

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA STROJNÍ**

**KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ**

# **Optimalizace výběru materiálů v průběhu konstrukčního procesu**

Disertační práce

Autor: Ing. Ivana Mazínová  
Školitel: doc. Ing. Jaroslav Krátký, Ph.D.  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení

Plzeň, 2016

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité prameny a literaturu, ze kterých jsem čerpala.

V Plzni dne

.....

podpis

**UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA**  
**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF MACHINE DESIGN**

# **Optimising materials selection during the design process**

Doctoral Thesis

Author: Ing. Ivana Mazínová  
Supervisor: doc. Ing. Jaroslav Krátký, Ph.D.  
Study program: Mechanical Engineering  
Field of study: Design of Machines and Equipment

Pilsen, 2016

## **Declaration**

I declare that I carried out this doctoral thesis independently and cited all used sources and literature.

In Pilsen date

.....

Signature



**ANOTACE:**

Disertační práce pojednává o problematice výběru materiálů v průběhu konstrukční fáze životního cyklu produktu. Obecná část disertační práce vysvětluje principy konstrukčního procesu. Z této části vyplývá, že materiál ovlivňuje velmi podstatnou část celkových vlastností produktu a to včetně jeho celkové ceny. Přesto dosud výběr materiálů probíhá nesystematicky.

Těžištěm disertační práce je objasnění metodiky výběru materiálů. Výběr materiálů je postupně veden na základě konstrukčních požadavků. Ty se převedou na funkci, omezení, cíle a volné proměnné. Omezení nastavují meze vlastností materiálů. Cíle definují materiálové indikátory, pro které se hledají extrémní hodnoty. V disertační práci je vysvětlen princip odvození materiálových indikátorů.

Metodika výběru materiálů je v disertační práci vyzkoušena na příkladu výběru optimálního materiálu pro rám jízdního kola. V této části práce je ještě vysvětlen princip tzv. tvarového faktoru. Tvarové faktory jsou měřítko efektivnosti užití materiálů.

Cílem disertační práce je rozšířit dosavadní metodiku „Systémového navrhování technických produktů“ o metodiku „Systémového výběru materiálů v průběhu navrhování technických produktů“.

**KLÍČOVÁ SLOVA:**

výběr materiálů; konstrukční proces; vlastnosti materiálů; mapy vlastností materiálů; materiálové indikátory; tvarový faktor; CES (Cambridge Engineering Selector)

**ANNOTATION:**

The thesis deals with the selection of materials during the design phase in the life cycle of a product. The general part of the thesis explains the principles of the design process. From this it follows that materials have a considerable influence on the overall properties of a product, including total cost but, despite this, the selection of materials has until now been unsystematic.

The core of the thesis is the clarification of the methodology for materials selection. Materials selection is conducted on the basis of design requirements. These are converted to functions, constraints, objectives and free variables. Constraints set the limits of the material properties. The objectives define the material indices for which extreme values are sought. The thesis explains the principles for the derivation of material indices.

The methodology for materials selection is tested on the example of the selection of the optimal material for a bicycle frame. This part of the thesis also explains the principle of the 'shape factor'. Shape factors are gauges of the efficiency of the material used.

The goal of this thesis is to expand the existing methodology 'Systematic design engineering' to 'Systemic materials selection during the design of a technical product'.

**KEYWORDS:**

Materials selection; design process; material properties; material property charts; material indices; shape factors; CES (Cambridge Engineering Selector)

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěla poděkovat všem, kteří mě byli nápomocni a podporovali mě při zpracování a dokončení této práce. Děkuji svému školiteli, doc. Ing. Jaroslavovi Krátkému, Ph.D., za trpělivost.

Tato práce vznikala s podporou projektu SGS – 2013 – 050 „Komplexní podpora konstruování technických zařízení II“.

# Obsah

Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	12
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	13
1. Úvod .....	1
2. Proces konstruování – teoretické východisko.....	2
2.1. Obecný popis.....	2
2.2. Fáze procesu konstruování.....	4
2.3. Systémové navrhování technických produktů .....	7
2.4. Cíle disertační práce .....	15
3. Materiály a jejich vlastnosti .....	17
3.1. Vlastnosti konstrukčních materiálů.....	17
3.1.1. Fyzikální a mechanické vlastnosti .....	17
3.1.2. Tepelné vlastnosti .....	20
3.1.3. Elektrické, magnetické a optické vlastnosti .....	21
3.1.4. Chemické vlastnosti.....	23
3.2. Informace o materiálech - databáze .....	24
3.2.1. Získávání informací o vlastnostech materiálů.....	24
3.2.2. Databáze materiálů .....	26
3.3. Granta Design - CES.....	29
3.4. Rozdělení materiálů .....	33
3.5. Mapy vlastností materiálů.....	35
4. Metodika výběru materiálů.....	38
4.1. Vztah mezi procesem konstruování a výběrem materiálů.....	38
4.2. Výběr materiálů řízený konstrukčním návrhem.....	39
4.3. Materiálové indikátory.....	40
4.3.1. Minimalizace hmotnosti: lehký pevný prut.....	41
4.3.2. Minimalizace hmotnosti: lehká tuhá deska .....	43
4.3.3. Minimalizace hmotnosti: lehký tuhý nosník .....	45
4.3.4. Minimalizace nákladů na materiál: levné pruty, desky a nosníky.....	47
4.3.5. Materiálové indikátory obecně .....	48
4.4. Postup (strategie) výběru materiálů .....	50
4.4.1. Převedení konstrukčních požadavků a odvození indikátoru.....	53

4.4.2. Vyšetření: aplikace limitů atributů .....	54
4.4.3. Seřazení: materiálové indikátory v mapě.....	55
4.4.4. Prozkoumání dokumentace .....	58
5. Aplikace metodiky výběru materiálů na příkladu .....	60
5.1. Úvod .....	60
5.2. Definování konstrukčních požadavků .....	60
5.2.1. Mechanická zatížení .....	60
5.2.2. Cena versus hmotnost.....	62
5.2.3. Další konstrukční omezení .....	62
5.3. Převedení konstrukčních požadavků do materiálových indikátorů .....	63
5.3.1. Cíl: minimální hmotnost .....	64
5.3.1.1. Pevně daný rádius trubky ( $R$ ) .....	65
5.3.1.2. Pevně daný poměr poloměru a tloušťky stěny ( $R/t$ ).....	66
5.3.2. Cíl: minimální cena .....	68
5.3.2.1. Pevně daný rádius trubky ( $R$ ) .....	68
5.3.3. Shrnutí.....	68
5.4. Výběr materiálů.....	69
5.4.1. Příklad 1 – minimální hmotnost - pevně daný rádius trubky ( $R$ ) .....	70
5.4.2. Příklad 2 – minimální hmotnost - pevně daný poměr poloměru a tloušťky stěny ( $R/t$ ).....	71
5.4.3. Příklad 3 – minimální cena - pevně daný rádius trubky ( $R$ ) .....	73
5.5. Zobecnění metody výběru materiálu v závislosti na tvaru průřezu.....	75
5.6. Příklad použití obecné metody .....	79
6. Závěr.....	83
6.1. Zhodnocení dosažených výsledků disertační práce .....	83
6.1.1. Rešerše současného stavu poznání.....	83
6.1.2. Analýza zjištěného stavu poznání .....	83
6.1.3. Integrace zjištěných poznatků.....	84
6.1.4. Validace zjištěných poznatků .....	84
6.2. Doporučení pro pokračování práce.....	85
6.3. Shrnutí.....	85
Citovaná literatura .....	87
Seznam publikovaných prací.....	91
Příloha – Materiálové a procesní mapy (54) .....	93

## Seznam obrázků

Obr. 1 Průběh ovlivněných a vzniklých nákladů produktu během konstrukčního procesu (1) .....	3
Obr. 2 Vývojový diagram konstrukčního procesu (2) .....	5
Obr. 3 Vstup konstrukčních nástrojů do vývojového diagramu konstrukčního procesu (2).....	6
Obr. 4 Model složek objektu EDS (11).....	8
Obr. 5 Řízený systém + prvky akce $\Rightarrow$ model transformace (11) .....	8
Obr. 6 Obecný model transformačního systému (TrfS) s transformačním procesem (TrfP) (11).....	9
Obr. 7 Životní cyklus jako série Transformačních procesů (TrfP) s Transformačními systémy (TrfS) v jeho hlavních životních etapách (11) .....	10
Obr. 8 Metaforické znázornění vztahů mezi vlastnostmi technického systému (14) .....	13
Obr. 9 Vzájemná závislost mezi vnitřními a vnějšími třídami vlastností technického systému (14)	14
Obr. 10 Mechanické vlastnosti (16) .....	19
Obr. 11 Tepelné vlastnosti (16) .....	21
Obr. 12 Elektrické, magnetické a optické vlastnosti (16).....	23
Obr. 13 Chemické vlastnosti (16) .....	24
Obr. 14 Schéma získávání dat o materiálových vlastnostech (2).....	25
Obr. 15 Základní organizační struktura CES EduPack databáze (47).....	31
Obr. 16 Hierarchická struktura záznamů o materiálech v datové tabulce (47) .....	32
Obr. 17 Nabídka konstrukčních materiálů (2) .....	33
Obr. 18 Sloupcová mapa modulu pružnosti. Ukazuje odlišnosti v tuhosti mezi rodinami materiálů. (47) .....	36
Obr. 19 Bublinová mapa modulu pružnosti a hustoty. Rodiny obsadily oddělené oblasti mapy (47) .....	37
Obr. 20 Vývojový diagram procesu navrhování – vstupy materiálových dat do procesu navrhování (2) .....	39
Obr. 21 Výběr materiálů řízený návrhem.....	40
Obr. 22 Základní prvky: a) prut, b) deska, c) a d) nosník (2) .....	41
Obr. 23 Specifikace funkce, cíle a omezení vede k materiálovému indikátoru. Kombinace zvýrazněných polí vede k indikátoru $E^{1/2}/\rho$ (2) .....	49
Obr. 24 Zužování prostoru pro výběr materiálů v důsledku aplikace konstrukčních omezení (16)	51
Obr. 25 Strategie výběru materiálů. Zde jsou ukázány čtyři hlavní kroky (2) (16).....	52
Obr. 26 Schematická mapa $E - \rho$ ukazující spodní hranici pro $E$ a horní hranici pro $\rho$ (47).....	55
Obr. 27 Schematická mapa $E - \rho$ s vodíciými přímkami pro tři indikátory pro lehké, tuhé konstrukce (47) .....	57
Obr. 28 Schematická mapa $E - \rho$ s vodíciými přímkami určitého materiálového indikátoru (47) ....	58
Obr. 29 Výběr materiálu založený na materiálovém indikátoru $M$ spolu s podmínkou $E > 50 GPa$ . Materiály vyskytující se v oblasti hledání postupují do další fáze procesu výběru (47) .....	59
Obr. 30 Statické zatížení rámu kola (ohyb, tlak) (49) .....	60
Obr. 31 Dynamické cyklické zatížení rámu kola (krut) (49).....	61
Obr. 32 Dynamické zatížení rámu kola (ohyb, tlak) (49).....	61
Obr. 33 Celkové zatížení rámu kola (49) .....	62
Obr. 34 Rozměry průřezu trubky.....	63
Obr. 35 Jednoduchý výpočtový model - trubka zatížená ohybem.....	64
Obr. 36 Jednoduché a složené vlastnosti (51).....	69

Obr. 37 Materiálová mapa pro pevnost a tuhost s pevně daným rádiusem $R$ , ale s volnou tloušťkou stěny trubky .....	70
Obr. 38 Materiálová mapa pro pevnost a tuhost s pevně daným poměr poloměru a tloušťky stěny ( $R/t$ ), ale s volným rádiusem .....	72
Obr. 39 Materiálová mapa pro pevnost a tuhost s pevně daným rádiusem $R$ , ale s volnou tloušťkou stěny trubky. Cílem je minimalizovat cenu .....	74
Obr. 40 Ukázka vlivu tvaru průřezu a měřítka na ohybovou tuhost (2).....	76
Obr. 41 Působení tvaru průřezu na ohybovou tuhost .....	76
Obr. 42 Mapa kompromisů pro výběr materiálu při vícenásobných konstrukčních cílech (hmotnost a cena) (2).....	82

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Třídy vlastností technických systémů (TS) (12).....	11
Tabulka 2 Základní vlastnosti konstrukčních materiálů, jejich označení a jednotky (2) .....	18
Tabulka 3 Požadavky konstrukce pro lehký pevný prut.....	42
Tabulka 4 Konstrukční požadavky pro lehkou tuhou desku.....	44
Tabulka 5 Konstrukční požadavky na lehký tuhý nosník.....	46
Tabulka 6 Příklady materiálových indikátorů (2) .....	50
Tabulka 7 Interpretace (převedení konstrukčních požadavků) (2) .....	53
Tabulka 8 Definice tvarových faktorů (2) .....	77
Tabulka 9 Horní meze empirických hodnot tvarových faktorů pro vybrané materiály (2).....	78
Tabulka 10 Materiálové indikátory s tvarovými faktory pro navrhování se stanovenou mezí tuhosti a pevnosti při minimální hmotnosti .....	79
Tabulka 11 Materiály pro rám kola (vidlici kola) (2).....	81



## Seznam použitých zkratek a symbolů

CAD	Computer-aided design (Konstruování s podporou počítače)
FEM	Finite Element Method (Metoda konečných prvků)
QFD	Quality Function Deployment (Dům kvality)
3D	Trojdimenzionální
DFM	Design for Manufacture (Konstruování s ohledem na výrobu)
DFA	Design for Assembly (Konstruování s ohledem na montáž)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Počítačová simulace dynamiky tekutin)
EDS	Engineering Design Science
TrfS	Transformační systém
TrfP	Transformační proces
TS	Technický systém
ASM	The American Society for Metals
ISO	The International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
IOM3	The Institute of Materials, Minerals and Mining
SPE	Society of Plastics Engineers
CES	Cambridge Engineering Selector
MDMC	The Material Data Management Consortium
EMIT	The Environmental Materials Information Technology
CES EduPack	Cambridge Engineering Selector Education Pack
Al/SiC	Kompozity s kovokeramickou maticí
CFRP	Kompozity s karbonovými vlákny
GFRP	Kompozity se skelnými vlákny
ANSYS	The American Computer-aided engineering software
DOE	Design of Experiments
Six Sigma	Strategie řízení původně vyvinutá společností Motorola
3P	People Planet Profit

# 1. Úvod

V disertační práci je řešen proces výběru materiálů v průběhu celého konstrukčního procesu. Výsledkem procesu výběru by měla být velmi malá množina optimálních materiálů z množiny všech konstrukčních materiálů. Optimální materiály jsou takové, které nejvíce splňují konstrukční požadavky pro daný produkt.

Tato problematika dosud nebyla řešena, respektive nebyla řešena na českých univerzitách. Z tohoto důvodu je řešena v této disertační práci. Tato skutečnost je až s podivem, neboť proces výběru materiálů hraje v průběhu konstrukčního procesu velmi významnou roli. Samotný materiál ovlivňuje kolem 80 procent vlastností produktu (1). V kontextu celého životního cyklu produktu je konstrukční proces nejdůležitější fází, protože všechny následující fáze jsou na ní přímo závislé. Jinými slovy řečeno tato fáze ovlivňuje všechny následující. Lze v ní za malé množství finančních prostředků, ve srovnání s celkovými náklady na produkt, ovlivnit všechny vlastnosti produktu včetně jeho celkových nákladů.

Řešení této problematiky je především určeno k rozšíření dosavadní metodiky „Systémového navrhování technických produktů“ o metodiku „Systémového výběru materiálů v průběhu navrhování technických produktů“. Běžně se během procesu navrhování produktu používají podpůrné nástroje, jako např. počítačem podporované navrhování (CAD) a numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí a deformací na vytvořeném fyzikálním modelu (FEM). Cílem práce je přidat k běžně používaným nástrojům i metodiku „Systémového výběru materiálů“. V tomto spočívá přínos této práce.

## 2. Proces konstruování – teoretické východisko

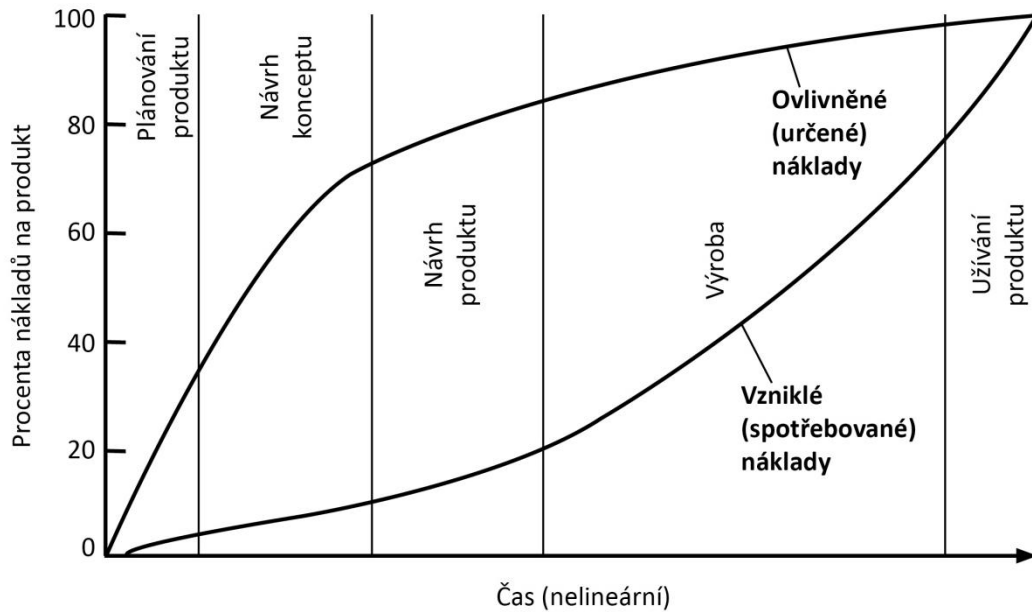
### 2.1. Obecný popis

Teoretickým východiskem pro proces výběru konstrukčních materiálů je beze sporu samotný proces konstruování.

Navrhování produktu, jinými slovy proces konstruování, představuje pro konstruktéra náročnou činnost, protože se musí zabývat převážně s nestrukturovanými spornými (diskutabilními) otázkami, které jsou důležité pro potřeby společnosti. Vytváří něco, co dříve neexistovalo, což vyžaduje volbu mezi mnoha proměnnými a parametry. Většinou musí vyvažovat více, často i protichůdných, požadavků. Proto byl proces navrhování produktu identifikován jako klíč ke konkurenceschopnému podnikání (1).

V 80 letech začaly americké firmy vážně pociťovat působení kvality produktů z Japonska, výrazně se tím snížila jejich konkurenceschopnost. Domnívali se, že tento problém vyřeší snížením cen. Důraz na snížení výrobních nákladů řešily automatizací a stěhováním firem do regionů s levnou pracovní silou. Až do té doby, než byla zveřejněna významná studie americké národní rady pro výzkum [National Research Council, “Improving Engineering Design,” National Academy Press, Washington, D.C., 1991] (1), která ukázala, že klíč ke konkurenceschopnosti produktu leží ve vysoce kvalitně provedeném konstrukčním návrhu produktu.

Důležitost konstrukční fáze je patrna z obr. 1. Ukazuje, že jen malá část z celkových nákladů na výrobu produktu (cca 5 procent) je potřeba pro pokrytí nákladů v konstrukční fázi, zatímco dalších 95 procent ceny se spotřebuje na materiály, kapitál a pracovní sílu k výrobě produktu. Ovšem, při pohledu z druhé strany, konstrukční fáze se skládá z velkého množství rozhodnutí, které následně ovlivňují 70-80 procent výrobní ceny produktu. Jinými slovy řečeno, všechna rozhodnutí prováděná po konstrukční fázi životního cyklu produktu ovlivňují pouze 20-30 procent celkové ceny produktu. Jestliže se chyba konstrukce objeví až ve fázi, kdy produkt odchází k zákazníkovi, jsou náklady na její odstranění fatálně větší, než ve fázi konstruování. Stručně vyjádřeno, *rozhodnutí dělaná během procesu konstruování stojí velmi málo ve srovnání s celkovou cenou produktu, ale mají závažný vliv na cenu produktu.*



Obr. 1 Průběh ovlivněných a vzniklých nákladů produktu během konstrukčního procesu (1)

Dobře udělaný konstrukční návrh má významný vliv nejen na cenu produktu, ale samozřejmě také na jeho kvalitu. Podle starého pojetí se prováděla kontrola kvality produktu až při jeho opouštění z výroby. Dnes už se ví, že skutečná kvalita musí být do produktu tzv. zakonstruována. Návrh produktu by měl být proveden tak, aby mohl být bezchybně vyroben za konkurenceschopnou cenu. Stručně řečeno, *ve výrobě se nemohou kompenzovat chyby zavedené v konstrukční fázi.*

Další důležitou oblastí konkurenceschopnosti produktu je doba trvání cyklu, než se produkt dostane k zákazníkovi. Zkrácení doby přinese nejen vyšší prodejnost produktu, ale zkrácením doby vývoje produktu se též ještě sníží náklady. Jednoduše shrnuto, *proces návrhu by měl být provedený tak, aby byl navrhnut kvalitní, cenově konkurenceschopný produkt, v co možná nejkratší době. Cena, kvalita a čas by měly být v rovnováze.*

Je zřejmé, že přijatelné konstrukční řešení musí splňovat požadovanou funkci a výkonnost produktu. Ale to pro dobrý návrh nestačí. Konstruování je mnohostranný proces, a proto *v dobrém návrhu by se měly brát v úvahu všechny následující oblasti:*

- dosažení výkonnostních požadavků
- problematiku životního cyklu produktu
- problematiku regulačních a sociálních hledisek

Hlavním výkonnostním požadavkem konstruování je funkce produktu, prostředí, ve kterém bude pracovat, a s tím úzce související výrobní technologie. Další důležitým hlediskem

jsou požadavky zohledňující lidský faktor. K tomu se používají vědy, jako jsou biomechanika, ergonomie a psychologie. V neposlední řadě se musí splnit požadavky estetické a ekonomické.

Životní cyklus produktu začíná koncepcí potřeb a končí likvidací produktu. Dobrý návrh proto musí splňovat požadavky na produkt ze všech jeho fází životního cyklu. Konstruktor by měl myslet i do budoucna, měl by se při návrhu zabývat vlivem budoucího produktu na tzv. trvale udržitelný rozvoj.

Mezi hlediska regulační a sociální patří různé normy a předpisy, které musí být v rámci návrhu splněny. Patří sem však i etický kodex, týkající se zdraví a bezpečnosti široké veřejnosti.

## 2.2. Fáze procesu konstruování

Obr. 2 ukazuje (velmi zjednodušeně) fáze konstrukčního procesu. Konstrukční proces začíná identifikováním potřeb trhu neboli zjištěním požadavků zákazníka. Výsledkem je soubor konstrukčních požadavků, které je nezbytné precizně formulovat. Vyjádření požadavků by neměla naznačovat řešení. Tím se předejde tomu, aby již při definování požadavků nedošlo k zúžení oblastí s možnostmi řešení. Příkladem požadavku je „odstranit zátku z hrdla láhve“, takto vyjádřený požadavek je prostý řešení. Ale požadavek „vytáhnout zátku z hrdla láhve“, ten už naznačuje způsob odstranění.

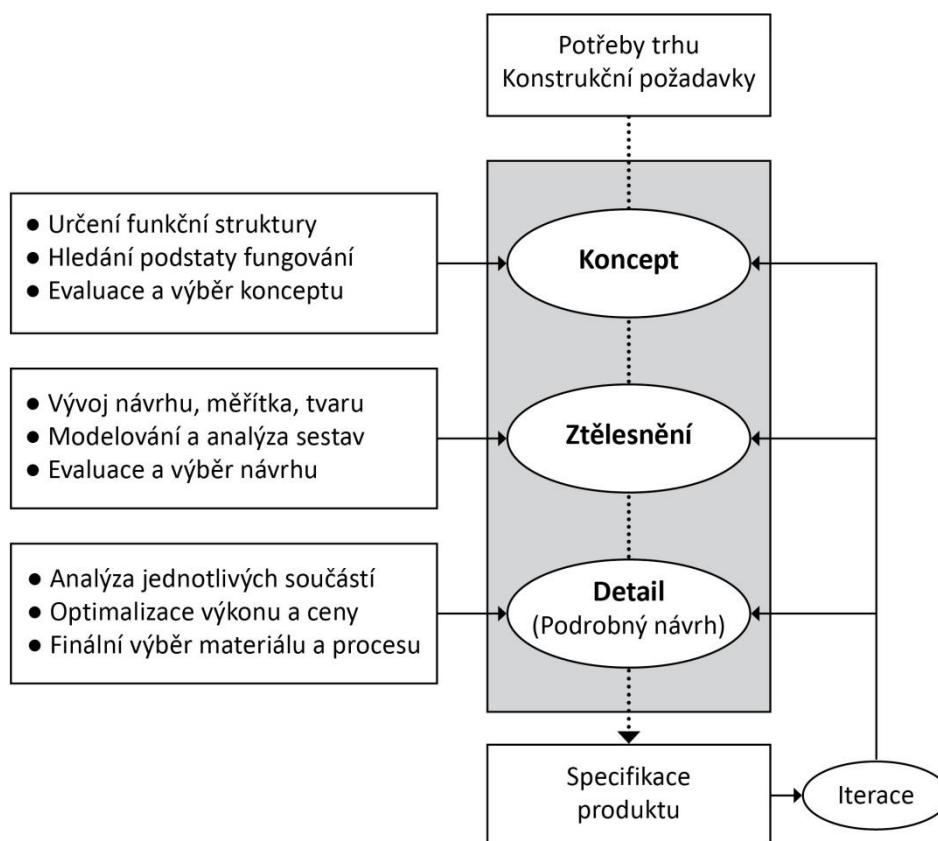
V počáteční první fázi, *koncept*, konstrukčního procesu se navrhuje koncepty tak, aby mohly splnit konstrukční požadavky. V této se fázi se stanovuje funkční struktura, hledají se vyhovující funkční jednotky, provádí se jejich vyhodnocení a následný výběr potenciálně možných konceptů.

Ve druhé konstrukční fázi, *ztělesnění*, se vezmou možné koncepty a vytvoří se z nich v měřítku geometrické modely uspořádání (sestav). Na sestavách se provedou různé analýzy, které zahrnují dimenzování prvků, výběr materiálu, který bude např. schopen přenášet daná zatížení, pracovat za požadovaných teplot a v požadovaném prostředí. Na základě analýz se vybere vhodný návrh.

Následuje třetí, konečná fáze, ve které se návrh podrobně rozpracuje. Ve fázi *detailního rozpracování* se vypracovává podrobná specifikace pro každou součást. Kritické součásti jsou podrobeny přesné mechanické nebo tepelné analýze, provádí se konečný výběr tvaru, materiálů součástí a technologických postupů, zpracovává se přesná kalkulace nákladů.

Koncovým bodem konstrukčního procesu je *úplná specifikace produktu*, který splní potřeby zákazníka.

Takto popsany proces se jeví jako logický a lineární. Ale důsledky rozhodnutí, která se přijmou ve fázi konceptu, se plně projeví až v poslední fázi při vytváření detailů. Proto je většinou součástí procesu konstruování iterace, prozkoumání dalších variant konceptů. Skutečná cesta procesem navrhování je spleť a mnohdy velmi zdlouhavá. Zrychlení a optimalizaci průběhu procesu mohou ovlivnit různé nástroje.

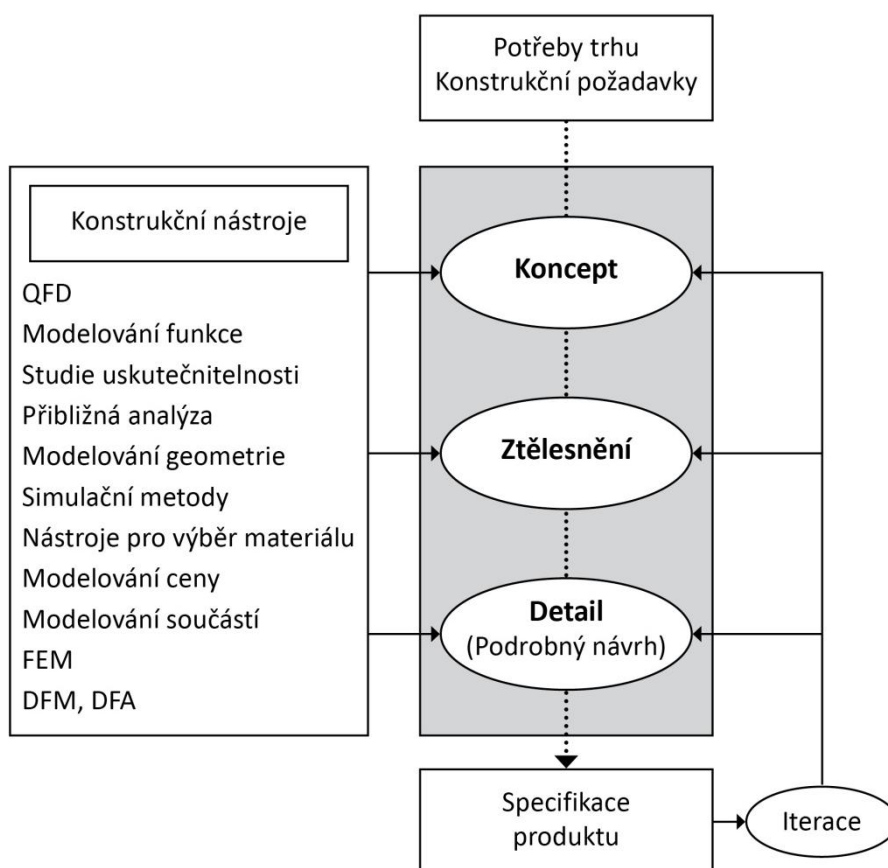


Obr. 2 Vývojový diagram konstrukčního procesu (2)

Pro ulehčení realizace všech kroků, které jsou nutné při procesu navrhování, se využívá různých nástrojů. Ty jsou zobrazeny na obr. 3 vlevo jako vstupy do hlavní páteře konstrukční metodologie. K převedení kvalitativních požadavků zákazníka produktu do kvantitativních parametrů návrhu produktu slouží metoda QFD (Quality Function Deployment – v českém překladu – rozvíjení funkce kvality, více je ale používán název Dům kvality). Metoda by měla pomáhat setřít hranice mezi uživatelem, tj. zákazníkem, a

konstruktérem. Měla by pomoci vzájemnému porozumění mezi nimi. Tím dojde k správnému převedení zákaznických požadavků do tzv. technické řeči (3).

Další zobrazené nástroje na obr. 3 umožňují modelování a optimalizaci procesu navrhování, přinášejí zjednodušení do všech jeho fází. Pomocí funkčního modelování se navrhuje „životaschopná“ funkční struktura (4). Nastavením optimalizátoru se navrhují nebo zpřesňují tvary. 3D modelovací programy umožňují vizualizace a vytváření souborů (dat), které mohou být dále použity pro virtuální prototyp a vytváření virtuálního výrobního procesu (5).



Obr. 3 Vstup konstrukčních nástrojů do vývojového diagramu konstrukčního procesu (2)

K minimalizaci nákladů se používají např. nástroje typu DFM (Design for Manufacture – konstruování s ohledem na výrobu), DFA (Design for Assembly - konstruování s ohledem na montáž) (6) a počítačové programy pro odhadování nákladů. Nástroje DFM a DFA mají dopomoci k tomu, aby byly produkty konstruovány tak, že jejich výrobní a montážní náklady dosáhnou minima (7). Programové balíčky pro simulaci dějů jako je FEM (Finite

Element Method – metoda konečných prvků) (8) a CFD (Computational Fluid Dynamics – počítačová simulace dynamiky tekutin) umožňují přesnou mechanickou a teplotní analýzu. Vlastní výběr používání nástrojů se odvíjí od procesu navrhování. V koncepční fázi probíhá přibližná analýza a modelování, sofistikovanější modelování a optimalizace probíhá ve fázi ztělesnění a přesná (ne vždy se však podaří udělat zcela přesná) analýza probíhá ve fázi detailního rozpracování.

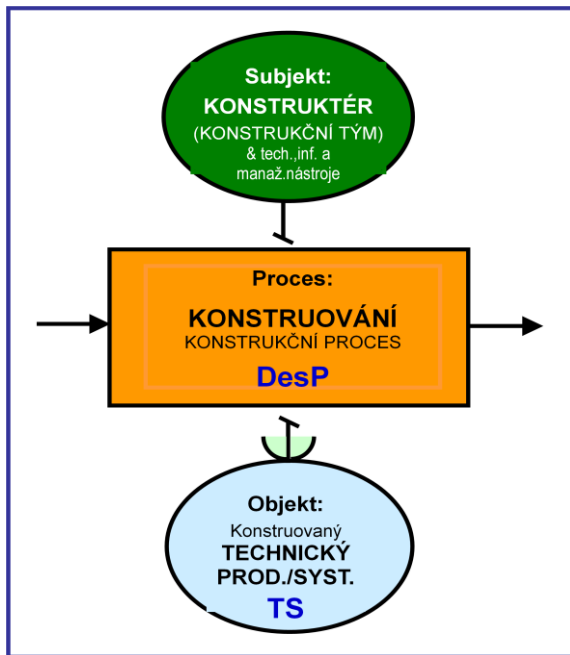
Existuje i nástroj pro ulehčení a optimalizaci výběru materiálů během procesu navrhování produktu. O něm bude v disertační práci pojednáno.

### 2.3. Systémové navrhování technických produktů

Samotný produkt se v terminologii konstruování nazývá technický systém. Ten se skládá z podsestav a ty se skládají z komponent (součástí). Tento rozklad se hodí pro rozbor už vytvořeného návrhu konstrukce, ale ne při samotném procesu návrhu. Pro účel samotného procesu návrhu se lépe hodí rozklad založený na principech systémové analýzy. Systémový přístup k analýze technického systému je představován transformacemi energie, materiálů a informací. Při procesu navrhování se převádí vstupy na výstupy, např. elektrický motor převádí elektrickou energii na mechanickou, kovací lis přeformuje materiál, poplašné zařízení proti vloupání shromažďuje informace a převádí je na hluk, atd. Technický systém je zde rozdělen na propojené podsystemy, které vykonávají specifické funkce. Výsledné uspořádání se nazývá funkční struktura nebo funkční dekompozice systému.

Z hlediska vědeckého pojetí je nejvíce propracován proces konstruování ve speciální vědní disciplíně Engineering Design Science (EDS) (9), (10). Pohled EDS na proces konstruování se odlišuje od ostatních teorií tím, že se zabývá uceleně systémem navrhování technických produktů, tj. *subjektem*, jehož představitelem je konstruktér, resp. konstrukční tým, *procesem*, myšleno konstrukčním procesem a *objektem*, který představuje technický produkt, resp. technický systém. Výše popsany model je zobrazen na obr. 4. Jedinečnost tohoto modelu je tedy ve *vzájemné provázanosti jeho složek*, tj. mezi subjektem, procesem a objektem.





### Konstruktor (konstr. tým&nástroje):

- Tvořivost
- Poznatky/Znalosti
- Schopnosti
- Zkušenosti

### Konstruování (konstrukční proces):

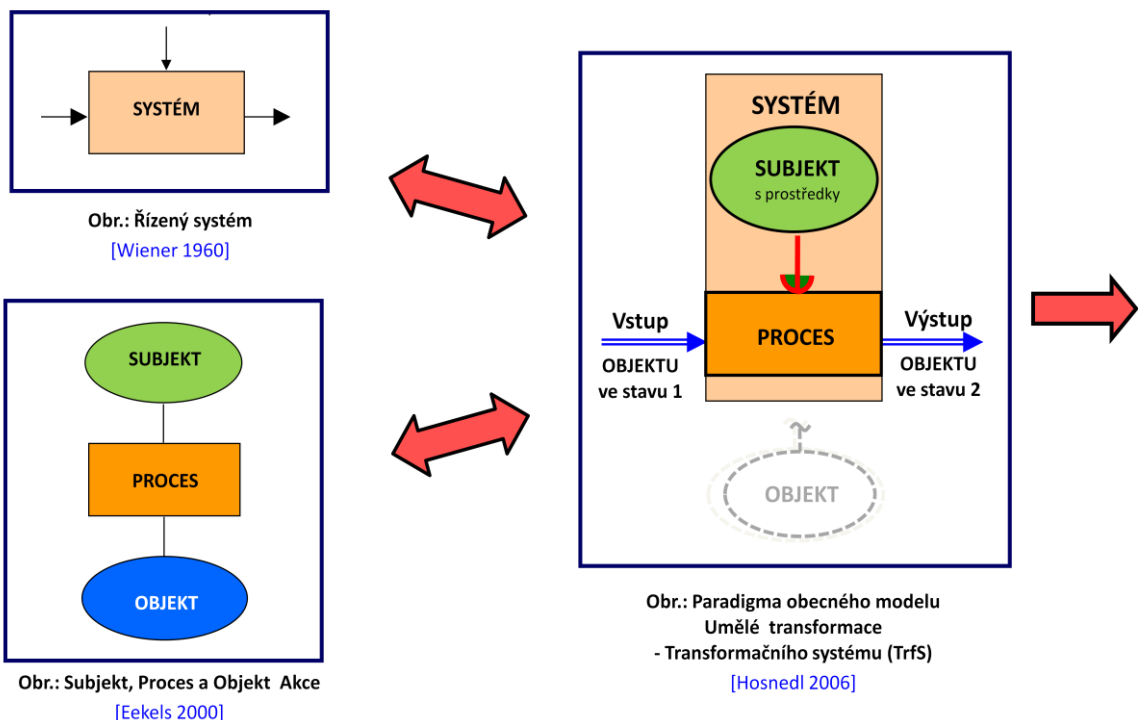
- Specifikace požadavků
- Hledání řešení
- Hodnocení a rozhodování
- Dokumentování

### Technický systém (tech. produkt):

- Životní cyklus
- Vlastnosti, kvalita, konkurenceschopnost
- Struktury

Obr. 4 Model složek objektu EDS (11)

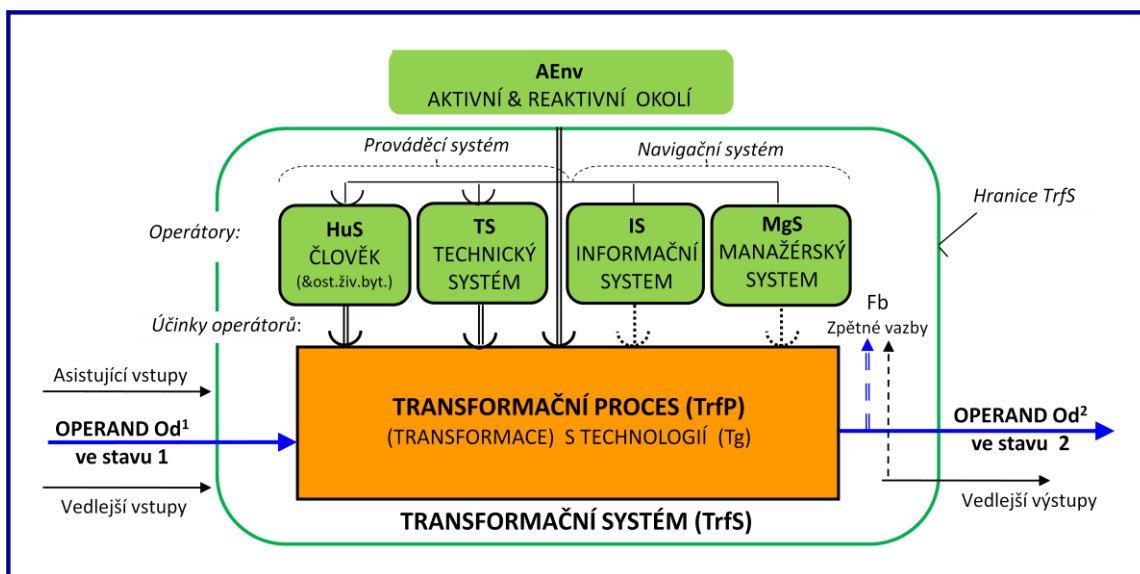
Vezme-li se model složek EDS jako řízený systém a objekt se rozdělí na vstupní a výstupní, dostane se paradigma (vzor) obecného modelu, viz obr. 5.



Obr. 5 Řízený systém + prvky akce ⇒ model transformace (11)

Přizpůsobí-li se obecný model pro potřeby konstruování, získají se základní prvky *transformačního systému*, viz obr. 6. Objekt je nahrazen *operandem*, který představuje, co

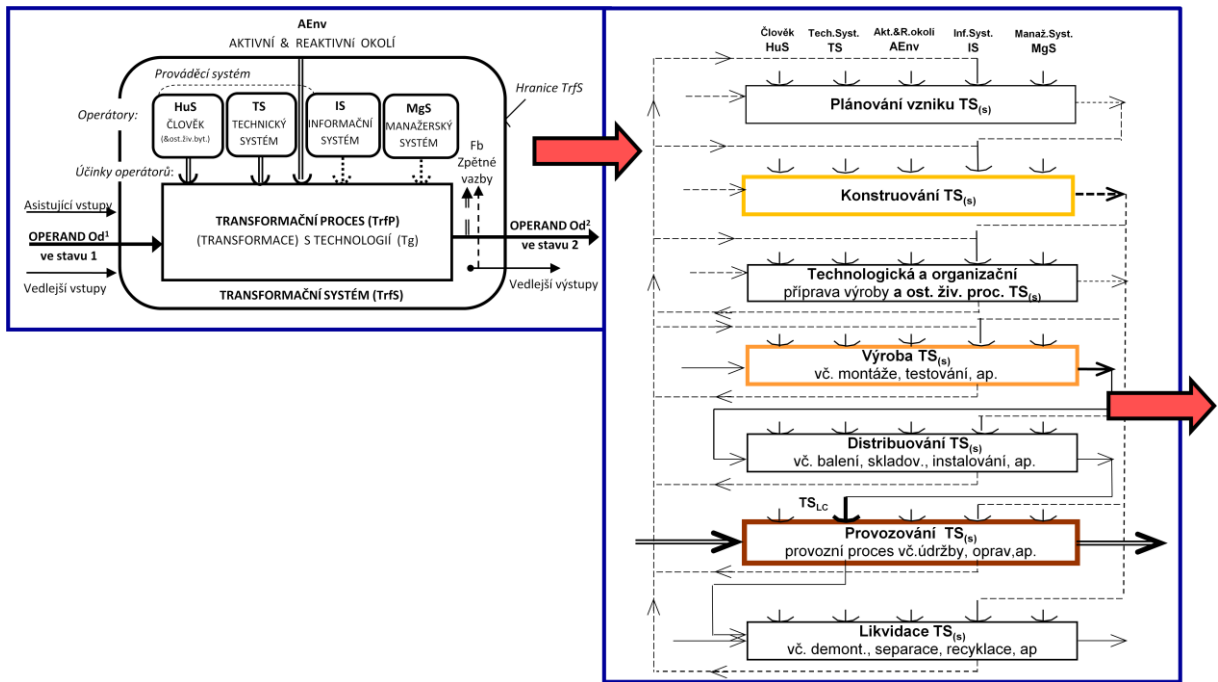
se přeměňuje. Operand mění svůj stav od výchozího na vstupu ke konečnému na výstupu. Subjekt je nyní nahrazen *operátory*, které představují, **kdo** a **co** dodává potřebné účinky operandu, neboli **čím** se přeměňuje operand. Mezi operátory patří člověk, technický systém (prostředek), informační systém, manažerský systém. Proces je nahrazen *transformačním procesem*. V rámci něho se vzájemným působením mezi operátory a operandem mění určité vlastnosti operandu. Operand je pasivním členem transformace, operátory jsou aktivními členy transformace.



Obr. 6 Obecný model transformačního systému (TrfS) s transformačním procesem (TrfP) (11)

V EDS je technický produkt chápán jako technický systém. Z hlediska životního cyklu produktu každá jeho etapa představuje svůj vlastní transformační systém, viz obr. 7.

Vlastnost technického systému je každý jeho znak, charakteristika, atribut, jako například výkon, tvar, velikost, vyrobiteľnosť, spoľehlivosť, vhodnosť pro balení apod. Každý technický systém je nositelem množiny objektivních vlastností, které jako celek umožňují posoudit jeho celkovou kvalitu. Z výše uvedeného je zřejmé, že vlastnost technického systému představuje jeho netriviální charakteristiku z nějakého ucelenějšího, ale přesto specificky zaměřeného hlediska (12). Podle EDS je pro konstruktéra nejvhodnější třídění vlastností technických systémů v závislosti na etapách jeho životního cyklu, na jeho vlastní podstatě a existenci, kombinované s určitými dalšími oblastmi vědění. Tímto stylem třídění se dojde k poznání, že každý technický systém je držitelem identických skupin vlastností, ale liší se stavy ztělesnění a hodnot. Tyto vlastnosti existují, i přestože nebyly vědomě vtělesněny do systému, a přestože nebyly specificky požadovány.



Obr. 7 Životní cyklus jako série Transformačních procesů (TrfP) s Transformačními systémy (TrfS) v jeho hlavních životních etapách (11)

Tabulka 1 obsahuje kompletní soubor tříd vlastností, soubor typických otázek, které se dotazují na specifické vlastnosti v jednotlivých třídách a příklady, které ilustrují tyto třídy vlastností. Vlastnosti tříd 1 a 2 souvisejí s účelem technického systému, třídy 3-7 jsou odvozeny ze životního cyklu produktu, třídy 8-11 se vztahují k lidem a k jejich společnosti. Třída 12 se vztahuje bezprostředně k navrhování technického systému (neboli ke konstruování).

Důležitost jednotlivých vlastností nebo tříd vlastností je pro zákazníky nebo uživatele velmi proměnlivá (nestálá). Mění se s dobou, módou a hlavně s nasyceností trhu daným produktem. Například estetické vlastnosti produktu se mohou stát rozhodujícím faktorem pro nákup, obzvláště pokud je k mání mnoho produktů plnící ten samý účel a u nichž jsou si v postatě rovny jejich technické vlastnosti. Logicky vystává otázka, jaký je vztah mezi vlastnostmi produktu a jeho kvalitou. Kvalitou se rozumí stupeň splnění požadavků (jimiž jsou potřeby nebo očekávání, které jsou stanoveny, obecně se předpokládají nebo jsou závazné) souborem inherentních znaků produktu (13). Často je kvalita zaměňována s excelencí. Kvalita neznámá např. nejvyšší technickou úroveň.

Tabulka 1 Třídy vlastností technických systémů (TS) (12)

Číslo	Třída vlastností	Otázky týkající se třídy	Příklady třídy vlastností
1	Funkce vlastností Účinek vlastností	Co TS dělá? Jakou má TS způsobilost?	Funkce: pracovní, pomocné, pohonné, regulační a kontrolní, spojovací
2	Vlastnosti stanovené účelově (funkční parametry)	Jaké mají jednotlivé funkce stavy a hodnoty?	Výkon, rychlost, velikost, funkční rozměry, únosnost
3	Provozní vlastnosti	Jak je TS vhodný pro pracovní proces (provoz)?	Provozní bezpečnost, spolehlivost, životnost, spotřeba energie, požadavky na prostor, požadavky na údržbu
4	Výrobní vlastnosti	Jak je TS vhodný pro výrobu?	Vyrobitelnost, smontovatelnou, kvalita výroby
5	Distribuční vlastnosti	Jak je TS vhodný pro dopravu, skladování, balení?	Vhodnost pro: transport, skladování, balení, zprovoznění
6	Vlastnosti vztahující se k dodání a plánování	Kdy může být TS dodán? Objem výroby.	Dodací způsobilost, typ výroby (kusová, hromadná)
7	Ekologické vlastnosti vztahující se k celému životnímu cyklu	Jaký vliv má TS na životní prostředí v průběhu celého životního cyklu? Jak snadno jde TS zlikvidovat?	Spotřeba energie v průběhu životního cyklu produktu, uhlíková stopa produktu v průběhu životního cyklu produktu, demontovatelnost, schopnost recyklace, nebezpečný odpad
8	Ergonomické vlastnosti	Jak dobře je TS obsluhovatelný a jak ovlivňuje člověka (obsahu)?	Provozní bezpečnost, způsob provozování, požadavky na lidskou pozornost, vliv vedlejších výstupů na člověka
9	Estetické vlastnosti	Jak TS působí na smyslové cítění člověka?	Tvar, barva, sounáležitost s prostředím, rozložení ploch, juxtapozice ploch
10	Vlastnosti vztahující se k souladu s předpisy	Je TS ve shodě se zákony, předpisy a normami v příslušné oblasti?	Standardizovaný, patentová čistota, zákonný (legální)
11	Ekonomické vlastnosti	Jak hospodárné jsou pracovní a výrobní procesy TS?	Výrobní náklady, provozní náklady, účinnost, cena, výrobce
12	Konstrukční vlastnosti (elementární)	S jakými prostředky jsou dosaženy vlastnosti tříd 1 – 11?	Struktura, forma, tvar, rozměry, materiály, drsnost povrchu, tolerance, typ výroby

Z toho vyplývá vztah mezi kvalitou a vlastnostmi technického systému. Srovnáním hodnot jednotlivých vlastností vznikajícího, zkonstruovaného nebo již existujícího technického systému s hodnotami požadavků na produkt lze vyjádřit jeho kvalitu v hodnotové formě (14).

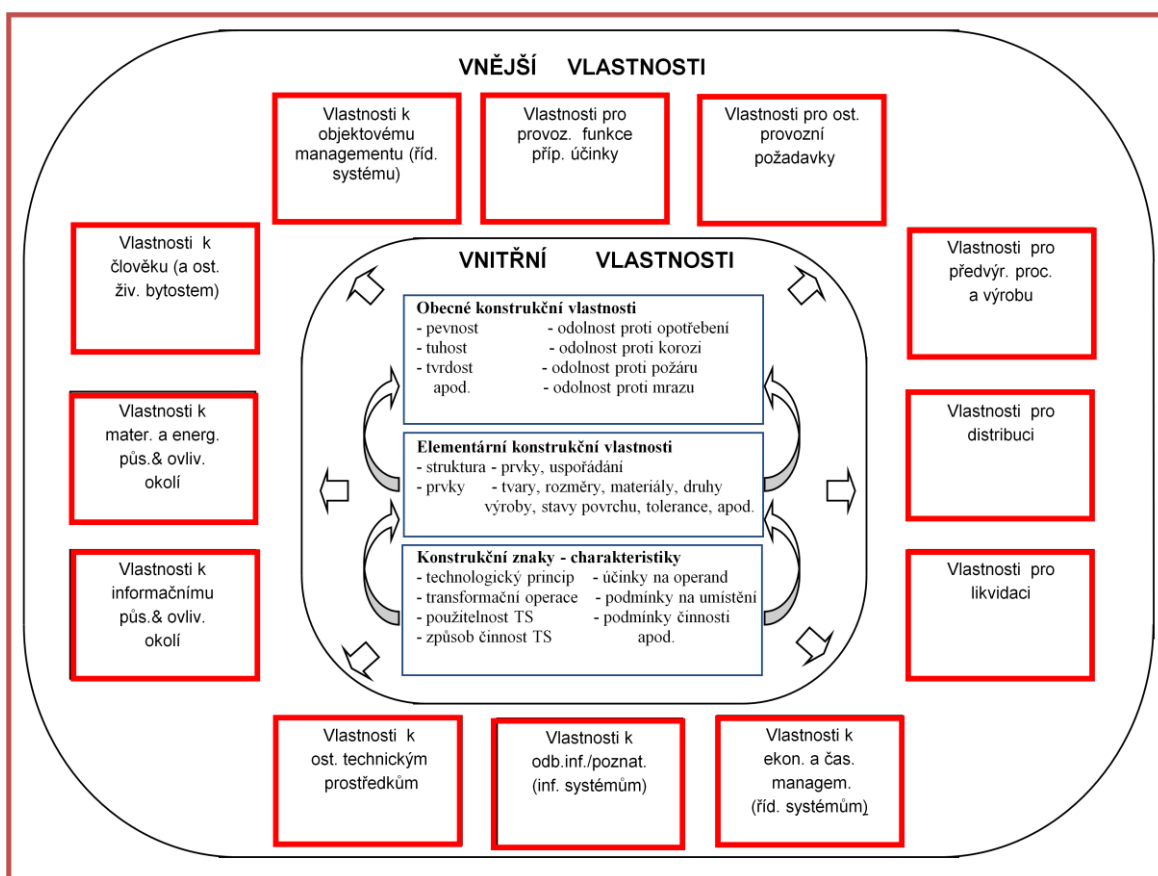
Vlastnosti technických systémů jsou vůči sobě v určité závislosti. Pro konstruktéra a jeho práci je důležité si uvědomit a porozumět, že všechny vlastnosti, které očekáváme od technického systému (produktu) závisí výhradně na speciální třídě základních vlastností, kterou nazýváme *elementární konstrukční vlastnosti*, (viz Tabulka 1, třída vlastností 12). Pouze tyto vlastnosti jsou pod přímou kontrolou a rozhodovací schopností konstruktéra. Elementárními konstrukčními vlastnostmi jsou ovlivněny nejen schopností technického systému vykonávat účinky, ale i dalšími vlastnostmi, jako je pevnost, bezpečnost, vzhled, možnost přepravy, ekonomičnost, atd.

Mezi elementární konstrukční vlastnosti patří (12):

- **prvky** stavební struktury (*např. hřídel, šroub*)
- jejich **uspořádání** (*např. vzájemná poloha, orientace*)
- **tvary**, tj. tvarové charakteristiky (*např. krychle, válec, šroubovice i části ploch*)
- **rozměry**, tj. rozměrové charakteristiky (*např. průměr, délka hrany*)
- **materiály**, tj. materiálové charakteristiky fyzikální (*např. hustota, plocha*), mechanické (*např. otěruvzdornost*), tepelné, chemické, akustické, optické, elektrické, chemicko-mechanické, technologické (*např. slévatelnost, tepelná zpracovatelnost, kalitelnost, tvařitelnost, obrobitelnost, svařitelnost*) apod.
- **způsoby výroby**, tj. charakteristiky způsobů výroby (*např. vrtání, soustružení, válcování*)
- **stavy povrchů**, tj. charakter povrchu (*např. střední kvadratická odchylka výšky nerovností*)
- **odchylky** (mezní, tj. tolerance, příp. skutečné) **od jmen hodnot**, tj. charakteristiky odchylek od jmenovitých rozměrů (*např. horní a dolní mezní odchylka, skutečná odchylka*)

Lze tedy konstatovat, že konstruování je hledání konstrukčních vlastností. Na obr. 8 je metaforicky znázorněn vztah mezi vlastnostmi technického systému. Vztah je znázorněn jako balón, ve kterém *vnější vlastnosti* (nově jsou označovány jako reflektivní vlastnosti) jsou generovány a udržovány „tlakem“ *vnitřních vlastností* (nově označovány jako deskriptivní a reaktivní vlastnosti). Vnější vlastnosti představují třídy vlastností 1-11, viz Tabulka 1. Vnitřní vlastnosti představují elementární konstrukční vlastnosti, konstrukční

znaky (ty dohromady jsou nově označovány jako deskriptivní vlastnosti) a obecné konstrukční vlastnosti (nově označovány jako reaktivní vlastnosti).



Obr. 8 Metaforické znázornění vztahů mezi vlastnostmi technického systému (14)

Elementární konstrukční vlastnosti se vztahují ke všem etapám životního cyklu technického systému. Plně definují stavební strukturu technického systému. Změny hodnot těchto vlastností vlivem působícího zatížení nesmí překročit meze, které by změnilly požadovanou mezní hodnotu kvality technického systému.

Elementární konstrukční vlastnosti jsou přímo závislé na konstrukčních znacích (nově označovaných jako znakové konstrukční vlastnosti/charakteristiky), ve kterých se odráží rozhodnutí dělané konstruktéry během jejich konstrukčního procesu. Charakterizují znaky stavební struktury technického systému. Mezi konstrukční znaky patří:

- strukturní (konstrukční) znaky  
(např. konstrukční principy a způsoby stavební, orgánové a funkční struktury)
- funkční (pracovní) znaky  
(např. pracovní princip a způsob)

- transformační (technologické) znaky

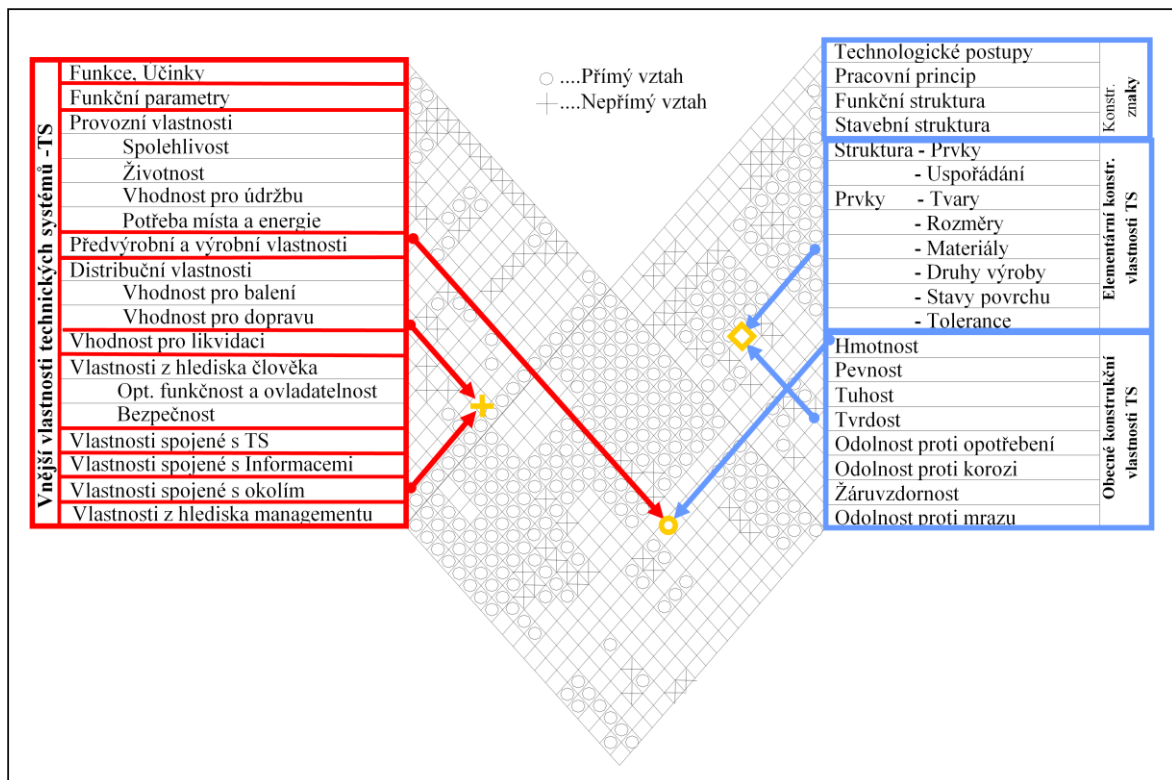
(např. technologický princip a způsob, principy transformačního procesu)

- obecné (fyzikální, mechanické, tepelné apod.) konstrukční znaky

(např. povrch, objem, hmotnost, poloha těžiště)

Obecné konstrukční vlastnosti (reaktivní vlastnosti) vyjadřují reakce (odezvy, chování) na působící zatížení. Jedná se mimo jiné o mechanické, tepelné, chemické, akustické, optické, technologické vlastnosti technických systémů.

Vzájemnou závislost mezi vnitřními a vnějšími třídami vlastností technického systému vyjadřuje obr. 9. Levá strana obrázku představuje vnější vlastnosti, pravá strana představuje vnitřní vlastnosti.



Obr. 9 Vzájemná závislost mezi vnitřními a vnějšími třídami vlastností technického systému (14)

Konstruktér hned na začátku životního cyklu produktu rozhoduje o všech jeho vlastnostech, které bude mít produkt v průběhu svého životního cyklu. Ovlivňuje vše volbou prvků, jejich uspořádáním a zvolením jejich elementárních konstrukčních vlastností, tj. tvaru, rozměrů, materiálů, druhů výroby, stavů povrchů a odchylkami od jmenovitých hodnot. Výběr materiálu je při navrhování velmi důležitý, protože, jak je patrné z obr. 9, materiál ovlivňuje většinu vlastností produktu.

Metodika „Systémového navrhování technických produktů“ podle Engineering Design Science je propracována do detailu ve všech fázích konstrukčního procesu až na způsob výběru materiálů. Zde z ní byla představena jen nepatrná část, která objasňuje roli výběru materiálů při navrhování technických produktů.

## 2.4. Cíle disertační práce

Výše uvedené teoretické východisko zcela zřetelně ukazuje, že materiál ovlivňuje velmi podstatnou část celkových vlastností produktu a to včetně jeho celkové ceny. V současné době si konstruktér může vybírat až z 160 000 konstrukčních materiálů (2). Běžný konstruktér má přístup jen k velmi omezenému množství informací o materiálech, v literatuře (1) se uvádí, že má informace pouze o 30 až 60 druzích materiálů.

Výpočetní technika značně změnila svět konstruování. Existují sofistikované nástroje, které zachycují funkci a geometrii. Tyto nástroje simulují, modelují a analyzují. Optimalizují, nejen technické provedení produktu, ale také jeho vyrobitelnost. Jejich použití je ještě mnohem širší. Pro výběr materiálů existuje minimum nástrojů, což má za následek, že výběr materiálů je žalostně málo integrován do konstrukčního procesu. Zdravý rozum říká, že současná výkonnost rozvoje nauky o materiálech předstihla schopnosti konstruktérů aplikovat ji v celém jejím rozsahu. Tento rozpor se dá jednoduše definovat jako schopnost konstruktéra prozkoumat potenciál alternativních materiálů, které může použít v jeho konstrukčním návrhu. Pro řešení výše nastíněné problematiky je nezbytná nějaká strategie.

Cíle disertační práce jsou:

- rešerše současného stavu poznání
- analýza zjištěného stavu poznání
- integrace zjištěných poznatků
- validace zjištěných poznatků

Při řešení disertační práce bude využita vědecká metoda zvaná kompilace. Tato metoda je někdy předmětem sporů, ovšem ke kompilační práci se vyjádřil i U. Eco (15), který zdůraznil, že v ní student *„kriticky přehlédl větší část existující literatury (spisů, které již byly v daném oboru napsány a publikovány), že je schopen stávající problematiku jasně vyložit a že dokáže dát do vzájemných souvislostí různé přístupy a názory tak, aby vznikl inteligentní, syntetický přehled, který by pak mohl posloužit jako zdroj důležitých informací*



*i odborníkovi z daného odvětví, který se studovaným tématem nikdy nezabýval konkrétně a do hloubky.“*

Výsledek práce by měl doplnit „bílé místo“ v metodice navrhování technických produktů. Měl by sloužit nejen odborníkům z daného odvětví, ale především by měl být přínosem pro pedagogickou činnost na technických fakultách.

## 3. Materiály a jejich vlastnosti

### 3.1. Vlastnosti konstrukčních materiálů

Konstrukční proces a materiály mají vzájemnou silnou vazbu. Obrazně se dá říci, že materiály jsou potravou pro konstrukční proces. Každý materiál v sobě ukrývá specifický potenciál, který je popsán vlastnostmi materiálů. O každém materiálu můžeme uvažovat jako o množině atributů nebo vlastností. Kombinace, která charakterizuje daný materiál, je jeho *profil vlastností*. Vlastnosti jsou sestavovány pomocí systematického testování. Lze je obecně rozdělit na vlastnosti *fyzikální, mechanické a funkční*. Funkční vlastnosti popisují tepelné, elektrické, magnetické a optické chování materiálů. Přehled základních vlastností materiálů, které limitují návrh, a jejich jednotek ukazuje tabulka 2. Cílem konstruktéra je dokázat plně využít potenciálu vlastností, protože to vede k úspěchu produktu na trhu. Pro ucelené uvedení do problematiky metodiky výběru materiálů následuje stručný přehled základních charakteristik vlastností konstrukčních materiálů.

#### 3.1.1. Fyzikální a mechanické vlastnosti

Ocelové pravítko se snadno ohýbá, tzn., že po odlehčení zase skočí do původního stavu. Jeho elastická tuhost (myšleno odolnost proti ohnutí) je dána částečně jeho průřezem (tenké pásky jdou snadno ohýbat) a z části vlastností oceli samotné, konkrétně jejím modulem pružnosti  $E$ . Materiály s vysokým  $E$ , jako oceli, jsou skutečně tuhé. Materiály s nízkým  $E$ , jako polyetylény, nejsou. Obr. 10 (b) ilustruje důsledky nedostatečné tuhosti. Již zmíněné ocelové pravítko se ohýbá pružně a je těžké ho trvale ohnout. Trvalá deformace má co do činění s pevností, ne s tuhostí. Jak snadno může být pravítko trvale ohnuto, závisí zase na jeho průřezu a také na, tentokrát jiné, vlastnosti použité oceli, na mezi kluzu  $\sigma_y$ . Materiály s vysokou  $\sigma_y$ , jako jsou titanové slitiny, jsou těžko trvale deformovatelné, přestože jejich tuhost (která je dána velikostí  $E$ ) nemusí být vysoká. Materiály s nízkým  $\sigma_y$ , jako je olovo, mohou být snadno deformovány. Když je kov deformován, dochází k jeho zpevnování, ale je určitá mez, která se nazývá mez pevnosti v tahu  $\sigma_{ts}$ , za kterou dojde k porušení materiálu (velikost protažení, než dojde k prasknutí, se nazývá tažnost). Tvrdost  $H$ , úzce souvisí s mezí kluzu  $\sigma_y$ . Vysoká tvrdost zaručuje

odolnost proti otěru a proti opotřebení. Obr. 10 (c) vysvětluje důsledky nedostatečné pevnosti.

Tabulka 2 Základní vlastnosti konstrukčních materiálů, jejich označení a jednotky (2)

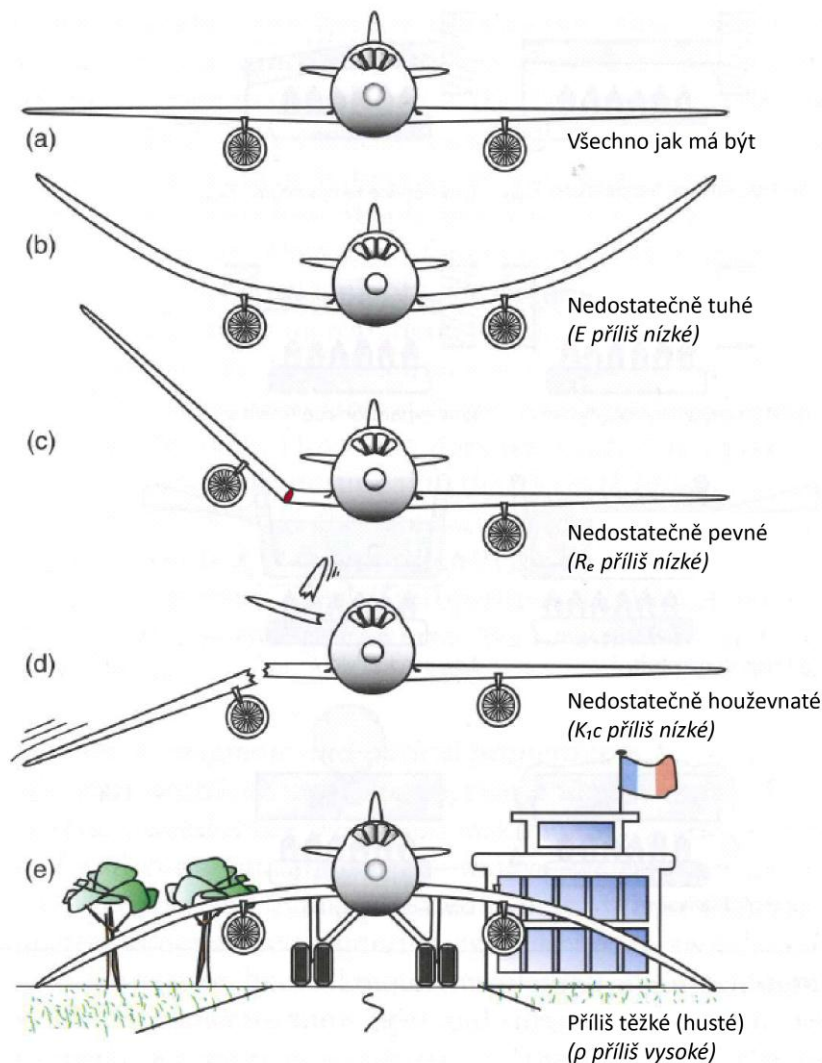
<b>Třída</b>	<b>Vlastnost</b>	<b>Symbole a jednotky</b>	
Obecné	Hustota	$\rho$ ( $\frac{kg}{m^3}$ nebo $\frac{Mg}{m^3}$ )	
	Cena	$C_m$ ( $K\check{c}/kg$ )	
Mechanické	Modul pružnosti (v tahu, smyku, stlačitelnost)	$E, G, K$ (GPa)	
	Mez kluzu	$\sigma_y$ (MPa)	
	Mez pevnosti v tahu	$\sigma_{ts}$ (MPa)	
	Mez pevnosti v tlaku	$\sigma_c$ (MPa)	
	Napětí při mezním stavu	$\sigma_f$ (MPa)	
	Tvrlost	$H$ (Vickers)	
	Poměrné prodloužení	$\epsilon$ (-)	
	Mez únavy	$\sigma_e$ (MPa)	
	Lomová houževnatost	$K_{lc}$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )	
	Houževnatost	$G_{lc}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	
	Koeficient tlumení	$\eta$ (-)	
	Tepelné	Teplota tání	$T_m$ (°C nebo K)
		Teplota skelného přechodu	$T_g$ (°C nebo K)
Maximální provozní teplota		$T_{max}$ (°C nebo K)	
Minimální provozní teplota		$T_{min}$ (°C nebo K)	
Součinitel tepelné vodivosti		$\lambda$ (W/m · K)	
Izobarická měrná tepelná kapacita		$C_p$ (J/kg · K)	
Součinitel tepelné roztažnosti		$\alpha$ (K <sup>-1</sup> )	
Odolnost proti tepelnému šoku		$\Delta T_S$ (°C nebo K)	
Elektrické	Elektrický odpor	$\rho_e$ ( $\Omega \cdot m$ nebo $\mu\Omega \cdot cm$ )	
	Dielektrická konstanta	$\epsilon_d$ (-)	
Optické	Refrakční index	$n$ (-)	
Ekologické	Energie na výrobu kilogramu materiálu	$H_m$ (MJ/kg)	
	Uhlíková stopa	$CO_2$ (kg/kg)	

Pokud to pravítko nebude vyrobeno z oceli, ale ze skla nebo plexiskla, jako většina průhledných pravítek bývá, tak nepůjde vůbec trvale ohnout. Pravítko se zlomí náhle, bez varování, není ho možné trvale ohnout. Materiál, který praskne tímto způsobem, se považuje za křehký a málo houževnatý. Pokud nedochází k trvalé deformaci, potom mez pružnosti není tou charakteristickou vlastností. Odolnost materiálu proti prasknutí a

zlomení je měřena pomocí lomové houževnatosti  $K_{Ic}$ . Většina ocelí je houževnatá, (ale např. ocelové plechovky jsou křehké), mají vysokou  $K_{Ic}$ . Skla jsou typickým představitelem křehkosti, mají velmi malou  $K_{Ic}$ . Obr. 10 (d) ukazuje důsledky nedostatečné lomové houževnatosti.

Velmi důležitou fyzikální vlastností je hustota  $\rho$ . Je to hmotnost na jednotku objemu. Hustota je u pravitka nepodstatná. Ale pro většinu věcí, které se pohybují, hmotnost přináší palivovou „daň“ (zvýšení ceny za palivo), menší u automobilů, větší u nákladních aut a vlaků, ještě větší u letadel a obrovskou u kosmických lodí. Zmenšování hmotnosti se dá ovlivnit výběrem materiálu. Hliník má malou hustotu, olovo velkou. Jestliže letadlo na obr. 10 (e) bude z olova, nikdy se nevznese od země.

Materiál křidel na obr. 10 (a) má ideální kombinaci vlastností.



Obr. 10 Mechanické vlastnosti (16)

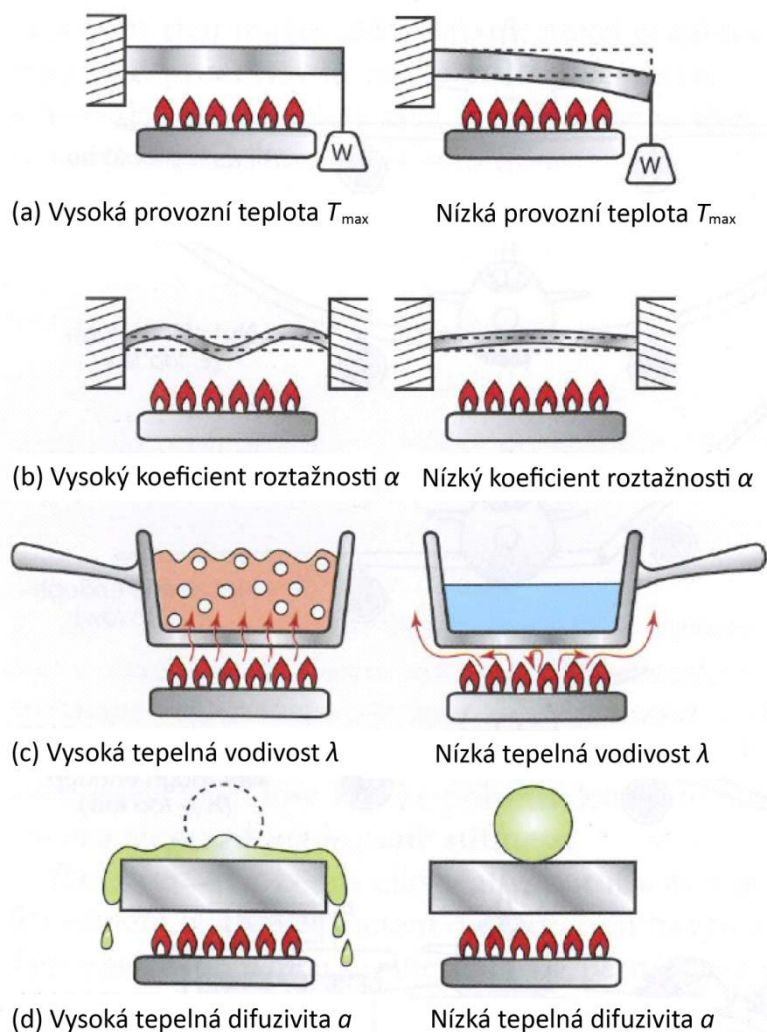
### 3.1.2. Tepelné vlastnosti

Vlastnosti materiálů se mění s teplotou a to většinou k horšímu. Pevnost klesá, začínají „téci“, mohou oxidovat, rozkládají se nebo rozpadávají. Nejběžnější teplotní vlastnosti jsou výstižně zobrazeny na obr. 11. Obr. 11 (a) představuje provozní teplotu, která limituje provozní podmínky produktu z daného materiálu. U materiálů se udává maximální provozní teplota  $T_{max}$ , a minimální  $T_{min}$ . Nerezavějící oceli mají vysokou  $T_{max}$ , mohou být užívány až do 800°C. Většina polymerů má nízkou  $T_{max}$ , jen zřídka se mohou používat nad 150°C.

Většina materiálů se roztahuje, když jsou zahřívány, ale o různou délku. Záleží na jejich koeficientu teplotní roztažnosti  $\alpha$ . Roztažnost je malá, ale důsledky mohou být velké. Názorným příkladem je vetknutý nosník, jako je na obr. 11 (b). Pokud je zahříván, roztažné síly nosníku působí proti vetknutí a tím dojde k jeho zborcení.

Některé materiály, např. kovy, se zdají studené, jiné, např. dřevo působí teple. S tím souvisí dvě tepelné vlastnosti materiálů: tepelná vodivost a tepelná kapacita. První, tepelná vodivost  $\lambda$ , měří rychlost, s jakou se teplo šíří materiálem z jedné zahřáté strany do jiné studené části. Obr. 11 (c) naznačuje následky malé a velké  $\lambda$  u materiálu použitého na kuchyňský hrnec. Ale materiály s malou tepelnou vodivostí jsou také užitečné, izolují únik tepla a tím snižují spotřebu energie.

V předešlém případě se materiál zahřívá plynule delší dobu. Pokud je ale čas limitovaný, je důležitá druhá, již zmíněná, vlastnost a to je tepelná kapacita  $C_p$ . Měří se množství potřebného tepla, aby se teplota materiálu zvedla o dané množství. Materiály s vysokou tepelnou kapacitou, např. měď, potřebují mnoho tepla, aby se změnila jejich teplota. Materiály s nízkou tepelnou kapacitou, jako jsou polymerové pěny, potřebují mnohem méně. Rovnoměrné šíření tepla, jak už bylo řečeno, má co do činění s tepelnou vodivostí. Ale je ještě jedna rafinovaná vlastnost, která popisuje, co se děje, když se materiál začne zahřívát. Jev je znázorněn na obr. 11 (d). Začne se zahřívát studený plát materiálu, na kterém leží např. kopeček zmrzliny. Na začátku zahřívání je spodní plocha plátu teplá, ale zbytek je studený. Po chvíli se začne oteplovat střed, až potom se začne oteplovat horní plocha a zmrzlina začne tát. Za jak dlouho roztaje? Pro danou tloušťku plátu je čas nepřímě úměrný tepelné difuzivitě  $a$  materiálu plátu. Liší se od tepelné vodivosti, protože materiály mají rozlišnou tepelnou kapacitu. Tepelná difuzivita je úměrná poměru  $\lambda/C_p$ .



Obr. 11 Tepelné vlastnosti (16)

### 3.1.3. Elektrické, magnetické a optické vlastnosti

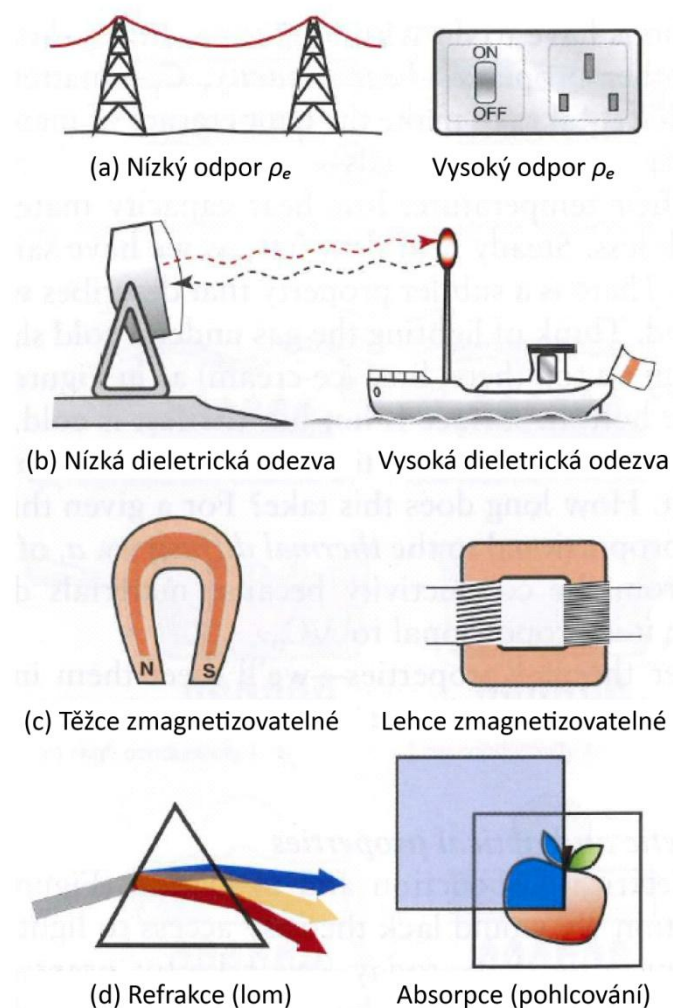
Základní elektrické vlastnosti jsou elektrická vodivost a izolace (obr. 12 (a)). Bez elektrické vodivosti by nebylo jednoduchého přístupu ke světlu, teplu, energii, regulaci, komunikaci, což je dnes bráno za samozřejmost. Kovy vedou dobře, měď a hliník jsou nejlepší vodiči z těch, které jsou cenově dostupné. Ale vodivost není vždycky to nejlepší. Skříňky na pojistky, vypínače, všechna zavěšení pro elektrická vedení vyžadují materiály, které jsou izolátory a kromě toho aby měly schopnost přenášet nějaké zatížení, vydržely nějaké teplo a přežily nějakou příležitostní jiskru. K tomu je potřeba vlastnost, která se nazývá elektrický odpor  $\rho_e$ , jež opakem elektrické vodivosti  $\kappa_e$ . Většina plastů a skel má

vysoký elektrický odpor (obr. 12 (a)) je používána jako izolátory, ačkoli díky speciálnímu zpracování může trochu vést.

Obr. 12 (b) ukazuje další elektrickou vlastnost, a to schopnost dovolit průchod mikrovlnného záření, (jako kryt antény radiolokátoru), nebo ho odrazit, (jako pasivní odrazové sklo loďky). Obě vlastnosti mají co do činění s dielektrickou konstantou  $\epsilon_D$ . Materiály s vysokou  $\epsilon_D$  reagují na elektrické pole.

Elektřina a magnetismus jsou úzce propojeny. Elektrické proudy indukují magnetická pole, pohybující se magnet indukuje v jakémkoli okolním vodiči elektrický proud. Odezva většiny materiálů na magnetická pole je příliš malá pro praktické využití. Ale několik materiálů, které se nazývají feromagnety a ferimagnety, mají kapacitu držet trvale magnetické pole. Říká se jim „tvrdé“ magnetické materiály, neboť když se jednou zmagnetizují, jdou jen obtížně odmagnetizovat. Využívají se jako trvalé magnety ve sluchátkách, motorech a dynamech. Zde je klíčovou vlastností remanence, míra intenzity zachovaného magnetického pole. Několik dalších, tzv. magneticky „měkkých“ materiálů, je možno snadno zmagnetizovat a odmagnetizovat. Jsou to materiály transformátorových jader a vychylovacích cívek televizních obrazovek. Mají schopnost vést magnetické pole, ale permanentně ho neudrží (obr. 12(c)). Pro tyto materiály je klíčovou vlastností saturační magnetizace, která udává, jak velké pole může materiál vést.

Odezva materiálů na světlo je obdobná jako na elektřinu a magnetismus, neboť světlo samo o sobě je elektromagnetické vlnění. Opakní (neprůhledné, avšak průsvitné) materiály světlo odrážejí, zatímco transparentní ho lámou. Některé materiály mají schopnost pohlcovat světlo jistých vlnových délek (čili barev) a dovolují tak pouze některým barvám volně projít (obr. 12 (d)).



Obr. 12 Elektrické, magnetické a optické vlastnosti (16)

### 3.1.4. Chemické vlastnosti

Výrobky musí často pracovat v antagonistickém prostředí, vystaveny korozivním kapalinám, horkým plynům nebo radiaci. Vlhký vzduch je korozivní, stejně jako voda, pot na našich dlaních je obzvláště korozivní. Samozřejmě existuje velké množství mnohem agresivnějších prostředí, než jsou tyto příklady. Pokud má produkt přežít po celou dobu životnosti v takovém prostředí, musí být vyroben z materiálů, nebo mít minimálně na funkční ploše povlak z materiálů, které odolávají okolnímu pracovnímu prostředí. Obr. 13 ilustruje některá z nejběžnějších prostředí: pitnou a mořskou vodu, kyseliny a zásady, organická rozpouštědla, oxidování a ultrafialové záření. Vlastní odolnost materiálů vůči



každému z těchto prostředí se považuje za materiálovou vlastnost, měřenou na stupnici 1 (velmi špatná) až 5 (velmi dobrá).



Obr. 13 Chemické vlastnosti (16)

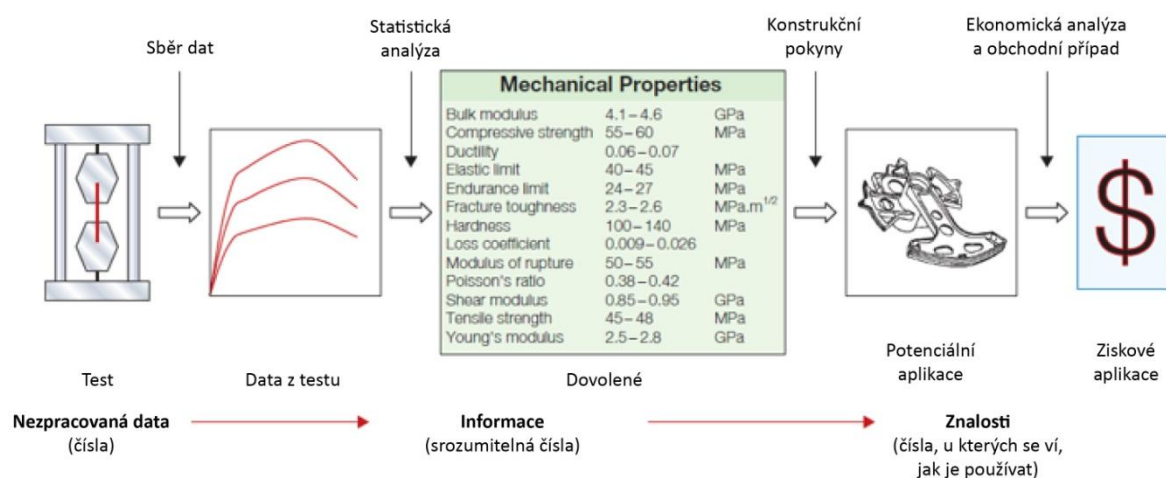
## 3.2. Informace o materiálech - databáze

### 3.2.1. Získávání informací o vlastnostech materiálů

Data vlastností často používaných materiálů jsou dobře dostupná a hlavně také osvědčená v mnoha fungujících produktech. Na rozdíl od toho data nově vznikajících materiálů mohou být neúplná, nedůvěryhodná, tudíž nespolehlivá. Z hlediska bezpečnostních,

spolehlivostních a ekonomických kritérií by měli konstruktéři aplikovat materiály, u kterých jsou data jejich vlastností statisticky analyzovaná. U těchto materiálů jsou jejich vlastnosti garantovány. Selhat může řekněme jeden materiál z milionu. Při současných nárocích na zajišťování kvality produktů (17), se v některých průmyslových odvětvích takto garantovaná data stávají nutností, speciálně u produktů vyráběných ve velkých sériích, např. v automobilovém průmyslu. Získání ověřených dat znamená investovat, ale tyto investice se v budoucnu firmě bohatě vrátí (18). A to nejen snížením počtu neshodných produktů, které výrazně snižují zisk firmy (záleží velmi na tom, ve které fázi životního cyklu produktu se neshoda projeví, neboť objevení neshody v každé další fázi je 10 krát dražší, než ve fázi předcházející (19)), a s tím je samozřejmě spojeno budování dobrého jména společnosti.

Problematika statisticky ověřených dat je popisována ve zprávě (20). Získání ověřených dat vlastností je zvláště obtížné pro konstruování z kompozitů. Na internetových stránkách ASM International je nabízena na toto téma celá příručka (21). Názorné vysvětlení, jak se získávají a statisticky analyzují data vlastností materiálů, poskytuje obr. 14.



Obr. 14 Schéma získávání dat o materiálových vlastnostech (2)

Data musí být především tříděna u všech materiálů stejným způsobem a uložena. To je nutným předpokladem pro výběr mezi nimi. Data se rozdělují na strukturovaná a nestrukturovaná. Strukturovaná data se týkají vlastností materiálů, mohou být zaznamenána v tabulkách. Udávána jsou především v číselných hodnotách, ale i jako tvrzení ano/ne nebo hodnocení např. dobrý/špatný. Mezi nestrukturovaná data patří základní informace o materiálu, jeho typická použití, výrobci, možné způsoby tvarování,

spojování a informace o dokončovacích operacích. V množině informací o materiálech by neměly chybět ani informace, které jsou předmětem norem a zákonných předpisů. Jsou to ty, které se musí dodržet např. při výběru materiálů pro potravinářský průmysl, pro splnění normy týkající se životního prostředí ISO 14040, atd. Strukturovaná data různého rozsahu se nachází ve většině databází, ale nestrukturovaná data jsou v databázích jen poskromnu.

### 3.2.2. Databáze materiálů

Ve světě existuje mnoho různých databází materiálů. Liší se zaměřením, rozsahem, způsobem třídění, možnostmi dostupnosti, zpoplatněním, atd. Konstrukteři mají možnost hledat informace např. z následujících zdrojů.

- **Lexikon ocelí (22)**

V publikaci jsou zpracovány materiálové listy pro jednotlivé značky ocelí a niklových slitin, ve kterých jsou základní informace o materiálu, tj. chemické složení, mechanické vlastnosti, tepelné zpracování, svařitelnost, fyzikální vlastnosti, oblast použití aj. a přehledná tabulka s ekvivalentními materiály z jiných zemí.

- **Lexikon kovů se zahraničními ekvivalenty (23)**

Pomocí tohoto softwaru je možno vyhledat přehled ocelí, litin a neželezných kovů včetně jejich chemického složení, mechanických vlastností, použití a tepelném zpracování.

- **Atlas použití kovů ve strojírenství, elektrotechnice a v chemickém průmyslu (24)**

Atlas použití kovů byl sestaven zkušenými odborníky jako přehledná pomůcka pro volbu kovů, určená pro konstruktéry, techniky a studující odborných i vysokých škol. Kniha vyšla v roce 1980. Je součástí knihoven mnohých starších materiálových odborníků, ale v současné době je již nedostupná.

- **Hutnictví – Materiálové listy ocelí (25)**

Obsahuje bezplatné informace o platnosti technických norem ČSN a o vydaných změnách a opravách těchto norem.

- **Ferona, a.s., materiálové listy (26)**

Zde lze nalézt pouze některé nestrukturalizované informace o materiálech.

- **Matweb (27)**

Databáze materiálových vlastností pro mnoho kovů, plastů, keramiky a dalších konstrukčních materiálů.

- **AZoM.com (The A to Z of Materials) (28)**

Zdroj informací o materiálech pro konstruktérskou komunitu. Je bezplatná. Dá se v ní vyhledávat podle typu materiálů nebo podle klíčových slov, použití nebo odvětví.

- **ASM International (29)**

Společnost pro materiálové inženýry a vědce, celosvětová síť určená pokrokovému průmyslu, technologiím využívající kovy a další materiály.

- **Thomson Reuters TECHstreet (30)**

Obchod pro nákup norem všech světových vydavatelů, především však pro kovoprůmysl.

- **SAE International (31)**

Společnost pro inženýry z automobilového průmyslu, společnost techniků pro pokrokovou mobilitu na zemi nebo na moři, ve vzduchu nebo vesmíru. Zdroj informací používaných při navrhování vozidel s vlastním pohonem. Poskytují normy kovů, plastů a dalších materiálů společně s komponentami a systémy vozidel.

- **ASTM International (32)**

Dříve známo jako „American Society for Testing and Materials“. Přípravuje a prodává normy materiálových vlastností, testovacích procedur a mnoho dalších technických norem.

- **American Iron and Steel Institute (33)**

AISI připravuje průmyslové normy pro ocele a produkty vyrobené z oceli.

- **Iron and Steel Society** (34)

(The Institute of Materials, Minerals and Mining - IOM3, Ústav materiálů, minerálů a hornictví). IOM3 je významná britská strojírenská instituce, jejíž aktivity zahrnují celé životní cykly materiálů.

- **Aluminum Association** (35)

Poskytuje globální normy, průmyslové statistiky, odborné vědecké poznatky z oblasti hliníkového průmyslu, které jsou většinou zpoplatněny.

- **Alcoa Inc.** (36)

Výrobce hliníku a hliníkových produktů. Je možno zde vyhledat i informace o vlastnostech specifických ocelí.

- **Copper Development Association Inc.** (37)

Poskytuje rozsáhlou databázi vlastností tvářených i litých mědí, slitin mědí, mosazí a bronzů. Umožňuje vyhledávání vhodných slitin pro typické průmyslové využití založené na několika výkonnostních charakteristikách.

- **Metal Powder Industries Federation** (38)

Tato skupina je určena pro vývoj trhu a přenos technologií, které zvyšují hodnotu zinkových litých slitin. Poskytuje podporu konstruktérům a příručky výběru slitin.

- **Smithers Rapra** (39)

Smithers Rapra dodává expertizy o předních průmyslových gumách a plastech, a to od konceptu produktu po uvedení výrobku na trh i poté.

- **DuPont Plastics** (40)

Poskytuje informace a data o DuPont plastech a jejich vlastnostech. Umožňuje vyhledávání podle typu plastu nebo použití.

- **PolymerPlace.com** (41)

Zdroj informací o průmyslových polymerech.

- **Plastics Technology Online** (42)

Online zdroj časopisů o technologii plastů.

- **Material Data Center** (43)

Nabízí nejkvalitnější data z plastikářského průmyslu o materiálech a jejich použití. Systém nabízí komplexní intuitivní a inteligentní nástroje.

- **Society of Plastics Engineers (SPE)** (44)

SPE propaguje vědecké a inženýrské vědomosti a vzdělávání o plastech a polymerech po celém světě.

- **Materio** (45)

Jedná se o síť informačních center v oblasti materiálů a s nimi spojených technologií. Kromě fyzické knihovny materiálových vzorků nabízí on-line databázi. Je určena více uměleckým oborům, než technickým.

- **Granta Design** (46)

Jejím posláním je být ve vedení technologie pro předávání informací o materiálech, propagovat materiálové inženýrství a vzdělávání, a tím umožnit vhodnější, ekologičtější, bezpečnější produkty.

Jedná o světově jedinečnou firmu v této oblasti, a to jak v množství materiálů obsažených v databázi, tak především v možnostech a způsobech jejího využití a používání. Z těchto důvodů byla vybrána a dále se bude používat v této práci.

### 3.3. Granta Design - CES

Při výběru optimálních materiálů pro dané požadavky zákazníků na produkt potřebují konstruktéři znát následující:

- nabídku světově dostupných materiálů (kovů, polymerů, skel, keramiky, kompozitů, atd.) a technologické procesy jejich zpracování (tvarování, spojování, povrchové úpravy);
- porozumět vlastnostem materiálů a způsobům zpracování;

- mít k dispozici rychlý přístup k informacím o vlastnostech materiálů; vzhledem k rozsahu je rychlý přístup k datům pomocí počítače jediným efektivním řešením;
- metodiku výběru z nabídky materiálů a procesů, pomocí kterých se dají splnit požadavky kladené na konstrukci produktů.

Splnění výše uvedených potřeb bere firma Granta Design (46) jako svoje poslání. Poskytuje databázi materiálů, ve které lze sestavovat materiálové mapy vlastností, které pomáhají při optimalizaci výběru materiálů a pro porozumění celé problematice vlastností materiálů. Tímto, a řadou dalších aktivit, je firma Granta Design zcela výjimečnou mezi dalšími. Spojuje vědu o materiálech s konstrukcí produktů, snaží se, aby tyto dva dominantní „světy“ si porozuměly. Existuje od roku 1994, vznikla oddělením z Cambridge University, Engineering Department. Pomáhá vyřešit firmám nejen výběr materiálů, ale i sběr zkušebních dat pro řízení rizik a nákladů spojených s materiály, např. v oblastech předpisů pro životní prostředí, efektivitu zadávání veřejných zakázek, ekologického designu, řízení životního cyklu produktu a integrity dat pro simulaci. Jedni z mnoha jejích partnerů jsou: Airbus, Boeing, Doosan Power Systems, Emerson Electric, GE, General Motors, GKN Aerospace, Honeywell, Jaguar Land Rover, Lockheed Martin, NASA, Philips, PSA Peudeot-Citroën, Rolls-Royce, United Technologies Corp. Mnoho dalších firem je členy konsorcia firmy Granta. Díky tomu poskytuje Granta Design software svým zákazníkům přesně takový, jaký potřebují. Mají tři konsorcia:

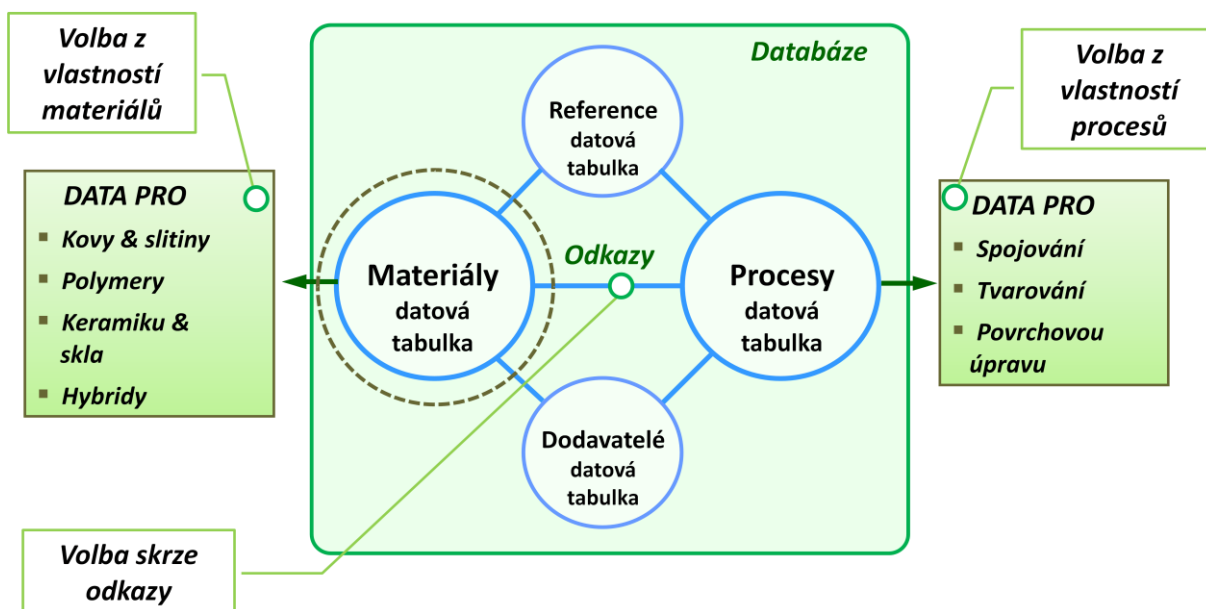
- The Material Data Management Consortium (MDMC)
- The EMIT Consortium (The Environmental Materials Information Technology)
- The Automotive Material Intelligence Consortium

Mezi akcionáře firmy Granta patří také Cambridge University a ASM International.

Vzhledem k tomu, že základy firmy byly postaveny na Cambridge University, firma Granta Design poskytuje obrovskou podporu v oblasti výuky strojírenských materiálů a navrhování z nich. Otcem a lídrem všech výukových podpor, a zároveň zakladatelem firmy, je profesor Mike Ashby.

CES EduPack (CES – Cambridge Engineering Selector) je software pro podporu výuky, který používá kolem tisíce univerzit po celém světě. Na obr. 15 je organizační struktura databáze CES EduPack. Obsahuje 4 propojené datové tabulky a to jsou:

- materiály – kovy, polymery, keramika a hybridy;
- technologické procesy – tvarování, spojování, dokončovací operace;
- reference obsahující další informace o daném záznamu v datových tabulkách;
- informace o dodavatelích materiálů nebo procesů.

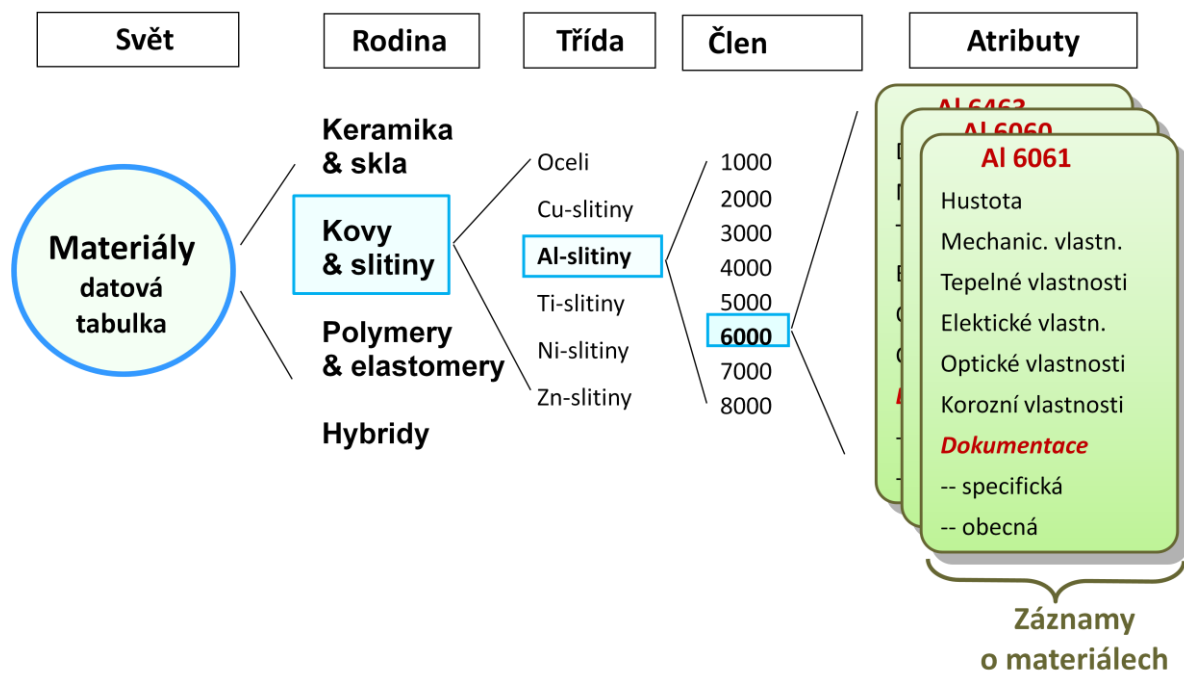


Obr. 15 Základní organizační struktura CES EduPack databáze (47)

Všechny záznamy v datové tabulce materiálů obsahují data o materiálových vlastnostech. Ta jsou propojena se záznamy o technologických procesech a obráceně. To umožňuje výběr materiálů zadáním požadované vlastnosti, nebo zadáním, jak může být materiál zpracován.

Na obr. 16 je hierarchická struktura záznamů o materiálech v datové tabulce. Svět materiálů obsahuje 4 rodiny materiálů. Dále se dělí na třídy (např. u kovů i na podtřídy) a ty se dále dělí na členy. Každý člen je charakterizován souborem atributů, což jsou vlastnosti vyjádřené kvantitativně nebo kvalitativně, a podpůrnými informacemi, které je charakterizují.





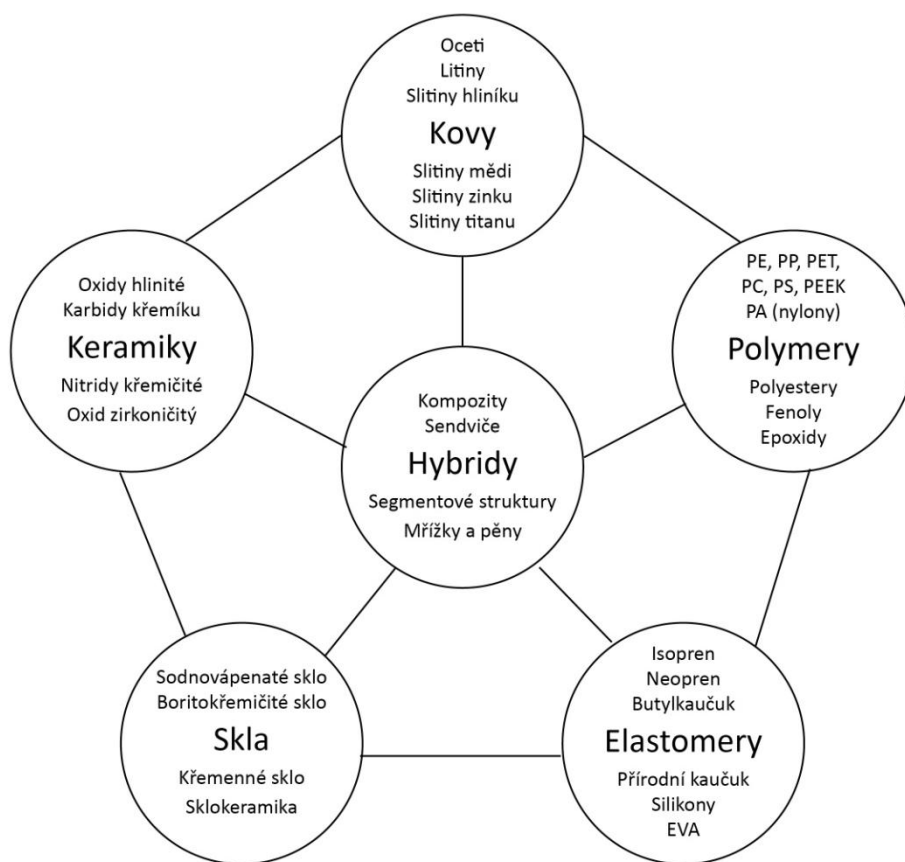
Obr. 16 Hierarchická struktura záznamů o materiálech v datové tabulce (47)

CES EduPack má následující hlavní nástroje:

- prohlížení;  
prozkoumá databázi a vyhledá záznamy podle hierarchického ukazatele nebo stromu;
- hledání;  
najde informace podle fulltextového vyhledávání záznamů;
- výběr;  
hlavní a nejdůležitější nástroj CES EduPack;  
využívá se pro aplikaci metodiky racionálního výběru materiálů;  
velmi účinný nástroj pro identifikování záznamů, které seřadí podle konstrukčních kritérií;  
umožňuje kompromisy mezi konkurenčními cíli.
- grafické znázornění;  
vytváří mapy a umožňuje úpravu formátu a označení, aby se dal objasnit smysl mapy;
- ekologická analýza;  
umožňuje rychlý odhad dopadu produktu na životní prostředí pro každou fázi jeho životního cyklu.

### 3.4. Rozdělení materiálů

Obvykle se strojírenské materiály rozdělují do šesti základních skupin, tak je tomu i v databázi CES EduPack. Rozdělení je znázorněno na obr. 17. Materiály se dělí na kovy, polymery, elastomery, keramiku, skla a hybridy. V jednotlivých skupinách (rodinách) mají materiály podobné vlastnosti, podobné procesy zpracování a často se hodí také na podobné aplikace. Dále následuje stručná charakteristika jednotlivých rodin materiálů.



Obr. 17 Nabídka konstrukčních materiálů (2)

*Kovy* mají vysokou tuhost. Mají poměrně vysoké moduly pružnosti. Ve výchozím stavu jsou měkké a snadno přetvářitelné. Jejich pevnost se může zvýšit legováním, mechanickým a tepelným zpracováním. Zůstávají však tažné a mohou být i po tomto zpracování tvářeny. Některé vysokopevnostní slitiny (např. pružinové oceli) mají tažnost jen 1%, ale to je dost, aby zajistily, že lomu bude předcházet plastická deformace. Pokud tedy k lomu dojde, bude tvárného charakteru. Kovy podléhají únavě, částečně kvůli jejich tažnosti, a mají ze všech skupin materiálů nejmenší odolnost vůči korozi.

*Keramiky* mají také vysoké moduly pružnosti, ale na rozdíl od kovů jsou křehké. Jejich pevností v tahu se rozumí pevnost do podlehnutí křehkému lomu. Schopnost odolávat křehkému porušení v tlaku je u nich asi 15 krát větší, než je v tahu. Protože keramiky nemají žádnou tažnost, mají nízkou odolnost vůči koncentrátorům napětí (jako jsou díry nebo praskliny) nebo vůči velkému kontaktnímu napětí (např. na upínací body). Tvárné materiály se vyrovnávají s koncentrací napětí pomocí deformace, která přerozděluje zatížení rovnoměrněji. Proto mohou být použity při statickém zatížení pohybujícím se kolem meze kluzu. Keramiky nemohou. Křehké materiály mají vždy široký rozptyl jejich mechanické pevnosti a pevnost sama závisí na objemu materiálu, který je zatěžován, a na délce doby zatížení. Konstruování z keramiky není tedy tak jednoduché jako z kovů. Navzdory tomu keramiky mají atraktivní vlastnosti. Jsou tuhé, tvrdé a odolné proti otěru (z tohoto důvodu se používají pro ložiska a obráběcí nástroje). Zachovávají pevnost i při vysokých teplotách a jsou dobře odolné vůči korozi.

*Skla* jsou nekystalické (amorfní) pevné látky. Nejběžnější jsou sodovápenatá a borokřemičitá skla, známá jako láhve a ohnivzdorné sklo, ale je jich mnohem více. Kovy mohou být také nekystalické, pokud se dostatečně rychle zchladí. Protože skla nemají kystalickou strukturu, jsou málo tvárná, stejně jako keramiky, tvrdá, křehká a citlivá na koncentraci napětí.

*Polymery* jsou organické pevné látky, jejichž základ tvoří dlouhé řetězce uhlíkových (nebo, málokdy, křemíkových) atomů. Polymery jsou lehké, všechny jsou lehčí, než nejjlehčí z kovů. Jsou měkké, mají nízké moduly pružnosti, zhruba 50 krát menší než kovy. Ale mohou být pevné téměř jako kovy, a to díky jejich nízké hustotě, tudíž jejich pevnost na jednotku hmotnosti je srovnatelná s kovy. Polymery tečou dokonce i při pokojových teplotách, což znamená, že zatížená součást z polymeru může časem získat jiný tvar. Jejich vlastnosti závisí na teplotě. Polymer, který je houževnatý a pružný při teplotě 20°C, může být v ledničce křehký (při 4°C) a už může rapidně téci ve vroucí vodě (při 100°C). Jen málo z nich má použitelnou pevnost nad 200°C. Některé polymery jsou převážně kystalické, některé jsou amorfní (nekystalické), některé jsou směsí, tedy kystalické a amorfní, přičemž průhlednost plastů je obvykle spojená s amorfní strukturou. Pokud jsou tyto aspekty přípustné pro určitý návrh konstrukce, potom se z nich mohou stát výhody polymerů. Může jich být mnoho. Pokud je pro návrh důležitá kombinace vlastností, jako je pevnost na jednotku hmotnosti, v tom případě polymery konkurují kovům. Jsou snadno tvarovatelné. Složité součásti, které plní několik funkcí, mohou být vylišované během jedné operace. Velké pružné deformace dovolují konstruování polymerních komponent,

kteře do sebe snadno zapadnou, takže jejich montáž je jednoduchá a levná. Při použití přesně dimenzovaných forem a již barevných polymerů, nejsou už zapotřebí další dokončovací operace. Polymery jsou odolné vůči korozi (např. nátěry jsou z polymerů) a mají nízký koeficient tření. Dobrým návrhem se dá těchto vlastností využít.

*Elastomery* (např. pružné pásy a boty na běhání) jsou polymery s unikátními vlastnostmi pro jejich tuhost. Tuhost se měří modulem pružnosti, který mají extrémně nízký (500-5000 krát menší než kovy). Proto jsou schopny mnohočetné protažitelnosti a po uvolnění se vrátí zpět do původního tvaru. I přes malou tuhost mohou být pevné a houževnaté (příkladem jsou pneumatiky).

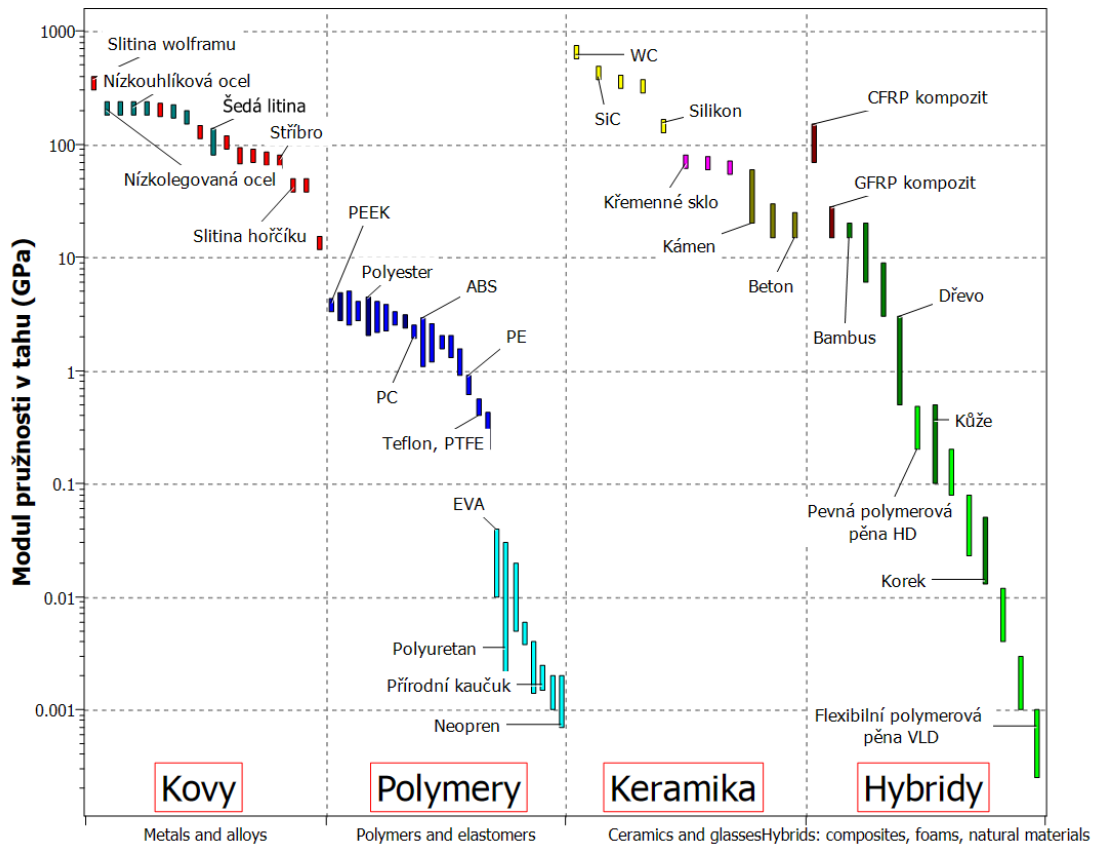
*Hybridy* jsou kombinací dvou nebo více materiálů v předem stanoveném uspořádání a měřítku (rozsahu). Kombinují atraktivní vlastnosti ostatních skupin materiálů, zatímco se vyhýbají některým jejich nevýhodám. Do skupiny hybridů patří vláknové a částicové kompozity, sendvičové konstrukce, příhradové konstrukce, pěny, kabely a lamináty. Téměř všechny přírodní materiály (dřevo, kosti, kůže a listy) jsou hybridy. Většina kompozitů, které mají konstruktéři v současné době k dispozici, má matrice z polymerů, které jsou vyztužené vlákny ze skla, uhlíku nebo kevlaru (aramidu). Jsou lehké, tuhé a pevné, můžou být také houževnaté. Kompozity a i jiné hybridy, v nichž je jedna ze složek z polymeru, nemohou být použity nad 250°C, protože s rostoucí teplotou díky polymeru měknou (ztrácí pevnost), ale při pokojové teplotě může být jejich výkonnost mimořádná. Komponenty z hybridů jsou drahé, jejich tvarování a spojování je poměrně složité. A tak navzdory jejich atraktivním vlastnostem je konstruktéři použijí jedině v případě, když zvýšená výkonnost ospravedlní zvýšení nákladů. Dnešní zvyšující se důraz na vysokou výkonnost a účinnost paliva zvyšuje motivaci pro jejich použití.

### **3.5. Mapy vlastností materiálů**

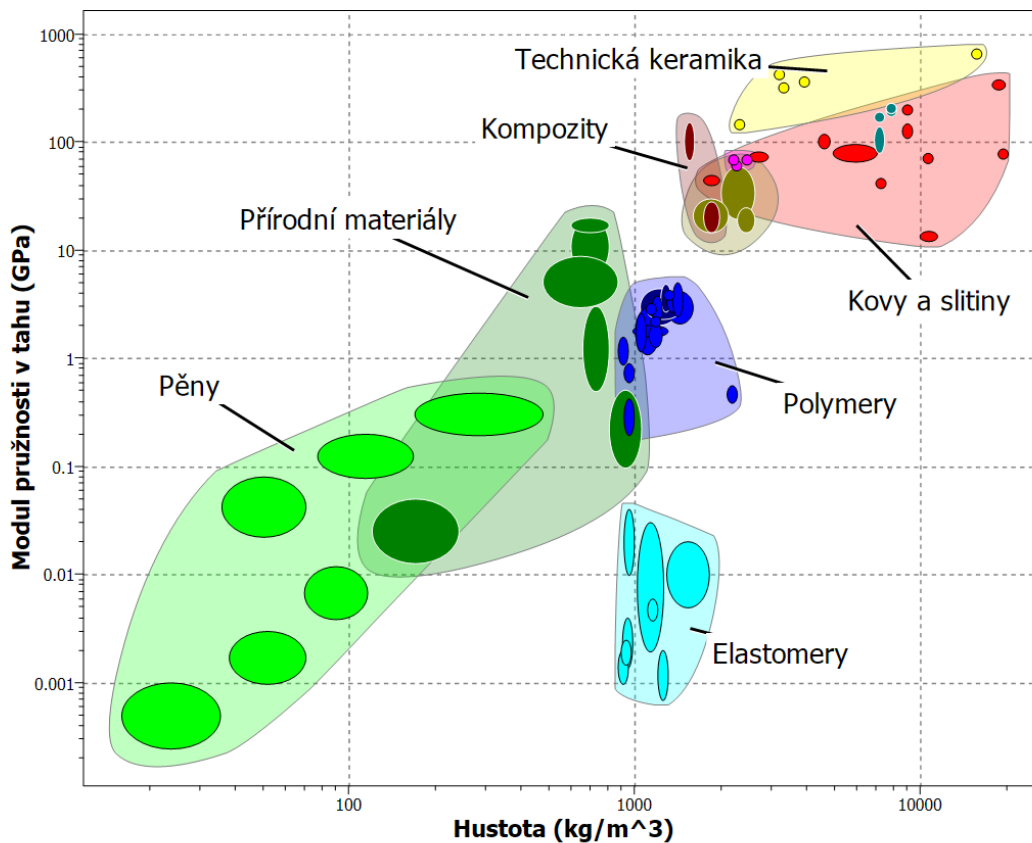
Jak již bylo řečeno, výkonnost materiálů omezují jejich vlastnosti. Tabulky vlastností materiálů nedávají perspektivu snadného a rychlého vyhledávání, neumožňují ani snadné srovnávání. Přehledné koncentrované informace o vlastnostech materiálů se dají zobrazit pomocí materiálových grafů (map) vlastností. Jsou dva typy. Sloupcové a bublinové mapy. Sloupcová mapa zobrazuje jednu vlastnost pro všechny materiály světa. Názorný příklad je na Obr. 18. Jedná se o sloupcovou mapu pro modul pružnosti  $E$ . Největší modul je více než 10 milion krát větší než nejmenší. Protože mnoho dalších vlastností mají podobná rozpětí jako modul, z tohoto důvodu jsou vlastnosti vynášeny v logaritmickém měřítku, nikoliv

lineárním. Výška každého sloupce představuje rozpětí vlastností každého jednotlivého materiálu. Jednotlivé materiály segregují v mapě ve skupinách a ty právě představují rodiny materiálů. Kovy a keramika mají vysoké moduly. Polymery je mají 50 krát menší než kovy, elastomery dokonce 500 krát menší.

Více informací je napěchováno v tzv. bublinové mapě, neboť tam jsou zobrazeny dvě vlastnosti všech materiálů proti sobě. Na obr. 19 je vyneseno modul pružnosti  $E$  a hustota  $\rho$ . Jako v předešlém případě, měřítka jsou logaritmická. V tomto diagramu jsou rodiny zřetelněji odděleny. Všechny kovy leží v červené zóně vpravo nahoře, všechny polymery leží v tmavomodré obálce ve středu mapy, elastomery ve světlomodré obálce pod nimi, keramika ve žluté obálce nejvýše. Každá rodina materiálů zaujímá jasně odlišné, charakteristické pole.



Obr. 18 Sloupcová mapa modulu pružnosti. Ukazuje odlišnosti v tuhosti mezi rodinami materiálů. (47)



Obr. 19 Bublínová mapa modulu pružnosti a hustoty. Rodiny obsadily oddělené oblasti mapy (47)

Mapy materiálových vlastností jsou základním a stěžejním nástrojem, který se používá při výběru materiálů. Dávají přehled o fyzikálních, mechanických a funkčních vlastnostech materiálů, poskytují o nich informace kompaktním způsobem. (Tisíce hodnot jsou zhuštěné do jedné přehledné mapy.) Odkrývají aspekty fyzikálního původu vlastností, které jsou prospěšné pro porozumění základů nauky o materiálech. Odhalují vztahy mezi materiálovými vlastnostmi, které napomáhají při kontrole a odhadu údajů. Stávají se nástrojem pro optimální výběr materiálů, které splňují konstrukční požadavky, a pomáhají porozumět používání materiálů ve stávajícím produktu.

Obě mapy vlastností jsou vytvořeny pomocí softwaru Cambridge Engineering Selector (CES), který umožňuje tvořit mapy vlastností nebo funkčních závislostí vlastností (jako  $E/\rho$ ) podle potřeb konstruktéra. V závislosti na vynesených vlastnostech mění jednotlivé bubliny tvar a umístění v mapě.

## 4. Metodika výběru materiálů

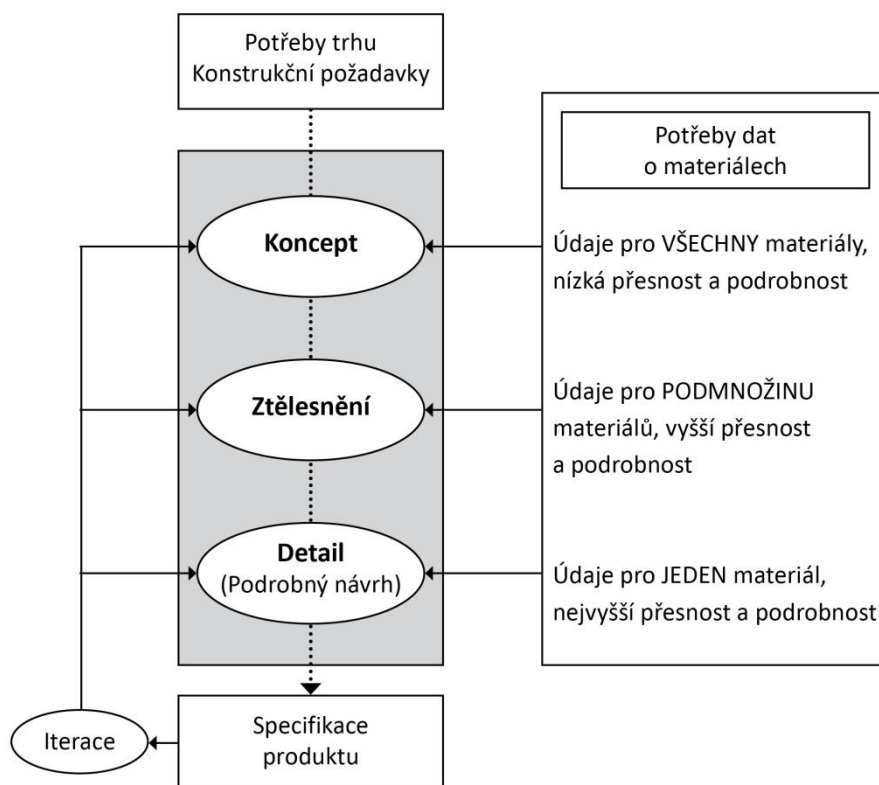
### 4.1. Vztah mezi procesem konstruování a výběrem materiálů

Výběr materiálu vstupuje do každé fáze procesu navrhování. Jeho vstupy do hlavní páteře konstrukční metodologie jsou zobrazeny na obr. 20 vpravo. V jednotlivých fázích se charakter údajů výběru materiálů liší a to především v úrovni přesnosti a šíře výběru.

Ve fázi konceptu konstruktér potřebuje přibližné hodnoty vlastností, ale potřebuje co nejširší škálu materiálů. V této fázi jsou ještě otevřeny všechny možnosti. Polymer může být nejlepší volba pro jedno pojetí výběru, pro druhé kov, i když funkce je stejná. Úkolem této fáze není provést výběr přesně a detailně. Předmětem řešení je zde rozsah a rychlost získání informací z co nejširší škály dat o materiálech, aby měl konstruktér dostatečnou volnost výběru a přitom neztrácel čas.

Ve fázi ztělesnění se zúží rozsah výběru materiálů. V této chvíli potřebuje konstruktér data určité podmnožiny materiálů, ale detailnější a přesnější, než v předchozí fázi. Musí hledat ve více specializovaných příručkách a softwarech, které se zabývají pouze jednou třídou nebo podtřídou materiálů, např. kovy nebo jen hliníkové slitiny. Nyní nastane riziko, že se zúžením rozsahu ztratí ze zřetele jiná skupina materiálů. Pokud by ale ve fázi detailního rozpracování konstruktér zjistil, že výběr materiálu zcela nevyhovuje zadaným kritériím, je potřeba se vrátit do fáze konceptu a detailněji prozkoumat jinou třídu nebo podtřidu materiálů, zda by se nenašlo lepší řešení výběru materiálu.

V závěrečné fázi detailního rozpracování návrhu je potřeba nalézt nejpřesnější a nejdetajnější informace pro jeden nebo několik málo materiálů. Takové informace je nejlepší hledat v materiálových listech samotných výrobců nebo v podrobných databázích pro omezené třídy materiálů. Určitý materiál, např. polyetylén, má řadu vlastností, které jsou odvozeny ze způsobu výroby. Každý dodavatel může mít mírně odlišné vlastnosti materiálu. Proto se musí v této fázi vybrat konkrétní dodavatel, zjistit podrobné a přesné vlastnosti daného materiálu z finálního výběru, aby se dala provést podrobná výpočtová analýza. Někdy je obezřetné provést testy na vzorku materiálu, aby se zjistily kritické hodnoty vlastností.



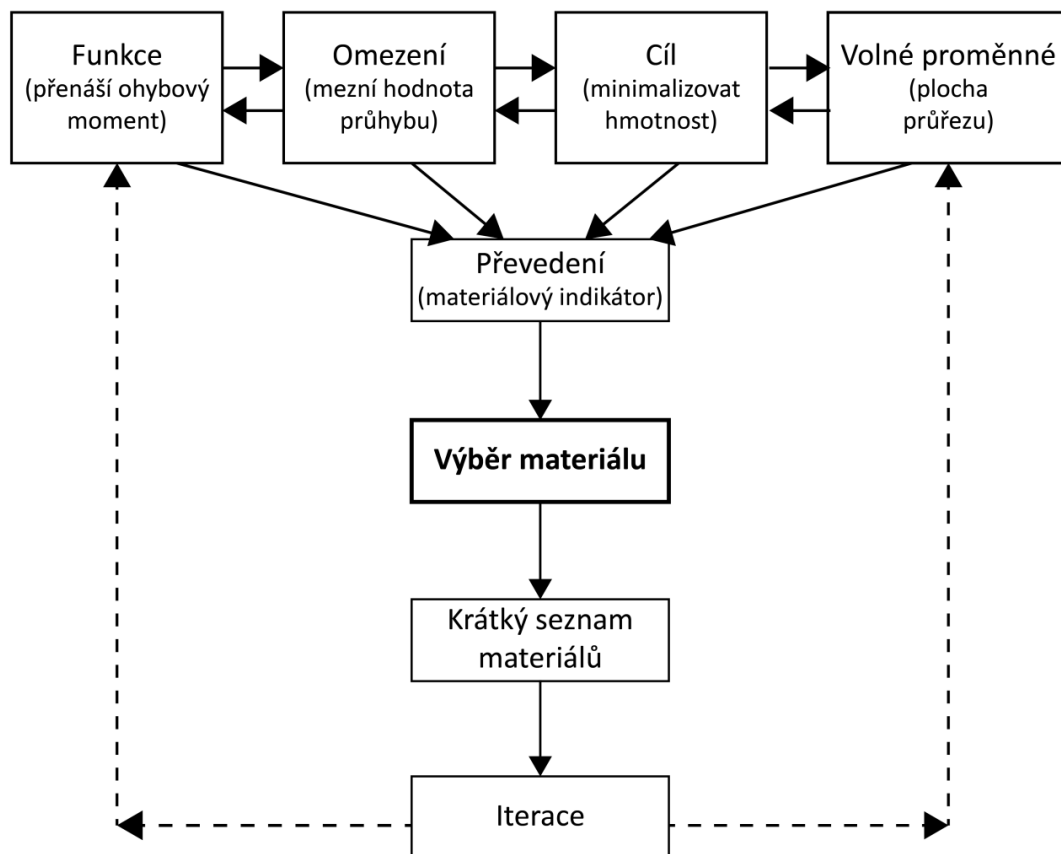
Obr. 20 Vývojový diagram procesu navrhování – vstupy materiálových dat do procesu navrhování (2)

## 4.2. Výběr materiálů řízený konstrukčním návrhem

Principy výběru materiálů jsou nastíněny na obr. 21. Výběr je řízen návrhem součástí produktu. Vstupem jsou požadavky návrhu produktu. To jsou: *funkce, omezení, cíle a volné proměnné*. *Funkce* je definována účelem součásti, např. nést zatížení, pohltit tlak, přenést teplo, atd. *Omezení* jsou podmínky, které musí být splněny pro vykonávání funkce součásti. Předně se jedná o funkční omezení, jako je např. mezní hodnota pružné deformace, komponenta musí přenést konstrukční zatížení nebo tlak bez selhání, chovat se jako izolant nebo vodič, pracovat v určitém vnějším prostředí nebo rozmezí teplot. Neméně důležitá jsou geometrická omezení, která předepisují určité rozměry navrhované součásti. Při navrhování komponent má konstruktér určité *cíle*. To jsou veličiny, které se mají minimalizovat nebo maximalizovat, např. udělat to co nejlevější, nejlehčí, nejbezpečnější, s největší životností, či možná určitou kombinaci výše zmíněných. Jisté parametry mohou být přizpůsobeny k co největšímu naplnění cíle. Konstruktér může měnit rozměry, které nejsou pevně dány, a hlavně může pro komponentu vybrat materiál. Jedná se o tzv. *volné proměnné*, to jsou parametry, které se mohou upravovat, aby se daly optimalizovat cíle.



Obr. 21 naznačuje postup výběru materiálů řízený konstrukčním návrhem. Konstrukční požadavky je potřeba převést do specifikace vhodné pro výběr materiálu. To se dělá odvozením tzv. materiálových indikátorů.



Obr. 21 Výběr materiálů řízený návrhem

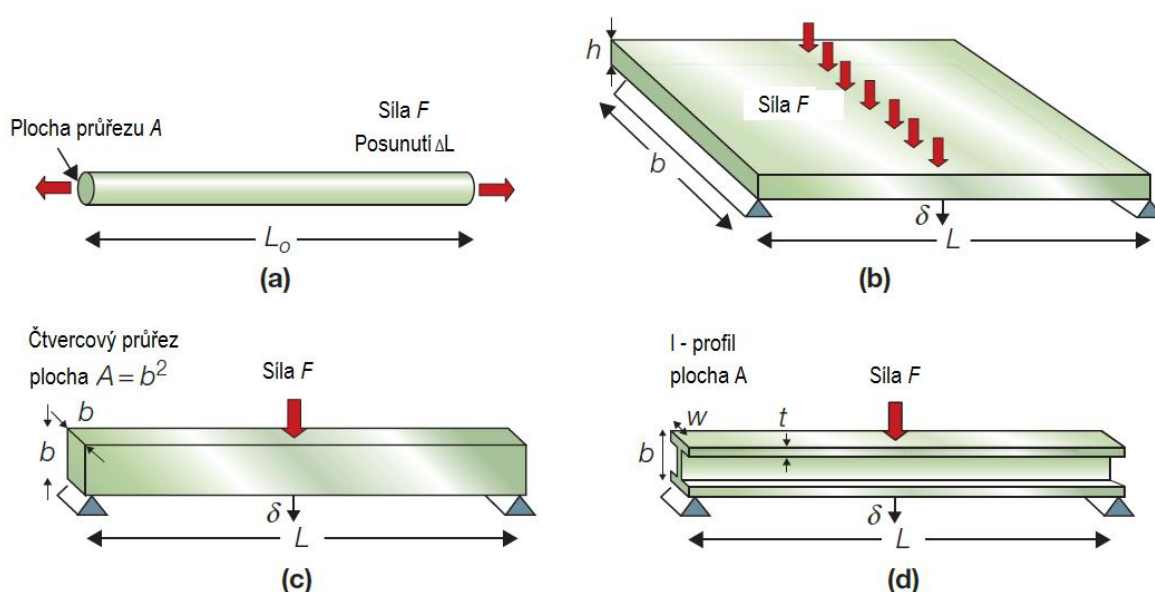
### 4.3. Materiálové indikátory

Omezení nastavují meze vlastností. Cíle definují materiálové indikátory, pro které hledáme extrémní hodnoty. Pokud „cíl“ není svázán s „omezením“, materiálovým indikátorem je prostá materiálová vlastnost. Ovšem pokud je „cíl“ svázán se dvěma vlastnostmi, indikátorem se stane skupina vlastností. Odvození materiálových indikátorů je dále vysvětleno.

Zatížení nejjednodušších mechanických částí může být obecně rozloženo na kombinaci tahu, ohybu, krutu a tlaku. Téměř vždy jedna složka dominuje. Takže je běžné, že funkční název součásti popisuje způsob zatížení. Pruty přenášejí tahové síly; nosníky a desky

přenášejí ohybové momenty; hřídele přenášejí kroutící momenty; sloupky přenášejí tlakové osové síly. Slova prut, nosník, hřídel a sloupek nepřímo vyjadřují funkci. U nich se přezkoumávají omezení, cíle a pro některé z nich odpovídající materiálové indikátory.

Velmi názorným příkladem je energie na provoz a emise dopravních systémů. Ty jsou určeny spotřebovaným palivem během používání. Čím je systém lehčí, potřebuje méně paliva a produkuje méně emisí. Dobrým startovacím bodem je tedy snaha o co nejlehčí konstrukci, samozřejmě za předpokladu splnění dalších omezení spojených např. s pevností a tuhostí. Dále budou uvažovány základní komponenty, které jsou zobrazeny na obr. 22. Prut, deska a nosníky jsou zatíženy vnějšími silami.



Obr. 22 Základní prvky: a) prut, b) deska, c) a d) nosník (2)

### 4.3.1. Minimalizace hmotnosti: lehký pevný prut

Prut musí přenést tahovou sílu  $F^*$ , aniž by došlo k jeho porušení, a zároveň být co nejlehčí (obr. 22 (a)). Délka je specifikovaná, ale průřez ne. V tomto případě maximální výkonnost znamená co nejmenší hmotnost za podmínky bezpečného přenesení síly  $F^*$ . Požadavky konstrukce jsou shrnuty v tabulka 3.

Tabulka 3 Požadavky konstrukce pro lehký pevný prut

Funkce	Prut
Omezení	Délka $L$ je daná (geometrické omezení) Prut musí přenést axiální tahovou sílu $F^*$ bez porušení (funkční omezení)
Cíl	Minimalizovat hmotnost $m$ prutu
Volné proměnné	Plocha průřezu $A$ ; Volba materiálu

Nejprve je potřeba najít rovnici popisující veličinu, která se má maximalizovat, nebo minimalizovat. Zde je touto veličinou hmotnost  $m$  a hledá se její minimum. Rovnice, jež se nazývá cílová funkce (funkce pro splnění cíle), je

$$m = AL\rho \quad 1$$

kde  $A$  je plocha průřezu a  $\rho$  hustota použitého materiálu. Délka  $L$  a síla  $F$  jsou dané, průřez  $A$  je volný. Hmotnost se může zmenšit zmenšením průřezu, ale to má omezení. Průřez  $A$  musí být dostatečný pro přenos síly  $F^*$ , což vyžaduje aby

$$\frac{F^*}{A} \leq \sigma_f \quad 2$$

kde  $\sigma_f$  je pevnost na mezním stavu. Eliminací  $A$ , neboli dosazením  $A$  z rovnice 2 do rovnice 1 se dostane:

$$m \geq (F^*)(L) \left( \frac{\rho}{\sigma_f} \right) \quad \leftarrow \text{Materiálové vlastnosti} \quad 3$$

↑ Funkční omezení
↑ Geometrické omezení

Důležité je všimnout si formátu výsledku. První závorka obsahuje specifické zatížení  $F$ , druhá geometrické parametry (délku prutu  $L$ ) a poslední materiálové vlastnosti. Nejlehčí nosník, který přenese  $F^*$  bezpečně, je vyroben z materiálu s nejmenším poměrem  $\rho/\sigma_f$ . Tento poměr se dá prohlásit za materiálový indikátor a hledat jeho minimum. Ovšem více obvyklé je hledat maximální hodnoty určitých vlastností. Z tohoto důvodu se provede inverze materiálových vlastností z rovnice 3 a definuje se materiálový indikátor  $M_{tl}$  jako (označení indexem  $t$  vychází z anglického slova tie, česky prut):

$$M_{t1} = \frac{\sigma_f}{\rho} \quad 4$$

Nejlehčí prut, který přenesení  $F^*$  bez poškození, je z materiálu s největší hodnotou indikátoru  $M_{t1}$ , který představuje měrnou pevnost. Podobně se dá uvažovat, pokud je požadován lehký tuhý prut. Na místo pevnosti  $\sigma_f$  je uvažována tuhost  $S$ . To vede k indikátoru

$$M_{t2} = \frac{E}{\rho} \quad 5$$

kde  $E$  je modul pružnosti v tahu. Indikátor  $M_{t2}$  představuje měrnou tuhost. V obou případech se jedná o skupinu materiálových vlastností (více než jedna vlastnost), která se projevuje jako indikátor. Cíl, u obou se jedná o minimální hmotnost, byl svázán s omezením ohledně přenosu zatížení bez prasknutí nebo nadměrné deformace.

Následuje krátká rekapitulace postupu. Délka tyče je pevně dána, ale může se volit průřez. Cílem je minimální hmotnost. Byla napsána rovnice pro hmotnost  $m$ . Tím byla získána cílová funkce. Ale je tu omezení. Tyč musí přenést zatížení  $F$ . To se využije k eliminaci volné proměnné  $A$  z rovnice a k odečtení kombinace vlastností  $M$ , které se budou maximalizovat. Zní to jednoduše a také je, ovšem za předpokladu, že od začátku je známo (dobře určeno), jaká jsou omezení, co se má maximalizovat, nebo minimalizovat, které parametry jsou dané a které jsou volné.

### 4.3.2. Minimalizace hmotnosti: lehká tuhá deska

Délka  $L$  a šířka  $b$  jsou specifikované, ale tloušťka  $h$  je volná. Deska je zatížena ohybem od centrálního zatížení  $F$  (jak je vidět na obr. 22 (b)). Tuhostní omezení požaduje průhyb menší než  $\delta$ . Cílem je při těchto omezeních dosáhnout nejmenší možnou hmotnost  $m$ . Tabulka 4 shrnuje konstrukční požadavky.

Tabulka 4 Konstrukční požadavky pro lehkou tuhous deskou

Funkce	Deska
Omezení	Tuhosť v ohybu $S^*$ je daná (funkční omezení) Délka $L$ a šířka $b$ jsou dané (geometrické omezení)
Cíl	Minimální hmotnosť $m$ desky
Volné proměnné	Tloušťka desky $h$ ; Volba materiálu

Cílová funkce hmotnosť desky je stejná jako pro prut:

$$m = AL\rho = bhL\rho \quad 6$$

Ohybová tuhosť  $S$  musí být větší nebo rovna  $S^*$ :

$$S = \frac{C_1 EI}{L^3} \geq S^* \quad 7$$

Zde  $C_1$  je konstanta závisějící jen na rozložení zatížení. Její hodnota není potřeba, lze ji najít v odborné literatuře. Kvadratický moment průřezu  $I$  pro obdélkový průřez je:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad 8$$

Hmotnosť se může snížit zmenšením tloušťky  $h$ , ale pouze za podmínky splnění tuhosťního omezení. Použitím posledních dvou rovnic k eliminaci  $h$  z cílové rovnice se získá:

$$m \geq \left(\frac{12S^*}{C_1 b}\right)^{1/3} (bL^2) \left(\frac{\rho}{E^{1/3}}\right) \quad \leftarrow \text{Materiálové vlastnosť} \quad 9$$

Funkční omezení

↑

↑

Geometrické omezení

Veličiny  $S^*$ ,  $L$ ,  $b$  a  $C_1$  jsou dané; jedinou volnou proměnnou je volba materiálu. Indikátorem je skupina materiálových vlastností, pro které se hledá maximum její převrácené hodnoty. Nejlepší materiály pro lehkou tuhous deskou jsou ty s nejvyšší hodnotou:

$$M_{p1} = \frac{E^{1/3}}{\rho} \quad 10$$

Pokud se místo tuhosti bude uvažovat pevnost, potom bude indikátor dán tímto vztahem:

$$M_{p2} = \frac{\sigma_k^{1/2}}{\rho} \quad 11$$

Tyto výrazy nevypadají velmi odlišně od předchozích indikátorů  $E/\rho$  a  $\sigma_k/\rho$ , ale vedou k volbě jiného materiálu, což bude ukázáno později.

### 4.3.3. Minimalizace hmotnosti: lehký tuhý nosník

V tomto případě hraje důležitou roli tvar nosníku. Nosníky se vyskytují v mnoha tvarech - plné obdélníkové, válcové duté, I-profilu a mnoho dalších. Některé mají příliš mnoho volných geometrických proměnných, aby bylo možná aplikovat předchozí metodu přímo. Ale pokud se omezí tvar tak, aby byl navzájem geometricky podobný (všechny rozměry průřezu se mění úměrně celkové velikosti, tak jako se mění celková velikost), problém se zjednoduší a je řešitelný. Proto se provádí návrh nosníku ve dvou krocích. Nejprve se hledá optimální materiál pro lehký, tuhý nosník předepsaného jednoduchého tvaru (čtvercový průřez). Ve druhém kroku se zkoumá, o kolik lehčí může být při stejné tuhosti s využitím efektivnějšího tvaru.

Je uvažován nosník čtvercového průřezu  $A = b \times b$ , který může měnit velikost, ale čtvercový tvar musí být zachován. Je namáhán na ohyb, uložen na dvou podporách s pevnou roztečí  $L$  a zatížen centrálně umístěnou silou  $F$  (obr. 22 (c)). Znovu se použije tuhostní omezení, že průhyb musí být menší než  $\delta$ . Cílem je opět dosažení co možná nejmenší hmotnosti. Tabulka 5 shrnuje konstrukční požadavky.

Postup je stejný jako v předchozích případech. Cílovou funkcí pro hmotnost je:

$$m = AL\rho = b^2L\rho \quad 12$$

Ohybová tuhost  $S$  musí být větší nebo rovna  $S^*$

$$S = \frac{C_2 EI}{L^3} \geq S^* \quad 13$$

kde  $C_2$  je konstanta. Kvadratický modul průřezu  $I$  pro čtvercový nosník je:

$$I = \frac{b^4}{12} = \frac{A^2}{12} \quad 14$$

Pro danou délku  $L$  je tuhost  $S^*$  přizpůsobena změnou velikosti čtvercového průřezu. Vyloučením  $b$  (nebo  $A$ ) se z cílové funkce pro hmotnost získá:

$$m \geq \left( \frac{12S^*L^3}{C_2} \right)^{1/2} (L) \left( \frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \quad 15$$

Tabulka 5 Konstrukční požadavky na lehký tuhý nosník

Funkce	Nosník
Omezení	Délka $L$ je daná (geometrické omezení) Čtvercový průřez je dán (geometrické omezení) Nosník musí přenést ohybovou sílu $F$ s průhybem menším než $\delta$ , což znamená, že je předepsaná ohybová tuhost $S^*$ (funkční omezení)
Cíl	Co nejmenší hmotnost $m$ nosníku
Volné proměnné	Plocha průřezu $A$ ; Volba materiálu

Veličiny  $S^*$ ,  $L$ , a  $C_2$  jsou dané. Nejlepší materiály pro lehký, tuhý nosník jsou ty s nejvyšší hodnotou indikátoru  $M_{b1}$ :

$$M_{b1} = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad 16$$

Pokud se místo tuhosti bude uvažovat pevnost, potom bude indikátor dán tímto vztahem:

$$M_{b2} = \frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho} \quad 17$$

Tato analýza byla provedena pro čtvercový nosník, ale výsledek je stejný pro všechny tvary, pokud se zachová geometrická podobnost. Toto tvrzení vychází z rovnice 14. Pro daný tvar může být kvadratický moment průřezu vždy vyjádřen jako konstanta „krát  $A^2$ “, změnou tvaru se pouze změní konstanta  $C_2$  v rovnici 15, ale nikoliv výsledný indikátor.

Jak již bylo zmíněno výše, skutečné nosníky mají různé tvary průřezu, které zlepšují ohybové vlastnosti tak, že stejnou tuhost lze dosáhnout menším množstvím materiálu. Změnou tvaru je možné zvýšit  $I$ , aniž by se změnilo  $A$ . Toto je dosaženo přesunem materiálu od neutrální osy tak daleko, jak je to jen možné, jako je tomu u tenkostěnných trubek a I-profilů (obr. 22 (d)). Některé materiály jsou více přístupné tvarování do výhodnějších tvarů než jiné. Porovnávání materiálů pouze na základě  $M_b$  vyžaduje opatrnost, protože některé materiály mohou nižší hodnoty indikátoru vyvážit lepší schopností tvarovatelnosti. Toto je hlouběji zkoumáno v kapitole 5. 5, str. 75.

#### 4.3.4. Minimalizace nákladů na materiál: levné pruty, desky a nosníky

Pokud je cílem co nejmenší cena, nikoliv hmotnost, indikátory se opět mění. Je-li cena materiálu  $C_m$  [Kč/kg], náklady na materiál k výrobě součásti o hmotnosti  $m$  jsou jednoduše  $mC_m$ . Cílová funkce pro materiálové náklady  $C$  prutu, desky nebo nosníku je:

$$C_m = mC_m = ALC_m\rho \quad 18$$

Stejný postup jako v předchozích případech vede k indikátorům, které mají tvar jako rovnice 4, 5, 10, 11, 16 a 17 s tím, že hustota  $\rho$  je nahrazena  $C_m\rho$ . Tudiž indikátor pro prut dané pevnosti s minimální cenou má tvar

$$M = \frac{\sigma_f}{C_m\rho} \quad 19$$

kde  $C_m$  je cena materiálu za kilogram. Indikátor pro lehkou tuhou desku je:

$$M = \frac{E^{1/3}}{C_m\rho} \quad 20$$



Je důležité nezapomínat na to, že cena materiálu je pouze část nákladů na výrobu součásti.

### 4.3.5. Materiálové indikátory obecně

Výše popsanou metodu lze popsat obecnějším způsobem. Konstrukční prvky jsou komponenty vykonávající fyzikální (reálnou) funkci. Přenášejí zatížení, teplo, ukládají energii atd. Zkráceně, splňují funkční požadavky. Prut musí přenést tahovou sílu, pružina musí poskytnout vratnou sílu nebo uloženou energii. Tepelný výměník musí uvolnit teplo s daným tepelným tokem atd.

Výkonnost strukturálního prvku je určena třemi parametry: funkčními požadavky, geometrií a vlastnostmi materiálu, ze kterého je vyroben. Výkonnost  $P$  prvku je popsána rovnicí ve tvaru

$$P = \left[ \left( \begin{array}{c} \text{Funční} \\ \text{požadavky, } F \end{array} \right), \left( \begin{array}{c} \text{Geometrické} \\ \text{parametry, } G \end{array} \right), \left( \begin{array}{c} \text{Materiálové} \\ \text{vlastnosti, } M \end{array} \right) \right]$$

nebo

$$P = f(F, G, M) \quad 21$$

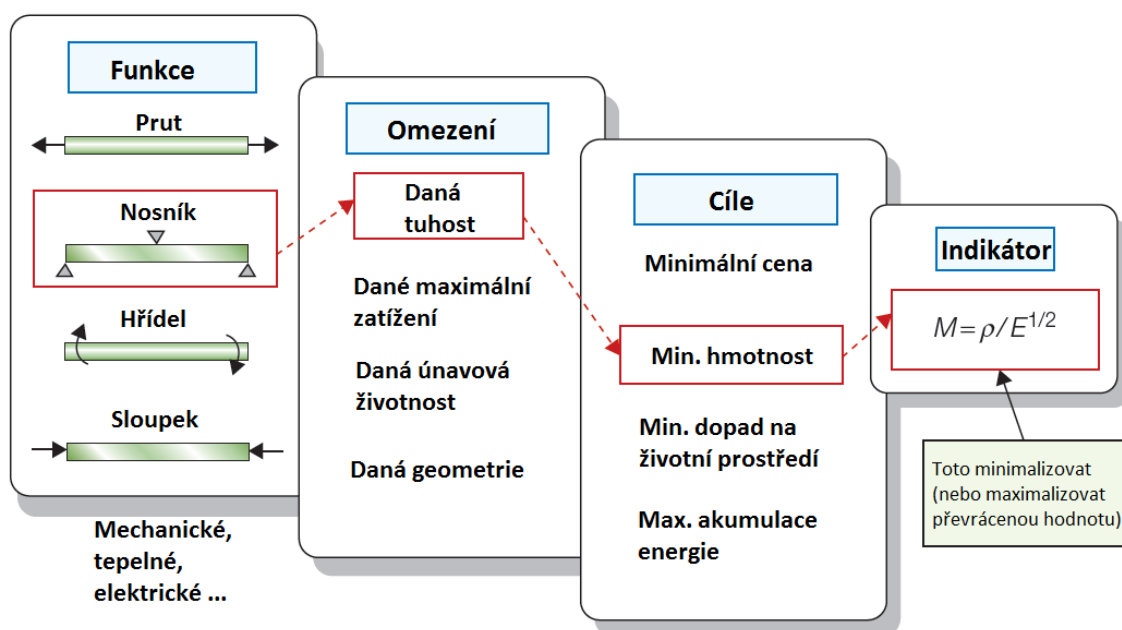
kde  $P$  je výkonnostní metrika popisující určité aspekty výkonnosti komponenty: její hmotnost, objem, cenu, životnost;  $f$  představuje funkční závislost. Optimální návrh je výběr materiálu a geometrie, jež maximalizují, či minimalizují  $P$ , na základě potřebnosti.

Tři skupiny parametrů z rovnice 21 lze separovat, čímž se získá

$$P = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M) \quad 22$$

kde  $f_1, f_2, f_3$  jsou samostatné funkce, které se mezi sebou jednoduše vynásobí. Výběr optimálního materiálu se stane nezávislým na detailech konstrukce. To samé platí pro geometrické parametry  $G$  a pro funkční požadavky  $F$ . Pak k nalezení podmnožiny vhodných materiálů se nemusí řešit celý problém, či dokonce znát podrobnosti o  $F$  a  $G$ . Toto umožňuje značné zjednodušení. Výkonnost pro všechny  $F$  a  $G$  je maximalizovaná, pokud je maximalizovaná  $f_3(M)$ , jenž se nazývá koeficient účinnosti materiálu, nebo zkráceně materiálový indikátor. Zbývající část  $f_1(F) \cdot f_2(G)$  představuje koeficient

strukturální účinnosti neboli strukturální indikátor. Výše uvedená tvrzení mají základ v teorii o optimalizaci konstrukcí (48).



Obr. 23 Specifikace funkce, cíle a omezení vede k materiálovému indikátoru. Kombinace zvýrazněných polí vede k indikátoru  $E^{1/2}/\rho$  (2)

Každá kombinace funkce, cíle a omezení vede k materiálovému indikátoru, viz obr. 23. Indikátor je charakterizován výše zmíněnou kombinací a tudíž i funkcí, kterou komponenta vykonává. Tato metoda je obecná a lze jí aplikovat na širokou škálu problémů. Tabulka 6 udává příklady indikátorů a konstrukční problematiku, kterou charakterizují. Rozsáhlejší přehled indikátorů je v příloze této disertační práce. Nová konstrukční problematika dává vzniknout novému indikátoru.

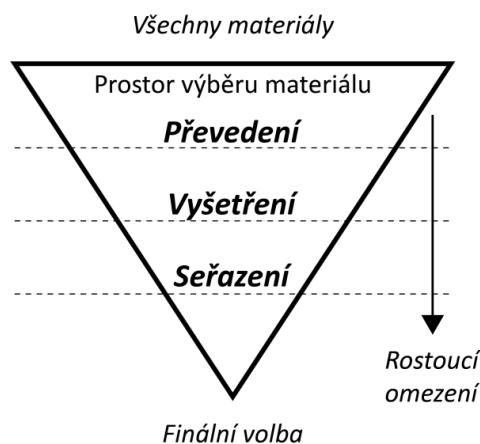
Tabulka 6 Příklady materiálových indikátorů (2)

Funkce, cíl a omezení	Indikátor
<i>Prut</i> , minimální hmotnost, daná tuhost	$\frac{E}{\rho}$
<i>Nosník</i> , minimální hmotnost, daná tuhost	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
<i>Nosník</i> , minimální hmotnost, daná pevnost	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$
<i>Nosník</i> , minimální cena, daná tuhost	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
<i>Nosník</i> , minimální cena, daná pevnost	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{C_m \rho}$
<i>Sloupek</i> , minimální cena, dané zatížení při vzpěru	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
<i>Pružina</i> , minimální hmotnost pro dané množství akumul. energie	$\frac{\sigma_y^2}{E \rho}$
<i>Tepelná izolace</i> , minimální cena, daný tepelný tok	$\frac{1}{\lambda C_p \rho}$
<i>Elektromagnet</i> , maximální magnetické pole, daný nárůst teploty	$\frac{C_p \rho}{\rho_e}$

Vysvětlivky veličin v tabulce:  $\rho$  = hustota;  $E$  = modul pružnosti v tahu;  $\sigma_y$  = mez kluzu;  $C_m$  = cena/kg;  $\lambda$  = součinitel tepelné vodivosti;  $\rho_e$  = elektrický odpor;  $C_p$  = izobarická měrná tepelná kapacita.

#### 4.4. Postup (strategie) výběru materiálů

Jak již bylo dříve konstatováno, výběr materiálů vstupuje do každé fáze procesu navrhování produktu. V jednotlivých fázích se charakter údajů výběru materiálů liší a to především v úrovni přesnosti a šíři výběru. Obr. 24 naznačuje zužování prostoru pro výběr materiálů v průběhu navrhování produktu v důsledku aplikace konstrukčních omezení.



Obr. 24 Zužování prostoru pro výběr materiálů v důsledku aplikace konstrukčních omezení (16)

Základní postup výběru materiálů je založen na stanovení pojítka mezi materiálem a funkcí komponenty. V prvních krocích je velmi důležité uvažovat všechny materiály jako potencionální kandidáty. Pokud se tak neučiní, mohou se přehlédnout některé vhodné materiály. Jestliže se mají použít inovativní materiály, musí se s výběrem začít v úvodních fázích konstrukčního procesu. Začalo-li by se později, bylo by potom nutné provést mnoho rozhodnutí a radikálních změn, které by byly velmi nákladné.

Řešení problému s výběrem materiálu se dá vyjádřit do dvou kroků:

- identifikovat požadovaný profil vlastností hledaného materiálu a poté
- porovnat tento profil se skutečnými materiály a nalézt nejlepší shodu.

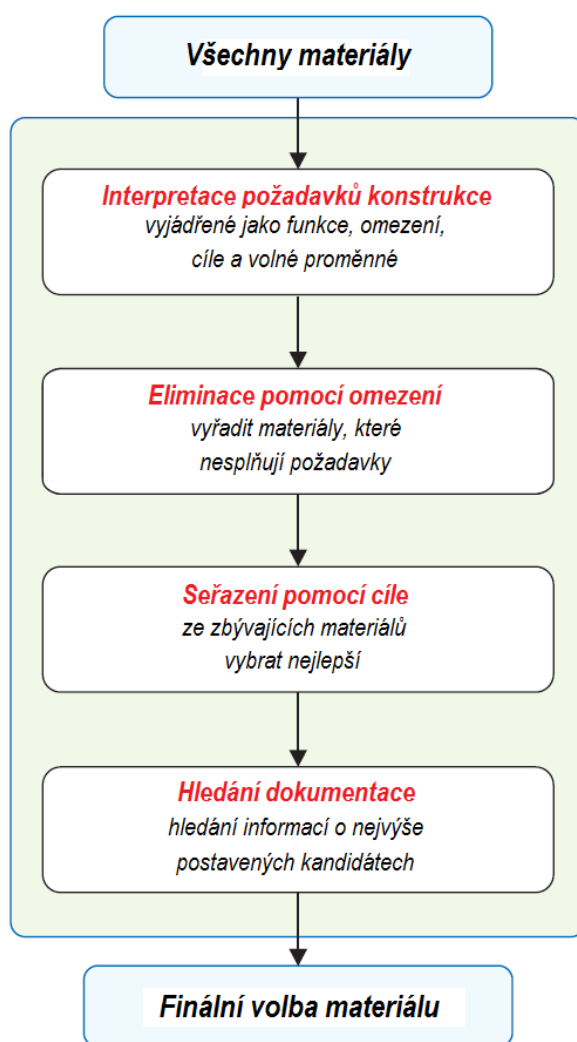
Strategie aplikovaná na výběr materiálů je zobrazena na obr. 25. Je rozdělena do čtyř kroků:

1. **Převedení konstrukčních požadavků**, potřeb a podmínek na:

- **funkci komponenty** – např. udržet namáhání, pojmout tlak bez porušení, odvádět teplo;
- **omezující podmínky** – některé aspekty jsou pevně dány – např. velikost pevnosti v tahu, tažnosti, maximální teplota provozu, aby se materiál dal injekčně vstříkovat, velikost délky komponenty;
- **cíle** – např., aby komponenta byla co nejlehčí, nejlevnější, nejmenší, min. cena výrobního procesu, min. tepelné zkroucení vlivem slunečního záření;
- **volné proměnné** – parametry, které se dají libovolně měnit, za účelem dosažení optimálního výběru materiálu – např. velikost průměru, tloušťky, tvar.

2. **Vyšetření materiálů tím, že se zadají omezující podmínky.** Tím se eliminují materiály, které nesplňují zadané podmínky.
3. **Seřazení materiálů pomocí stanovených cílů.** Tím se naleznou materiály, které splňují nejlépe zadané podmínky.
4. **Vyhledávání dokumentace** těch materiálů, které se po seřazení ocitly na předních místech.

Teprve potom následuje finální výběr materiálu.



Obr. 25 Strategie výběru materiálů. Zde jsou ukázány čtyři hlavní kroky (2) (16)

Nyní následuje podrobnější vysvětlení čtyř kroků systematického postupu výběru optimálního materiálu pro dané konstrukční požadavky.

## 4.4.1. Převedení konstrukčních požadavků a odvození indikátoru

V tabulka 7 jsou uvedeny potřebné kroky. Zjednodušeně lze postup popsat takto:

- identifikovat materiálové vlastnosti, které jsou omezeny konstrukčními požadavky;
- rozhodnout, co se použije jako kritérium excelence (tzn. jaký je cíl a zda se bude maximalizovat nebo minimalizovat);
- nahradit volné proměnné omezeními;
- vyčíst kombinaci materiálových vlastností, které optimalizují kritérium excelence.

Tabulka 7 Interpretace (převedení konstrukčních požadavků) (2)

Číslo kroku	Akce
1	Definovat konstrukční požadavky: <b>Funkce:</b> Co komponent dělá? <b>Omezení:</b> Základní požadavky, které musí být splněny: např. tuhost, pevnost, korozivzdornost, tvářecí charakteristiky, atd. <b>Cíl:</b> Co má být maximální nebo minimální? <b>Volné proměnné:</b> Které proměnné nejsou vázány omezeními?
2	Sestavit seznam omezení (vyhnout se plastické deformaci, lomu, zhroucení, atd.) a bude-li třeba, odvodit pro ně rovnici.
3	Odvodit rovnici pro cíl z hlediska funkčních požadavků, geometrie a materiálových vlastností ( <b>cílová funkce</b> ).
4	Identifikovat volné (nespecifikované) proměnné.
5	Nahradit volné proměnné z rovnice pro omezení do cílové funkce.
6	Seskupit proměnné do tří skupin: funkční požadavky <b>F</b> , geometrie <b>G</b> a materiálové vlastnosti <b>M</b> . Tímto je dána výkonnostní metrika: $P \leq f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$
7	Vyčíst (vyjádřit) materiálový indikátor, vyjádřený jako veličina <b>M</b> , která optimalizuje výkonnostní metriku <b>P</b> . <b>M</b> je kritériem excelence.

## 4.4.2. Vyšetření: aplikace limitů atributů

Každý konstrukční návrh klade na výrobní materiál určité požadavky nepřijatelnosti, srozumitelněji řečeno, materiál musí splňovat určitá omezení. Prozatím bylo vysvětleno, jak jsou tato omezení převáděna do limitů atributů. Tyto limity se vynášejí jako horizontální nebo vertikální přímky do materiálových map, jak ilustruje obr. 26. Na něm je zobrazena materiálův map vlastností  $E - \rho$ , způsobem, který byl výše popisován. Za předpokladu, že konstrukční požadavky vyžadují limity  $E > 10 \text{ GPa}$  a  $\rho < 3000 \text{ kg/m}^3$ , což je ukázáno na obr. 26, potom optimální materiál se bude vybírat z prostoru ve tvaru obdélníku, který je ohraničen limitami. Na obr. 26 je prostor označen jako „Oblast hledání“.

Hůře kvantifikovatelné vlastnosti, jako korozivzdornost, ořezuvzdornost nebo tvařitelnost, se mohou také vyjádřit pomocí limitů, přičemž mají tvar

$$A > A^*$$

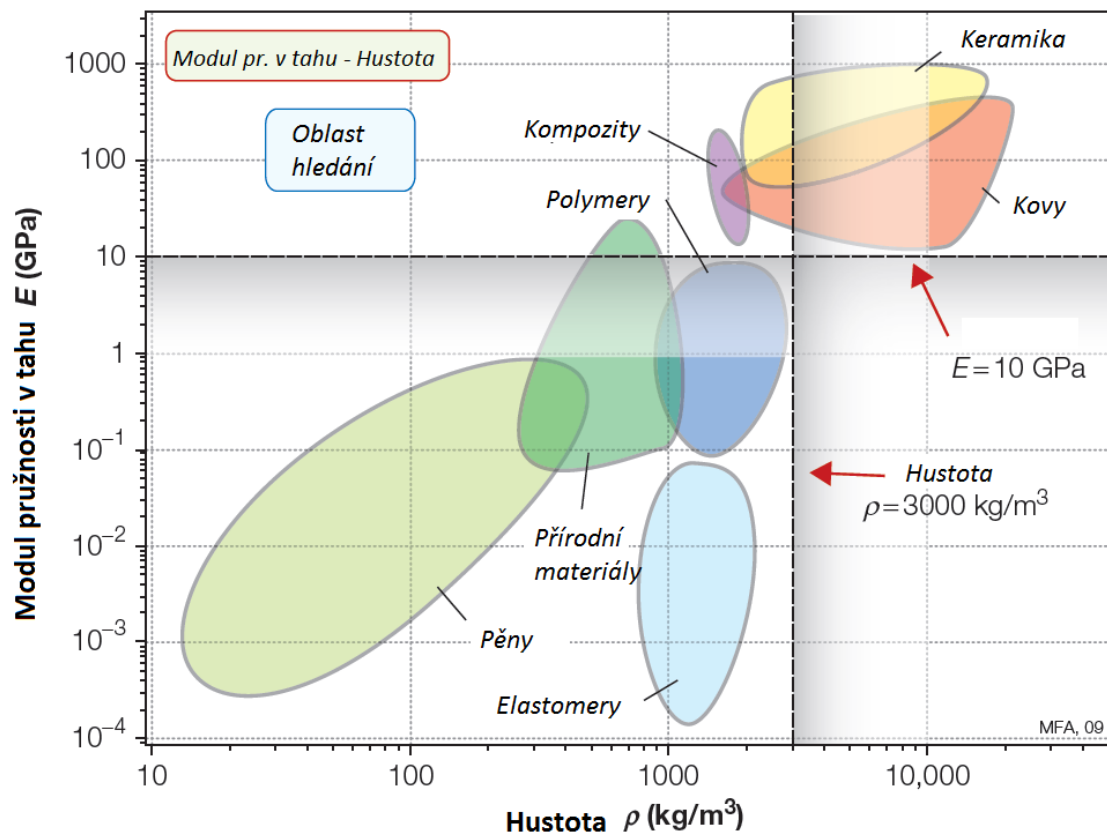
nebo

$$A < A^*$$

23

kde  $A$  je daný atribut (např. provozní teplota) a  $A^*$  je kritická hodnota atributu daná konstrukčními požadavky, které musí být lepší, nebo (např. v případě rychlosti koroze) horší, než  $A$ .

Stanovování limitů by nemělo být ukvapené, protože je možné udělat konstrukční návrh tak, aby se dala příslušná nežádoucí limita obejít. Součást, které se nadměrně zahřívá, může být chlazená a nemusí být vyrobena z materiálů s vysokou maximální provozní teplotou. Součást náchylná ke korozi může být potažena ochrannou vrstvou. Konstrukční často udávají limity pro lomovou houževnatost  $K_{Ic} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  a tvárnost  $\epsilon_f > 2 \%$ , aby byla zajištěna rezerva pro koncentraci napětí. Tímto ovšem eliminují materiály, které inovační konstruktér může vhodně využít. (Uvedená hodnota pro lomovou houževnatost vyřadí všechny polymery a keramiku, což je velmi unáhlený krok na začátku konstrukčního procesu). V této fázi je třeba ponechat tolik možností, kolik je v dané chvíli možné.



Obr. 26 Schematická mapa  $E - \rho$  ukazující spodní hranici pro  $E$  a horní hranici pro  $\rho$  (47)

### 4.4.3. Seřazení: materiálové indikátory v mapě

Dalším krokem je najít takové materiály z podmnožiny materiálů splňujících stanovené limity, které maximalizují výkonnost komponenty. Jako příklad bude použit návrh lehkých a tuhých komponent. Ostatní indikátory se používají obdobně.

Obr. 27 zobrazuje, stejně jako předešlý, modul pružnosti v tahu  $E$  proti hustotě  $\rho$  v logaritmických měřících. Materiálové indikátory  $E/\rho$ ,  $E^{1/2}/\rho$  a  $E^{1/3}/\rho$  se také mohou zobrazit v mapě vlastností materiálů. Podmínka

$$E/\rho = C \quad 24$$

nebo vzato logaritmicky

$$\text{Log}(E) = \text{Log}(\rho) + \text{Log}(C) \quad 25$$



popisuje příbuzné rovnoběžné přímky se směrnici rovnou 1 v mapě zobrazující logaritmus ( $E$ ) proti logaritmu ( $\rho$ ). Každá z přímek koresponduje s hodnotou konstanty  $C$ .

Podmínka

$$E^{1/2}/\rho = C \quad 26$$

nebo znovu logaritmicky:

$$\text{Log}(E) = 2\text{Log}(\rho) + 2\text{Log}(C) \quad 27$$

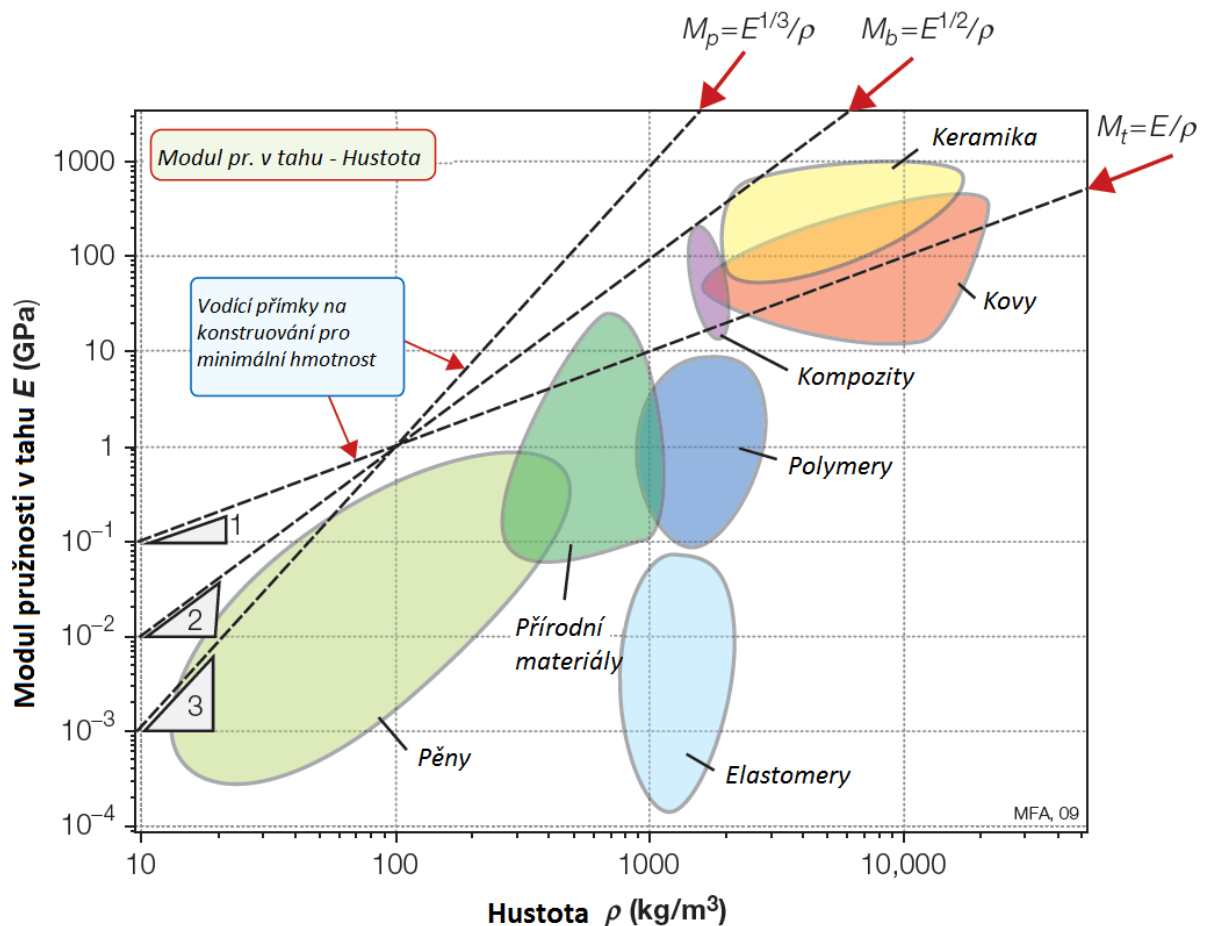
udává další přímky se směrnici tentokrát rovnou 2 a

$$E^{1/3}/\rho = C \quad 28$$

udává další přímky se směrnici rovnou 3. Těmto přímekám se říká **řídící přímky výběru**.

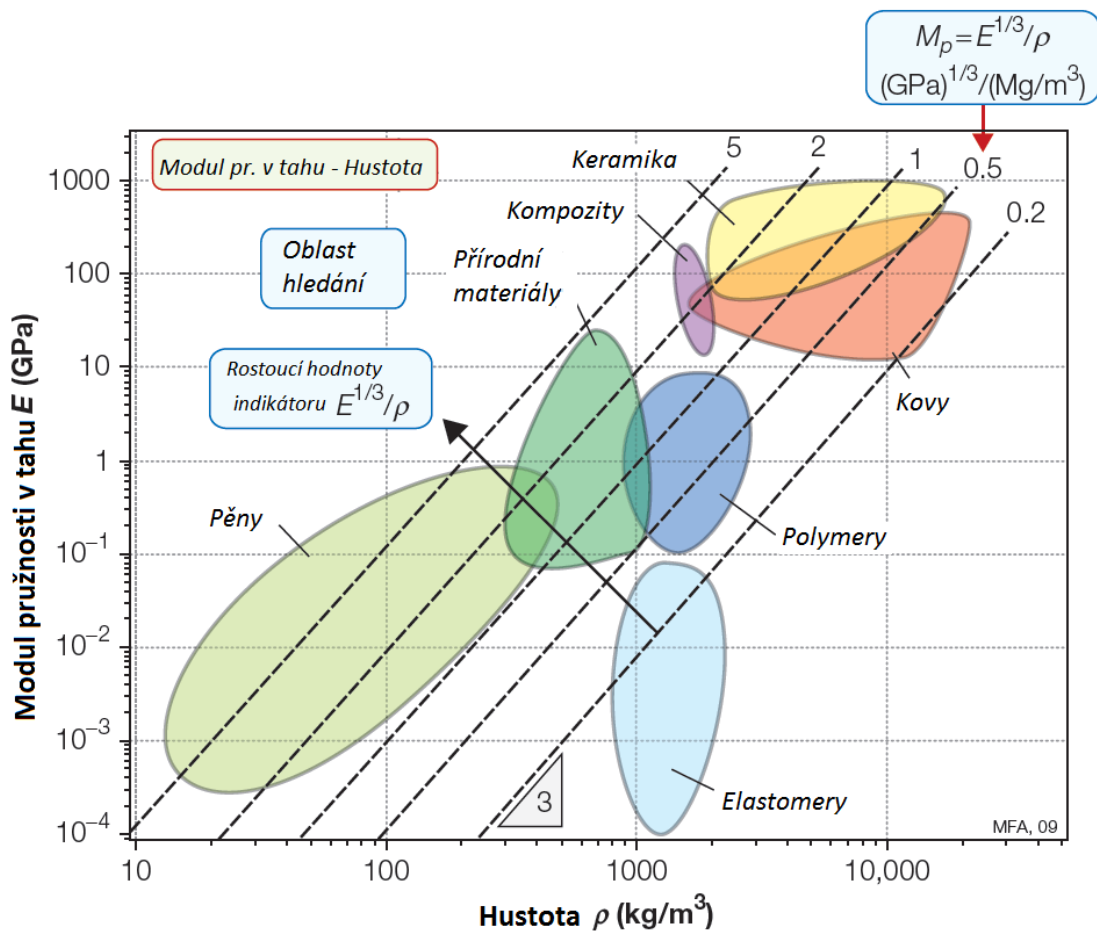
Udávají směrnici příbuzných rovnoběžných přímek příslušejících k danému indikátoru.

Nyní je jednoduché vyčíst podmnožinu materiálů, která optimálně maximalizuje výkonnost pro každý způsob zatěžování. Všechny materiály ležící na přímce o konstantní hodnotě  $E^{1/3}/\rho$  mají stejnou výkonnost pro lehké, tuhé desky. Materiály nad přímkou jsou lepší, materiály pod přímkou jsou horší. Obr. 28 ukazuje síť řídících přímek výběru odpovídajícím hodnotám  $E^{1/3}/\rho$  od 0,2 do  $5 \text{ GPa}^{1/3}/\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Z materiálu s hodnotou  $M = 2$  ve zmíněných jednotkách lze vyrobit desku o desetinové hmotnosti oproti desce z materiálu s hodnotou  $M = 0,2$  při stejné tuhosti.



Obr. 27 Schematická mapa  $E - \rho$  s vodícími přímkami pro tři indikátory pro lehké, tuhé konstrukce (47)

Podmnožina materiálů s obzvláště dobrými hodnotami indikátorů se dá získat vybráním přímky, která izoluje hledanou oblast obsahující přiměřeně malý počet kandidátů. Diagonální přímka výběru je schematicky ukázána na obr. 29. Současně se mohou aplikovat limity atributů a tím se zúží oblast pro vyhledávání. Podmínka  $E > 50$  GPa je reprezentovaná vodorovnou přímkou. Materiály ležící v oblasti pro vyhledávání, tedy v oblasti nad oběma přímkami, splňují obě kritéria. Počet materiálů se dá zvýšit snížením hodnoty indikátoru a naopak.

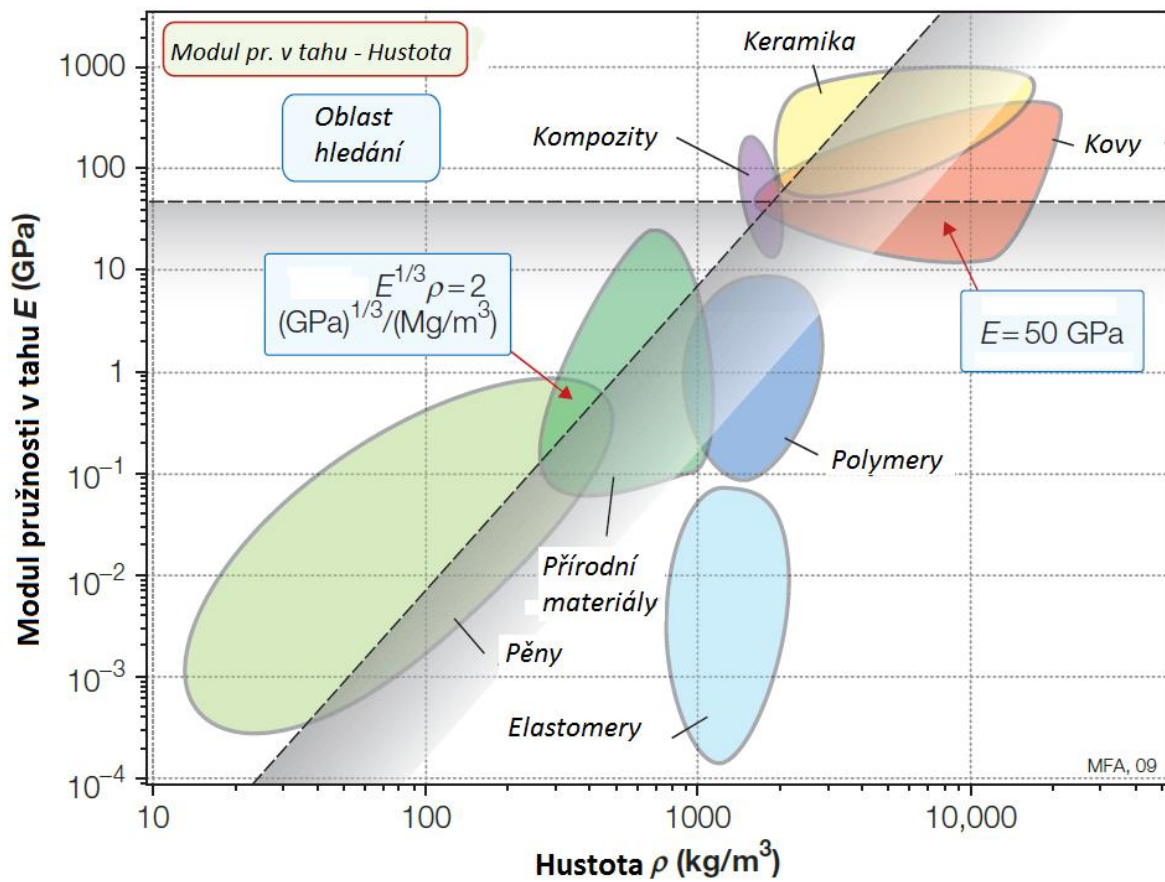


Obr. 28 Schematická mapa  $E - \rho$  s vodícími přímkami určitého materiálového indikátoru (47)

#### 4.4.4. Prozkoumání dokumentace

Nyní je vyčleněn seznam několika potencionálních materiálů. Posledním krokem je hlouběji prozkoumat jejich charakteristické vlastnosti. Ne všechna omezení lze snadno vyjádřit jako jednoduché limity atributů. Mnohá jsou vztažena k chování materiálu v daném prostředí nebo k jejich vhodnosti ke tvarování, spojování či dokončování. Tyto informace lze nalézt v příručkách, katalozích výrobců a počítačových databázích.

I v tomto bodě hledání se mohou dodatečně objevit omezení, která byla přehlížena, protože se tak zpočátku nejevila. Zkušenosti vedoucí k vyšší spolehlivosti výběru se dají získat hledáním v konstrukčních příručkách, zkoumáním případových studií a analýz selhání, které se zaznamenávají ke každému kandidátu na materiál. Tím se dají vybudovat dokumenty o silných a slabých stránkách materiálů a o způsobech, jak slabé stránky překonat.



$$M = E^{1/3} / \rho > 2 \text{ [GPa}^{1/3} \cdot \text{t/m}^3\text{]}$$

Obr. 29 Výběr materiálu založený na materiálovém indikátoru  $M$  spolu s podmínkou  $E > 50$  GPa. Materiály vyskytující se v oblasti hledání postupují do další fáze procesu výběru (47)

## 5. Aplikace metodiky výběru materiálů na příkladu

### 5.1. Úvod

Praktická ukázka systémového výběru materiálů může pomoci k objasnění metody. Tento konkrétní příklad je možné přímo použít při výuce budoucích konstruktérů. Byl zvolen rám jízdního kola, protože tato hlavní komponenta kola je dobře známa a není potřeba vysvětlovat její funkci. Rám se vyrábí z rozličných materiálů (dokonce i ze dřeva). Příklad podává logické vysvětlení o vhodnosti jednotlivých materiálů vzhledem ke specifickým požadavkům zákazníků a o vlivu tvaru průřezu trubky na výběr materiálu rámu.

### 5.2. Definování konstrukčních požadavků

Příklad je pojat obecně a to kvůli názornosti vysvětlení metody výběru. Nebude se tedy vybírat materiál podle přání konkrétního uživatele jednoho jízdního kola. Dále následuje vyjádření obecných požadavků na rám kola.

#### 5.2.1. Mechanická zatížení

Rámy kol jsou namáhány řadou prostorových zatížení:

- statickým zatížením způsobujícím v trubkách ohyb a tlak, které vznikají následkem jezdce hmotnosti a od uložení na osách kol;



Obr. 30 Statické zatížení rámu kola (ohyb, tlak) (49)

- dynamickým cyklickým zatížením vznikajícím od šlapání do pedálů, které způsobuje krut (hlavní působení krutu je ve spodní rámové trubce);



kroutící moment od šlapání

Obr. 31 Dynamické cyklické zatížení rámu kola (krut) (49)

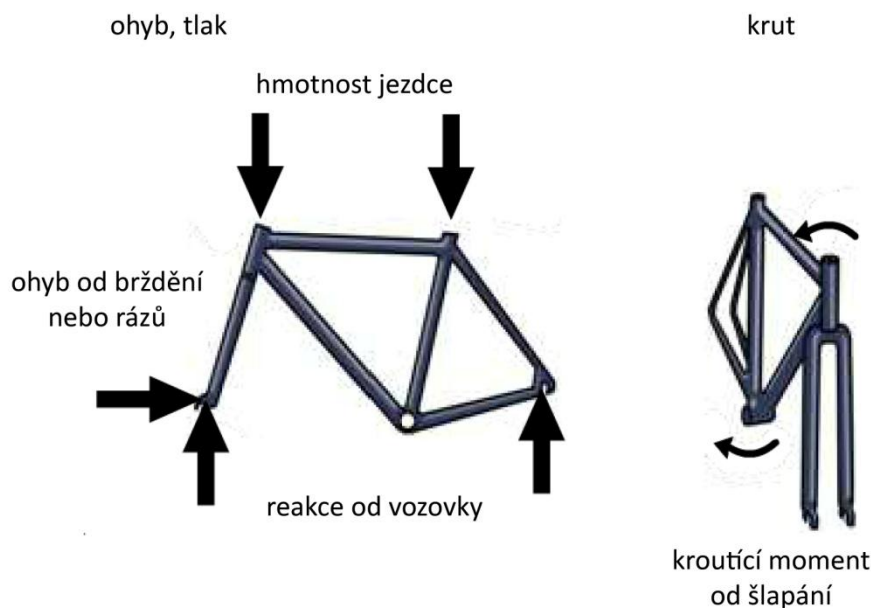
- dynamickým zatížením, které vzniká následkem vibrací na nerovném povrchu, nárazy a od brždění (což způsobuje převážně ohyb přední vidlice).



Obr. 32 Dynamické zatížení rámu kola (ohyb, tlak) (49)

Mechanické konstrukční požadavky na rám kola se dají sumarizovat následovně:

- musí být v první řadě dostatečně pevný, aby nedošlo k jeho porušení;
- musí být dostatečně tuhý, aby přenesl statické i dynamické zatížení bez nadměrného pružného průhybu;
- musí být dostatečně tuhý a houževnatý, aby odolal napětí způsobené jednotlivými přetíženími, jako jsou rázy;
- musí mít dobrou odolnost proti únavě (únavovou pevnost), aby nedošlo k růstu trhlin a únavové poruše během obvyklého používání.



Obr. 33 Celkové zatížení rámu kola (49)

## 5.2.2. Cena versus hmotnost

Kola jsou konstruována pro širokou škálu uživatelů, od dětí až po ty, kteří na kole dojíždějí denně do práce, od turistů k závodníkům. Hmotnost je důležitá pro všechny uživatele, ale pro velkou skupinu cyklistů, jako jsou např. příležitostní jezdci, je mnohem důležitější cena rámu. Cena je částečně závislá na použitém materiálu a částečně složitosti (či jednoduchosti) a objemu výroby. Pro závodní cyklisty je nízká hmotnost hlavní cíl, naopak nízká cena je pro ně cílem podřadným.

## 5.2.3. Další konstrukční omezení

Jízdní kola musí splňovat řadu dalších požadavků. Systémové navrhování produktů má propracovanou metodiku na určování konstrukčních požadavků. Pro přehlednost představení metodiky výběru materiálů jsou uvedeny pouze některé z těchto požadavků na rám:

- odolnost proti korozi - je důležitá přinejmenším v podmínkách evropského klimatu;
- spolehlivost, jednoduchá údržba, možnost výměny standardních komponent (kola, sedla, nosiče, atd.), možnost připevnění doplňků na rám (např. nosiče na láhve) - z toho plyne, že některé klíčové rozměry rámu by měly být pevně dány;

- ergonomie a bezpečnost – jízdní kolo musí být pohodlné a ovladatelné hlavně i ve chvíli, kdy cyklista vyvíjí na rám mechanické namáhání;
- estetické vlastnosti – lak rámu neslouží pouze pro zajištění odolnosti proti korozi, ale i silně ovlivňuje celkové vnímání zákazníků při výběru kola.

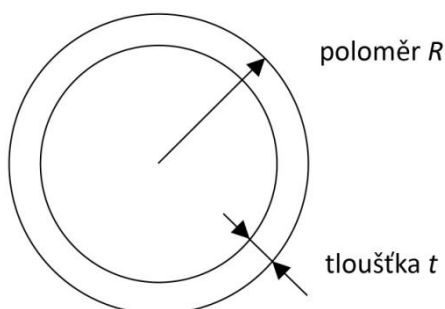
### 5.3. Převedení konstrukčních požadavků do materiálových indikátorů

Výběr materiálu je řízen funkcí komponenty, proto se musí nejprve stanovit pojitko mezi funkcí a výběrem, tj. definovat konstrukční požadavky v následujících bodech:

- **Funkce:** Co komponenta dělá?  
Komponentou je trubka, která přenáší statické i dynamické namáhání.
- **Omezení:** Které základní požadavky musí být splněny?  
Musí být najednou splněna požadovaná pevnost, tuhost a únavová pevnost.
- **Cíl:** Co má být maximální nebo minimální?  
Minimální hmotnost nebo minimální cena.
- **Volné proměnné:** Které proměnné nejsou vázány omezeními?  
Rozměr průřezu trubky.

Volný rozměr průřezu tenkostěnné trubky ovšem komplikuje porovnání vlastností materiálů. Z tohoto důvodu budou postupně uvažovány dvě varianty:

- a) Pevně daný poloměr  $R$  a tloušťka stěny  $t$  je volným rozměrem.
- b) Pevně daný poměr poloměru a tloušťky stěny ( $R/t$ ).



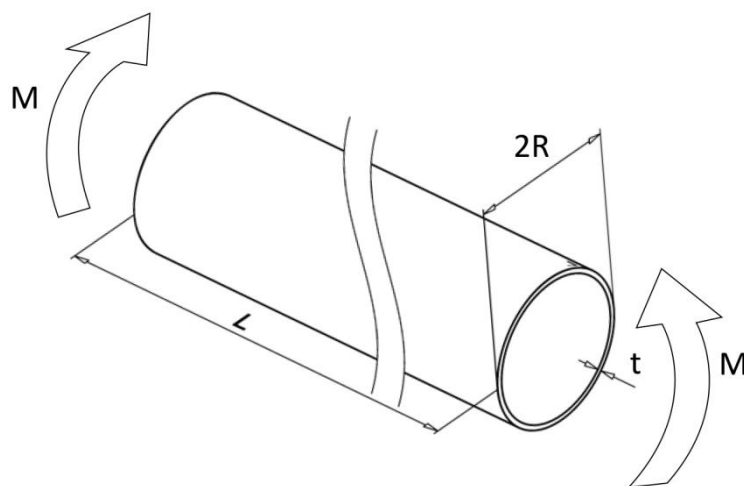
Obr. 34 Rozměry průřezu trubky

Dříve se vyráběly rámy pouze s pevně daným poloměrem (případ a, viz výše). Doposud jsou tak vyráběna především silniční kola, zvláště v Anglii. Hlavním důvodem byla



stoprocentní kompatibilita s dalšími komponenty kola a dále potom patentovaná tradiční výroba ocelových „Reynolds 531“ trubek (50). Relativně nově, v porovnání s historií cyklistických kol, byl „uvolněn“ poloměr trubky (tzn., vyrábí se různě velké poloměry). Výhody tohoto kroku budou dále vysvětleny.

Pro stanovení materiálových indikátorů byl vytvořen jednoduchý model, který přesně vystihuje základní principy. Jedná se o trubku, která je namáhána ohybem (výsledky materiálových indikátorů pro namáhání krutem jsou stejné), trubkový nosník je fixovaný za vnější průměr, viz obr. 35.



Obr. 35 Jednoduchý výpočtový model - trubka zatížená ohybem

### 5.3.1. Cíl: minimální hmotnost

Funkce komponenty (trubky) je přenášet ohybové momenty. Cíl je minimalizovat hmotnost  $m$  rámu (trubky). Vyjádřeno na jednotku délky  $L$  trubky, její hmotnost je

$$\frac{m}{L} = 2 \pi R t \rho \quad 29$$

kde  $R$  je vnější poloměr trubky,  $t$  je tloušťka stěny a  $\rho$  je hustota materiálu, ze kterého je rám vyroben. Tohle je *cílová funkce*, kvantita bude minimalizovaná (a to ve všech případech, ať se jedná o pevnost nebo tuhost, o fixovaný poloměr  $R$  nebo fixovaný poměr poloměru a tloušťky  $R/t$ ).

Dále následuje odvození materiálových indikátorů pro trubku s danou tuhostí a s danou únavovou pevností a to ve všech variantách (tj. pevně daný  $R$  a daná pevnost; pevně

daný  $R$  a daná tuhost; pevně daný poměr  $R/t$  a daná pevnost; pevně daný poměr  $R/t$  a daná tuhost).

### 5.3.1.1. Pevně daný rádius trubky ( $R$ )

#### Funkční omezení - požadovaná únavová pevnost ( $R$ )

Základní předpoklad je, že trubka nesmí prasknout. Tato mechanická porucha může nastat od plastické deformace, od rychlého lomu, od vzpěru nebo od únavy materiálu způsobené opakovaným cyklickým zatížením. Rám kola je právě cyklicky namáhán, proto pravděpodobná možná destrukce materiálu rámu je jeho tzv. únava. Funkční (provozní) omezení pro materiál rámu kola tedy je, že maximální napětí  $\sigma_{max}$  v materiálu nesmí překročit mez únavy  $\sigma_e$ :

$$\sigma_{max} < \sigma_e$$

Cyklický ohybový moment  $M_B$ , kterému trubka může odolávat s nekonečným počtem cyklů, lze vyjádřit rovnicí

$$M_B = \frac{I\sigma_e}{R} \quad 30$$

kde  $I$  je kvadratický moment průřezu. Pro tenkostěnnou trubku je:

$$I = \pi R^3 t \quad 31$$

Dosazením z rovnic 30 a 31 do rovnice 29 se dostane hmotnost na jednotku délky z hlediska konstrukčních parametrů a materiálových vlastností, což je vyjádřeno v rovnici:

$$\frac{m}{L} = \frac{2M_B}{R} \left[ \frac{\rho}{\sigma_e} \right] \quad 32$$

Nejlehčí trubka, která dokáže odolat cyklickému ohybovému momentu, je právě taková, která je vyrobena z materiálu s největší hodnotou materiálového indikátoru:

$$M_1 = \frac{\sigma_e}{\rho} \quad 33$$

### **Funkční omezení - požadovaná tuhost ( $R$ )**

Rám musí být adekvátně tuhý, protože v příliš pružném rámu by se promarnila jezdcova energie. Změna funkce, cíle nebo omezení změní materiálový indikátor. Pokud by se změnila funkce, místo mechanického zatížení by byla funkce přenést teplo, potom by se v materiálovém indikátoru místo meze únavy objevila tepelná vodivost. Ale více relevantní v případě cyklistického rámu je změna omezení, a to z pevnosti na tuhost. Materiálový indikátor je odvozen podobně jako v předešlém případě a pro danou tuhost je

$$M_2 = \frac{E}{\rho} \quad 34$$

kde  $E$  je modul pružnosti v tahu (Youngův modul). (Podrobnější odvození pro požadovanou tuhost následuje níže pro případ pevně daného poměru  $R/t$ ).

### **5.3.1.2. Pevně daný poměr poloměru a tloušťky stěny ( $R/t$ )**

#### **Funkční omezení - požadovaná únavová pevnost ( $R/t$ )**

Analogicky lze zopakovat odvození jako v případě dané pevnosti pro fixní vnější průměr. V tomto případě bude mít materiálový indikátor následující tvar:

$$M_3 = \frac{\sigma_e^{2/3}}{\rho} \quad 35$$

#### **Funkční omezení - požadovaná tuhost ( $R/t$ )**

Funkční omezení je požadovaná tuhost  $S$

$$S = \frac{F}{\delta} \quad 36$$

kde  $\delta$  je průhyb a  $F$  je síla. Z teorie pružných nosníků platí

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad 37$$

kde  $I$  je kvadratický moment průřezu. Pro tenkostěnnou trubku je:

$$I = \pi R^3 t \quad 38$$

Dosazením z rovnic 37 a 38 do 36 se dostane rovnice:

$$\frac{F}{\delta} = \frac{3\pi ER^3 t}{L^3} \quad 39$$

Jsou dána tato geometrická omezení, délka  $L$  a tvarový poměr  $R/t$ . Tento poměr se dá také vyjádřit

$$R = C \cdot t \quad 40$$

kde  $C$  je konstanta. Rádus  $R$  se může měnit přímo úměrně s tloušťkou  $t$ . Potom dosazením rovnice 40 do 39 se dostane:

$$\frac{F}{\delta} = \frac{3\pi ER^4}{CL^3} \quad 41$$

Vyjádřením  $R$  z rovnice 41 a pomocí následné úpravy se dostane dosazením do rovnice 29:

$$\frac{m}{L} = \left[ \frac{\rho}{E^{1/2}} \right] 2\pi \left[ \frac{\left(\frac{F}{\delta}\right) L^3}{3\pi C} \right]^{1/2} \quad 42$$

Nejlehčí trubka s požadovanou tuhostí pro pevně daný poměr poloměru a tloušťky stěny je právě taková, která je vyrobena z materiálu s největším hodnotou materiálového indikátoru:

$$M_4 = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad 43$$

## 5.3.2. Cíl: minimální cena

### 5.3.2.1. Pevně daný rádius trubky ( $R$ )

Pokud se změní cíl, místo minimalizace hmotnosti je cíl minimalizace ceny, bude v materiálovém indikátoru hustota  $\rho$  nahrazena  $C_m \rho$ , kde  $C_m$  je cena za kilogram materiálu. Potom nejlevnější trubka s požadovanou únavovou pevností pro pevně daný rádius trubky je právě taková, která je vyrobena z materiálu s největší hodnotou materiálového indikátoru

$$M_5 = \frac{\sigma_c}{C_m \rho} \quad 44$$

A nejlevnější trubka s požadovanou tuhostí pro pevně daný rádius trubky je právě taková, která je vyrobena z materiálu s největší hodnotou materiálového indikátoru

$$M_6 = \frac{E}{C_m \rho} \quad 45$$

V případě - Pevně daný poměr poloměru a tloušťky stěny ( $R/t$ ) – se postupuje analogicky.

### 5.3.3. Shrnutí

Výběr materiálu je řízen procesem konstruování. Vstupem do procesu výběru materiálu je určení funkce, omezení a cílů. Funkce definuje účel komponenty, např. přenést ohybový moment. Omezení jsou podmínky, které musí být splněny při výkonu funkce, jsou to např. hodnoty mechanických vlastností a geometrická omezení, která představují určité dané velikosti rozměrů. Cíl je charakterizován kvantitou, která bude minimalizována, či maximalizována, např. hmotnost, cena. Prvním krokem procesu výběru materiálu je převedení těchto požadavků do specifikace pro výběr materiálu. To se dělá odvozením tzv. materiálových indikátorů, které, jestliže se maximalizují, optimálně splní konstrukční požadavky. Tohle se stává vstupem do procesu výběru materiálů, výstupem z něho je krátký seznam vhodných materiálů a data, která ho popisují.

Jednoduché vlastnosti	Složené vlastnosti		Funkce
	Pevně daný rádius	Pevně daný tvar	
Hustota $\rho$		$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	Tuhost
Modul $E$		$\frac{\sigma_e}{\rho}$	Pevnost
Pevnost $\sigma_e$			

Obr. 36 Jednoduché a složené vlastnosti (51)

Obr. 36 poskytuje představu o tom, jaký je rozdíl mezi výkonností materiálu a výkonností komponenty. V levém sloupci jsou jednotlivé jednoduché vlastnosti materiálu, které udávají jeho výkonnost. V prostředních sloupcích jsou složené vlastnosti, neboli materiálové indikátory, které udávají výkonnosti komponent. Materiálové indikátory vypadají jednoduše, ale jsou významně výkonné, obsahují funkci, omezení i cíl. V posledním sloupci je uvedeno, k jaké funkci se daný materiálový indikátor vztahuje.

## 5.4. Výběr materiálů

Databáze obsahuje informace o vlastnostech materiálů, které mohou být použity pro cyklistický rám kola. Jsou to jednoduché vlastnosti (viz levý sloupec na obr. 36), např. modul pružnosti  $E$ , mez únavy  $\sigma_e$  a hustota  $\rho$ . Z nich se tvoří složené vlastnosti, (viz druhý a třetí sloupec obr. 36) a ty se vynáší do materiálových map. Konstrukční návrh rámu kola je limitován dvěma hlavními funkčními omezeními, tuhostí a pevností (při minimální hmotnosti). Pokud by byl návrh limitován pouze jedním omezením, např. tuhostí, potom by byla vytvořena mapa složená ze dvou jednoduchých vlastností a to z modulu pružnosti  $E$  a hustoty  $\rho$ . Materiály s maximální výkonností by ležely na přímce odvozené z materiálového indikátoru (viz vysvětlení v kapitole 4.4.3, str. 55). V případě výběru materiálu rámu kola se jedná o vícečetná konstrukční omezení, proto se vynáší na osy do materiálové mapy rovnou složené vlastnosti neboli materiálové indikátory. Tím se dosáhne větší efektivity při hodnocení vhodnosti materiálů pro dané konstrukční požadavky.

### 5.4.1. Příklad 1 – minimální hmotnost - pevně daný rádius trubky (R)

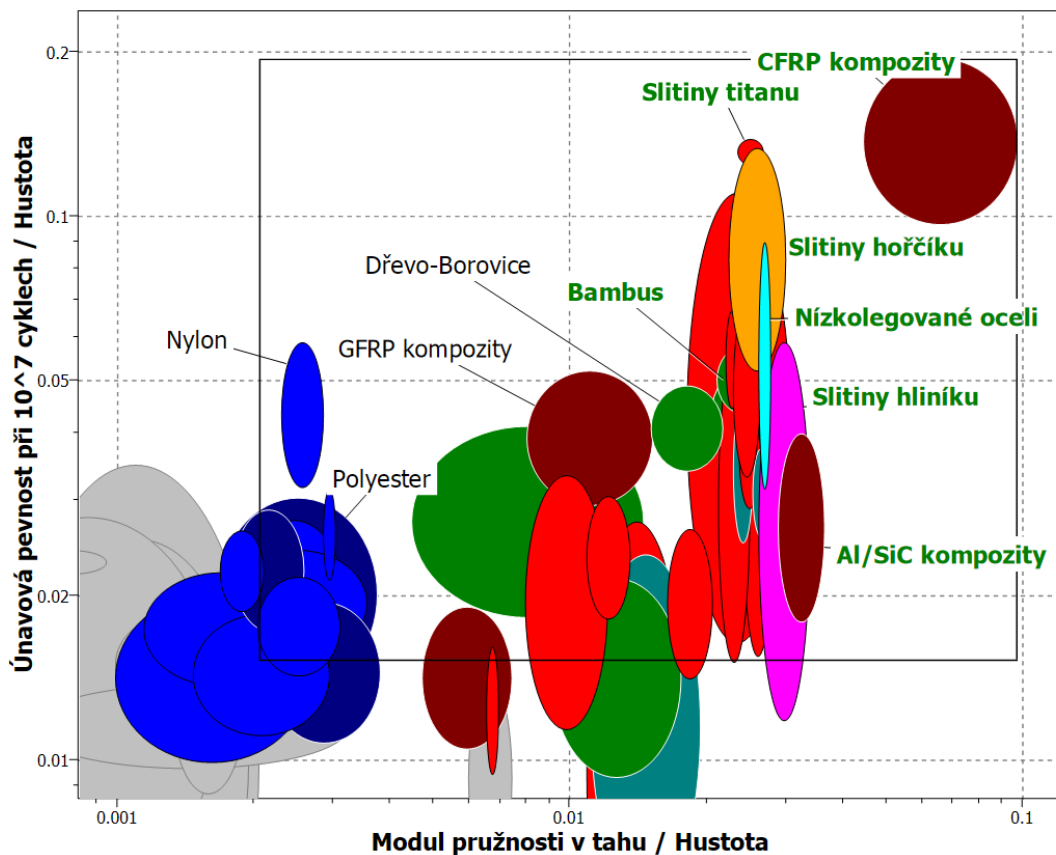
Definice konstrukčních požadavků:

- **Funkce:** přenést statické a dynamické namáhání.
- **Omezení:** splnit najednou požadovanou tuhost a únavovou pevnost.
- **Cíl:** minimální hmotnost.
- **Volná proměnná:** tloušťka stěny trubky.

Vyšetřené materiálové indikátory:

- pro požadovanou únavovou pevnost;  $M_1 = \frac{\sigma_e}{\rho}$
- pro požadovanou tuhost;  $M_2 = \frac{E}{\rho}$

Pomocí CES EduPack (47) byla vytvořena materiálová mapa pro vícečetná konstrukční omezení.



Obr. 37 Materiálová mapa pro pevnost a tuhost s pevně daným rádiusem  $R$ , ale s volnou tloušťkou stěny trubky

### Interpretace výsledků materiálové mapy:

Optimálnost kombinace vlastností materiálů se zlepšuje směrem k pravému hornímu rohu. Z výběru jsou vyloučeny všechny keramické materiály. Vzhledem k jejich křehkosti jsou nevhodné pro rámy kol. Materiály, jejichž název je na mapě tučným a barevným písmem, se používají pro rámy kol. Jedná se o nízkolegované oceli, slitiny hliníku, Al/SiC kompozity (kompozity s kovokeramickou maticí), slitiny titanu, slitiny hořčíku, dřevo (bambus) a CFRP kompozity (kompozity s karbonovými vlákny).

CFRP kompozity jsou nejvhodnějším materiálem, naopak jako nevhodné se jeví polymery. Plastové rámy kol budou buď příliš těžké, nebo málo tuhé. Všechny kovy mají přibližně stejnou tuhost, ale liší se v únavové pevnosti. Slitiny titanu a hořčíku mají lepší únavovou pevnost než oceli, slitiny hliníku a Al/SiC kompozity. Dřevo se také jeví jako vhodné, ale jeho použití je limitováno možností výroby tenkostěnné trubky.

### 5.4.2. Příklad 2 – minimální hmotnost - pevně daný poměr poloměru a tloušťky stěny ( $R/t$ )

Definice konstrukčních požadavků:

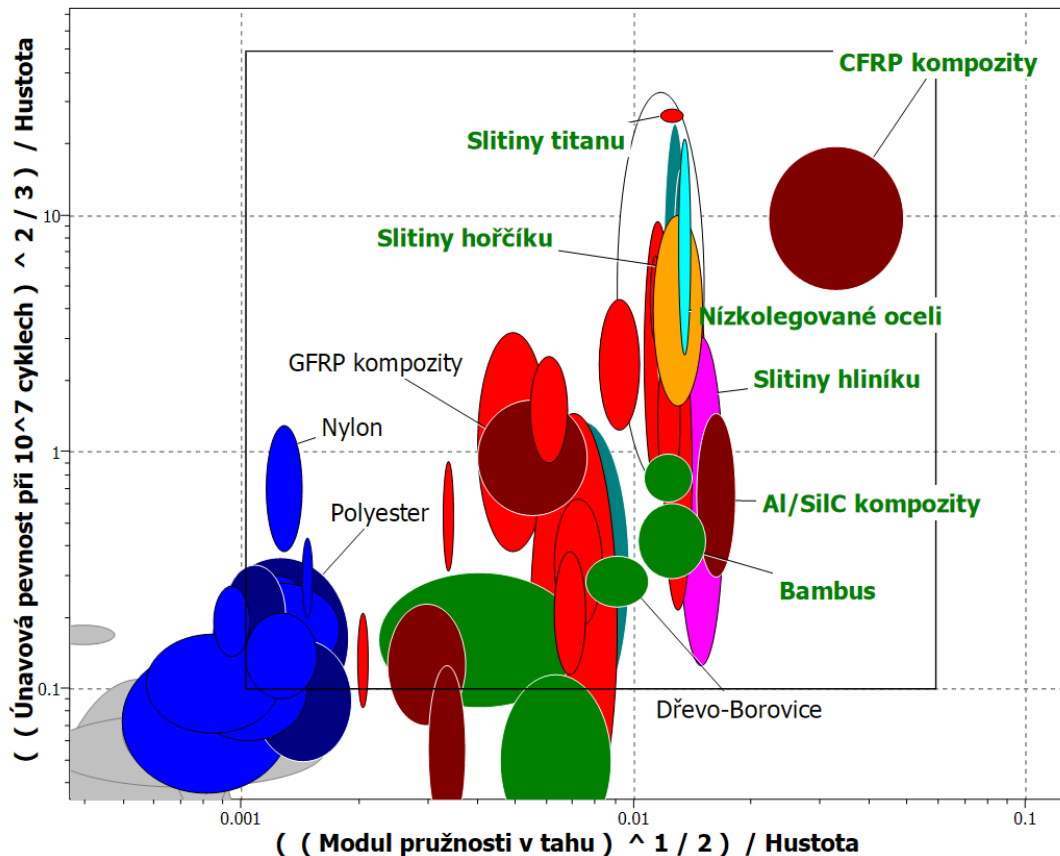
- **Funkce:** přenést statické a dynamické namáhání.
- **Omezení:** splnit najednou požadovanou tuhost a únavovou pevnost.
- **Cíl:** minimální hmotnost.
- **Volná proměnná:** poloměr trubky  $R$  (při splnění podmínky fixního poměru  $R/t$ ).

Vyšetřené materiálové indikátory:

- pro požadovanou únavovou pevnost;  $M_3 = \frac{\sigma_e^{2/3}}{\rho}$
- pro požadovanou tuhost;  $M_4 = \frac{E^{1/2}}{\rho}$

Pomocí CES EduPack (47) byla vytvořena materiálová mapa pro vícečetná konstrukční omezení.





Obr. 38 Materiálová mapa pro pevnost a tuhost s pevně daným poměr poloměru a tloušťky stěny ( $R/t$ ), ale s volným rádiusem

### Interpretace výsledků materiálové mapy:

Opět platí, že optimálnost kombinace vlastností materiálů se zlepšuje směrem k pravému hornímu rohu. Z výběru jsou zase vyloučeny všechny keramické materiály vzhledem k jejich křehkosti. Materiály, jejichž název je na mapě tučným a barevným písmem, se používají pro rámy kol. Jedná se o nízkolegované oceli, slitiny hliníku, Al/SiC kompozity (kompozity s kovokeramickou maticí), slitiny titanu, slitiny hořčíku, dřevo (bambus) a CFRP kompozity (kompozity s karbonovými vlákny).

Z materiálové mapy vyplývá, že CFRP kompozity jsou nejvhodnějším materiálem, naopak jako nevhodné se jeví polymery. Plastové rámy kol budou buď příliš těžké, nebo málo tuhé.

V nedávné minulosti (cca před deseti až dvaceti lety) by ležela bublina s nízkolegovanou ocelí v levém dolním kvadrantu materiálové mapy (hned napravo vedle polymerů, které jsou na mapě zobrazeny tmavomodře). Slitiny hliníku ležely oproti oceli výrazně blíže hornímu pravému rohu. To také vysvětluje, proč se začaly ve velkém vyrábět rámy

z hliníkových slitin. Ve chvíli, kdy se upustilo od omezení, že se musí vyrábět trubky stejně velkých průměrů kvůli kompatibilitě souvisejících dílů jízdního kola, začalo se využívat kombinace tvaru průřezu a vhodné volby materiálu. Se zvětšujícím se průměrem trubky se zvětšuje i její ohybová tuhost. Hliníkové slitiny jsou lehké a tak rámy z nich vyrobené měly optimální kombinaci tuhosti, únavové pevnosti a hmotnosti. Ovšem při pohledu na materiálovou mapu vytvořenou z databáze CES EduPack z roku 2013 je vidět, že slitiny hliníku a nízkolegované oceli mají přibližně stejnou tuhost, ocel má dokonce násobně vyšší únavovou pevnost. Zlepšování vlastností nízkolegovaných ocelí jde skokově kupředu. Vývoj ocelí je stejně rychlý jako např. vývoj mobilních telefonů. V současné době je ocel výhodnější materiál oproti slitinám hliníku, a to jak pro pevně daný poloměr trubky ( $R$ ), tak i pro pevně daný poměr poloměru a tloušťky stěny ( $R/t$ ). Logicky vystává otázka: zvýšila-li se v současné době pevnost oceli, zvýšila se i její cena? Odpověď je v následující podkapitole.

### 5.4.3. Příklad 3 – minimální cena - pevně daný rádius trubky ( $R$ )

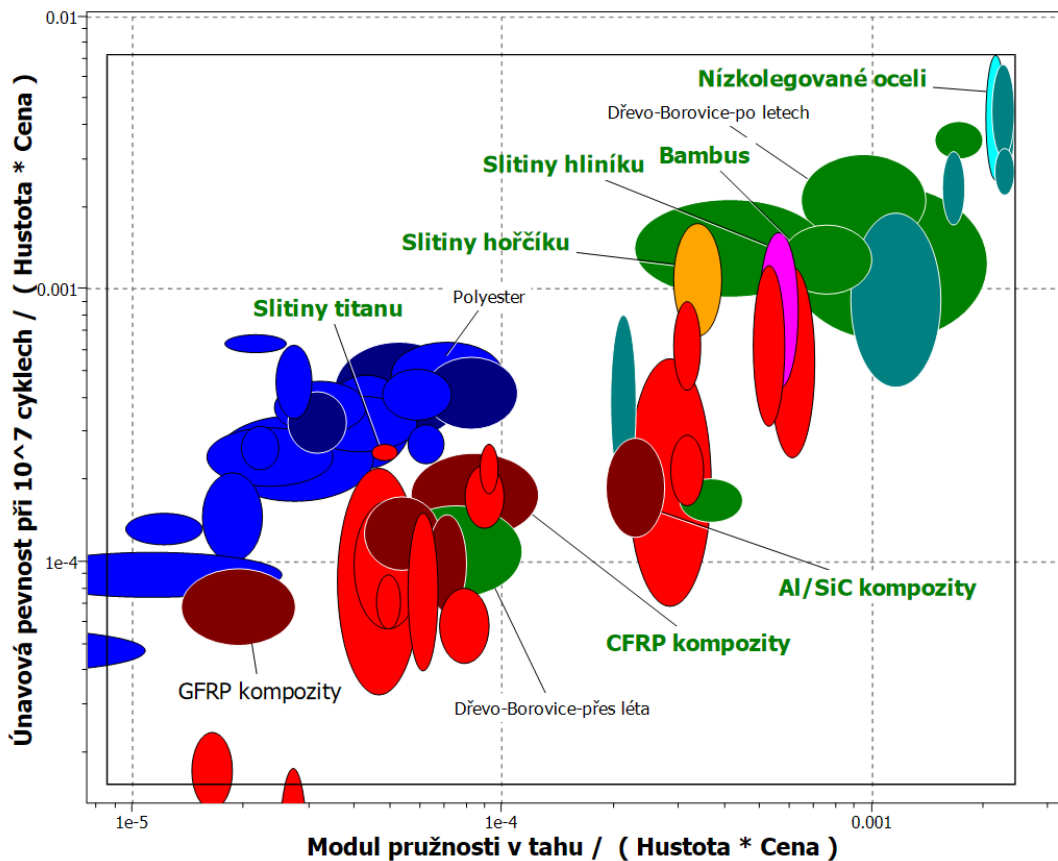
Definice konstrukčních požadavků:

- **Funkce:** přenést statické a dynamické namáhání.
- **Omezení:** splnit najednou požadovanou tuhost a únavovou pevnost.
- **Cíl:** minimální cena.
- **Volná proměnná:** tloušťka stěny trubky.

Vyšetřené materiálové indikátory:

- pro požadovanou únavovou pevnost;  $M_5 = \frac{\sigma_c}{c_m \rho}$
- pro požadovanou tuhost;  $M_6 = \frac{E}{c_m \rho}$

Pomocí CES EduPack (47) byla vytvořena materiálová mapa pro vícečetná konstrukční omezení.



Obr. 39 Materiálová mapa pro pevnost a tuhost s pevně daným rádiusem  $R$ , ale s volnou tloušťkou stěny trubky. Cílem je minimalizovat cenu

### Interpretace výsledků materiálové mapy:

Opět platí, že optimálnost kombinace vlastností materiálů se zlepšuje směrem k pravému hornímu rohu. Z výběru jsou vyloučeny všechny keramické materiály vzhledem k jejich křehkosti a celkové nevhodnosti pro rámy kol. Materiály, jejichž název je na mapě tučným a barevným písmem, se používají pro rámy kol. Jedná se o nízkolegované oceli, slitiny hliníku, Al/SiC kompozity (kompozity s kovokeramickou maticí), slitiny titanu, slitiny hořčíku, dřevo (bambus) a CFRP kompozity (kompozity s karbonovými vlákny).

V případě, že kritériem je minimální cena, jednoznačně vede nízkolegovaná ocel. Konkuruje jí dřevo, ale jak už bylo dříve uvedeno, jeho použití je limitováno možností výroby tenkostěnné trubky. Dřevo následují slitiny hliníku. Další kovy jsou dražší. Velmi drahé jsou slitiny titanu a CFRP kompozity.

Na závěr lze konstatovat, že v současné době jsou nízkolegované oceli optimálními materiály ve všech výše posuzovaných kriteriích.

## 5.5. Zobecnění metody výběru materiálu v závislosti na tvaru průřezu

Chce-li konstruktér optimalizovat funkční charakteristiky komponenty, která je namáhána ohybem, má dvě skupiny proměnných, které jsou navzájem závislé. Jsou to vlastnosti materiálu a tvar průřezu.

Je-li trubka namáhána na ohyb nebo krut, její tuhost a pevnost se dá zvýšit zvolením vhodného tvaru průřezu. Má-li být tedy provedeno srovnání různých materiálů, musí se do metodiky výběru materiálů, resp. do materiálového indikátoru, zahrnout i tzv. tvarový faktor (2) (16). Materiál má vlastnosti, ale nemá tvar. Konstrukce komponenty je materiál zpracovaný do nějakého tvaru. Tvarové faktory jsou měřítko efektivnosti užití materiálů. Ohybová tuhost nosníku  $S$  je úměrná součinu  $EI$

$$S \propto \frac{EI}{L^3}$$

$E$  je modul průřezu v ohybu a  $I$  je kvadratický moment průřezu nosníku délky  $L$  okolo osy ohybu (osa  $x$ ). Pro srovnávací nosník, čtvercového průřezu o délce strany  $b_0$  a ploše průřezu  $A = b_0^2$ , je kvadratický moment  $I_0$  roven

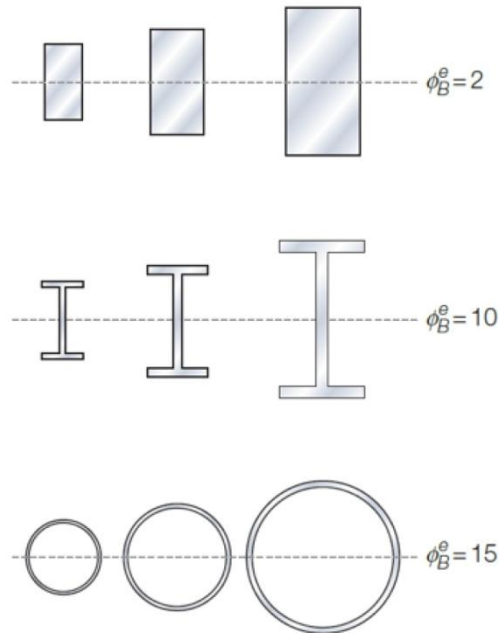
$$I_0 = \frac{b_0^4}{12} = \frac{A^2}{12} \quad 46$$

Pravý dolní index  $_0$  se vztahuje k plnému čtvercovému srovnávacímu průřezu. Ohybová tuhost různých tvarovaných průřezů se stejnou průřezovou plochou  $A$  se liší. Tato skutečnost se dá vyjádřit pomocí tvarového faktoru  $\phi_B^e$

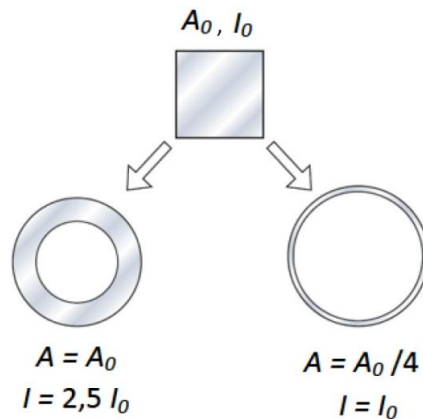
$$\phi_B^e = \frac{S}{S_0} = \frac{EI}{EI_0} = \frac{12 I}{A^2} \quad 47$$

$\phi_B^e$  se nazývá *tvarový faktor pro pružný ohyb*. Je bezrozměrný. Záleží pouze na tvaru, ne na měřítku. Malé i velké nosníky mají stejnou hodnotu tvarového faktoru  $\phi_B^e$  za předpokladu, že jejich průřezové tvary jsou stejné (velikost průřezu  $A$  se může lišit). To názorně ukazuje obr. 40. Obr. 41 představuje další názorný příklad působení tvaru průřezu

na ohybovou tuhost  $EI$ . Nosník plného čtvercového průřezu je porovnán nalevo s trubkou, která má stejnou plochu průřezu ( $A = A_0$ ), ale je 2,5 krát tužší, protože jeho kvadratický moment průřezu je 2,5 větší ( $I = 2,5 I_0$ ). Napravo je nosník plného čtvercového průřezu porovnán s trubkou, která má stejnou tuhost ( $I = I_0$ ), ale je 4 krát lehčí ( $A = A_0/4$ ).



Obr. 40 Ukázka vlivu tvaru průřezu a měřítka na ohybovou tuhost (2)



Obr. 41 Působení tvaru průřezu na ohybovou tuhost

Plné rovnoosé průřezy (kruhové, čtvercové, šestiúhelníky, osmiúhelníky) mají hodnotu tvarového faktoru  $\phi_B^e$  velmi blízko 1, prakticky vzato 1. Ale pokud se průřez zvětšuje (roztahuje) do šířky a udělají se v něm dutiny, (jako např. tenkostěnná trubka s velkým průměrem nebo štíhlý nosník s I profilem), potom může tvarový faktor  $\phi_B^e$  dosahovat

hodnoty až 50 i více. Nosník s tvarovým faktorem 50 je 50 krát tužší, než nosník s plným průřezem při stejné hmotnosti. Tato teorie se dá použít i obráceně, a to v případě, pokud by byla naopak požadována malá ohybová tuhost, např. u pružin, rámců, různých závěsů, atd.

Velikost tvarového faktoru je ovšem omezena. Jednak kvůli výrobním možnostem různých tvarů z různých materiálů, dalším omezením tvarového faktoru je, že při použití určitého „účinného“ tvaru průřezu může nastat lokální zborcení nosníku.

Lze definovat čtyři tvarové faktory. První,  $\phi_B^e$ , je faktor pro pružný ohyb a zborcení nosníku, viz rovnice 47. Druhý,  $\phi_T^e$ , je pro pružný krut hřídelů. Třetí,  $\phi_B^f$ , je faktor pro plastické porušení hřídelů ohybem. Poslední,  $\phi_T^f$ , je faktor pro plastické porušení hřídelů krutem. Formulace tvarových faktorů jsou shrnuty v tabulka 8.

Tabulka 8 Definice tvarových faktorů (2)

Konstrukční omezení	Ohyb	Krut
Tuhost	$\phi_B^e = \frac{12 I}{A^2}$	$\phi_T^e = \frac{7,14 K}{A^2}$
Pevnost	$\phi_B^f = \frac{6 Z}{A^{3/2}}$	$\phi_T^f = \frac{4,8 Q}{A^{3/2}}$

Názvy použitých značek v tabulce:

$A$  = plocha průřezu [ $m^2$ ]

$I$  = kvadratický moment plochy průřezu [ $m^4$ ]

$K$  = moment plochy v krutu [ $m^4$ ] (odpovídá českému značení  $J_p$  - moment průřezu polární)

$Z$  = průřezový modul odporu v ohybu [ $m^3$ ] (odpovídá českému značení  $W_o$ )

$Q$  = průřezový modul odporu v krutu [ $m^3$ ] (odpovídá českému značení  $W_k$ )

Tabulka 9 Horní meze empirických hodnot tvarových faktorů pro vybrané materiály (2)

Material	$(\phi_B^e)_{max}$	$(\phi_T^e)_{max}$	$(\phi_B^f)_{max}$	$(\phi_T^f)_{max}$
Konstrukční ocel	65	25	13	7
Slitina hliníku (6061)	44	31	10	8
GFRP a CFRP	39	26	9	7
Polymery (např. nylony)	12	8	5	4
Dřevo (plný průřez)	5	1	3	1
Elastomery	<6	3	-	-

Horní meze pro tvarovou výkonnost jsou důležité a to hlavně pro navrhování konstrukce, která má být lehká nebo levná (levná bude, když obsah materiálu bude minimalizován). Jsou dva způsoby, jak je stanovit. První je empirický, tedy zkoušením různých tvarů a materiálů, a druhý způsob je analýzou mechanické stability tvarových průřezů. V tabulka 9 jsou uvedeny pro vybrané materiály horní meze jednotlivých tvarových faktorů.

Nejlepší kombinace tvaru a materiálu pro lehký nosník s danou ohybovou tuhostí je právě ten, který maximalizuje materiálový indikátor

$$M_7 = \frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho} \quad 48$$

Nejlepší kombinace tvaru a materiálu pro lehký nosník s danou pevností je právě ten, který maximalizuje materiálový indikátor

$$M_8 = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho} \quad 49$$

Výše uvedené materiálové indikátory již obsahují tvarové faktory. Tímto se umožní zpracování vlivu tvarovaných průřezů do procesu výběru materiálů. Indikátory, které obsahují tvar, poskytují nástroj pro optimalizaci výběru materiálu a tvaru současně. V tabulka 10 je stručný přehled nejdůležitějších z nich. Postup výběru materiálového indikátoru je následující. Identifikují se kandidáti z databáze materiálů a vybere se tvar, který je dostupný nebo může být vyroben. Potom se vyčíslí příslušný relevantní

materiálový indikátor. Nejlepší kombinace materiálu a tvaru je právě taková, která má nejvyšší hodnotu materiálového indikátoru.

Tabulka 10 Materiálové indikátory s tvarovými faktory pro navrhování se stanovenou mezí tuhosti a pevnosti při minimální hmotnosti

Tvar komponenty, zatížení a omezení	Tuhostně omezený návrh	Pevnostně omezený návrh
<i>Prut</i> (namáhán tahem) zatížení, tuhost a délka jsou specifikovány; volný průřez	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_f}{\rho}$
<i>Nosník</i> (namáhán ohybem) zatížení (vnější nebo vlastní hmotnosti), tuhost, pevnost a délka jsou specifikovány; volný průřez a volný tvar	$\frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$
<i>Torzní tyč</i> nebo <i>trubka</i> zatížení (vnější), tuhost, pevnost a délka jsou specifikovány; volný průřez a volný tvar	$\frac{(\phi_T^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{(\phi_T^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$
<i>Sloup</i> (namáhán tlakem) kolabsní vzpěrné zatížení, pevnost a délka jsou specifikovány; volný průřez a volný tvar	$\frac{(\phi_T^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{\sigma_f}{\rho}$

## 5.6. Příklad použití obecné metody

Základním zřetelem při navrhování rámu kola je pevnost. Na tuhosti samozřejmě také záleží, ale výchozím konstrukčním kritériem je, že rám kola nesmí při normálním použití prasknout. Tento příklad je zaměřen na vidlici kola. Ta je dominantně namáhána ohybem. Dále je uvažováno, že se jedná o silniční kolo pro sportovní jízdu, proto je minimální hmotnost hlavním cílem návrhu. Je tedy potřeba nalézt nejlepší kombinaci materiálu a jeho tvaru průřezu.



Shrnutí konstrukčních požadavků pro volbu materiálu vidlice kola:

- **Funkce:** cyklistická vidlice; nosník namáhaný ohybem.
- **Omezení:** dána pevnost a délka.
- **Cíl:** minimální hmotnost.
- **Volné proměnné:** výběr materiálu a tvar průřezu.

### Převedení konstrukčních požadavků a výběr materiálu

Výpočtovým modelem pro vidlici kola je nosník délky  $L$ , který musí přenést maximální zatížení bez plastického porušení nebo prasknutí. Bude minimalizována jeho hmotnost. Další detaily ohledně zatížení vidlice a její geometrie, přestože vidlice má zahnutý tvar, jsou pro tento návrh nepodstatné. Vysvětlení je podáno v kapitole 4.3.5, str. 48.

Z tabulka 10 je patrné, že nejlepší materiál a tvar je takový, který má největší hodnotu materiálového indikátoru

$$M_{8(V)} = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho} \quad 50$$

V tabulka 11 je porovnáno 8 materiálů. 6 z nich se běžně používá na rámy. Smrkové dřevo se nepoužívá, je zde uvedeno jako příklad materiálu s malým tvarovým faktorem. Rámy z bambusu jsou zcela funkční, ale vyskytují se spíše jako rarity. Bambus je speciální případ, protože už rovnou roste jako trubka s hodnotou tvarového faktoru  $\phi_B^f$  okolo 2,2. V předposledním sloupci jsou hodnoty materiálového indikátoru bez tvarového faktoru, tedy zde není zohledněna výhoda tvaru průřezu. V posledním sloupci má už materiálový indikátor v sobě zahrnut vliv tvaru průřezu. Tvarové faktory (2) v tabulce jsou dosažitelné při užití běžných výrobních metod. Hodnoty indikátorů vycházejí ze středních hodnot vlastností materiálů.

CFRP kompozity jsou, i přes poměrně malý tvarový faktor, nejlepším materiálem pro zadané požadavky. Pomine-li se na chvíli materiál na posledním dolním řádku (ocel Reynolds 953), potom slitiny titanu jsou jasně druhé. S daleko horším výsledkem jsou na třetím místě slitiny hliníku, těsně je následují oceli (Reynolds 531) a téměř na stejné pozici jsou slitiny hořčíku.

Jak již bylo dříve konstatováno v kapitole 5.4.2, str. 71, díky rychlému vývoji vlastností ocelí v posledních letech, se jejich vlastnosti výrazně zlepšují. Legendou mezi výrobci

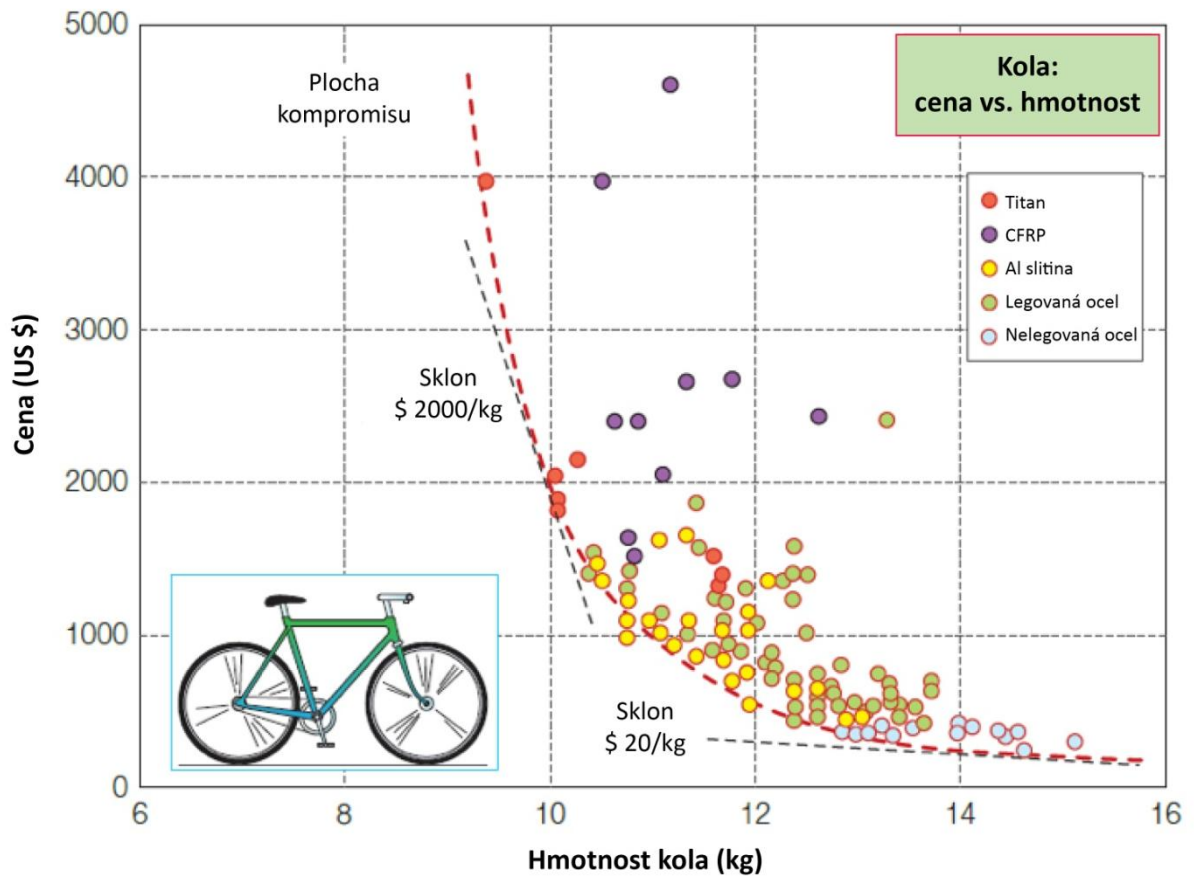
rámů kol je firma Reynolds (52). Na svých webových stránkách uvádí, že používají ocel Reynolds 953, u které hodnota meze pevnosti přesahuje 2000 MPa. Tato ocel je hodnotou jejího materiálového indikátoru srovnatelná s hodnotou slitiny titanu. Znamená to, že rámy z oceli zcela konkurují svými mechanickými vlastnostmi ráům ze slitiny titanu. Výrazný rozdíl je ovšem v jejich ceně. Cena oceli srovnatelných vlastností jako Reynolds 953 je 20 Kč za kilogram (47), kdežto cena slitiny titanu (Ti-6Al-4V) je 500 Kč za kilogram (47).

Tabulka 11 Materiály pro rám kola (vidlici kola) (2)

Materiál	Pevnost $\sigma_f$ [MPa]	Hustota $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Tvarový faktor $\phi_B^f$	Mat. indikátor $\sigma_f^{2/3} / \rho$ [MPa] <sup>2/3</sup> / [Mg/m <sup>3</sup> ]	Mat. indikátor $M_B$ $(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3} / \rho$ [MPa] <sup>2/3</sup> / [Mg/m <sup>3</sup> ]
Smrkové dřevo (norské)	75	450	1,5	39	51
Bambus	70	700	2,2	24	41
Ocel (Reynolds 531)	880	7850	7,5	12	46
Slitina hliníku (6061-T6)	250	2700	5,9	15	49
Slitina titanu (6%Al-4%V)	950	4420	5,9	22	72
Slitina hořčíku (AZ 61)	165	1810	4,25	17	45
CFRP kompozit	378	1550	4,25	33	87
Ocel (Reynolds 953)	1850	7850	7,5	19	73

Pokud by byla hlavním cílem místo hmotnosti cena, potom by se zase, jako v případě popsané v kapitole 5.4.3, str. 73, v materiálových indikátorech nahradila hustota  $\rho$  vztahem  $C_m \rho$ , kde  $C_m$  je cena za jeden kilogram materiálu. V tomto případě by nejlevnější materiál byl ten, který by měl největší materiálový indikátor vztahující se k minimální ceně.

Běžný člověk v reálném životě hledá kompromis mezi cenou a výkonem objektu, který si chce koupit. V případě jízdního kola je to mezi jeho hmotností a cenou. Jedná se o konflikt cílů konstrukčních požadavků. Obr. 42 názorně zobrazuje danou problematiku. Je zde znázorněna mapa kompromisů pro materiály, které se používají na výrobu ráámů, v závislosti na jejich ceně a hmotnosti. Použitá data materiálů jsou sebrána z cyklistických časopisů. Tečna k porovnávací křivce v jakémkoliv jejím bodě dává míru změny konstanty. Její rozmezí je od 20-ti dolarů za kilogram až po 2000 dolarů za kilogram. Cena za snížení hmotnosti kola o jeden kilogram je obrovská. Pokud se vezme jezdec a kolo jako systém, jaká je cena snížení hmotnosti jezdce o jeden kilogram? Nebo cena zvýšení fyzické výkonnosti jezdce? O tom se ve světě reklamy nemluví.



Obr. 42 Mapa kompromisů pro výběr materiálu při vícenásobných konstrukčních cílech (hmotnost a cena) (2)

Velmi podstatná je informace, že v materiálové mapě pro vícekritériální výběr však nejsou ještě zahrnuty nové oceli s nadstandardními vlastnostmi, avšak cenou srovnatelnou se staršími typy ocelí (viz dříve popsané). Zdá se, že použitím těchto nových ocelí na výrobu rámu nebude již třeba dělat kompromisů.

## **6. Závěr**

### **6.1. Zhodnocení dosažených výsledků disertační práce**

#### **6.1.1. Rešerše současného stavu poznání**

V kapitole 2 je objasněn současný stav konstrukčního procesu. Existuje mnoho sofistikovaných nástrojů, které simulují, modelují, analyzují, prostě pomáhají zpřesnit a zrychlit vlastní proces konstruování. Ovšem v subprocessu - výběr materiálů - je situace opačná, dosud se ve většině případů materiál vybírá nesystematicky (podle zkušeností, či intuitivně, atd.).

Z kapitoly 2 také vyplývá, že materiál ovlivňuje velmi podstatnou část celkových vlastností produktu a to včetně jeho celkové ceny. Existuje až 160 000 konstrukčních materiálů (2). Konstruktor má ovšem přístup jen k velmi omezenému množství informací o materiálech, v literatuře (1) se uvádí, že má informace pouze o 30 až 60 druzích materiálů. Dá se konstatovat, že současná výkonnost rozvoje nauky o materiálech předstihla schopnosti konstruktérů aplikovat ji v celém jejím rozsahu.

V kapitole 3 je přehled dostupných světových i českých databází materiálů. Z rešerše vyplývá, že databáze jsou vždy zaměřeny specificky, nejsou úplné a mají každá jiný způsob vyhledávání. Databáze firmy Granta Design je úplná a má jedinečný systém vyhledávání.

#### **6.1.2. Analýza zjištěného stavu poznání**

Rešerše současného stavu výběru materiálů při konstrukčním procesu jednoznačně ukázala, že tato problematika potřebuje být řešena. Z mnoha světových databází materiálů se jako výjimečná ukázala databáze firmy Granta Design. Výjimečnost je založena na možnosti vytváření materiálových map, na jejichž osy se mohou vynášet jakékoliv vlastnosti materiálů i jejich kombinace. Princip vynášení materiálových map je základem optimalizace výběru materiálů. Problematika materiálových map je popsána v kapitole 3.5.

### 6.1.3. Integrace zjištěných poznatků

V kapitole 4 je objasněna metodika výběru materiálů, která je řízena konstrukčním procesem. Řešení problému s výběrem materiálu se dá vyjádřit jednoduše ve dvou krocích. Nejprve je nutno identifikovat požadovaný profil vlastností hledaného materiálu a poté porovnat tento profil se skutečnými materiály a nalézt nejlepší shodu.

V jednotlivých fázích konstrukčního procesu se charakter údajů výběru materiálů liší a to především v úrovni přesnosti a šíře výběru. Vstupem do procesu výběru materiálů jsou požadavky návrhu produktu. Ty se převedou na funkce, omezení, cíle a volné proměnné. Omezení nastavují meze vlastností materiálů. Cíle definují materiálové indikátory, pro které se hledají extrémní hodnoty. Pokud cíl není svázán s omezením, materiálovým indikátorem je prostá materiálová vlastnost. Ovšem pokud je svázán se dvěma vlastnostmi, indikátorem se stane skupina vlastností. Odvození materiálových indikátorů je vysvětleno právě v kapitole 4. Je-li znám správný materiálový indikátor, proces výběru probíhá dále jednoduše a logicky. Eliminují se materiály, které nesplňují zadané podmínky, dále se seřadí pomocí stanovených cílů (materiálových indikátorů). Pro materiály, které se umístily na předních místech, se vyhledá podrobnější dokumentace.

### 6.1.4. Validace zjištěných poznatků

V kapitole 5 je výše popsaná metodika použita na konkrétním příkladu rámu jízdního kola. Tento konkrétní příklad je možné přímo použít při výuce budoucích konstruktérů. Příklad podává logické vysvětlení o vhodnosti jednotlivých materiálů vzhledem ke specifickým požadavkům zákazníků a o vlivu tvaru průřezu trubky na výběr materiálu rámu. Nejprve jsou definovány obecně konstrukční požadavky na rám kola, které jsou v dalším kroku převedeny na funkci, omezení, cíle a volné proměnné. Volný rozměr průřezu tenkostěnné trubky ovšem komplikuje porovnání vlastností materiálů. Z tohoto důvodu jsou postupně uvažovány dvě varianty. U první varianty je pevně daný poloměr, tloušťka stěny je volným rozměrem. U druhé varianty je pevně daný poměr poloměru a tloušťky stěny. Postupně jsou nalezeny všechny materiálové indikátory pro všechny zátěžové stavy. Ty jsou následně použity pro výběr optimálních materiálů pomocí materiálových map.

Dále následuje zobecnění metodiky výběru. Je-li trubka namáhána na ohyb nebo krut, její tuhost a pevnost se dá zvýšit zvolením vhodného tvaru průřezu. Má-li být tedy provedeno srovnání různých materiálů, musí se do metodiky výběru materiálů, resp. do materiálového

indikátoru, zahrnout i tzv. tvarový faktor (2). Materiál má vlastnosti, ale nemá tvar. Konstrukce komponenty je materiál zpracovaný do nějakého tvaru. Tvarové faktory jsou měřítko efektivnosti užití materiálů.

## 6.2. Doporučení pro pokračování práce

Doba je rychlá, nestačí mít pouze kvalitní produkt, ale musí být dodán včas a za minimální náklady. Proto by měla následovat podpora optimalizace výběru materiálů pomocí systému ANSYS. Cílem projektu by mělo být propojení metodiky optimalizace výběru materiálů s optimalizačním prostředím ANSYS. Výsledkem by mělo být nejen ověření a rozvinutí metodiky optimalizace výběru materiálů, ale především, díky rychlosti ANSYS, obrovské zefektivnění daného procesu optimalizace výběru materiálů. Program ANSYS DesignXplorer disponuje řadou optimalizačních algoritmů pro nalezení globálního extrému, jako jsou:

- DOE (Design of Experiments)
- Goal-Driven Optimization
- Six Sigma
- Aproximace (Kriging)

Výsledky těchto simulací se velice přibližují realitě a jsou schopny reflektovat složité fyzikální děje.

Další doporučení jsou:

- sestavení optimalizačních modelů v prostředí ANSYS pro různé zátěžové stavy
- numerické ověřování materiálových indikátorů
- materiálová optimalizace složitějších úloh z hlediska zátěžových stavů a pracovního prostředí
- kompromisy mezi vícenásobnými omezeními a cíly
- rozšiřování teorie výběru materiálů na základě vyhodnocování numerických výsledků

## 6.3. Shrnutí

V této disertační práci byl vytvořen přehled o systému výběru materiálů, který je simultánně veden s konstrukčním procesem. Jako vstup do procesu výběru materiálu se berou konstrukční požadavky, tzn. funkce, omezení, cíle a volné proměnné. Na výstupu se získá podmnožina použitelných materiálů s daty o jejich vlastnostech. Toto „schéma

vstup/výstup“ má vlastnosti nezbytné pro integraci do rozsáhlejšího konstrukčního systému, který dovoluje konstruktérovi prozkoumat včas, tedy na začátku konstrukčního procesu, výběr materiálu a jeho následků. I když se v této práci o tom nezmiňovalo, jeví se pravděpodobné, že paralelní schéma by mělo být vytvořeno pro výběr výrobních procesů. Tohle je cesta sbližování dvou hlavních proudů strojírenství, což jsou nauka (věda) o materiálech a strojírenská konstrukce.

Cílem disertační práce bylo rozšířit dosavadní metodiku „Systémového navrhování technických produktů“ o metodiku „Systémového výběru materiálů v průběhu navrhování technických produktů“. Cíl disertační práce byl splněn.

Tato metodika by měla být velkým přínosem pro pedagogickou činnost. Umožňuje studentům hlubší porozumění vlastnostem materiálů díky vizualizaci prostřednictvím materiálových map. Učí je propojit vlastnosti materiálů s konstrukčními požadavky. Je podporou při řešení studentských konstrukčních projektů v průběhu celého studia. Přípravuje studenty pro průmysl. Metodika poskytuje studentům perspektivu, zpětnou vazbu, metody a data pro přemýšlení o navrhování materiálů tak, aby byl minimalizován jejich dopad na životní prostředí.

Pomocí této metodiky se dá také rozvíjet porozumění studentů interdisciplinárním tématům. Jedno takovéto důležité téma je problematika 3P, zkratka je složena ze slov planeta, lidé a prosperita, (v angličtině jsou všechny tři slova od písmene P). Více se používá název společenská odpovědnost firem. Hodně se mluví o samotném tématu, ale méně se mluví o metodice posuzování 3P. Jak učit studenty posuzovat společenskou odpovědnost v procesu výběru materiálů je popsáno v příspěvku na konferenci (53). Je potřeba vychovávat inženýry se širokým rozhledem a to nejen technickým, ale i společenským.

## Citovaná literatura

1. **DIETER, George E. a SCHMIDT, Linda C.** *Engineering design*. New York : McGraw-Hill, 2009. ISBN 978-0-07-283703-2.
2. **ASHBY, Michael F.** *Material Selection in Mechanical Design*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-1-85617-663-7.
3. QFD Institute. [Online] [Citace: 11. 12 2014.]  
[http://www.qfdi.org/what\\_is\\_qfd/what\\_is\\_qfd.html](http://www.qfdi.org/what_is_qfd/what_is_qfd.html).
4. **OWENS, John.** Function Modelling. *Integrated Modelling Method*. [Online] [Citace: 21. 5 2011.]  
<http://www.scribd.com/doc/10989035/Business-Function-Modeling-eBook-Extract>.
5. **ŘEPA, Václav.** *Podnikové procesy: procesní řízení a modelování*. Praha : Grada Publishing, 2007. ISBN 978-80-247-2252-8.
6. **DALGLEISH, G. F., JARED, G. E. M. a SWIFT, K. G.** Design for assembly: influencing the design process. *Journal of Engineering Design*. Taylor & Francis Ltd, 2000, Sv. vol.11, no. 1, stránky 17-29.
7. **KOUKOLSKÝ, Mikuláš.** DFMAS. *Výstupy z projektu - Partner Škoda Auto*. [Online] [Citace: 27. 3 2011.] [http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy\\_z\\_projektu/09~Partner%20-%20%C5%A0KODA%20Auto/P3-04\\_%20DFMAS.pdf](http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy_z_projektu/09~Partner%20-%20%C5%A0KODA%20Auto/P3-04_%20DFMAS.pdf).
8. **ŠVÁBEK, Karel.** Technické výpočty = virtuální zajištění funkčnosti vozu (FEM). *Výstupy z projektu - Partner Škoda Auto*. [Online] [Citace: 27. 3 2011.]  
[http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy\\_z\\_projektu/09~Partner%20-%20%C5%A0KODA%20Auto/P2-04\\_FEM\\_20091113.pdf](http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy_z_projektu/09~Partner%20-%20%C5%A0KODA%20Auto/P2-04_FEM_20091113.pdf).
9. **HOSNEDL, Stanislav a EDER, W. Ernst.** Engineering Design Science - Advances in Definition. *The Design Society*. [Online] 3. 11 2005. [Citace: 21. 8 2014.] <https://www.designsociety.org/search-publication/5/hosnedl/2>.
10. **EDER, W. Ernst a HOSNEDL, Stanislav.** *Design Engineering. A Manual for Enhanced Creativity*. Boca Raton : CRC Press, Taylor & Franciss Group, 2008. ISBN 978-1-4200-4765-3.
11. **HOSNEDL, Stanislav.** *Systémové navrhování technických produktů*. [Studijní podklady, pdf.] Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2012. ISBN 978-80-261-0125-3.
12. **HUBKA, Vladimír a EDER, W. Ernst.** *Engineering Design, General Procedural of Engineering Design*. Zurich : Heurista, 1992. ISBN 3-85693-026-4.
13. ČSN EN ISO 9000:2009. *Systém managementu kvality - Základní principy a slovník*. Praha : ÚNMZ, 2009.
14. **HOSNEDL, Stanislav.** *Konstrukční nauka, Obecný model postupu při konstruování*. Zurich : Heurista, 1995. ISBN 80-90 1135-0-8.
15. Metodologie odborné práce - opory. *IS MU*. [Online] [Citace: 14. 7 2014.]  
[http://is.muni.cz/el/1441/podzim2009/Ze\\_SBP2/um/Metodologie\\_odborne\\_prace\\_-\\_opory.pdf](http://is.muni.cz/el/1441/podzim2009/Ze_SBP2/um/Metodologie_odborne_prace_-_opory.pdf).



16. **ASHBY, Michael, SHERCLIFF, Hugh a CEBON, David.** *Materials: Engineering, Science, Processing and Design.* Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-08-097773-7.
17. **NETOLICKÝ, Petr a MAZÍNOVÁ, Ivana.** Plánování kvality v předvýrobních etapách a vzdělávání. *MM Průmyslové spektrum.* 9. 6 2011, Sv. MM 2011 / 6, str. 86.
18. *Výzkum metodiky návrhu vhodných konstrukčních materiálů s využitím teorie vlastností.* **MAZÍNOVÁ, Ivana.** Žilina : Žilinská univerzita, 2009. ISBN 978-80-554-0080-8.
19. **PLURA, Jiří.** *Plánování a neustálé zlepšování jakosti.* Praha : Computer Press, 2001. ISBN 80-7226-543-1.
20. **MARSDEN, Will, WARDE, Stephen a FAIRFULL, Arthur.** *Meeting the Materials Data Management Needs of.* Cambridge : Granta Design Limited, 2007.
21. **BOSHERS, Chris.** Design Allowables. *ASM - The Material Information Society.* [Online] [Citace: 5. 5 2011.]  
<http://www.asminternational.org/portal/site/www/AsmStore/ProductDetails/?vgnextoid=61ce7e0e64e18110VgnVCM100000701e010aRCRD#details>. ASM Handbook Volume 21, Composites (ASM International).
22. **FÜRBACHER, Ivan.** Verlag Dashöfer. *Lexikon ocelí.* [Online] 1997. [Citace: 14. 9 2015.]  
<http://www.dashofer.cz/lexikon-technicky-materiálu-productlxm/>.
23. Verlag Dashöfer. *Lexikon kovů se zahraničními ekvivalenty.* [Online] 1997. [Citace: 14. 9 2015.]  
<http://www.dashofer.cz/softwarey-lexikon-kovu-se-zahranicnimi-ekvivalenty-productlkv/>.
24. **DRASTÍK, František, BENEŠ, Antonín a spol., a.** *Atlas použití kovů ve strojírenství, elektrotechnice a v chemickém průmyslu.* Praha : ALFA, 1980. Jedná se o typové číslo.. L13-E1-IV-51/22511.
25. Technor. *41 Hutnictví - Materiálové listy ocelí.* [Online] 2005. [Citace: 14. 9 2015.]  
<http://www.technicke-normy-csn.cz/technicke-normy/hutnictvi-materialove-listy-oceli-41>.
26. Feron, a.s. *Feron.* [Online] 2004. [Citace: 17. 9 2012.]  
[http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php).
27. MatWeb, Your Source for Materials Information. *MatWeb.* [Online] 1996. [Citace: 20. 9 2012.]  
<http://www.matweb.com/>.
28. AZoMaterials. *An AZoNetwork Site.* [Online] 2000. [Citace: 20. 9 2012.]  
<http://www.azom.com/>.
29. ASM International. *ASM International.* [Online] 2015. [Citace: 17. 9 2015.]  
<http://www.asminternational.org/>.
30. TECHstreet. *Thomson Reuters.* [Online] 2015. [Citace: 17. 9 2015.]  
<http://www.techstreet.com/>.
31. SAE International. *SAE International.* [Online] 2015. [Citace: 17. 9 2015.] <http://www.sae.org/>.

32. ASTM International . *ASTM International* . [Online] 1996. [Citace: 17. 9 2015.] <http://www.astm.org/>.
33. Steel Works. *American Iron and Steel Institute*. [Online] 2015. [Citace: 17. 9 2015.] <http://www.steel.org/>.
34. The Iron and Steel Society. *The Institute of Materials, Minerals and Mining*. [Online] [Citace: 17. 9 2015.] <http://www.iom3.org/iron-steel-society>.
35. The Aluminum Association. *The Aluminum Association*. [Online] 2016. [Citace: 3. 1 2016.] <http://www.aluminum.org/>.
36. Alcoa. *Alcoa Inc*. [Online] 2016. [Citace: 3. 1 2016.] <http://www.alcoa.com/global/en/home.asp>.
37. Copper Development Association Inc. *Copper Development Association Inc*. [Online] 2016. [Citace: 3. 1 2016.] <http://www.copper.org/>.
38. Metal Powder Industries Federation. *Metal Powder Industries Federation*. [Online] [Citace: 17. 9 2015.] <https://www.mpif.org/index.asp>.
39. Smithers Rapra. *Smithers Rapra*. [Online] 2016. [Citace: 3. 1 2016.] <http://www.smithersrapra.com/>.
40. PLASTICS, POLYMERS & RESINS. *DuPont*. [Online] 2016. [Citace: 3. 1 2016.] <http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers-resins.html>.
41. PolymerPlace.com. *Polymerplace*. [Online] 2000. [Citace: 17. 9 2015.] <http://www.polymerplace.com/>.
42. Plastics Technology. *Plastics Technology Online*. [Online] 2016. [Citace: 3. 1 2016.] <http://www.ptonline.com/>.
43. Material Data Center. *Material Data Center*. [Online] 2016. [Citace: 3. 1 2016.] <http://www.materialdatacenter.com/mb/>.
44. SPE. *Society of Plastics Engineers*. [Online] 2016. [Citace: 3. 1 2016.] <http://www.4spe.org/>.
45. Materio. *Materio*. [Online] 2015. [Citace: 17. 9 2015.] <http://www.materio.cz/>.
46. Granta Material Intelligence. *Granta Design*. [Online] 2012. [Citace: 21. 5 2012.] <http://www.grantadesign.com/>.
47. *CES EduPack 2013 Version 12.2.13*. [DVD] Cambridge : Granta Design Limited, Granta Design Limited, 2013. 12, 2, 13, 0.
48. **SHANLEY, F. R.** *Weight-Strength Analysis of Aircraft Structures*. místo neznámé : Dover Publications, 1960. 199.

49. AluMatter. *Matter*. [Online] The European Aluminium Association and MATTER, 2001. [Citace: 13. 8 2015.]  
<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=60&pageid=2144416148>.
50. Steel Reynolds 531. *Reynolds Technology Limited*. [Online] 2016. [Citace: 3. 1 2016.]  
<http://www.reynoldstechnology.biz/materials/steel/s-531/>.
51. **ASHBY, M. F.** Materials, bicycles, and design. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2 1995. Volume 26, Issue 1 , pp 1101-1108 .
52. Reynolds Steel 953. *Reynolds Technology Limited*. [Online] 2016. [Citace: 3. 1 2016.]  
<http://www.reynoldstechnology.biz/materials/steel/s-953/>.
53. *Materials and Sustainable Development*. **MAZÍNOVÁ, Ivana a BOCHINSKY, Michal**. Cham-Switzerland : Czech Technical University of Prague, 2015, The Latest Methods of Construction Design. DOI 10.1007/978-3-319-22762-7. ISBN: 978-3-319-22761-0.
54. **TICHÁ, Ludmila a CIVÍNOVÁ, Zdeňka**. Jak psát vysokoškolské závěrečné práce. *Ústřední knihovna ČVUT*. [Online] 2010. [Citace: 22. 9 2014.]  
[http://knihovna.cvut.cz//administrace/upload\\_dir/files/d5b6884ca8b911463d5dd2d14ee0ed75e0d1fd7d.pdf](http://knihovna.cvut.cz//administrace/upload_dir/files/d5b6884ca8b911463d5dd2d14ee0ed75e0d1fd7d.pdf).
55. **ASHBY, Michael F.** *Materials and Process Selection Charts*. [CD] Cambridge UK : Granta Design Limited, 2009.

## Seznam publikovaných prací

- [1] MAZÍNOVÁ, I. Optimalizace výběru vhodného konstrukčního materiálu. In *Zborník referátov*. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2010. s. 185-190. ISBN: 978-80-970-294-1-8
- [2] NETOLICKÝ, P., MAZÍNOVÁ, I. Plánování kvality produktu v předvýrobní etapě. In *Strojírenská technologie Plzeň 2011*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 24-24. ISBN: 978-80-7043-934-0
- [3] MAZÍNOVÁ, I., DVOŘÁK, J. Eco-Aspects of Material Selection. In *53rd International Conference of Machine Design Departments*. Brno: VUT Brno, 2012. s. 171-178. ISBN: 978-80-214-4533-8
- [4] MAZÍNOVÁ, I., BOCHINSKY, M. Materials and Sustainable Development. In *The Latest Methods of Construction Design*. Cham Switzerland: Czech Technical University of Prague, 2016. s. 377-382. ISBN: 978-3-319-22761-0
- [5] MAZÍNOVÁ, I. Výzkum metodiky návrhu vhodných konstrukčních materiálů s využitím teorie vlastností. In *50. Medzinárodná vedecká konferencia katedier častí a mechanizmov strojov*. Žilina: Žilinská univerzita, 2009. s. 1-7. ISBN: 978-80-554-0081-5
- [6] MAZÍNOVÁ, I., FLORIAN, P. Materials Selection in Mechanical Design. In *ICMD 2013*. Liberec: TU Liberec, 2013. s. 123-130. ISBN: 978-80-7372-986-8
- [7] MAZÍNOVÁ, I. DESIGNERS AND SUSTAINABILITY. *Design of Machines and Structures*, 2015, roč. 5, č. 1, s. 47-52. ISSN: 1785-6892
- [8] MAZÍNOVÁ, I., NETOLICKÝ, P. Vazba mezi tolerancemi na výrobním výkrese a zajištěním kvality. In *Sborník referátů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. s. 153-158. ISBN: 978-80-248-2450-5
- [9] MAZÍNOVÁ, I., BOCHINSKY, M. Materials and Sustainable Development. In *55 th International Conference of Machine Design Departments*. Praha: 2014. s. 335-340. ISBN: 978-80-01-05542-7
- [10] MAZÍNOVÁ, I., KRÁTKÝ, J. Databáze materiálů firmy GRANTA DESIGN. In *49. Mezinárodní konference kateder častí a mechanismů strojů*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2008. s. 171-174. ISBN: 978-80-7043-718-6
- [11] MAZÍNOVÁ, I., DUCHEK, P. *Teaching Experience using CES EduPack for Education of Bachelor and Master Degree Students of Faculty of Mechanical Engineering, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic*. Cambridge, 2011.
- [12] MAZÍNOVÁ, I. Geometrical Product Specifications - Do We Know What We Prescribe?. In *Book of Proceedings of 56th International Conference of Machine Design Departments*. Nitra: Slovak University of Agriculture in Nitra, 2015. s. 205-212. ISBN: 978-80-552-1377-4
- [13] Hosnedl, S., Vaněk, V., Barták, J., Borusíková, I., Mazínová, I., Círek, M., Hlaváč, J., Krónerová, E., Šindelářová, J., Štádl, C. AEDS 2004 Workshop. Plzeň, 11.11.2004 - 12.11.2004.

- [14] MAZÍNOVÁ, I., KRÁTKÝ, J. Analysis of flanged connection from a view point of tightening torque and the number of bolts. In *PhD 2005*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. s. 1-10. ISBN: 80-7043-414-7
- [15] MAZÍNOVÁ, I., KRÁTKÝ, J. Životnost táhla upínací jednotky. In *45. mezinárodní konference Kateder částí a mechanismů strojů*. Brno: Vysoké učení technické, 2004. s. 62-65. ISBN: 80-214-2702-7
- [16] MAZÍNOVÁ, I., KRÁTKÝ, J. Analýza otočného hrotu stroje na obrábění rotačních součástí. In *47. Mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2006. s. 177-180. ISBN: 80-213-1523-7
- [17] NETOLICKÝ, P., MAZÍNOVÁ, I. Plánování kvality v předvýrobních etapách a vzdělávání. *MM Průmyslové spektrum*, 2011, roč. 2011, č. 6, s. 86-87. ISSN: 1212-2572
- [18] KRÁTKÝ, J., MAZÍNOVÁ, I. Aplikace konstrukční nauky při řešení semestrálních projektů v konstrukčních oborech. In *Sborník mezinárodní XLVI. konference kateder částí a mechanismů strojů*. Liberec: Technická univerzita, 2005. s. 178-181. ISBN: 80-7083-951-1
- [19] MAZÍNOVÁ, I., KRÁTKÝ, J. Analysis of plate springs of hydrostatic rest clamp unit. In *PhD 2004*. Plzeň: University of West Bohemia, 2004. s. 1-7. ISBN: 80-7043-330-2
- [20] MAZÍNOVÁ, I., KRÁTKÝ, J. Problematika kompozitních materiálů v konstrukci strojů. In *48. Medzinárodná konferencia katedier častí strojov a mechanizmov 2007*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2007. s. 191-198. ISBN: 978-80-227-2708-2
- [21] MAZÍNOVÁ, I. Výzkum metodiky návrhu vhodných konstrukčních materiálů s využitím teorie vlastností. In *50. Medzinárodná vedecká konferencia katedier častí a mechanizmov strojov*. Žilina: Žilinská univerzita, 2009. s. 23. ISBN: 978-80-554-0080-8
- [22] MAZÍNOVÁ, I., FLORIAN, P. Materials Selection in Mechanical Design. In *Modern Methods of Construction Design, Proceedings of ICMD 2013*. Cham Switzerland: Technical University of Liberec, 2014. s. 145-153. ISBN: 978-3-319-05202-1, ISSN: 2195-4356

## **Příloha – Materiálové a procesní mapy (54)**

# Obsah

## 1. Mapy materiálových vlastností

Mapa 1	Modul pružnosti v tahu/Hustota
Mapa 2	Napětí při mezním stavu/Hustota
Mapa 3	Modul pružnosti v tahu / Napětí při mezním stavu
Mapa 4	Měrný modul pružnosti v tahu /Měrná pevnost
Mapa 5	Lomová houževnatost/Modul pružnosti v tahu
Mapa 6	Lomová houževnatost/ Mez pevnosti
Mapa 7	Koeficient tlumení/Modul pružnosti v tahu
Mapa 8	Součinitel tepelné vodivosti/Elektrický odpor
Mapa 9	Součinitel tepelné vodivosti /Součinitel teplotní vodivosti
Mapa 10	Součinitel tepelné roztažnosti/ Součinitel tepelné vodivosti
Mapa 11	Součinitel tepelné roztažnosti/Modul pružnosti v tahu
Mapa 12	Mez pevnosti/Maximální provozní teplota
Mapa 13	Součinitel tření
Mapa 14	Součinitel opotřebení/Tvrdost
Mapa 15a,b	Přibližná cena materiálu
Mapa 16	Modul pružnosti v tahu/Poměrné náklady
Mapa 17	Mez pevnosti/Poměrné náklady
Mapa 18a,b	Potřebná energie na výrobu jednotky materiálu
Mapa 19	Modul pružnosti v tahu/ Potřebné energie na výrobu jednotky m.
Mapa 20	Mez pevnosti/ Potřebné energie na výrobu jednotky materiálu

## 2. Mapy procesních atributů

Mapa P1	Materiál – Matice kompatibility procesu
Mapa P2	Proces – Matice tvarové kompatibility
Mapa P3	Proces/Hmotnost
Mapa P4	Proces/Tloušťka průřezu
Mapa P5	Proces/Rozměrové tolerance
Mapa P6	Proces/Drsnost povrchu
Mapa P7	Proces/Ekonomická velikost dávky

## **Dodatek: indexy materiálu**

Tabulka 1	Konstruování na danou tuhost při minimální hmotnosti (nákladech)
Tabulka 2	Konstruování na danou pevnost při minimální hmotnosti (nákladech)
Tabulka 3	Konstruování na danou pevnost pro maximální výkon
Tabulka 4	Konstruování s ohledem na kmitání
Tabulka 5	Konstruování s dovoleným poškozením
Tabulka 6	Tepelné a tepelně-mechanické konstruování
Tabulka 7	Elektro-mechanické konstruování



## **1. Mapy materiálových vlastností**

Mapy v této příloze shrnují materiálové a procesní vlastnosti. Každá mapa je na samostatné stránce se stručným komentářem ohledně jejího použití. Více informací je k nalezení v knize „Materials Selection in Mechanical Design“ (2).

Materiálové mapy zobrazují oblasti vlastností, které zabírají jednotlivé skupiny materiálů.

## Mapa 1: Modul pružnosti v tahu $E$ a hustota $\rho$

Tato mapa pomáhá při výběru materiálů pro lehké, tuhé komponenty. Rozsah modulu pružnosti je  $10^7$  GPa a rozpětí hustoty je  $3000 \text{ t/m}^3$ . Rovnoběžné přímky ukazují rychlost podélné vlny v m/s; vlastní frekvence jsou přímo úměrné těmto hodnotám. Různoběžné přímky (guidelines) ukazují body, pro které platí:

$$\frac{E}{\rho} = C \quad (\text{tuhé pruty s minimální hmotností, minimální průhyby při zatížení odstředivými silami})$$

$$E^{1/2}/\rho = C \quad (\text{tuhé nosníky, hřídele a sloupky s minimální hmotností})$$

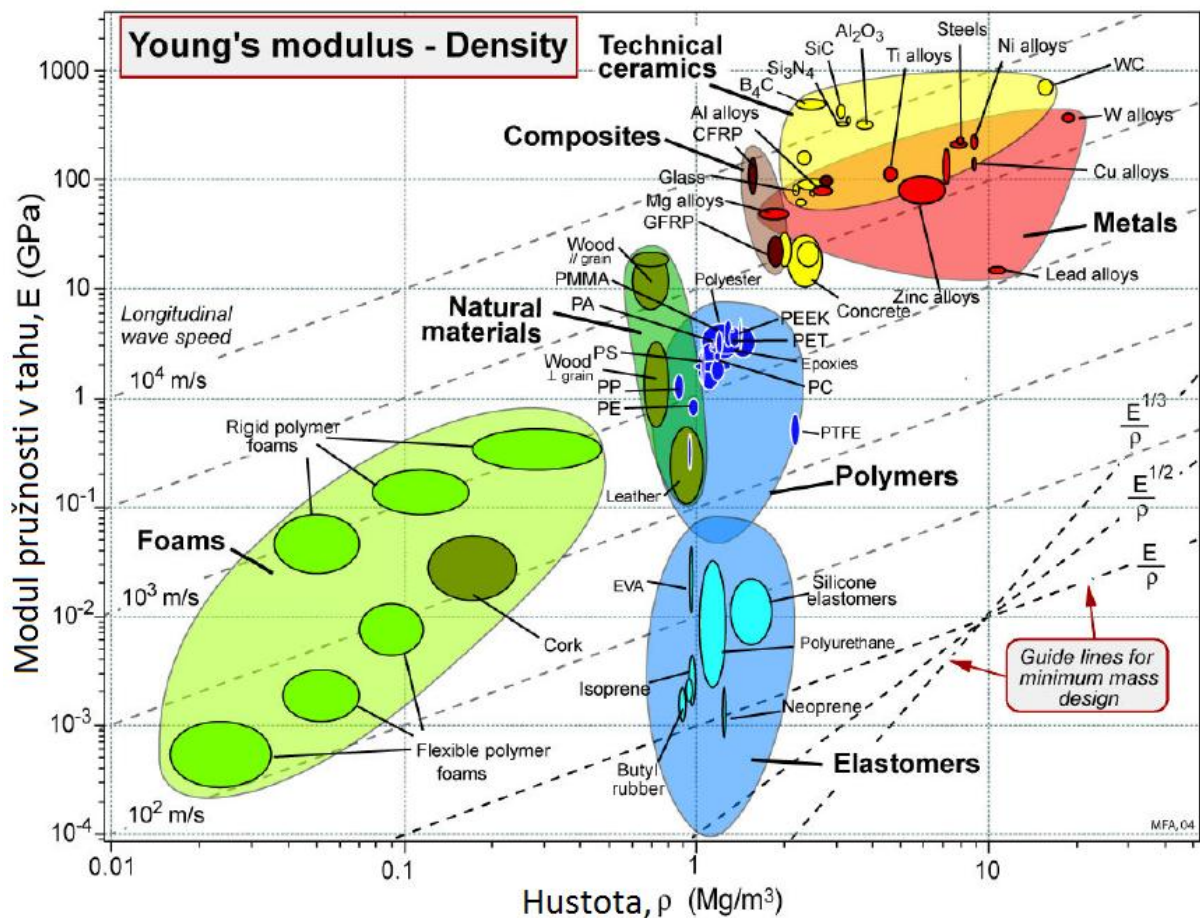
$$E^{1/3}/\rho = C \quad (\text{tuhé desky s minimální hmotností})$$

Hodnoty konstanty  $C$  vzrůstají, čím více jsou přímky vlevo nahoře; materiály s největším poměrem tuhosti k hmotnosti leží blízko levého horního rohu. Ostatní moduly pružnosti lze přibližně určit pomocí  $E$ :

$$\nu = 1/3; \quad G = \frac{3}{8}E; \quad K \approx E \quad (\text{kovy, keramika, skla a skelné polymery})$$

$$\text{nebo } \nu = 0,5; \quad G \approx E/3; \quad K \approx 10E \quad (\text{elastomery, gumové polymery}),$$

kde  $\nu$  je Poissonovo číslo,  $G$  modul pružnosti ve smyku a  $K$  je součinitel objemové stlačitelnosti.



## Mapa 2: Napětí při mezním stavu $\sigma_f$ a hustota $\rho$

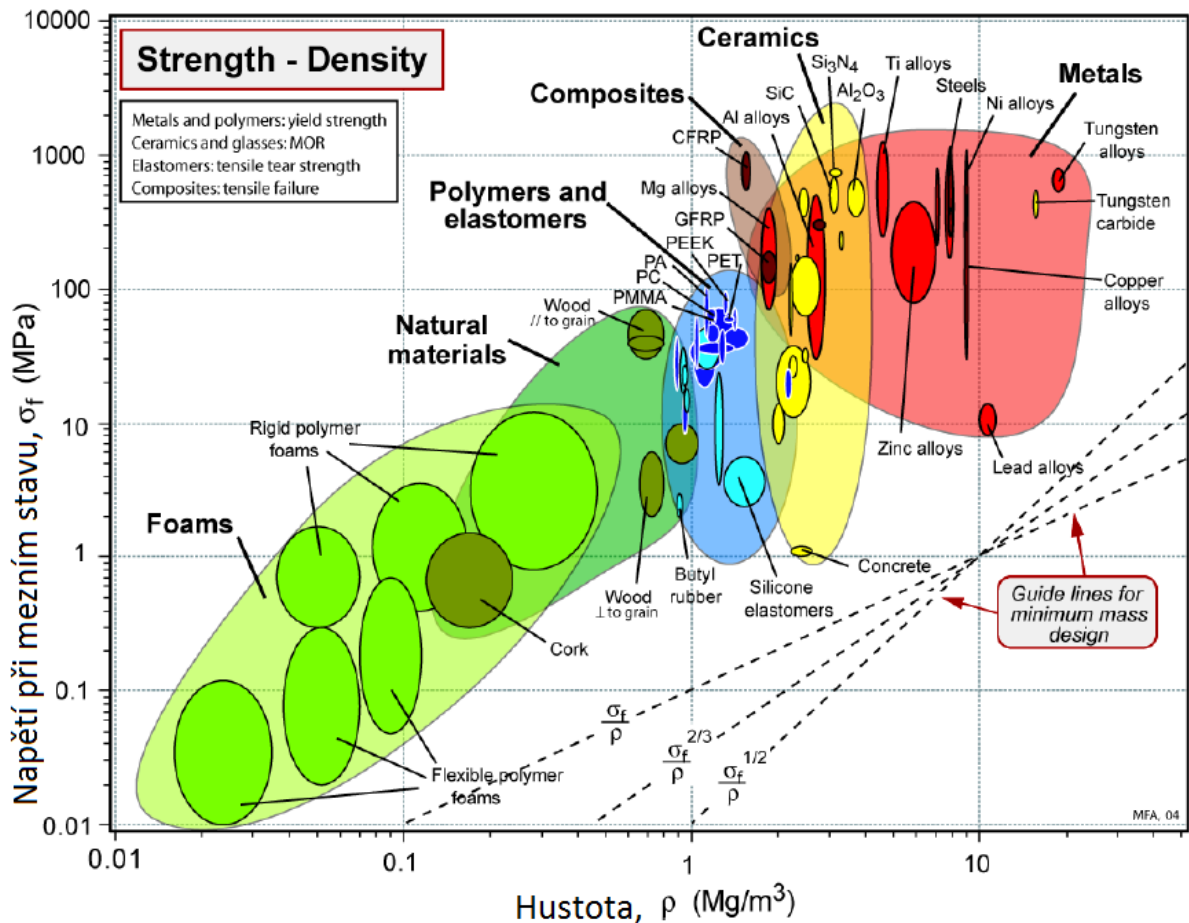
Tato mapa je vhodná pro návrh lehkých, pevných struktur. Napětí při mezním stavu pro kovy je napětí, které způsobí 0,2% plastických deformací. Pro polymery je to hodnota napětí, při kterém se závislost napětí na poměrné deformaci stává výrazně nelineární, typicky při hodnotě 1% trvalé deformace. Pro keramiku a skla je to hodnota tlakového napětí, při které dojde k rozdrčení; pamatujte, že tato hodnota je asi 15 krát vyšší než pevnost v tahu. Pro kompozity je rovna mezi pevnosti v tahu. Pro elastomery je to hodnota napětí při roztržení. Tato mapa pomáhá při výběru materiálu pro lehké a pevné komponenty. Různoběžné přímky ukazují body, pro které platí:

$$\sigma_f / \rho = C \quad (\text{pevné pruty s minimální hmotností, maximální úhlová rychlost rotujících kotoučů})$$

$$\sigma_f^{2/3} / \rho = C \quad (\text{pevné nosníky a hřídele s minimální hmotností})$$

$$\sigma_f^{1/2} / \rho = C \quad (\text{pevné desky s minimální hmotností})$$

Hodnoty konstanty  $C$  vzrůstají, čím více jsou přímky vlevo nahoře; materiály s největším poměrem napětí při mezním stavu k hmotnosti leží blízko levého horního rohu.



### Mapa 3: Modul pružnosti v tahu $E$ a napětí při mezním stavu $\sigma_f$

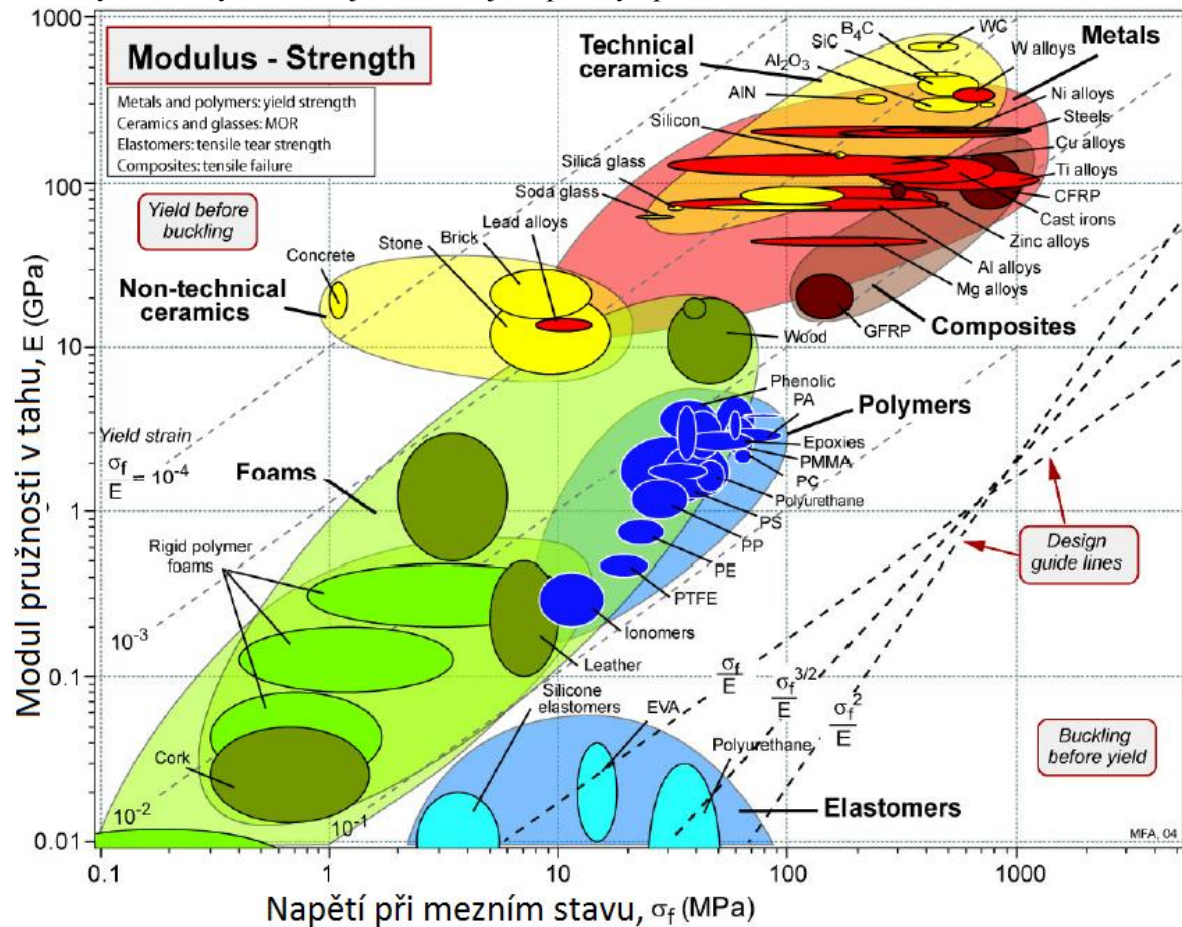
Mapa pro konstruování s ohledem na elastickou deformaci. Tato mapa je vhodná pro návrh lehkých, pevných struktur. Napětí při mezním stavu pro kovy je napětí, které způsobí 0,2% plastických deformací. Pro polymery je to hodnota napětí, při kterém se závislost napětí na poměrné deformaci stává výrazně nelineární, typicky při hodnotě 1% trvalé deformace. Pro keramiku a skla je to hodnota tlakového napětí, při které dojde k rozdrčení; pamatujte, že tato hodnota je asi 15 hrát vyšší než pevnost v tahu. Pro kompozity je rovna mezi pevnosti v tahu. Pro elastomery je to hodnota napětí při roztržení. Tato mapa nabízí mnohá využití: výběr materiálů pro pružiny, elastické panty, čepy a pružná ložiska. Je také možné vybrat materiály pro tlakově namáhané komponenty tak, aby nedocházelo ke vzpěru. Rovnoběžné přímky zobrazují hodnotu poměrné deformace při mezním stavu  $\sigma_f/E$ . Různoběžné přímky tří hodnoty těchto parametrů, pro které platí:

$$\sigma_f/E = C \quad (\text{pružné panty})$$

$$\sigma_f^2/E = C \quad (\text{pružiny, akumulátory mechanické energie})$$

$$\sigma_f^{3/2}/E = C \quad (\text{elastické prvky, ostří nožů, elastické membrány, těsnění})$$

Hodnoty konstanty  $C$  vzrůstají, čím více jsou přímky vpravo dole.





## Mapa 4: Měrný modul pružnosti v tahu $E/\rho$ a měrné napětí při mezním

stavu  $\sigma_f/\rho$

Mapa pro měrnou tuhost a pevnost. Rovnoběžné přímky udávají hodnoty poměrné deformace při mezním stavu. Východiska z map 2 a 4 zde také platí. Tato mapa najde uplatnění při návrhu prutů a pružin s minimální hmotností a při návrhu rotujících součástí k dosažení maximálních úhlových rychlostí a akumulace kinetické energie. Různoběžné přímky ukazují body, pro které platí:

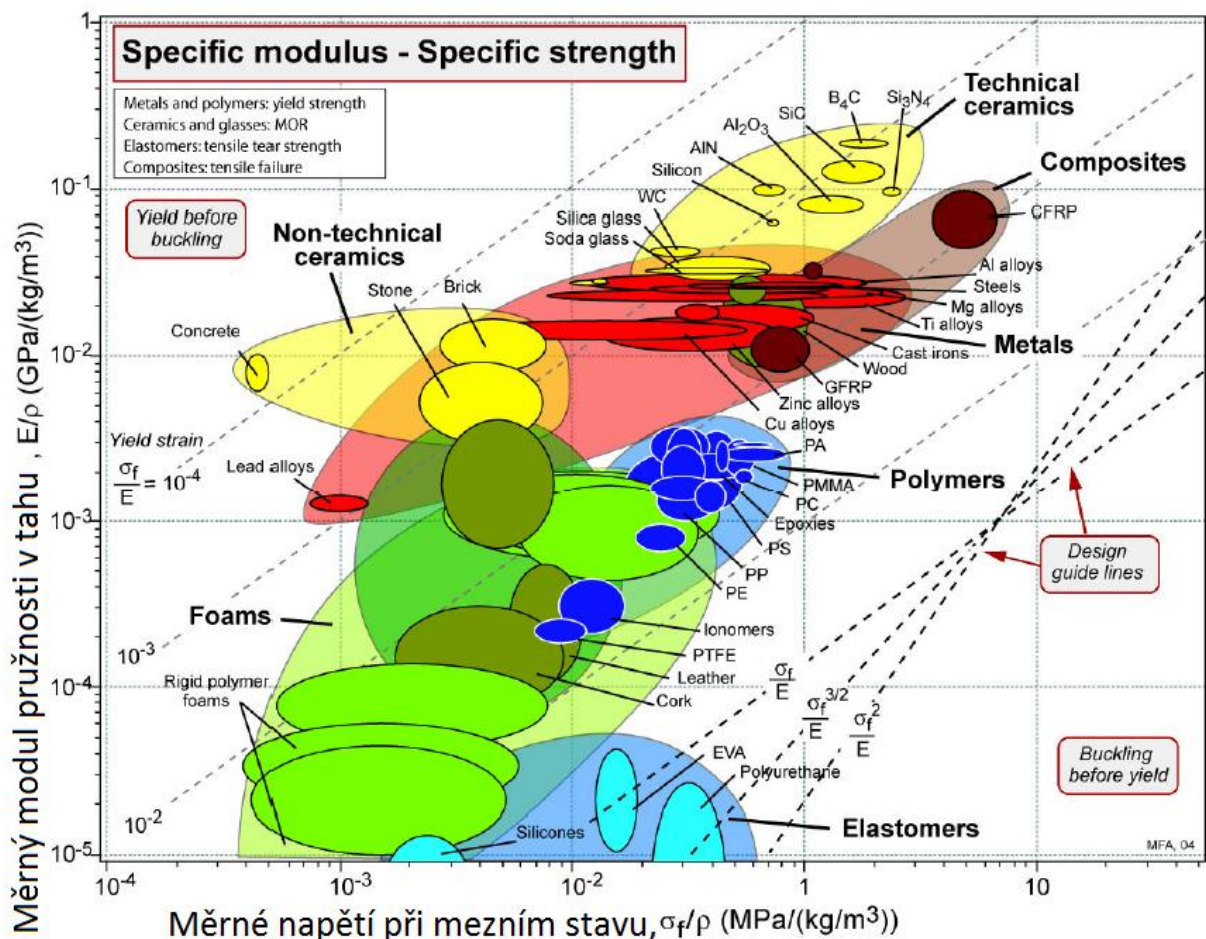
$$\frac{\sigma_f^2}{E\rho} = C \quad (\text{pruty, pružiny s minimální hmotností, rotující kotouče}$$

s maximální úhlovou rychlostí)

$$\frac{\sigma_f^{2/3}}{E\rho^{1/2}} = C$$

$$\frac{\sigma_f}{E} = C \quad (\text{elastické panty})$$

Hodnoty konstanty C vzrůstají, čím více jsou přímky vpravo dole.



## Mapa 5: Lomová houževnatost $K_{Ic}$ a modul pružnosti v tahu $E$

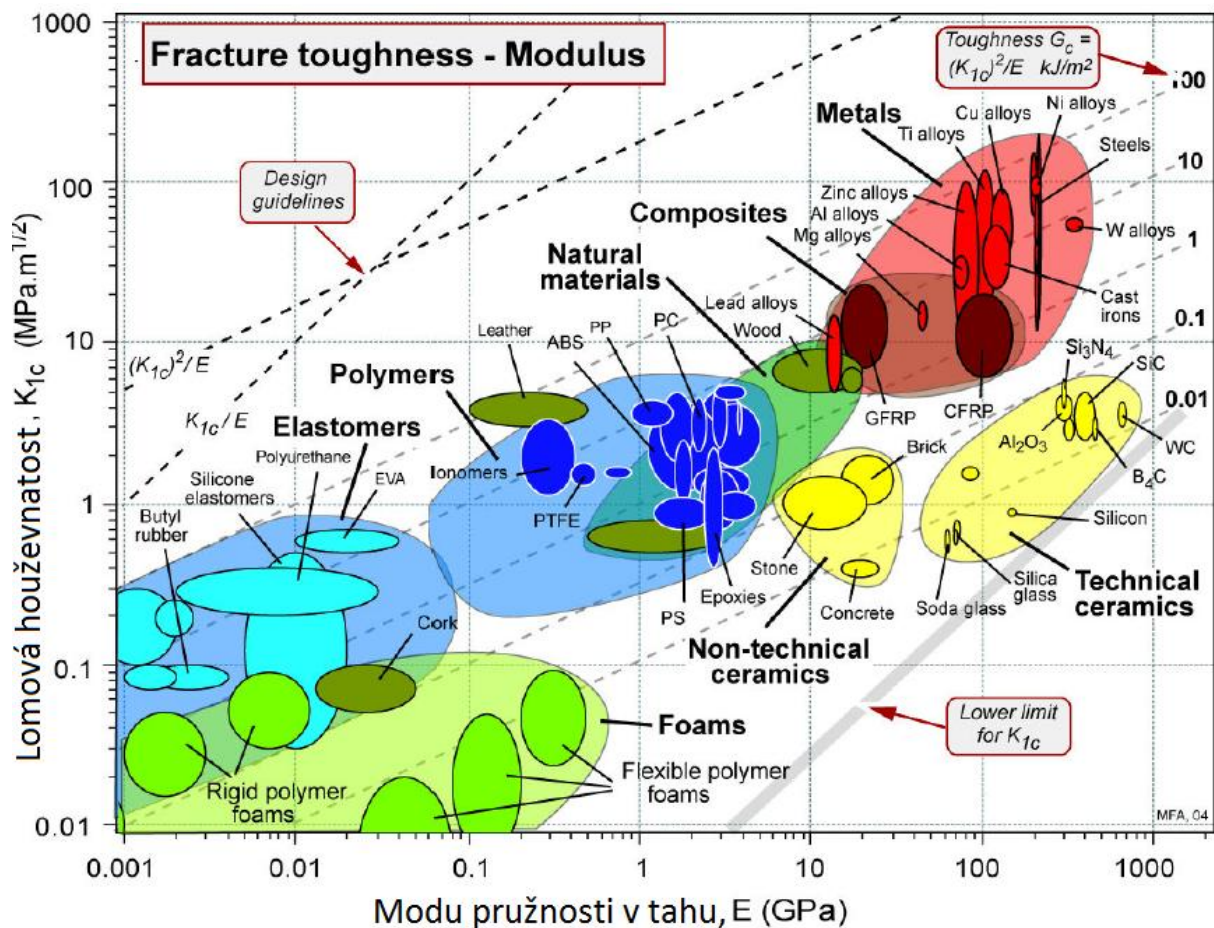
Tato mapa zobrazuje lomovou houževnatost  $K_{Ic}$  a také houževnatost  $G_{Ic} \approx K_{Ic}^2/E$

Umožňuje srovnávat kritéria pro napětí a pro mezní stav daný hodnotou posunutí. ( $K_{Ic}$  a  $K_{Ic}/E$ )  
Různoběžné přímky zobrazují body, pro které platí:

$$K_{Ic}^2/E = C \quad (\text{přímky o konstantní houževnatosti})$$

$$K_{Ic}/E = C \quad (\text{pokud chceme křehký lom způsobený hodnotou posunutí})$$

Hodnoty konstanty  $C$  vzrůstají, čím více jsou přímky vlevo nahoře. Houževnaté materiály leží blízko levého horního rohu, křehké materiály jsou vpravo dole.



## Mapa 6: Lomová houževnatost $K_{Ic}$ a napětí při mezním stavu $\sigma_f$

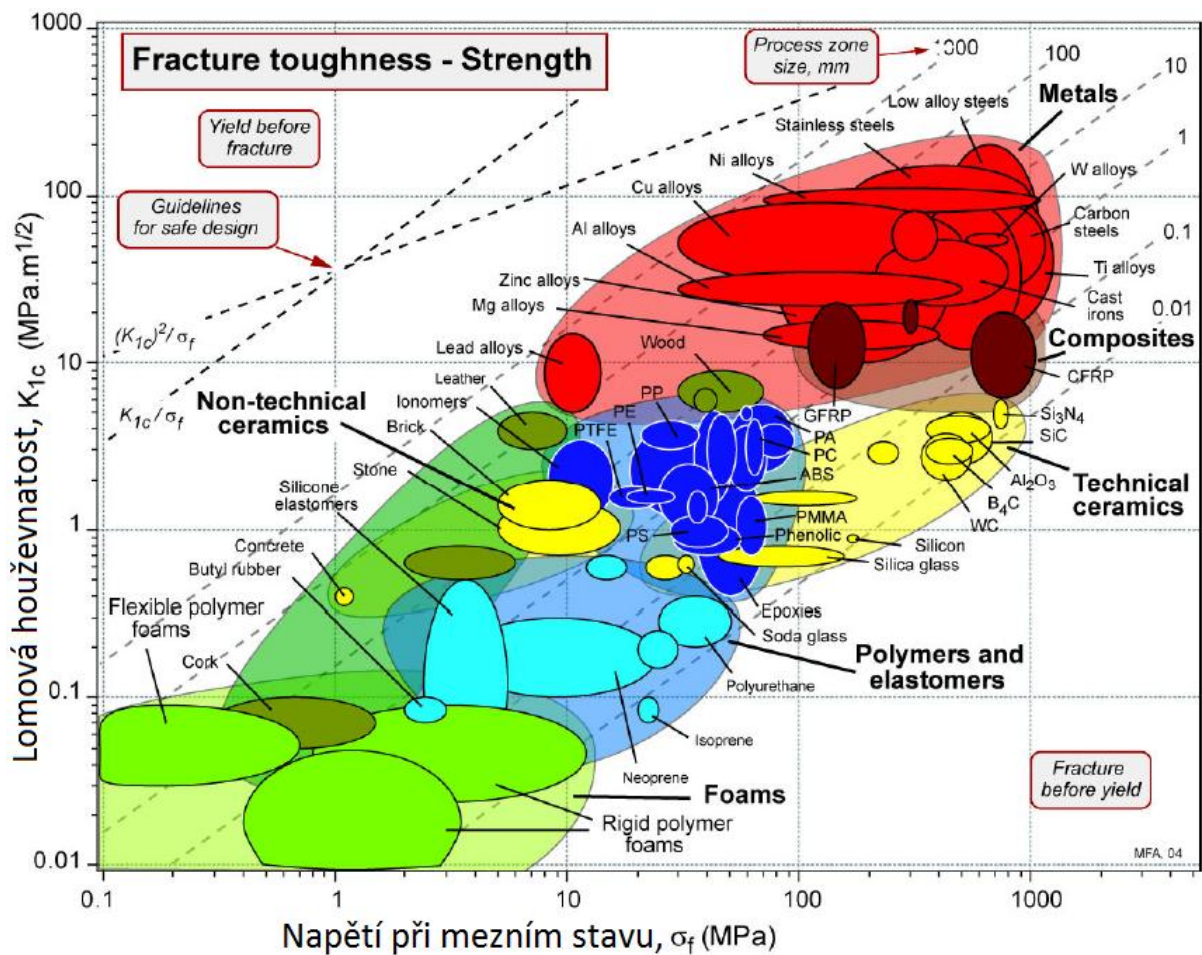
Tato mapa je vhodná pro návrh součástí tak, aby nedocházelo k lomu. Rovnoběžné přímky udávají průměr lomové plochy, které je přibližně rovna  $K_{Ic}^2 / \pi \sigma_f^2$ . Východiska z map 2 a 3 zde také platí.

Mapa rovněž pomáhá vybrat materiály, které vykazují výraznou plastickou deformaci před samotným lomem. Také je vhodná pro hodnocení plasticky deformovaných nebo lomových ploch a pro návrh vzorků pro testování lomové houževnatosti. Různoběžné přímky zobrazují body, pro které platí:

$$K_{Ic} / \sigma_f = C \quad (\text{výrazná plastická deformace před selháním})$$

$$K_{Ic}^2 / \sigma_f = C \quad (\text{tvorba malých trhlin před selháním})$$

Hodnoty konstanty C vzrůstají, čím více jsou přímky vlevo nahoře.



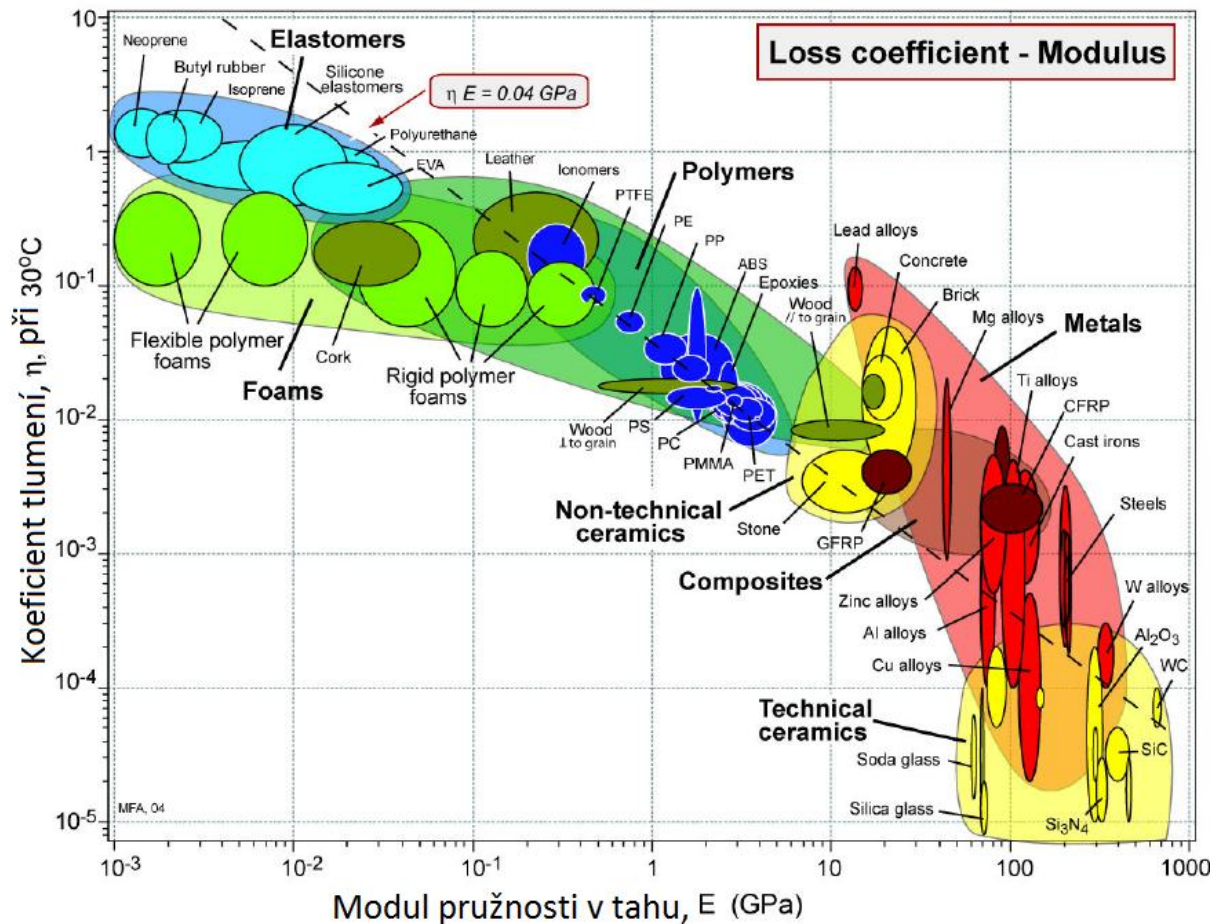


## Mapa 7: Koeficient tlumení $\eta$ a modul pružnosti v tahu $E$

Tato mapa pomáhá při výběru materiálu s nízkou hodnotou vnitřního tlumení (pružiny, vibrační elementy) nebo s vysokou hodnotou vnitřního tlumení (tlumicí prvky). Přímka ukazuje body, pro které platí:

$$\eta E = C \quad (\text{pravidlo palce pro odhadování tlumících schopností polymerů})$$

Hodnoty konstanty  $C$  vzrůstají, čím více jsou přímky vpravo nahoře.





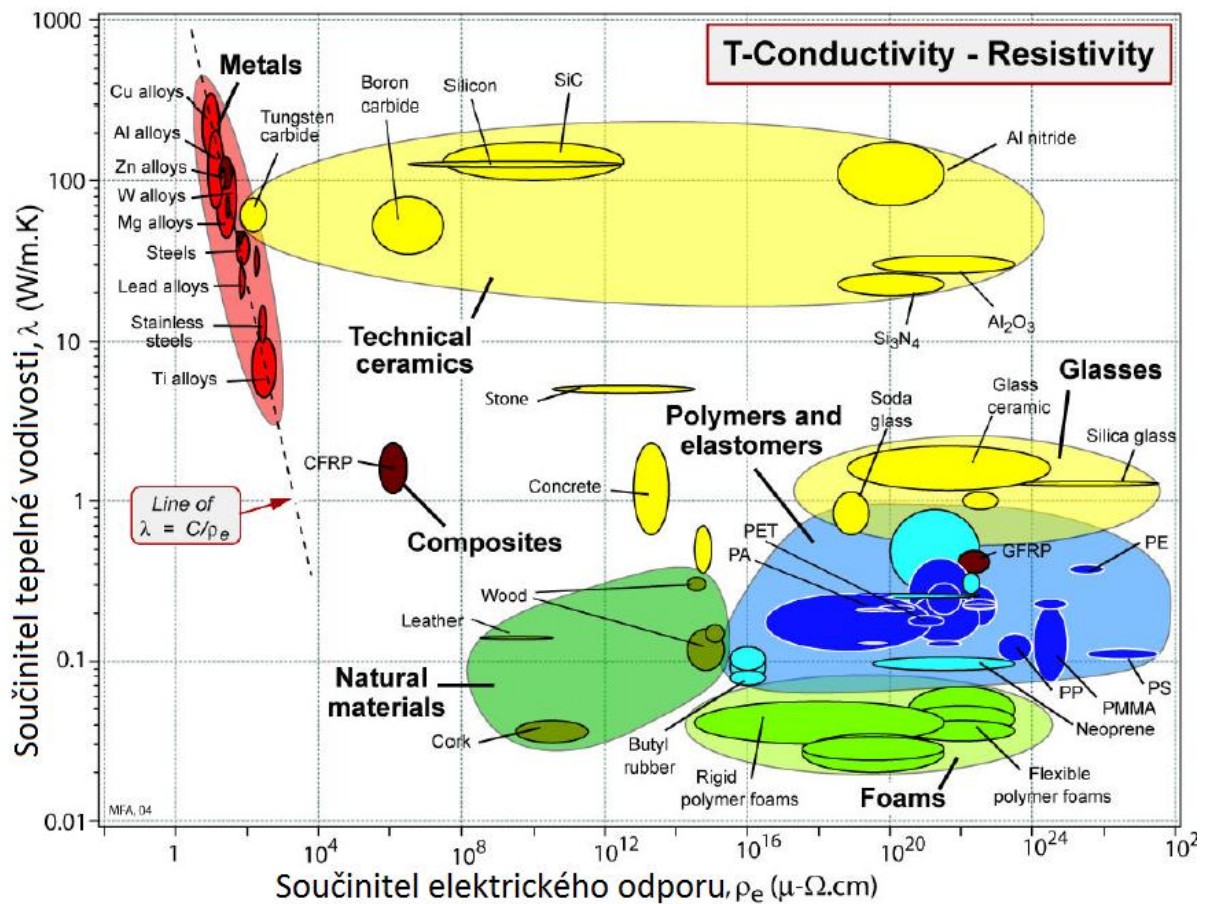
## Mapa 8: Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ a součinitel elektrického odporu

$\rho_e$

Toto je mapa pro zkoumání tepelné a elektrické vodivosti (elektrická vodivost  $\kappa$  je převrácenou hodnotou součinitele elektrického odporu  $\rho_e$ ). Pro kovy platí Widemann-Franzův zákon:

$$\lambda \approx \kappa = \frac{1}{\rho_e}$$

Protože vliv elektroniky dominuje oběma vlastnostem. Ale pro ostatní třídy pevných látek tepelné a elektrické vlastnosti stojí na jiných základech, a tak tento vztah neplatí.



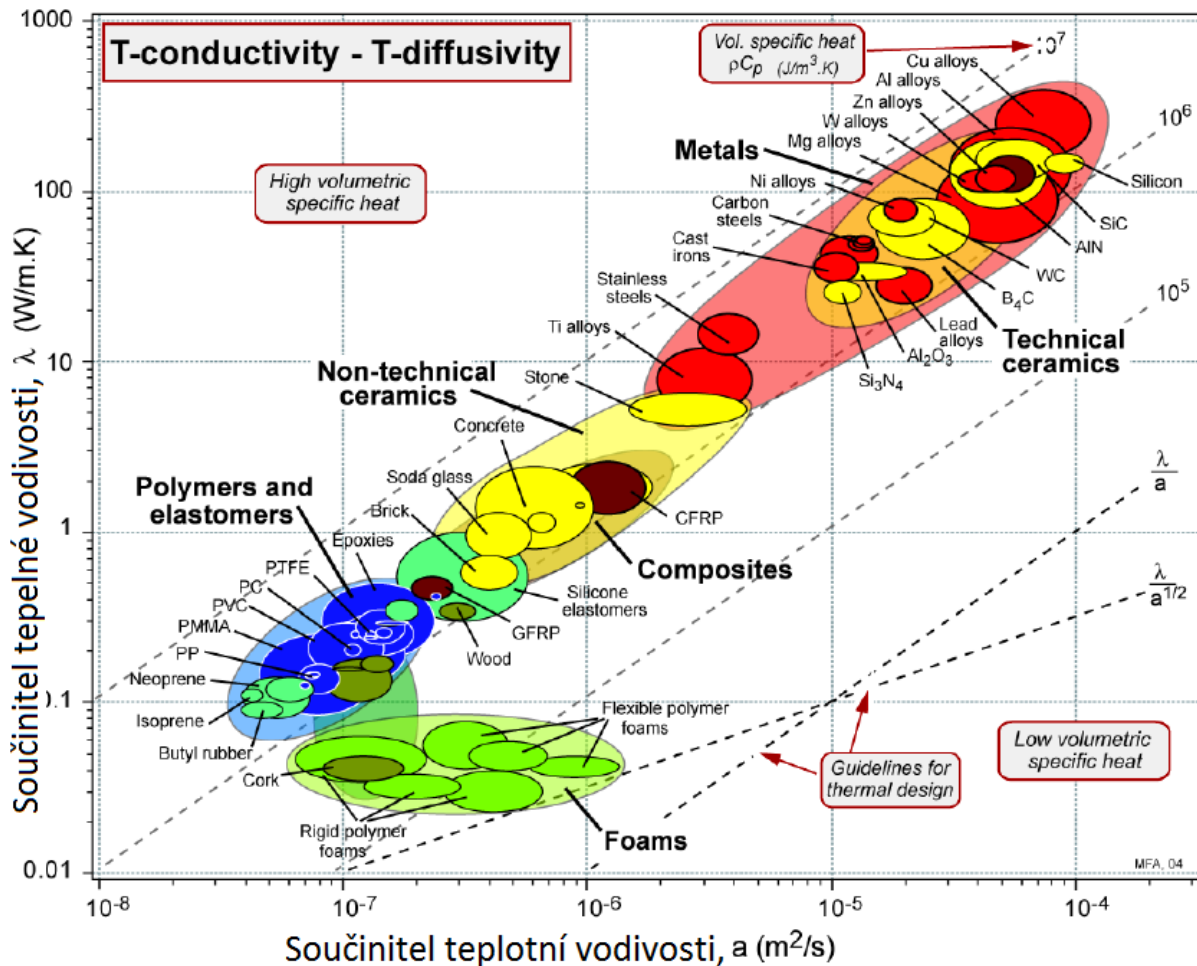
## Mapa 9: Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ a součinitel teplotní vodivosti $\alpha$

Tato mapa pomáhá při výběru materiálů pro tepelné izolace, pro chladiče a podobně; v obou případech, kdy vedení tepla je stacionární, ( $\lambda$ ) a kdy je nestacionární (součinitel teplotní vodivosti  $\alpha = \lambda / \rho C_p$ , kde  $\rho$  je hustota a  $C_p$  izobarické tepelná kapacita). Rovnoběžné přímky ukazují hodnoty objemové tepelné kapacity  $\rho C_p = \lambda / \alpha$  ( $J/m^3K$ ). Různoběžné přímky zobrazují body, pro které platí:

$$\lambda / \alpha = C \quad (\text{konstantní objemová tepelná kapacita})$$

$$\lambda / \alpha^{1/2} = C \quad (\text{efektivní izolace, akumulátor tepelné energie})$$

Hodnoty konstanty  $c$  vzrůstají směrem k levému hornímu rohu.



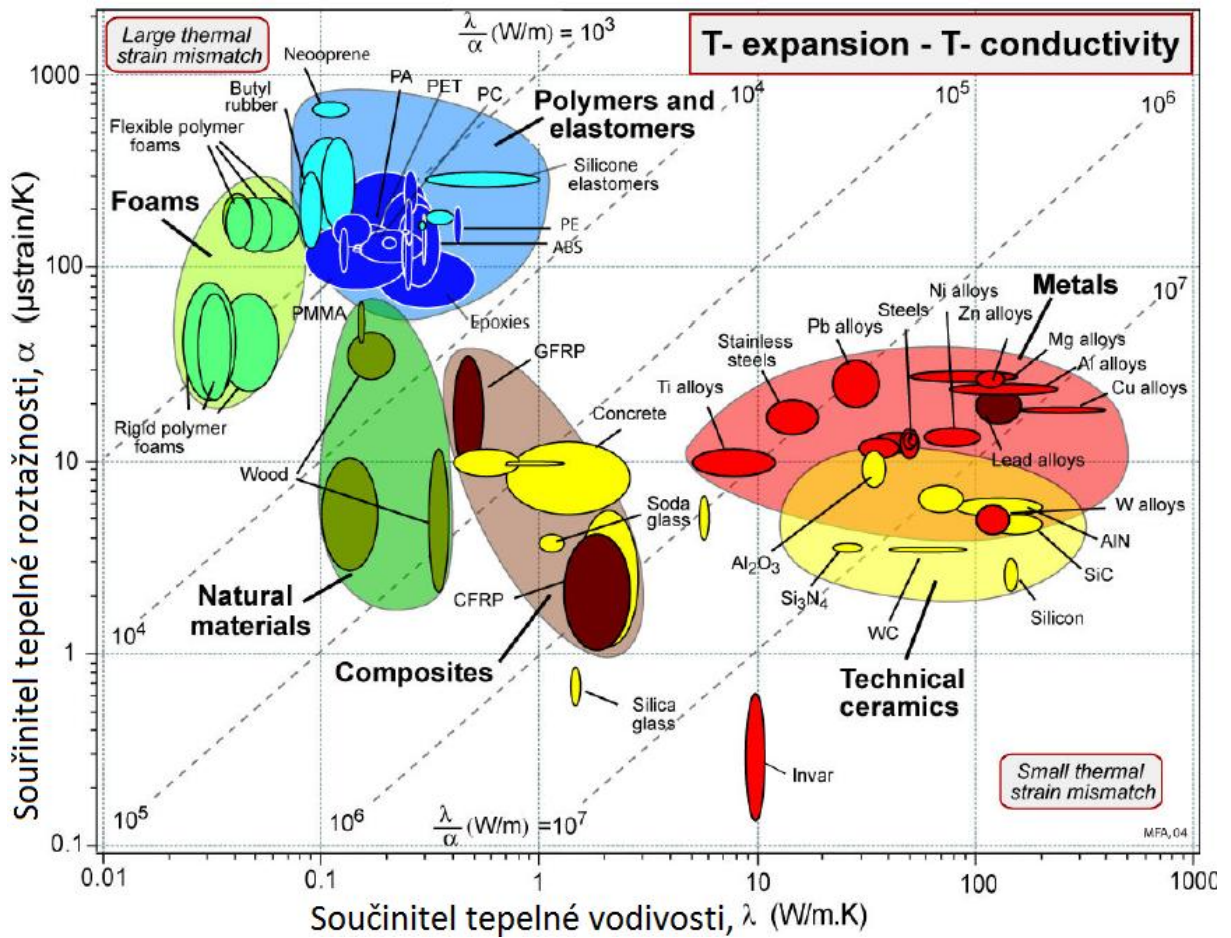
## Mapa 10: Součinitel tepelné roztažnosti $\alpha$ a součinitel tepelné vodivosti $\lambda$

Mapa pro hodnocení tepelných deformací. Rovnoběžné přímky ukazují hodnoty poměru  $\lambda/\alpha$  (W/m).

Materiály s vysokou hodnotou tohoto indikátoru vykazují malé tepelné deformace. Definují přímkou:

$$\lambda/\alpha = C \quad (\text{minimalizace tepelných deformací})$$

Hodnota konstanty C vzrůstá směrem k pravému spodnímu rohu.

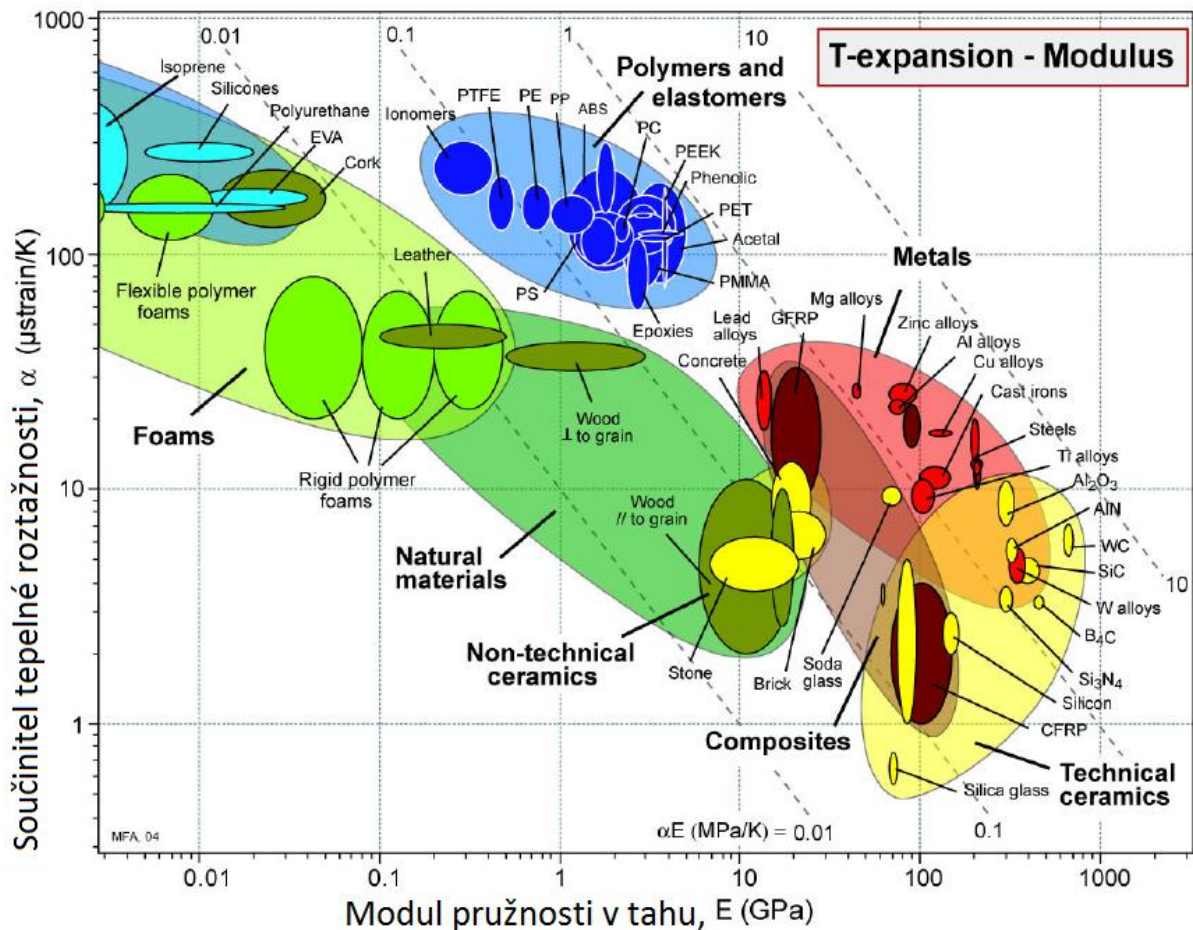


## Mapa 11: Součinitel tepelné roztažnosti $\alpha$ a modul pružnosti v tahu $E$

Tato mapa pomáhá při výběru materiálu pro aplikace, kde vzniká napětí tepelným namáháním. Rovnoběžné přímky udávají napětí ve vzorku vzniklé tepelným namáháním při změně teploty v °C. Definují tak přímku:

$$\alpha E = C \text{ (MPa/K)} \quad (\text{konstantní tepelné napětí za K})$$

Hodnota konstanty  $C$  vzrůstá směrem k pravému hornímu rohu.

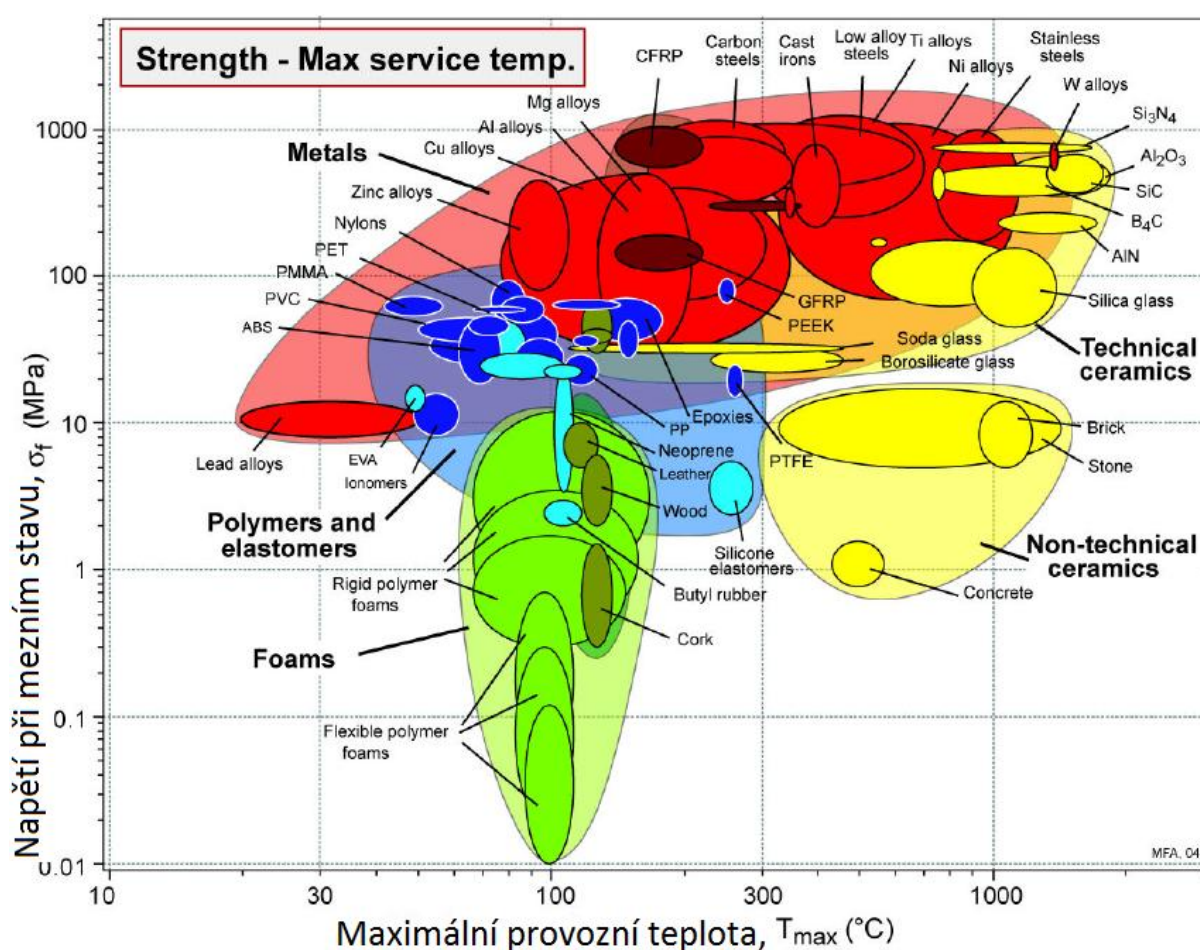




## Mapa 12: Napětí při mezním stavu $\sigma_f$ a maximální provozní teplota

$$T_{max}$$

Teplota ovlivňuje chování materiálu v mnoha ohledech. Se vzrůstající teplotou může dojít k tečení, což omezuje schopnost materiálu přenášet zatížení. Může také degradovat nebo se rozložit, čímž se změní chemická struktura materiálu tak, že se stává nepoužitelným. A může také oxidovat nebo reagovat s vnějším prostředím jiným způsobem do takové míry, že nebude schopen vykonávat svoji funkci. Přibližná hodnota teploty, při které je nebezpečné z jakéhokoliv důvodu materiál používat, se nazývá maximální provozní teplota  $T_{max}$ . V této mapě je znázorněna společně s napětím při mezním stavu  $\sigma_f$ . Tato mapa poskytuje náhled na oblasti napětí a teplot, ve kterých jsou materiály použitelné. Všimněte si, že i ty nejlepší polymery mají malou pevnost nad 200°C; většina kovů značně změkne při 800°C; a pouze keramika poskytuje dostatečnou pevnost nad 1500°C.

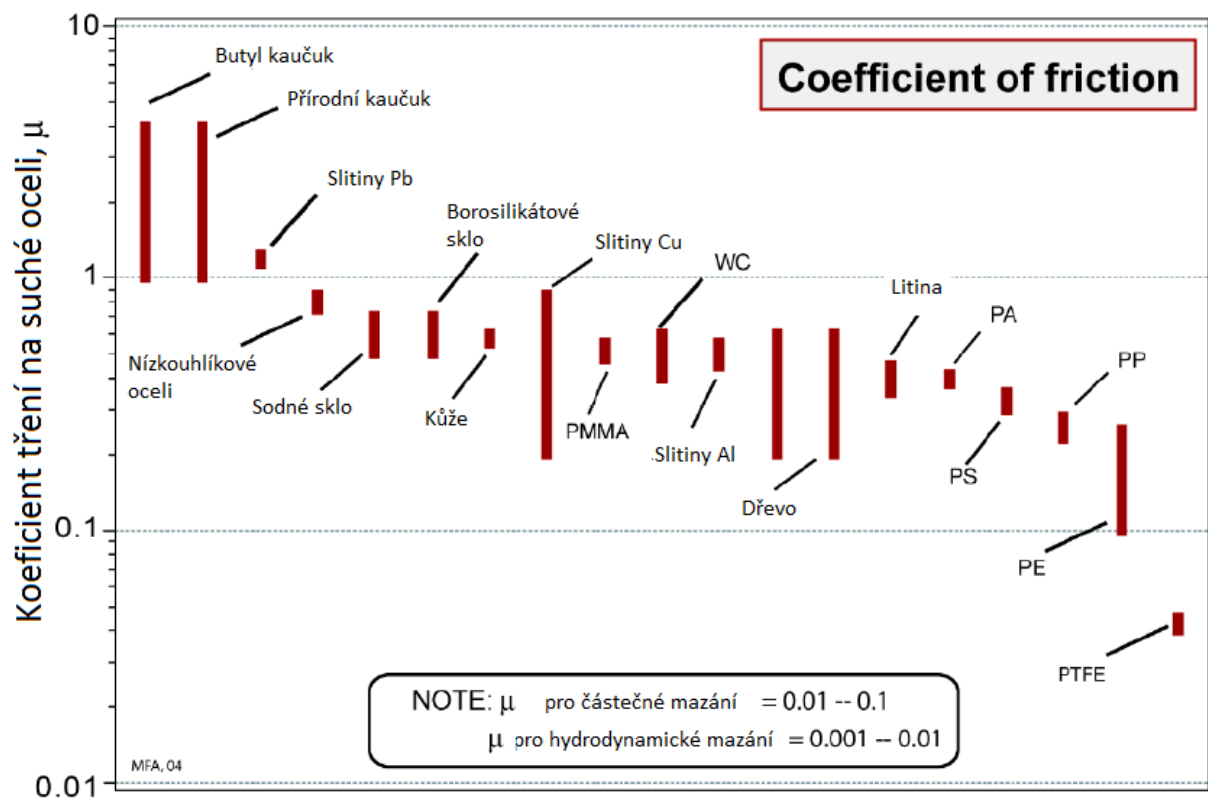


## Mapa 13: Koeficient tření

Jestliže se dvě plochy dotýkají a jsou vystaveny normálové síle  $F_n$ , tak pokud se jedna posunuje přes druhou, vzniká třecí síla  $F_s$ , působící proti směru pohybu. Tato síla je přímo úměrná síle  $F_n$ , ale nezávisí na obsahu ploch – a to je ten nejvýznamnější výsledek studia tření, protože předpokládá, že se plochy nedotýkají v celém povrchu, ale pouze v malých oblastech, jejichž povrch nezávisí na celkové ploše stykových ploch  $A_n$ . Koeficient tření je definován

$$\mu = \frac{F_s}{F_n}$$

Přibližné hodnoty  $\mu$  pro suché nemazané povrchy materiálů klouzající po ocelové podložce jsou uvedeny zde. Většinou je  $\mu \approx 0,5$ . Jisté materiály vykazují mnohem vyšší hodnoty, protože přilnou (měkké kovy bez mazání), nebo protože jeden z materiálů je výrazně poddajnější, takže se tvarem přizpůsobí druhému (guma na hrubém betonu). Druhým extrémem jsou dvojice materiálů s velmi malou hodnotou  $\mu$ , např. PTFE klouzající po leštěné oceli nebo bronzová ložiska s grafitovým mazivem. Zde se koeficient tření pohybuje okolo 0,04, což je pořád vysoká hodnota v porovnání s mazanými povrchy, jak je uvedeno v dolní části diagramu.



## Mapa 14: Součinitel opotřebení $k_a$ a tvrdost $H$

Když se povrchy o sebe třou, dochází k opotřebení. Materiál ubývá z obou ploch, i když je jeden výrazně tvrdší než druhý. Míra opotřebení  $W$  je obvykle definovaná:

$$W = \frac{\text{Objem odebraného materiálu}}{\text{Délka kluzné dráhy}}$$

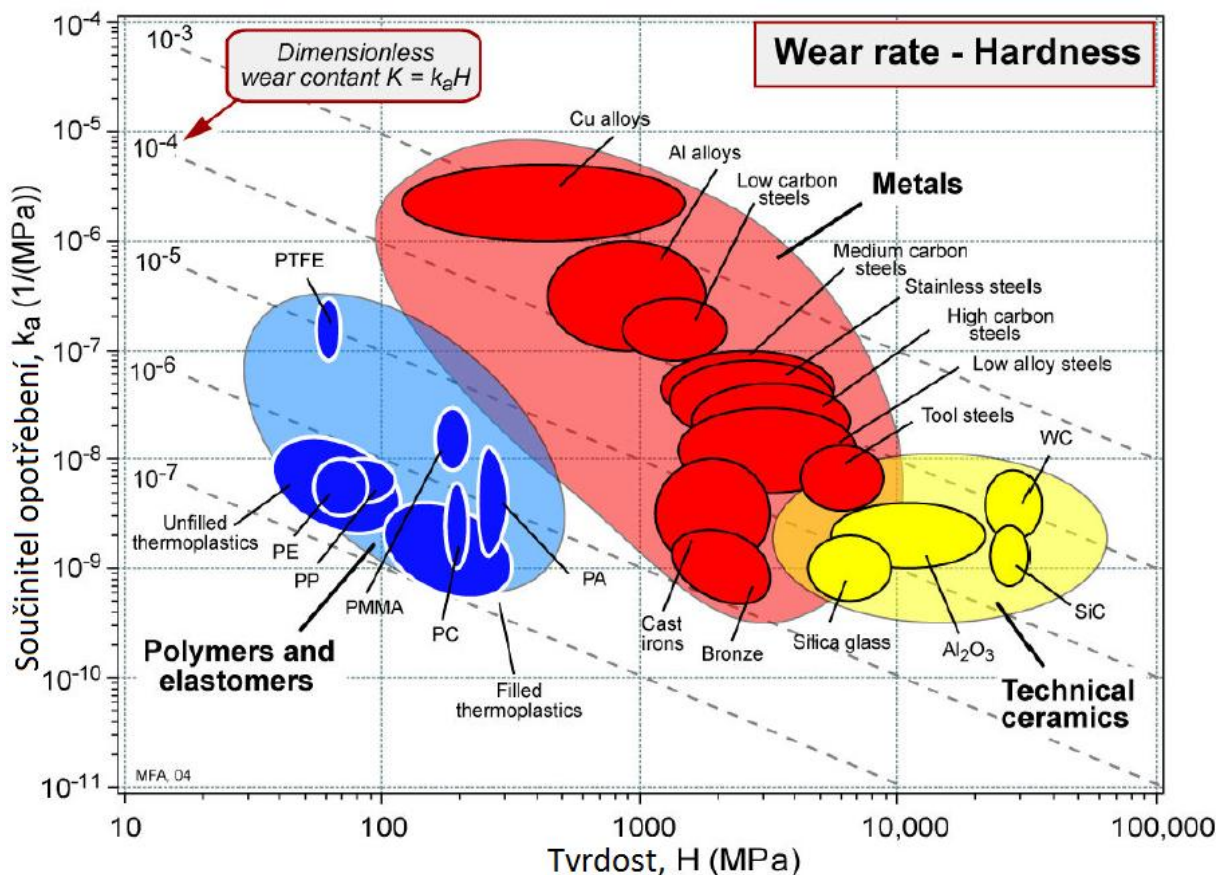
a tedy má jednotky  $\text{m}^2$ . Užitečnější pro naše záměry je měrná míra opotřebení:

$$\Omega = \frac{W}{A_n}$$

což je bezrozměrná veličina. Vzrůstá s kontaktním tlakem  $P$  (normálová síla  $F_n$  vydělená nominální plochou  $A_n$ ) tak, že poměr

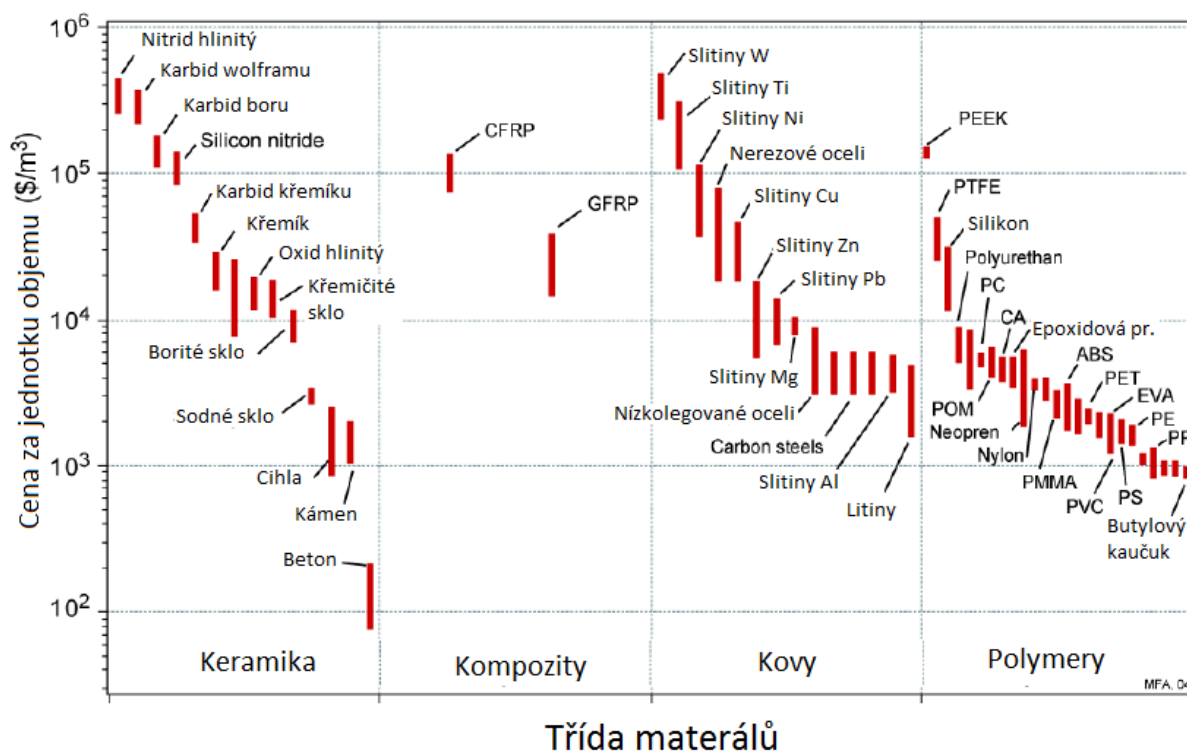
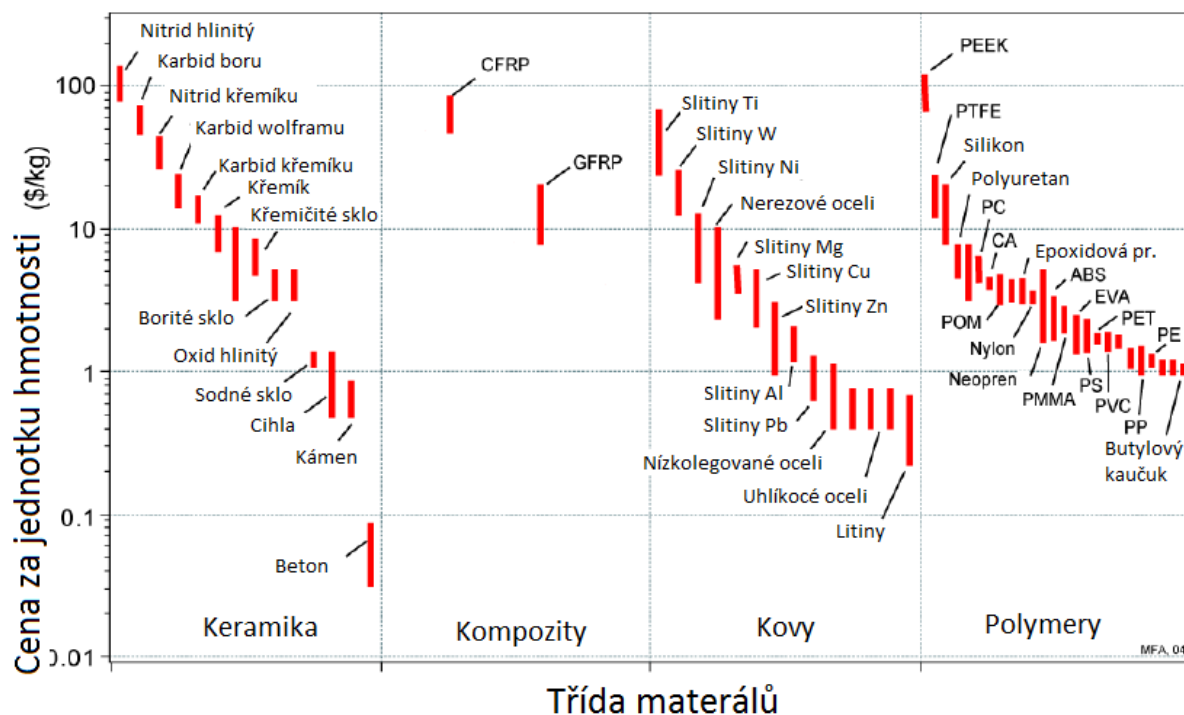
$$k_a = \frac{W}{F_n} = \frac{\Omega}{P}$$

je zhruba konstantní. Veličina  $k_a$  ( $\text{MPa}^{-1}$ ) udává náchylnost k opotřebení materiálů. Vysoká hodnota  $k_a$  znamená rychlé opotřebení při daném tlaku  $P$ . Zde je zobrazena společně s tvrdostí  $H$ .



## Mapa 15a, b: Přibližné ceny materiálů $C_m$ a $\rho C_m$

Vlastnosti jako modul pružnosti v tahu, pevnost nebo vodivost se v čase nemění. S náklady je to obtížné, protože se v čase mění. Nabídka, nedostatek, spekulace a inflace se podílejí na značném kolísání ceny za kilogram komodit, jako je měď nebo stříbro. Některá cenová data se objevují v novinách a obchodních časopisech; ceny ostatních materiálů je obtížnější zjistit. Přibližné hodnoty ceny materiálů za kilogram a metr krychlový jsou uvedeny v těchto dvou mapách. Cena většiny materiálů (sklo, ocel, hliník a běžné polymery) se pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 \$/kg. Kvůli nízké hustotě polymerů je jejich cena za  $m^3$  nižší v porovnání s kovy.





## Mapa 16: Modul pružnosti v tahu $E$ a relativní náklady $C_R \rho$

Při konstruování za účelem minimalizace ceny se výběr materiálu řídí indikátory, které obsahují modul pružnosti v tahu, pevnost a cenu za jednotku objemu. Abychom zohlednily vliv inflace a vztahy mezi měnami, zavádíme relativní náklady na jednotku objemu  $C_{v,R}$

$$C_{v,R} = \frac{\text{Cena/kg} \cdot \text{Hustota}}{\frac{\text{Cena}}{\text{kg}} \cdot \text{Hustota ocelové tyče}}$$

Době, kdy vznikla tato mapa, se cena ocelové tyče na výztuhy pohybovala okolo 0,3 \$/kg.

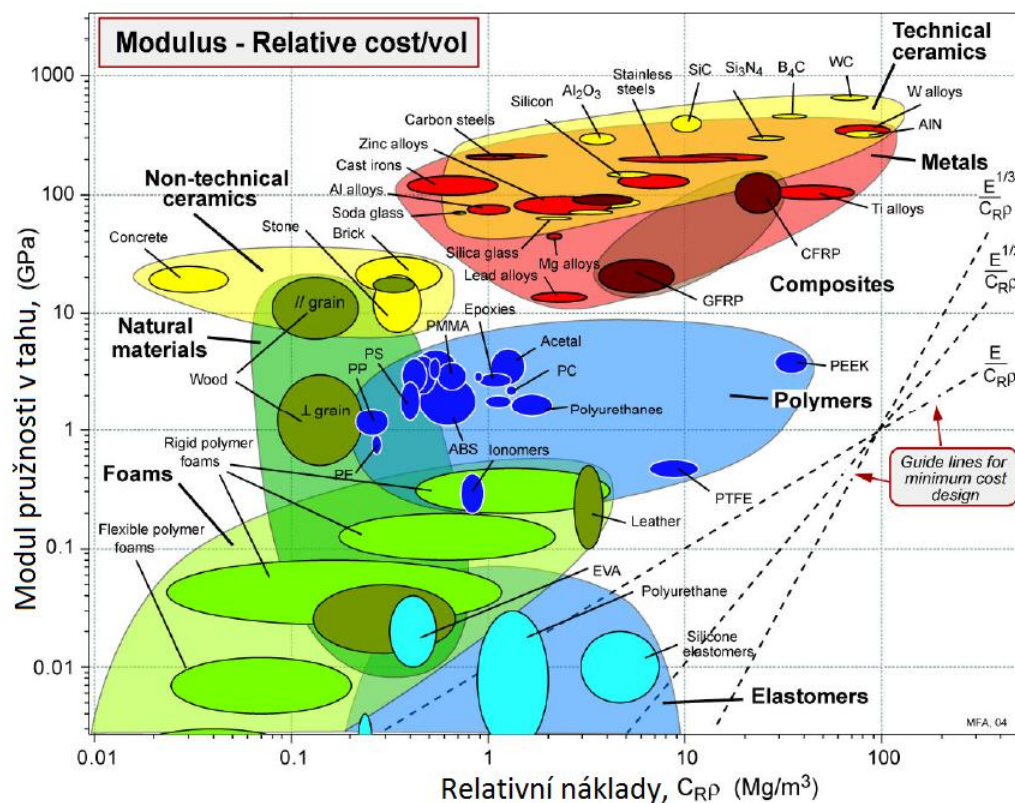
Tato mapa ukazuje modul pružnosti v tahu  $E$  a relativní náklady na jednotku objemu  $C_{v,R}\rho$ , kde  $\rho$  je hustota materiálu. Levné tuhé materiály leží vlevo nahoře. Různoběžné přímky pro výběr tuhých a levných materiálů jsou zobrazeny na mapě. Různoběžné přímky ukazují body, pro které platí:

$$E/C_{v,R}\rho = C \quad (\text{levné, tuhé tyče})$$

$$E^{1/2}/C_{v,R}\rho = C \quad (\text{levné, tuhé nosníky a sloupky})$$

$$E^{1/3}/C_{v,R}\rho = C \quad (\text{levné, tuhé desky})$$

Hodnota konstanty  $C$  vzrůstá, čím více jsou přímky vlevo nahoře. Materiály poskytující nejlepší poměr tuhosti a ceny leží v levém horním rohu.



## Mapa 17: Napětí při mezním stavu $\sigma_f$ a relativní náklady $C_{RP}$

S využitím této mapy lze vybírat pevné a levné materiály. Mapa ukazuje dříve definované napětí při mezním stavu a relativní náklady na jednotku objemu definované na mapě 16. Dříve uvedená východiska definice pevnosti zde také platí. Je nutno zdůraznit, že zde uvedená data a data na mapě 16 jsou méně spolehlivá než na ostatních mapách a mohou se neočekávaně změnit. Přes toto varování jsou obě mapy velmi užitečné. Umožňují výběr materiálů pomocí kritéria funkce/cena.

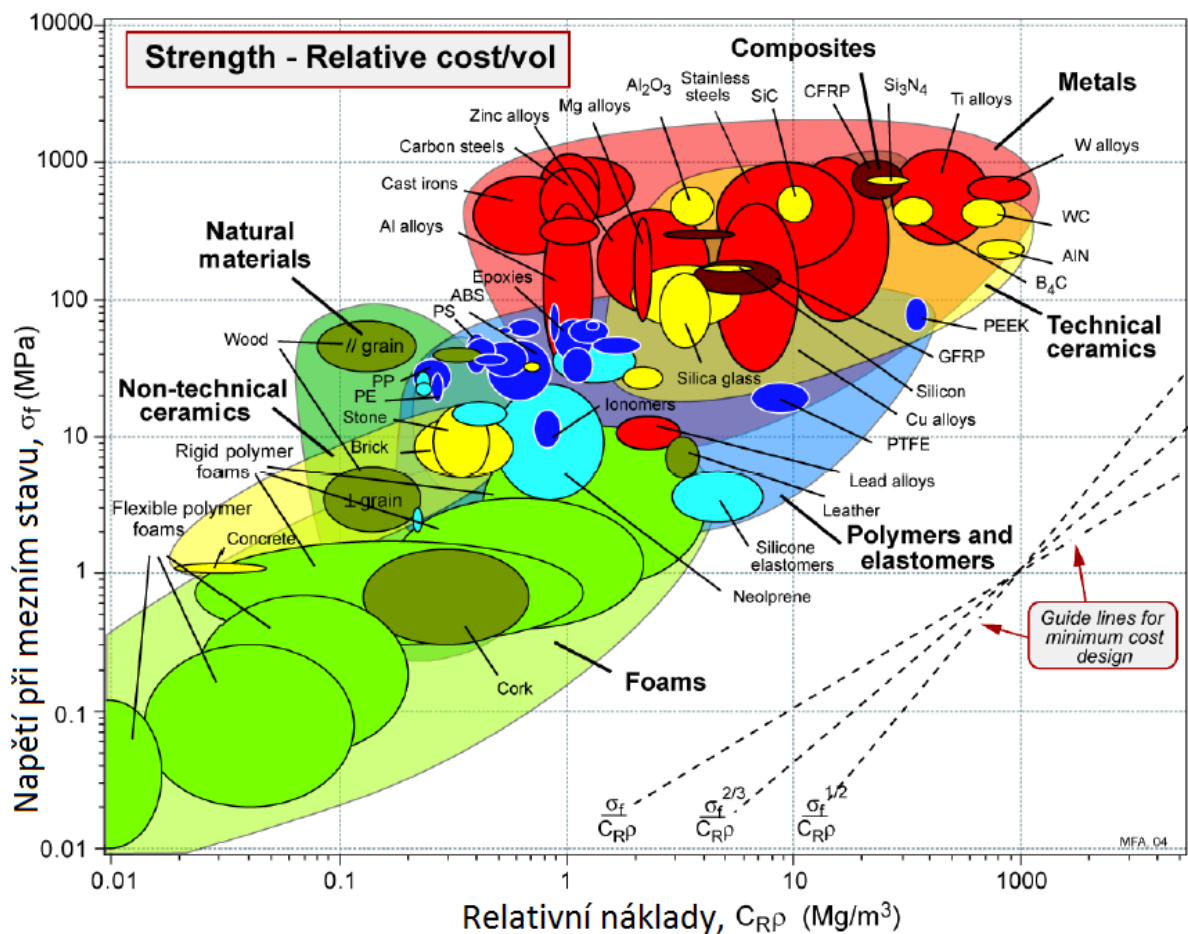
Různoběžné přímky zobrazují body, pro které platí:

$$\sigma_f / C_{v,RP} = C \quad (\text{levné, pevné pruty, rotující kotouče})$$

$$\sigma_f^{2/3} / C_{v,RP} = C \quad (\text{levné, pevné nosníky a hřídele})$$

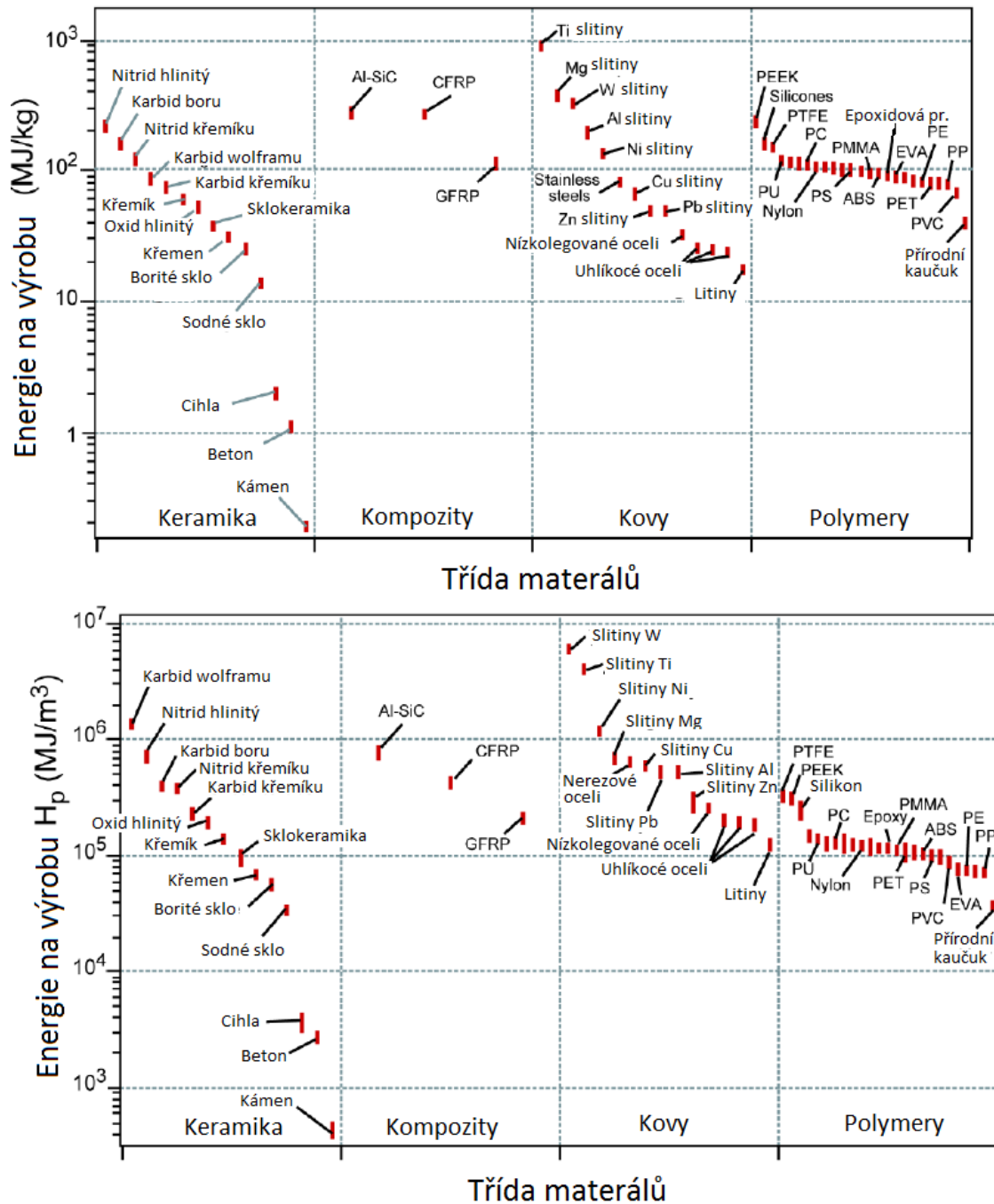
$$\sigma_f^{1/2} / C_{v,RP} = C \quad (\text{levné, pevná desky})$$

Hodnota konstanty  $C$  vzrůstá, čím více jsou přímky vlevo nahoře. Materiály poskytující nejlepší poměr pevnosti a ceny leží v levém horním rohu.



## Mapa 18 a, b: Potřebná energie na výrobu materiálu na jednotku hmotnosti a objemu

Energie spojená s výrobou jednoho kilogramu materiálu je  $H_p \rho$  a jednotky objemu  $H_p$ , kde  $\rho$  je hustota materiálu. Tyto dva diagramy ukazují množství energie pro keramiku, kovy, polymery a kompozity. V horním grafu materiály v první skupině potřebují nejméně energie. Ocel je na tom hůře. Výroba polymerů je mnohem energeticky náročnější než výroba ocele. Hliník a ostatní lehké slitiny jsou na tom nejhůře ze všech. Ale pokud jsou stejné materiály porovnány podle energie na jednotku objemu (spodní graf), závěry se mění: sklo je stále nejvýhodnější, ale teď se polymery jako PE a PP jeví výhodnější než ocel; kompozit GFRP je na tom je o kousek hůře než PE a PP.



## Mapa 19: Modul pružnosti v tahu $E$ a potřebná energie na výrobu materiálu na jednotku objemu $H_p\rho$

Tato mapa slouží k výběru materiálů pro tuhé, energeticky-výhodné komponenty. Energie na kg  $H_p\rho$  je energie na  $m^3 H_p$  vynásobená hustotou  $\rho$ . Různoběžné přímky zobrazují body, pro které platí:

$$\frac{E}{H_p\rho} = C \quad (\text{energeticky výhodné tuhé pruty; minimální průhyby při odstředivém zatížení atd.})$$

$$\frac{E^{1/2}}{H_p\rho} = C \quad (\text{energeticky výhodné tuhé nosníky, hřídele a sloupky})$$

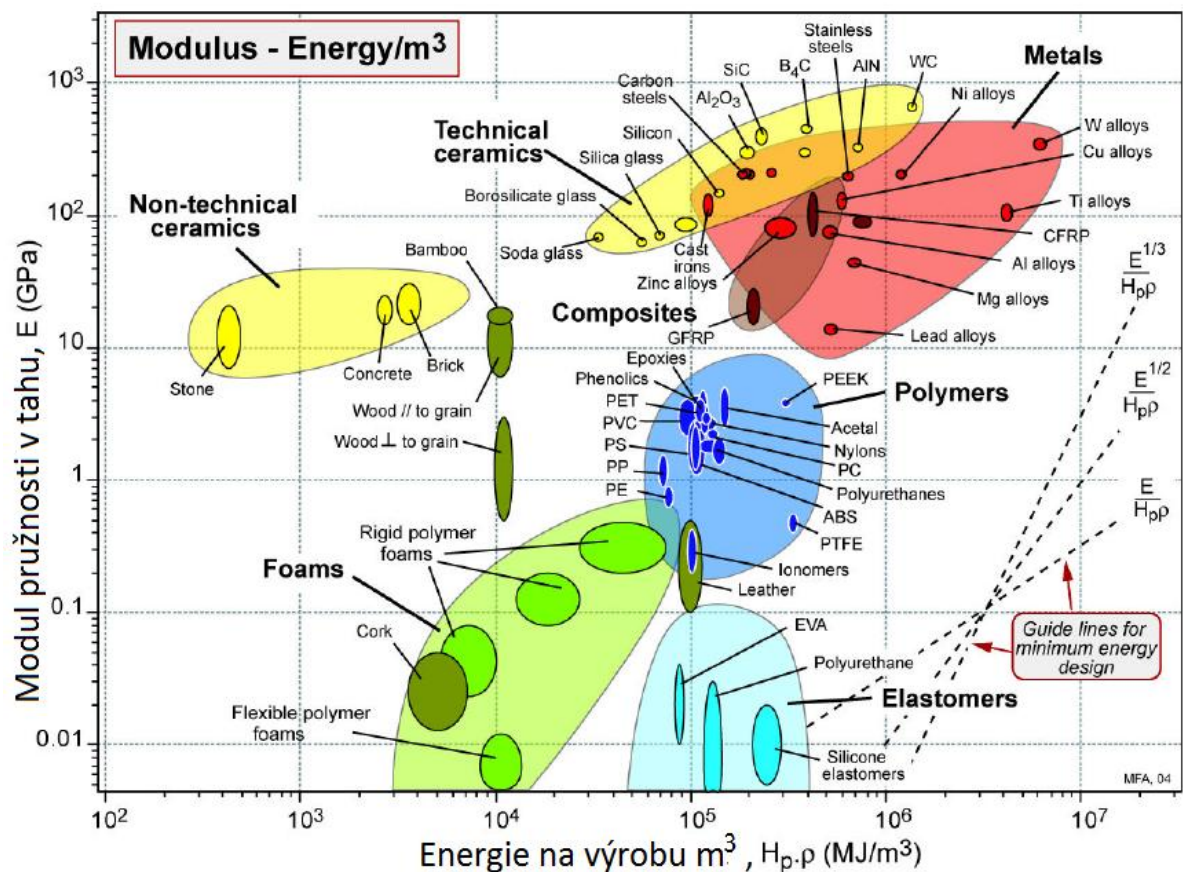
$$\frac{E^{1/3}}{H_p\rho} = C \quad (\text{energeticky výhodné tuhé desky})$$

Hodnota konstanty  $C$  vzrůstá, čím více jsou přímky vlevo nahoře. Materiály poskytující nejlepší poměr tuhosti a energie leží v levém horním rohu. Ostatní moduly pružnosti lze přibližně určit pomocí  $E$ :

$$\nu = 1/3; \quad G = \frac{3}{8}E; \quad K \approx E \quad (\text{kovy, keramika, skla a skelné polymery})$$

nebo  $\nu = 0,5; \quad G \approx E/3; \quad K \approx 10E \quad (\text{elastomery, gumové polymery}),$

kde  $\nu$  je Poissonovo číslo,  $G$  modul pružnosti ve smyku a  $K$  je součinitel objemové stlačitelnosti.





## Mapa 20: Napětí při mezním stavu $\sigma_f$ a potřebná energie na výrobu materiálu na jednotku hmotnosti $H_p\rho$

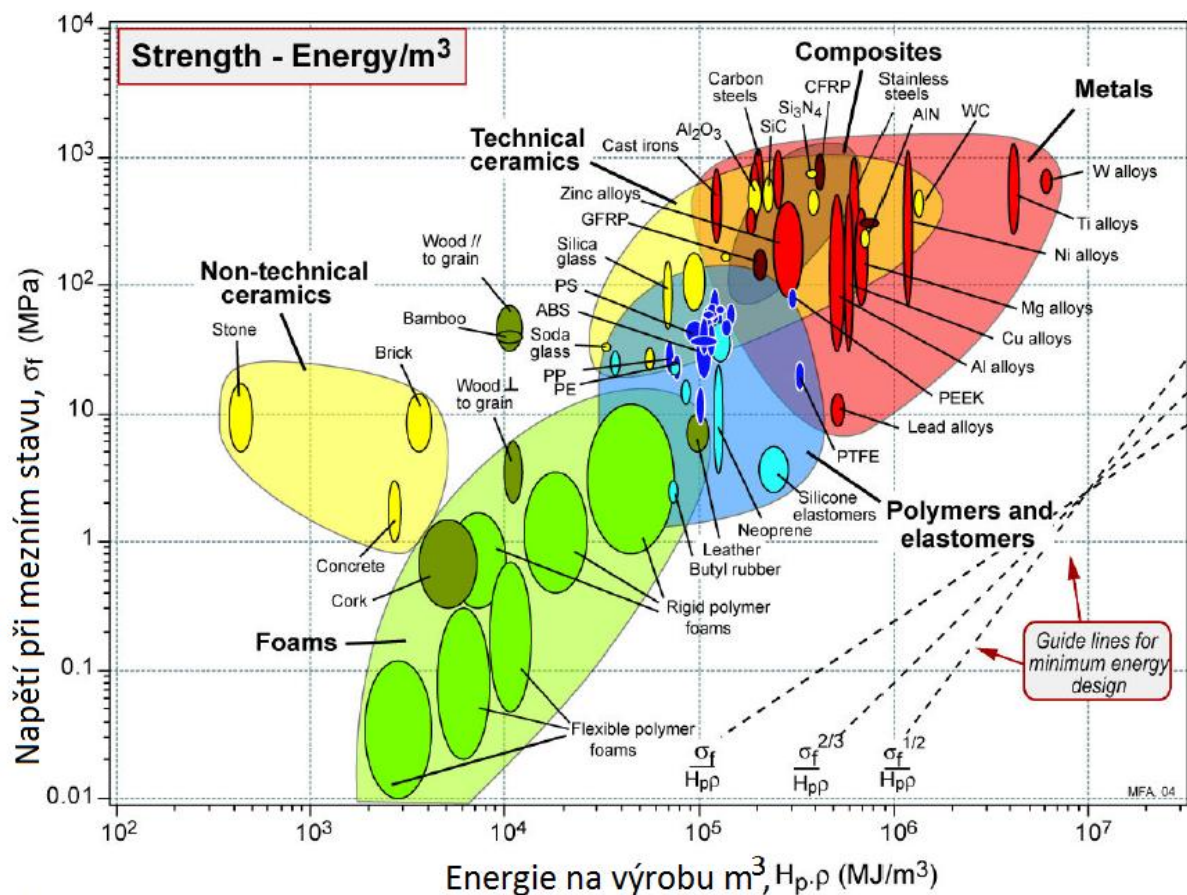
Tato mapa pomáhá při výběru materiálu pro pevné, energeticky výhodné komponenty. Napětí při mezním stavu pro kovy je napětí, které způsobí 0,2% plastických deformací. Pro polymery je to hodnota napětí, při kterém se závislost napětí na poměrné deformaci stává výrazně nelineární, typicky při hodnotě 1% trvalé deformace. Pro keramiku a skla je to hodnota tlakového napětí, při které dojde k rozdrčení; pamatujte, že tato hodnota je asi 15 krát vyšší než pevnost v tahu. Pro kompozity je rovna mezi pevností v tahu. Pro elastomery je to hodnota napětí při roztržení. Energie na kg  $H_p\rho$  je energie na  $m^3 H_p$  vynásobená hustotou  $\rho$ . Různoběžné přímkové oblasti zobrazují body, pro které platí.

$$\sigma_f / H_p\rho = C \quad (\text{energeticky výhodné tuhé pruty, maximální úhlová rychlost rotujících kotoučů})$$

$$\sigma_f^{2/3} / H_p\rho = C \quad (\text{energeticky výhodné pevné nosníky a hřídele})$$

$$\sigma_f^{1/2} / H_p\rho = C \quad (\text{energeticky výhodné pevné desky})$$

Hodnota konstanty  $C$  vzrůstá, čím více jsou přímkové oblasti vlevo nahoře. Materiály poskytující nejlepší poměr pevnosti a energie leží v levém horním rohu.



## 2. Mapy procesních atributů

*Výrobní proces* je metoda tvarování, dokončování nebo spojování materiálů. *Lití do pískových forem, vstřikování, tavné svařování a lakování* jsou příklady výrobních procesů. Výběr procesu pro danou součást závisí na materiálu, ze kterého je vyrobena, na její velikosti, tvaru a požadované přesnosti. Dalším kritériem je potřebný počet kusů.

Strojírenské výrobní procesy spadají do devíti tříd:

Odlévání	(do pískových forem, gravitační, pod tlakem)
Tvarování pod tlakem	(přímé, vstřikování)
Deformační procesy	(válcování, kování, protahování)
Práškové metody	(spékání)
Speciální metody	(CVD, elektroforming, vrstvení)
Obrábění	(řezání, soustružení, vrtání, frézování, broušení)
Tepelné zpracování	(kalení, temperování, stárnutí)
Spojování	(šrouby, nýty, svařování, pájení, lepení)
Povrchové úpravy	(lakování, pokovování, barvení)

Každý proces je charakterizován množinou *atributů*: použitelným materiálem, možným tvarem a přesností, které lze dosáhnout, složitostí, velikostí atd. Mapy výběru procesů zobrazují atributy a rozmezí jejich hodnot, které lze dosáhnout jednotlivými procesy. Jsou použity způsobem popsaným v knize „Materials Selection in Mechanical Design“ (2). Uvedený postup nevede ke zvolení konkrétního výrobního procesu, ale vytipuje podmnožinu procesů, které mohou splnit požadavky konstrukce. Poté musí být použity specializovanější zdroje k určení ekonomicky nejvýhodnější varianty.

Tato verze je zjednodušená a ukazuje pouze omezený počet procesů a atributů. Počítačová verze CES Edu software (47) umožňuje důkladnější průzkum.

## Mapa P1: Matice proces – materiál

Tvarovací, spojovací nebo dokončovací proces může pracovat s některými materiály, ale ne se všemi. Tato matice ukazuje propojení mezi třídami materiálů a procesů. Červená tečka indikuje, že dvojice je kompatibilní. Procesy, které nemohou upravovat daný materiál, jsou bez tečky. Horní část matice popisuje tvarovací procesy. Dvě spodní sekce zahrnují spojování a dokončování.

		Kovy, železné	Kovy, neželezné	Keramika	Skla	Elastomery	Termoplasty	Reaktoplasty	Polymerní pěny	Kompozity
Tvarování	Lití do pískové formy	●	●							
	Lití pod tlakem	●	●							
	Lití na vytavitelný model	●	●							
	Nízkotlaké lití	●	●							
	Kování	●	●							
	Protlačování	●	●							
	Tváření plechů	●	●							
	Prášková metalurgie	●	●	●						
	Elektrojiskrové obrábění	●	●	●						
	Klasické obrábění	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Vstřikování				●	●	●	●	●	●
	Vyfukování				●		●	●		
	Lisování				●	●	●	●		
	Rotomoulding					●	●	●	●	
	Tepelné tvarování					●	●	●		
	Lití polymerů					●	●	●	●	
	RTM						●	●	●	●
	Navíjení vláknové výztuže									●
	Metody vrstvení									●
Vakuování									●	
Spojování	Lepení	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Svařování kovů	●	●							
	Svařování polymerů					●	●	●	●	
	Spojovací prvky	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Dokončování	Přesné obrábění	●	●				●	●		●
	Broušení	●	●	●	●					●
	Lapování	●	●	●	●					●
	Leštění	●	●	●	●		●	●		●

## Mapa P2: Matice proces – tvar

Tvar je nejobtížněji charakterizovatelným parametrem. Spousta procesů zahrnuje rotaci či posuv nástroje nebo součásti, čímž usměrňuje naše myšlení k osové souměrnosti, posunutí, jednotnosti průřezu apod. Soustružení vytváří osově souměrné tvary; protlačování, protahování a válcování tvoří prizmatické tvary, kruhové i nekruhové. Procesy tváření plechů vytvářejí rovné plochy (lisování) nebo vypuklé tvary (tažení plechu). Určité procesy zvládají trojrozměrné tvary a některé z nich navíc duté tvary, ale jiné to neumí.

Matice proces-tvar zobrazuje propojení mezi oběma. Pokud proces není schopen dosáhnout požadovaný tvar, je možné ho skombinovat s jiným, abychom získali požadovaný výsledek. Odlitek, který je posléze obroben je typickým příkladem.

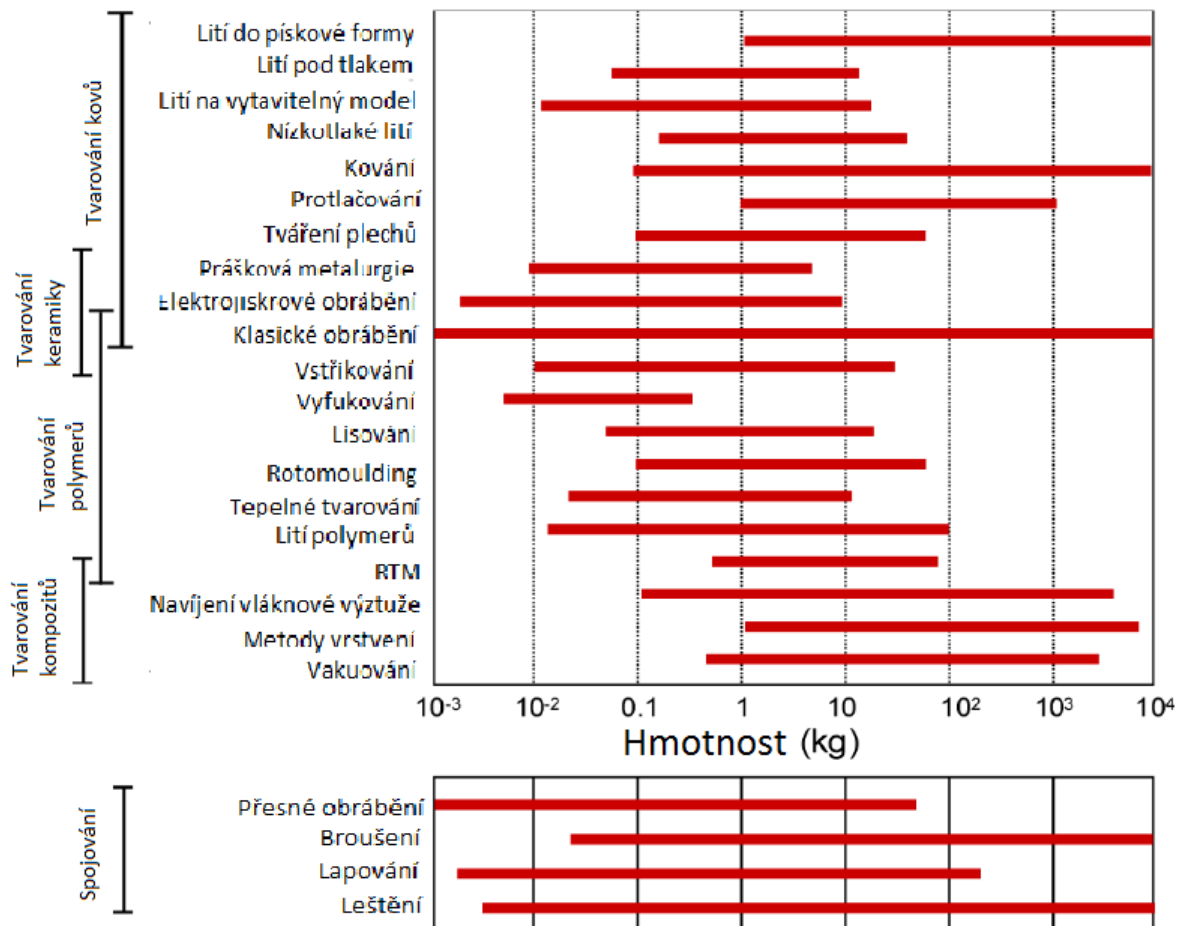
Informace o kompatibilitě s materiály jsou úplně vlevo.

		Kruhový prizmatický	Nekruhový prizmatický	Rovný plech	Klenutý plech	3D celistvý	3D dutý	
Tvarování kovů	Lití do pískové formy	●	●			●	●	
	Lití pod tlakem	●	●			●	●	
	Lití na vytavitelný model	●	●			●	●	
	Nízkotlaké lití	●	●			●	●	
	Kování	●	●			●		
	Protlačování	●	●					
	Tváření plechů	●	●	●	●			
	Prášková metalurgie	●	●			●	●	
	Elektrojiskrové obrábění	●	●	●	●	●	●	
	Klasické obrábění	●	●	●	●	●	●	
Tvarování keramiky	Vstřikování	●	●			●	●	
	Výfukování				●		●	
	Tvarování polymerů	Lisování			●	●	●	
		Rotomoulding				●		●
Tvarování kompozitů	Tepelné tvarování				●			
	Lití polymerů	●	●			●	●	
	RTM	●	●	●	●	●	●	
	Navíjení vláknové výztuže	●	●		●		●	
	Metody vrstvení			●	●	●		
	Vakuování			●	●			



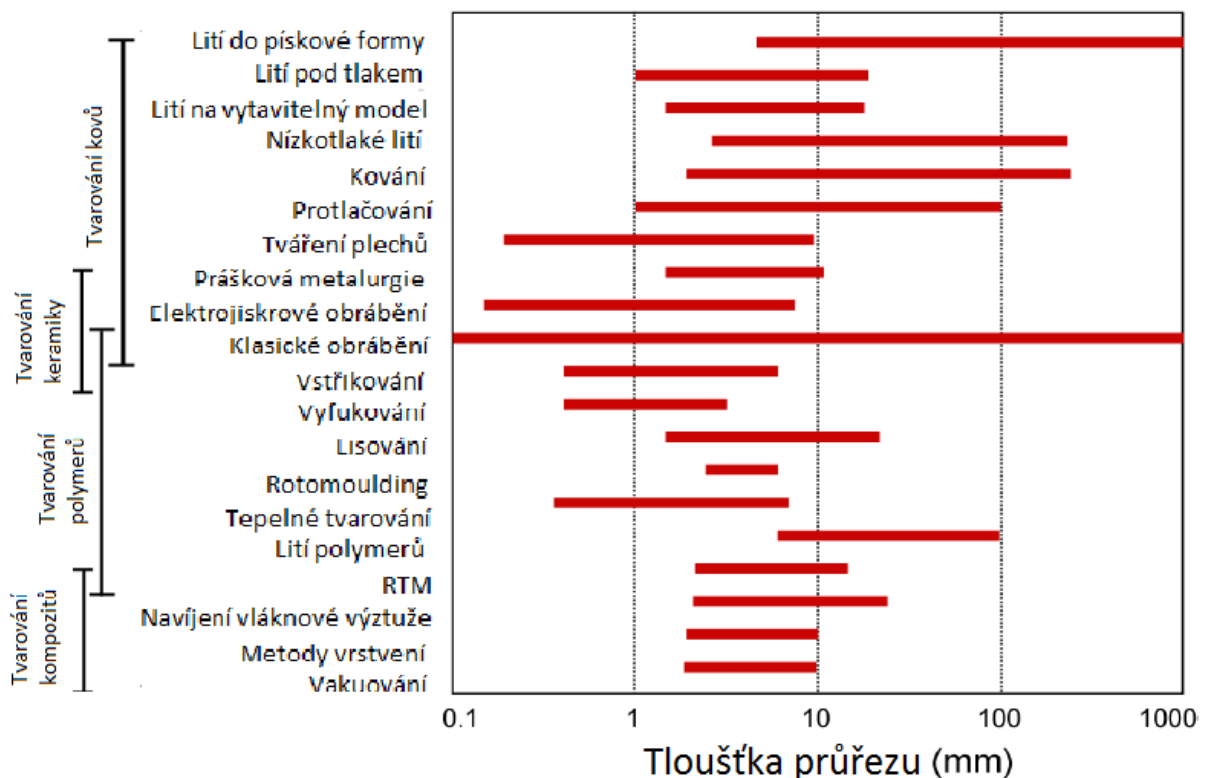
### Mapa P3: Graf proces - hmotnost

Tento graf ukazuje typické rozmezí hmotnosti výrobku, které lze dosáhnout daným procesem. Je to jeden ze čtyř parametrů umožňujících stanovení mezí velikosti (měřeno hmotností), tloušťky průřezu, tolerancí a drsností povrchu. Velké komponenty mohou být vytvořeny spojením menších. Z tohoto důvodu jsou meze spojené se spojováním uvedeny ve spodní části grafu. Pokud jsme omezeni hmotností, hledáme jeden tvarovací proces nebo kombinace tvarování a spojování, které jsou schopné splnit naše požadavky.



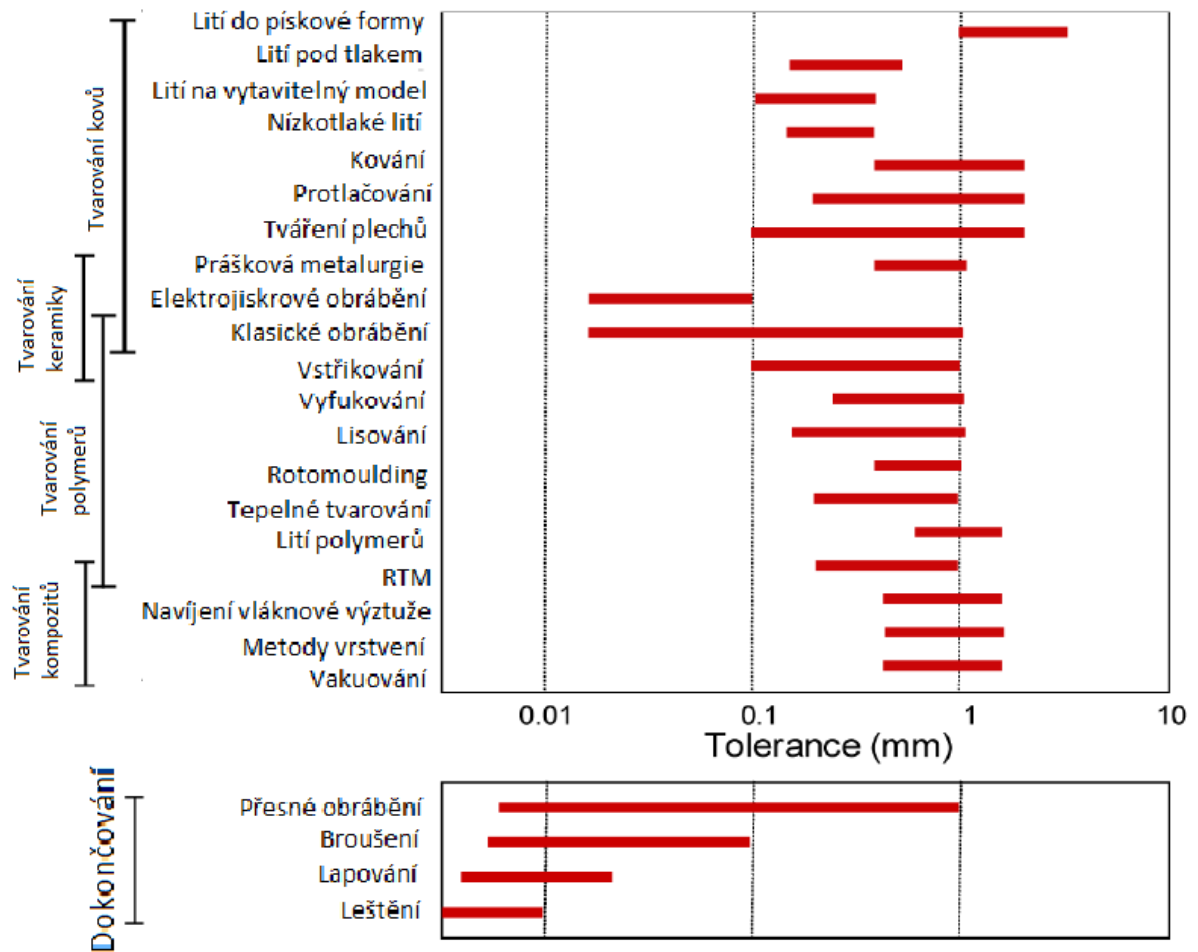
## Mapa P4: Graf proces – tloušťka průřezu

Tento graf umožňuje výběr procesu s ohledem na tloušťku průřezu. Povrchové pnutí a tepelný tok omezují minimální tloušťku průřezu odlitků. Rozmezí může být rozšířeno zvýšením tlaku při odlévání nebo přehřátím formy, ale spodní mez tloušťky průřezu je stále daná. Minimální tloušťka stěny dosažitelná deformačními procesy, jako je válcování a kování, je omezena maximálními dosažitelnými tlaky. Metody práškové metalurgie umožňují malá rozmezí tloušťky, ale mohou být použity pro keramiku a velmi tvrdé kovy, které nelze tvarovat jinými způsoby. Tloušťka průřezu u metod pro zpracování polymerů – vstřikování, lisování, vyfukování, atd. – závisí na viskozitě polymeru; plniva zvyšují viskozitu a omezují tak minimální tloušťku stěny. Speciální techniky, které zahrnují elektrodepozici, plazmovou depozici, CVD, umožňují velmi štíhlé stěny.



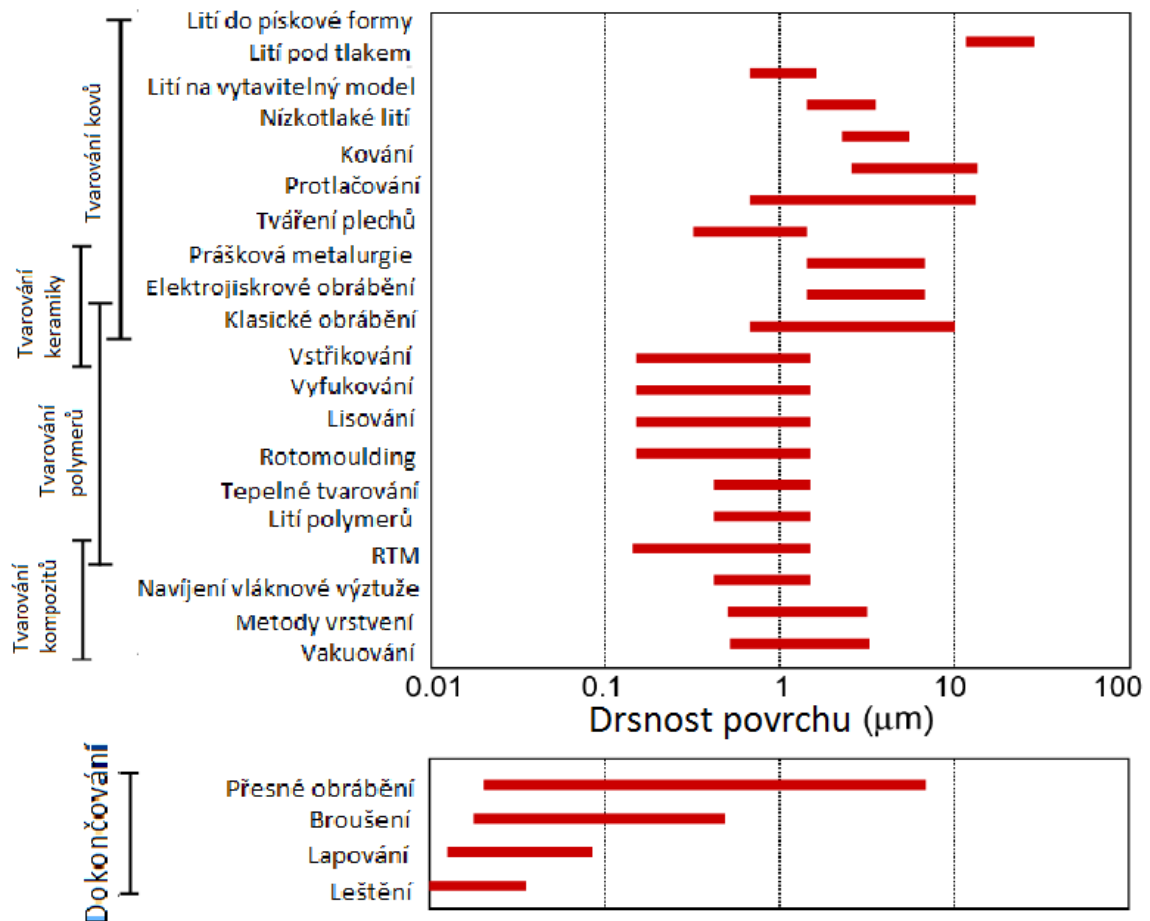
## Mapa P5: Graf proces – tolerance

Žádným procesem nelze vytvarovat součást na přesně specifikované rozměry. Jistá odchylka  $\Delta x$  z požadovaného rozměru  $x$  je dovolena; této odchylce se říká tolerance  $T$  a může být definována jako  $x = 100 \pm 0,1$  mm, nebo  $x = 50_{-0,001}^{+0,01}$  mm. Tento graf umožňuje výběr procesu, aby bylo možno dosáhnout danou toleranci. Zahrnutím dokončovacích procesů lze zkoumat jednoduché kombinování procesů.



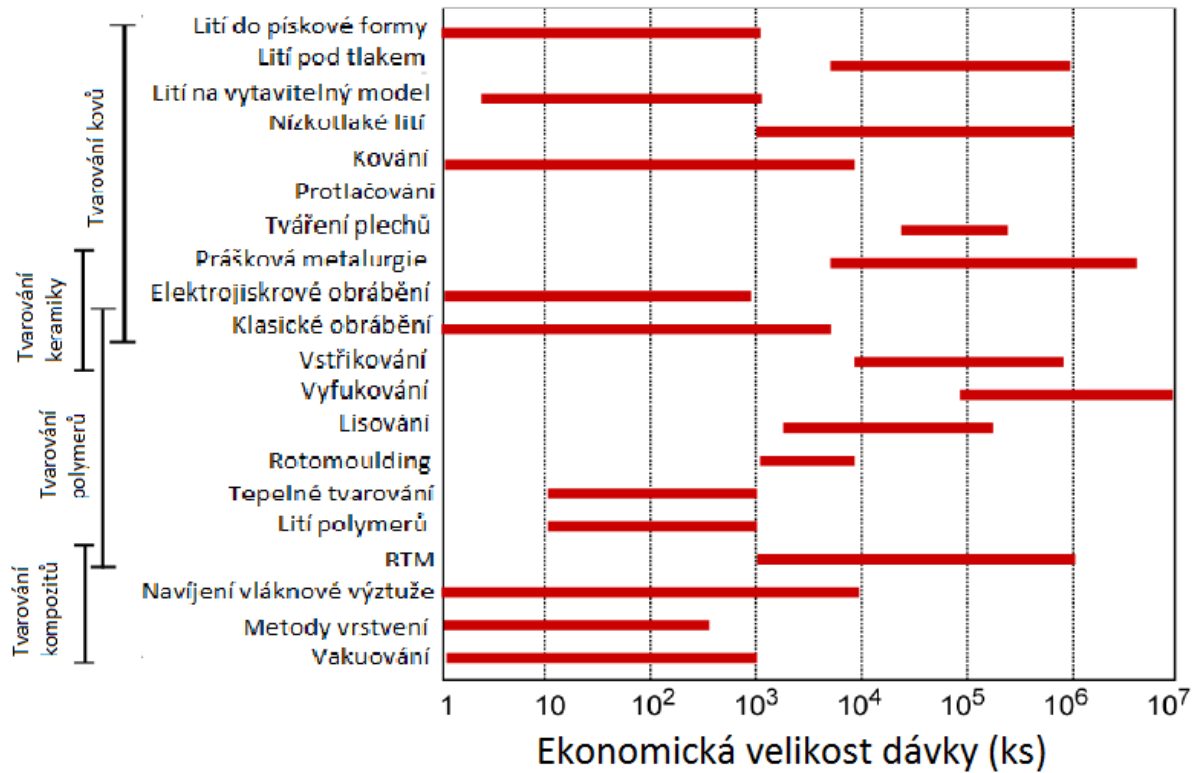
## Mapa P6: Graf proces – drsnost povrchu

Drsnost povrchu  $R$  je definována jako kvadratický průměr amplitud nerovností povrchu. Rozlišujeme  $R < 100 \mu\text{m}$  (hrubý povrch odlitků) a  $R < 0,01 \mu\text{m}$  (vysoce leštěný povrch). Graf umožňuje výběr procesu za účelem dosažení potřebné drsnosti. Zahrnutím dokončovacíh procesů lze zkoumat jednoduché kombinování procesů.



## Mapa P7: Graf proces – ekonomická velikost dávky

Výrobní náklady závisí na spoustě nezávislých proměnných. Vliv mnoha z nich se dá vyjádřit jedním parametrem: ekonomická velikost dávky. Proces s ekonomickou velikostí dávky v rozmezí  $B_1 - B_2$  je výhodný, pokud požadovaný počet výrobků je rovněž v tomto intervalu.



## **Dodatek: materiálové indikátory**

Indikátory uvedené v tabulkách 1 až 7 jsou převážně založeny na minimalizaci hmotnosti. Pokud chceme minimalizovat náklady, nahradíme ve stejných indikátorech hustotu  $\rho$  za cenu za jednotku objemu  $\rho C_m$ , kde  $C_m$  je cena za kilogram. Když chceme minimalizovat energetickou nebo ekologickou náročnost, zaměníme hustotu za  $H_p \rho$  nebo za  $CO_2 \rho$ , kde  $H_p$  je energie potřebná na výrobu jednoho kilogramu materiálu a  $CO_2$  je produkce  $CO_2$  na jeden kilogram vyrobeného materiálu.

## Tabulka A1: Konstruování na danou tuhost při minimální hmotnosti (nákladech, ...)

Funkce a omezení	Hledat maximum
<b>Prut (namáhaný tahem)</b> tuhost, délka dané; nezávislé na průřezu	$E/\rho$
<b>Hřídél (namáhaná krutem)</b> tuhost, délka, tvar dané; nezávislé na průřezu	$G^{1/2}/\rho$
tuhost, délka, vnější průměr dané; nez. na tloušťce stěny	$G/\rho$
tuhost, délka, tloušťka stěny dané; nez. na vnějším průměru	$G^{1/3}/\rho$
<b>Nosník (namáhaný ohybem)</b> tuhost, délka, tvar dané; nez. na průřezu	$E^{1/2}/\rho$
tuhost, délka, výška dané; nez. na šířce	$E/\rho$
tuhost, délka, šířka dané; nez. na výšce	$E^{1/3}/\rho$
<b>Sloupek (zatížený tlakem, nebezpečí vzpěru)</b> kritérium vzpěru, délka, tvar dané; nez. na průřezu	$E^{1/2}/\rho$
<b>Panel (rovná deska, zatížená ohybem)</b> tuhost, délka, šířka dané; nez. na tloušťce	$E^{1/3}/\rho$
<b>Deska (rovná deska zatížená tlakem, nebezpečí vzpěru)</b> kritérium vzpěru, délka, šířka dané; nez. na tloušťce	$E^{1/3}/\rho$
<b>Válec s vnitřním tlakem</b> elastická deformace, tlak, průměr dané; nez. na tloušťce stěny	$E/\rho$
<b>Kulová skořepina s vnitřním tlakem</b> elastická deformace, tlak, průměr dané; nez. na tloušťce stěny	$E/(1 - \nu)\rho$

## Tabulka A2: Konstruování na danou pevnost při minimální hmotnosti (nákladech, ...)

Funkce a omezení	Hledat maximum
<b>Prut (namáhaný tahem)</b> tuhost, délka dané; nezávislé na průřezu	$\sigma_f / \rho$
<b>Hřídél (namáhaná krutem)</b> tuhost, délka, tvar dané; nezávislé na průřezu	$\sigma_f^{2/3} / \rho$
tuhost, délka, vnější průměr dané; nez. na tloušťce stěny	$\sigma_f / \rho$
tuhost, délka, tloušťka stěny dané; nez. na vnějším průměru	$\sigma_f^{1/2} / \rho$
<b>Nosník (namáhaný ohybem)</b> tuhost, délka, tvar dané; nez. na průřezu	$\sigma_f^{2/3} / \rho$
tuhost, délka, výška dané; nez. na šířce	$\sigma_f / \rho$
tuhost, délka, šířka dané; nez. na výšce	$\sigma_f^{1/2} / \rho$
<b>Sloupek (zatížený tlakem, nebezpečí vzpěru)</b> kritérium vzpěru, délka, tvar dané; nez. na průřezu	$\sigma_f / \rho$
<b>Panel (rovná deska, zatížená ohybem)</b> tuhost, délka, šířka dané; nez. na tloušťce	$\sigma_f^{1/2} / \rho$
<b>Deska (rovná deska zatížená tlakem, nebezpečí vzpěru)</b> kritérium vzpěru, délka, šířka dané; nez. na tloušťce	$\sigma_f^{1/2} / \rho$
<b>Válec s vnitřním tlakem</b> elastická deformace, tlak, průměr dané; nez. na tloušťce stěny	$\sigma_f / \rho$
<b>Kulová skořepina s vnitřním tlakem</b> elastická deformace, tlak, průměr dané; nez. na tloušťce stěny	$\sigma_f / \rho$
<b>Setrvačnický, rotující kotouč</b> maximální uložená energie na jednotku objemu, daná rychlost max. uložená energie na jednotku hmotnosti, zamezit selhání	$\rho$ $\sigma_f / \rho$



### Tabulka A3: Konstruování na danou pevnost pro maximální výkon

Funkce a omezení	Hledat maximum
<b>Pružiny</b>	
max. uložená energie na jednotku objemu, zamezit selhání	$\sigma_f^2/E$
max. uložená energie na jednotku hmotnosti, zamezit selhání	$\sigma_f^2/E\rho$
<b>Elastické panty</b>	
minimální poloměr ohybu (maximální flexibilita bez selhání)	$\sigma_f/E$
<b>Hrany nožů, otočné čepy</b>	
minimální kontaktní ploch, maximální zatížení	$\sigma_f^3/E^2 \text{ a } H$
<b>Těsnění</b>	
maximální přizpůsobivost, omezený kontaktní tlak	$\sigma_f^3/E^2 \text{ a } 1/E$
<b>Membrány</b>	
maximální průhyb při daném tlaku nebo síle	$\sigma_f^3/E$
<b>Rotující bubny a odstředivky</b>	
maximální úhlová rychlost, daný průměr, nez. na tloušťce stěny	$\sigma_f/\rho$

### Tabulka A4: Konstruování s ohledem na kmitání

Funkce a omezení	Hledat maximum
<b>Pruty, sloupky</b>	
maximální frekvence podélných kmitů	$E/\rho$
<b>Nosníky daných rozměrů</b>	
maximální frekvence ohybových kmitů	$E/\rho$
<b>Nosníky dané délky a tuhosti</b>	
maximální frekvence ohybových kmitů	$E^{1/2}/\rho$
<b>Desky daných rozměrů</b>	
maximální frekvence ohybových kmitů	$E/\rho$
<b>Desky dané délky, šířky a tuhosti</b>	
maximální frekvence ohybových kmitů	$E^{1/3}/\rho$
<b>Pruty, sloupky, nosníky, panely dané tuhosti</b>	
minimální podélné buzení z vnějších zdrojů, pruty	$\eta E/\rho$
minimální ohybové buzení z vnějších zdrojů, nosníky	$\eta E^{1/2}/\rho$
minimální ohybové buzení z vnějších zdrojů, panely	$\eta E^{1/3}/\rho$

## Tabulka A5: Konstruování s dovoleným poškozením

Funkce a omezení	Hledat maximum
<b>Pruty (zatížené tahem)</b>	
max. tolerance vad a pevnost, konstr. s řízeným zatížením	$K_{lc} a \sigma_f$
max. tolerance vad a pevnost, konstr. s řízenou deformací	$K_{lc}/E a \sigma_f$
max. tolerance vad a pevnost, konstr. s řízenou energií	$K^2_{lc}/E a \sigma_f$
<b>Hřídele (namáhané krutem)</b>	
max. tolerance vad a pevnost, konstr. s řízeným zatížením	$K_{lc} a \sigma_f$
max. tolerance vad a pevnost, konstr. s řízenou deformací	$K_{lc}/E a \sigma_f$
max. tolerance vad a pevnost, konstr. s řízenou energií	$K^2_{lc}/E a \sigma_f$
<b>Nosníky (namáhané ohybem)</b>	
max. tolerance vad a pevnost, konstr. s řízeným zatížením	$K_{lc} a \sigma_f$
max. tolerance vad a pevnost, konstr. s řízenou deformací	$K_{lc}/E a \sigma_f$
max. tolerance vad a pevnost, konstr. s řízenou energií	$K^2_{lc}/E a \sigma_f$
<b>Tlaková nádoby</b>	
výrazná plastická deformace před selháním	$K_{lc}/\sigma_f$
tvorba malých trhlin před selháním	$K^2_{lc}/\sigma_f$

## Tabulka A6: Tepelné a tepelně-mechanické konstruování

Funkce a omezení	Hledat maximum
<b>Materiály na tepelné izolace</b>	
minimální tepelný tok v ustáleném stavu, daná tloušťka	$1/\lambda$
minimální nárůst teploty, daná tloušťka	$1/\lambda = \rho C_p/\lambda$
minimální spotřeba energie během cyklu	$\sqrt{a}/\lambda = \sqrt{\lambda \rho C_p}$
<b>Materiály pro ukládání tepelné energie</b>	
maximální uložená energie/náklady na jednotku mat.	$C_p/C_m$
max. uložená energie za daný nárůst teploty a čas	$\lambda/\sqrt{a} = \sqrt{\lambda \rho C_p}$
<b>Přesná zařízení</b>	
minimální tepelná deformace pro daný tepelný tok	$\lambda/a$
<b>Odolnost proti tepelným šokům</b>	
maximální změna teploty povrchu, zamezit selhání	$\sigma_f/E\alpha$
<b>Chladiče</b>	
max. tepelný tok na jednotku objemu, ometená roztažnost	$\lambda/\Delta\alpha$
max. tepelný tok na jednotku hmotnosti, ometená roztažnost	$\lambda/\rho\Delta\alpha$
<b>Tepelné výměníky (omezené tlakem)</b>	
max. tepelný tok na jednotku plochy, zamezit selhání $\Delta p$	$\lambda\sigma_f$
max. tepelný tok na jednotku hmotnosti, zamezit selhání $\Delta p$	$\lambda\sigma_f/\rho$

## Tabulka A7: Elektro-mechanické konstruování

Funkce a omezení	Hledat maximum
<b>Přípojnice</b> minimální náklady na provoz, dobrý elektrický vodič	$1/\rho_e \rho C_m$
<b>Vinutí elektromagnetů</b> max. magnetické pole krátkých impulzů, zamezit mech. selhání max. magnetické pole a délka impulsů, omezený nárůst teploty	$\sigma_f$ $\rho C_p / \rho_e$
<b>Vinutí vysokorychlostních elektromotorů</b> maximální úhlová rychlost, zamezit únavovému poškození minimální ohmické ztráty, zamezit únavovému poškození	$\sigma_e / \rho_e$ $1/\rho_e$
<b>Relé</b> minimální reakční prodleva, zamezit únavovému poškození minimální ohmické ztráty, zamezit únavovému poškození	$\sigma_e / E \rho_e$ $\sigma_e^2 / E \rho_e$