic koncepcji [2]: 1 – osłona, 2 – szkielet, 3 – otwór w kasku, mający kształt „fasolki”, 4 – elastyczne elementy, 5 – pas spinający, 6 – pasek podbródkowy

Zgodnie z tą koncepcją autorzy opracowali konstrukcję kasku. W tym celu skorzystali z modułów modelowania bryłowego i powierzchniowego systemu CATIA v5. Elementem wejściowym do opracowania postaci szkieletu kasku był model siatkowy – skan głowy dorosłego człowieka (autorzy dysponowali modelem odpowiadającym wielkościowi człowiekowi o wymiarach ok. 70. centyla). Docelowo powstał model wirtualny kasku ochronnego (rys. 2), którego struktura ma charakter hybrydowy (jest efektem modelowania powierzchniowego i bryłowego).

Główny szkielet jest przybliżonym odwzorowaniem głowy człowieka. Aby jednak kask nie stanowił zbyt ciężkiego obciążenia, a jednocześnie zapewniał jak najlepszą wentylację powierzchni głowy, wykonano w nim trzy poprzeczne wycięcia. W pozostałej części szkieletu wykonano dodatkowe, okrągłe otwory wentylacyjne, sprzyjające odparowywaniu potu i emisji ciepła.

W części wewnętrznej kasku przewidziano również tzw. potnik, czyli chłonną wyściółkę, bezpośrednio stykającą się z powierzchnią głowy. Szkielet ma zakończenia do zamocowania pasków od strony podbródka oraz w części potylicznej. Odpowiednie dopasowanie kasku do rozmiaru głowy użytkownika zapewniają odpowiednie wycięcia oraz przewężenia w grubości skorupy szkieletu (wykonane od strony wewnętrznej).

Ważnym elementem kasku jest ruchoma przyłbica. Umożliwia ona właściwą ochronę głowy w miejscu, które musi być chronione. Przyłbica ma zatrzaskowy system mocowania, łatwy w obsłudze i niewymagający użycia dodatkowych narzędzi czy pomocy drugiej osoby (zwłaszcza lekarza). Dzięki specjalnie ukształtowanemu otworowi w części bocznej szkieletu możliwe jest przemieszczenie oraz ustalenie przyłbicy w jednym z trzech położeń kątowych (zawsze tak, aby przyłbica zasłaniała jedno z trzech wycięć). Brzeg otworu oraz zaokrąglone wypusty ustalające położenie przyłbicy są przewidziane do wykonania z bardziej miękkiego i sprężystego tworzywa (w odróżnieniu od reszty szkieletu). W szczególnych przypadkach możliwe jest umieszczenie w otworach mocujących do trzech prowadnic, co w praktyce oznacza uzyskanie pełnego kasku. Zadaniem przyłbicy jest nie tylko zewnętrzna osłona powierzchni głowy, lecz także przyjęcie obciążeń dynamicznych z zewnątrz (np. podczas upadku lub uderzenia w głowę twardym przedmiotem) i pochłonięcie energii uderzenia. Sprzyja temu różnicowanie tworzywa pomiędzy szkieletem a brzegiem otworu do mocowania przyłbicy (miejsce mocowania jest mniej sztywne).



Rys. 2. Model wirtualny kasku [2]

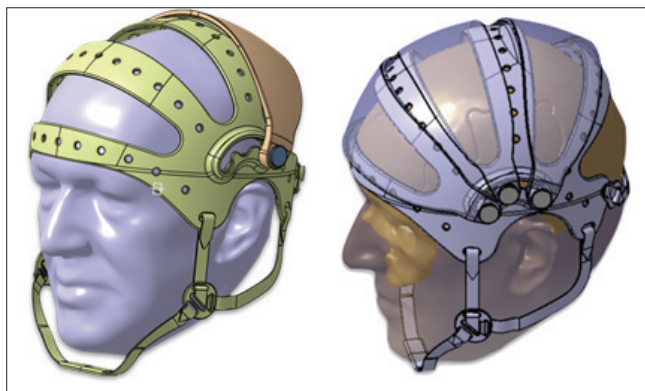
Analiza kasku

Model kasku posłużył do wykonania uproszczonych analiz ergonomiczności (rys. 3) i wytrzymałości (rys. 4 i 5).

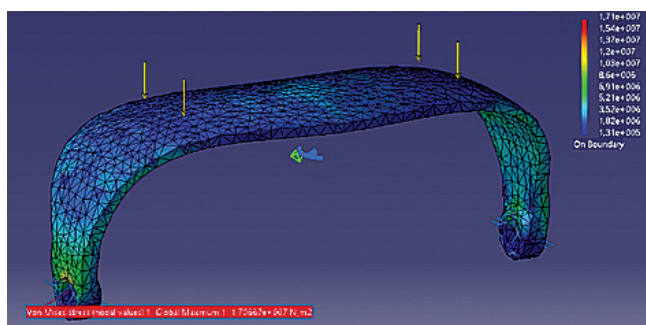
W analizie ergonomiczności ograniczono się do dopasowania modelu kasku do posiadanego modelu ludzkiej głowy oraz do sprawdzenia: ewentualnych kolizji, charakterystycznych miejsc kasku (położenia opaski czołowej szkieletu, położenia uchwytów na paski podtrzymujące itp.) oraz działania kasku w konfiguracji z największą możliwą liczbą zamontowanych przyłbic.

W analizie wytrzymałości skoncentrowano się natomiast na zweryfikowaniu wytrzymałości przyłbicy na obciążenia statyczne. W tym celu na model przyłbicy narzucono warunki brzegowe w postaci trwałego ustalenia w miejscach jej naturalnego mocowania. Powierzchnię przyłbicy obciążono siłą o wartości 700 N (oszacowano ją jako siłę odpowiadającą upadkowemu uderzeniu człowieka o masie 70 kg z przyspieszeniem ziemskim – przy teoretycznym założeniu, że w chwili kontaktu kasku z podłożem siła zostanie rozłożona na całą powierzchnię zewnętrzną elementu ochronnego).

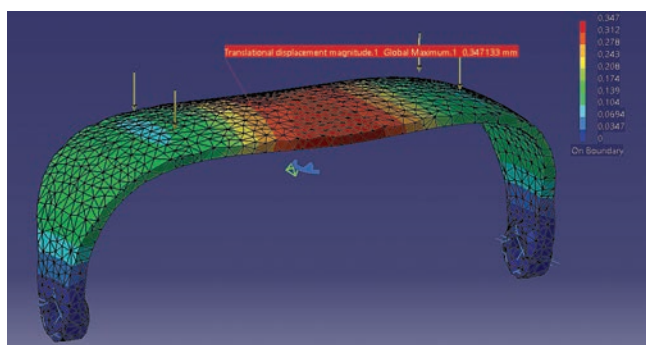
Jako tworzywo, z którego docelowo ma być wykonany kask, przyjęto polieteroeteroketon (PEEK). Jest to termoplastyczne, półkryształiczne tworzywo sztuczne, które łączy dobre właściwości mechaniczne z odpornością na wysoką temperaturę i działanie zewnątrzpo pochodnych czynników chemicznych [8]. Dzięki temu to tworzywo



Rys. 3. Widok modelu kasku w różnych konfiguracjach wraz z modelem ludzkiej głowy [2]



Rys. 4. Wynik analizy metodą elementów skończonych – naprężenia [2]



Rys. 5. Wynik analizy metodą elementów skończonych – przemieszczenia [2]

często jest z powodzeniem stosowane w branży medycznej (do wytwarzania części narzędzi chirurgicznych), w protetyce stomatologicznej oraz w budowie tymczasowych implantów do małoinwazyjnych zabiegów.

Do najważniejszych zalet tworzywa PEEK należą:

- bardzo dobra odporność chemiczna,
- wysoka stabilność wymiarowa,
- biokompatybilność (co pozwala na kontakt przez długi czas użytkowania),
- dobre właściwości ślizgowe i cierne,
- odporność na hydrolizę i parę przegrzaną,
- wysoka wytrzymałość mechaniczna,
- podatność na sterylizację parą wodną lub tlenkiem etylenu.

Dodatkową zaletą PEEK jako tworzywa do wykonania przyłbicy jest możliwość jego wykorzystania w procesie wytwarzania generatywnego, zwłaszcza w przypadku produkowania prototypów.

Badaną przyłbicę w całości zamodelowano jako wykonaną z tworzywa PEEK o granicy plastyczności 114 MPa.

Wyniki przeprowadzonej analizy wykazały, że maksymalne naprężenia w miejscach najbardziej obciążonych, tj. w otworach umożliwiających połączenie, wyniosły zaledwie 17 MPa, co stanowi niewielki procent wartości granicy plastyczności zastosowanego materiału. Nawet w przypadku przyjęcia liczby bezpieczeństwa równej 5 naprężenia dopuszczalne nie zostałyby przekroczone (85 MPa).

Maksymalne uzyskane przemieszczenie wynosi natomiast 0,35 mm, co stanowi realną wartość w przypadku symulowanego upadku.

Reasumując, wyniki analizy wytrzymałościowej modelu przyłbicy (rys. 4 i 5) są poprawne – nie stwierdzono ani dużych przemieszczeń, ani przekroczenia granicy wytrzymałości.

Podsumowanie

Niniejszy artykuł miał na celu przedstawienie opracowanej konstrukcji adaptacyjnego kasku ochronnego, a także wykonanego wirtualnego modelu tego kasku.

Posługując się modelem wirtualnym kasku, wykonano niezbędną weryfikację wytrzymałościową oraz analizę ergonomiczną (w analizie ergonomicznej wykorzystano model głowy człowieka).

Zdaniem autorów obszar zastosowania opracowanego kasku nie ogranicza się tylko do opisanej rehabilitacji w przypadku zabiegów kranioplastycznych. Kask można również z powodzeniem wykorzystać w sytuacjach, gdy konieczna jest jakakolwiek ochrona nerwalgicznego miejsca głowy. Kask może znaleźć zastosowanie w profilaktyce deformacji czaszki oraz w celu ochrony głowy u osób z zaburzeniami równowagi, a także z rozpoznaniem porażenia mózgowego, hemofilii, ataksji lub spastyki.

LITERATURA

1. Dujovny M., Aviles A., Agner C., Fernandez P., Charbel F.T. "Cranioplasty: Cosmetic or therapeutic". *Surg Neurol.* 47 (1997): s. 238–241.
2. Frączek P. „Model wirtualny kasku ochronnego dla osób oczekujących na zabieg kranioplastyki”. Praca magisterska. Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska, 2017.
3. Gedliczka A. „Atlas miar człowieka. Dane do projektowania i oceny ergonomicznej”. Warszawa: CIOP, 2001.
4. Karbowski K., Urbanik A., Wyleźół M. „Analiza obrazów i modelowanie wirtualne w konstruowaniu protez kości czaszki”. *Mechanik.* 7 (2010): s. 620–622.
5. Kozubski W., Liberski P.P. „Neurologia”. Wydanie 1. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2011.
6. Tytyk E. „Projektowanie ergonomiczne”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2001.
7. Wyleźół M. „Metodyka modelowania na potrzeby inżynierii rekonstrukcyjnej”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
8. Strona firmy Ensinger: <https://www.ensingerplastics.com/pl-pl/polwyroby/tworzywa-wysokosprawne/peek> (dostęp: 20.08.2018 r.).