

Grzegorz MILEWSKI, Katedra Mechaniki Doświadczalnej i Biomechaniki, Politechnika Krakowska, Kraków

FUNKCJONALNA ADAPTACJA W PRZYRODZIE – OPTYMALIZACJA KSZTAŁTU STRUKTUR BIOLOGICZNYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono podstawy i założenia teorii funkcjonalnej adaptacji w przyrodzie. Prezentację zilustrowano przykładami struktur biologicznych oraz wzorowanych na nich rozwiązań konstrukcyjnych. W szczególności wyeksponowano zagadnienia wytrzymałościowe optymalizacji kształtu struktur biologicznych.

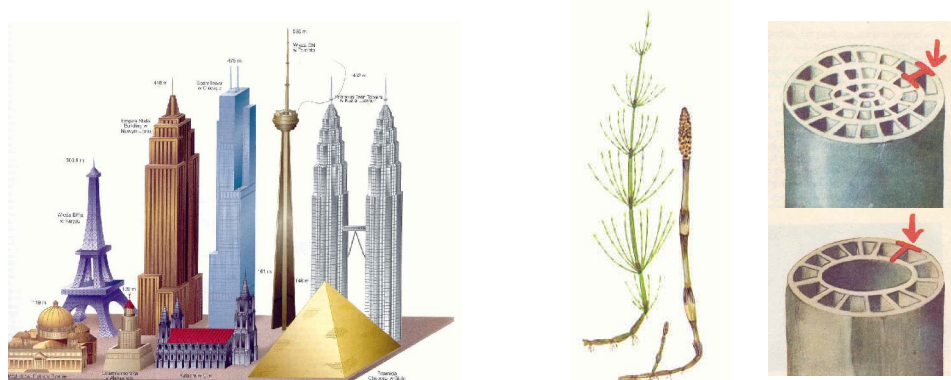
1. WSTĘP

Funkcjonalna adaptacja jest pojęciem używanym do opisu możliwości organizmów do zwiększania ich zdolności wypełniania pewnych funkcji wraz ze wzrastającymi wymaganiami i - odwrotnie - spadku tych zdolności wraz ze zmniejszającymi się wymaganiami. Procesy tworzenia się i rozwoju form tkankowych związane są z ich wzrostem (zmianą masy), przebudową (zmianą własności) i morfogeneza (zmianą kształtu). W swoim rozwoju zwierzęta i rośliny podlegają funkcjonalnej optymalizacji, tzn. adaptują się do wszelkich warunków brzegowych i obciążeń określonych przez otoczenie. Okazuje się, że różnorodność oraz bogactwo występujących w naturze form oraz kształtów można wyjaśnić prostymi regułami. Prawidłowości te dotyczą zarówno świata roślin jak i zwierząt. Znany już w starożytności pentagramie ukryte są symetrie i proporcje rządzące powstawaniem i rozwojem występujących w przyrodzie form naturalnych. Morfologia wielu roślin, w tym na przykład sposób ułożenia liści na łodydze, czy sposób ułożenia ziaren w słoneczniku można wyjaśnić posługując się szeregiem Fibonacciego, czyli ciągiem, w którym każda kolejna liczba jest sumą dwóch poprzednich. Kształt rogów i pazurów zwierząt, kształty muszli, liści, skrzydeł ptaków i owadów można opisać prostym matematycznym wzorem za pomocą spirali logarytmicznej, krzywej podanej przez Kartezjusza. Nieprzypadkowy jest kształt jajka. Innym wzorem występującym w przyrodzie są tzw. krzywe Bauda. Optymalizują one kształt karbu jako zasady rozwoju biologicznego. Kształt ten jest zasadą rozwoju geometrii konarów drzew jak i kości w układzie szkieletowym zwierząt i człowieka. W pracy przedstawiono przykłady struktur biologicznych oraz przykłady wzorowanych na nich rozwiązań konstrukcyjnych. W szczególności wyeksponowano zagadnienia wytrzymałościowe optymalizacji kształtu struktur biologicznych. Występujące w świecie przyrody prawidłowości można sformalizować tworząc różnego rodzaju teorie matematyczne i ich przełożenia na symulacje i modelowania komputerowe. W szczególności dotyczyć to może algorytmów optymalizacyjnych wykorzystywanych w metodach projektowania inżynierskiego. Warto w tym miejscu przytoczyć konkluzję, której autorem jest słynny matematyk S. Wolfram (Nowy rodzaj nauki, 2002): *... nawet najbardziej skomplikowane zjawiska występujące w naturze ożywionej i nieożywionej wyjaśnić można prostymi mechanizmami. Dowolnie złożony efekt można uzyskać poprzez zastosowanie odpowiednio prostego algorytmu ...* W

pracy posłużyłem się m.in. przykładami zaczerpniętymi z następujących pozycji: Thompson D.W., *On Growth and Form*, 1966, Wainwright S.A., et al., *Mechanical Design in Organisms*, 1976 Mattheck C., *Engineering Components Grow like Trees*, 1989, Taber L.A., *Biomechanics of Growth, Remodeling and Morphogenesis*, 1995.

2. ZASADY BIONIKI W PROJEKTOWANIU INŻYNIERSKIM

Bionika (gr.) to nauka zajmująca się badaniem budowy i zasad działania organizmów żywych w celu wykorzystania uzyskanych wyników do projektowania i budowy nowych urządzeń technicznych. Początki tzw. nauk bioinżynierskich wiązały się z obserwacją i podpatrywaniem przyrody oraz projektowaniem na ich bazie określonych rozwiązań konstrukcyjnych. Przykładowym i bardzo spektakularnym przykładem mogą być tutaj struktury przekładkowe piór bażanta, które już w połowie ubiegłego wieku posłużyły inżynierom koncernu Junkersa do opatentowania blisko 1500 rozwiązań w konstrukcjach lotniczych. W budownictwie powszechnie wykorzystywana jest projektowanie, szczególnie fundamentowania konstrukcji w podmokłych i grząskich terenach, wykorzystujące formacje podporowe korzeni drzew. Prawo kształtowania struktur w przyrodzie (... *im mniejsza jest przenoszona struktura, tym cieńsza może być jej struktura nośna* ...) stanowi fundamentalną zasadę w projektowaniu konstrukcji budowlanych. Rozwiązania występujące w świecie natury dalej często pozostają jednak niedoścignionym wzorem. W konstrukcji najwyższych wież, masztów czy tzw. 'drapaczy chmur' stosunek wysokości do jej średnicy na ogół nie przekracza 50, podczas gdy analogiczny parametr dla większości zbóż czy traw nierzadko zbliża się do 200. Konstrukcja łodygi skrzyków czy widłaków dalej pozostaje wzorem prostoty i optymalizacji wytrzymałościowej konstrukcji prętów, kolumn i słupów – Rys.1.



Rys. 1. Formacje teowników i dwuteowników w konstrukcji łodygi skrzyka i widłaka na tle najwyższych budowli świata

3. OPTYMALIZACJA KSZTAŁTU STRUKTUR BIOLOGICZNYCH

W mechanizmach rozwoju adaptacyjnego kwintesencją teorii tej jest zdanie z cytowanej już wcześniej pracy D.W. Thompsona: ... *w ekstremalnych warunkach współzawodnictwa w zdobywaniu przestrzeni życiowej i poszukiwaniu różnych form energii tylko najbardziej ekonomicznie pracujące konstrukcje są w stanie przetrwać* Przy podejściu z punktu widzenia mechaniki i wytrzymałości materiałów do tak rozumianej funkcjonalnej adaptacji struktur biologicznych słowo 'optimum' oznacza minimum masy (ciężaru) oraz odpowiednią wytrzymałość dla wszystkich występujących możliwych przypadków obciążeń. Tłumaczy to przykładowo dlaczego drzewa na zboczu zawsze rosną w kierunku wyznaczonym środkiem

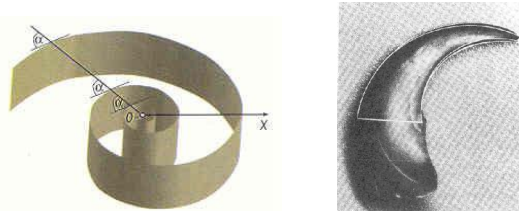
ciężkości ziemi, niepryzmatyczny kształt pnia drzewa w każdym przekroju charakteryzuje się zależnością $h \sim D^3$ (gdzie h jest wysokością, a D średnicą), a pnie drzew rosnących na nadmorskich brzegach o dominującym kierunku wiatru mają tendencję do opalizacji w celu zwiększenia sztywności w tym kierunku.

Dla struktur kostnych znakomitą ilustracją mechanizmów rozwoju adaptacyjnego jest przedstawiona poniżej tabela 1, w której zestawiono własności wytrzymałościowe trzech różnych materiałów kostnych. Tkanki te pochodzą z tej samej tkanki łącznej zarodkowej, ale na skutek różnych funkcji pełnionych w organizmie w wyniku funkcjonalnej adaptacji ich własności są skrajnie różne.

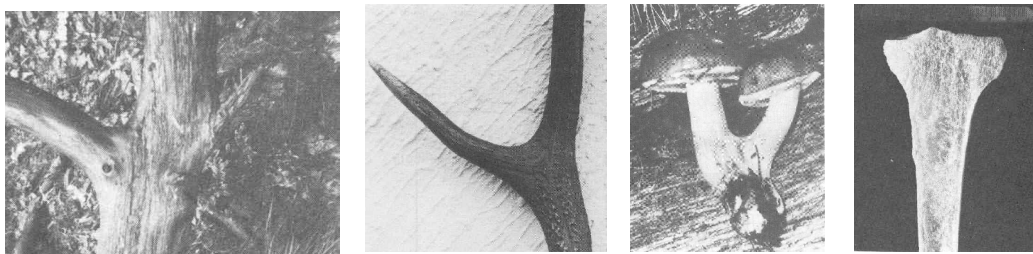
Tab.1. Własności wytrzymałościowe trzech różnych form tkanki kostnej zbitej ilustrujące zasadę funkcjonalnej adaptacji (W_f – praca zniszczenia, σ_g – wytrzymałość na zginanie, E – moduł sprężystości, m – stopień mineralizacji, ρ – gęstość

Forma kostna tkanki zwartej	Róg jelenia	Kość udowa wołu	Kość ucha środkowego wieloryba
W_f [Jm ⁻²]	6190	1710	200
σ_g [MPa]	179	247	33
E [GPa]	7.4	13.5	31.3
m [%]	59.3	66.7	86.4
ρ [10 ³ kgm ⁻³]	1.86	2.03	2.47

W optymalne kształty struktur biologicznych często można wpisać wspomniane już krzywe spirali logarytmicznej czy krzywe Bauda – Rys. 2, 3. Problematyka ta zostanie szerzej przedstawiona w prezentacji.



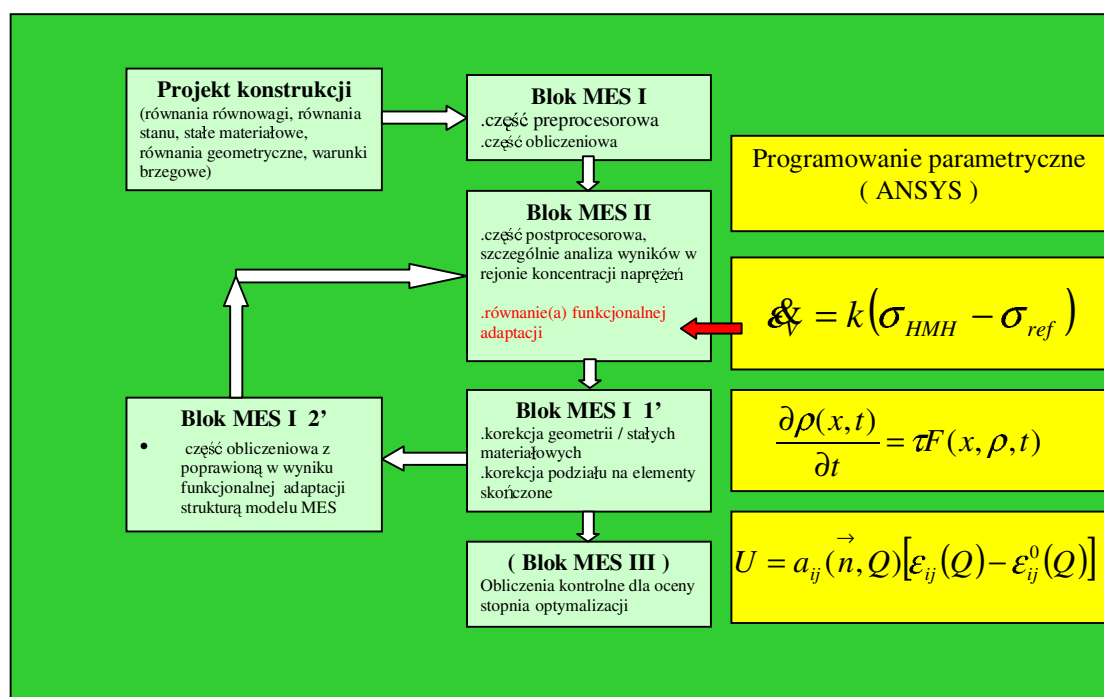
Rys. 2. Optymalny wytrzymałościowo kształt konturu pazura rodziny kotów



Rys. 3. Konturowe krzywe Bauda dla różnych form struktur biologicznych minimalizujące wpływ koncentracji naprężeń od działania 'karbu'

Zasady mechanizmów rozwoju adaptacyjnego można znakomicie ująć w ramy schematu optymalnego kształtowania wytrzymałościowego. Schemat taki poza klasycznymi etapami

związanymi z doбором kryterium optymalizacji i zapisaniem odpowiedniej funkcji celu, doбором zmiennych optymalizacji, sformułowaniem ograniczeń i przyjęciem równań stanu powinien zawierać równanie(a) opisujące mechanizm funkcjonalnej adaptacji. W literaturze przyjmuje się różne wielkości sterujące tym mechanizmem – mogą to być wielkości typu przemieszczeniowego, odkształceniowego, naprężeniowego bądź np. rozkład gęstości. Schemat blokowy iteracyjnego procesu optymalizacyjnego wspomaganego komputerowo realizującego proces funkcjonalnej adaptacji przedstawia Rys. 5.



Rys. 5. Schemat blokowy optymalizacji z uwzględnieniem funkcjonalnej adaptacji

LITERATURA

- [1] Cowin S.C., et. al.: Proceed. Bone Cell and Tissue Mechanics, C.I.S.M., Udine, 1995.
- [2] Mattheck C.: Engineering components grow like trees, Kernforschungszentrum, Karlsruhe, 1989.
- [3] Taber L.A.: Biomechanics of growth, remodeling and morphogenesis, Applied Mechanical Review, vol. 48, no. 8, (1995), pp. 487 - 545.
- [4] Thompson D.W.: On growth and form, Springer, 1966.

FUNCTIONAL ADAPTATION IN NATURE – SHAPE OPTIMIZATION OF BIOLOGICAL STRUCTURES

Summary. The paper presents the fundamentals and the main assumptions of the theory of functional adaptation in nature. The presentation has been illustrated with the examples of biological structures and constructions based on those designs. In particular, the problems of strength optimization of the shape of biological structures have been worked out.