

Dobór materiałów konstrukcyjnych

Dr inż. Hanna Smoleńska

Materiały edukacyjne
DO UŻYTKU WEWNĘTRZNEGO
Część I

Materiał – co to jest?

W technice **MATERIAŁ** to tworzywo lub substancja o określonych własnościach, stosowana w budownictwie oraz do wytwarzania wyrobów codziennego użytku, maszyn narzędzi lub preparatów.

Jak klasyfikować materiały?

Ze względu na pochodzenie:

- NATURALNE
- SZTUCZNE (INŻYNIERSKIE)

Ze względu na budowę i własności:

- METALE I ICH STOPY
- CERAMIKA
- POLIMERY
- KOMPOZYTY

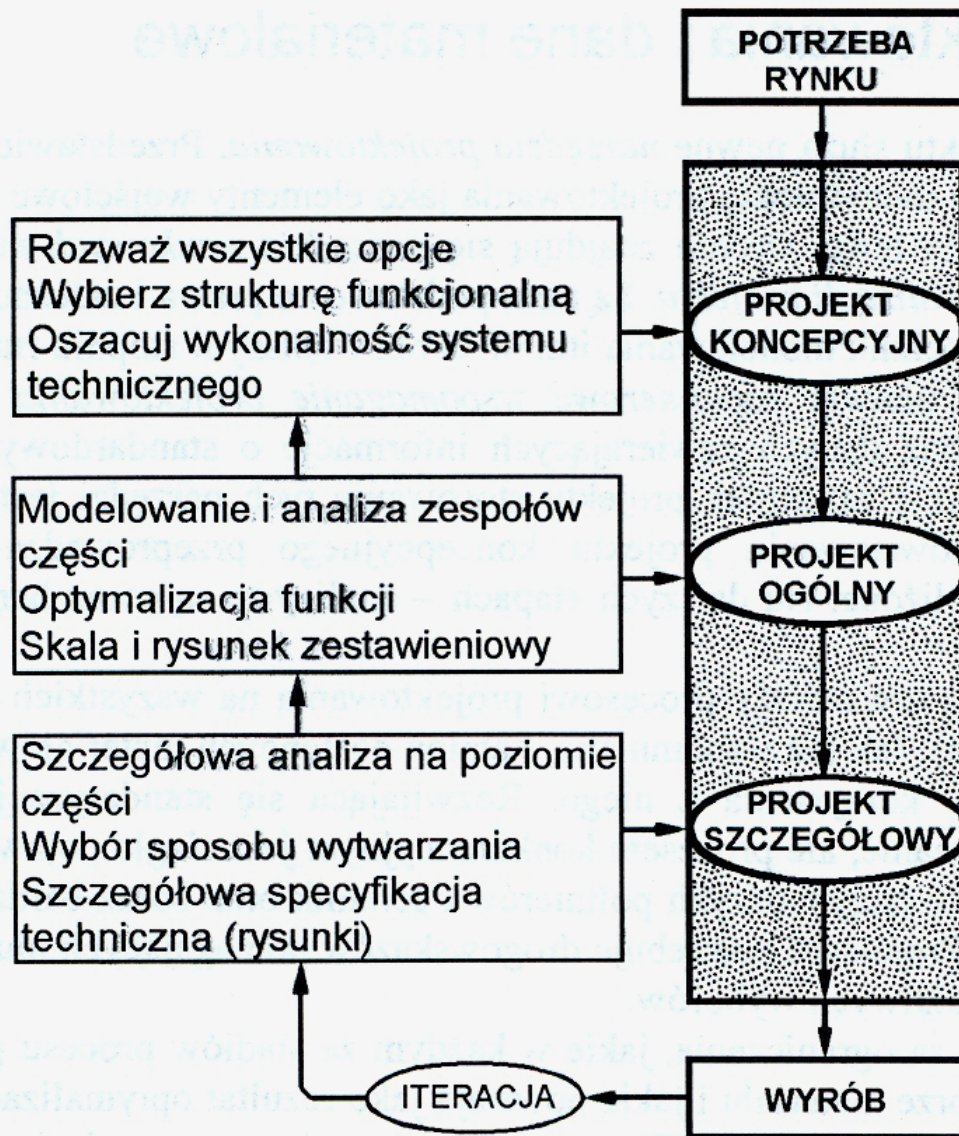
Ze względu na zastosowanie:

- MATERIAŁY KONSTRUKCYJNE
- MATERIAŁY FUNKCJONALNE

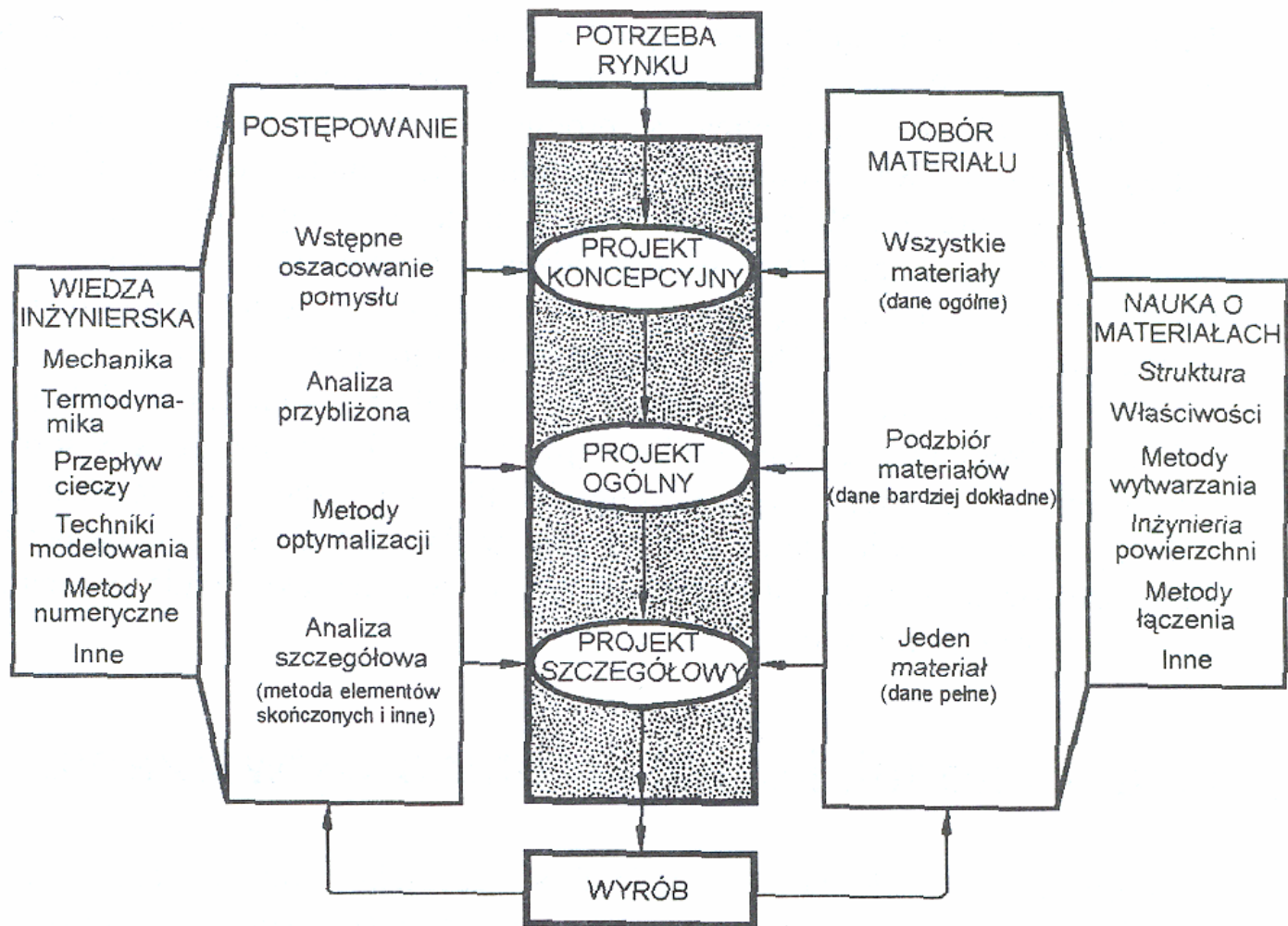
Miejsce analizy doboru materiału w procesie projektowania

Proces projektowania

- **Proces stworzenia, przekształcenia i uzyskania opisu obiektu**
- **Proces przekształcenia początkowego obrazu obiektu w ostateczny**
- **Przekształcenie to generuje opisy przejściowe - rozwiązania przejściowe**
- **Rozwiązanie ostateczne - proces decyzyjny wyboru jednego rozwiązania z wielu przejściowych**

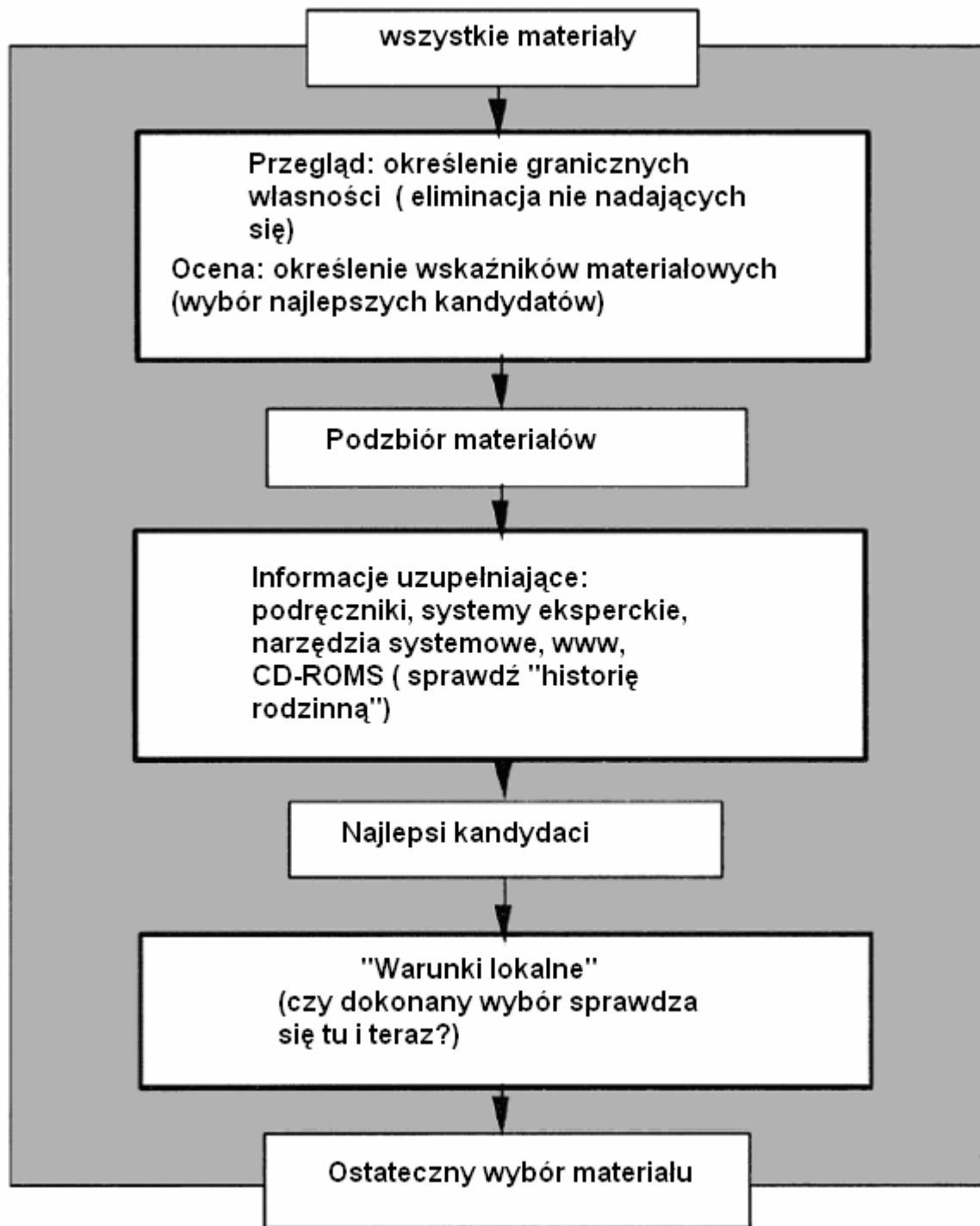


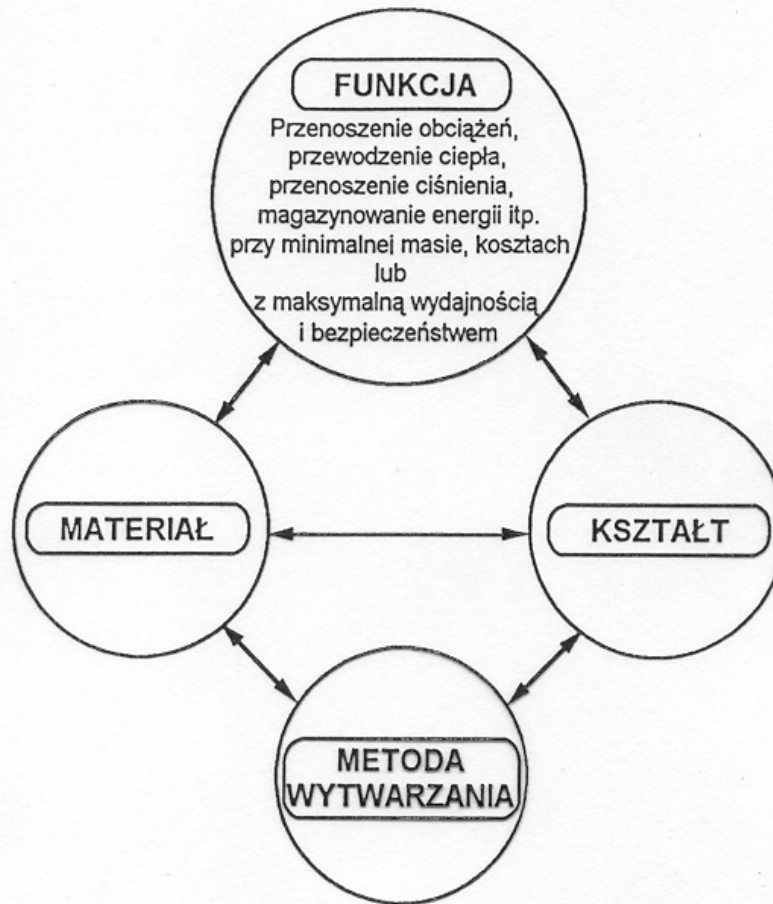
Ogólny schemat procesu projektowania. Rozpoczyna się on rozpoznaniem zadania i postępuje przez stadia koncepcji, projektu ogólnego i szczegółowego, aż do otrzymania wyrobu



Schemat procesu projektowania. Przedstawiono sposób, w jaki narzędzia wspomagające projektowanie i dobór materiału uczestniczą w tym procesie. Informacje dotyczące materiału są potrzebne na każdym etapie projektowania, jednak w zróżnicowanym zakresie i o różnej szczegółowości

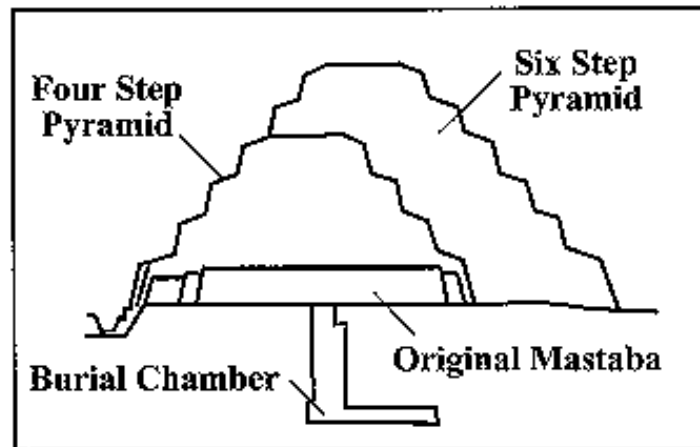
Metodologia wyboru





Główny problem związany z doбором materiału w czasie projektowania:
zależności między funkcją, materiałem, metodą wytwarzania i kształtem wyrobu

THE STEP PYRAMID AT SAQQARA c.2650BC

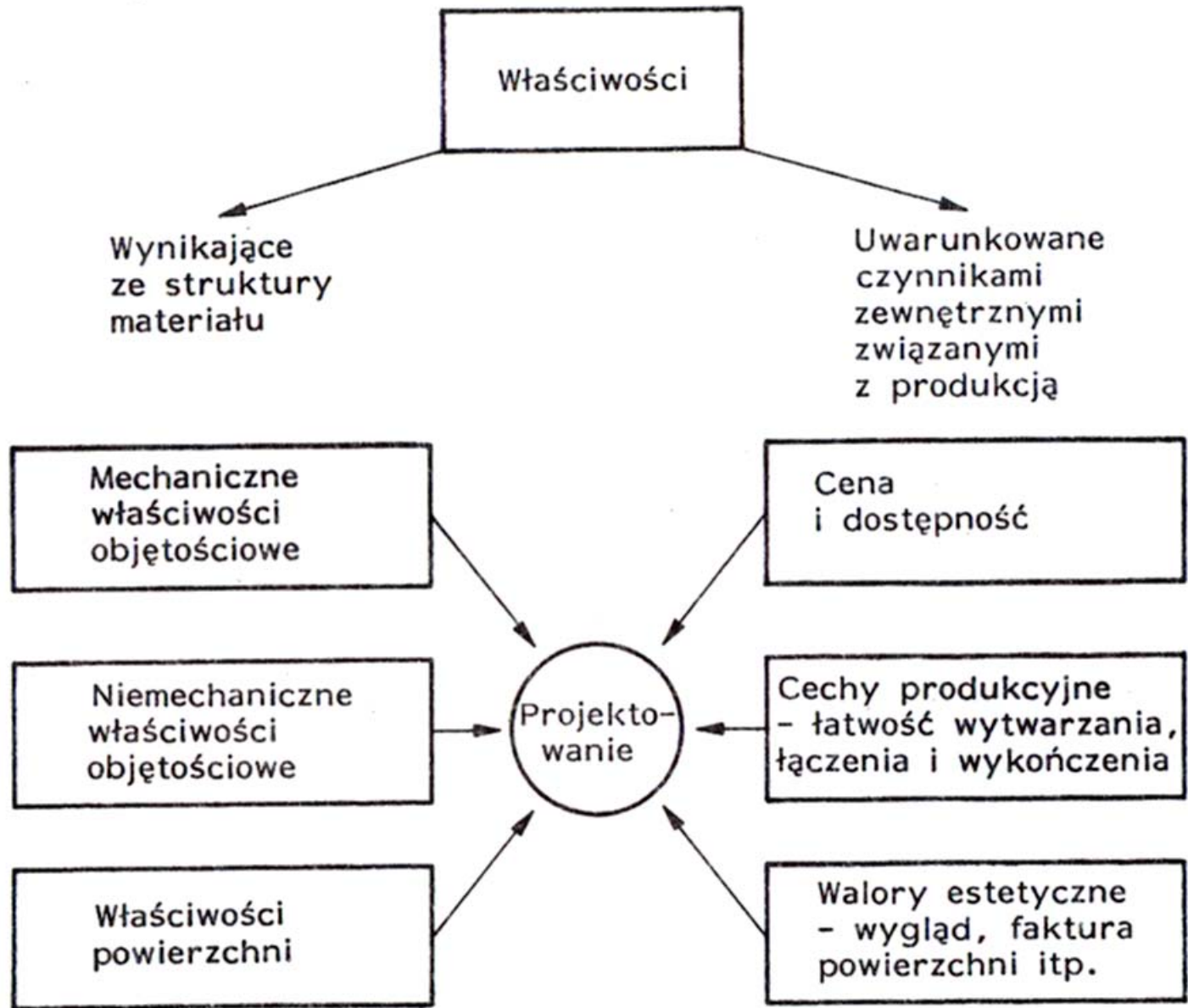


STRUCTURE: Megalithic construction, faced with Limestone/Concrete.

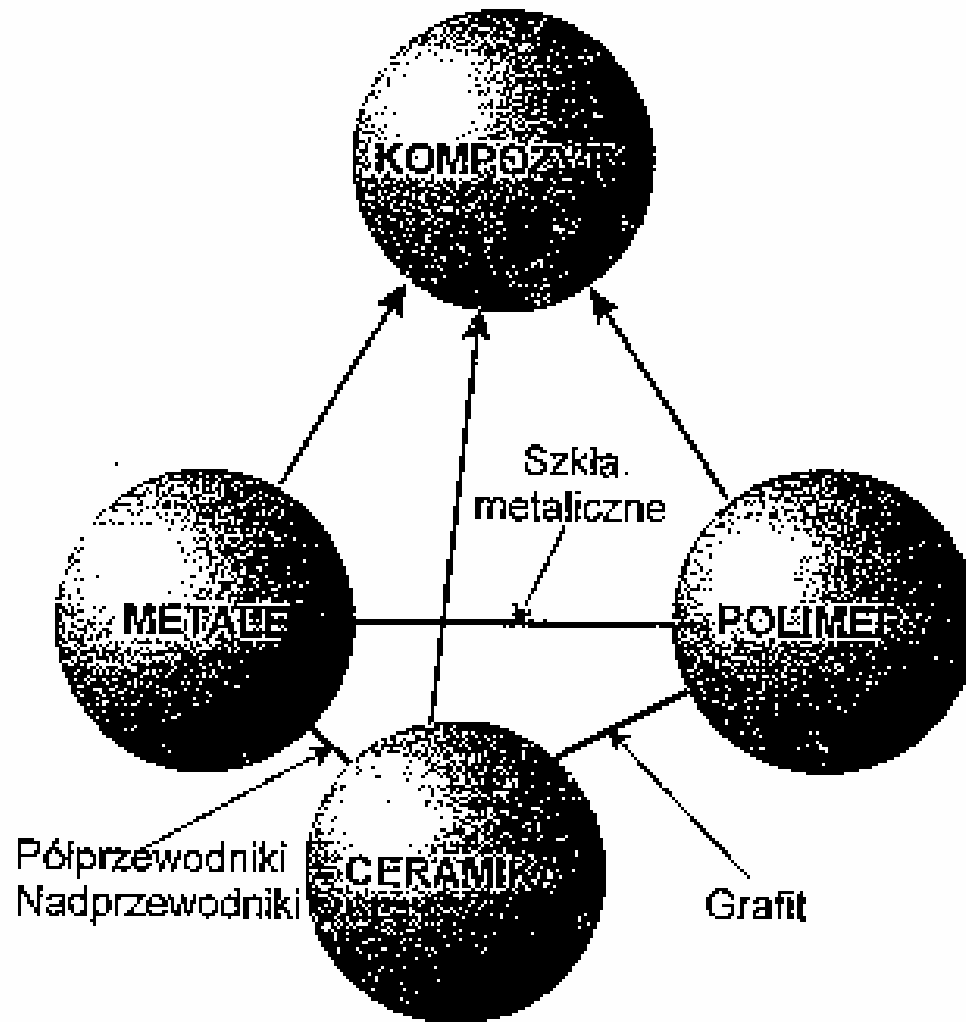
PROCESSING: Raw materials are obtained from local quarries. Massive stone blocks are cut/shaped using Diorite Balls (Stone-Age Tools) and silica (sand) impregnated Copper saw-blades.

PROPERTIES: Excellent strength in Compression; very poor strength in Tension. Good Wear/Erosion characteristics in a dry climate!! Good DESIGN for a Ceramic Monument.

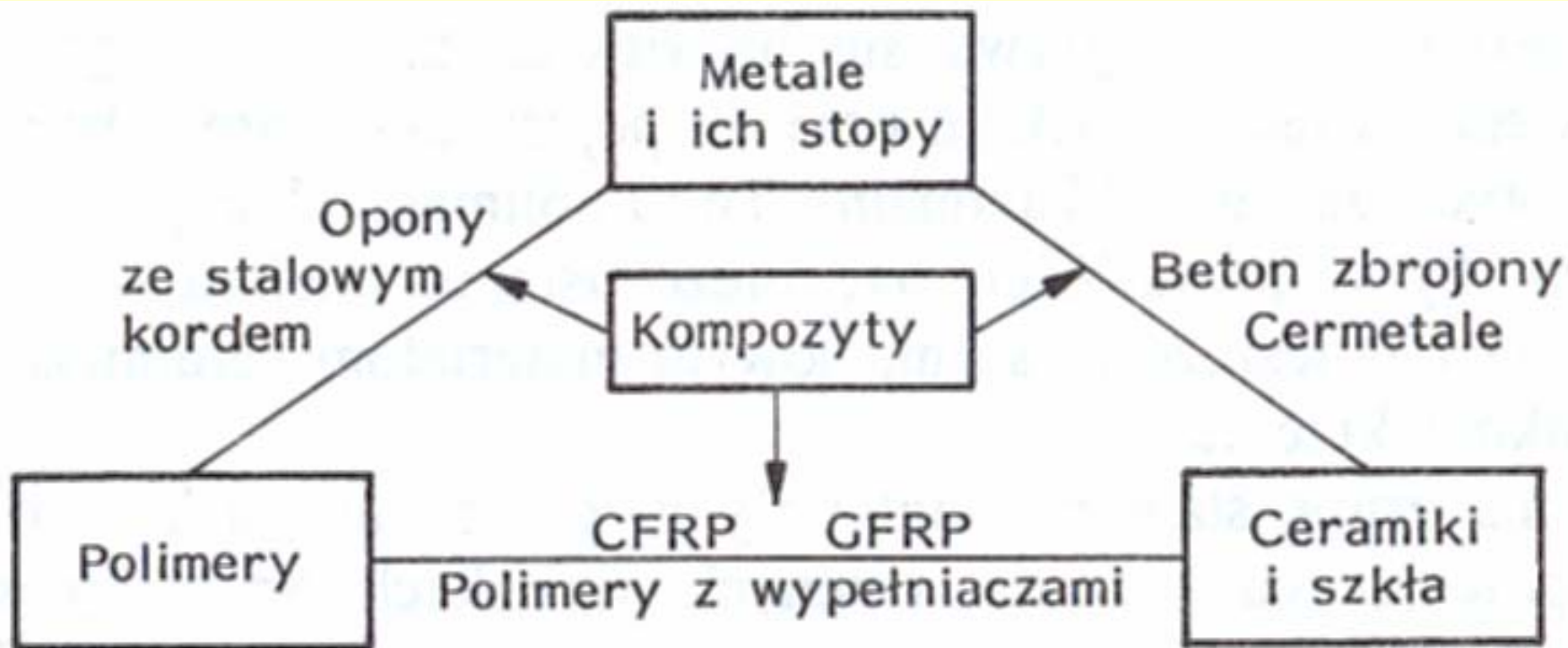
PERFORMANCE: Measured in terms of lifetime (in excess of 5000 years).....OUTSTANDING!!
In terms of protecting the Pharaoh's earthly remains and worldly possessionsABJECT FAILURE!!

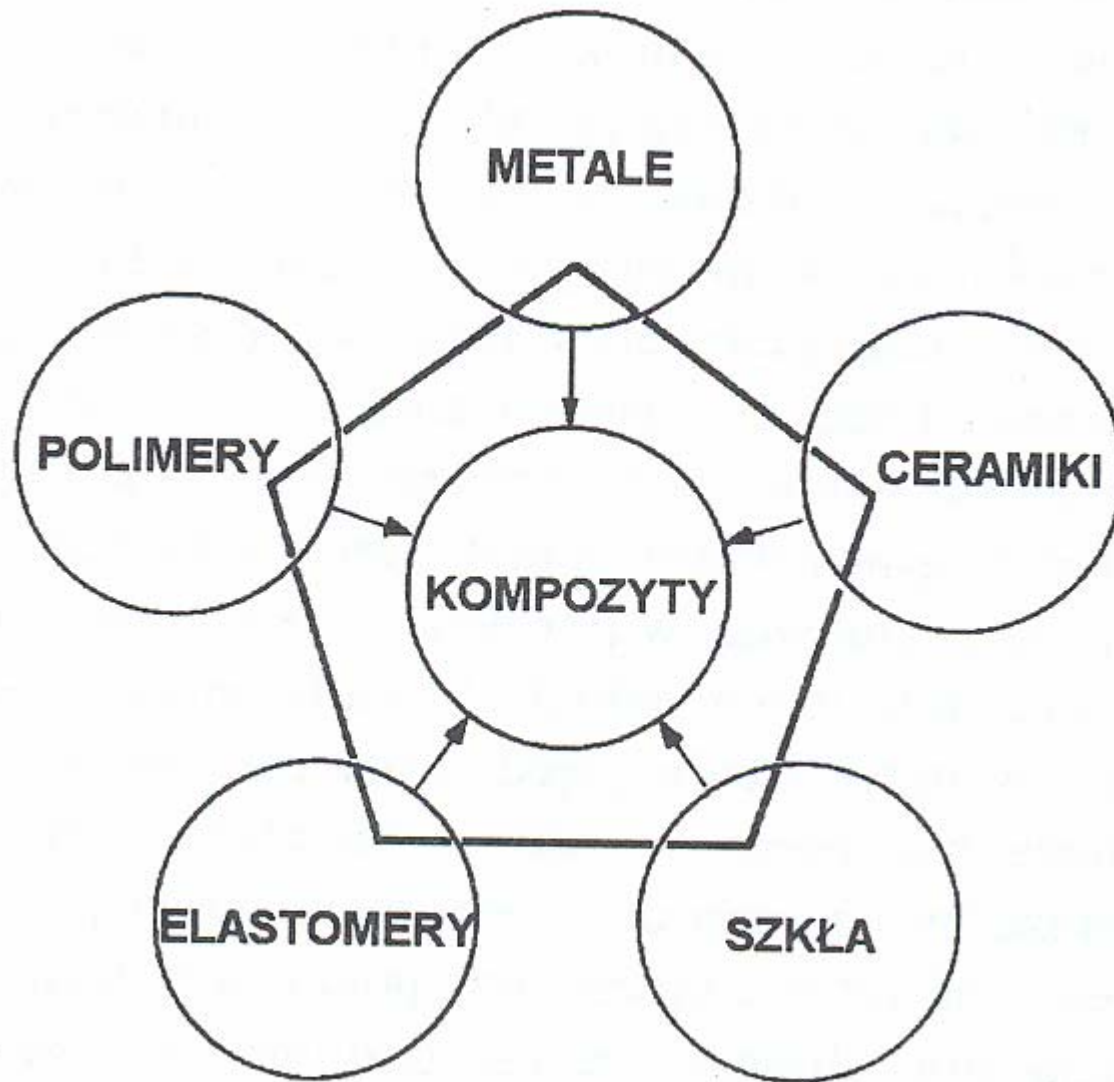


Wpływ właściwości materiałów konstrukcyjnych na proces projektowania

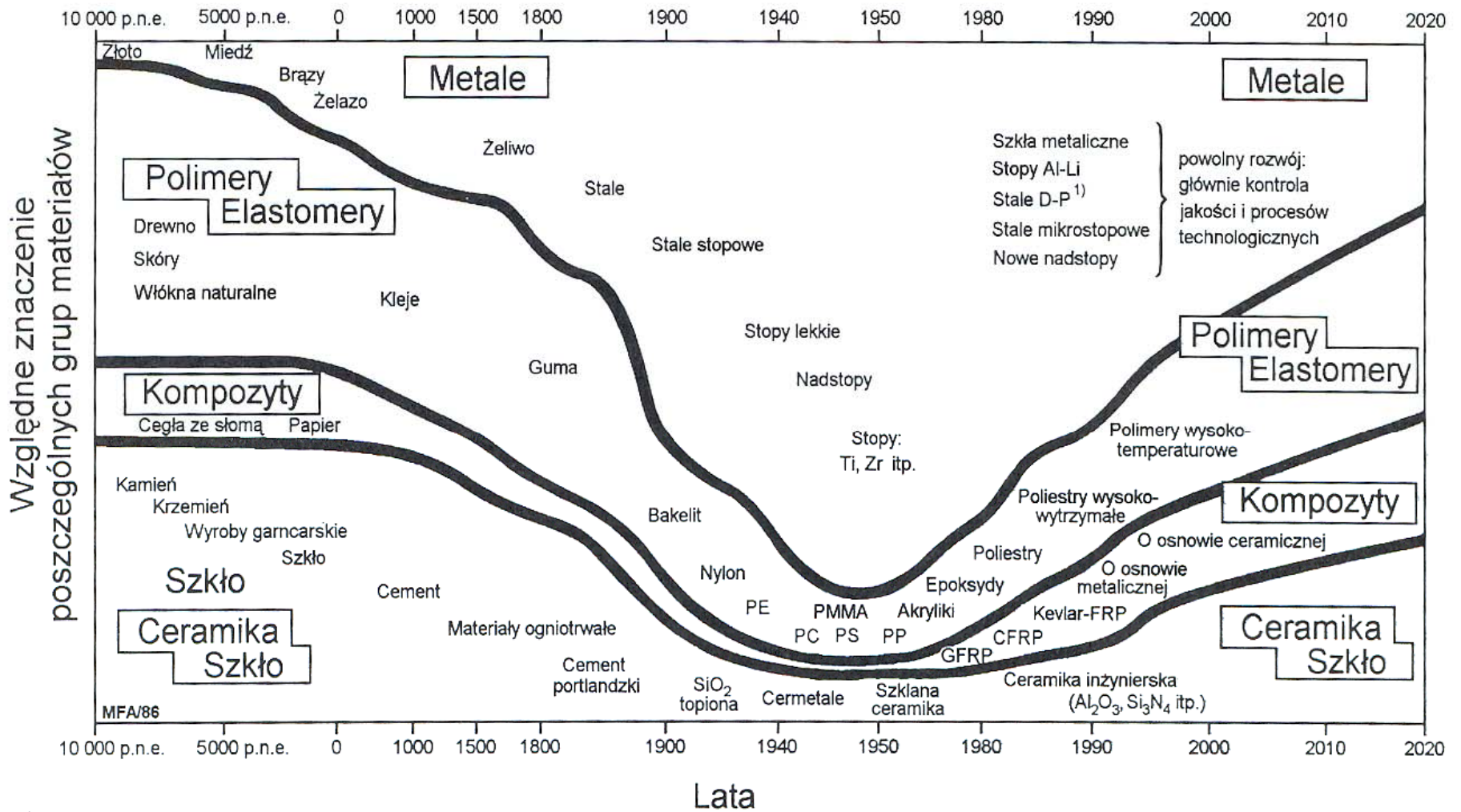


Rys. 2.6. Podstawowe grupy materiałów inżynierskich



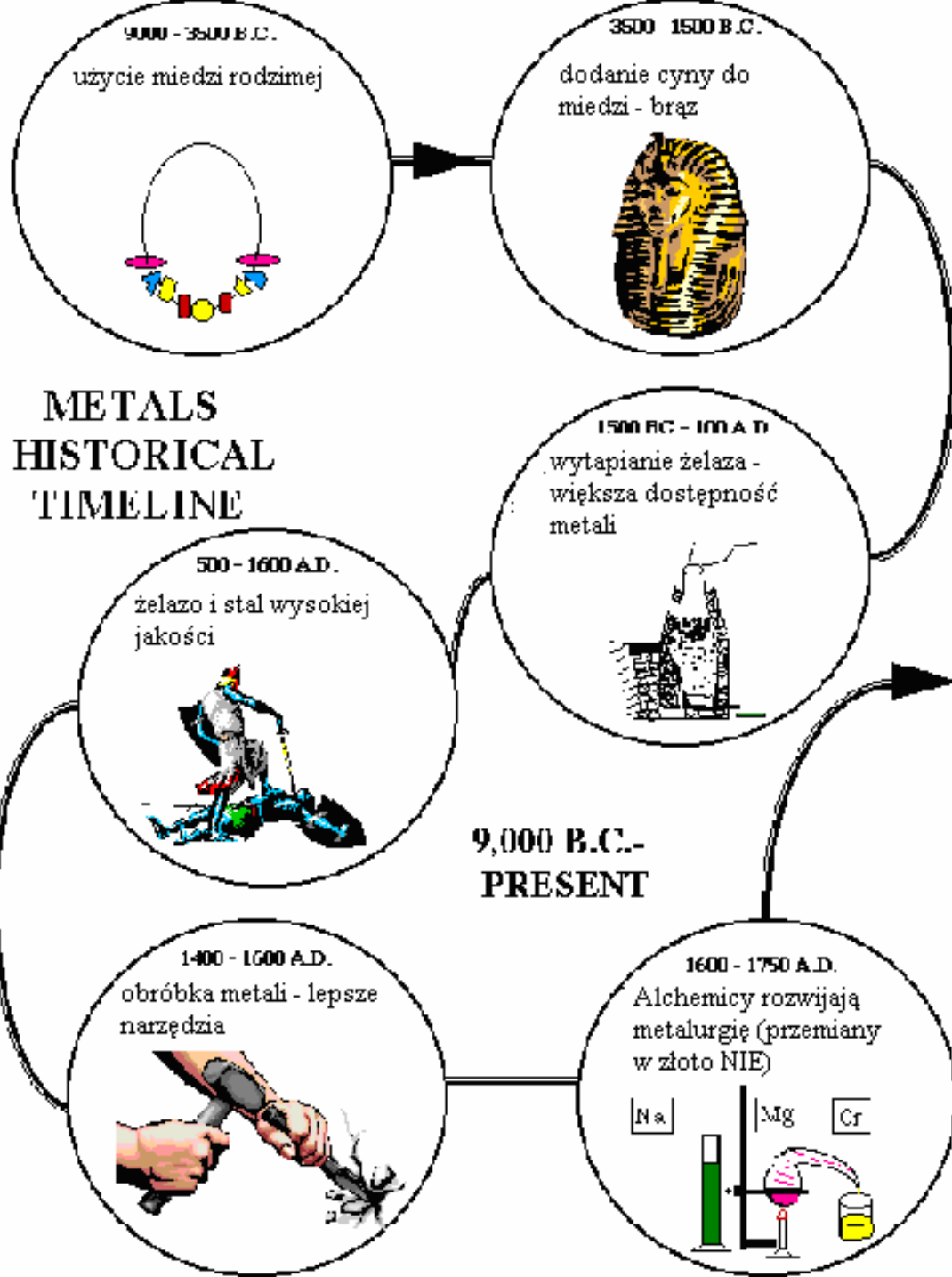


Klasyfikacja materiałów inżynierskich.



¹⁾ Stale dwoisto-fazowe (przyp. tłum.)

RYSUNEK 1.1. Rozwój materiałów inżynierskich



1750 - 1850

przemysłowa produkcja
taniej stali jakościowej



1850 - 1900

tania produkcja dużych
ilości Al (proces Halla)



1900 - 1935

wysoko wytrzymałe stopy
Al - samoloty



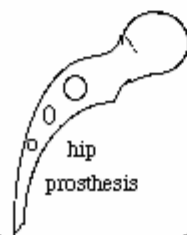
1935 - 1955

stopy specjalne - wydajne
turbiny, silniki



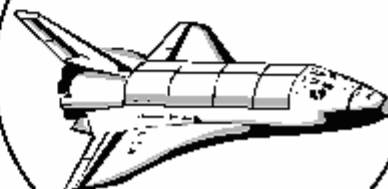
1955 - 1970

"części zamienne" do
człowieka- stopy Co, Ti, Fe



1970 - 1995

superstopy



26,000 B.C.

glina z tłuszczem mamucim i popiołem z kości daje tworzywo z którego można robić żaroodporne naczynia!



6,000 B.C.

wypalane naczynia do celów użytkowych i artystycznych
Grecja



4,000 B.C.

Egipt- wynalazek szkła - glazura szklana(krzemionka) na powierzchni spieku krzemionkowego. Powłoki stosuje się do dzisiaj!



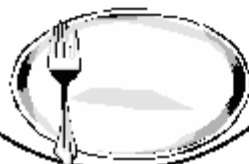
50 B.C. - 50 A.D.

Rzym - szkło optyczne (soczewki, lustra), szyby, wydychywanie wyrobów szklanych



600 A.D.

Porcelana - pierwszy kompozyt ceramiczny. Używana wszędzie od zastawy stołowej do izolatorów



1870's

materiały ogniotrwałe - surowiec: wapień i MgO - są stosowane od ścian budynków do wyłożenia pieców metalurgicznych



HISTORIA CERAMIKI

**26,000 B.C.-
PRESENT**

1877

Pierwszy materiał h-t o określonej rezystywności do nowo wynalezionej mikrofonu węglowego



1889

The American Ceramic Society was founded by Elmer E. Gorton, Samuel Geijsbeek and Colonel Edward Orton Jr.. The primary goal of this society continues to be unlocking the mysteries of high-tech ceramics.

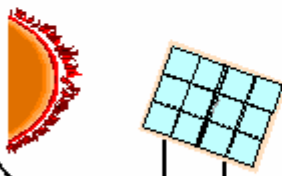
1960

włókna optyczne - możliwość przesyłania informacji z małymi stratami energii



1965

ogniwa fotowoltaniczne - możliwość wykorzystania energii słonecznej



1987

nadprzewodzące tlenki ceramiczne (temp. kryt. 92K) - lepsze o 60K od metalicznych nadprzewodników. Potencjalne zastosowanie do super szybkich komputerów



1992

"inteligentne materiały" - zdolne do reagowania na otoczenie np. włączanie poduszek w samochodzie - element ceramiczny piezoelektryczny



HISTORIA POLIMERÓW

1500's

Majowie posługiwali się piłkami wykonanymi z żywicy drzew kaczukowych



1839

Goodyear - proces wulkanizacji - wydłuża żywotność elementów gumowych - stosowany do dzisiaj!



1907

Bakelit - pierwszy syntetyczny polimer
wysoka twardość i odporność na temperaturę



1917

Odkrycie chemicznej struktury celulozy - struktura łańcuchowa polimerów; zastosowanie rentgenowskich metod badań krystalograficznych



1500-
PRESENT

1920

Początek badań naukowych nad zagadnieniami polimeryzacji



1927

Masowa produkcja wyrobów z polichlorku winylu (PCV) - rury, butelki itd



1930

wynaleziono polistyren
(wideokasety) i styrofoam
- kubki, opakowania itd



1938

Dupont produkuje nylon -
odzież, liny itp. - nadal
stosowany



1941

Polietylen- wysokiej i
niskiej gęstości -
powszechnie stosowany



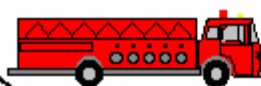
1970

Ekonol - moldable high
temperature polymer -
polimer ciekłokrystaliczny
- sprzęt komputerowy,
silniki lotnicze



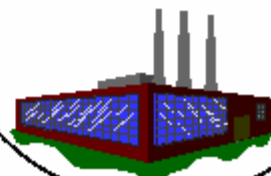
1971

keвлar - materiał wysoko
wyttrzymały do temp. 300
deg C.
Kamizelki kuloodporne,
kombinezony
ognioodporne itd.



1976

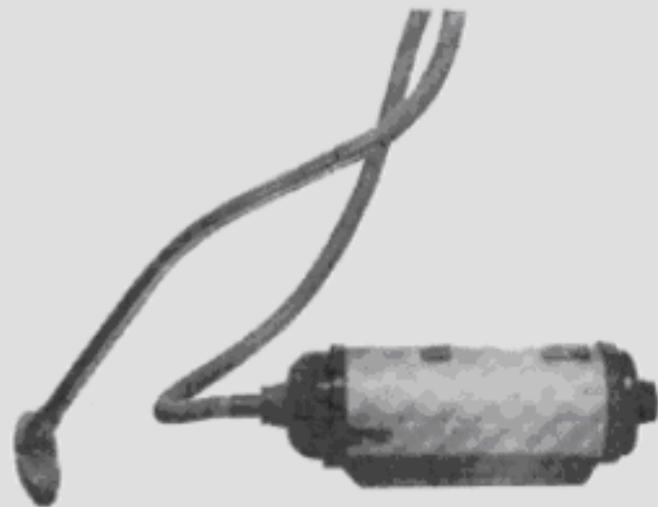
zużywany więcej polimerów
niż stopów metalicznych!



Historia odkurzacza



(a) 1905



(b) 1950



(c) 1985

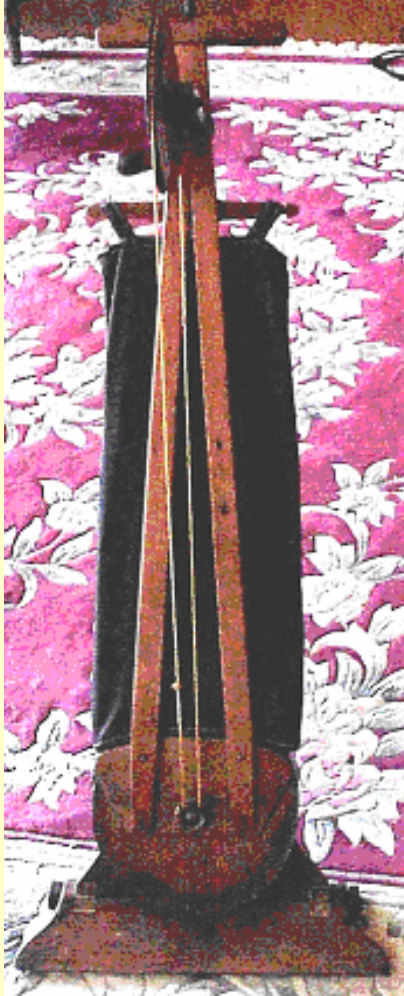


(d) 1997

Porównanie ceny, mocy i masy odkurzaczy

Rodzaj odkurzacza i data produkcji	Podstawowy materiał	Moc [W]	Masa [kg]	Cena*
Napęd ręczny, 1900	Drewno płótno, skóra	50	10	£240/\$380
Cylindryczny, 1950	Stal niskowęglowa	300	6	£96/\$150
Cylindryczny, 1985	Wyciskany ABS i polipropylen	800	4	£60/\$95
Dyson, 1995 (typu cyklon)	Polipropylen, poliwęglan, ABS	1200	6,6	£190/\$300

* ceny odniesione do roku 1995



Whirlwind, Chicago 1869 – ma większość elementów współczesnego odkurzacza z wyjątkiem napędu. Siła ssąca była realizowana za pomocą wentylatora z napędem pasowym i korbką n górze uchwytu

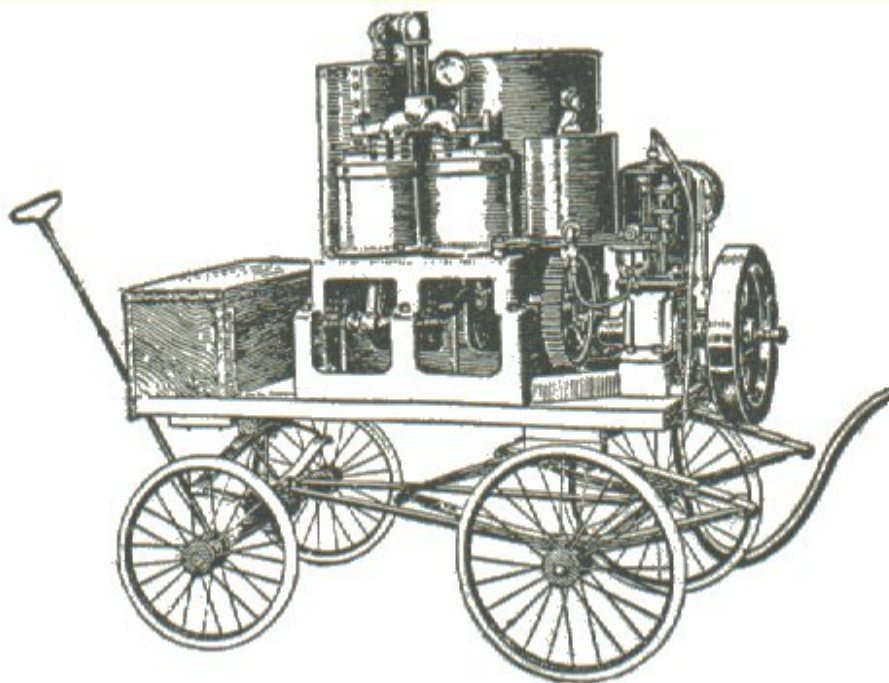
Hercules 1904

Regina, Model A, 1905



Hubert Cecil Booth **1901**

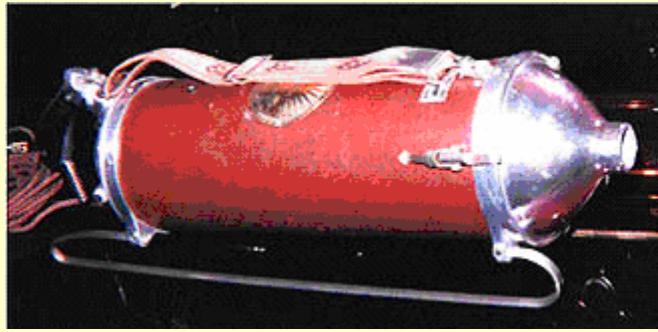
Składał się pompy tłokowej, bez szczotek, czyszczenie wykonywała rura ssąca z dyszą na końcu; napęd silnikiem spalinowym, później elektrycznym



Wersja amerykańska



**Hoover Model O
1907**



Electrolux Model V 1925

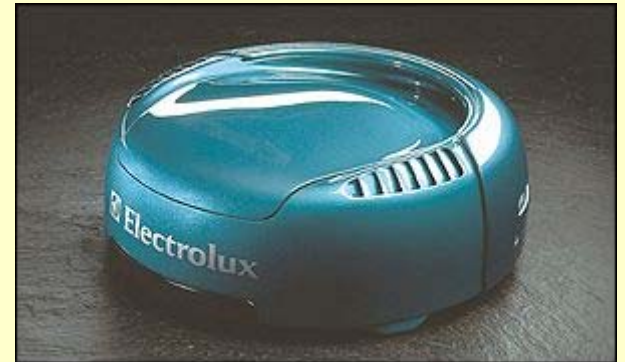


**Hoover Constellation model 822
1954**

poduszka powietrzna!



**The Root Cyclone
1980 (Dyson)**



Grupy materiałów

Grupa	Materiał
Metale i ich stopy	żeliwo i stale aluminium i jego stopy miedź i jej stopy nikiel i jego stopy tytan i jego stopy
Polimery	polietylen (PE) polimetakrylan metylu (PMMA, pleksiglas) nylon polistyren (PS) poliuretan (PU) polichlorek winylu (PVC) gumy
Ceramika i szkła *	tlenki glinu (Al_2O_3 , papier ścierny, szafir) tlenek magnezu – magnezja (MgO) dwutlenek krzemu – krzemionka (SiO_2): szkła i krzemiany węglik krzemu (SiC) azotek krzemu (Si_3N_4) cement i beton
Kompozyty	drewno polimery zbrojone włóknem szklanym (GFRP) ¹⁾ polimery zbrojone włóknem węglowym (CFRP) ²⁾ polimery z wypełniaczami cermetale

Właściwości materiałów inżynierskich uwzględniane w procesie projektowania i doboru materiałów

Rodzaj właściwości	Właściwość	Symbol	Jednostka
<i>Ogólne</i>	Cena (względna)	C_R	–
	Gęstość	ρ	$\text{Mg/m}^3 = \text{g/cm}^3$
<i>Mechaniczne</i>	Moduły sprężystości	E, G, K	GPa
	Naprężenie (granica plastyczności, wytrzymałość, naprężenie pękania)	σ_f	MPa
	Wiązkość (ang. <i>toughness</i>)	G_c	kJ/m^2
	Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń (odporność na kruche pęknięcie)	K_{Ic}	$\text{MN/m}^{3/2}$
	Współczynnik tłumienia drgań	η	–
	Współczynnik zmęczenia	f	–
	<i>Cieplne</i>	Przewodność cieplna	λ
Współczynnik wyrównania temperatury		a	m^2/s
Ciepło właściwe		c_p	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
Temperatura topnienia		T_m	K
Temperatura zeszklenia		T_g	K
Współczynnik rozszerzalności cieplnej liniowej		α	K^{-1}
Odporność na szoki cieplne		ΔT	K
Odporność na pełzanie		–	–
<i>Cierne</i>	Stała Archarda	K_A	MPa^{-1}
<i>Korozyjne/utleniające</i>	Szybkość korozji	–	–
	Stała parabolicznej szybkości utleniania	K_p	m^2/s

WASNOŚCI EKONOMICZNE

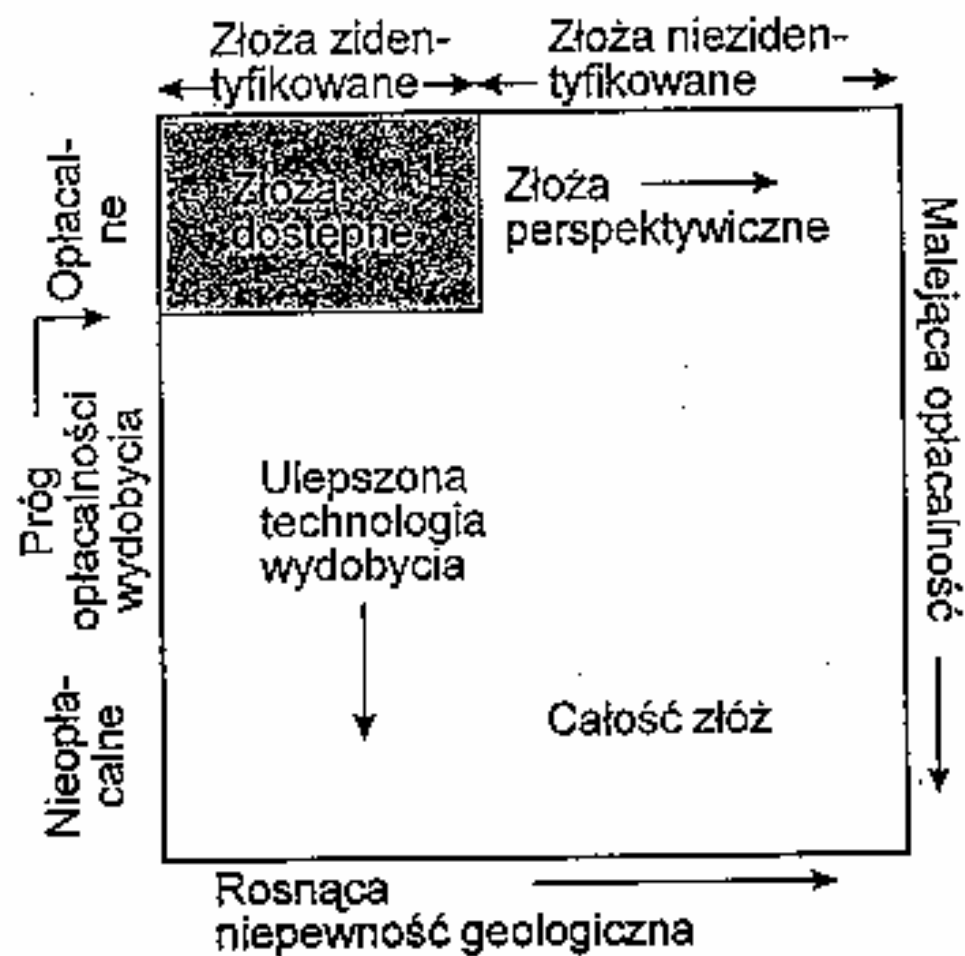
DOSTĘPNOŚĆ

- Ilość
- Lokalizacja
- Praco- i energochłonność pozyskiwania
- Próg opłacalności ekonomicznej

Udział masowy pierwiastków na Ziemi (w %)

Skorupa ziemna		Ocean		Atmosfera	
tlen	47	tlen	85	azot	79
krzem	27	wodór	10	tlen	19
aluminium	8	chlor	2	argon	2
żelazo	5	sód	1	dwutlenek	0,04
wapń	4	magnez	0,1	węgla	
sód	3	siarka	0,1		
potas	3	wapń	0,04		
magnez	2	potas	0,04		
tytan	0,4	brom	0,007		
wodór	0,1	węgiel	0,002		
fosfor	0,1				
mangan	0,1				
fluor	0,06				
bar	0,04				
stront	0,04				
siarka	0,03				
węgiel	0,02				

Całkowita masa skorupy ziemskiej do głębokości 1 km wynosi $3 \cdot 10^{21}$ kg, masa oceanów – 10^{20} kg, atmosfery – $5 \cdot 10^{18}$ kg.



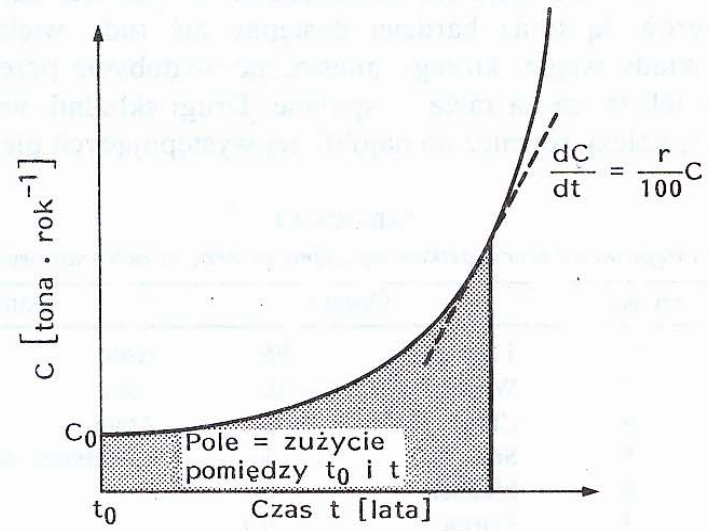
Rys. 2.13. Szacunek zasobów surowcowych (schemat według McElvey'a)

Wykładniczy wzrost i czas podwojenia zużycia

Jak odmierzyć czas możliwości korzystania z zasobów – np. rtęci? Jak dla większości materiałów, przyrost szybkości zużycia rtęci rośnie z czasem wykładniczo (rys. 2.1). Jeśli bieżącą szybkość zużycia mierzona w tonach na rok oznaczymy przez C , to wzrost wykładniczy oznacza, że

$$\frac{dC}{dt} = \left(\frac{r}{100}\right)C \quad (2.1)$$

gdzie r – przyrost procentowy w roku.



Rys. 2.1. Wykładniczy wzrost zużycia materiałów

Po scałkowaniu

$$C = C_0 \exp \frac{r(t-t_0)}{100} \quad (2.2)$$

gdzie C_0 – szybkość zużycia dla $t = t_0$.

Czas podwojenia szybkości zużycia t_D otrzymamy, przyjmując $C/C_0 = 2$

$$t_D = \frac{100}{r} \ln 2 \approx \frac{70}{r} \quad (2.3)$$

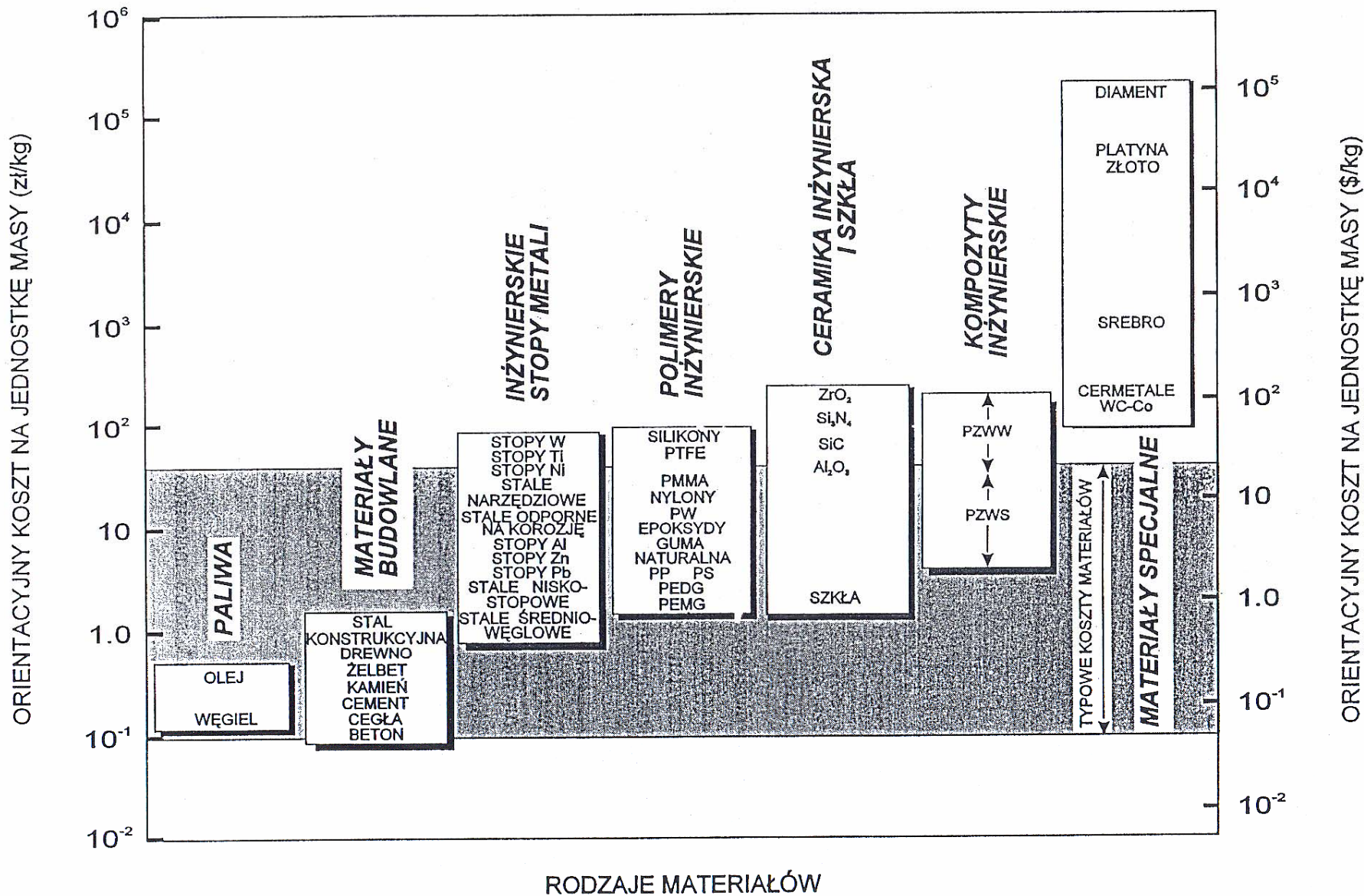
Wzrost zużycia

- Stal o 3,5% rocznie – podwaja się co 20 lat
- Aluminium o 8% rocznie - podwaja się co 9 lat
- Polimery o ok.. 20% rocznie - podwaja się co ~4 lata

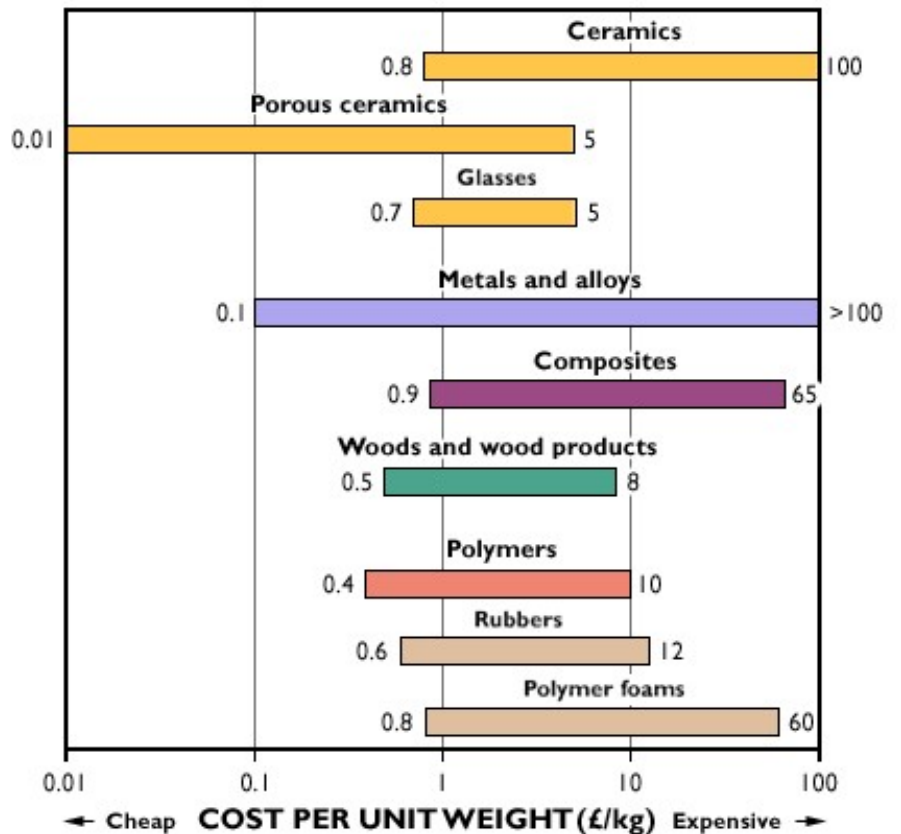
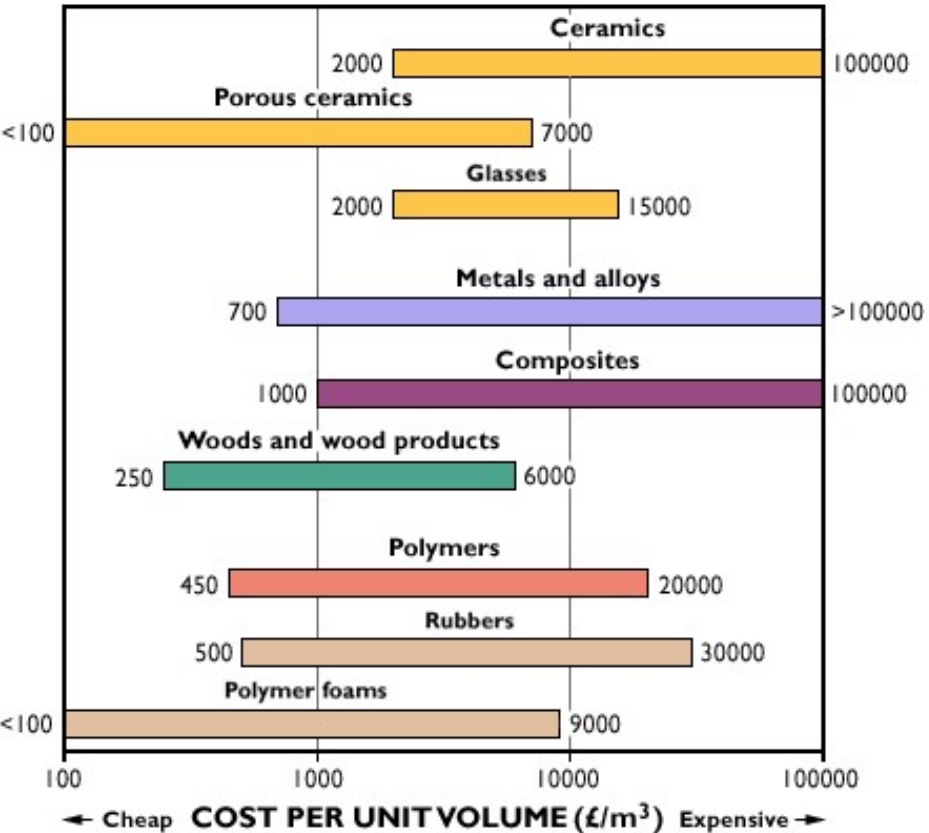
Okres połowicznego wyczerpania zasobów

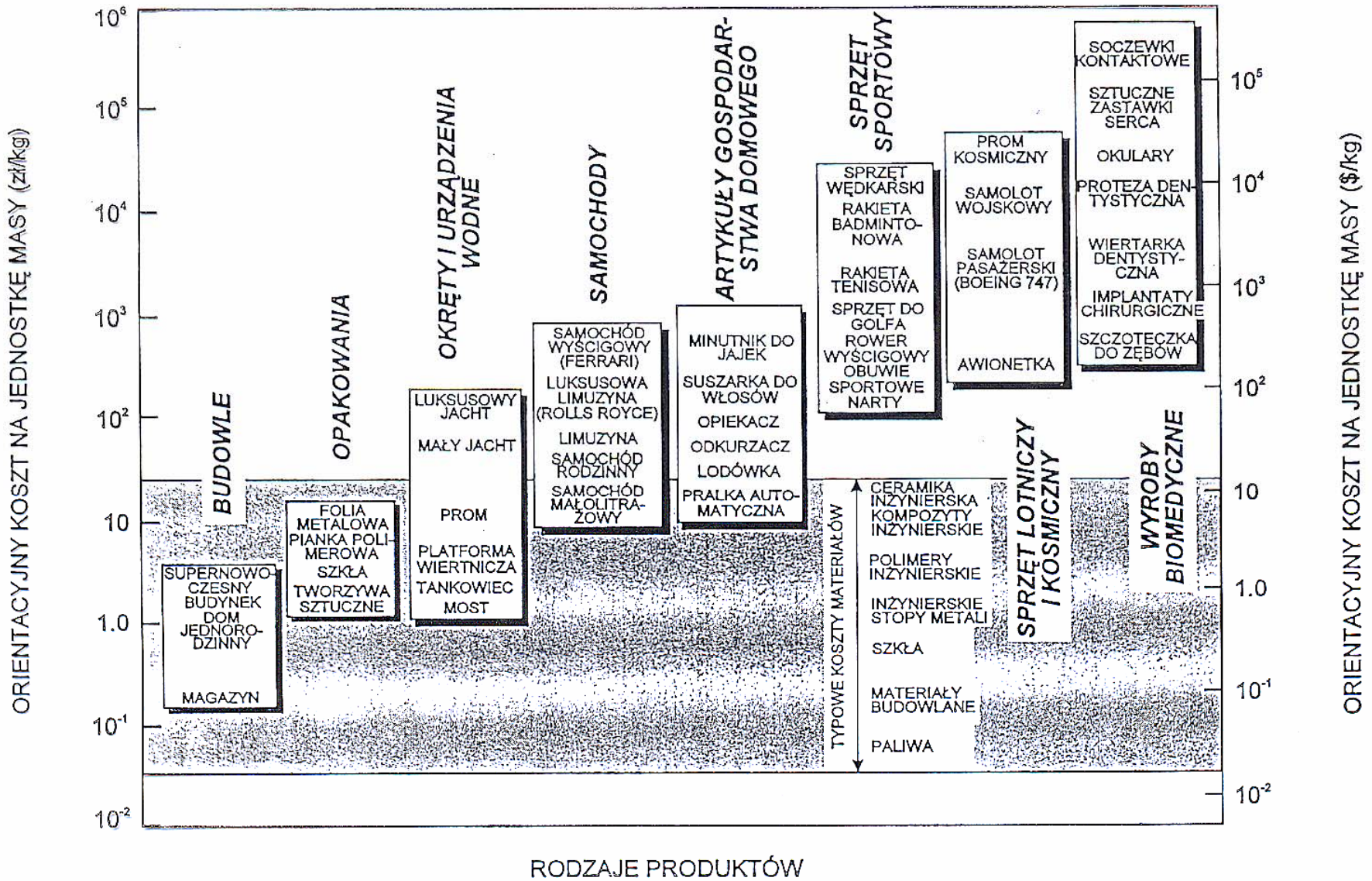
- Gaz ziemny i ropa naftowa – 25 lat
- Srebro, cyna, wolfram, cynk, ołów, rtęć - 50÷80 lat
- Aluminium, żelazo, krzemiany – kilkaset lat

Cena



Orientacyjne koszty różnych grup materiałów odniesione do 1 kg materiału (opracowano według danych M.F. Ashby'ego)





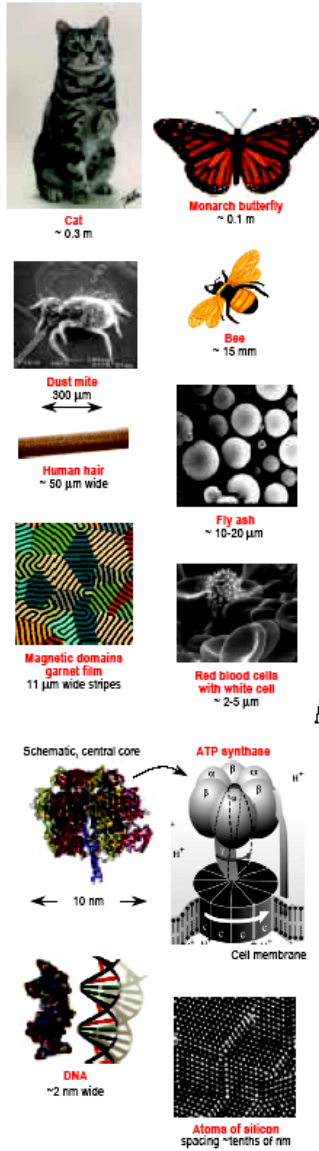
Orientacyjne koszty różnych grup produktów odniesione do 1 kg (opracowano według danych M.F. Ashby'ego)

Zastosowanie	Materiał	Cena za tonę [\$]
Konstrukcje duże i proste	Drewno, beton, stal konstrukcyjna	60÷550
Konstrukcje średnie i małe	Metale, stopy i polimery (samoloty, samochody przyrządy itp.)	550÷5 500
Łopatkı turbin	Stopy, materiały specjalne, nowoczesne kompozyty (CFRP, BFRP) itp.	5 500÷200 000
Łożyska, styki elektryczne, ścieżki w mikroukładach	Szafir, srebro, złoto	200 000÷2 mln
Narzędzia tnące i polerujące	Diamenty przemysłowe	~ 900 mln

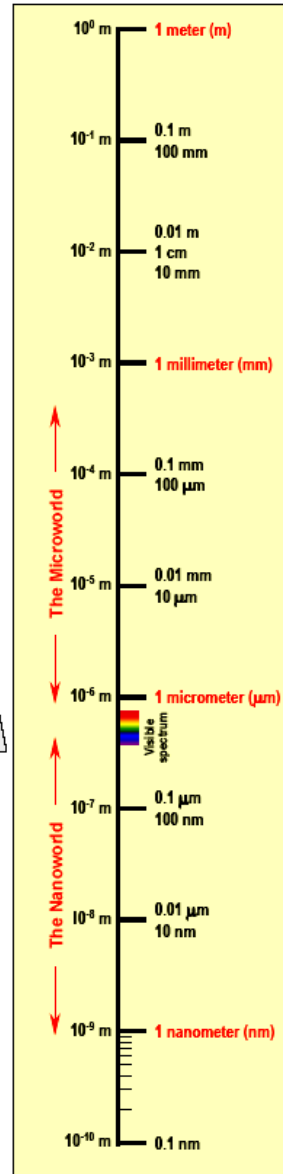
WAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW

THE SCALE OF THINGS

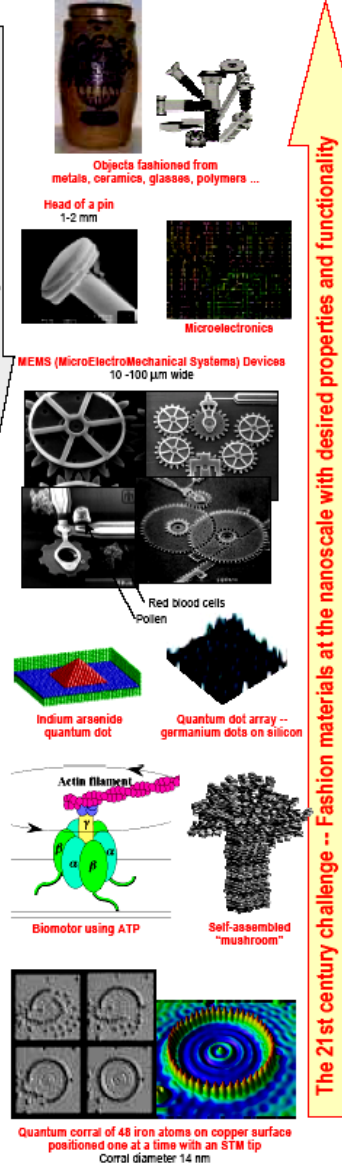
Things Natural



Progress in atomic-level understanding



Things Manmade



Progress in miniaturization

The 21st century challenge -- Fashion materials at the nanoscale with desired properties and functionality

meter	m	10 ⁰	1 m
centimeter	cm	10 ⁻²	0.01 m
millimeter	mm	10 ⁻³	0.001 m
micrometer	μ m	10 ⁻⁶	0.000001 m
nanometer	nm	10 ⁻⁹	0.000000001 m

Chart from http://www.sc.doe.gov/production/bes/scale_of_things.html

Gęstość materiałów

PRZYKŁADY STRUKTUR KRystalicznych

lata 90: ponad 200.000 struktur krystalicznych zapisanych w bazach danych

Struktury gęsto upakowane

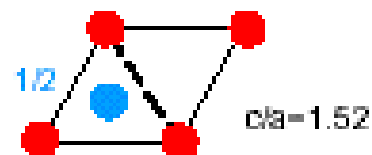
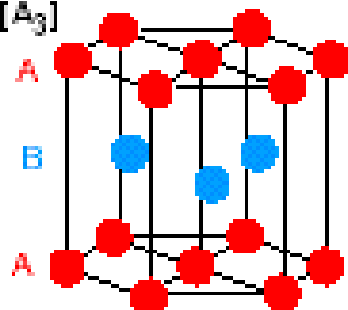
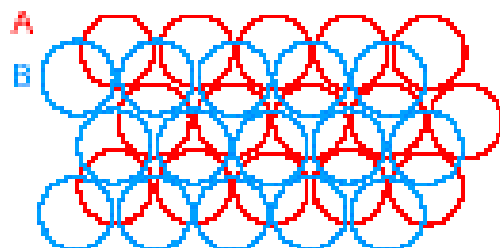


Goldschmidt (1926): atomy upakowane jak sztywne sfery

rozwiązaniem problemu Keplera (1611) upakowanie kul armatnich - dowód T.C. Hales (19987)

74% przestrzeni zajętej przez atomy, liczba koordynacyjna = 12

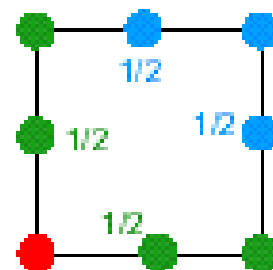
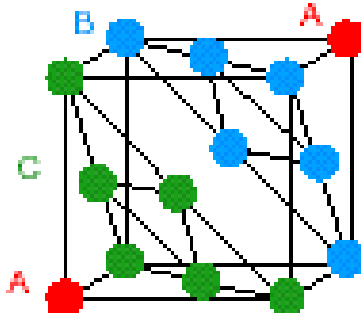
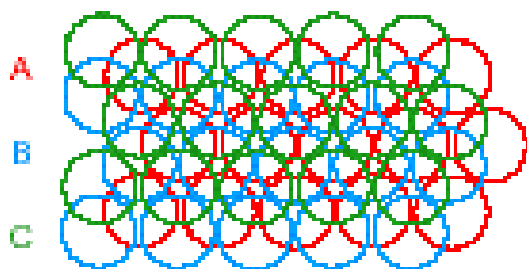
...**ABAB**...: Hexagonal Close-Packing (HCP) [A_3]



(dla metali o większej l. elektronów: Mg, Sc, Ti, Co, Zn, Gd-Tm)

ulożenie h: identyczne warstwy sąsiednie danej warstwy (B)

...**ABCABC**...: Cubic Close-Packing (CCP) = face centred cubic [A_1]



(dla metali o większej l. elektronów: Ca, Ni, Cu, Zn, Ag, Au)

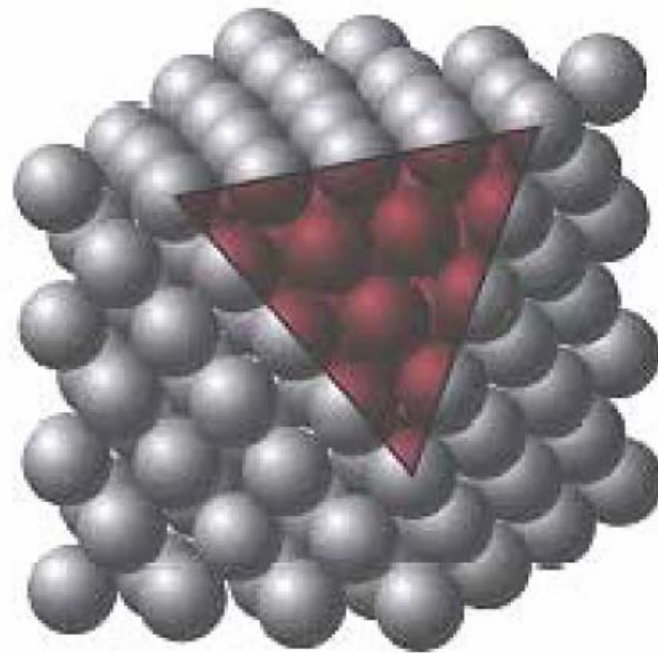
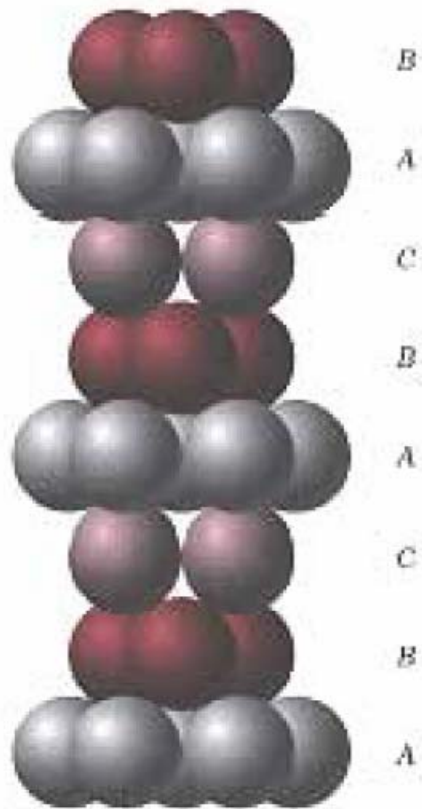
ulożenie c: różne warstwy sąsiednie danej warstwy (B)

Struktury mieszane HCP-CCP: np. ułożenie hc w La,Pr; ułożenie chh w Sm.

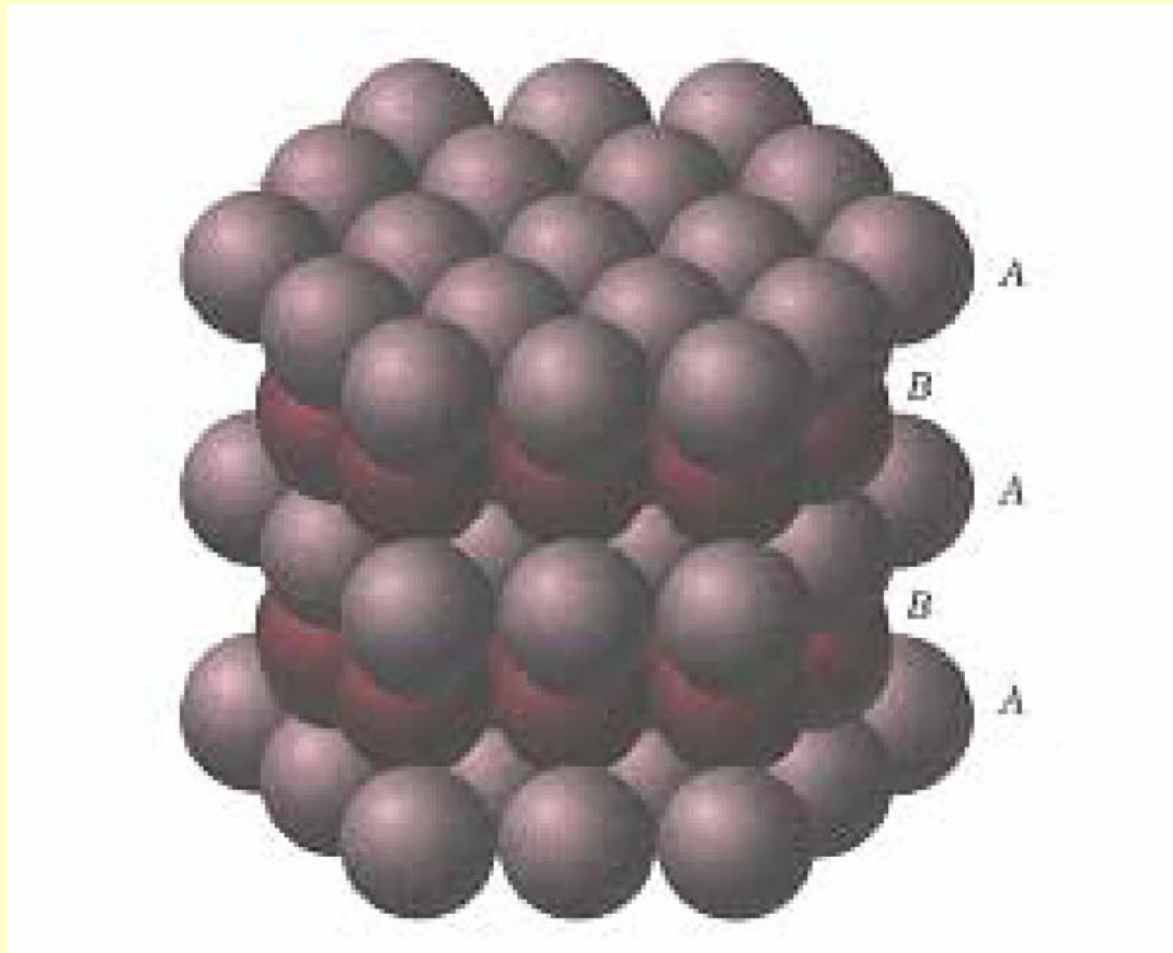
Struktura body centred cubic [A_2] daje 68% przestrzeni zajętej przez atomy, l. koordynacyjna = 8

(dla metali o małej l. elektronów: Li, Na, K, Rb, Cs, Fe)

Rodzaje upakowania



Sieć FCC (A1)



Sieć heksagonalna (A3)

Gęstość materiału

gęstość materiału krystalicznego =

= gęstość komórki elementarnej=

= (ilość atomów w komórce elementarnej, n) · (masa atomu, M) /
(objętość komórki V_c)

$n = 2$ (BCC); 4 (FCC); 6 (HCP)

$M = A / N_A$

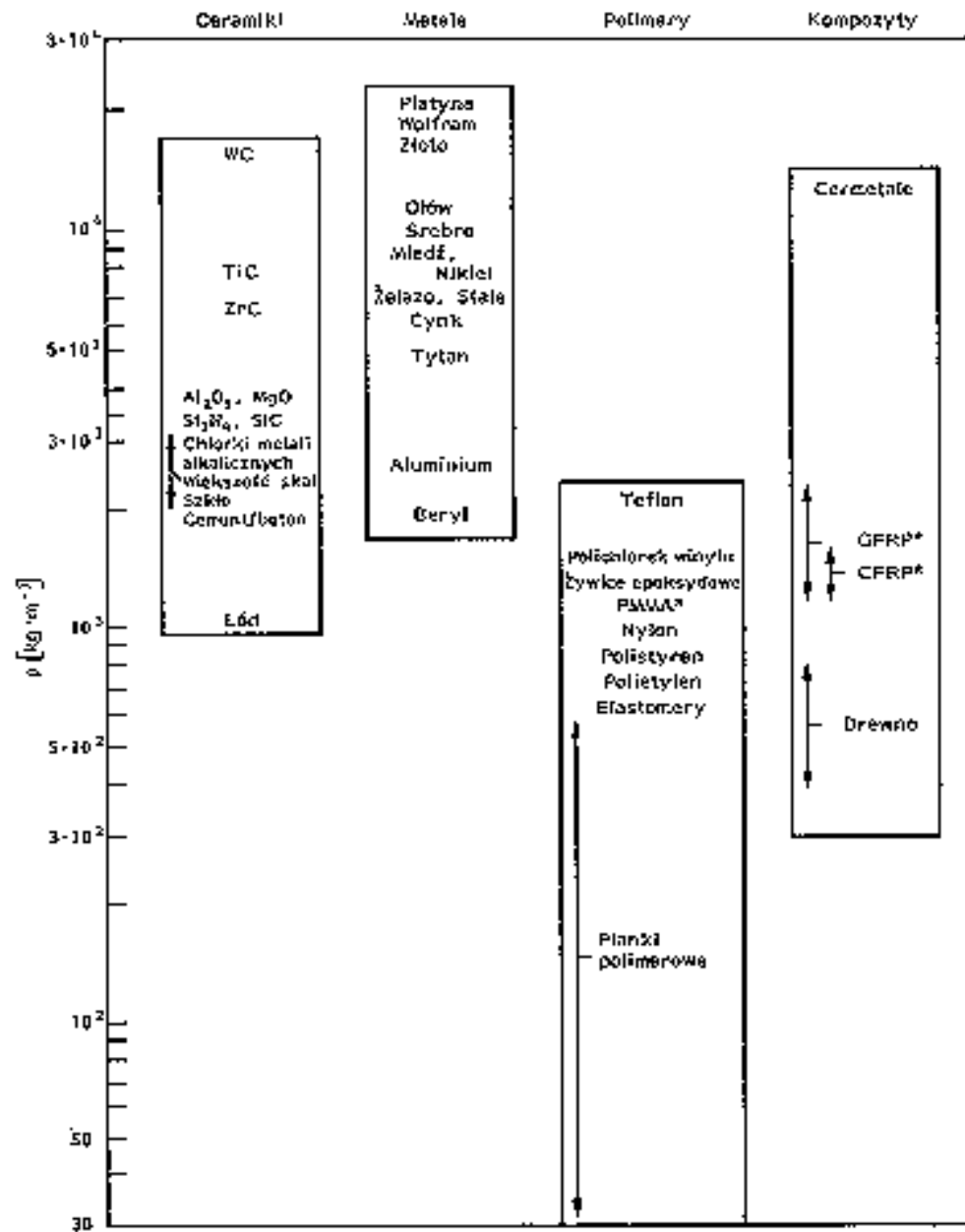
$N_A = 6.023 \times 10^{23}$ atomów/mol

$V_c = a^3$ (FCC i BCC)

$a = 2R\sqrt{2}$ (FCC); $a = 4R/\sqrt{3}$ (BCC)

R promień atomu

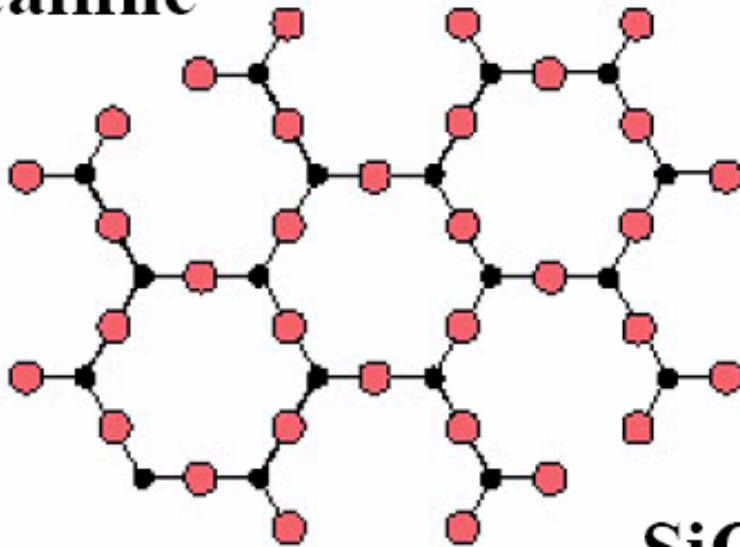
$$\rho = \frac{nA}{V_c N_A}$$



Rys. 5.12. Wykres słupkowy gęstości ciał ρ

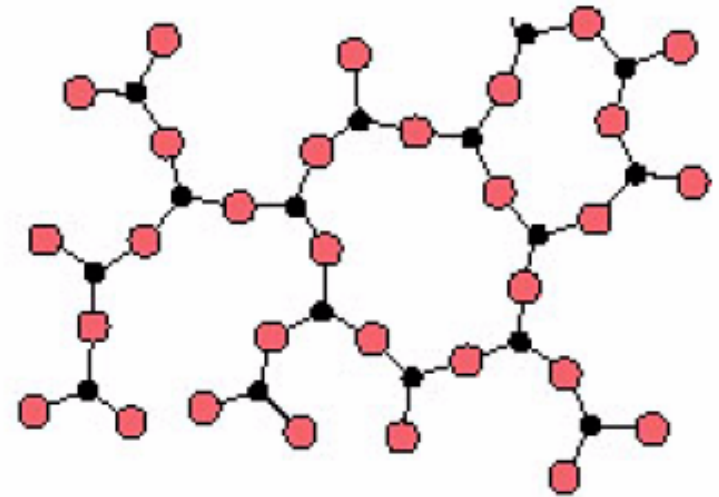
Ułożenie atomów w kryształach

Crystalline



(a)

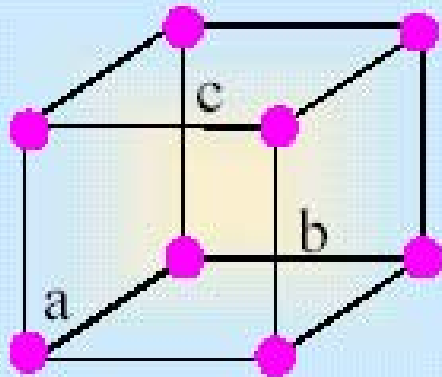
Amorphous



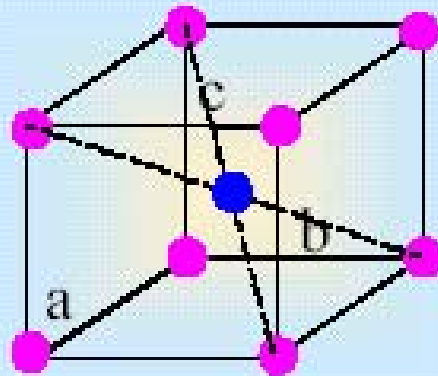
(b)

RODZAJE SIECI BRAVAIS'A

1. SIEĆ REGULARNA: $a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

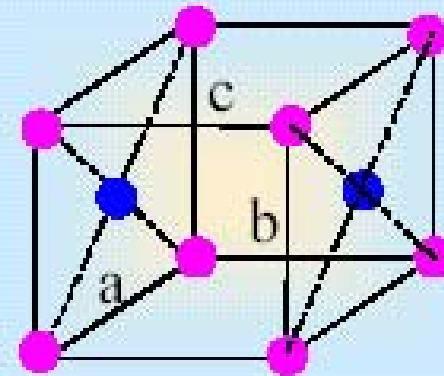


Prosta
(prymitywna)



Centrowana
przestrzennie

A2

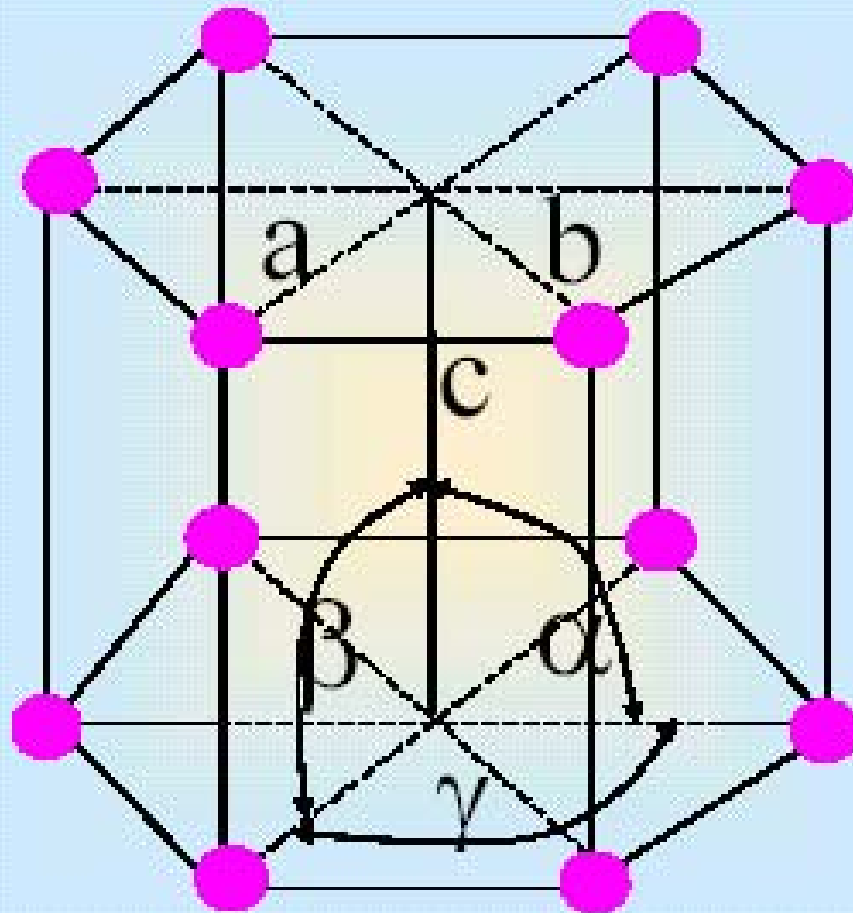


Centrowana
powierzchniowo

A1

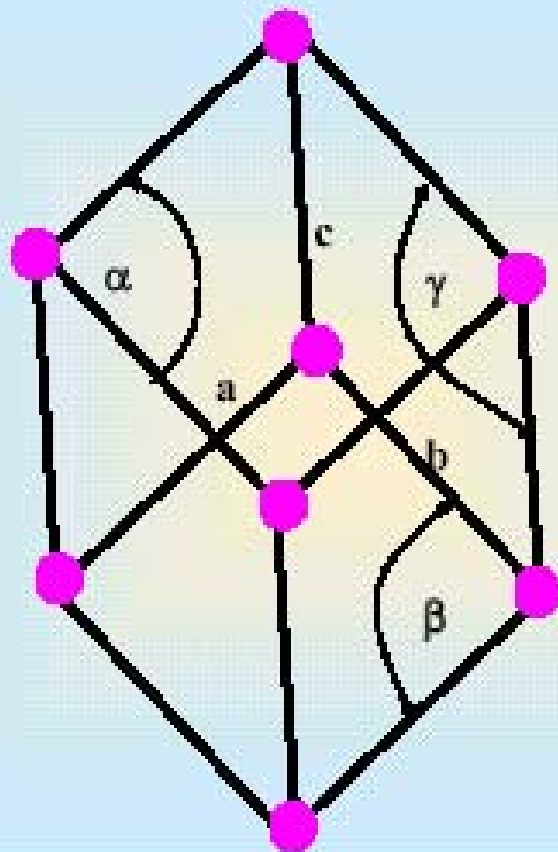
2. SIEĆ HEKSAGONALNA:

$$a = b = c; \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$$



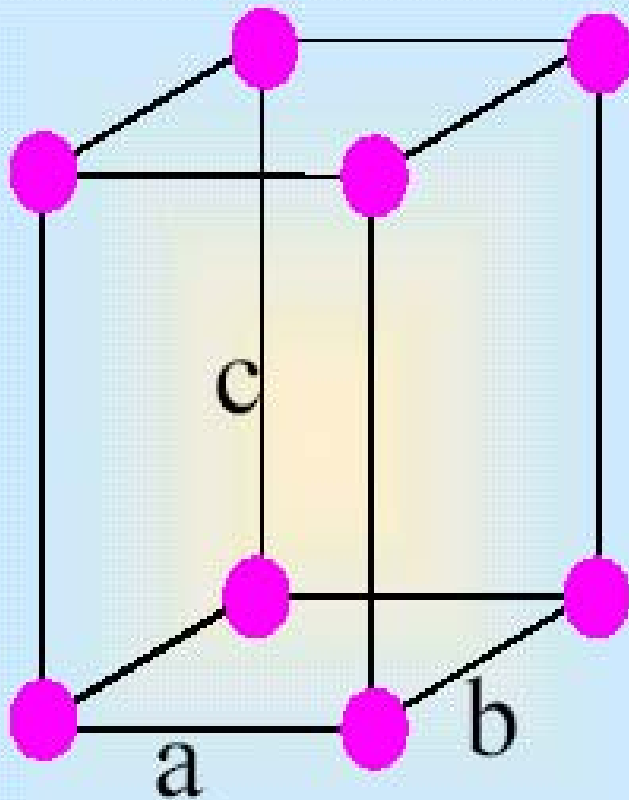
3. SIEĆ TRYGONALNA:

$$a = b = c; \quad \alpha = \beta = \gamma < 120 \neq 90$$

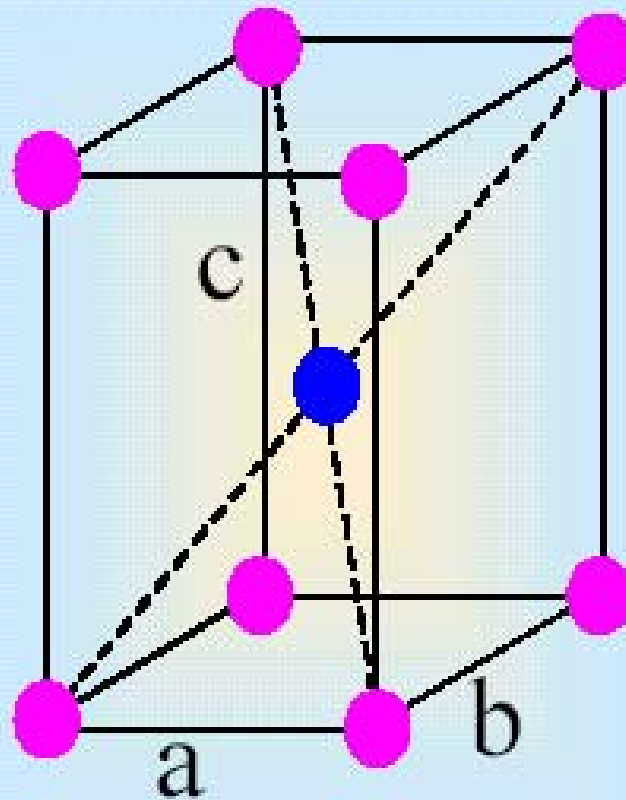


4. SIEĆ TETRAGONALNA:

$$a = b \neq c; \quad \alpha = \beta = \gamma = 90$$



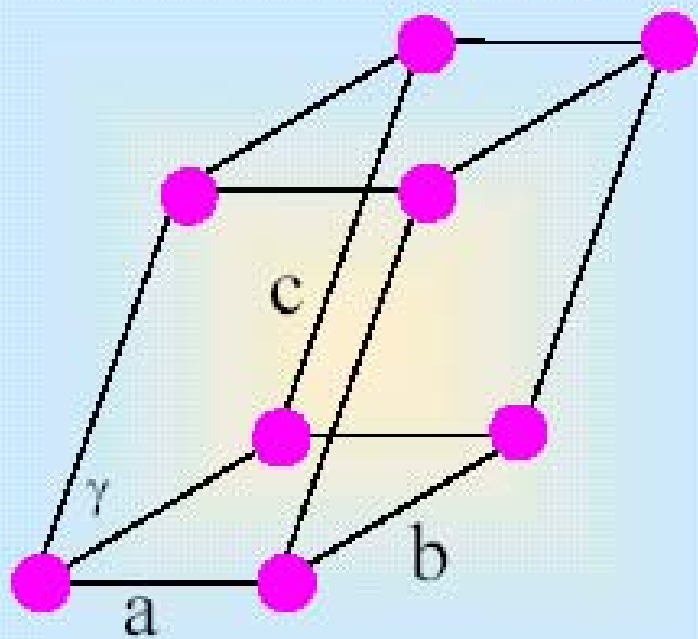
Prosta



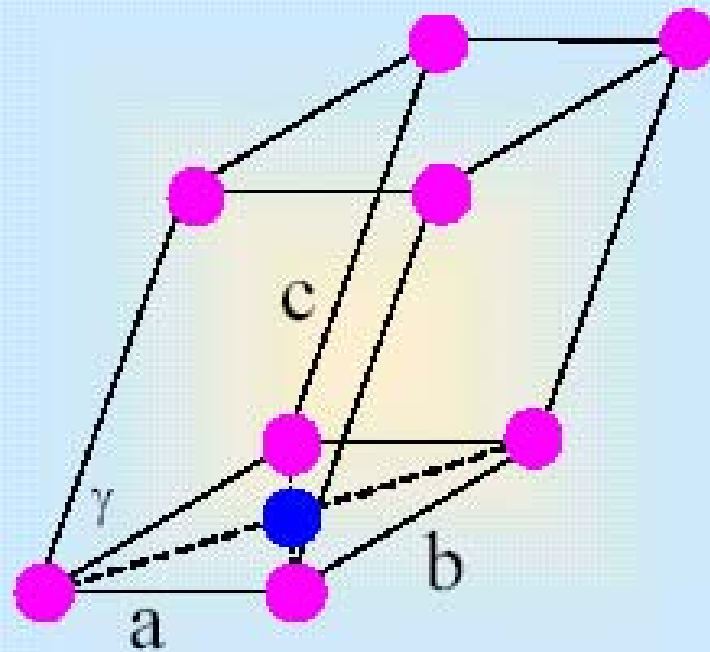
Centrowana przestrzennie

5. SIEĆ JEDNOSKOŚNA:

$$a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90 \neq \beta$$



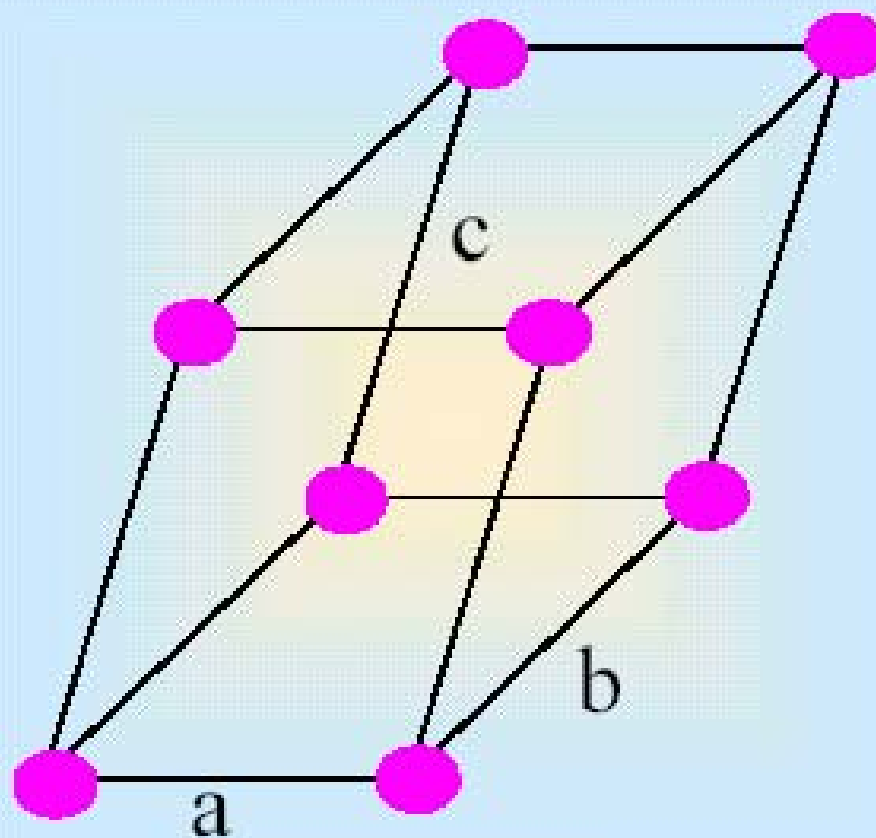
Prosta



Centrowana u podstawy

6. SIEĆ TRÓJSKOŚNA:

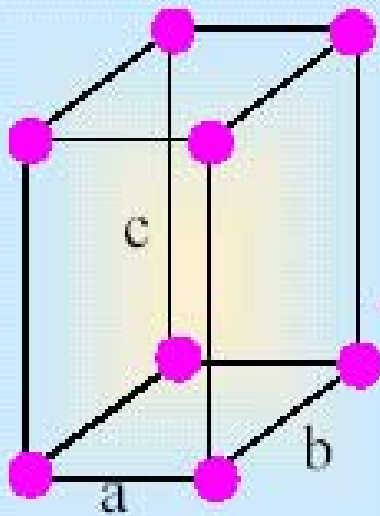
$$a \neq b \neq c; \quad \alpha \neq \beta \neq \gamma$$



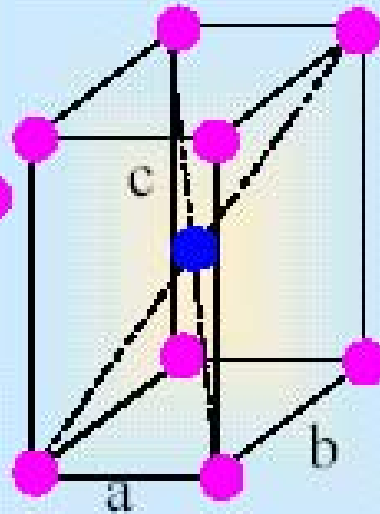
Prosta

7. SIEĆ ROMBOWA:

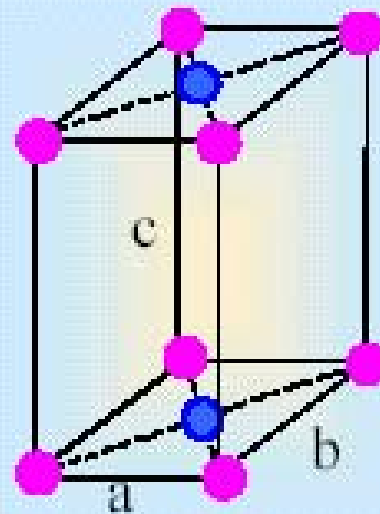
$$a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma$$



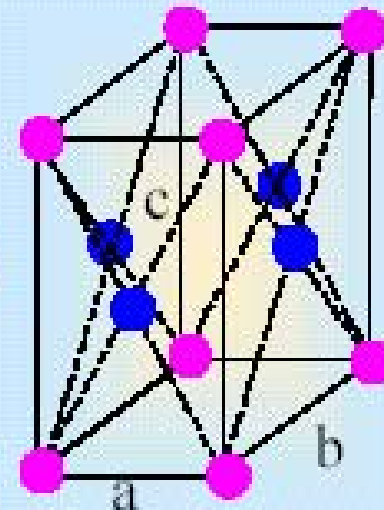
Prosta



Centrowana
przestrzennie

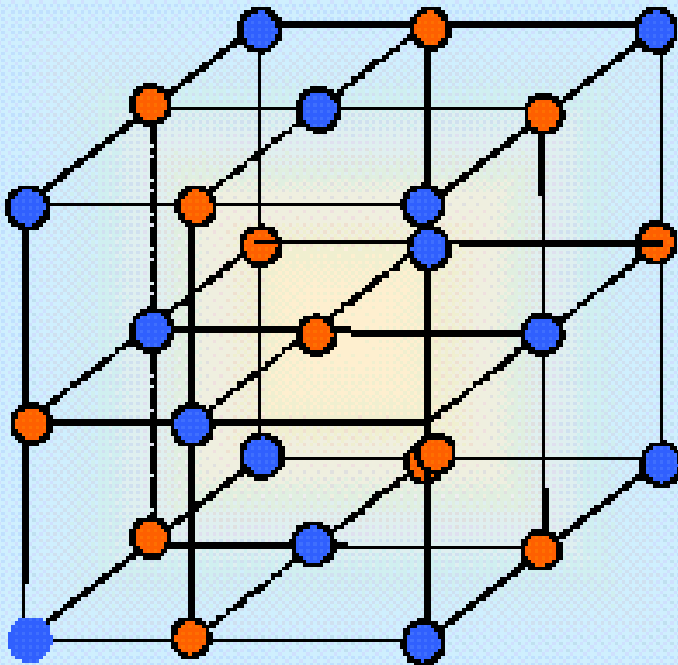


Centrowana
u podstawy

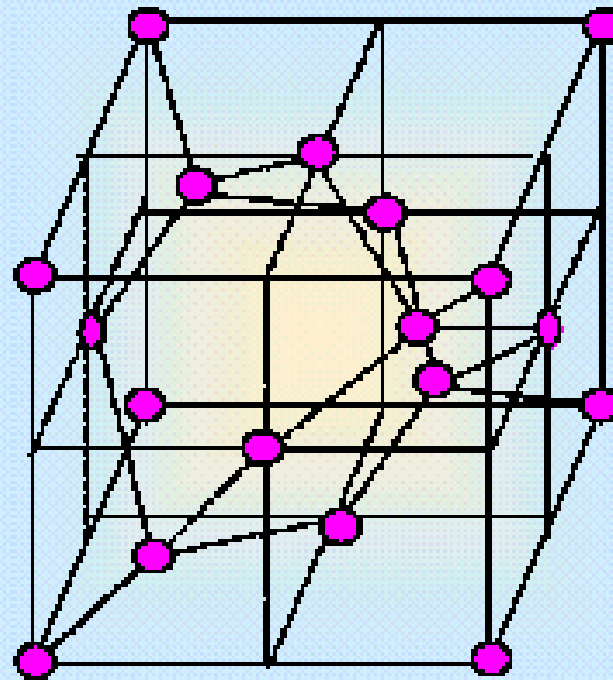


Centrowana
powierzchniowo

Przykłady typowych struktur



Struktura chlorku
sodu



Struktura diamentu

Wybrane przykłady struktur

Struktura regularna centrowana powierzchniowo		Struktura regularna Centrowana przestrzennie		Struktura NaCl		Struktura diamentu	
Kryształ	Stała sieci a: 10^{-10}m	Kryształ	Stała sieci a: 10^{-10}m	Kryształ	Stała sieci a: 10^{-10}m	Kryształ	Stała sieci a: 10^{-10}m
Ag	4.08	Cr	2.88	AgBr	5.77	C	3.56
Al	4.04	Cs	6.05	KCl	6.29	Ge	5.65
Cu	3.61	K	5.33	MgO	4.20	Si	5.43
Ni	3.52	Li	3.50	MnO	4.43	Sn	6.46
Pt	3.91	W	3.16	NaCl	5.64		

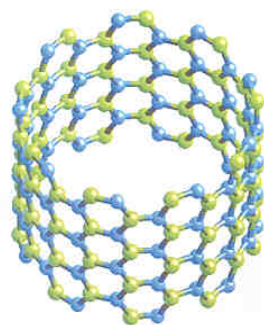


Fig. 1(a)

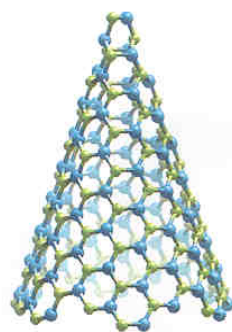


Fig. 3(a)

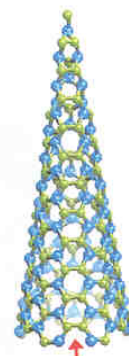


Fig. 3(b)



Fig. 5(a)

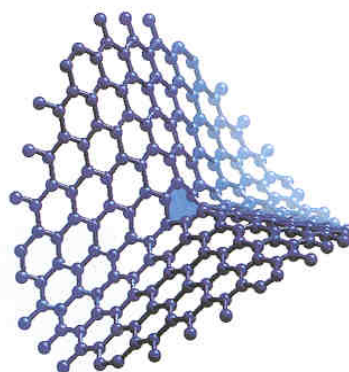


Fig. 4



Fig. 5(b)

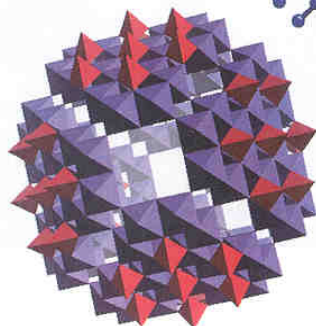


Fig. 6(b)

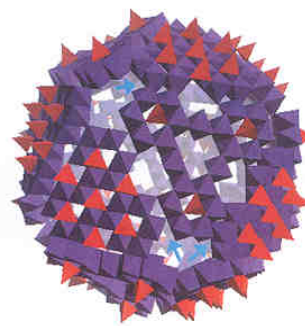


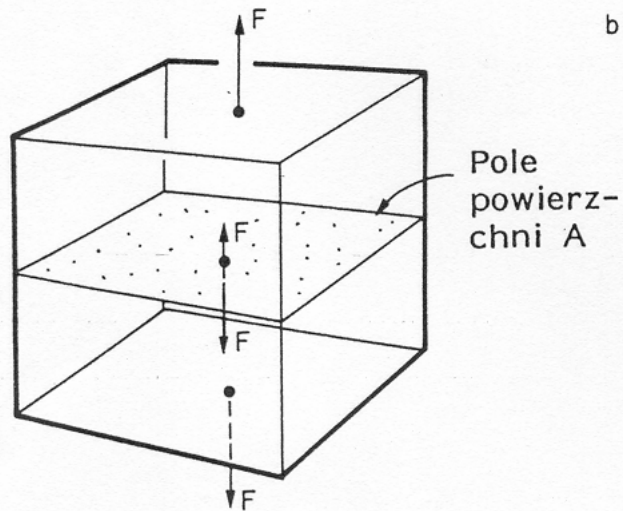
Fig. 6(c)

Plate 2. Molecular structures simulated by L. BOURGEOIS *et al.* Fig. 1(a): A boron nitride nanotube. Figs. 3(a) and 3(b): Two boron nitride seamless cones. Fig. 5(a): An octahedral shell of BN with a square at each of its six vertices. Fig. 4: A saddle-shaped surface for carbon. Fig. 5(b): C_{60} with its characteristic twelve pentagonal rings and icosahedral symmetry. Fig. 6(b): Octahedral model for allophane. Fig. 6(c): Pseudo-icosahedral model. For precise see the paper by BOURGEOIS *et al.* (p. 295).

Sztywność materiałów

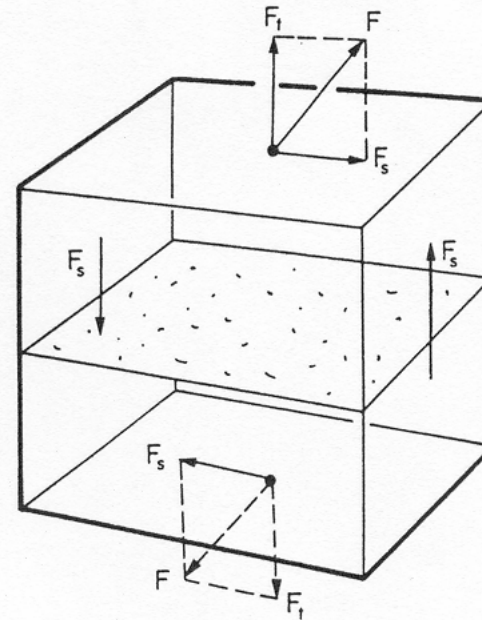
Naprężenia

a.)



Naprężenie normalne $\sigma = \frac{F}{A}$
(rozciągające)

b.)

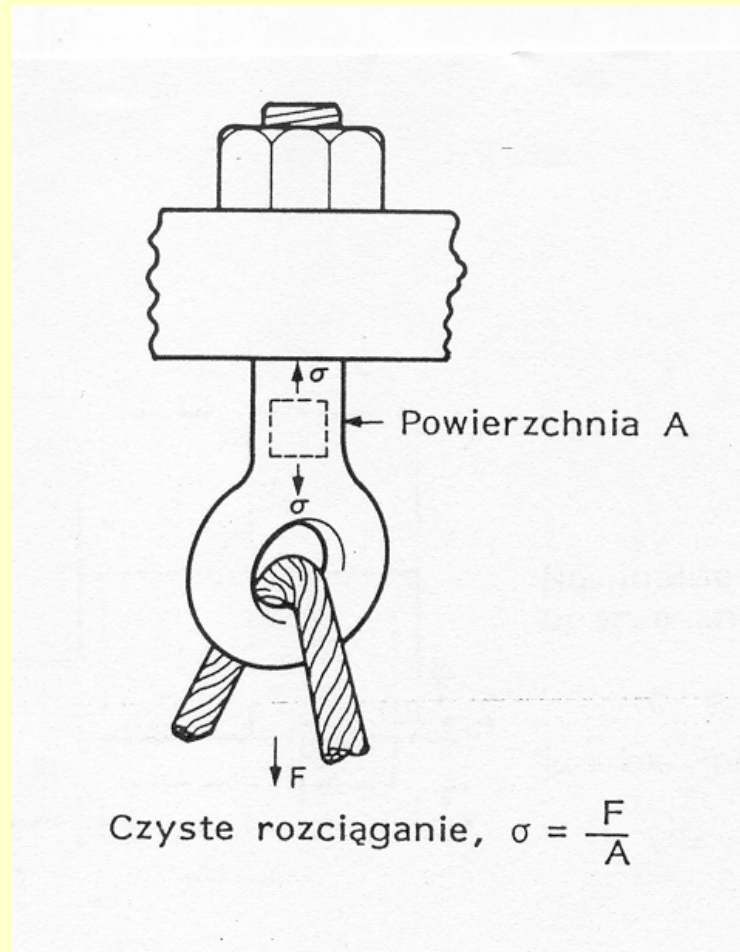


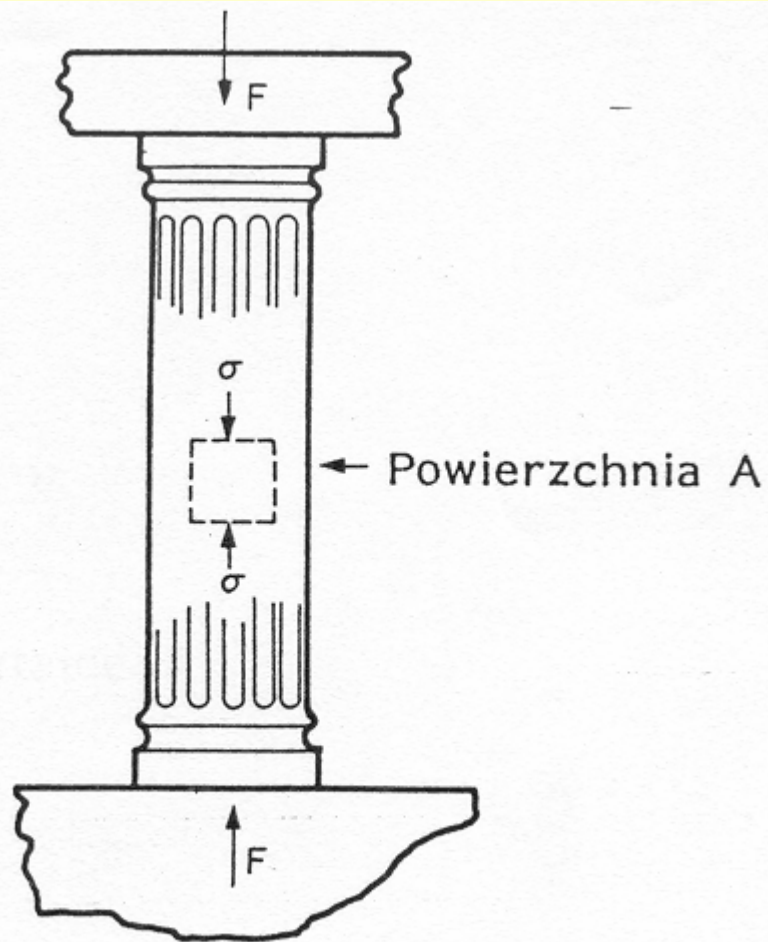
Naprężenie styczne $\tau = \frac{F_s}{A}$
(ścinające)

Naprężenie normalne $\sigma = \frac{F_t}{A}$
(rozciągające)

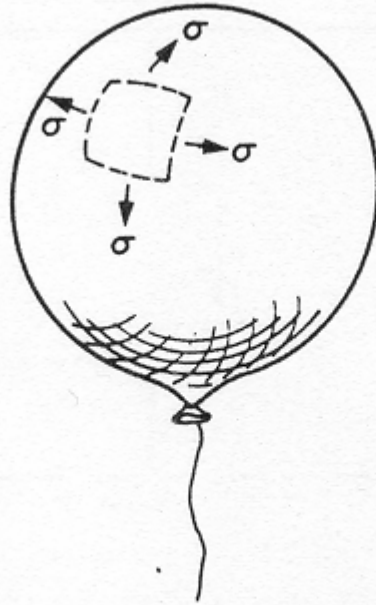
Zrównoważenie naprężeń
stycznych (w stanie równowagi)

Typowe stany naprężeń

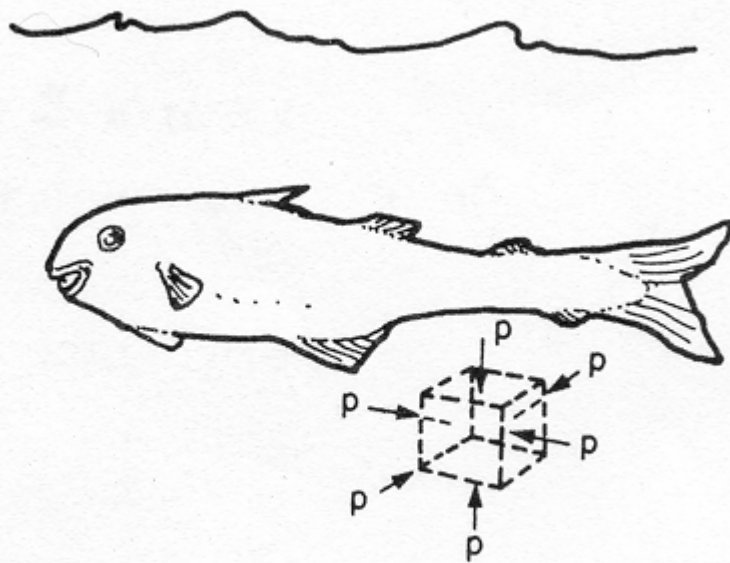




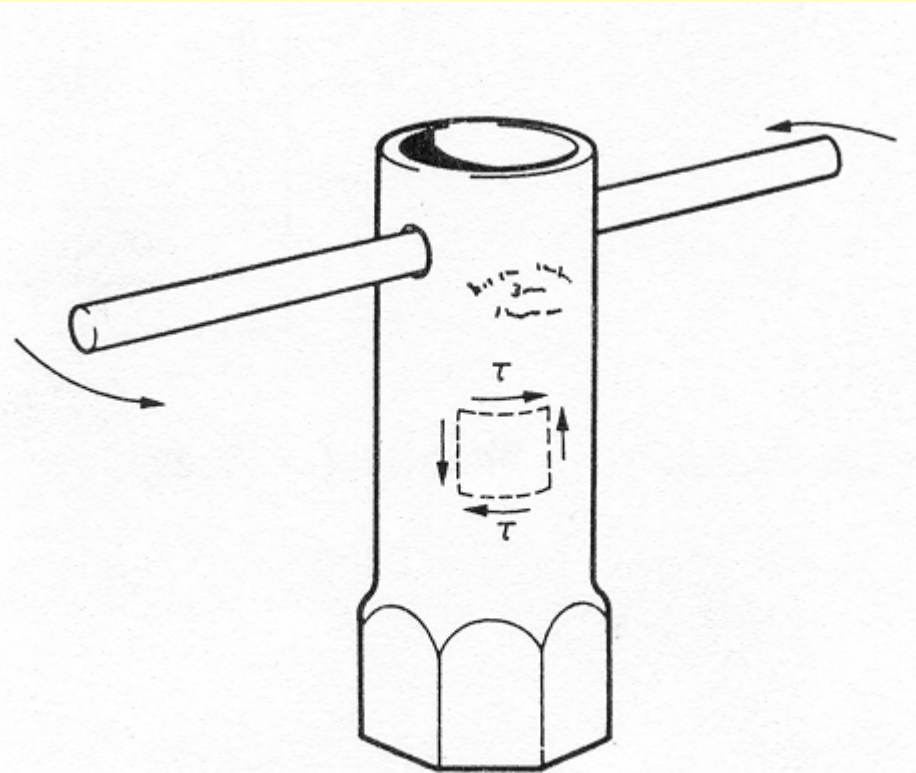
Czyste ściskanie, $\sigma = \frac{F}{A}$



Dwuosiowe rozciąganie, $\sigma = \frac{F}{A}$

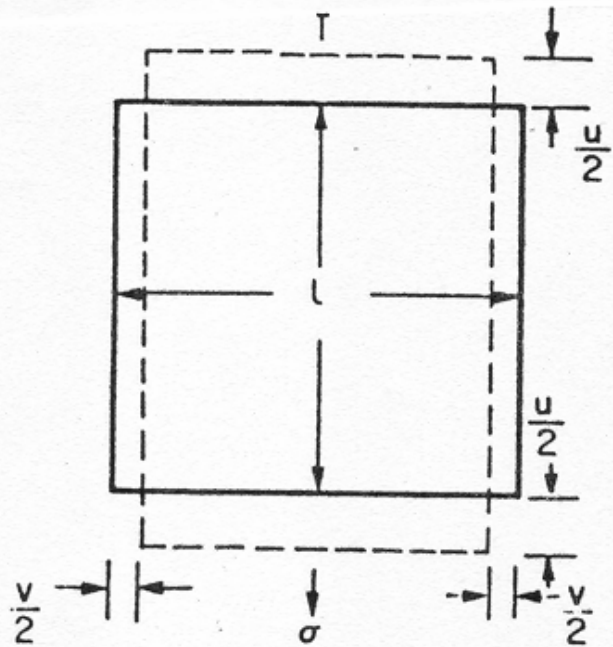


Ciśnienie hydrostatyczne, $p = - \frac{F}{A}$



Czyste ścinanie, $\tau = \frac{F_s}{A}$

Odształcenia



Nominalne odkształcenie wzdłużne przy rozciąganiu

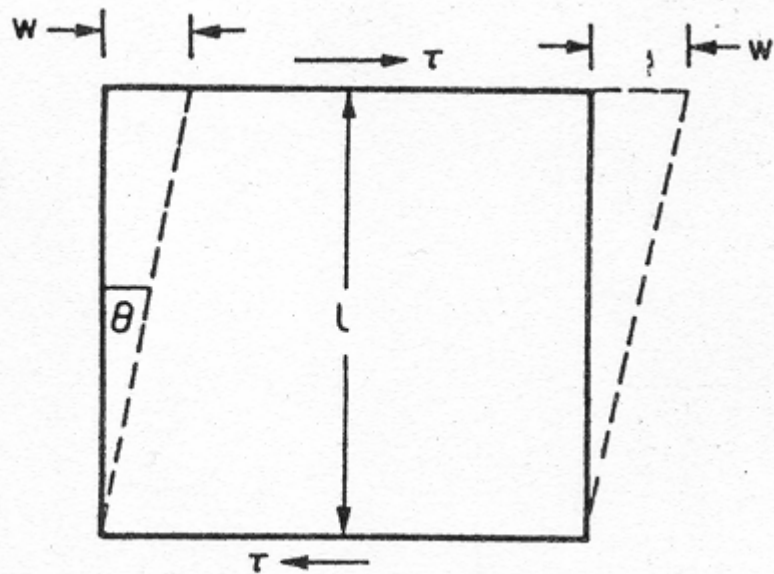
$$\epsilon_n = \frac{u}{l}$$

Nominalne odkształcenie poprzeczne

$$\epsilon_n = -\frac{v}{h}$$

Liczba Poissona

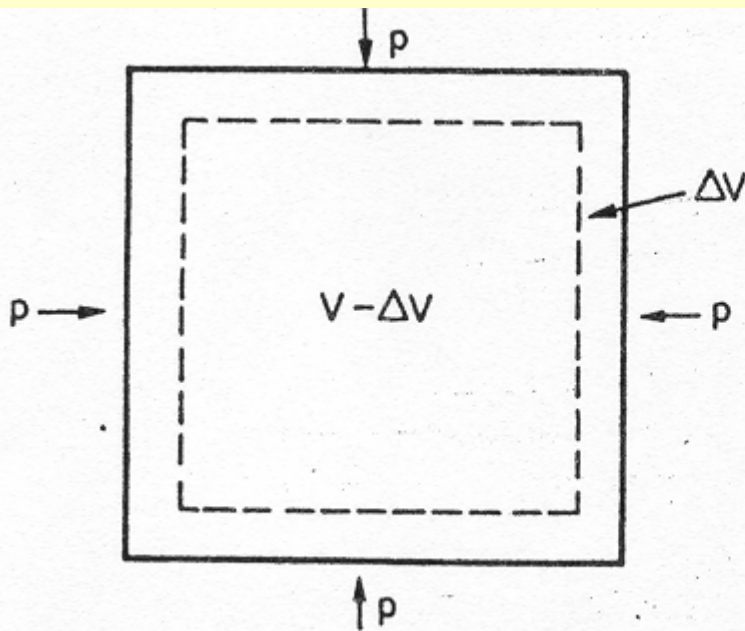
$$\nu = -\frac{\text{odkształcenie poprzeczne}}{\text{odkształcenie wzdłużne}}$$



Rzeczywiste odkształcenie ścinania

$$\gamma = \frac{w}{l} = \text{tg } \theta$$

$\gamma \approx \theta$ dla małych odkształceń



Odkształcenie objętościowe

$$\Delta = \frac{\Delta V}{V}$$

Prawo Hook'a

$$\sigma = E \varepsilon_n$$

E - moduł Younga

$$\tau = G \gamma$$

G - moduł ścinania

$$p = -K \Delta$$

K - moduł ścisłości

Dla metali

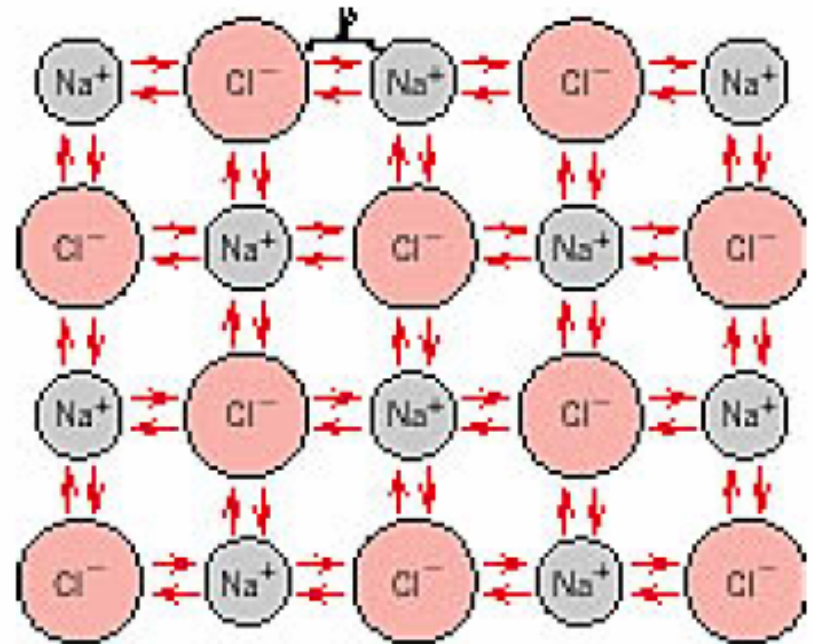
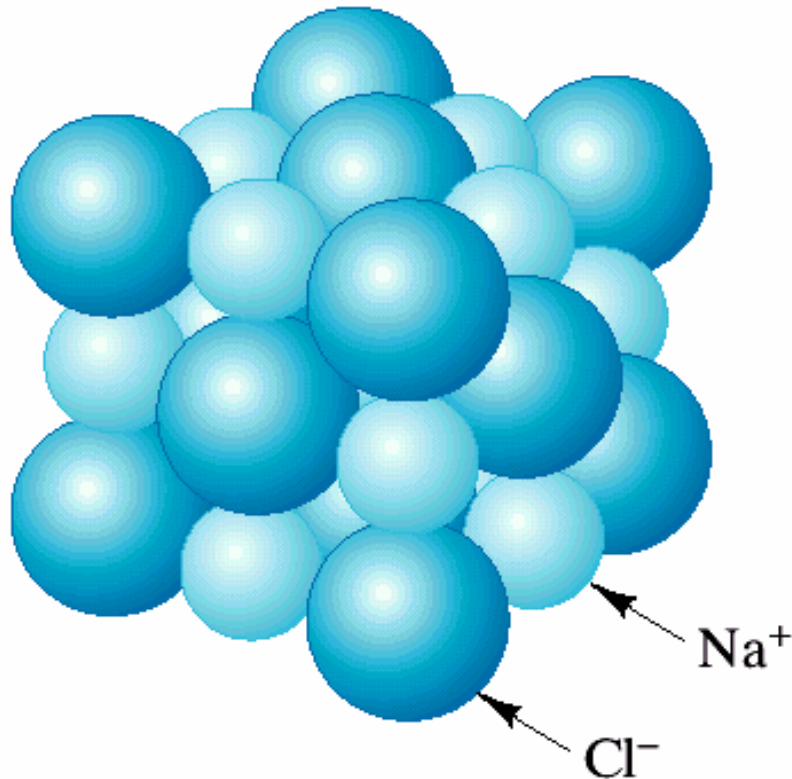
$$K \approx E, \quad G \approx 3/8 E, \quad \nu \approx 0,331$$

RODZAJE WIAZAŃ W KRYSZTAŁACH:

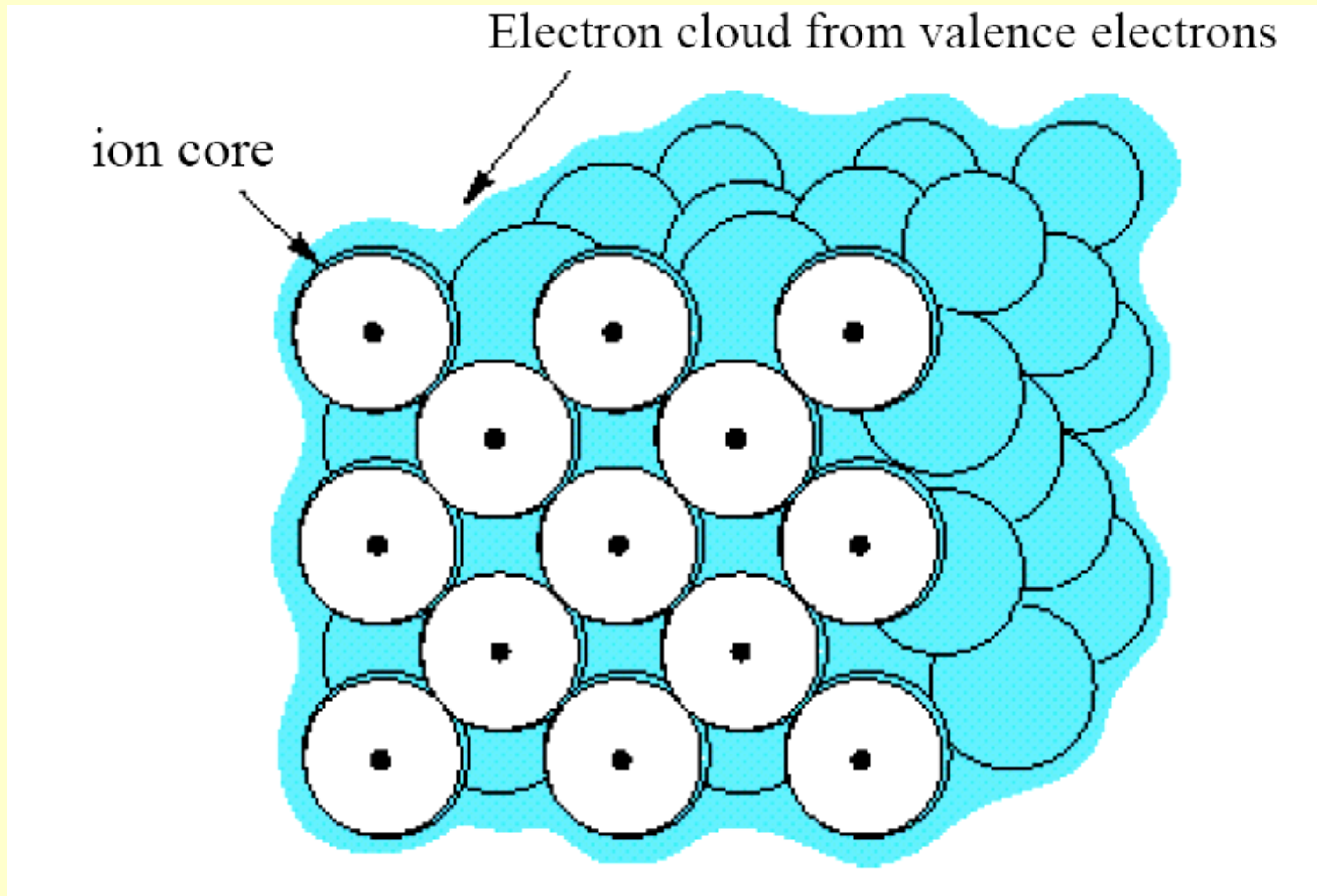
- Wiązania jonowe**
- Wiązania kowalentne**
- Wiązania metaliczne**
- Wiązania molekularne**

Wiązania jonowe

(bardzo silne, niekierunkowe)

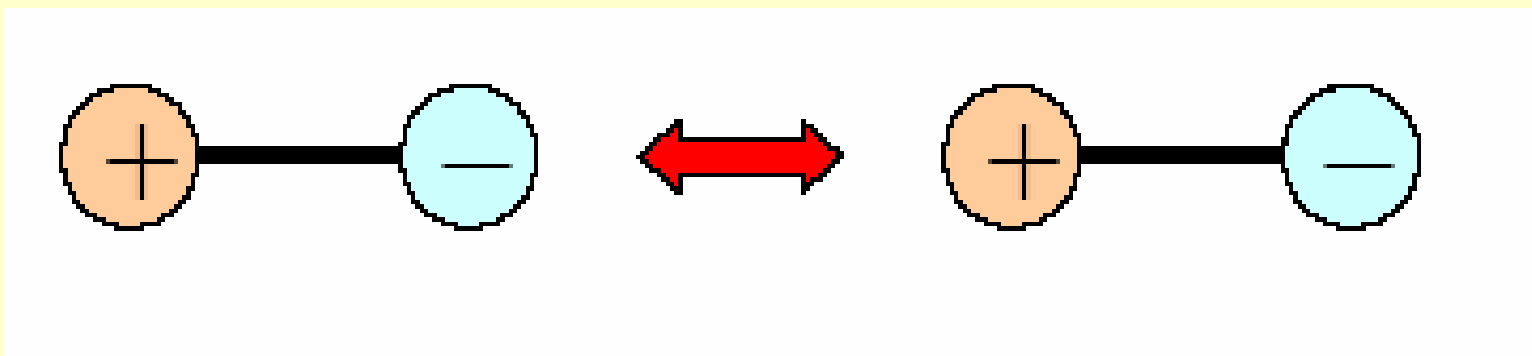


Wiązania metaliczne

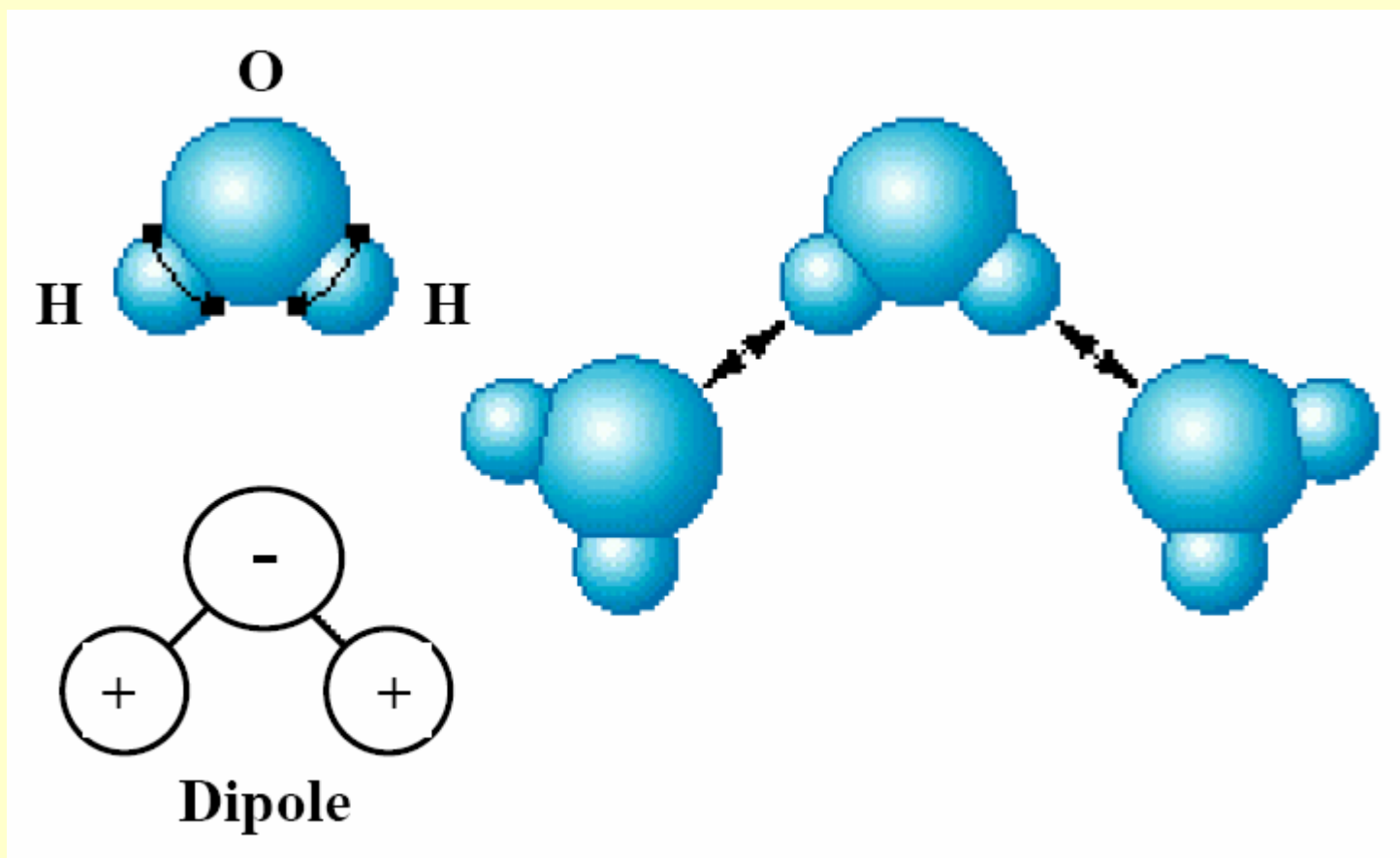


Wiązania drugorzędowe

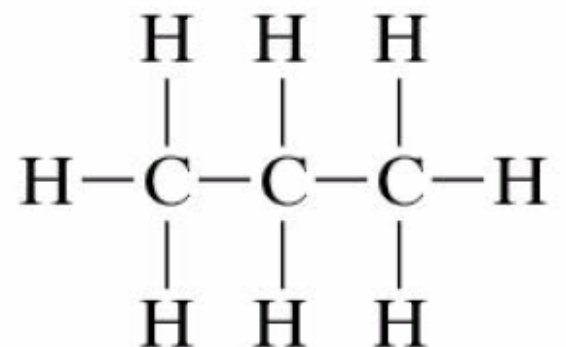
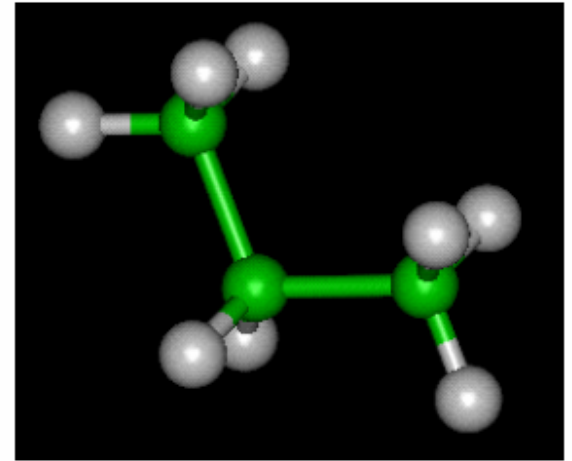
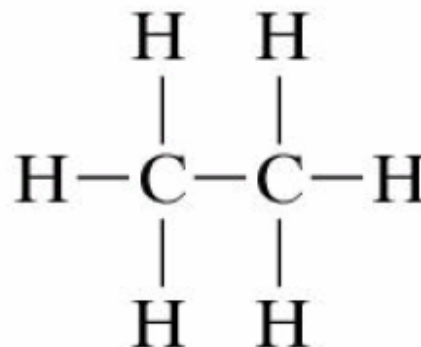
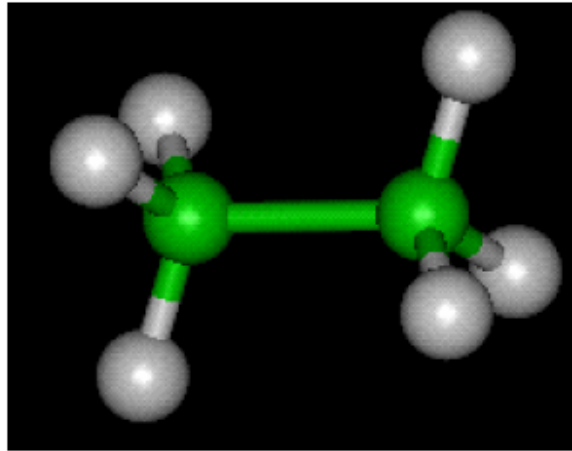
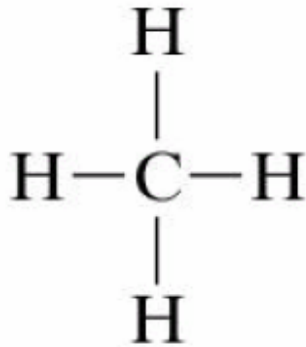
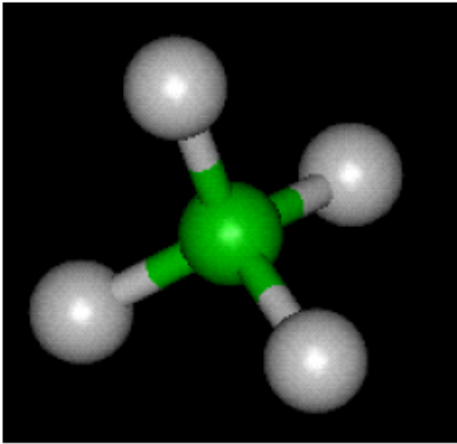
Van der Waalsa



wodorowe



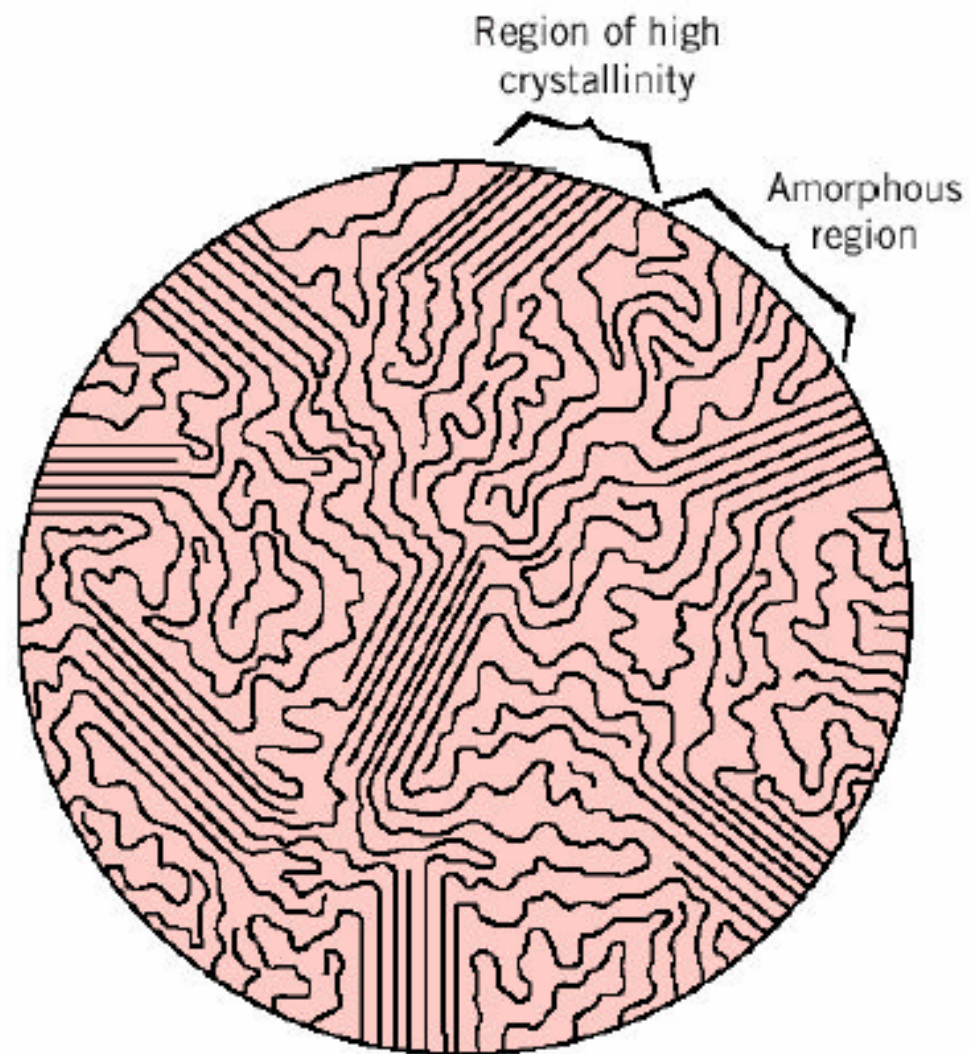
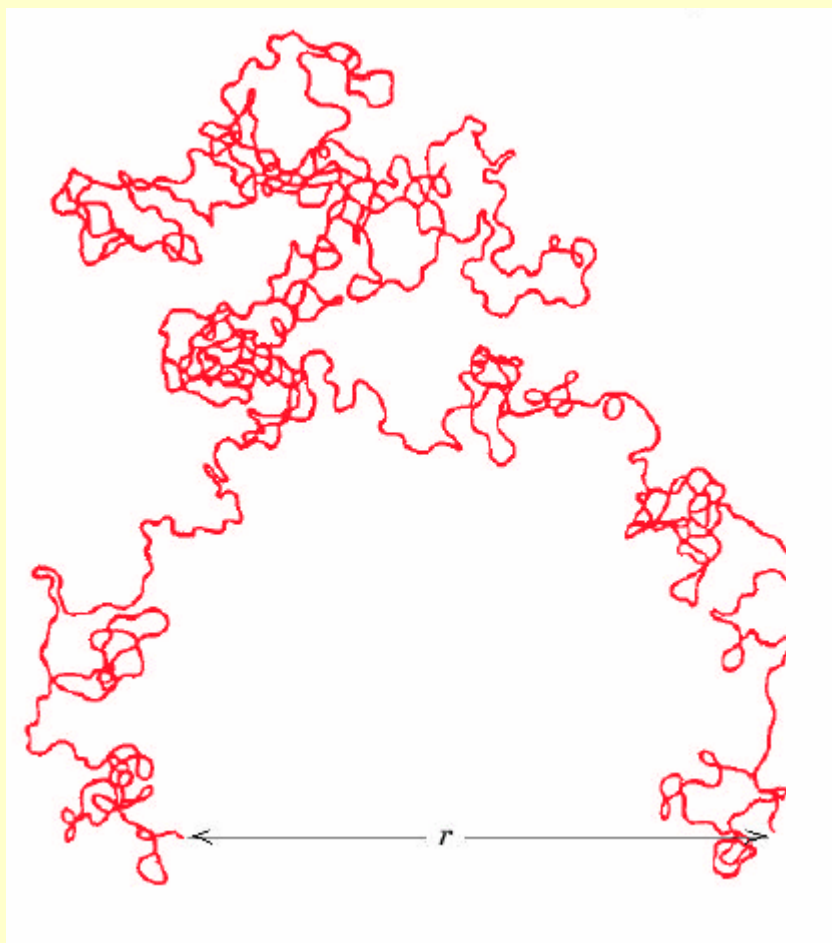
Polimery



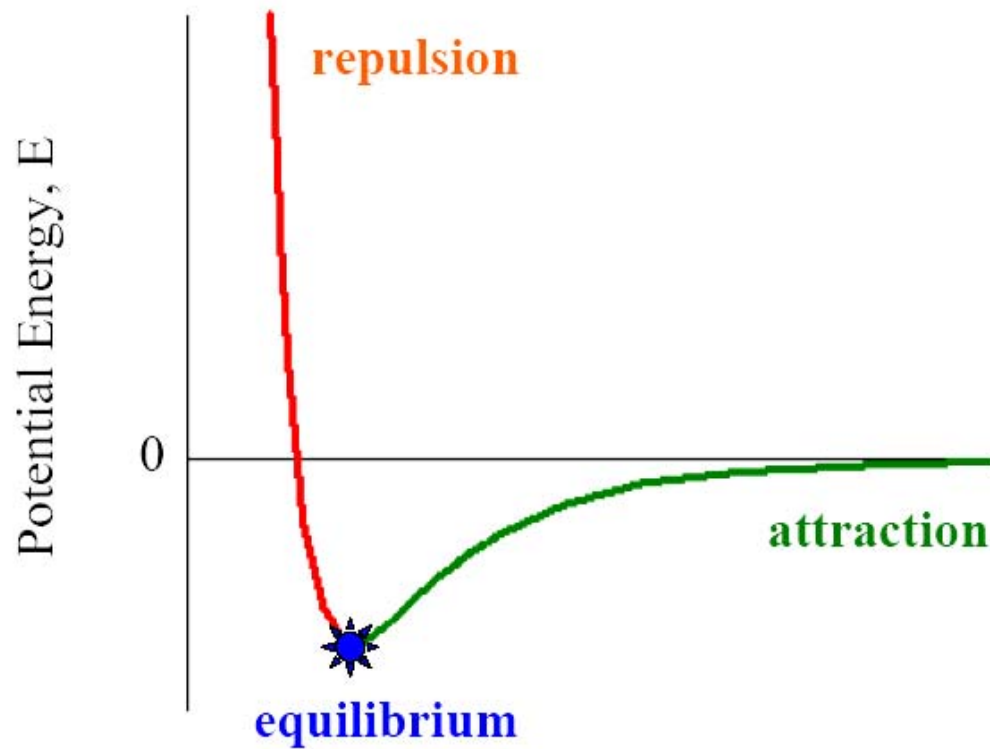
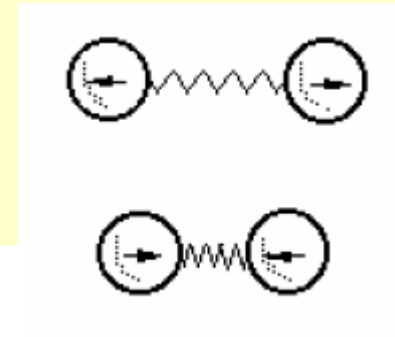
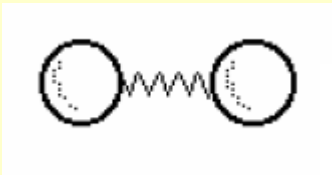
Metan, CH₄

Propan, C₃H₈

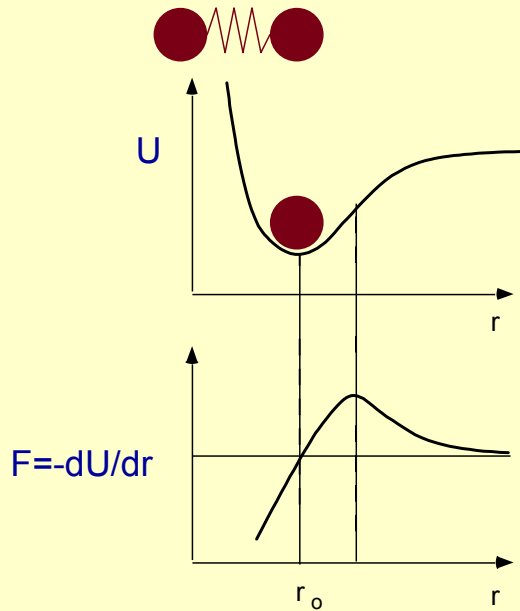
Etan, C₂H₆



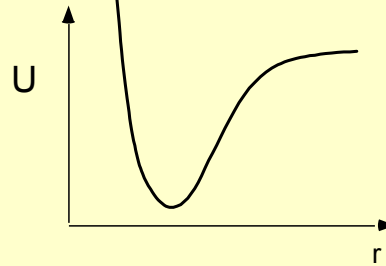
Energia wiązania



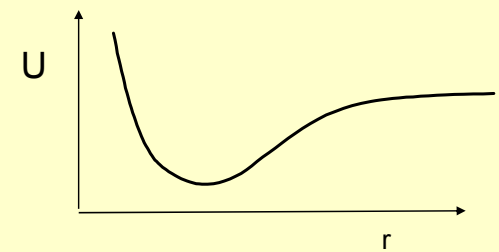
Siły międzyatomowe :



Przebieg i własności :



- Wysoka sztywność (E)
- wysoka T_m



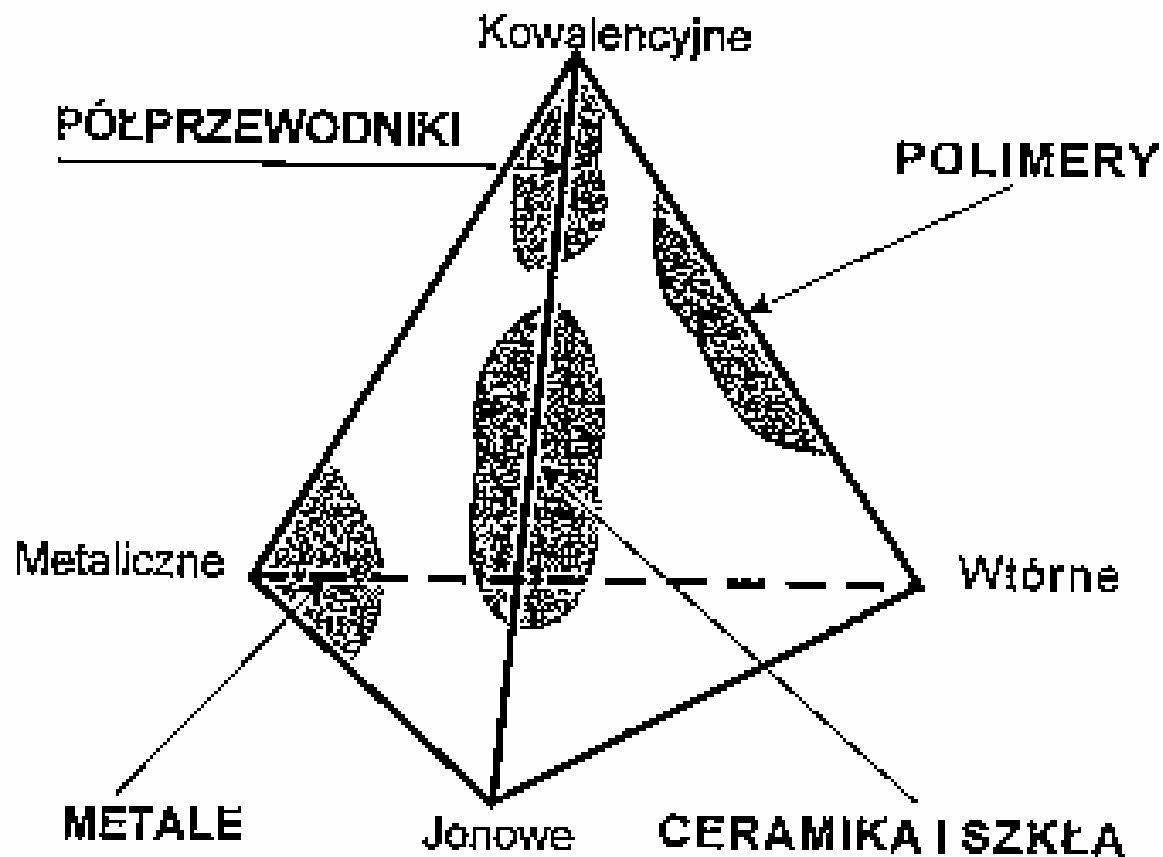
- Niska sztywność (E)
- Niska T_m

Właściwości wiązań

<i>Bonding Type</i>	<i>Substance</i>	<i>Bonding Energy</i>		<i>Melting Temperature</i> (°C)
		<i>kJ/mol</i> (<i>kcal/mol</i>)	<i>eV/Atom,</i> <i>Ion, Molecule</i>	
Ionic	NaCl	640 (153)	3.3	801
	MgO	1000 (239)	5.2	2800
Covalent	Si	450 (108)	4.7	1410
	C (diamond)	713 (170)	7.4	>3550
Metallic	Hg	68 (16)	0.7	-39
	Al	324 (77)	3.4	660
	Fe	406 (97)	4.2	1538
	W	849 (203)	8.8	3410
van der Waals	Ar	7.7 (1.8)	0.08	-189
	Cl ₂	31 (7.4)	0.32	-101
Hydrogen	NH ₃	35 (8.4)	0.36	-78
	H ₂ O	51 (12.2)	0.52	0

WŁAŚCIWOŚCI KRYSZTAŁÓW

Typ wiązania w kryształach	Przykład	Energia wiązania w e V/atom	Własności charakterystyczne kryształu
Jonowe	Ag Cl Li F K Cl Na Cl	10.2 10.5 7.2 7.9	Duża twardość, wysoka temperatura topnienia, słabe przewodnictwo w niskich temperaturach, dość dobre przewodnictwo jonowe w wysokich temperaturach
Kowalencyjne	C Ge Si	7.4 3.9 4.6	Duża twardość, w bardzo niskich temperaturach nie przewodzą prądu, w wysokich temperaturach stają się przewodnikami
Metaliczne	Cu Ag Fe Pb	3.5 2.9 4.1 2.0	Plastyczność kryształów, dobre przewodnictwo elektryczne, możliwość tworzenia stopów, różne temperatury topnienia
Wodorowe	H ₂ O HF	0.52 0.31	Wykazują tendencję do polimeryzacji
Molekularne	Ne Ar Kr	0.02 0.08 0.12	Niska temperatura topnienia i wrzenia, duża ściśliwość, duże współczynniki rozszerzalności cieplnej, niska twardość



Rys. 2.5. Rodzaje wiązań między atomami występującymi w podstawowych grupach materiałów inżynierskich

Sztywność pojedynczego wiązania S_0

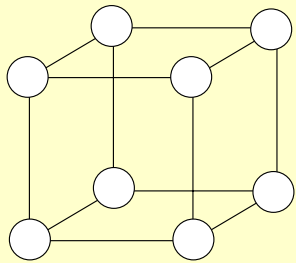
$$S_0 = \left(\frac{d^2U}{dr^2} \right)_{r=r_0}$$

r_0 – odległość między atomami

U – praca wykonana przy zbliżaniu (odsuwaniu) atomów

Rodzaj wiązania	S_0	$E \approx S_0 / r_0$
	[Nm ⁻¹]	[GNm ⁻²]
Kowalencyjne	180	1000
Czysto jonowe np. Na-Cl	9÷21	30÷70
Czysto metaliczne np. Cu-Cu	15÷40	30÷150
Wodorowe np. H ₂ O-H ₂ O	2	8
Van der Wasala np. polimery	1	2

Określenie Modułu Young'a :



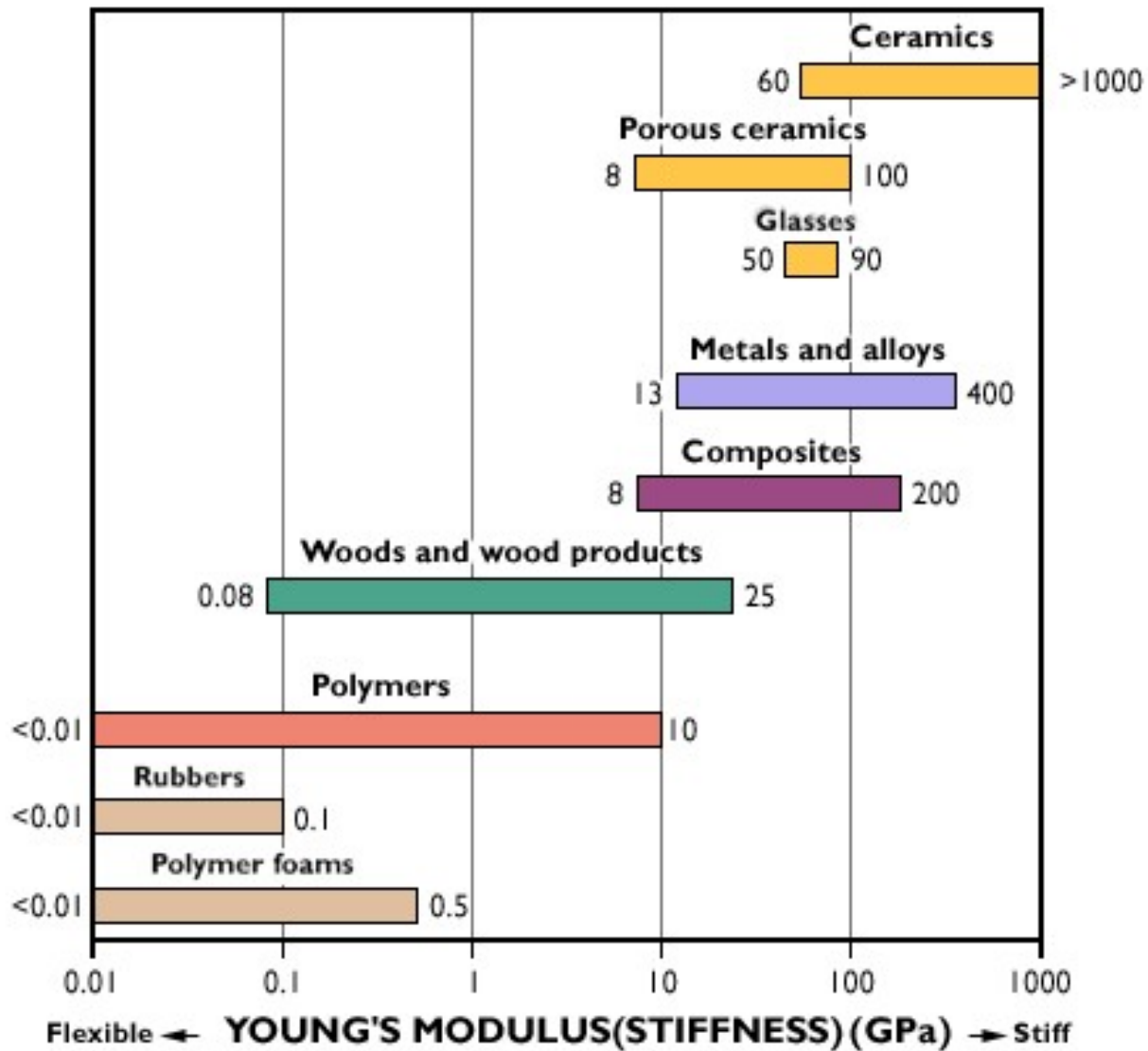
“jedna
sprężyna na
sześcián”

Model sześcienny <010>

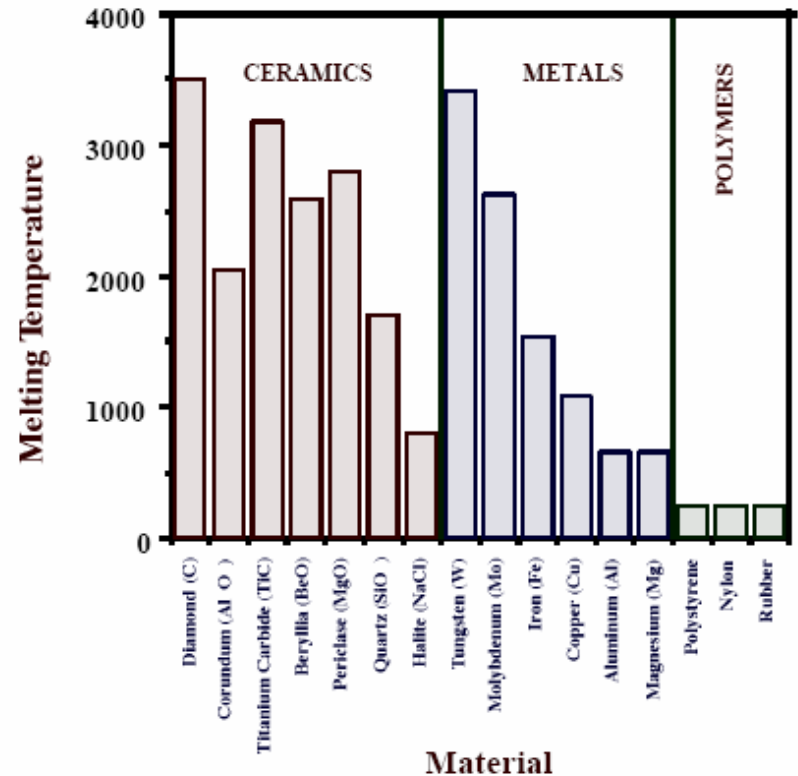
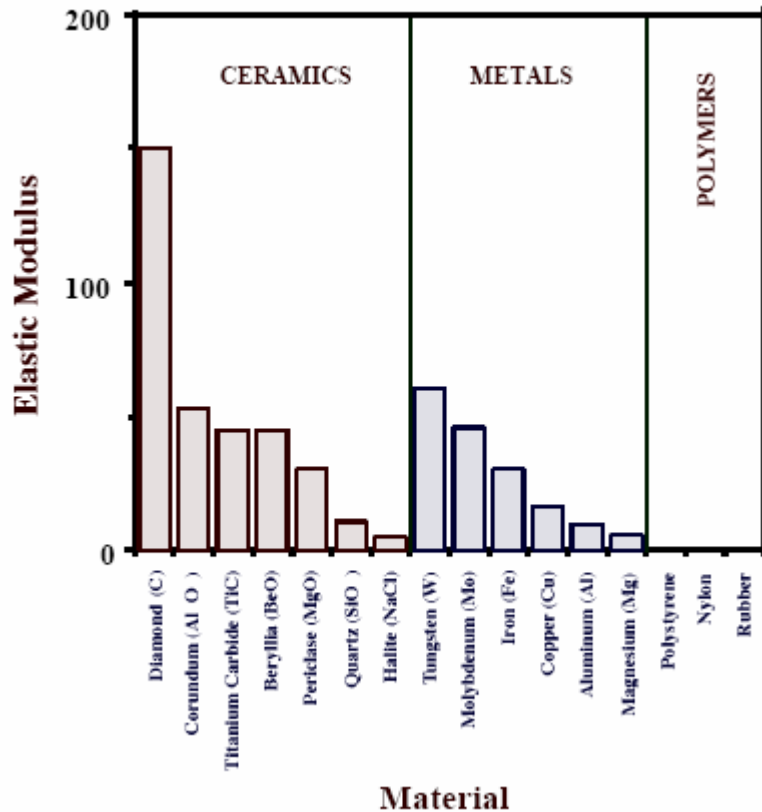
$$\Delta f / \Delta r = [df / dr]_{r=a_0} = [d^2U / dr^2]_{r=a_0}$$

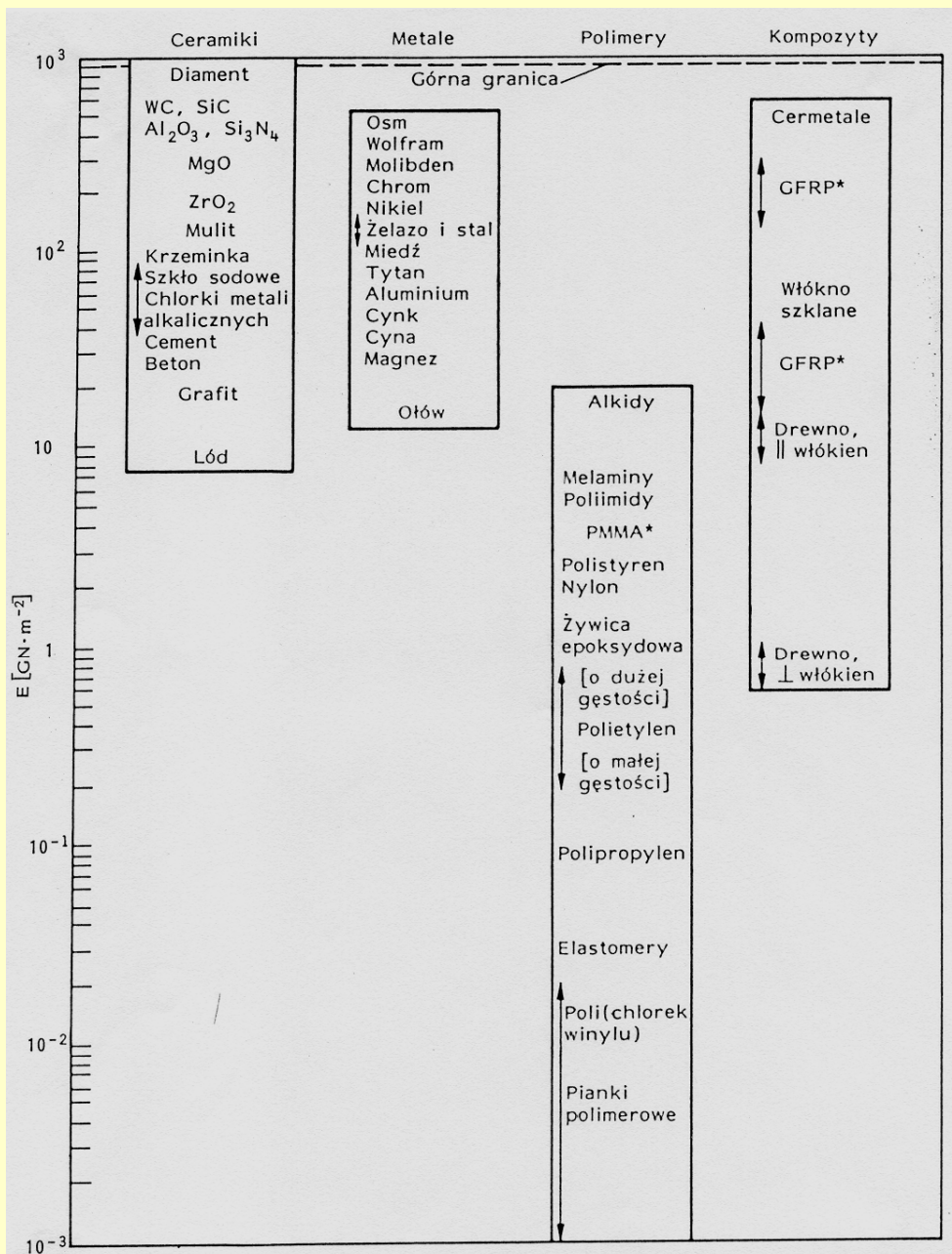
$$\Delta f / \Delta r = \sigma a^2 / \varepsilon a = aE$$

$$E = 1/a_0 [d^2U / dr^2]_{r=a_0}$$



Sztywność i temperatura topnienia materiałów





Rys. 3.5. Wykres słupkowy modułów Younga E

Wskaźnik funkcjonalności

Trzy wymagania, które musi spełniać każdy projektowany element:

- Wymagania funkcjonalne F
- Cechy geometryczne G
- Właściwości materiału M

$$p = f (F, G, M)$$

Optymalny projekt zapewnia *minimalizowanie*
lub *maksymalizowanie* p:

$$p = f(F, G, M)$$

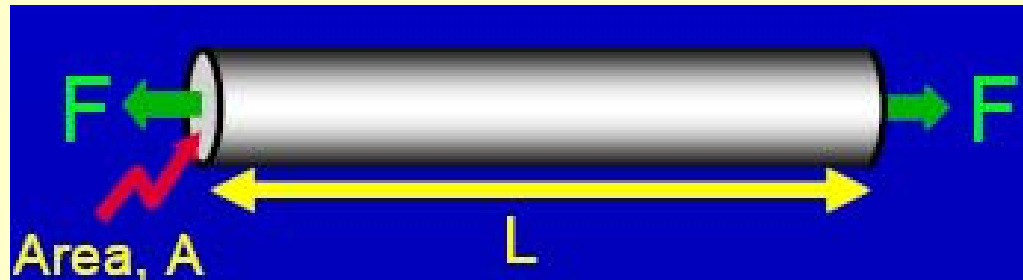
lub

$$p = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$$

Przykład

Potrzebny jest materiał na lekki sztywny pręt poddany rozciąganiu, który ma mieć minimalną masę.

Pręt nie może ulec wydłużeniu.

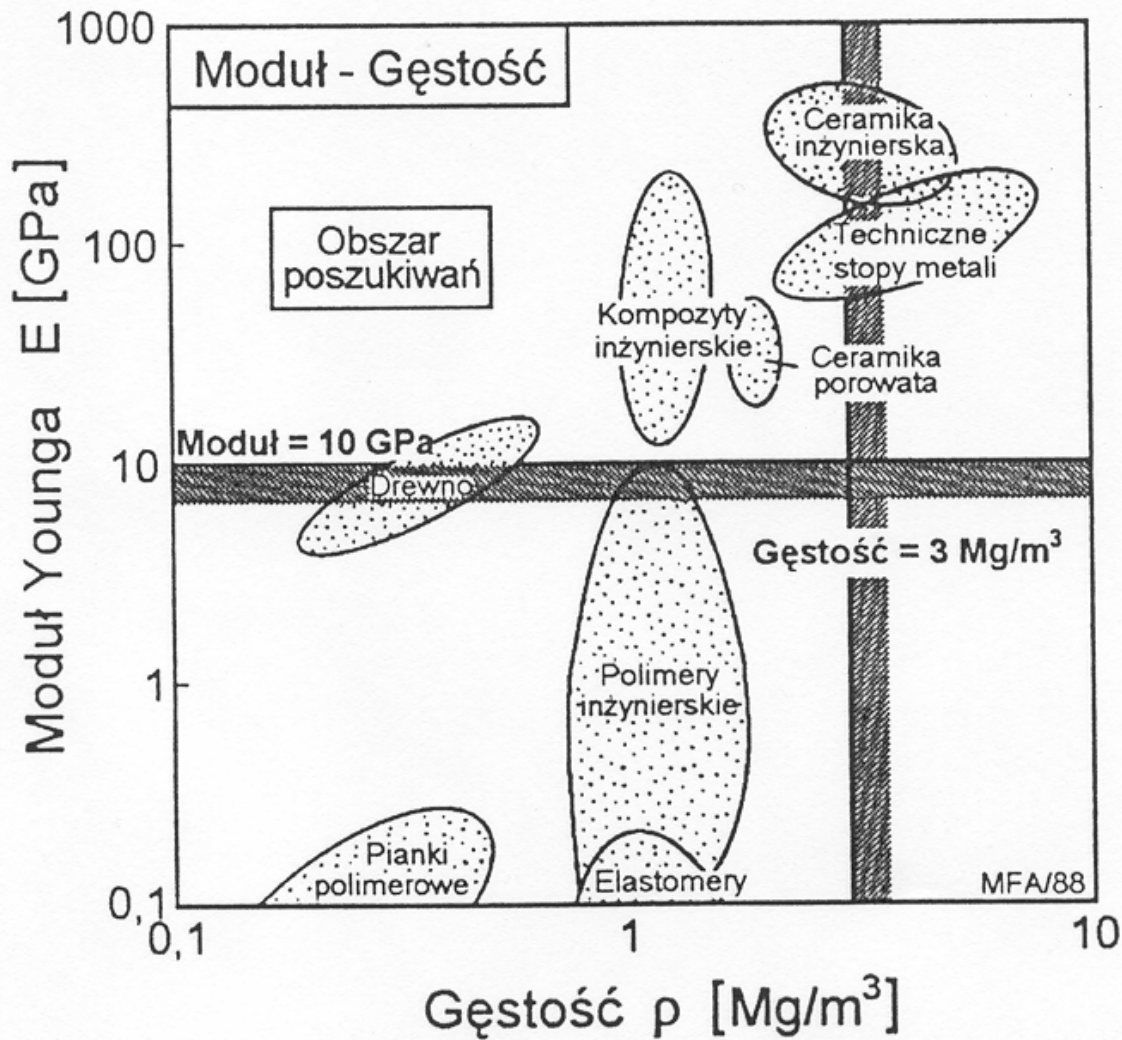


$$m = AL\rho$$

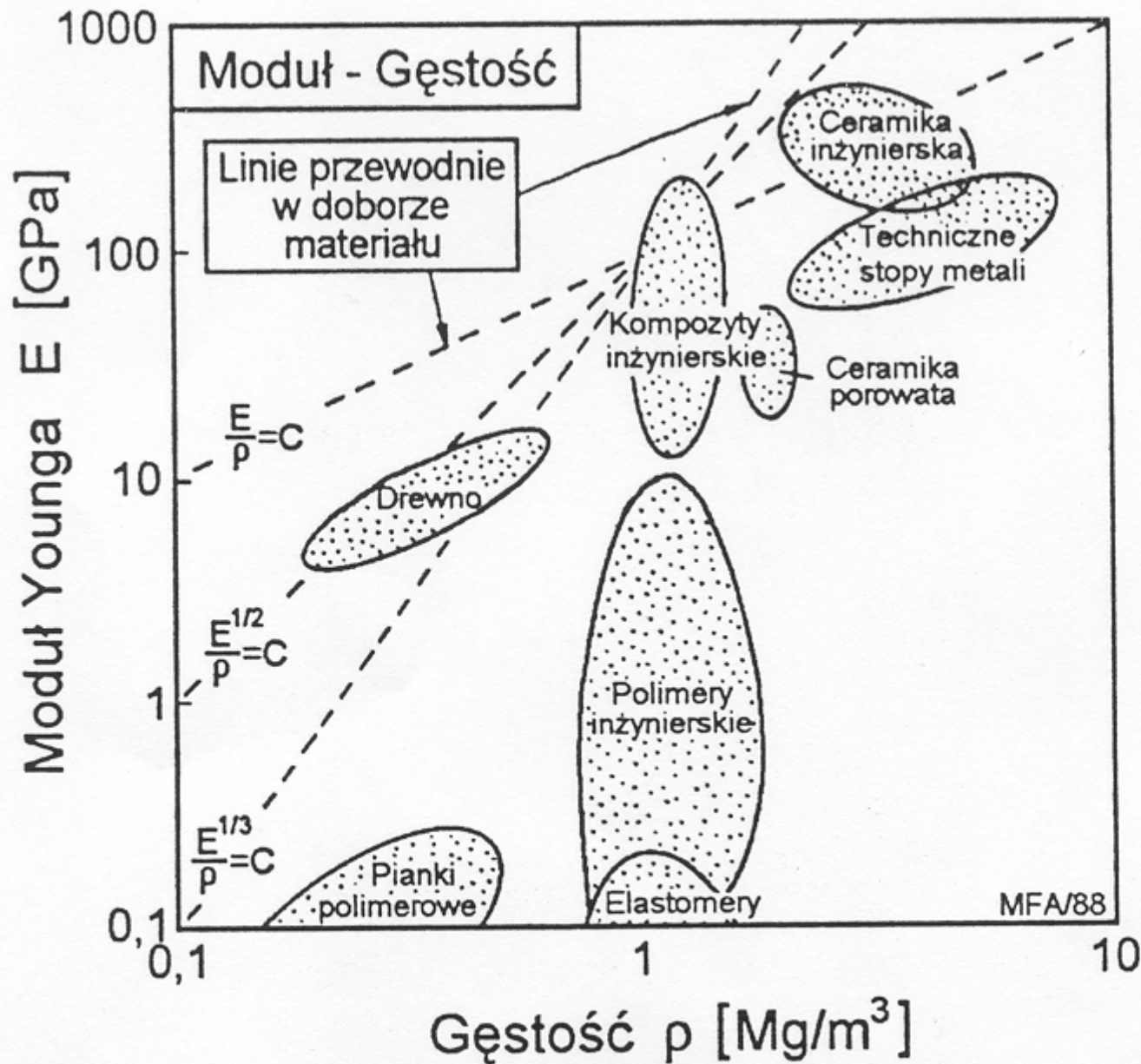
$$\sigma = F/A \quad \sigma = E\varepsilon_n$$

$$m = (F/\varepsilon_n) (L) (\rho/E) \rightarrow \min$$

$$M = E/\rho \rightarrow \max$$

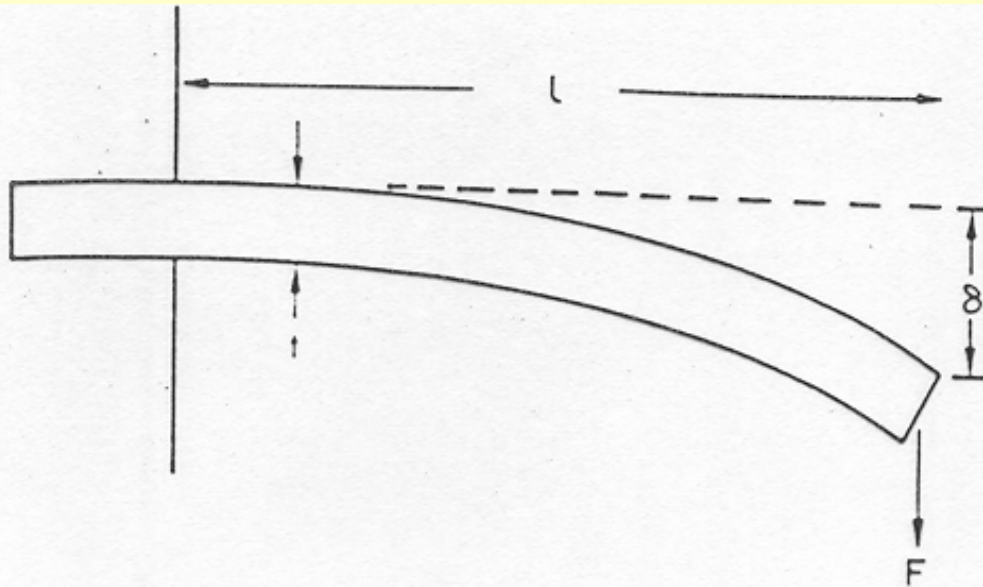


Schematyczny WYKRES $E - \rho$ przedstawiający podstawowe ograniczenia projektowe



Schematyczny WYKRES $E - \rho$ przedstawiający trzy linie przewodnie stosowane w projektowaniu sztywnej i lekkiej konstrukcji

Belka zginana



Sprężyste odkształcenie belki wspornikowej pod wpływem zewnętrznej siły F

	C_1	C_2
	3	2
	8	6
	2	1
	48	16
	$\frac{384}{5}$	24
	192	-
	384	-
	6	-
	-	4
	-	3

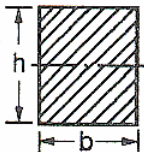
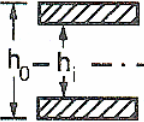
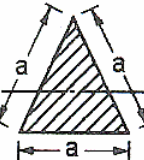
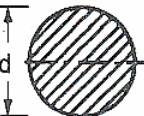
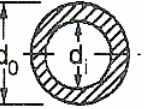
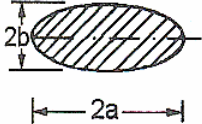
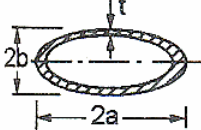
$$\delta = \frac{F\ell^3}{C_1 EI} = \frac{M\ell^2}{C_1 EI}$$

$$\theta = \frac{F\ell^2}{C_2 EI} = \frac{M\ell}{C_2 EI}$$

- E – moduł Younga [N/m²]
- δ – ugięcie [m]
- F – siła [N]
- M – moment [N·m]
- ℓ – długość [m]
- b – szerokość [m]
- t – grubość [m]
- θ – kąt nachylenia końca belki
- I – patrz rys. A2 [m⁴]
- y – odległość od osi obojętnej [m]
- R – promień krzywizny [m]

$$\frac{\sigma}{y} = \frac{M}{I} = \frac{E}{R}$$

Ugięcie belek

Przekrój	S_0 [m ²]	I [m ⁴]	K [m ⁴]	I/y_m [m ³]	H [m ³]
	bh	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{16}{3}hb^3(1-0,58\frac{b}{h})$	$\frac{bh^2}{6}$	$\frac{bh^2}{4}$
	$b(h_0 - h_i)$	$\frac{b}{12}(h_0^3 - h_i^3)$	—	$\frac{b}{12h_0}(h_0^3 - h_i^3)$	$\frac{b}{4}(h_0^2 - h_i^2)$
	$\frac{\sqrt{3}}{4}a^2$	$\frac{a^4}{32\sqrt{3}}$	$\frac{a^4\sqrt{3}}{80}$	$\frac{a^3}{32}$	—
	$\frac{\pi d^2}{4}$	$\frac{\pi}{64}d^4$	$\frac{\pi}{32}d^4$	$\frac{\pi}{32}d^3$	$\frac{1}{6}d^3$
	$\frac{\pi}{4}(d_0^2 - d_i^2)$	$\frac{\pi}{64}(d_0^4 - d_i^4)$	$\frac{\pi}{32}(d_0^4 - d_i^4)$	$\frac{\pi}{32d_0}(d_0^4 - d_i^4)$	$\frac{1}{6}(d_0^3 - d_i^3)$
	πab	$\frac{\pi}{4}ab^3$	$\frac{\pi a^3 b^3}{a^2 + b^2}$	$\frac{\pi}{2}ab^2$	—
	$2\pi(ab)^{1/2}t$	$\frac{\pi}{4}ab^3t(\frac{1}{a} + \frac{3}{b})$	$\frac{4\pi t a^2 b^2}{(a+b)}$	$\frac{\pi ab^2 t}{2}(\frac{1}{a} + \frac{3}{b})$	—

Rys. A2. Momenty bezwładności przekrojów

FUNKCJA: przenoszenie obciążeń

OGRANICZENIA: ugięcie δ nie może przekraczać określonej wartości

CEL: minimalizacja masy

$$\delta = \frac{4l^3 F}{Et^4}$$

jeśli zaniedbać masę własną belki.

Masa belki:

$$m = V\rho = lt^2 \rho$$

więc

$$t = (m/l\rho)^{1/2}$$

po podstawieniu do równania na odchylenie sprężyste

$$\delta = \frac{4l^3 F}{E} \cdot \frac{l^2 \rho^2}{m^2}$$

wyrażenie na masę

$$m = \left(\frac{4l^5 F}{\delta} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho^2}{E} \right)^{1/2}$$

CEL: minimalizacja kosztu

$$\text{cena} = m p$$

p - cena jednostkowa

$$\text{cena} = \left(\frac{4l^5 F}{\delta} \right)^{1/2} p \left(\frac{\rho^2}{E} \right)^{1/2}$$

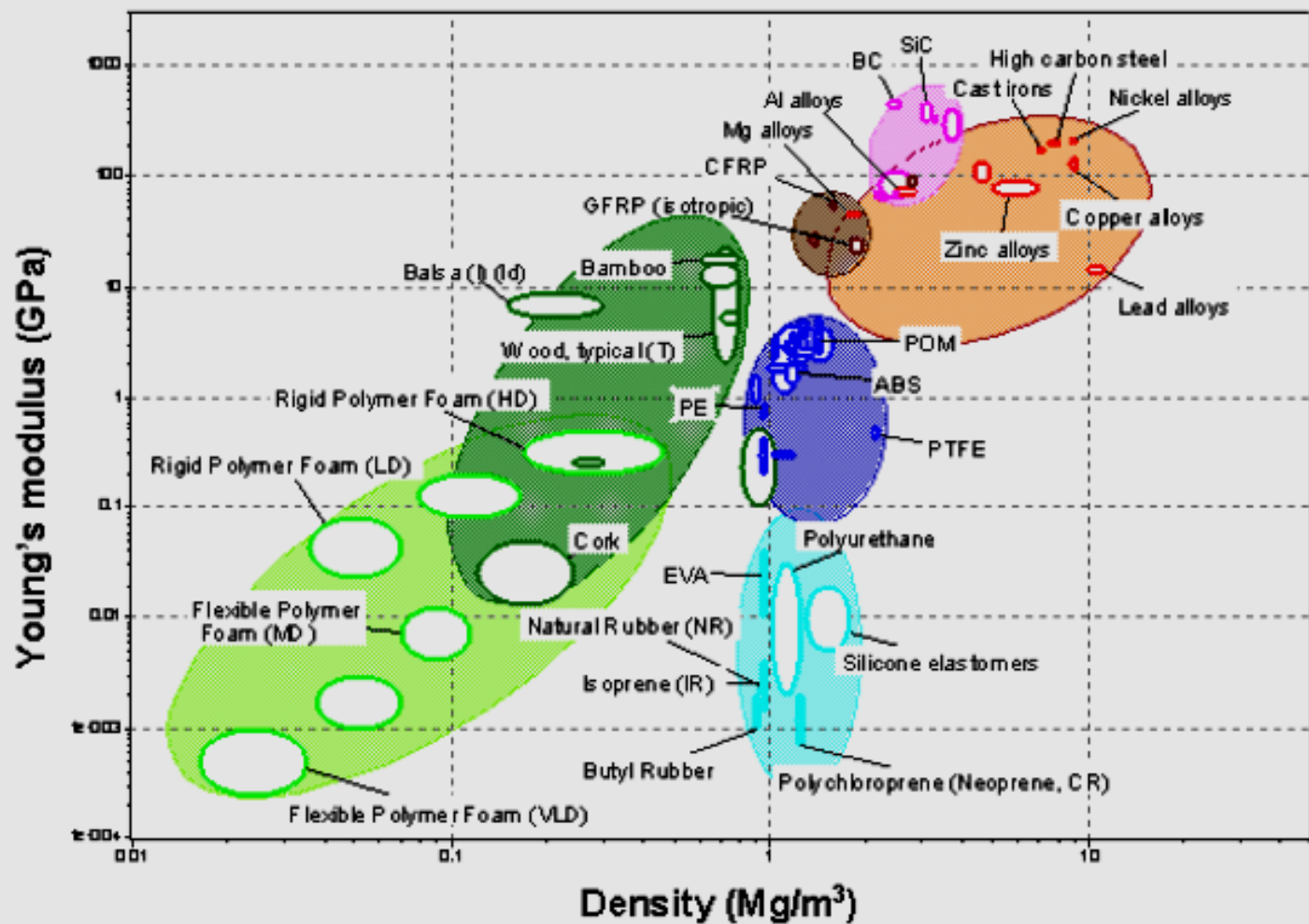
Belka o określonej sztywności - wskaźnik funkcjonalności

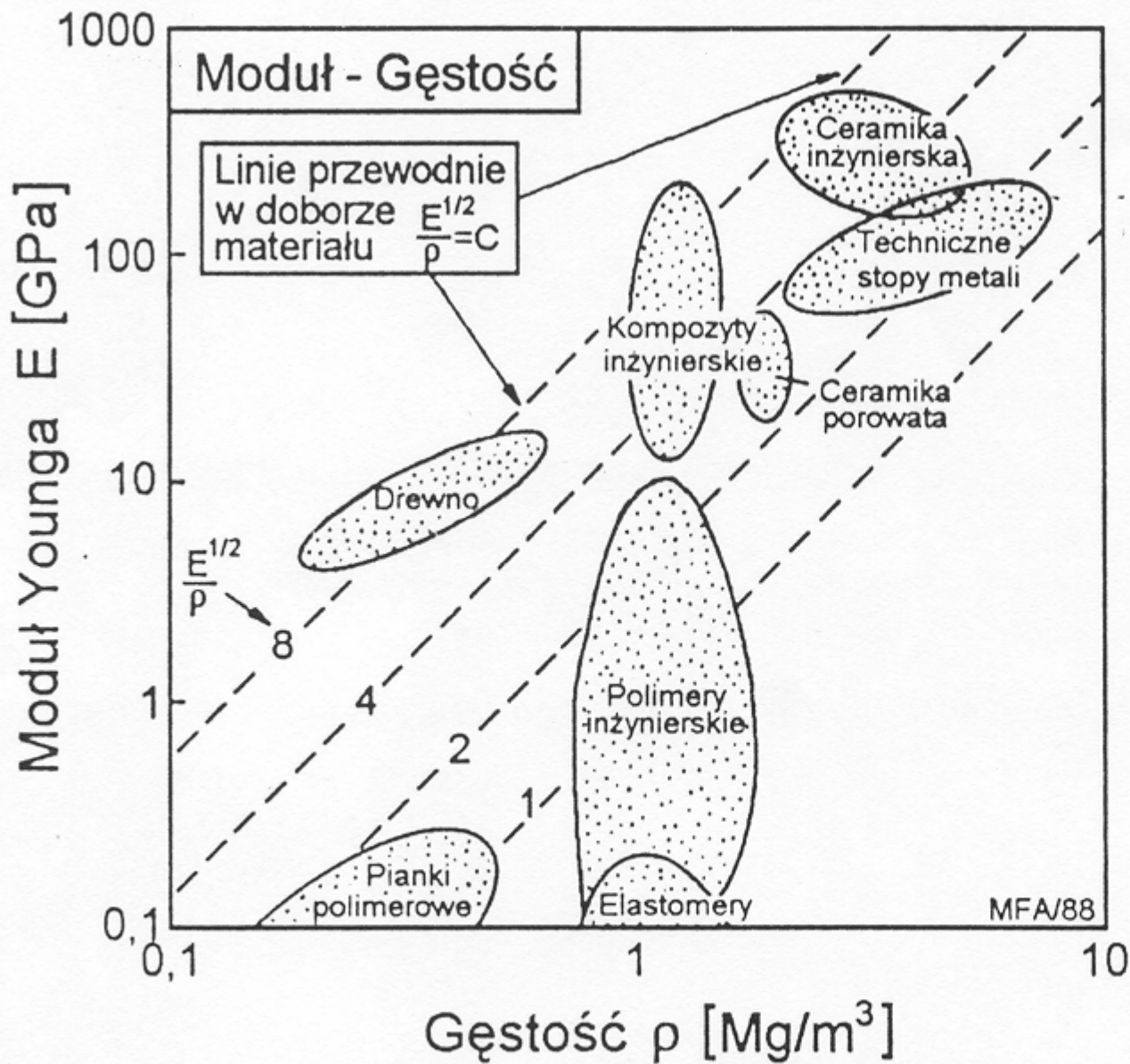
$$M_1 = \frac{E^{1/2}}{\rho}$$

Należy wybrać materiał o jak najwyższej wartości M_1 .

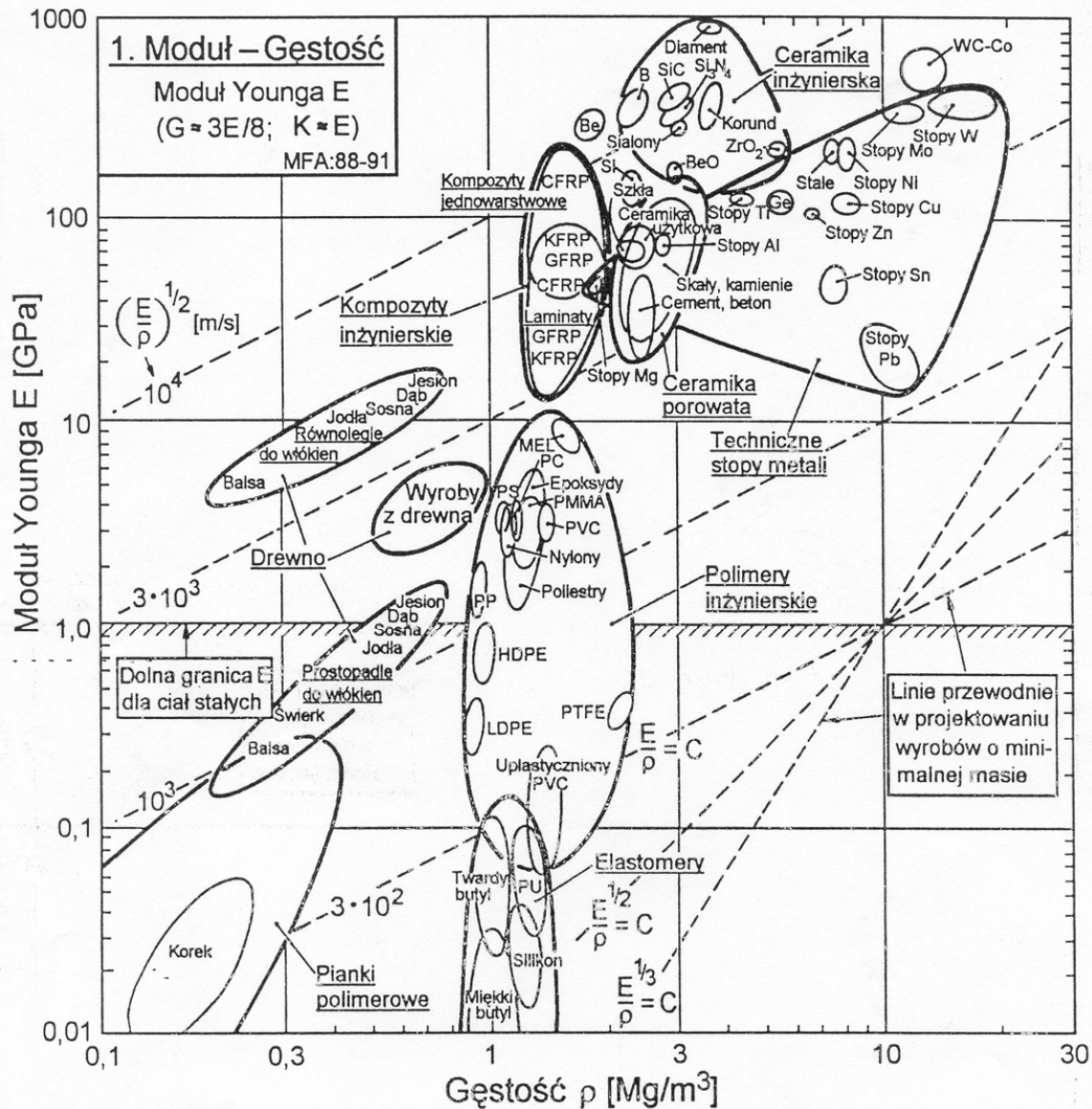
Dla minimalizacji ceny należy wybrać materiał o jak największej wartości M_2

$$M_2 = \frac{E^{1/2}}{p\rho}$$

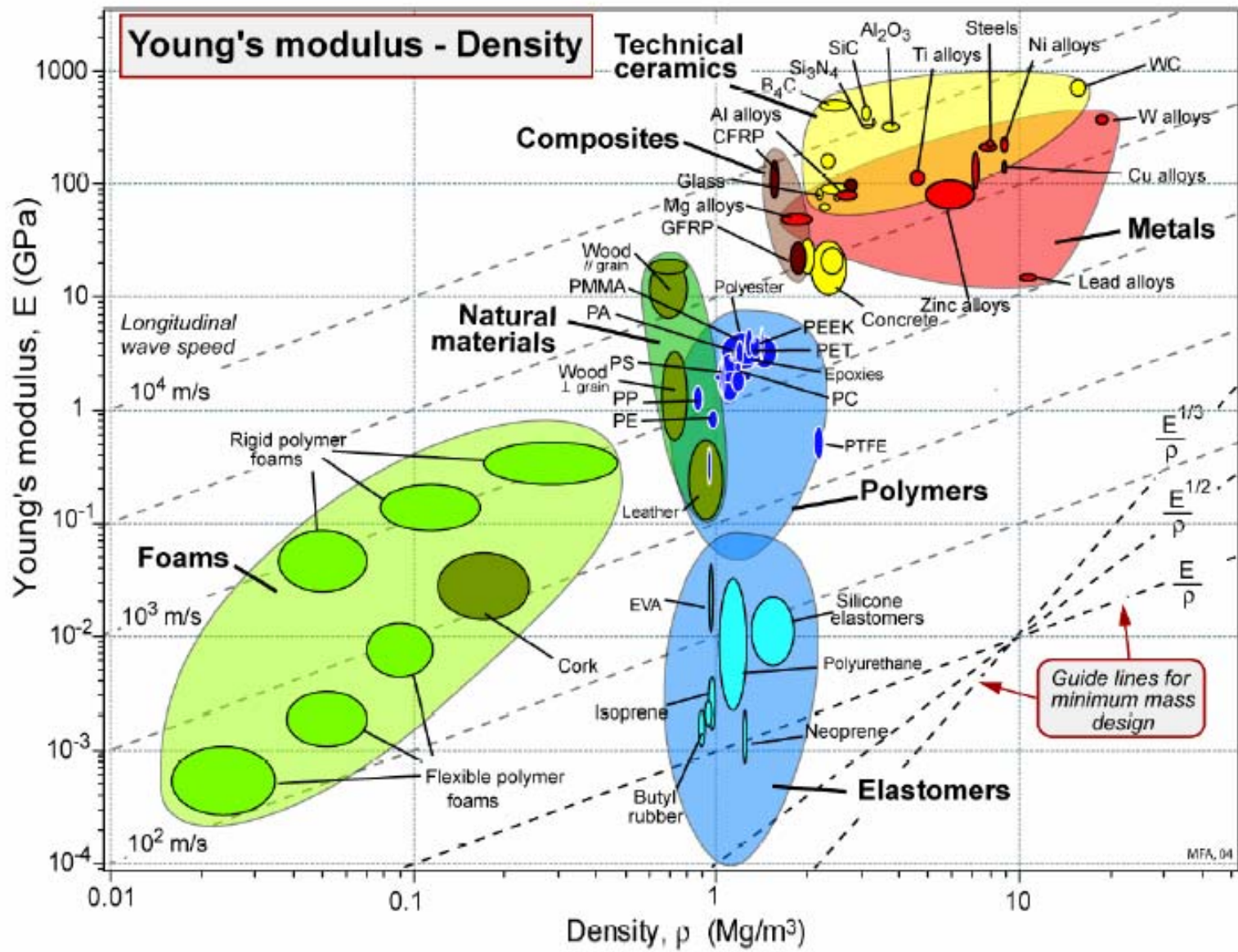




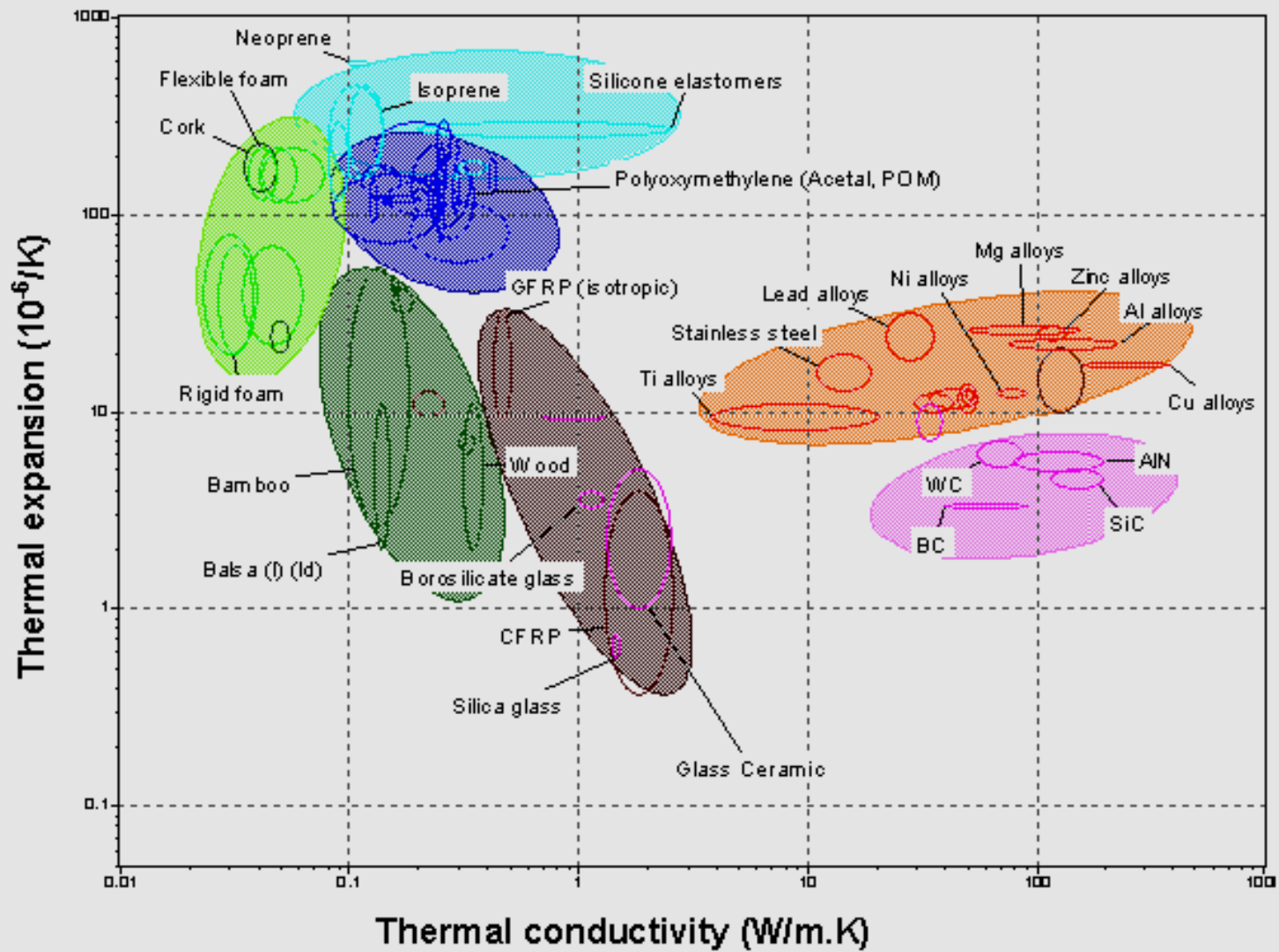
Schematyczny WYKRES $E - \rho$ przedstawiający zbiór linii wskaźnika funkcjonalności $M = E^{1/2}/\rho$. Wymiarem wskaźnika jest $(\text{GPa})^{1/2}/(\text{Mg/m}^3)$

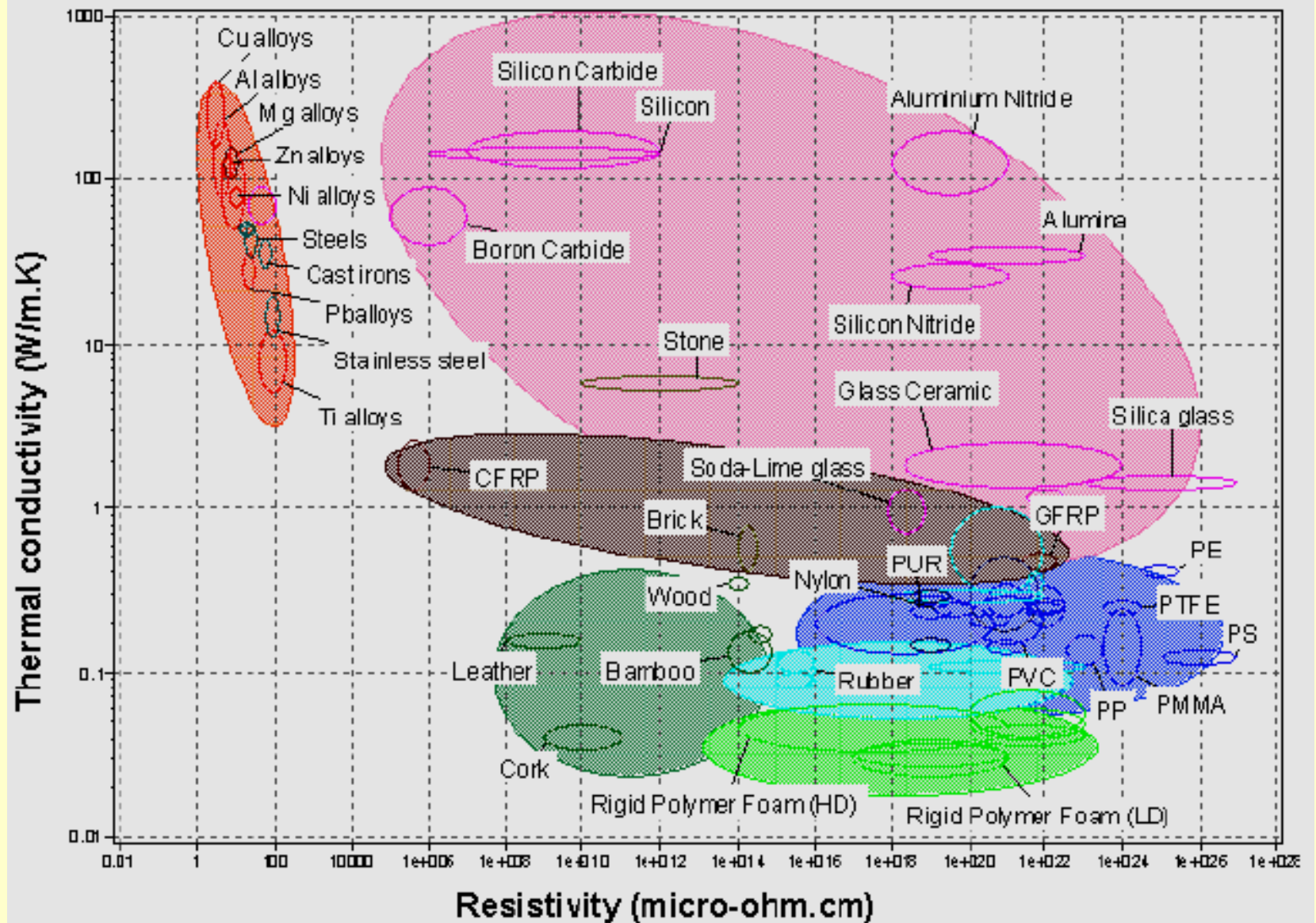


RYСУNEK 4.2. WYKRES 1: Moduł Younga E w zestawieniu z gęstością ρ . Obszary obwiedzione grubymi liniami zawierają dane dla poszczególnych rodzajów materiałów. Linie ukośne łączą materiały, w których prędkość rozchodzenia się fali podłużnej jest jednakowa. Linie przewodnie odpowiadające stałej wartości wskaźników E/ρ , $E^{1/2}/\rho$, $E^{1/3}/\rho$ umożliwiają dobór materiałów na konstrukcje o minimalnej masie i ograniczonym odkształceniu



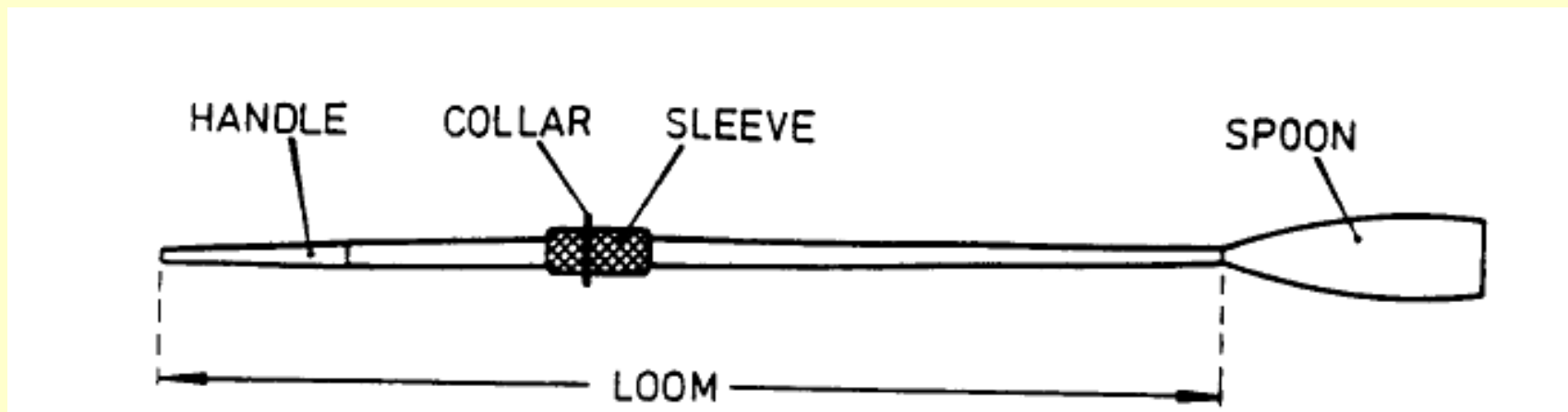
material	M_1 [GPa ^{1/2} m ³ /Mg]	p-[cena tony w \$]
Beton	2,74	290
Drewno	5,77	431
stal	1,87	453
Stopy Al	3,08	2330
GFRP	3,16	3300
CFRP	10,95	198 000
Pianka poliuretanowa	2,45	1100

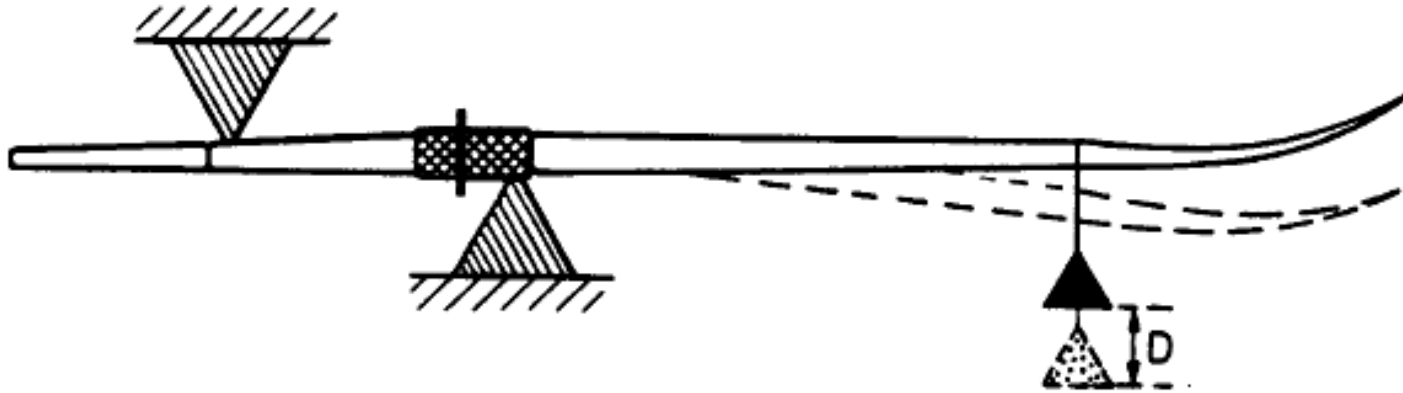




DOBÓR MATERIAŁU NA WIOSŁO

Z punktu widzenia mechaniki wiosło jest **belką obciążoną na zginanie**. Wiosło musi być wystarczająco **wytrzymałe** aby przenieść moment zginający, wytworzony przez wiosłarza, bez zniszczenia. Musi także posiadać odpowiednią **sztywność** (najlepiej odpowiadającą wiosłarzowi), a także powinno być tak **lekkie** jak to tylko możliwe.

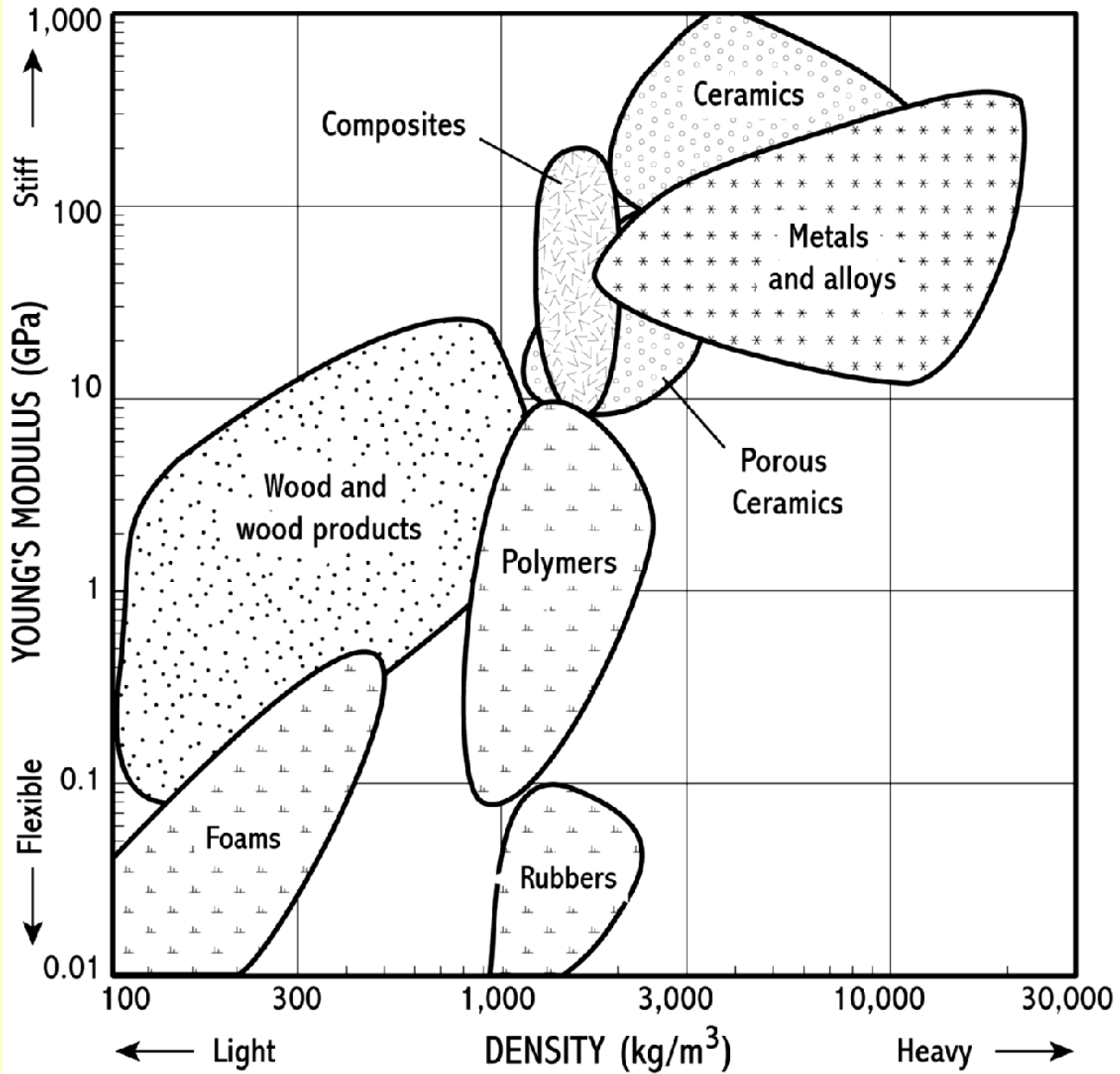


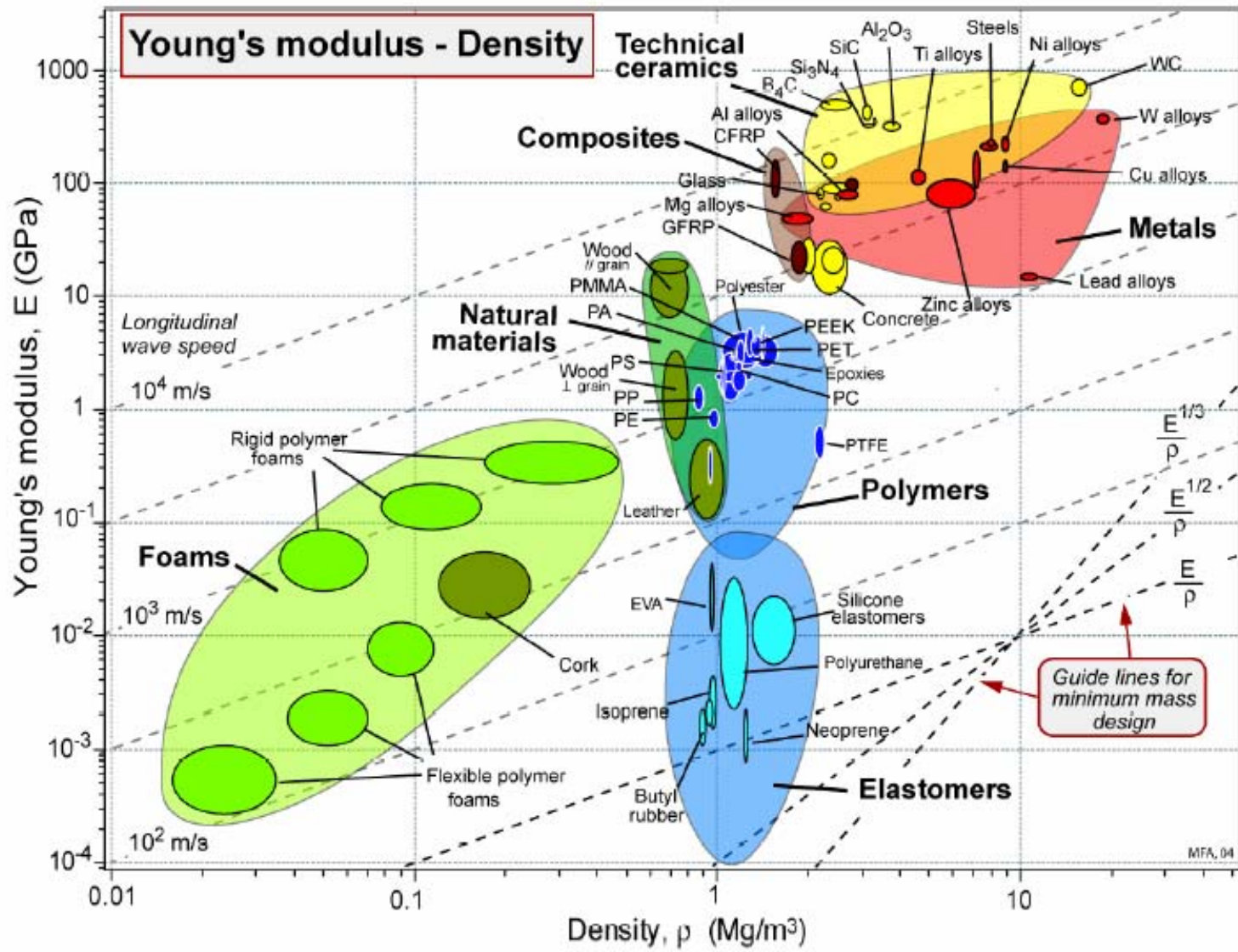


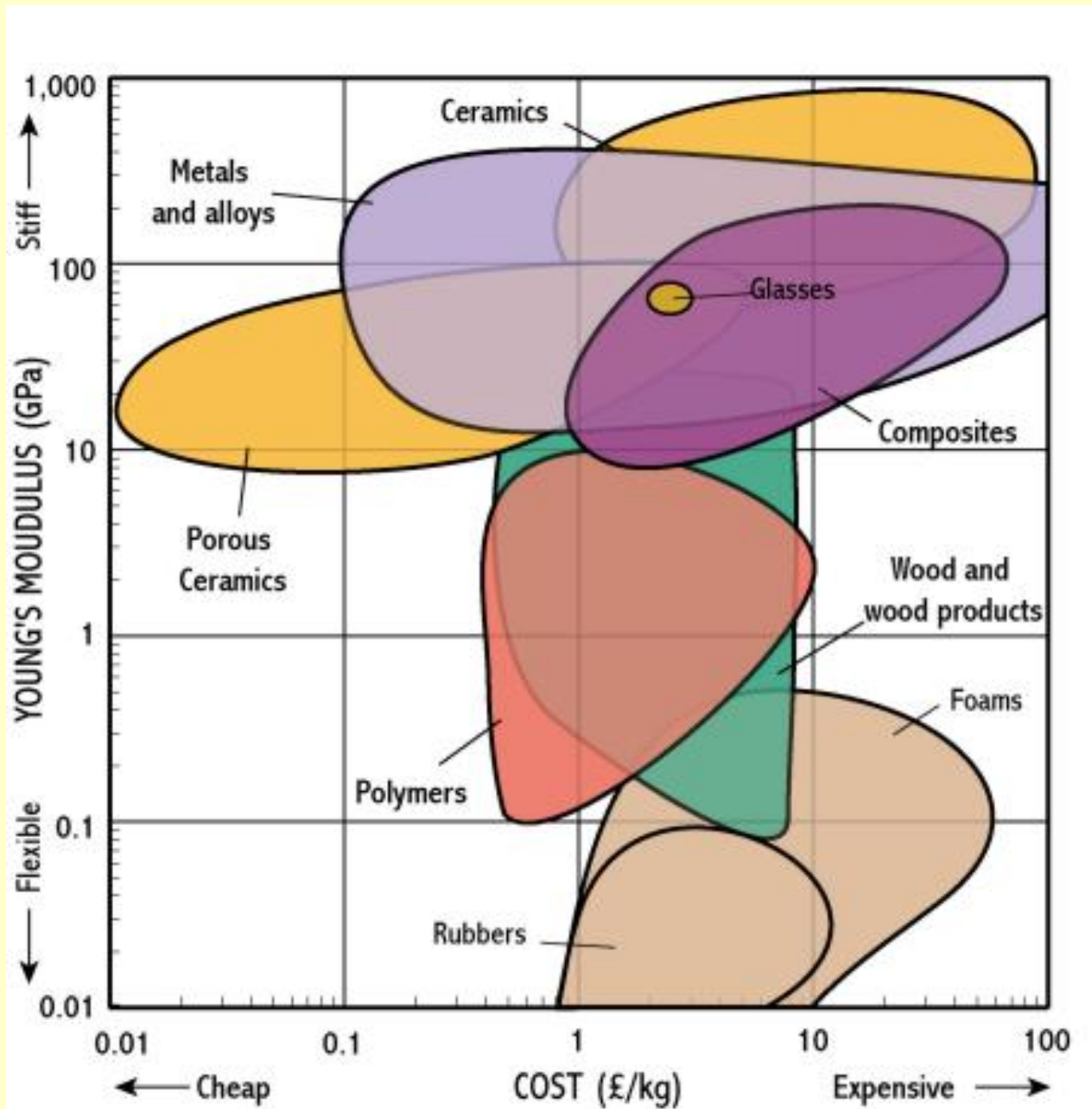
Metoda pomiaru ugięcia wiosła: obciążnik o masie 10 kg zawieszony na wiosle w odległości 2.05 m od kołnierza. Ugięcie D wynosi dla wiosel „miękkich” do 50 mm, a dla „twardych” tylko 30 mm.

Wskaźnik funkcjonalności:

$$M_1 = \frac{E^{1/2}}{\rho}$$

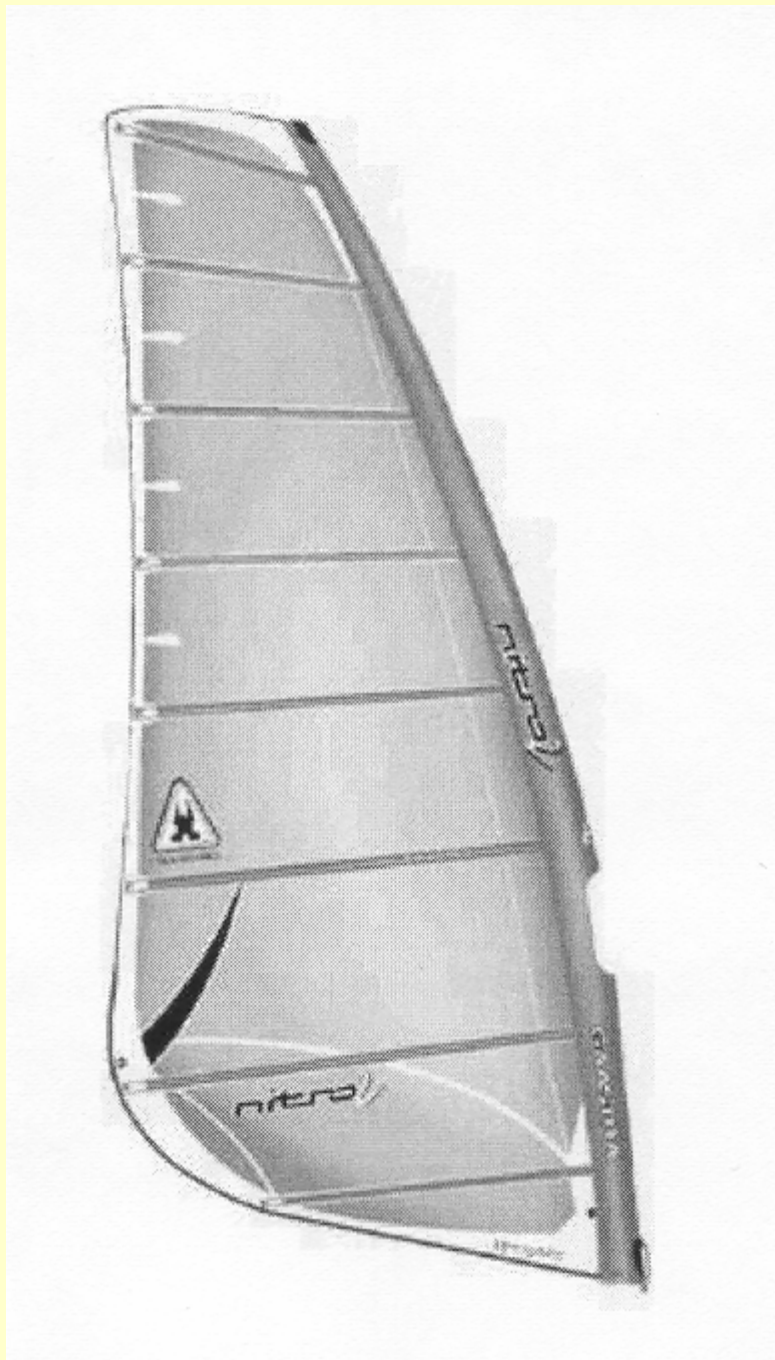






MATERIAŁ NA WIOSŁO - wybór

Material	M [$\text{GPa}^{1/2}/\text{Mg}/\text{m}^3$]	Uwagi
Drewno	5 - 8	Tanie, tradycyjne, trudna kontrola szczegółowych własności
CFRP	4 - 8	Tak dobre jak drewno, lepiej można kontrolować własności
GFRP	3.5 - 5.5	Tańszy od CFRP ale niższa wartość M
Ceramika	4 - 8	Dobra wartość M ale materiał kruchy i drogi



Maszt do deski z
żaglem

Jednym z warunków efektywnego żeglowania jest dobór właściwego masztu do żagla. Podstawowym parametrem masztu, jaki należy tu wziąć pod uwagę, jest jego sztywność wyrażana obecnie wg systemu IMCS (Indexed Mast Check System). W tym systemie sztywność masztu charakteryzuje parametr obliczany z wzoru:

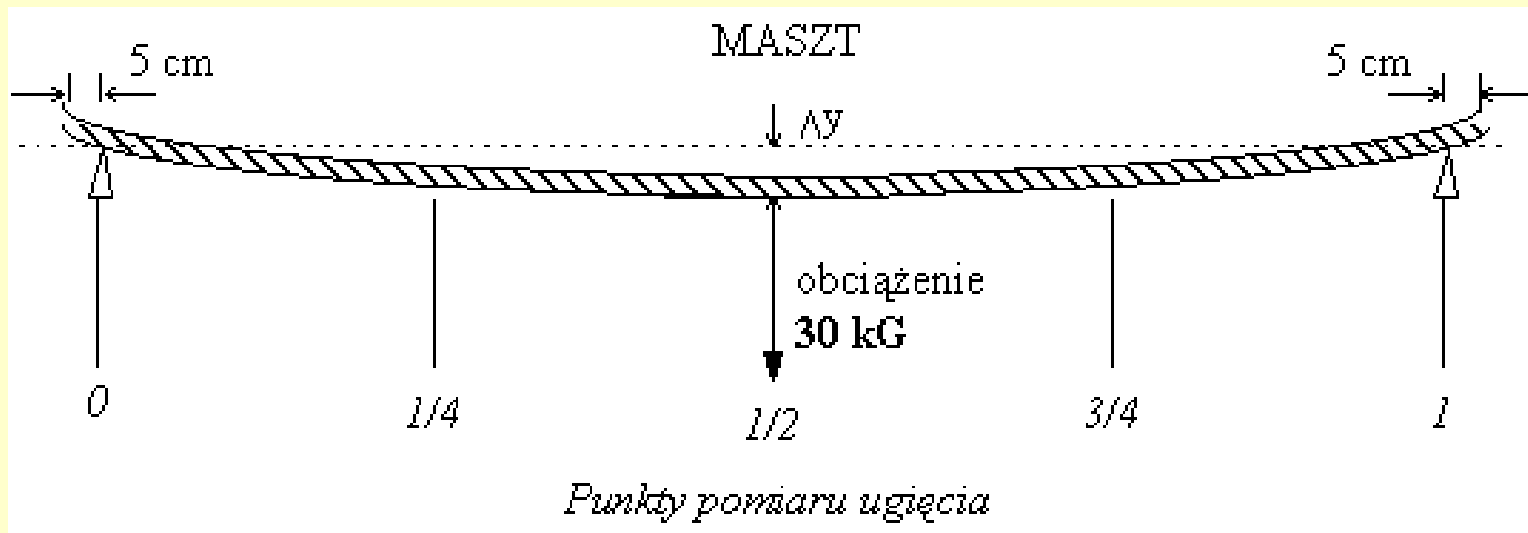
$$IMCS = \frac{L^3}{465^2 \Delta y}$$

L - długość masztu,

Δy - różnica ugięcia masztu przed i po obciążeniu masztu w jego połowie 30 kg obciążnikiem,

465² - czynnik normalizujący

Pomiaru ugięcia masztu dokonuje się w sposób przedstawiony na rysunku:



Wzór na obliczanie IMCS (1) ma swoje teoretyczne uzasadnienie. Ugięcie pręta swobodnie podpartego na końcach, obciążonego w środku, jest proporcjonalne do długości pręta.

$$\Delta y = \frac{1}{48} \frac{L^3}{EJ} F$$

F - obciążenie masztu (tu zawsze równe 30 kG),

E – moduł Younga materiału pręta,

J - moment bezwładności poprzecznego przekroju pręta ($J = \pi /64 d^4$)

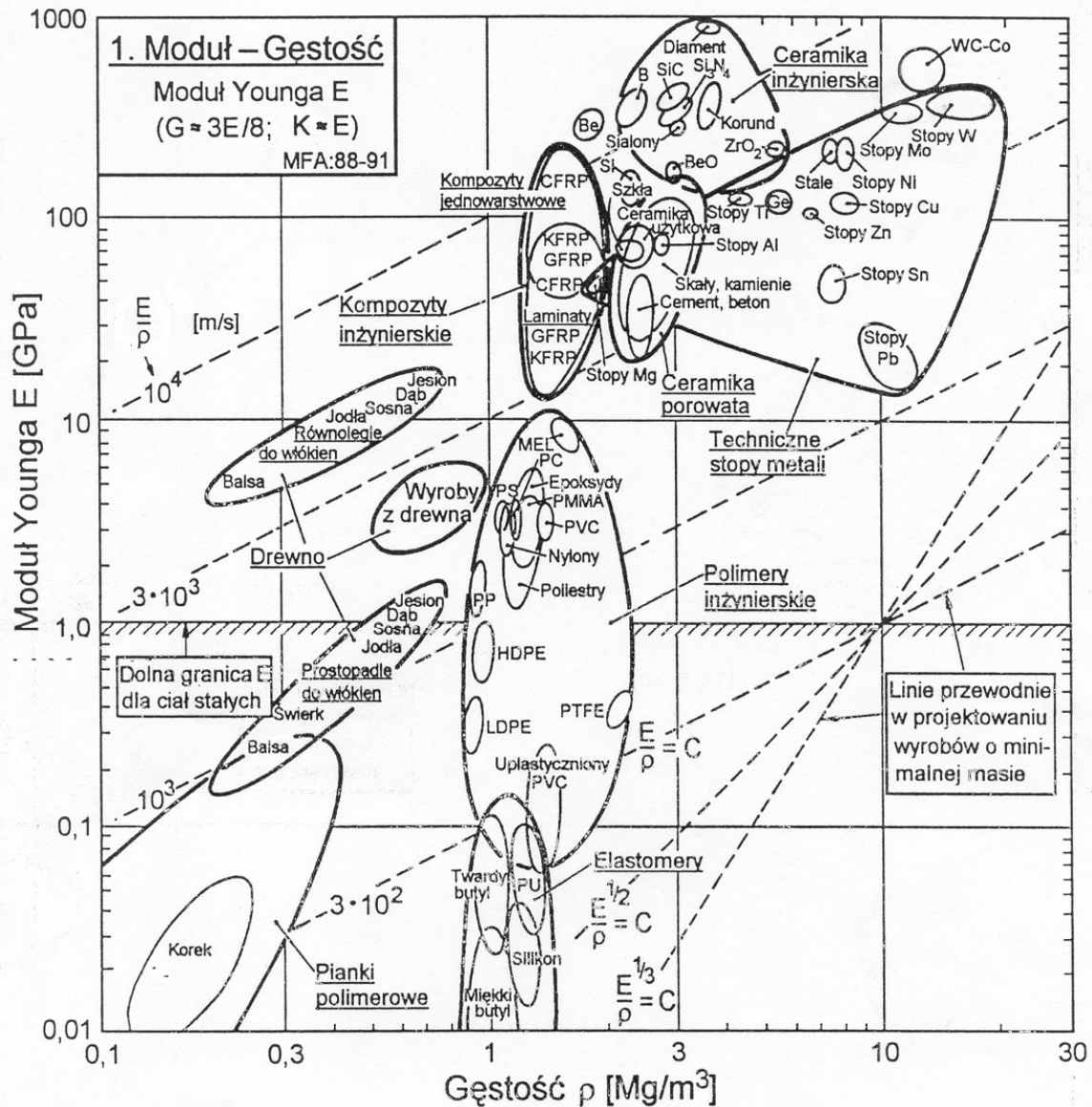
$$IMCS = \frac{3\pi d^4 E}{465^2 \cdot 4F}$$

Uwzględniając masę:

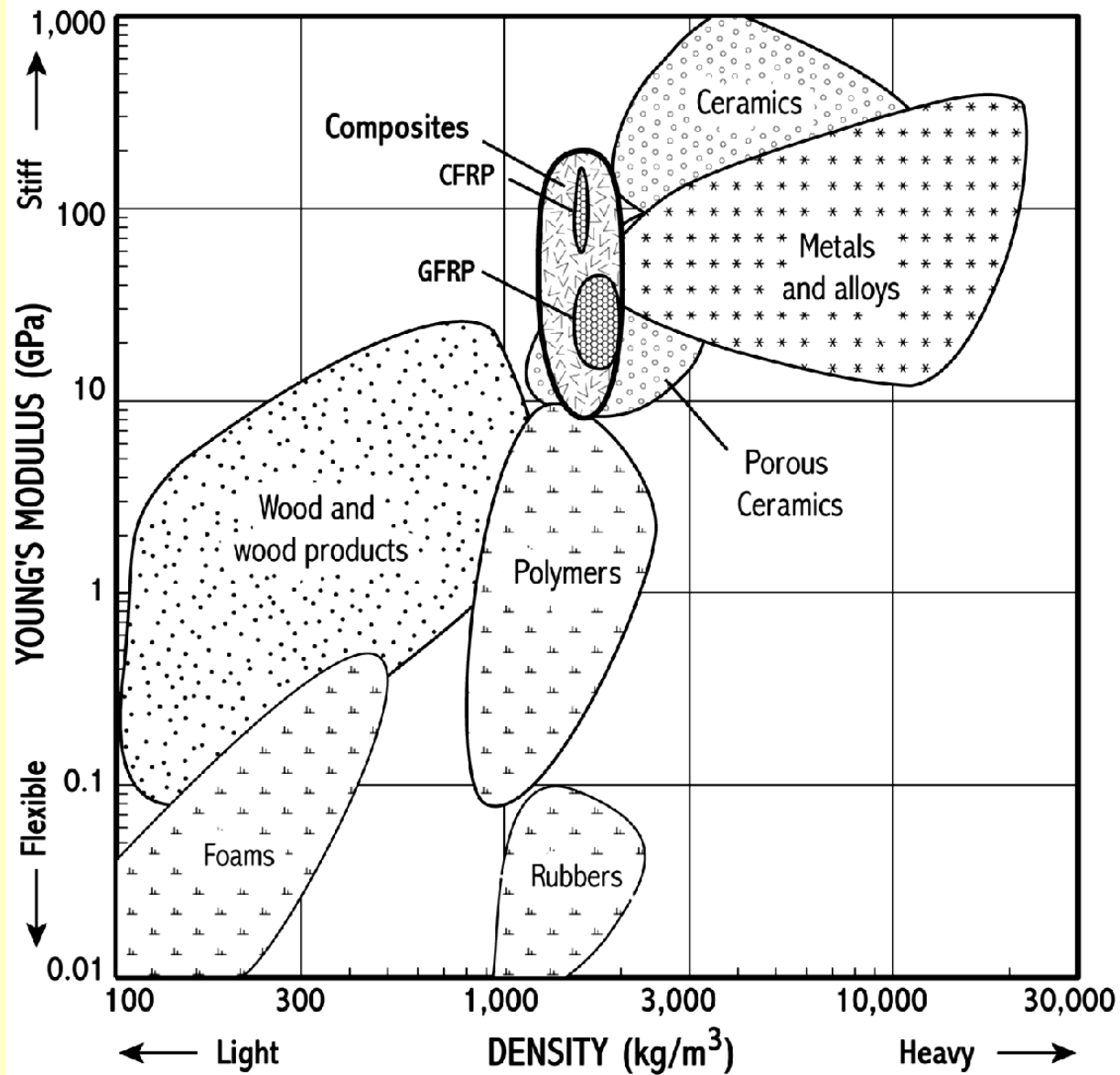
$$m = \frac{\pi d^2}{4} L \rho$$

$$m = \frac{L^4 F}{3d^2 \Delta y} \cdot \frac{\rho}{E}$$

$$M = \frac{E}{\rho} \longrightarrow \text{maksymalizować}$$



RYСУNEK 4.2. WYKRES 1: Moduł Younga E w zestawieniu z gęstością ρ . Obszary obwiedzione grubymi liniami zawierają dane dla poszczególnych rodzajów materiałów. Linie ukośne łączą materiały, w których prędkość rozchodzenia się fali podłużnej jest jednakowa. Linie przewodnie odpowiadające stałej wartości wskaźników E/ρ , $E^{1/2}/\rho$, $E^{1/3}/\rho$ umożliwiają dobór materiałów na konstrukcje o minimalnej masie i ograniczonym odkształceniu



Formula 100

To najlżejszy maszt oferowany jak dotąd przez Naish Sails - 100 % carbon. Konstrukcja stworzona jest w technologii "tip-and-tip/base-and-base", która zapewnia niską wagę i dużą wytrzymałość przy obniżonym środku ciężkości.

Formula 100 430 - **IMCS** 21 - 1.6 kg

Formula 100 460 - **IMCS** 25 - 1.7 kg

Formula 100 490 - **IMCS** 29 - 1.9 kg

Formula 100 520 - **IMCS** 34 - 2.2 kg

Aeromax

To wysokiej klasy maszt wave/freeride. 75 % zawartości carbonu. Szeroka podstawa masztu pozwala zastosować go do wszystkich standartowych stóp masztowych. Unikalna konstrukcja zwęża się od miejsca powyżej mocowania na bom aż do samego topu.

Aeromax 370 - **IMCS** 17 - 1.6 kg

Aeromax 400 - **IMCS** 19 - 1.8 kg

Aeromax 430 - **IMCS** 21 - 1.9 kg

Aeromax 460 - **IMCS** 25 - 2.1 kg

Design 1 (to be considered for a weekend sailor):

Force 3 wind

Required modulus - > 10 GPa

Required strength - > 100MPa

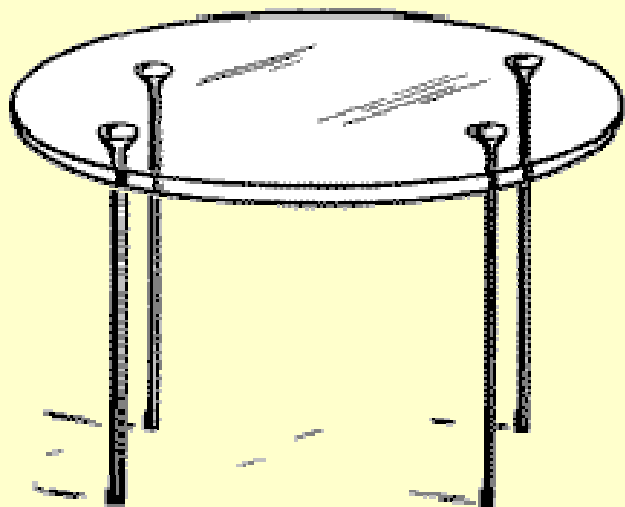
Design 2 (applies to competition masts):

Force 5 wind and above

Required modulus - > 100 GPa

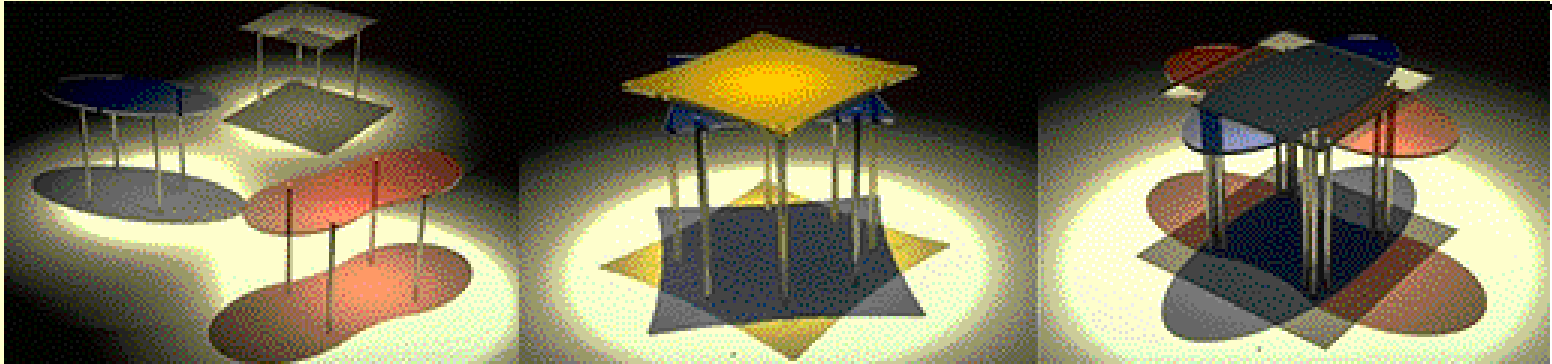
Required strength - > 1GPa

Nogi stołowe



Stół z wysmukłymi cylindrycznymi nogami. Lekkość i smukłość nóg jest wymaganiem projektanta

FUNKCJA	Podparcie blatu stołu, przenoszenie obciążenia
OGRANICZENIE	Nie może nastąpić wyboczenie
CEL	Minimalizacja masy i maksymalizacja smukłości



Karim Rashid Industrial Design

"Aura" Coffee Table. (1990)

Sandwich of glass sheets and colored PMMA (polymethyl-metacrylate) film, steel rods, and redwood

Noga – smukła kolumna wykonana z materiału o gęstości ρ i module E .

Długość l i maksymalne obciążenie P , jakie musi przenosić – ustalone w założeniach projektowych.

Promień nogi R – zmienna swobodna .

Żądamy minimalnej masy danej jako:

$$m = \pi R^2 l \rho$$

Krytyczne obciążenie P_{crit} wywołujące wyboczenie kolumny:

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = \frac{\pi^3 ER^4}{4l^2}$$

$I = \pi R^2/4$ to geometryczny moment bezwładności powierzchni przekroju kolumny względem osi. Po obliczeniu R z tego równania i wstawieniu do zależności na m :

$$m \geq \left(\frac{4P}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} (l)^2 \left[\frac{\rho}{E^{\frac{1}{2}}} \right]$$

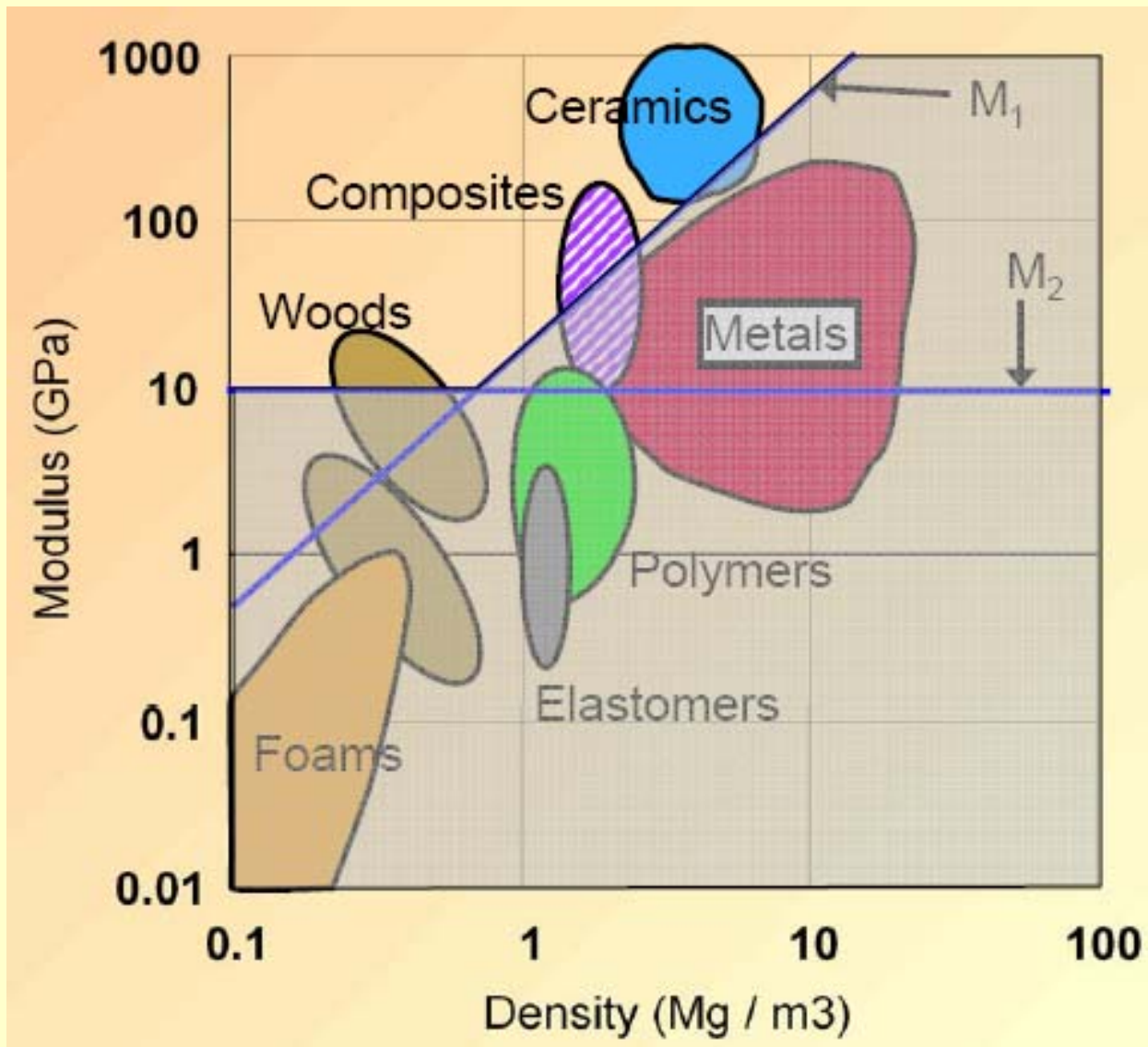
Własności materiałowe zawiera ostatni człon równania.

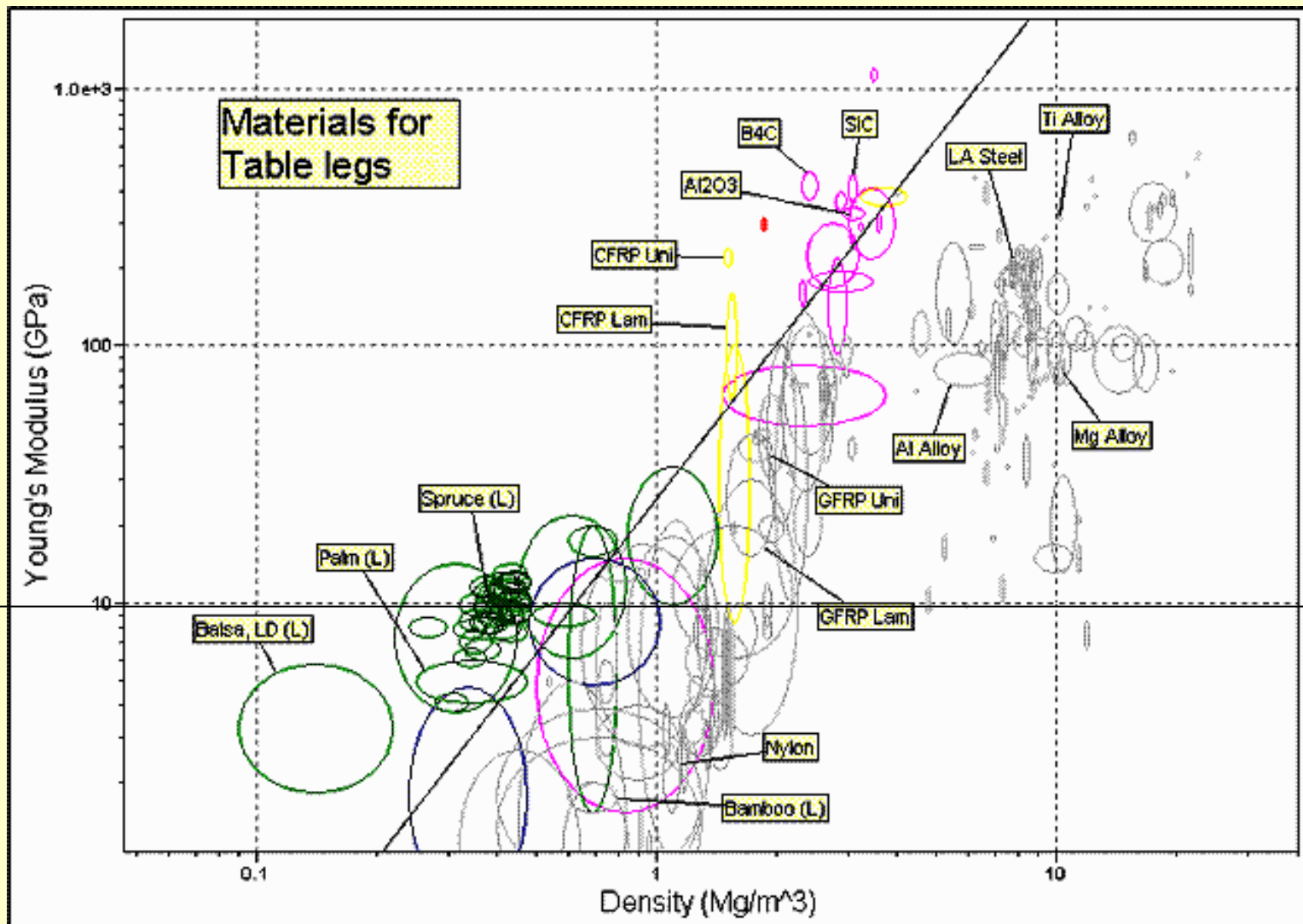
Masa jest minimalizowana dla materiałów o największej wartości wskaźnika M_1

$$M_1 = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho}$$

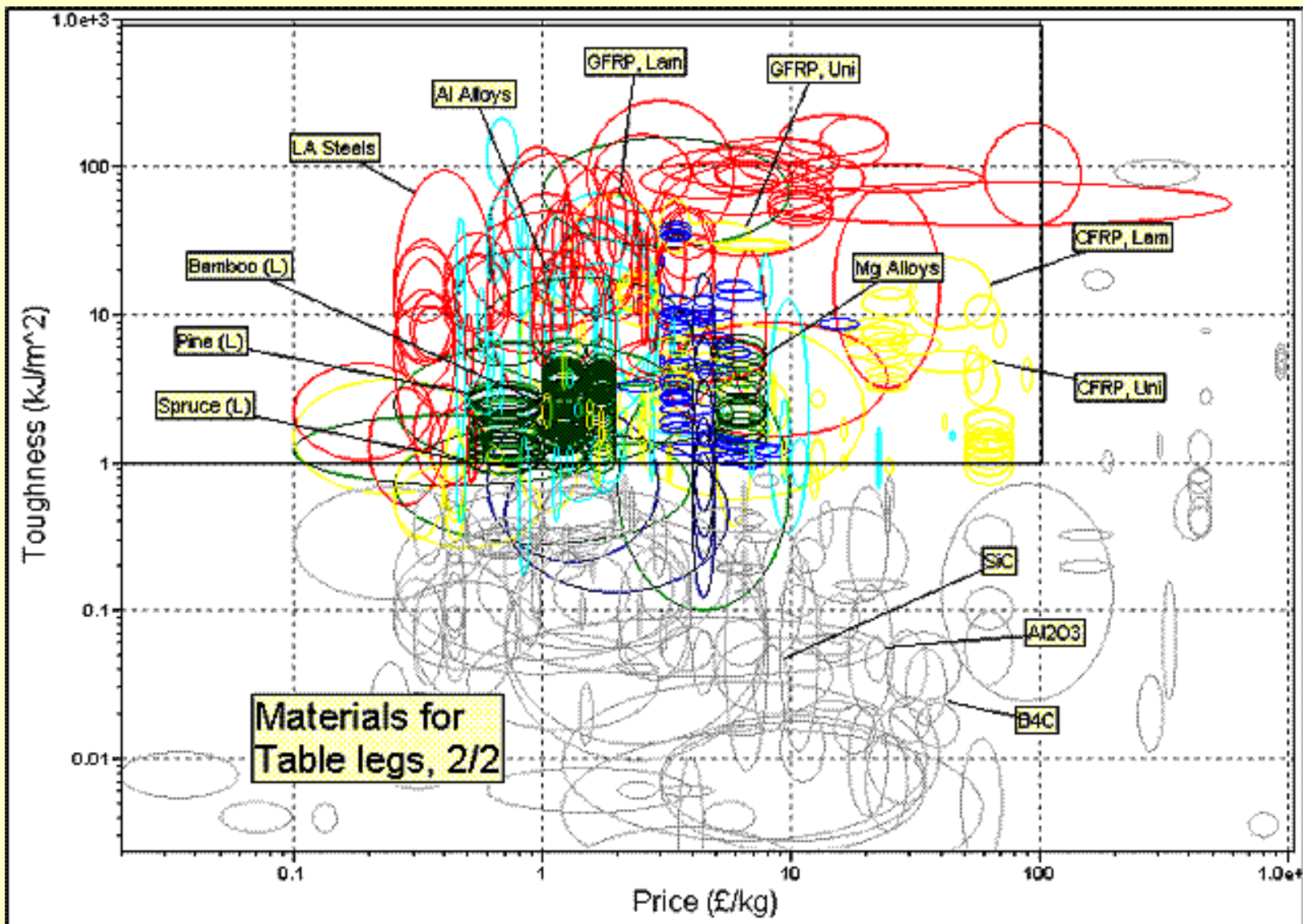
Smukłość – obliczenie R wg zależności $P \leq P_{crit}$

$$R = \left(\frac{4P}{\pi^3} \right)^{\frac{1}{4}} (l)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{E} \right)^{\frac{1}{4}} \longrightarrow M_2 = E$$





Materiały na lekkie nogi



Materiały odporne na kruche pękanie i tanie

Wybór

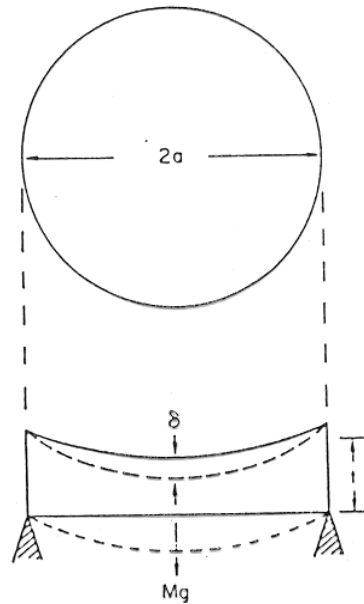
Material	$\rho/E^{1/2}$	$E^{-1/4}$	M_1	M_2	Uwagi
Drewno	0,125÷0,2	0,47÷0,84	5÷8	2÷20	Tanie, tradycyjne, niezawodne
CFRP	0,125÷0,25	0,266÷0,427	4÷8	30÷200	Drogie
GFRP	0,182÷0,286	0,325÷0,472	3,5÷5,5	20÷90	Tańsze niż CFRP, gorsze własności
Ceramika inżynierska	0,125÷0,25	0,178÷0,286	4÷8	150÷1000	Krucha!

ZWIERCIADŁO TELESKOPU

Wymagania dotyczące zwierciadła

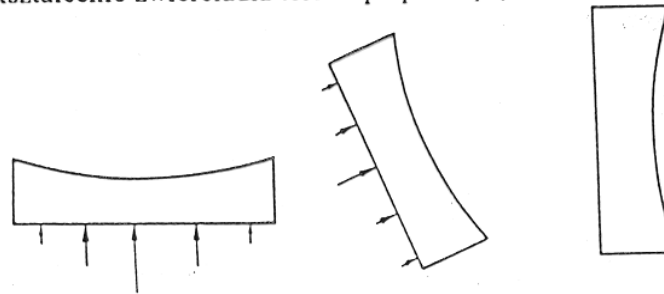
- Zwierciadło o średnicy 6 m (zrobione ze szkła pokrytego warstwą srebra o grubości 100 nm- ok. 30g) ma grubość ok. 1 m i waży 70 ton.
- Koszt teleskopu ok. 180 mln \$; koszt zwierciadła ok. 5% całej sumy (zmienia się proporcjonalnie do *kwadratu masy zwierciadła*)
- Odkształcenia sprężyste konstrukcji rzędu długości fali światła

Schemat odkształceń zwierciadła



$$\delta \leq 1\mu\text{m}$$

Rys. 7.2. Sprężyste odkształcenie zwierciadła teleskopu pod wpływem własnej masy



Rys. 7.3

Wzory na sprężyste odkształcenia płyt i belek pod wpływem własnej masy można znaleźć w podręcznikach mechaniki konstrukcji. Tutaj potrzebny nam jest tylko jeden wzór: na odkształcenie δ środka poziomego dysku pod wpływem masy własnej

$$\delta = \frac{3}{4\pi} \frac{mga^2}{Et^3}$$

poszukujemy minimalnej masy dla ustalonych wielkości $2a = 5\text{m}$ i $\delta = 10\mu\text{m}$. Grubość t to dodatkowa zmienna, którą można wyrazić:

$$m = \pi a^2 t \rho \qquad t = \frac{m}{\pi a^2 \rho}$$

Po podstawieniu t do wzoru na odkształcenie:

$$\delta = \frac{3}{4\pi} \frac{mga^2}{E} \frac{\pi^3 a^6 \rho^3}{m^3}$$

stąd masa:

$$m = \left(\frac{3g}{4\delta} \right)^{1/2} \pi a^4 \left(\frac{\rho^3}{E} \right)^{1/2}$$

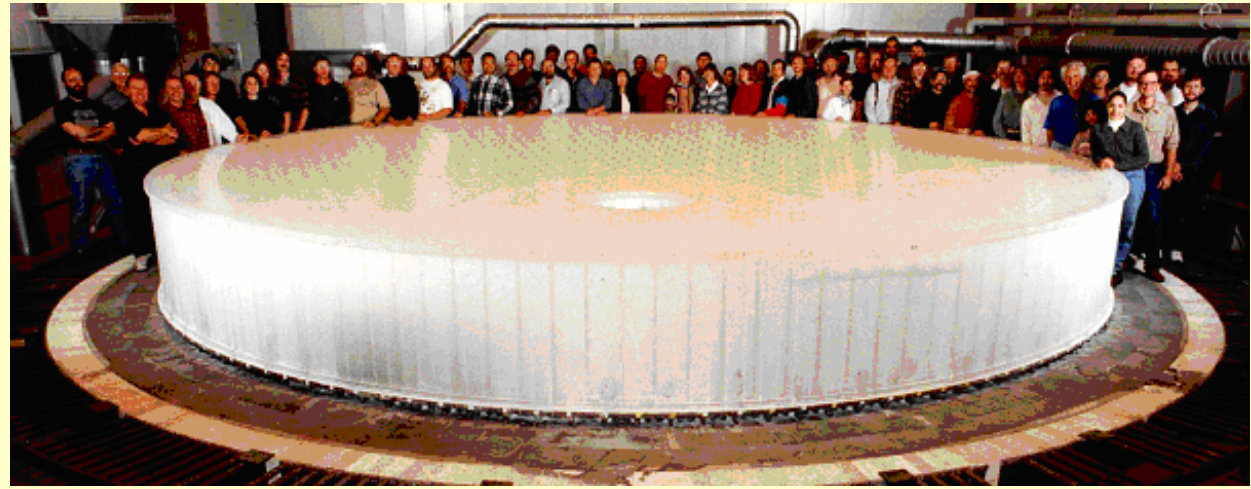
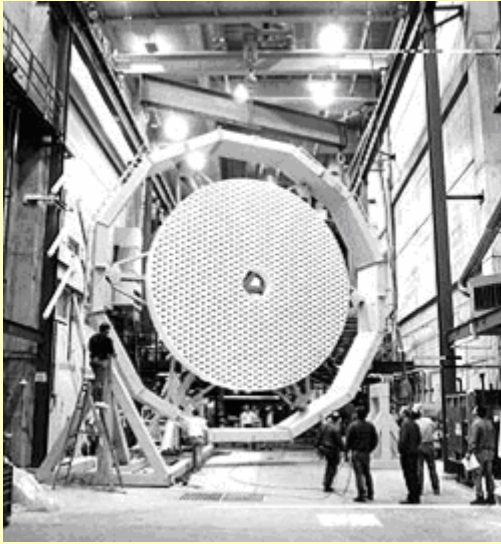
Najłżejsze zwierciadło będzie wykonane z materiału o **największej wartości** wskaźnika funkcjonalności:

$$M = \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

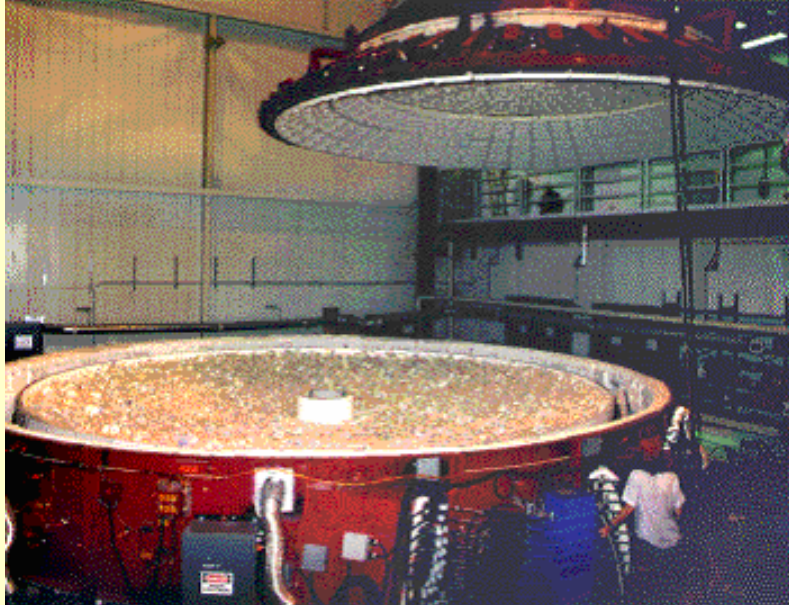
Material	E [GPa]	ρ [Mg/m ³]	M [Gpa ^{1/3} m ³ /Mg]	m [Mg]	t [m]	uwagi
Stal lub speculum (Cu- Sn)	200	7,8	0,7	158	1,0	bardzo ciężkie; stosowane w przeszłości
Beton	47	2,5	1,4	56	1,2	Ciężki; pełzanie, odkształcenia cieplne
Stopy Al	69	2,7	1,5	53	1,0	Ciężkie; duża rozszerzalność cieplna
Szkło	69	2,5	1,6	48	0,97	Stosowane obecnie
GFRP	40	2,0	1,7	44	1,1	Niewystarczająca stabilność wymiarowa
Stopy Mg	42	3,5	2,1	38	0,6	Lżejsze niż szkło; duża rozszerzalność cieplna
Drewno	12	0,6	3,6	14	1,2	Niestabilne wymiarowo
Pianki polistyrenowe	0,06	0,1	3,9	13	6,6	?
CFRP	270	1,5	4,3	11	0,38	bardzo lekkie; niestabilne wymiarowo; (stosowane na radioteleskopy)

Współczesne teleskopy

Name	Diameter	Site	Built
Southern African Large Telescope SALT	11.0 m	Sutherland, South Africa	2005
Gran Telescopio Canarias (GTC)	10.4 m	La Palma, Canary Islands	2005
Keck*	9.8 m	Mauna Kea Hawaii	1993
Keck 2*	9.8 m	Mauna Kea, Hawaii	1996
Hobby-Eberly Telescope (HEB)	9.2 m	Mt Fowlkes, Texas	1997
Large Binocular Telescope (LBT)	2x8.4 m	Mt Graham Arizona	2004
Subaru (NTL)**	8.3 m	Mauna Kea, Hawaii	1999
VLT 3 (Melipal)	8.2 m	Cerro Paranal, Chile	2000
VLT 4 (Yepun)	8.2 m	Cerro Paranal, Chile	2001
Gemini North	8.1 m	Mauna Kea, Hawaii	1999
Gemini South	8.1 m	Cerro Pachón, Chile	2001
Multiple Mirror Telescope (MMT)	6.5 m	Mt Hopkins, Arizona	1999
Magellan	6.5 m	Las Campanas, Chile	1998
BTA-6	6 m	Mt Pastoukhov, Caucasus	1976
LZT	6 m	Maple Ridge, Brit. Columbia	2003
Hale Telescope	5 m	Mt Palomar, California	1948
William Herschel Telescope	4.2 m	La Palma, Canary Islands	1987



Mount Graham, Arizona, teleskop podwójny, składający się z 2 zwierciadeł każde o średnicy 8,4 m, zainstalowane na tej samej konstrukcji wspornikowej. Zwierciadła, wykonane ze szkła krzemoborowego, mają strukturę plastra miodu. 20 ton stopionego szkła poddane zostało rotacji w formie, w celu nadania odpowiedniego kształtu powierzchni (pozwoliło to na zaoszczędzenie ok. 56 ton szkła i 2 lat pracy nad wyszlifowaniem powierzchni). Dla zmniejszenia masy, przy zachowaniu odpowiedniej sztywności, w formie umieszczono 1700 heksagonalnych bloczków ceramicznych, które o ochłodzeniu zwierciadła zostały usunięte pozostawiając puste przestrzenie. Masa każdego zwierciadła to 15,6 tony. Tradycyjne, lite, o tych wymiarach ważyłoby 200 ton.



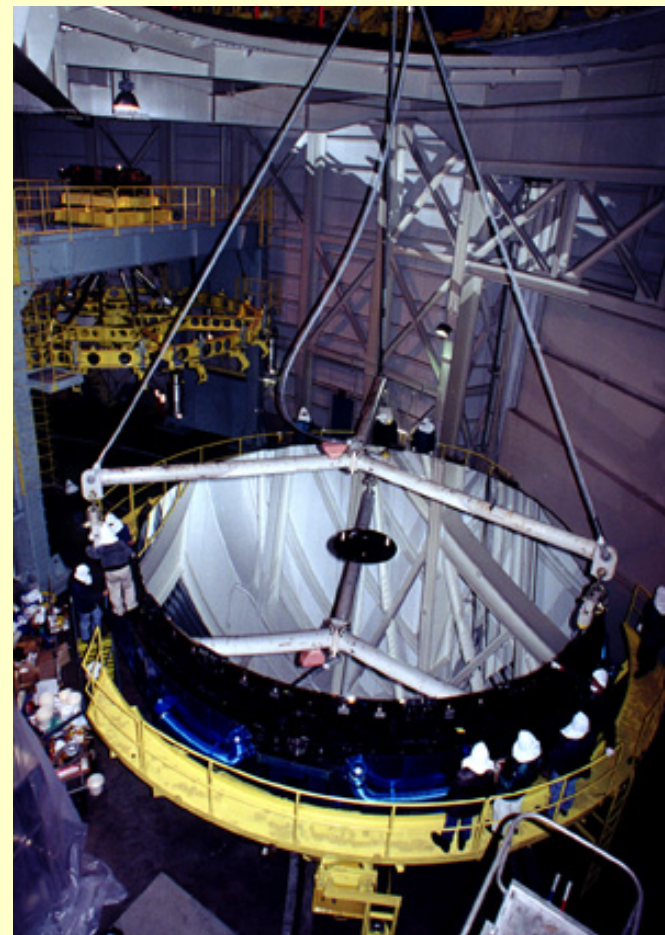
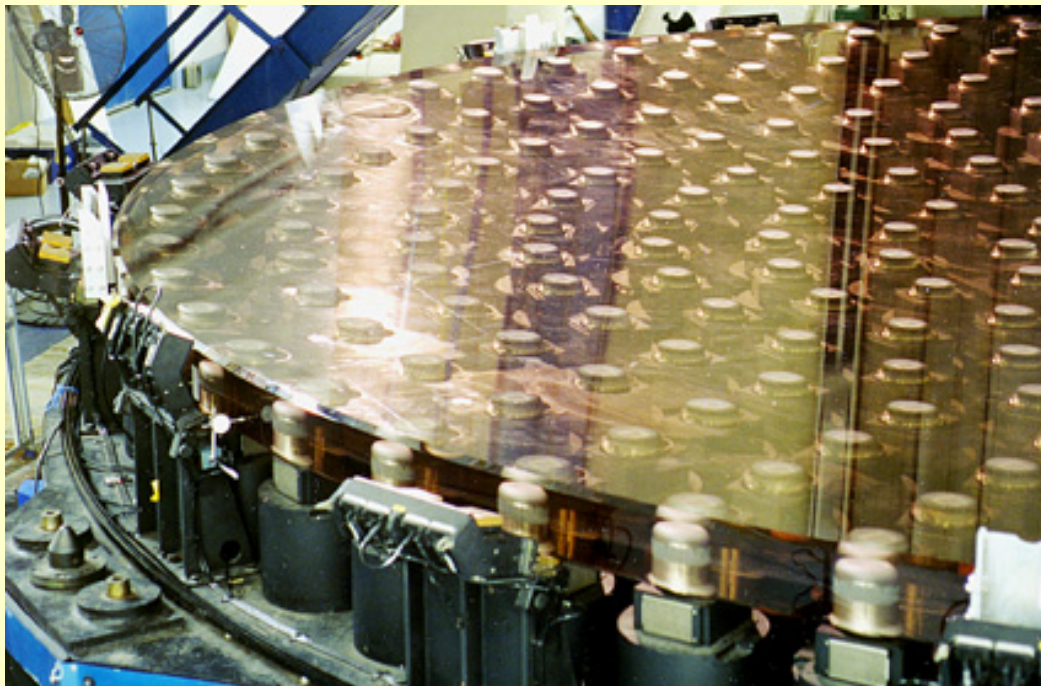
← „wirowanie” szkła



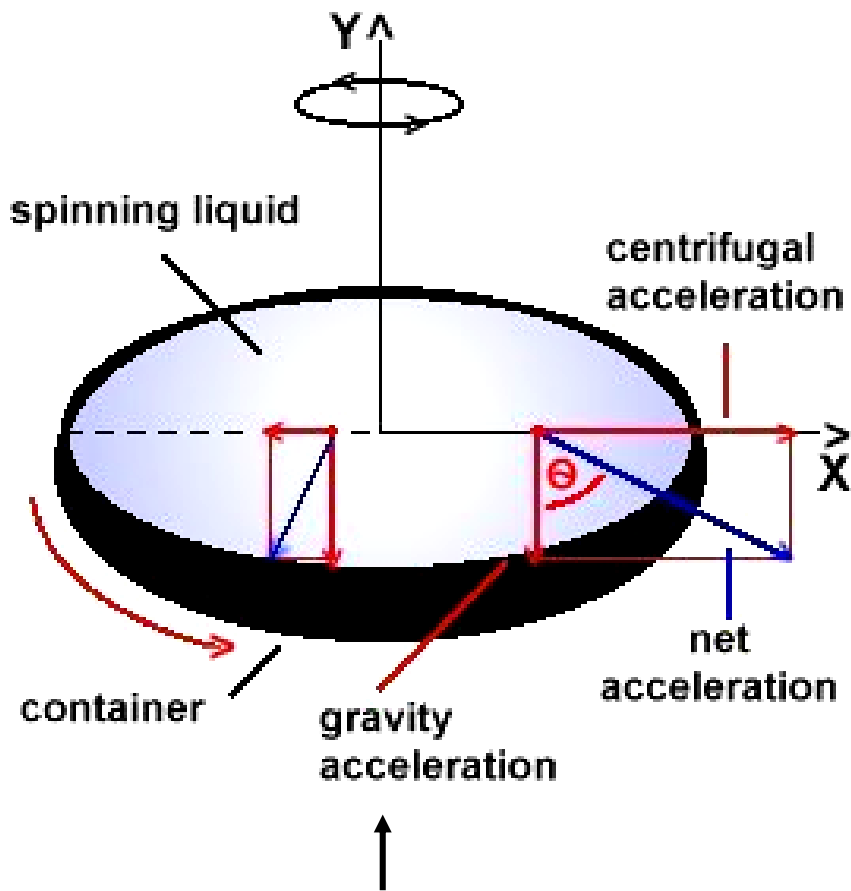
Konstrukcja teleskopu →



Teleskopy KECK`A – oddalone od siebie o 85 metrów i każdy o masie 300 ton, nie są zbudowane z jednego bloku szkła lecz z 36 sześciokątnych ruchomych płytek. Złożone razem dają lustro o średnicy 9,82 metra. Właściwe ułożenie płytek lustra koryguje dwa razy w ciągu sekundy system komputerowy.

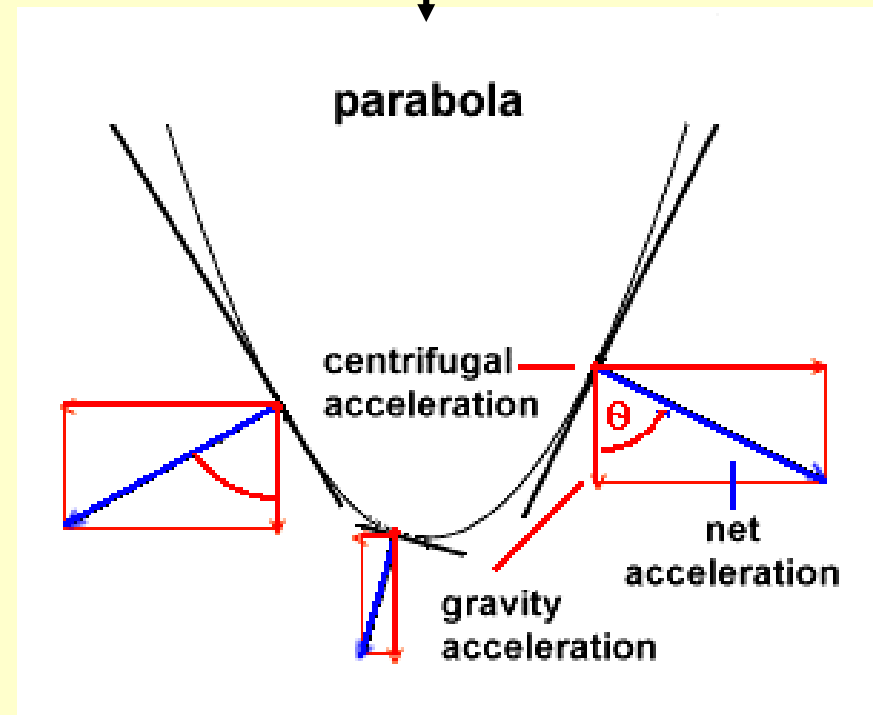


SUBARU – lustro o średnicy 8,3 metra to cienka płyta szklana, ma grubość zaledwie 20 centymetrów i przyjmuje właściwy kształt dzięki systemowi ruchomych wsporników sterowanym przez komputer. Modelują one ten „szklany naleśnik” tak, aby obrazy obiektów astronomicznych były jak najostrzejsze. Średni błąd powierzchni $0,014 \mu\text{m}$. Masa teleskopu 500 ton. Na zdjęciu lustro bez powłoki, widoczne wsporniki.



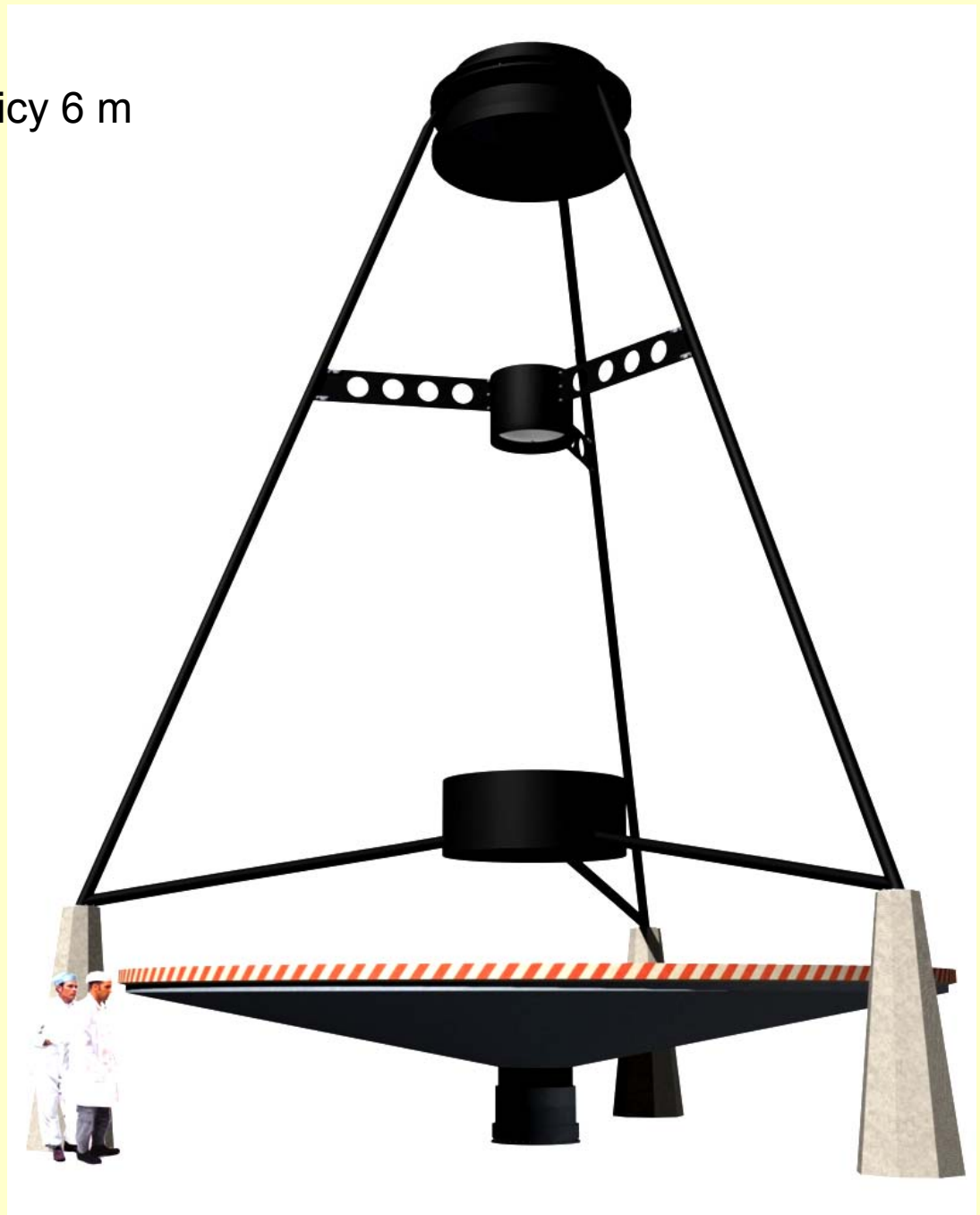
Sily oddziaływające na ciecż podczas ruchu obrotowego

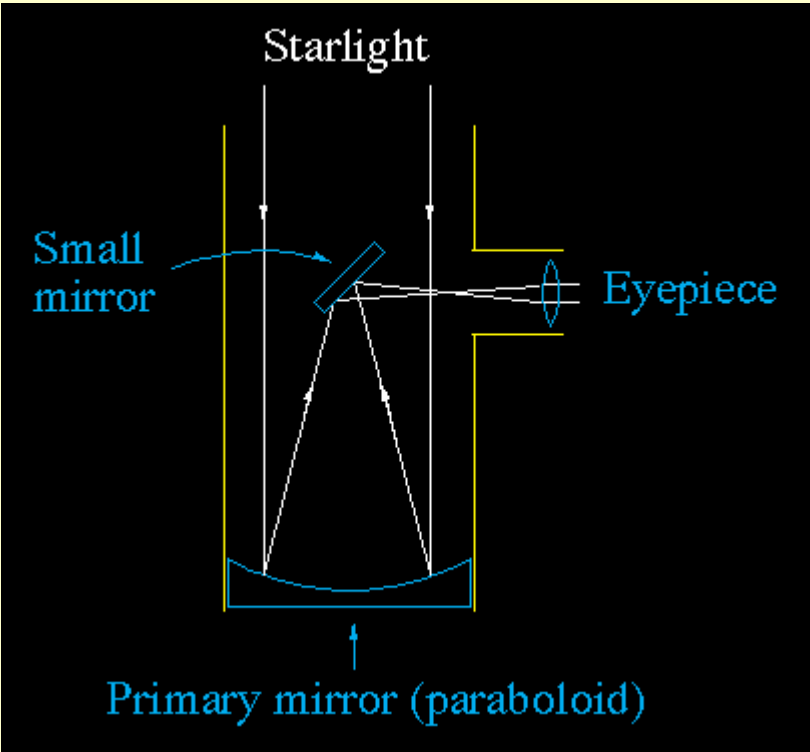
Paraboliczne ukształtowanie powierzchni ciecży – rozkład sił dla pojedynczej cząstki substancji

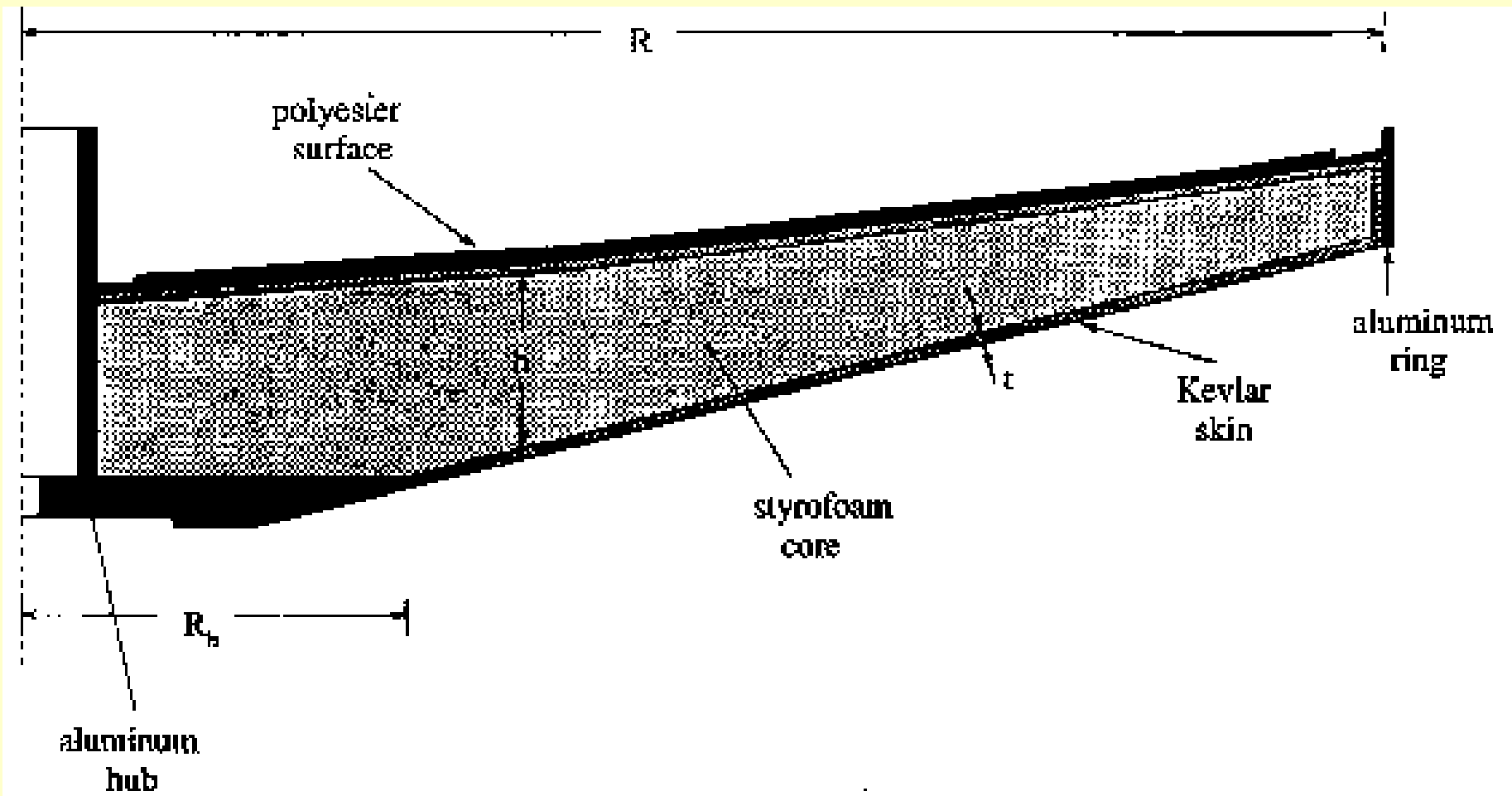


Projekt zwierciadła o średnicy 6 m

ALPACA -
Advanced Liquid-
mirror Probe for
Astrophysics,
Cosmology and
Asteroids







Budowa "talerza" dla zwierciadeł o średnicy 2-4 m

The Large Zenith Telescope

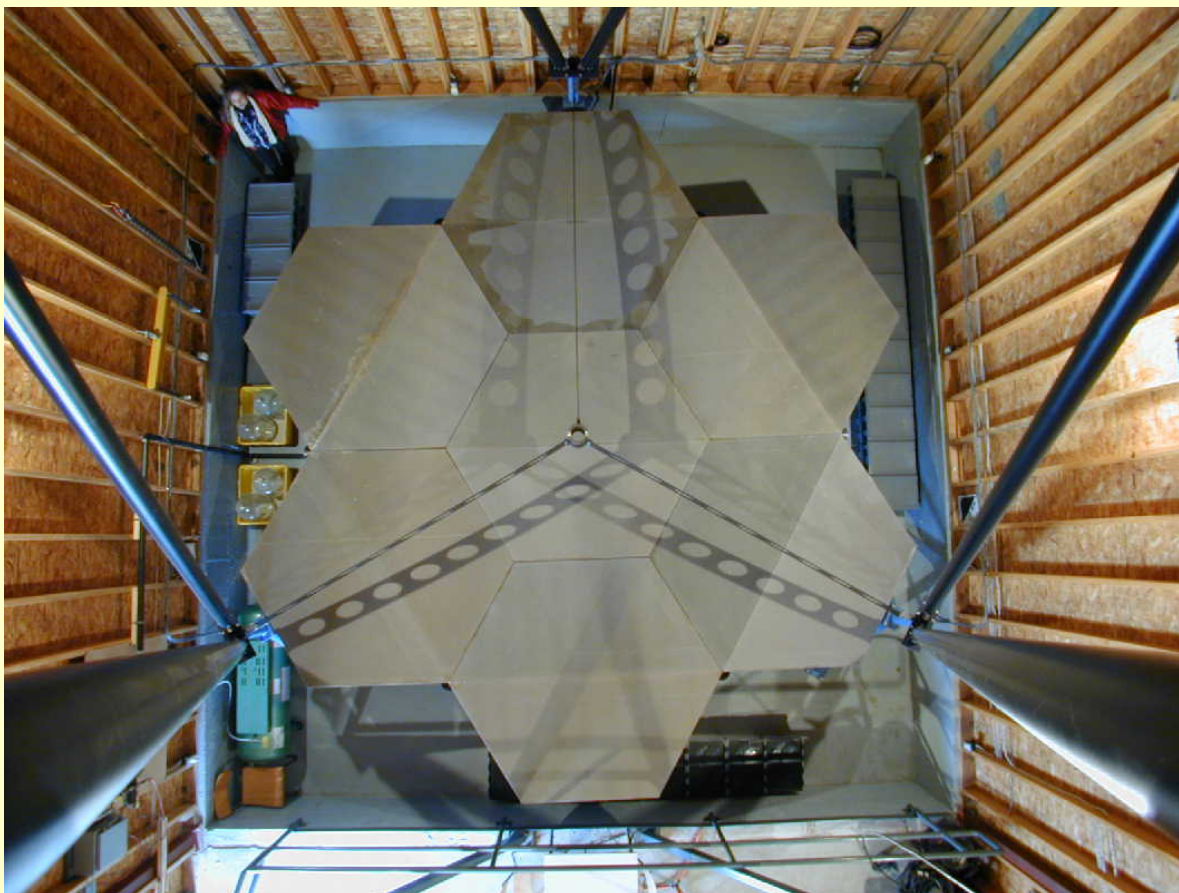


Łóżysko główne- pneumatyczne

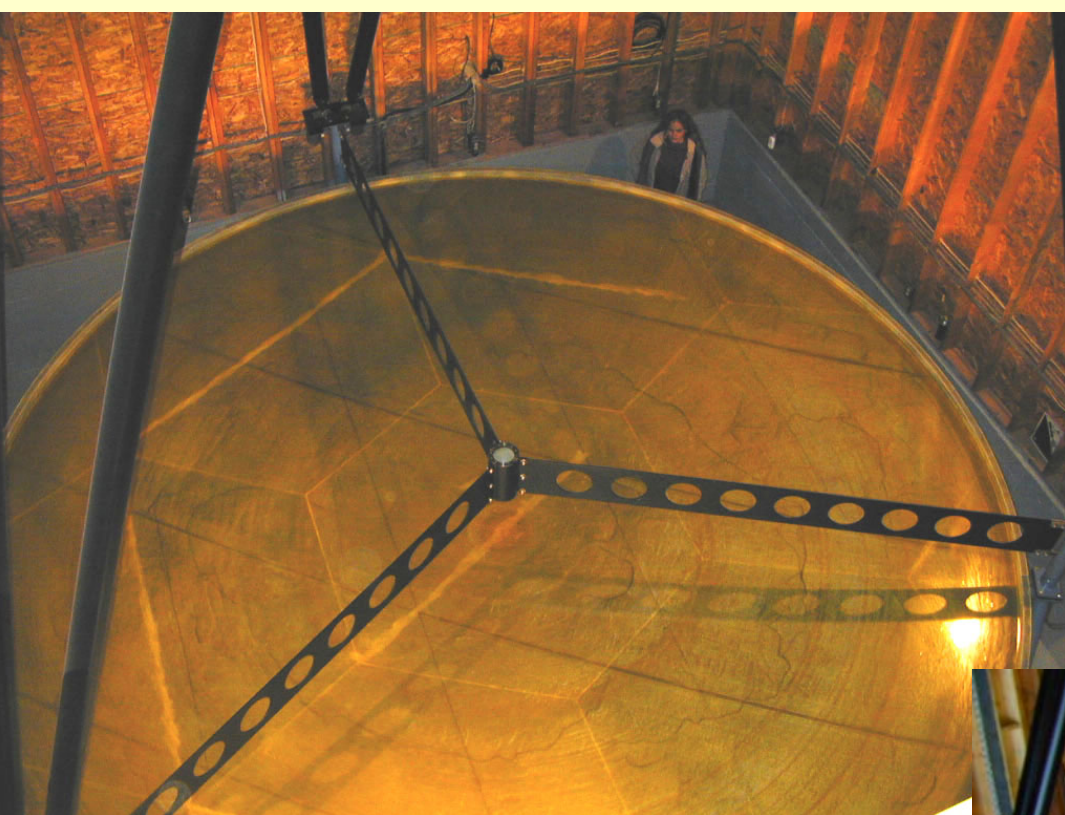


System podparcia lustra - niebieski.

British Columbia's Fraser Valley

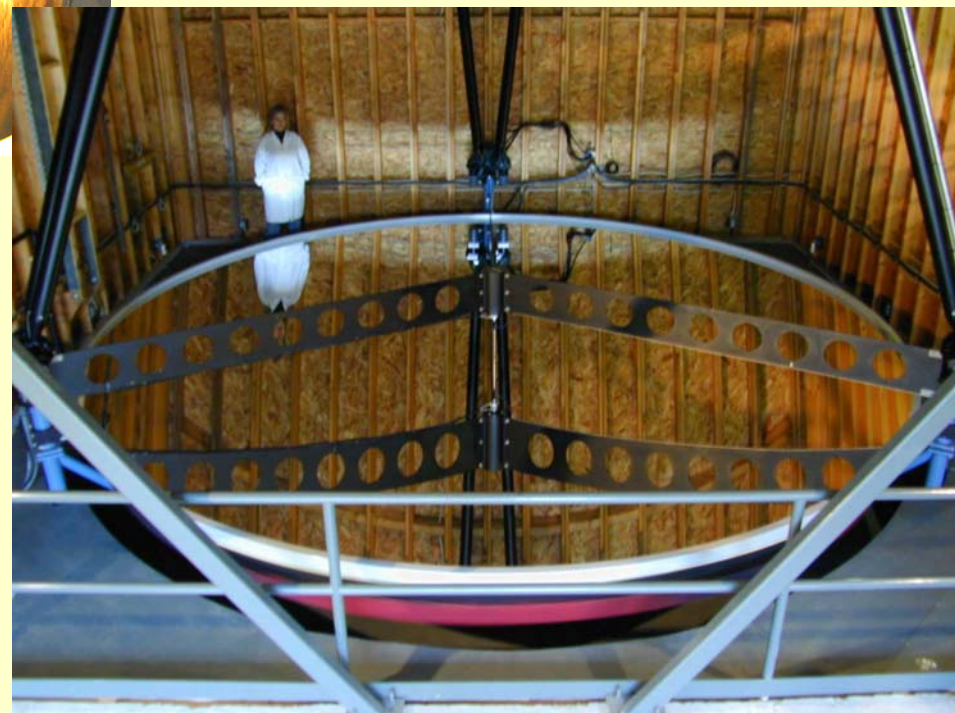


Widok z góry – siedem głównych heksagonalnych segmentów do formowania powierzchni zwierciadła. Sześć mniejszych trójkątnych sekcji uzupełni okrąg.



Pierwsze testy lustra

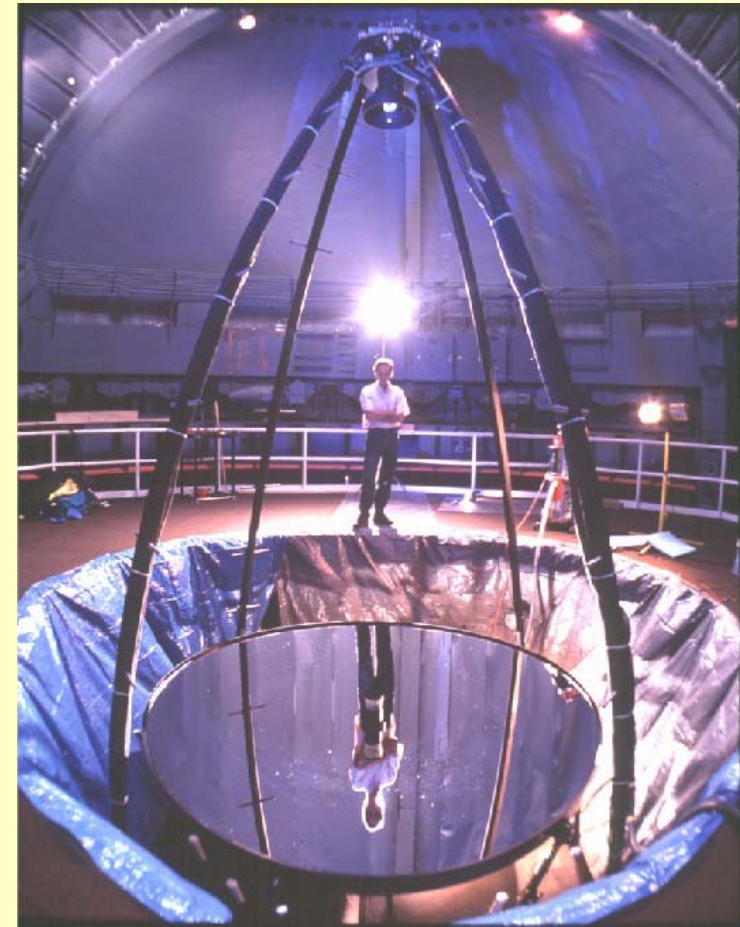
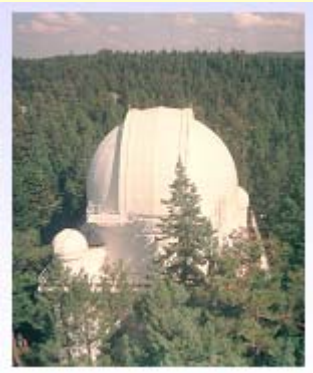
Gotowe lustro



Large Zenith Telescope

- 6.0m f/1.5 LMT with 2Kx2K PF CCD
- Maple Ridge, BC, 400m MSL





3.0 m NASA Liquid Mirror. Prękość obrotowa 1.043 radian/sek. ;
14 litrów Hg , warstwa 1,6 mm

Liquid-Mirror Development

- 2003 - 6.0 m Large Zenith Telescope
- 2009 - 4.0 m International Liquid Mirror Telescope
- 2009 - 8.0 m ALPACA Telescope
- 2013 - 13.9 m LAMA Prototype Telescope
- 2018 - 51.8 m Large Aperture Mirror Array