

Kazimierz E. Oczóś  
Andrzej Kawalec

---

# Kształtowanie metali lekkich

Wydawca  
**Agnieszka Nowak**

Redaktor  
**Barbara Nowak**

Produkcja  
**Mariola Grzywacka**

Publikacja dofinansowana przez Politechnikę Rzeszowską  
im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA  
Warszawa 2012

ISBN 978-83-01-16875-9

Wydawnictwo Naukowe PWN SA  
02-676 Warszawa, ul. Postępu 18  
tel. 22 69 54 321  
faks 22 69 54 288  
e-mail: [pwn@pwn.com.pl](mailto:pwn@pwn.com.pl)  
[www.pwn.pl](http://www.pwn.pl)

# Spis treści

1. Wprowadzenie .....	1
2. Konstrukcje lekkie – istota, rodzaje, realizacja .....	4
2.1. Przyroda a konstrukcje lekkie .....	4
2.2. Strategie tworzenia i rodzaje konstrukcji lekkich .....	7
2.3. Aspekty materiałowe konstrukcji lekkich .....	10
2.4. Aspekty projektowe konstrukcji lekkich .....	14
2.5. Techniki konstruowania a techniki kształtowania .....	18
2.5.1. Wpływ objętościowego kształtowania plastycznego (na przykładzie kucia) .....	18
2.5.2. Wpływ kształtowania formującego (na przykładzie odlewania).....	19
2.6. Przykłady zastosowań konstrukcji lekkich .....	23
Literatura .....	26
3. Klasyfikacja i charakterystyka rodzajów kształtowania metali lekkich .....	28
3.1. Klasyfikacja rodzajów kształtowania .....	28
3.2. Charakterystyka rodzajów kształtowania .....	28
3.2.1. Kształtowanie formujące .....	28
3.2.2. Kształtowanie plastyczne .....	32
3.2.3. Kształtowanie przyrostowe .....	35
3.2.4. Kształtowanie ubytkowe .....	37
3.2.5. Kształtowanie przez łączenie .....	39
Literatura .....	47
4. Właściwości metali lekkich i ich stopów .....	49
4.1. Aluminium i jego stopy .....	49
4.1.1. Zarys historii i produkcji aluminium .....	49
4.1.2. Właściwości aluminium .....	52
4.1.3. Ogólna charakterystyka stopów aluminium .....	53
4.1.4. Stopy aluminium do przeróbki plastycznej .....	54
4.1.5. Stopy odlewnicze aluminium .....	73
4.1.6. Spiekane stopy aluminium .....	79
4.1.7. Pianoaluminium .....	80

4.2. Tytan i jego stopy .....	83
4.2.1. Zarys historii i produkcji tytanu .....	83
4.2.2. Właściwości tytanu .....	87
4.2.3. Podział, mikrostruktura i właściwości stopów tytanu .....	90
4.2.4. Aluminidki tytanu .....	99
4.3. Magnez i jego stopy .....	104
4.3.1. Zarys historii i produkcji magnezu .....	104
4.3.2. Właściwości magnezu .....	108
4.3.3. Ogólna charakterystyka stopów magnezu .....	109
4.3.4. Stopy odlewnicze magnezu .....	112
4.3.5. Stopy magnezu do przeróbki plastycznej .....	117
4.3.6. Stopy magnezu wytwarzane szybkim krzepnięciem .....	119
4.4. Beryl i jego stopy .....	122
4.4.1. Zarys historii i produkcji berylu .....	122
4.4.2. Właściwości berylu .....	124
4.4.3. Stopy berylu .....	126
Literatura .....	131
5. Kształtowanie aluminium i jego stopów .....	134
5.1. Kształtowanie formujące .....	134
5.1.1. Odlewanie ciągle .....	134
5.1.2. Odlewanie kształtowe .....	137
5.1.3. Formowanie metalurgią proszków .....	155
5.1.4. Wytwarzanie i formowanie pianoaluminium .....	160
5.2. Kształtowanie plastyczne .....	167
5.2.1. Walcowanie .....	167
5.2.2. Kucie .....	173
5.2.3. Wyciskanie .....	190
5.2.4. Kształtowanie blach .....	203
5.3. Kształtowanie przyrostowe .....	226
5.3.1. Bezpośrednie kształtowanie przyrostowe .....	226
5.3.2. Pośrednie kształtowanie przyrostowe .....	230
5.4. Kształtowanie ubytkowe .....	235
5.4.1. Ogólna charakterystyka procesu skrawania .....	235
5.4.2. Skrawalność .....	236
5.4.3. Skrawanie wysokoefektywne (HSC i HPC) .....	244
5.4.4. Charakterystyka sposobów obróbki skrawaniem .....	247
5.4.5. Charakterystyka sposobów obróbki ścierniej .....	259
5.4.6. Przecinanie .....	265
5.4.7. Przykładowe obrabiarki skrawające .....	268
5.4.8. Recykling wiórów .....	272
Literatura .....	274
6. Kształtowanie tytanu i jego stopów .....	280
6.1. Wytwarzanie półwyrobów do kształtowania .....	280
6.2. Kształtowanie formujące .....	285
6.2.1. Odlewanie .....	285
6.2.2. Formowanie metalurgią proszków .....	294

6.3. Kształtowanie plastyczne .....	302
6.3.1. Kucie .....	302
6.3.2. Kształtowanie plastyczne aluminidków tytanu .....	310
6.3.3. Inne sposoby kształtowania plastycznego .....	313
6.3.4. Kształtowanie nadplastyczne stopów tytanu .....	314
6.3.5. Kształtowanie nadplastyczne połączone ze zgrzewaniem dyfuzyjnym .....	316
6.3.6. Kulowanie .....	319
6.4. Kształtowanie przyrostowe .....	321
6.4.1. Bezpośrednie spiekanie laserowe proszku metalowego (DMLS) .....	321
6.4.2. Selektywne stapianie laserowe (SLM) .....	323
6.4.3. Nanoszenie laserowo stopionego proszku (LENS) .....	324
6.4.4. Selektywne stapianie elektronowe (EBM) .....	325
6.5. Kształtowanie ubytkowe .....	329
6.5.1. Ogólna charakterystyka procesu skrawania .....	329
6.5.2. Charakterystyka sposobów obróbki skrawaniem .....	344
6.5.3. Charakterystyka sposobów obróbki ścierniej .....	373
6.5.4. Obróbka erozyjna i strumieniowo-erozyjna .....	383
6.5.5. Kształtowanie ubytkowe aluminidków tytanu .....	394
6.5.6. Obrabiarki skrawające .....	402
Literatura .....	410
7. Kształtowanie magnezu i jego stopów .....	417
7.1. Kształtowanie formujące .....	417
7.1.1. Odlewanie ciągle .....	417
7.1.2. Odlewanie kształtowe .....	420
7.2. Kształtowanie plastyczne .....	431
7.2.1. Walcowanie .....	433
7.2.2. Kucie .....	437
7.2.3. Wyciskanie .....	441
7.2.4. Kształtowanie blach .....	446
7.2.5. Kształtowanie nadplastyczne .....	450
7.3. Kształtowanie ubytkowe .....	452
7.3.1. Skrawalność stopów magnezu .....	452
7.3.2. Warunki realizacji procesów obróbkowych i zjawiska towarzyszące .....	454
7.3.3. Charakterystyka sposobów kształtowania ubytkowego .....	456
7.3.4. Chłodzenie i smarowanie strefy styku .....	461
7.3.5. Specyfika budowy obrabiarek i warunki bezpieczeństwa pracy .....	466
7.3.6. Gospodarka wiórami i odpadami .....	467
Literatura .....	468
8. Kształtowanie berylu i jego stopów .....	473
8.1. Kształtowanie formujące .....	473
8.1.1. Kształtowanie formujące berylu .....	473
8.1.2. Kształtowanie formujące stopów berylu .....	476
8.2. Kształtowanie plastyczne .....	477
8.2.1. Kształtowanie plastyczne berylu .....	477
8.2.2. Kształtowanie plastyczne stopów berylu .....	479

8.3. Kształtowanie ubytkowe .....	480
8.3.1. Obróbka skrawaniem, ścierna i erozyjna berylu .....	480
8.3.2. Obróbka stopów aluminium – beryl .....	485
8.4. Bezpieczeństwo zdrowia i pracy podczas kształtowania berylu i jego stopów .....	487
8.5. Główne obszary zastosowań berylu i jego stopów .....	489
8.5.1. Lotnictwo i aeronautyka .....	489
8.5.2. Technika jądrowa i rentgenologia .....	492
Literatura .....	493
9. Modelowanie i symulacja procesów kształtowania .....	495
9.1. Istota i znaczenie metod modelowania w procesach kształtowania .....	495
9.2. Klasyfikacja i rodzaje modeli procesów kształtowania .....	497
9.3. Modele konstytutywne materiałów .....	500
9.4. Główne metody numeryczne mechaniki ciał odkształcalnych .....	505
9.4.1. Opis ruchu ciała odkształcalnego – podstawy .....	505
9.4.2. Forma lokalna opisu zagadnienia ruchu ciała odkształcalnego.....	506
9.4.3. Forma słaba opisu zagadnienia ruchu ciała odkształcalnego .....	507
9.4.4. Ogólna charakterystyka metod MRS, MEB, MES .....	507
9.5. Metoda elementów skończonych w mechanice ciał odkształcalnych – wybrane zagadnienia .....	509
9.5.1. Zasada minimum całkowitej energii potencjalnej w MES .....	509
9.5.2. Równania ruchu w postaci dyskretnej z tłumieniem proporcjonalnym .....	511
9.5.3. Jawny schemat całkowania równań ruchu w postaci dyskretnej .....	515
9.5.4. Niejawny schemat całkowania równań ruchu w postaci dyskretnej .....	516
9.5.5. Przykładowe elementy skończone.....	517
9.5.6. Wybrane metody generowania siatki elementów skończonych .....	521
9.5.7. Etapy obliczeń w przemieszczeniowej wersji MES .....	527
9.5.8. Podstawy nieliniowej analizy MES ciał odkształcalnych .....	530
9.5.9. Adaptacyjne metody zmniejszania błędów dyskretyzacji modeli .....	535
9.6. Przykłady zastosowania oprogramowania MES w modelowaniu i symulacji procesów kształtowania .....	537
9.6.1. Wybrane systemy obliczeń MES stosowane do modelowania i symulacji procesów kształtowania .....	537
9.6.2. Przykłady modelowania i symulacji kształtowania formującego .....	539
9.6.3. Przykłady modelowania i symulacji kształtowania plastycznego .....	543
9.6.4. Przykład modelowania i symulacji kształtowania ubytkowego .....	551
9.6.5. Przykład modelowania i symulacji procesu łączenia .....	553
9.7. Kierunki rozwoju metod modelowania i symulacji .....	554
Literatura .....	556
10. Wykaz akronimów .....	561
Skorowidz .....	571

## Wprowadzenie

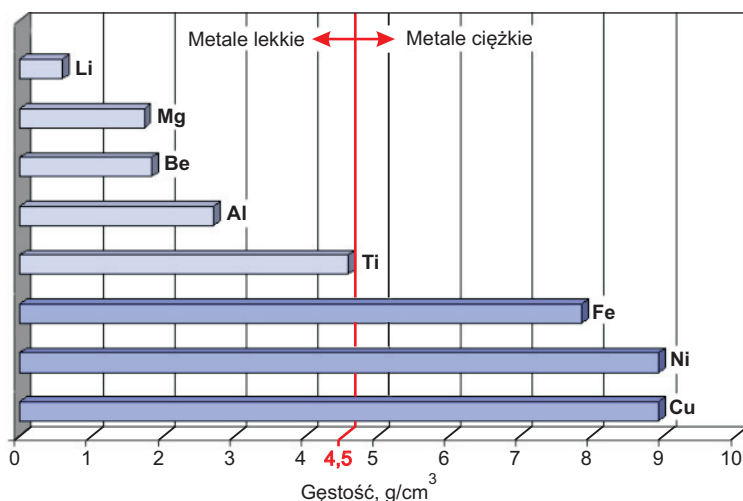
Tworzenie konstrukcji lekkich w wielu branżach przemysłowych stało się obecnie technologią coraz bardziej zyskującą na znaczeniu, nie tylko w budowie samochodów i samolotów, ale również w odniesieniu do wyrobów powszechnego użytku, np. elektronicznych, sportowych czy nawet tekstylnych. Powoduje to ustawiczny rozwój i doskonalenie właściwości materiałów lekkich oraz ciągły postęp w zakresie zwiększania efektywności ich zastosowania w postaci wysoce użytecznych wyrobów.

W przemyśle samochodowym dąży się do budowy pojazdów lżejszych, tańszych, bezpieczniejszych i bardziej przyjaznych środowisku. Główni producenci samochodów dążą do zmniejszenia masy samochodu i ograniczenia zużycia paliwa, a tym samym ilości emitowanych spalin, mając na względzie wymagania prawne oraz oczekiwania użytkowników ukierunkowane na bezpieczniejsze i bardziej czyste pojazdy. Emisja CO<sub>2</sub> jest proporcjonalna do zużycia paliwa, a zatem masa pojazdu stała się głównym kryterium w procesie projektowania, a w aspekcie stale rosnącej liczby samochodów (rys. 1.1) szczególnym wyzwaniem dla ich wytwórców. Z kolei w przewidywanym rozwoju ruchu lotniczego obniżenie masy samolotów oznacza istotną redukcję zużycia paliwa, dłuższy zasięg czy większą ładowność (udźwig) oraz korzyści ekologiczne, służące realizacji programu „czystsze niebo”.



Rys. 1.1. Ruch samochodowy charakteryzuje się dużą dynamiką rozwoju

Spośród materiałów konstrukcyjnych, określanych mianem „lekkich”, na plan pierwszy wysuwają się takie metale, jak stopy aluminium, tytanu, magnezu i berylu, a więc materiały o gęstości poniżej  $4,5 \text{ g/cm}^3$  (rys. 1.2) oraz materiały kompozytowe wzmocnione włóknami, głównie węglowymi i szklanymi. O ile, np. w budowie samochodów uwaga projektantów jest głównie skierowana na stopy aluminium i stopy magnezu oraz materiały kompozytowe, o tyle w budowie samolotów rosnący udział kompozytów konkuruje ze stopami aluminium, a stopy tytanu umacniają swoją pozycję. Do zastosowań specjalnych, m.in. do budowy teleskopów kosmicznych czy aparatury medycznej, preferuje się stopy berylu.



Rys. 1.2. Porównanie gęstości metali lekkich i wybranych metali ciężkich

Możliwości nadawania kształtu i wymiarów wyrobom z metali lekkich – pomimo ich zróżnicowanej kształtowności – zostały już szeroko rozwinięte i w znacznym stopniu dostosowane do specyfiki zastosowania wyrobów. W książce dokonano prezentacji najważniejszych oraz bardziej rozpowszechnionych i efektywnych sposobów kształtowania formującego (za pomocą odlewania czy metalurgii proszków), kształtowania plastycznego, kształtowania przyrostowego (metodami rapid-technologii) i kształtowania ubytkowego metali lekkich, a ze względu na wielość sposobów ich wykorzystania – ograniczono się do w miarę zwięzłego omówienia ich podstawowych cech i zalecanego zastosowania. Obszerniej potraktowano kształtowanie ubytkowe metali lekkich, przede wszystkim w aspekcie charakterystyki stosowanych łańcuchów procesowych, narzędzi kształtujących oraz maszyn i urządzeń w zależności od ich walorów użytkowych i coraz powszechniejszego zastosowania.

Wszelkie ujęcie problematyki kształtowania metali lekkich umożliwiły liczne i owocne kontakty z przedsiębiorcami produkującymi materiały konstrukcyjne oraz udostępnienie przez nich materiałów doświadczalno-wdrożeniowych.

Opracowanie książki było przedsięwzięciem złożonym z powodu, z jednej strony wielości źródeł, świadczących o rosnącym zainteresowaniu tą tematyką na świecie, z drugiej zaś ze znacznej rozbieżności i wycinkowości publikowanych danych, utrudniających dokonywanie syntezy.



Książka jest przeznaczona przede wszystkim dla kadry inżyniersko-technicznej zatrudnionej w przemyśle lotniczym, samochodowym i budowy maszyn, jak też w przedsiębiorstwach przetwarzających metale lekkie. Powinna być przydatna pracownikom i studentom wydziałów mechanicznych, budowy maszyn czy inżynierii produkcji, interesujących się wytwarzaniem konstrukcji lekkich.

Powstanie tej publikacji stało się możliwe dzięki dofinansowaniu przez Politechnikę Rzeszowską oraz wiele znaczących firm. Jesteśmy bardzo wdzięczni rektorowi Politechniki Rzeszowskiej prof. dr. hab. inż. Andrzejowi Sobkowiakowi, prorektorowi prof. dr. hab. Jackowi Klusce oraz kierownikowi Katedry Techniki Wytwarzania i Automatyzacji prof. dr. hab. inż. Janowi Burkowi za bardzo życzliwe potraktowanie inicjatywy wydania książki i jej wymierne wsparcie. Serdecznie dziękujemy wszystkim, którzy przyczynili się do nadania książce ostatecznej formy. Słowa podziękowania kierujemy również do mgr. Pawła Oczosia za dużą pomoc w przygotowaniu jej strony graficznej.

Żywimy nadzieję, że podjęty trud kompleksowego ujęcia technik wytwarzania wyrobów z metali lekkich spotka się z życzliwym przyjęciem Czytelników.

*Autorzy*

## Konstrukcje lekkie – istota, rodzaje, realizacja

Stosowanie lżejszych rozwiązań konstrukcyjnych w najróżniejszych branżach staje się powszechniejsze, zwłaszcza tam, gdzie dzięki obniżeniu masy, oszczędności energii, zmniejszeniu siły ciężkości lub podwyższeniu prędkości (w przypadku ruchomych mas) można rozszerzyć obszary ich użytkowania. Nie do pominięcia jest również rola konstrukcji lekkich w ochronie klimatu i środowiska. Im mniejszą masę ma samochód, samolot czy maszyna, tym mniejsze jest zużycie energii, pozwalającej pojazd lub urządzenie utrzymać w ruchu i tym mniejsze są zarówno emisja gazów cieplarnianych, jak i zanieczyszczenie powietrza.

Jednakże myli się ten kto sądzi, że głównym bodźcem do rozwijania konstrukcji lekkich jest ochrona środowiska. Konstrukcje o obniżonej masie przyczyniają się także do oszczędzania zasobów surowcowych, a tym samym kosztów, podwyższania niezawodności pojazdów i maszyn, rozwijania nowych sposobów konstruowania i kształtowania wyrobów, zapewniających im konkurencyjność na rynku [1].

Klasyczną konstrukcją lekką charakteryzuje zatem:

- wykorzystywanie materiałów o możliwie najmniejszej masie właściwej (gęstości),
- zapewnienie wyrobom odpowiedniej wytrzymałości i sztywności,
- stosowanie specyficznych zasad ukształtowania wyrobów i odpowiednich technik ich wytwarzania,
- podleganie jednej wspólnej zasadzie konstrukcyjnej: zminimalizowanie masy bez uszczuplenia nośności (udźwigu) lub innych funkcji konstrukcji.

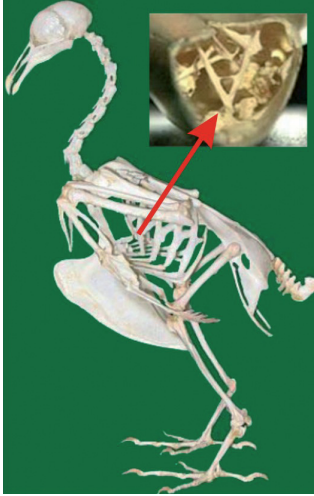
Do podstawowych reguł tworzenia konstrukcji lekkich należy zaliczyć [2]:

- najbardziej bezpośrednio wprowadzanie sił w celu uniknięcia skomplikowanych stanów naprężeń,
- realizowanie najwyższych geometrycznych momentów bezwładności powierzchni,
- stosowanie uzebrowań i drobno rozczłonkowanych ukształtowań struktur,
- integrowanie możliwie największej liczby funkcji w jednej koncepcji rozwiązania,
- zapewnienie na najwyższym poziomie zgodności naprężeń,
- przeprowadzanie oceny okresu użytkowania i żywotności wyrobu, a przez to realizowanie w danym przypadku najwyższej obciążalności.

### 2.1. Przyroda a konstrukcje lekkie

W przyrodzie konstrukcje lekkie są szeroko rozpowszechnione. Wynika to z jednej strony z bardzo ograniczonej ilości zasobów i związanych z tym wymogów oszczędnego wykorzystywania materiałów, z drugiej zaś z faktu, iż organizmy biologiczne potrzebują do syntezy ma-

teriału metabolicznej energii [3]. Ważną rolę odgrywa także funkcjonalność, np. zapewnienie lekkości konstrukcji w celu umożliwienia organizmom latającym w ogóle zdolności do lotu (rys. 2.1). Nie bez znaczenia jest także oddziaływanie konstrukcji lekkiej na polepszenie stabilności dużych struktur, które muszą udźwignąć własną masę, np. pnie drzew (rys. 2.2).

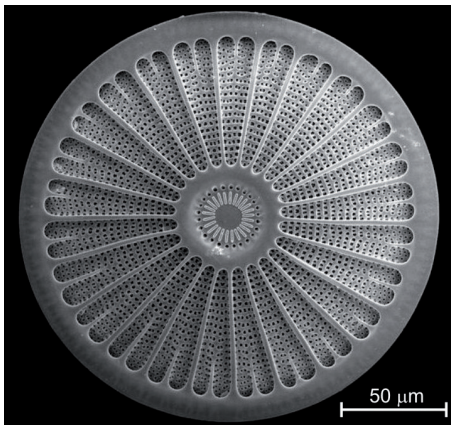


**Rys. 2.1.** Szkielet gołębia stanowi jedynie 8–9% jego całkowitej masy; w górnym prawym rogu – przekrój kości wewnątrz pustej z widocznymi usztywnieniami poprzecznymi (W. Nachtigall)



**Rys. 2.2.** Drzewo z szeroko rozrośniętymi gałęziami; mimo rozwidleń kolejnych gałęzi nie występują obszary spiętrzania naprężeń, które mogłyby być wywołane tymi naturalnymi karbami

Organizmy biologiczne ponadto muszą sprostać specyficznym wymaganiom, które przeważnie nie mają żadnego znaczenia dla wytwarzanych przez człowieka komponentów i kon-



**Rys. 2.3.** Okrzemka (*Arachnoidiscus*) ze swoją geometryczną strukturą porów (AWI - J. Michels)

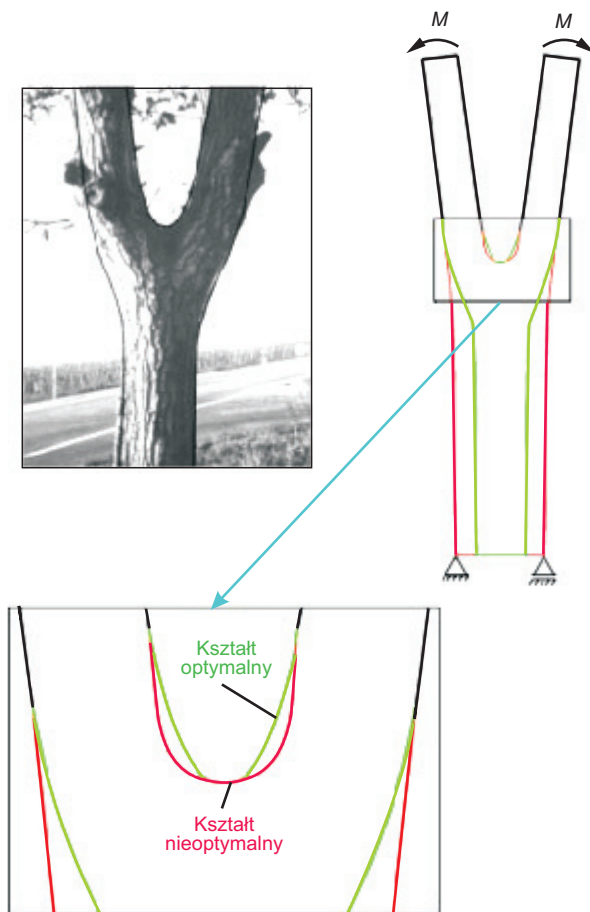


**Rys. 2.4.** Bambus pomimo wydłużonej i lekkiej budowy odznacza się bardzo dużą stabilnością

strukcji. Muszą bowiem spełniać swoje funkcje przez całe życie i to w zmiennych warunkach środowiskowych. Konserwacja, naprawa czy wymiana części nie wchodzi w grę, a każde usuwanie uszkodzeń lub przystosowywanie się do danych warunków musi następować w trakcie „bieżącej eksploatacji”. Przyroda jest w stanie sprostać nietypowym obciążeniom za pomocą bardzo dobrze dostosowanych konstrukcji. Budowa i właściwości organizmów żywych dostosowały się do warunków w ciągu trwającej wiele milionów lat ewolucji (rys. 2.3 i 2.4).

**Bionika**, jako dziedzina wiedzy z pogranicza biologii i techniki, bada budowę i zasady działania organizmów żywych w celu wykorzystania uzyskanych wyników w rozwiązaniach technicznych. Bionika strukturalna, jako poddziedzina bioniki, poszukuje przy tym odpowiedzi na pytanie, na jakich podstawowych regułach konstrukcyjnych bazują przenoszące obciążenia struktury przyrody ożywionej i w jaki sposób można je wykorzystać w technice. Najczęściej obiektami studialnymi są drzewa i kości [4].

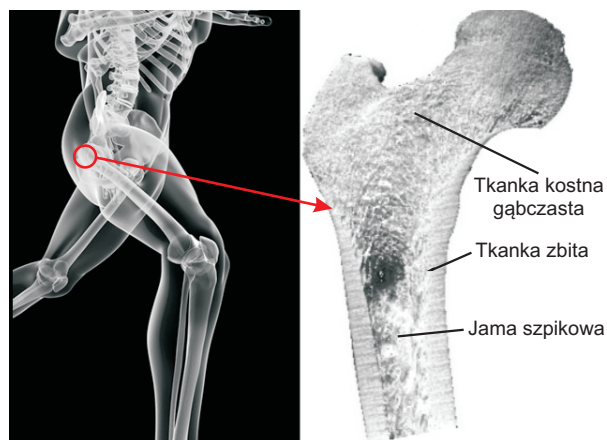
Istnienie miejscowych koncentracji naprężeń w drzewach, np. redukujących oddziaływanie wiatru, rejestruje *kambium*, tworzące się między korą (łykiem) a drewnem pierwotnym



**Rys. 2.5.** Każde rozwidlenie drzewa stanowi geometryczne przejście bez spiętrzania naprężeń (Sachs Engineering)

i powodujące przyrost wtórny. W celu ich usunięcia w bardziej obciążonych obszarach następuje większy przyrost kambium. Ten mechanizm samoopptymalizacji prowadzi do redukcji miejscowego spiętrzenia naprężeń na powierzchni i do porównywalnego ich rozkładu (rys. 2.5). Taki dostosowany do obciążeń „adaptacyjny przyrost” jest podstawową zasadą konstrukcji w przyrodzie. Można więc przyjąć, że w przyrodzie naprężenia powierzchniowe są stałe.

W przypadku kości znaczącą rolę odgrywa nie tylko redukcja miejscowych spiętrzeń naprężeń. Kości, w przeciwieństwie do drzew, nie tylko celowo rozbudowują się w tych miejscach, gdzie to szczególnie jest potrzebne, ale również usuwają materiał wszędzie tam, gdzie jest on zbyteczny. Nasadę górną głowy kości udowej (rys. 2.6) stanowi gąbczasta tkanka kostna, zbudowana z usztywnień krzyżowych w kształcie beleczek lub płytek, które są elementami nośnymi. Tkanka zbita tworzy trzon kości, który otacza jamę szpikową. Taka struktura sprawia, że kość znajduje się w przybliżeniu w stanie równomiernego rozkładu obciążenia. Nie występują ani miejscowo wysokie naprężenia (możliwe miejsca złamań), ani obszary z miejscowo niewielkimi wartościami naprężeń (marnotrawstwo materiału).



Rys. 2.6. Szkielet człowieka z uwidocznionym przekrojem wzdłużnym głowy kości udowej

## 2.2. Strategie tworzenia i rodzaje konstrukcji lekkich

Jak już podkreślono, główne zabiegi związane z tworzeniem konstrukcji lekkiej są ukierunkowane na zminimalizowanie jej masy własnej pod warunkiem, że ani funkcja, ani też bezpieczeństwo i długość okresu pracy konstrukcji nie zostaną ograniczone. W tym celu stosuje się różne środki, m.in. [5]:

- wykorzystywanie lekkich i o dużej wytrzymałości materiałów metalowych i niemetalowych,
- wprowadzanie nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych,
- wdrażanie nowych, efektywnych technik wytwarzania,
- stosowanie najnowszych metod obliczeniowych w celu określania odpowiednich naprężeń i stabilności wyrobów (zob. rozdz. 9).

Następstwem zastosowania tych środków są trzy strategie tworzenia konstrukcji lekkich, których charakterystyczne cechy dają się ująć jako [5, 6]:

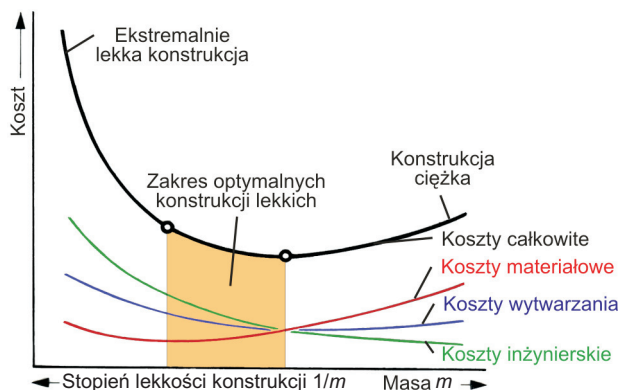
- **strategia materiałowa**, polegająca na zastąpieniu pierwotnego materiału przez materiał o mniejszej masie właściwej z możliwie najwyższymi wskaźnikami użytkowymi, np. zastąpienie konwencjonalnych materiałów stalowych przez nowoczesne, bardziej wytrzymałe stale, wysokowytrzymałe stopy aluminium lub kompozyty włókniste,

- **strategia postaciowa**, polegająca na dostosowaniu rozmieszczenia materiału w strukturze nośnej do występującego obciążenia, tzn. umacniania obszarów poddawanych wyższym obciążeniom, a redukcji materiału w obszarach mniej eksploatowanych, przez zmniejszanie grubości ścianek lub blach lub użycie odpowiednich geometrii profili,

- **strategia wytwórcza**, wykorzystująca wszelkie możliwości technologiczne w celu zapewnienia integracji funkcji (jednoczęściowości) przy możliwie najmniejszym zastosowaniu materiału i zminimalizowaniu miejsc połączeń.

Z każdą strategią wiążą się indywidualne wydatki (koszty) na realizację konstrukcji i technologii. Często konieczne jest połączenie wszystkich trzech strategii. Tworzenie konstrukcji lekkiej obejmuje wówczas nie tylko rozplanowanie i sposób wytworzenia wyrobu, ale również inżynierię materiałową. Taki multidyscyplinarny, inżyniersko-techniczny sposób konstruowania, przy zintegrowanym wykorzystywaniu wszystkich materiałowych, obliczeniowych i wytwórczych środków w odniesieniu do całkowitej struktury i jej elementów, redukuje masę oraz podwyższa walory użytkowe konstrukcji.

Każdemu, praktycznie realizowalnemu stopniowi lekkości konstrukcji ( $L = 1/m$ ) podczas budowy pojazdów i maszyn często są przypisane wąskie, wynikające z ich prawidłowości, granice kosztów, które zazwyczaj ograniczają swobodę działania. Jak pokazano na rysunku 2.7, koszty całkowite mają na ogół przebieg wykładniczy z teoretycznym minimum, stanowiącym rozsądne gospodarczo rozwiązanie. Istnieje bezpośredni związek między masą wyrobu i poziomem kosztów, objawiający się tym, że koszty całkowite z reguły wzrastają nieproporcjonalnie wraz ze zwiększaniem się stopnia lekkości konstrukcji.



Rys. 2.7. Zależność kosztów od masy konstrukcji lekkiej

Na koszty całkowite składają się [5]:

- *koszty inżynierskie*, związane z projektowaniem, obliczeniami i próbami, które mogą być nawet 5–10-krotnie wyższe w przypadku konstrukcji lekkiej,

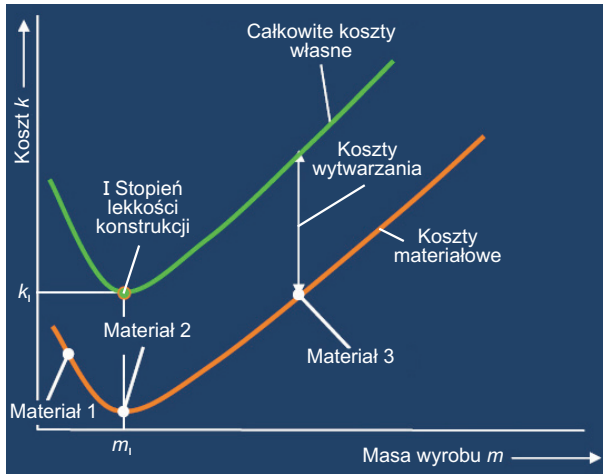
- *koszty materiałowe*, które wraz ze zmniejszaniem masy właściwej materiałów stają się zazwyczaj wyższe, odpowiednio np. do relacji: stal–aluminium–magnez–tytan–kompozyt włóknisty aramidowy – kompozyt włóknisty węglowy – 1, 3, 4, 20, 50, 100 euro/kg,

- *koszty wytwarzania*, które z powodu większych kosztów narzędziowych i procesowych mogą być nawet 3-krotnie wyższe.

Tworzenie lekkich konstrukcji pojazdów czy maszyn często wymaga więc niezbędnych kompromisów. Jeżeli jako określenie celu przyjmuje się *zoptymalizowaną konstrukcję lekką*, należy uwzględnić rozsądne relacje między nakładami i korzyściami. Z kolei w przypadku konstrukcji lotniczych i aeronautycznych często zdarza się, że z powodu spełnianych przez nie zadań czy misji koszty nie odgrywają pierwszoplanowej roli, co sprzyja tworzeniu *ekstremalnie lekkich konstrukcji*.

Jeżeli rozważa się bardziej zróżnicowane warunki zastosowania konstrukcji lekkich, można stwierdzić, że ich masa w rozwiązaniach docelowych ma różne znaczenie. Na ogół wyróżnia się trzy klasy, przy których masa wywiera bardziej lub mniej bezpośredni wpływ na koszty lub funkcje systemowe, a mianowicie *oszczędne, ekologiczne* i *celowe konstrukcje lekkie* [6], [7].

**Oszczędna konstrukcja lekka** powoduje obniżenie kosztów całkowitych, przede wszystkim przez obniżenie kosztów materiałowych (rys. 2.8). Koszty materiałowe zostają zredukowane dzięki odpowiedniemu doborowi materiału, lepszemu jego wykorzystaniu, odchudzeniu konstrukcji lub uzasadnionemu funkcjonalnie jej ukształtowaniu. Koszty wytwarzania ulegają zmniejszeniu przez zastosowanie materiałów o wyższej objętości właściwej (np. zastosowanie aluminium zamiast stali wymaga mniejszych usztywnień).



**Rys. 2.8.** Istota oszczędnej konstrukcji lekkiej (I stopień lekkości konstrukcji)

**Ekologiczna konstrukcja lekka** bazuje jedynie pośrednio na czynniku ekonomicznym. Zabiegi dotyczące materiału i wytwarzania są wprawdzie nadal dość kosztowne, jednak pośrednio uzasadnione przez np. uzyskiwaną oszczędność energii. Ten wpływ jest tym efektywniejszy, im silniej pojedynczy zabieg redukcji masy oddziałuje na masę całkowitą (masa  $m_{II}$  na rys. 2.9). Współczynnik wzrostu redukcji masy przy konstrukcjach lekkich można w przybliżeniu oszacować na podstawie stosunku masy całkowitej do udźwigu użytecznego, który np. w przypadku samolotów wynosi 4–10, a przypadku pojazdów szynowych – 1,5–3.