

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** B0715A270013 – Strojní inženýrství  
**Studijní specializace:** Konstruování strojů a technických zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Konstrukční požadavky na rámy jízdních kol**

**Autor:** Daniel NOVÝ  
**Vedoucí práce:** Ing. Ivana MAZÍNOVÁ, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

## Zadání BP

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2020/2021

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Daniel NOVÝ**  
Osobní číslo: **S20B0414P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstruování strojů a technických zařízení**  
Téma práce: **Konstrukční požadavky na rámy jízdních kol**  
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

### Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Proveďte rešerši konstrukčních požadavků pro různé typy rámu jízdních kol. Pro jeden typ rámu vyberte optimální materiál dle konstrukčních požadavků. Pro výběr materiálu použijte databázi GRANTA EduPack.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Uvedení do problematiky
2. Rešerše typů rámu jízdních kol a jejich vlastností
3. Příklad výběru materiálu pro daný typ rámu
4. Shrnutí a závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

- [1] ASHBY, M. F. Materials Selection in Mechanical Design. Fifth Edition. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 978-0-08-100599-6
- [2] ASHBY, M. F., SHERCLIFF H., CEBON D. Materials: Engineering, Science, Processing and Design. 3rd Edition. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-08-099434-5
- [3] The GRANTA EduPack materials and proces selection platforms, produkt firmy ANSYS/GRANTA, [www.grantadesign.com/education/](http://www.grantadesign.com/education/)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Mazínová, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Ivana Mazínová, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2021**

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

L.S.

---

**Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 16. října 2020

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Ivaně Mazínové, Ph.D. za trpělivost, poskytnutí odborných rad, věcné připomínky, ochotu a vstřícný přístup během zpracovávání této práce.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Nový	<b>Jméno</b> Daniel	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Mazínová, Ph.D.	<b>Jméno</b> Ivana	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST – KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Konstrukční požadavky na rámy jízdních kol		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	77	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	49	<b>PŘÍLOHY</b>	28
---------------	----	---------------------	----	----------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL, POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Bakalářská práce se zabývá výběrem materiálu metodou profesora Michaela F. Ashbyho z Univerzity v Cambridgi. V práci je nejprve metoda obecně popsána a poté použita při výběru vhodných materiálů pro rámy jízdních kol. Takto vybrané materiály se shodují s těmi, které byly nalezeny při rešeršní činnosti. Metoda prof. Ashbyho tedy byla úspěšně ověřena a její výsledky odpovídají konstrukční praxi. Pro vizualizaci problematiky jsou v databázi Granta vytvářeny mapy vlastností materiálů.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Výběr materiálu, konstrukční požadavky, materiálové indikátory, mapy vlastností materiálů, databáze materiálů, Michael F. Ashby, rám jízdního kola

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Nový	<b>Name</b> Daniel	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Mazínová, Ph.D.	<b>Name</b> Ivana	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST – KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Design constraints of bicycle frames		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKS	<b>SUBMITTED IN</b>	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	77	<b>TEXT PART</b>	49	<b>ATTACHMENTS</b>	28
----------------	----	------------------	----	--------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	Bachelor thesis deals with the selection of the right material using the method made by Cambridge University Professor Michael F. Ashby. His method is briefly explained and then used for selecting the right bicycle frame material. Materials selected using Ashby's method are the same as the materials bicycle frames are actually made of. According to this outcome, Ashby's method is suitable and reliable for the material selection in the design process. The whole problem can be visualised creating material property charts in material database made by Granta Design company.
<b>KEY WORDS</b>	Material choice, design requirements, material indices, material property charts, material database, Michael F. Ashby, bicycle frame

## Obsah

Zadání BP .....	2
Přehled použitých zkratk a symbolů .....	10
Seznam obrázků .....	11
Seznam tabulek .....	11
<b>1 Úvod.....</b>	<b>12</b>
1.1 Cíle práce.....	12
<b>2 Rozdělení rámu jízdních kol.....</b>	<b>13</b>
2.1 Horská kola .....	13
2.1.1 XC (Cross country) .....	13
2.1.2 Sjezdová kola.....	13
2.2 Silniční a dráhová kola .....	14
2.3 Městská kola.....	14
2.4 BMX .....	14
<b>3 Mechanické vlastnosti.....</b>	<b>16</b>
3.1 Pevnost .....	16
3.2 Tuhost.....	16
3.3 Houževnatost.....	16
3.4 Útlum vibrací .....	16
3.5 Životnost.....	17
<b>4 Ashbyho metoda výběru materiálu .....</b>	<b>18</b>
4.1 Odvození konstrukčních požadavků.....	19
4.1.1 Materiálový indikátor.....	20
4.1.2 Tvarový faktor .....	20
4.1.3 Stabilita a lokální zborcení.....	20
4.2 Zpřesnění výběru aplikací omezení .....	21
4.3 Seřazení materiálů.....	22
4.4 Kontrola dokumentace.....	23
<b>5 Případová studie – rám jízdního kola .....</b>	<b>24</b>
5.1 Výběr materiálu pro lehký rám .....	24
5.1.1 Odvození konstrukčních požadavků .....	24
5.1.2 Zpřesnění výběru aplikací omezení.....	25
5.1.3 Seřazení materiálů .....	28
5.1.3.1 Výběr materiálu pro více namáhaný lehký rám .....	29
5.1.3.2 Výběr materiálu pro méně namáhaný lehký rám .....	30



5.1.4	Kontrola dokumentace .....	32
5.2	Výběr materiálu pro levný rám .....	34
5.2.1	Odvození konstrukčních požadavků .....	34
5.2.2	Zpřesnění výběru aplikací omezení.....	34
5.2.3	Seřazení materiálů .....	35
5.2.3.1	Výběr materiálu pro více namáhaný levný rám .....	35
5.2.3.2	Výběr materiálu pro méně namáhaný levný rám .....	36
5.2.4	Kontrola dokumentace .....	37
5.3	Kompromis mezi cenou a hmotností .....	38
<b>6</b>	<b>Rešerše materiálů používaných pro výrobu rámců kol .....</b>	<b>40</b>
6.1	Ocel.....	40
6.2	Hliník .....	41
6.3	Kompozitní materiály .....	42
6.4	Titan .....	43
6.5	Hořčík .....	43
6.6	Ostatní materiály .....	43
6.6.1	Bambus.....	43
6.6.2	Dřevo.....	43
6.6.3	Karton.....	44
6.6.4	Plast .....	44
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>45</b>
	Seznam použité literatury .....	47
	PŘÍLOHA č. 1 .....	i

## Přehled použitých zkratk a symbolů

$\sigma_c$	mez únavy [Pa]
$\sigma_k$	mez kluzu [Pa]
$\sigma_p$	mez pevnosti [Pa]
$\phi_{B_{max}}^e$	maximální tvarový faktor pro pružnou deformaci ohybem [-]
$\phi_{B_{max}}^f$	maximální tvarový faktor pro plastické porušení ohybem [-]
$\rho$	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
C	cena za jednotku hmotnosti [Kč/kg]
E	modul pružnosti v tahu (Youngův modul) [Pa]
CFRP	carbon fiber reinforced polymer
GFRP	glass fiber reinforced polymer
AFRP	aramid fiber reinforced polymer
Hi-Ten	High Tensile
BMX	Bicycle Moto Cross

## Seznam obrázků

Obr. 1: Wöhlerova křivka.....	17
Obr. 2: Postup při výběru vhodného materiálu Ashbyho metodou.....	19
Obr. 3: Přehledné zobrazení všech existujících skupin materiálů.....	21
Obr. 4: Omezení zobrazené v materiálové mapě vlastností E-ρ .....	22
Obr. 5: Řídící přímka reprezentující indikátor M .....	23
Obr. 6: Lomová a vrubová houževnatost materiálů .....	26
Obr. 7: Ukázka nízkých hodnot modulu pružnosti elastomerů a pěnových materiálů .....	26
Obr. 8: Izolování malé skupiny materiálů s excelentními pevností při nízké hmotnosti .....	27
Obr. 9: Izolování malé skupiny materiálů s excelentními tuhostí při nízké hmotnosti .....	27
Obr. 10: Výběr nejlepšího materiálu pro více namáhaný lehký rám .....	30
Obr. 11: Zesílené středové složení dráhových kol.....	31
Obr. 12: Výběr nejlepšího materiálu pro méně namáhaný lehký rám .....	32
Obr. 13: Ochrana karbonové rámové trubky .....	33
Obr. 14: Výběr nejlepšího materiálu pro více namáhaný levný rám .....	36
Obr. 15: Výběr nejlepšího materiálu pro méně namáhaný levný rám .....	36
Obr. 16: Výběr nejlehčího materiálu pro stanovenou maximální cenu .....	38
Obr. 17: Výběr nejlevnějšího materiálu pro stanovenou maximální hmotnost.....	39
Obr. 18: Hledání materiálu pro rám s nejlepším poměrem ceny a hmotnosti.....	39
Obr. 19: Schéma rozložení napětí při zatížení rámu v provozu .....	41
Obr. 20: Proměnlivá tloušťka stěn .....	41
Obr. 21: Únavová křivka oceli oproti hliníku .....	42

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Obecné konstrukční požadavky na rámy kol.....	15
Tabulka 2: Konstrukční požadavky na co nejlehčí rám a odvozené materiálové indikátory...	25
Tabulka 3: Skupiny materiálů, které umožňují výrobu lehkého rámu při splnění pevnostních a tuhostních požadavků .....	28
Tabulka 4: Konkrétní materiály pro následné seřazení podle materiálových indikátorů .....	29
Tabulka 5: Konstrukční požadavky na co nejlevnější rám a odvozené materiálové indikátory .....	34
Tabulka 6: Skupiny materiálů, které umožňují výrobu levného rámu při splnění pevnostních a tuhostních požadavků .....	34
Tabulka 7: Konkrétní materiály pro následné seřazení podle materiálových indikátorů .....	35
Tabulka 8: Seznam materiálů, které se pro výrobu rámu v praxi používají.....	45

# 1 Úvod

V souvislosti s rozvojem technologií je třeba nacházet nová konstrukční řešení a navrhovat zcela nové komponenty. Konstruktor se často pohybuje na neprobádaném území a nemůže se opřít o dosavadní poznatky. Při volbě materiálu se nelze inspirovat u podobných komponent, když žádné takové neexistují. Navíc se stále rozvíjí výrobní technologie a rozšiřuje nabídka materiálů. Ačkoliv by se mohlo zdát, že široká nabídka materiálů a výrobních možností je při konstruování výhodou, bez správných nástrojů je složité se v tak velkém množství informací orientovat.

Samotný materiál ovlivňuje až 80 % vlastností výsledné součásti (1). Materiálem je z velké části dána cena, hmotnost, vzhled, výrobní možnosti, životnost a celková povaha produktu. Právě proto je výběr správného materiálu tak důležitý.

Při výběru vhodného materiálu je třeba postupovat systematicky. Jedním z možných přístupů je metoda profesora Michaela F. Ashbyho z Univerzity v Cambridgi. Tato metoda, v bakalářské práci dále zvaná jako „Ashbyho metoda“, rozděluje výběr materiálu do několika kroků. Celou metodiku autor vysvětluje v knize *Materials Selection in Mechanical Design*. Jak bylo již zmíněno, nabídka materiálů použitelných v technické praxi se neustále rozšiřuje. Současně s vývojem zcela nových materiálů se zlepšují vlastnosti těch již existujících. Není v lidských silách pamatovat si takové množství informací, které se navíc pořád mění. Řešením je použití průběžně aktualizované databáze materiálů. Jednou takovou je databáze Ansys Granta EduPack (dříve CES EduPack) od společnosti Granta Design Limited, jejíž spoluzakladatelem je právě Michael F. Ashby. Databáze EduPack je přizpůsobena Ashbyho metodice a společně jsou dobrým nástrojem pro výběr materiálu.

## 1.1 Cíle práce

Práce si klade za cíl ověřit metodu výběru materiálu dle prof. Ashbyho. Metoda by měla fungovat i v případě, kdy je navrhována komponenta nebo součást zcela nová, a nelze se tedy spoléhat na dosavadní poznatky z této oblasti. Pokud je úkolem konstruktéra jen upravit již existující produkt, může zůstat materiál stejný, ale je třeba mít na paměti, že trh s materiály se v průběhu let mění. Ten, který byl nejlepší volbou před 10 lety, mohl být již dávno překonán. Zcela se spoléhat na osvědčené materiály je sice logický postup, ale vývoj si občas žádá vydat se novým směrem.

Díky propojení Ashbyho metody s databází materiálů EduPack lze celou problematiku vizualizovat, a to tvorbou tzv. materiálových map. Databáze poskytuje o materiálech veškeré údaje a je uzpůsobena provádění jednotlivých kroků Ashbyho metody.

Pokud mají být výsledky Ashbyho metody ověřeny, je nutné ji vyzkoušet při výběru materiálu pro takovou součást, která se běžně vyrábí. Jedině tak je možné porovnat dosažené výstupy se skutečným stavem věcí. V této práci je prezentován postup výběru materiálu pro rám jízdního kola. Poté je provedena rešeršní činnost zaměřená na běžně používané materiály rámu kol. Takto je posouzena přesnost Ashbyho metody výběru materiálů.

## 2 Rozdělení rámu jízdních kol

Na rámy jízdních kol jsou kladeny různé požadavky v závislosti na tom, kde a jak bude dané kolo provozováno. Záleží také na koncovém zákazníkovi, profesionální závodník bude mít jiné představy o vlastnostech kola než amatérský cyklista.

Cyklistika dnes zahrnuje mnoho odvětví. Lze ji rozdělit na horskou, dráhovou, silniční apod. Společným znakem všech rámu je snaha o dostatečnou tuhost v bočním směru. Pokud se při šlapání rám deformuje, přenos hnacích sil není efektivní, protože určitá jejich část je spotřebována na tuto elastickou deformaci. Při provozu je rám vystaven působení vlhkosti, proto musí být zajištěna dobrá protikorozní ochrana. Nabízí se použití korozivzdorných materiálů nebo povrchová úprava rámu. Důležitý je správný poměr pevnosti a hmotnosti, tedy kolo co nejlépe za současného splnění pevnostních požadavků. S klesající hmotností rámu roste jeho cena, protože snížit hmotnost a současně zachovat vysokou pevnost a tuhost mnohdy vyžaduje použití dražších materiálů nebo inovativních konstrukčních řešení. V rámu je potřeba vyvrtat otvory pro uchycení vybavení, například košíku na lahev, blatníků apod. Tyto otvory se chovají jako vruby, tedy koncentrují napětí. Z těchto vrubů se nesmí iniciovat lom, dalším požadavkem je tedy vrubová houževnatost. Jízda po nerovném povrchu způsobuje vibrace, které je pro komfortní jízdu třeba pohltit. Požadavky, které jsou postupně u jednotlivých typů kol zmiňovány, jsou přehledně shrnuty v tabulce 1.

### 2.1 Horská kola

Horská kola jsou určena pro jízdu v terénu po nezpevněných cestách. Segment horských kol se postupně rozdělil na níže popsané kategorie, z nichž každá klade na rámy mírně odlišné požadavky.

#### 2.1.1 XC (Cross country)

Do této kategorie spadá většina vyráběných horských kol. Rám by měl být lehký pro snazší jízdu do kopce a zároveň dostatečně pevný.

Jízda po nerovnostech způsobuje otřesy a vibrace, které musí rám v co největší míře pohltit. Pokud by je pouze přenesl, jízda by byla značně nepohodlná. Vibrace jsou pohlcovány materiálovým pružením, není tedy žádoucí, aby rám byl dokonale tuhý. Průměrná rychlost jízdy v terénu není velká, takže není třeba přizpůsobovat tvar rámových trubek aerodynamice.

#### 2.1.2 Sjezdová kola

V této kategorii kol je na prvním místě pevnost. Při závodech ve sjezdu se jezdci pohybují vysokými rychlostmi v těžkém terénu a snaží se dosáhnout co nejrychlejšího času. Při dopadech nebo přejíždění překážek (kořenů) jsou rámy vystaveny extrémnímu zatížení rázového charakteru. Boční tuhost není tak důležitá, jelikož se při sjezdových závodech šlape jen minimálně. Nízká hmotnost je výhodou, kolo je pak obratnější a lépe ovladatelné. O pohlcování nárazů a otřesů se z většiny stará odpružení. Na tlumení vibrací materiálem není kladen důraz, sjezdové závody jsou krátké a pohodlí jezdce může být upozaděno.

Sjezdovým kolům jsou podobná tzv. freeride kola. V případě freeride závodů jde též o sjezd v těžkém terénu, ale neměří se dosažený čas. Jezdci musí cestou provádět triky, které jsou hodnoceny dle obtížnosti. Kola jsou tedy vystavena rázovým přetížením při dopadech, a proto je opět požadována vysoká pevnost.

## 2.2 Silniční a dráhová kola

Do tohoto segmentu patří kola určená pro jízdu po zpevněném povrchu a jejich rámy tedy nepotřebují odpružené součásti. Aerodynamičnost zde hraje už větší roli. Protože se cyklisté pohybují převážně po zpevněném povrchu, rám kola není vystavován rázům jako v předchozí kategorii. Na pevnost tedy nejsou kladeny takové nároky, jako u horských kol.

U silničních kol je kvůli absenci tlumičů potřeba, aby rázy a vibrace byly co nejvíce utlumeny materiálem. Ve vertikálním směru tedy rám musí mírně pružit. Dlouhé jízdy na silničním kole nesmí být nepohodlné. Toto platí i v závodní kategorii, protože hodiny nepohodlí v sedle plýtvají cyklistovou energií více, než elastické deformování rámu při šlapání. Hmotnost silničních kol musí být minimální.

U dráhových kol je profil rámových trubek kompletně podřízen aerodynamice. Pohodlí závodníka je zcela upozaděno ve prospěch co nejvyššího výkonu. Tuhost rámu je maximální ve všech směrech, aby bylo zajištěno, že veškerá energie se využije pro pohyb vpřed. Hmotnost musí být co nejnižší, protože v závodech na dráze je často nutné prudce akcelarovat. Při zrychlení působí na každý hmotný objekt setrvačná síla, která se ho snaží udržet v původním pohybovém stavu. Tato síla je přímo úměrná hmotnosti a je tedy zřejmé, že těžší kolo by závodníka brzdilo.

## 2.3 Městská kola

Tato kola jsou čistě dopravním prostředkem. Na aerodynamiku ani nízkou hmotnost se při konstrukci nehledí. Charakter jízdy neklade vysoké nároky ani na pevnost. Kolo by mělo být hlavně levné, důležitá je také korozivzdornost.

## 2.4 BMX

Zkratka BMX znamená Bicycle Moto Cross. Tato kola se původně vyvinula jako levnější alternativa přípravy na motokrosové závody. Rám je menších rozměrů, kolo je celkově obratné a uzpůsobené skokům a provádění triků. Jen menšina zájemců o BMX na těchto kolech profesionálně závodí. Pro většinu jezdců jde o životní styl, koníček, který si musí platit z vlastních zdrojů. BMX jsou oblíbená především u mladší generace, proto by mělo jít o kolo z nižší cenové kategorie. Z charakteru jízdy zase plyne, že rám musí být pevný. Vysoká tuhost v bočním směru není vyžadována, mírné ztráty šlapacích sil lze tolerovat. Rámy nemají odpružení, vibrace tedy musí být pohlcovány materiálovým pružením rámu ve vertikálním směru.

Tabulka 1: Obecné konstrukční požadavky na rámy kol

Typ kola	Obecné konstrukční požadavky na rámy kol				
	Vysoká pevnost	Vysoká tuhost	Útlum vibrací	Nízká hmotnost	Nízká cena
XC	✓		✓	✓	
Sjezdové	✓			✓	
Silniční		✓	✓	✓	
Dráhové		✓		✓	
BMX	✓		✓		✓
Městské					✓

## 3 Mechanické vlastnosti

### 3.1 Pevnost

Pevnost je odpor materiálu proti porušení působením vnějších sil. Při namáhání materiálu je postupně dosaženo určitých mezí napětí. Mez kluzu ( $\sigma_k$ ) je hranicí mezi pružnou a plastickou deformací a mez pevnosti ( $\sigma_p$ ) je hodnota zatížení, při kterém dochází k porušení materiálu (2). Vyšší pevnost znamená, že materiál přenesení větší zatížení bez plastické deformace, popř. bez porušení. Tuto vlastnost lze ovlivnit tepelným zpracováním materiálu nebo jeho tvářením za studena. Zatěžování se dělí na statické a dynamické. Rám kola je staticky namáhán působením tíhy jezdce. Dynamické namáhání je způsobeno cyklickým šlapáním a rázy od nerovností při jízdě. Důležitým pojmem je únava materiálu, což je porušení způsobené opakovaným zatěžováním pod mezí kluzu. U rámu většinou nehrozí selhání vlivem překonání meze kluzu, ale právě únavové porušení. Proto je u materiálů jízdních kol posuzována mez únavy ( $\sigma_c$ ).

### 3.2 Tuhost

Tuhost vyjadřuje odolnost proti deformacím. Větší tuhost znamená, že pro deformaci určité velikosti je zapotřebí větší působící síly. Tuhost závisí na modulu pružnosti (Youngův modul), což je poměr napětí a jím vyvolané deformace. Pro většinu ocelí je hodnota modulu pružnosti v tahu kolem 200 GPa, a to bez ohledu na předchozí tepelné zpracování nebo tvářením za studena (3). U rámu je žádoucí, aby se tuhost lišila v různých směrech. Boční (laterální) tuhost má být co nejvyšší, aby byla veškerá síla do pedálů okamžitě a bez ztrát přenesena do pohybu vpřed (4). Ve vertikálním směru je zapotřebí jistá pružnost rámu, který tak pohltí vibrace a rázy a jízda bude komfortnější. Kromě volby materiálu je tuhost při určitém typu zatěžování ovlivněna také geometrií, proto mívají rámové trubky často jiný tvar průřezu než jednoduchý kruhový.

### 3.3 Houževnatost

Houževnatost vyjadřuje schopnost materiálu odolat nárazům a deformacím bez tvorby trhlin. Značí množství potřebné práce pro přetržení součásti. Lomová houževnatost znamená, že již existující trhliny se materiálem tolik nešíří. Spolu s vrubovou houževnatostí, která vyjadřuje citlivost materiálu na koncentrátoři napětí (vruby), jsou tyto vlastnosti pro rám kola důležité. Opakem houževnatosti je křehkost. Křehké materiály mohou mít vysokou mez kluzu, tedy vysokou pevnost, ale při rázovém zatížení se snadno porušují. To je činí nevhodnými pro použití ve výrobě rámu kol.

### 3.4 Útlum vibrací

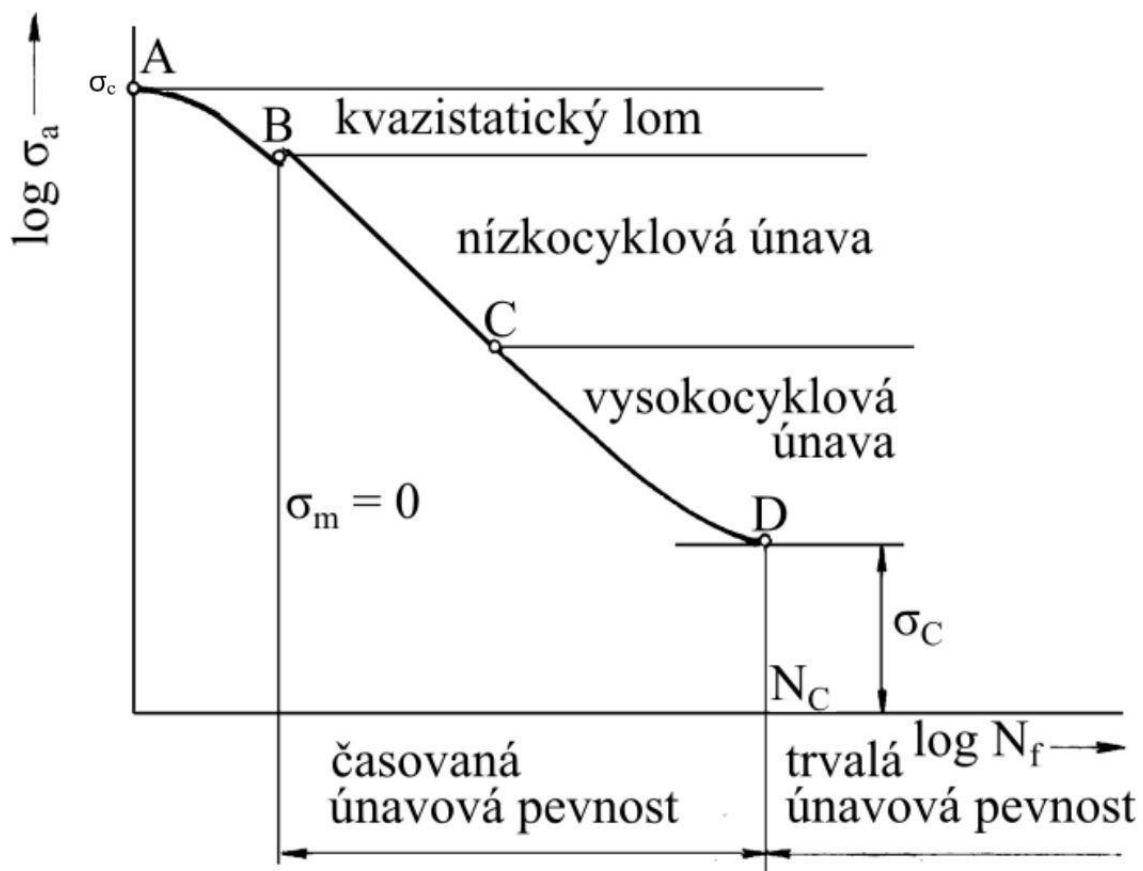
Průvodním jevem přenosu dynamického zatížení je rozkmitání namáhané konstrukce. Mechanismy tlumení vibrací jsou různé. V materiálu samotném dochází k tlumení na nehomogenitách ve struktuře. Tím jsou myšleny precipitáty nebo krystalové anizotropie. Vibrace jsou zde přeměněny v tepelnou energii (5). Svarové či šroubové spoje jednotlivých komponent vibrace odráží. Další možností útlumu je změna průřezu namáhané součásti nebo vložení pružného elementu do konstrukce (6) (7). Nejúčinnějším způsobem útlumu rázů je pružení celé komponenty nebo konstrukce. Energie vibrací je použita na elastickou deformaci, lepší tlumící efekt tedy mají pružnější materiály, zatímco ty tuhé vibrace jen přenášejí. Míra utlumení vibrací a otřesů má značný vliv na pohodlí cyklisty.



### 3.5 Životnost

Pokud je materiál vystaven namáhání nad mezí kluzu, logicky dojde k jeho plastické deformaci a při dalším zvyšování působící síly také k lomu. Porušení však může nastat i po zatěžování pod mezí kluzu, pokud je toto zatížení aplikováno opakovaně. Tento jev se nazývá únava materiálu a jím způsobené porušení je únavový lom. Životnost konstrukce je doba, po kterou materiál porušení odolává. Mez únavy ( $\sigma_c$ ) určuje, při jaké hodnotě napětí je materiál schopný vydržet nekonečný počet zátěžných cyklů (8). Na Obr. 1 je Wöhlerův diagram znázorňující hodnoty napětí a počty zátěžných cyklů, které je materiál schopen pod zatížením absolvovat. Přesná hodnota meze únavy se stanovuje experimentálně prováděním únavových zkoušek. Dle Wöhlera lze mez únavy orientačně určit z meze kluzu v tahu, a to pomocí vzorce  $\sigma_c = (0,4 \div 0,5) \cdot \sigma_k$  (9).

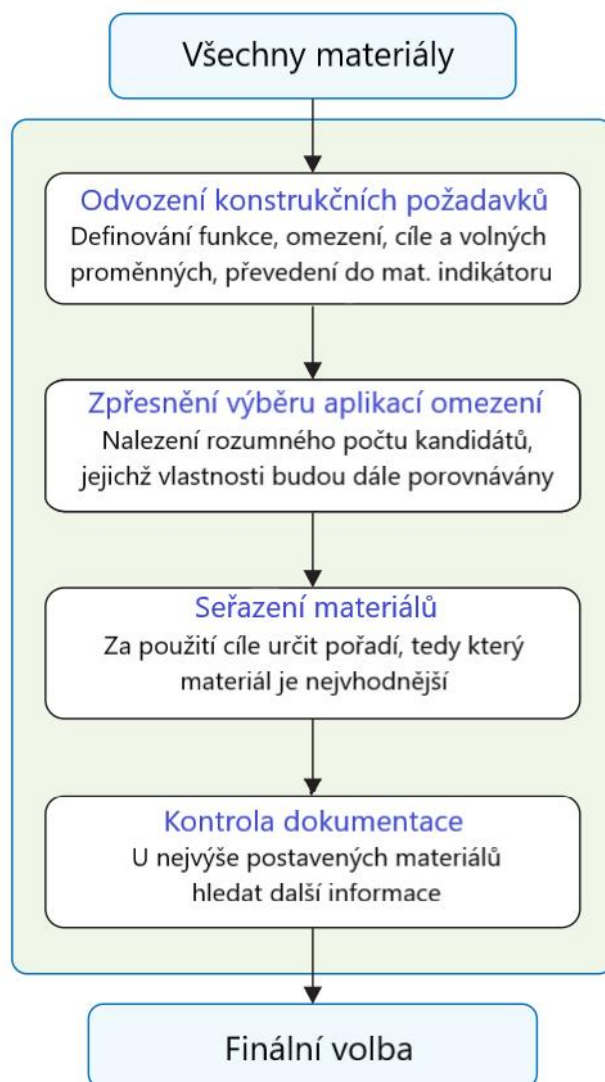
Jiné zdroje uvádí vztah mezi únavovou pevností a mezí pevnosti v tahu, a to:  $\sigma_c = 0,5 \cdot \sigma_p$  (10 str. 194).



Obr. 1: Wöhlerova křivka

## 4 Ashbyho metoda výběru materiálu

Při navrhování nové součásti (komponenty) musí konstruktér mimo jiné vybrat materiál, ze kterého má být součást vyrobena. K volbě materiálu lze přistupovat různými způsoby. V této práci je předvedena metoda prof. Ashbyho. Výběr vhodného materiálu Ashbyho metodou se skládá z několika kroků. Na začátku jsou stanoveny konstrukční požadavky na vyráběnou součást. Za konstrukční požadavky prof. Ashby považuje následující parametry: funkce součásti, omezení, cíle a volné proměnné. Následuje převedení těchto konstrukčních požadavků do materiálového indikátoru. Poté je třeba z množiny všech existujících materiálů vyřadit ty, které svými vlastnostmi nevyhovují. K tomu jsou využita omezení stanovená v prvním kroku. Omezení je limit určité vlastnosti, například pevnosti. Vyřazeny jsou pak materiály s pevností nižší než určuje omezení. Takto je zúžen okruh vhodných kandidátů, kteří jsou v dalším kroku seřazeny od nejvhodnějšího. Nejvhodnější materiál je takový, který nejlépe vyhovuje stanovenému cíli za současného splnění omezení. Obvykle je cílem minimální výsledná hmotnost, popř. cena komponenty. Seřazení probíhá na základě dosazení hodnot vlastností materiálu do materiálového indikátoru. Výsledkem tohoto kroku je žebříček vhodných materiálů seřazený od nejlepšího. Nejvýše postavené kandidáty je třeba důkladněji prostudovat, což je provedeno v posledním kroku – kontrola dokumentace. Ta má za úkol odhalit případné nedostatky. Ashbyho metodu lze obecně shrnout jako hledání shody mezi konstrukčními požadavky a vlastnostmi určitého materiálu. Celý proces je znázorněn na Obr. 2.



Obr. 2: Postup při výběru vhodného materiálu Ashbyho metodou (11 str. 103)

#### 4.1 Odvození konstrukčních požadavků

Jak bylo již zmíněno výše, konstrukčními požadavky jsou myšleny funkce komponenty, omezení, cíle a volné proměnné. Funkce vystihuje hlavní účel komponenty, tedy k čemu ve výsledku slouží. Například funkcí pružiny je akumulace energie, u zrcadla je to odraz světla, funkcí vesla je přenést ohybové namáhání. Dále je třeba stanovit omezení. Každý materiál je definován svými vlastnostmi, například mechanickými, fyzikálními či optickými. Navzájem se materiály liší náročností zpracování, cenou, uhlíkovou stopou nebo recyklovatelností. Výsledná součást musí mít pro plnění své funkce určité vlastnosti, například pevnost nebo tuhost. Ty jsou z většiny dány materiálem, ze kterého je vyrobena. Konstruktor stanoví omezení, tedy požadavky na vlastnosti, které musí materiál splnit, aby z něho mohla být součást vyrobena. Omezením může být minimální hodnota meze pevnosti, stupeň korozivzdornosti, odolnost proti kyselému prostředí nebo maximální cena za kilogram. Dalším krokem je stanovení cíle, tedy parametru výsledné součásti, který je třeba maximalizovat nebo minimalizovat. Cílem může být vytvoření součásti co nejlehčí, nejlevnější, nejbezpečnější. Je také možné hledat co nejlepší kombinaci výše zmíněného (12 str. 39). Do volných proměnných spadají ty parametry, které nejsou předem dány a volí je konstruktor. Patří sem většinou tvar a velikost průřezu, tloušťka

stěny dutých profilů a hlavně konečná volba materiálu. Z konstrukčních požadavků je odvozen materiálový indikátor.

Názorným příkladem je výběr materiálu pro lehký tuhý nosník zatížený ohybem. Funkcí je samotný přenos ohybového momentu. Tuhost je omezením, minimální hmotnost je cílem. Volnými proměnnými jsou tvar a velikost průřezu součásti.

#### 4.1.1 Materiálový indikátor

Materiálový indikátor je vztah odvozený z funkce, omezení, cíle a volných proměnných. Hodnota indikátoru pro určitý materiál je získána dosazením jeho vlastností do tohoto vztahu. Materiály se hodnotami svých indikátorů navzájem liší a lze je takto porovnat a seřadit. Nejvýše postavený kandidát, tedy ten s nejvyšší hodnotou indikátoru, nejlépe vyhovuje stanovenému cíli. Při porovnávání materiálů je důležité zohlednit nejen jejich mechanické a další vlastnosti, ale i tzv. tvarový faktor. Ten určuje, jak efektivní průřez z nich lze vytvořit. Při určitém směru zatížení jsou některé průřezy efektivnější než jiné, neboli poskytují lepší tuhost a pevnost při stejné hmotnosti. Vše je vysvětleno v následující kapitole.

#### 4.1.2 Tvarový faktor

Tvar součásti ovlivňuje její chování v mnoha ohledech. Pokud na součást působí vnější síly, pak ve struktuře vzniká mechanické napětí. Když toto napětí překročí mez pevnosti, dojde k porušení součásti. Výpočet napětí se liší v závislosti na způsobu namáhání, tedy zda se jedná o tah, smyk, ohyb, krut nebo jejich kombinaci. Ze vztahů pro výpočet namáhání ohybem a krutem vyplývá, že velkou roli hraje tvar průřezu. Jinými slovy komponentu lze tvarovat tak, aby při stejném ohybovém nebo kroutícím momentu byly vzniklé deformace a napětí nižší. Nemusí vždy jít jen o napjatost, tvar má vliv i na další vlastnosti. Například lepší odvod tepla lze řešit žebrovaním a zabránit tak přehřátí součásti. Tvar má vliv také na elektrickou kapacitu, optické vlastnosti, schopnost šířit nebo naopak pohltit zvuk (11 str. 244).

Tvarový faktor je bezrozměrná veličina určující, jak efektivně je materiál využitý. Vypočítá se tak, že zvolený průřez je porovnáván s plným čtvercovým průřezem o momentu setrvačnosti  $I_0$  a shodné ploše  $A=A_0$  (11 str. 248). Takový porovnávací průřez má vždy tvarový faktor  $\Phi=1$ . Efektivnost spočívá v použití co nejmenšího množství materiálu pro dosažení potřebné tuhosti nebo pevnosti (13). Jinými slovy průřez 1 je efektivnější než průřez 2 tehdy, když mají oba shodnou hmotnost, ale průřez 1 se při stejném zatížení méně deformuje a v jeho struktuře vzniká nižší napětí. Efektivita průřezu má své limity, což je vysvětleno v kapitole Stabilita a lokální zborcení. Tvarový faktor je třeba zahrnout do materiálového indikátoru. Určité materiály mohou mít například horší mechanické vlastnosti, ale lze z nich vyrobit součásti s efektivnějšími průřezy, jejich materiálový indikátor má tak nakonec vyšší hodnotu.

Není vždy cílem dosáhnout co nejvyššího tvarového faktoru. U pružin nebo drátů je cílem co nejvyšší pevnost, ale tvar a průřez musí být uzpůsobeny elastickému deformování.

#### 4.1.3 Stabilita a lokální zborcení

Tvarový faktor nelze zvyšovat do nekonečna, jeho horní limit je dán stabilitou. Při zatížení se součást elasticky deformuje, a právě tato deformace může způsobit, že se napětí bude koncentrovat v jednom konkrétním místě. V tomto místě pak hrozí lokální zborcení, a to aniž by došlo k překročení hodnoty meze kluzu materiálu. Z uvedeného vyplývá, že značný vliv na stabilitu má Youngův modul, který ovlivňuje tuhost součásti a tím její vychýlení pod zatížením. Materiály s vyšším modulem pružnosti se méně elasticky deformují a je možné z nich vytvořit efektivnější průřezy s vyšším tvarovým faktorem. Pro účely této práce je důležité znát

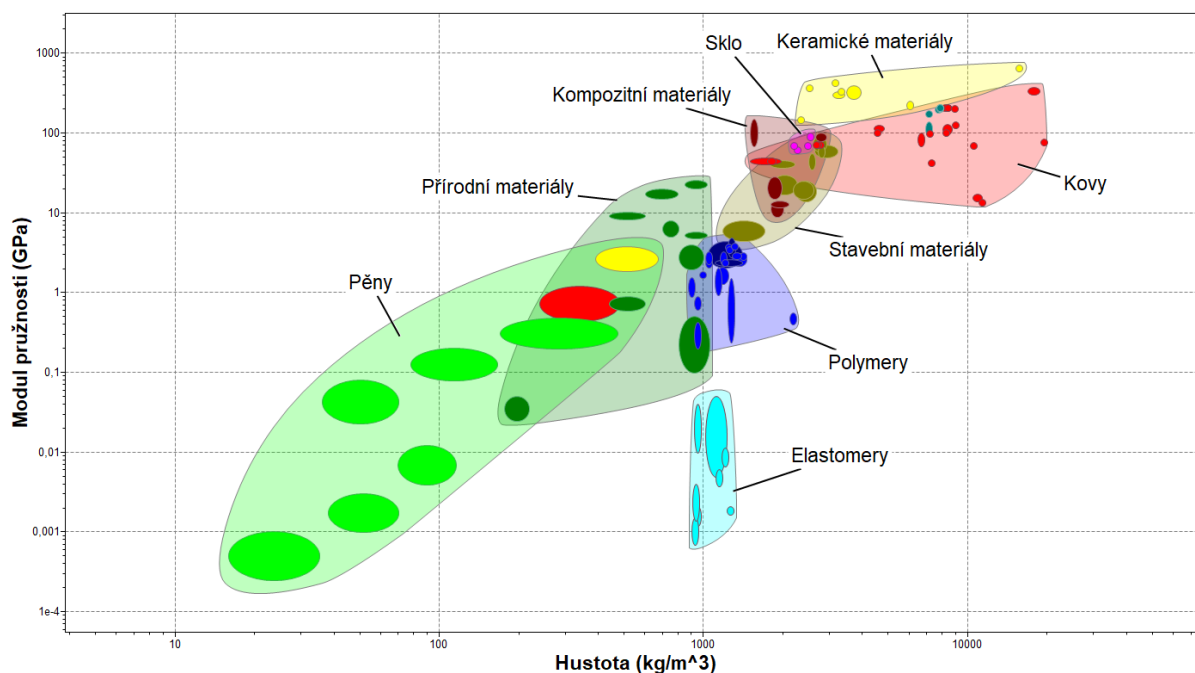
maximální tvarové faktory  $\Phi_{B_{max}}^e$  a  $\Phi_{B_{max}}^f$  a jejich výpočet, který je uveden níže. Jsou to tvarové faktory pro pružnou deformaci a plastické porušení ohybem. Maximální tvarový faktor určuje, jaký nejefektivnější průřez lze z daného materiálu vytvořit, aniž by při zatížení došlo k lokálnímu zborcení součásti.

$$\Phi_{B_{max}}^e = 2,3 \cdot \left(\frac{E}{\sigma_p}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Phi_{B_{max}}^f = \sqrt{2,3 \cdot \left(\frac{E}{\sigma_p}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (11 \text{ str. } 260)$$

## 4.2 Zpřesnění výběru aplikací omezení

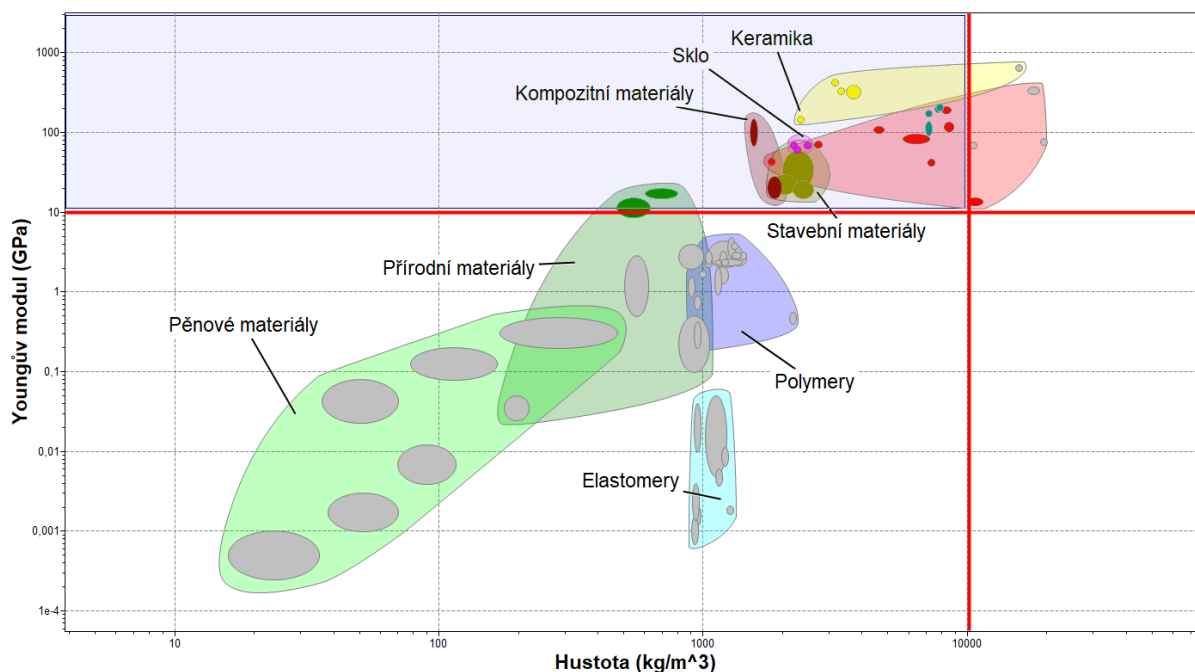
Do fáze zpřesňování vstupují všechny existující materiály. Databáze CES EduPack eviduje přes 4000 různých materiálů. V mapě na Obr. 3 jsou zobrazeny hlavní skupiny materiálů, ze kterých je možné vybrat ten finální.



Obr. 3: Přehledné zobrazení všech existujících skupin materiálů

Se známými konstrukčními požadavky je možné přistoupit ke snížení počtu kandidátů. Ze všech existujících materiálů jsou aplikací omezení vyřazeny ty, které pro své vlastnosti nevyhovují. Aplikace omezení je dobře proveditelná v databázi materiálů Granta EduPack (14). Je zde možnost určení minimálních nebo maximálních hodnot mechanických i jiných vlastností materiálů. Aplikace omezení s využitím databáze Granta EduPack je předvedena níže.

Úkolem je vybrat vhodný materiál pro lehký a tuhý nosník. Pro aplikování omezení je třeba vytvořit materiálovou mapu, která ukazuje závislost tuhosti na hustotě (Obr. 4). Pokud je omezením například hodnota modulu pružnosti  $10 \text{ GPa}$ , z výběru jsou vyřazeny následující skupiny materiálů: pěny, elastomery, polymery. Další omezení v podobě maximální hustoty  $10000 \text{ kg/m}^3$  z výběru eliminuje některé kovové a keramické materiály. Pro další kroky výběru zůstávají materiály stavební, keramické, přírodní, kompozitní a sklo.



Obr. 4: Omezení zobrazené v materiálové mapě vlastností E-ρ

### 4.3 Seřazení materiálů

Do fáze seřazení materiálů vstupují materiály, které nebyly vyřazeny aplikací omezení v předchozím kroku. Pro seřazení je využit materiálový indikátor, který je odvozen z konstrukčních požadavků. Tento krok navazuje na krok předchozí, úkolem je stále výběr materiálu pro lehký a tuhý nosník. Konečná podoba materiálového indikátoru pro lehký tuhý nosník zatížený ohybem, s možností volby průřezu a materiálu, je:

$$M = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (11 \text{ str. } 561)$$

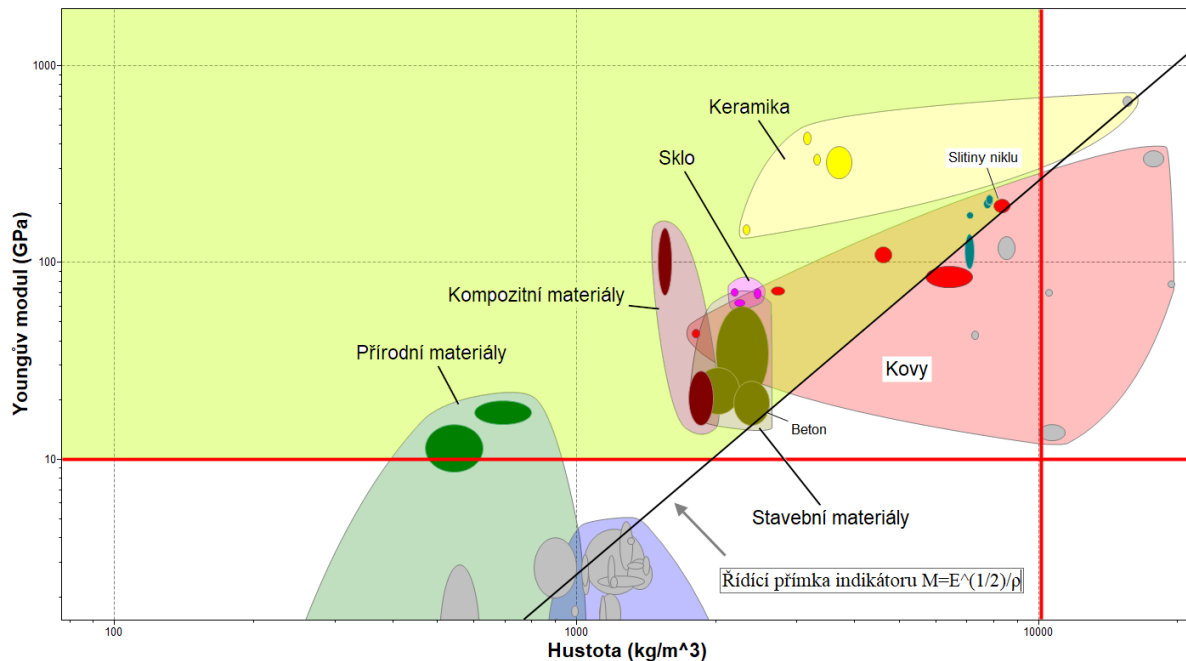
Pro zjednodušení zde není zahrnut tvarový faktor. Je stále využívána mapa vlastností  $E-\rho$ . Materiálový indikátor je v této mapě reprezentován přímkou s určitým sklonem (Obr. 5). Rovnice přímky ve směnicovém tvaru je  $y = kx + q$ , kde  $k$  určuje sklon. Pro získání sklonu (směrnice) přímky je třeba materiálový indikátor postupně přepsat do směnicového tvaru. Indikátor lze upravit jako:

$$M = E^{1/2} \cdot \rho^{-1}$$

Osy v materiálové mapě  $E-\rho$  jsou v logaritmickém měřítku. Po zlogaritmování a úpravách má materiálový indikátor tvar

$$\log(E) = 2 \log(\rho) + 2 \log(M)$$

a hledanou směrnici je zde koeficient 2. Přímkou, které v mapě reprezentují materiálový indikátor, se nazývají řídicí přímky výběru. Všechny materiály ležící na řídicí přímce mají stejnou výkonnost pro lehké a tuhé nosníky. Materiály nad přímkou mají vlastnosti lepší, ty pod přímkou pak horší (12 str. 56). Posouváním přímky vzhůru je možné izolovat malou skupinu kandidátů, jenž mají pro dané použití excelentní vlastnosti. Toho se s výhodou využívá v případě, že po aplikaci omezení stále zbývá velká skupina kandidátů. Po dosažení hodnot mechanických vlastností do materiálového indikátoru je možné kandidáty porovnat a seřadit od nejlepšího.



Obr. 5: Řídící přímka reprezentující indikátor M

#### 4.4 Kontrola dokumentace

V tuto chvíli je zkompletován seznam vhodných materiálů, které jsou po předchozím kroku seřazeny od nejvhodnějšího. Důkladná kontrola dokumentace každého vybraného kandidáta pomůže odhalit případné nedostatky (12). Jde například o špatnou svařitelnost, která nedovolí výrobu zamýšleného tvaru. Některé materiály mohou křehnout při nižších teplotách nebo mít sklon k tečení při vyšších teplotách. Databáze nemůže obsahovat informace o lokální nabídce materiálů, a právě dostupnost materiálu v dané oblasti je třeba ověřit. Závažné nedostatky je lepší zjistit prostudováním dokumentace, než selháním komponenty v pozdějším provozu. Naopak zde může být informace o tom, že materiál je pro výrobu dané součástky běžně používán, což potvrdí správnost jeho výběru. Dokumentací jsou myšleny materiálové databáze s komplexními informacemi nebo případové studie použití daných materiálů v praxi (11 str. 105). Užitečné informace poskytují i protokoly o provedených mechanických zkouškách a katalogy výrobců, kde jsou uvedeny ceny a informace o dostupnosti (12 str. 58).

## 5 Případová studie – rám jízdního kola

Pro ověření Ashbyho metody výběru materiálu je třeba zvolit existující komponentu, aby bylo možné porovnat dosažené výsledky s realitou. Touto existující komponentou je rám jízdního kola.

### 5.1 Výběr materiálu pro lehký rám

V této kapitole je vybírán materiál pro rám kola s ohledem na minimální konečnou hmotnost. V první fázi jsou stanoveny konstrukční požadavky, tedy funkce, omezení, cíl a volné proměnné. Z konstrukčních požadavků je odvozen materiálový indikátor. Ze všech existujících materiálů jsou aplikací omezení vyřazeny ty nevhodné. Zbylé materiály jsou porovnány na základě materiálového indikátoru a seřazeny. U několika kandidátů na předních místech je prostudována dokumentace. Poté je vybrán konečný materiál, který splní všechny požadavky a současně umožní výrobu rámu s nejnižší výslednou hmotností.

#### 5.1.1 Odvození konstrukčních požadavků

Rám kola se skládá z jednotlivých rámových trubek spojených nejčastěji svařováním do výsledného tvaru lichoběžníku. Pro účely této práce je rám pomyslně rozdělen na jednotlivé trubky. Komponentou, pro kterou je vybírán nejvhodnější materiál, je samotná rámová trubka. Dominantním typem namáhání každé rámové trubky je ohyb (10 str. 194), z toho může být odvozena funkce, tedy přenos ohybového momentu.

Základním předpokladem je, že rám se vlivem působících sil neporuší, tedy má určitou pevnost. Důležitá je zejména pevnost únavová. Občas může dojít k překročení meze pevnosti, například při dopadu z větší výšky. Většinou však za porušením stojí únavový lom. Rám je totiž vystaven vysokému počtu zátěžných cyklů pod mezí kluzu.

Rám se dále nesmí vlivem šlapacích sil příliš elasticky deformovat, protože každá deformace snižuje účinnost přenosu sil z pedálů na zadní kolo. Z toho plyne požadavek na tuhost. Pevnost a tuhost jsou dvě omezení a obě musí být splněny současně pro bezproblémové fungování kola.

Cílem je výše zmiňovaná minimální hmotnost. Každá rámová trubka musí být dostatečně pevná a tuhá, obojí při zachování co nejnižší hmotnosti. Volnost má konstruktér v návrhu tvaru a rozměrů průřezu trubky a samozřejmě ve volbě materiálu.

Takto byly stanoveny konstrukční požadavky na rám kola, který má ve výsledku být co nejlehčí. Z konstrukčních požadavků lze odvodit materiálové indikátory (11 str. 561). Počet indikátorů je shodný s počtem hlavních omezení (v tomto případě 2). Vše je přehledně shrnuto v tabulce 2 Tabulka 2.



Tabulka 2: Konstrukční požadavky co nejlhčí rám a odvozené materiálové indikátory

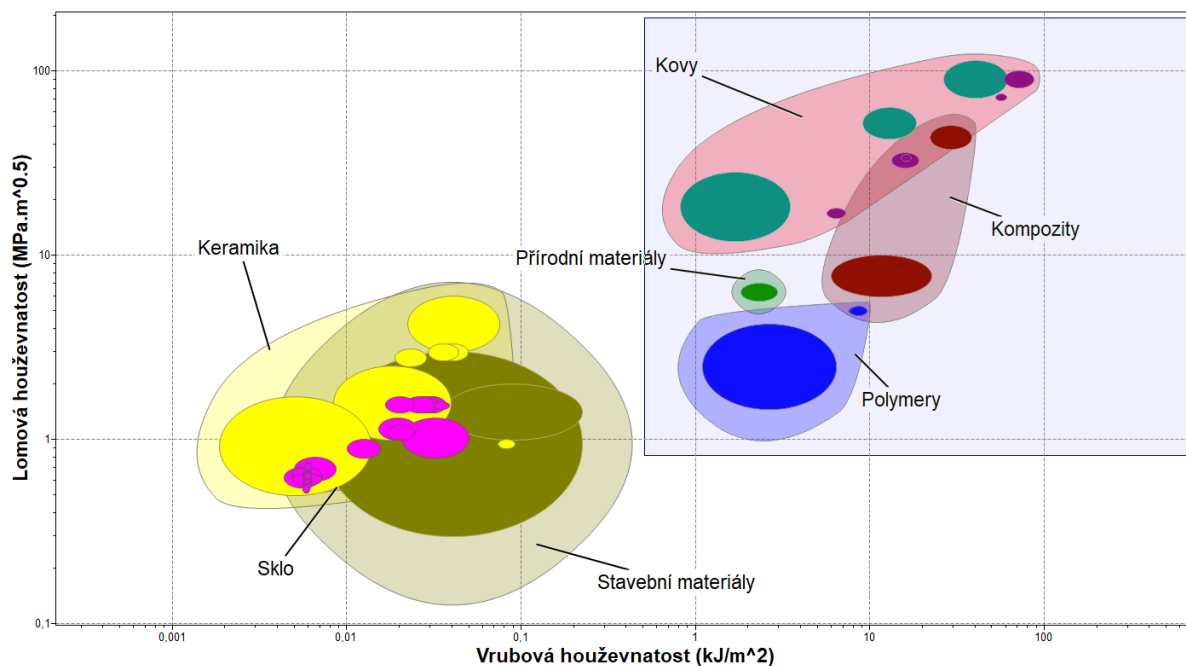
Konstrukční požadavky	Funkce	Přenos ohybového momentu
	Omezení	Pevnost – nepřekročena $\sigma_k$ ani $\sigma_c$
		Tuhost – malé hodnoty elastické deformace
	Cíl	Minimální konečná hmotnost
	Volné proměnné	Volba materiálu
Tvar a rozměry průřezu		
Materiálové indikátory	Pevnost	$M_1 = \sigma_c^{2/3} / \rho$
	Tuhost	$M_2 = E^{1/2} / \rho$
	Pevnost + tvar	$M_3 = (\Phi_{B_{max}}^f \cdot \sigma_c)^{2/3} / \rho$
	Tuhost + tvar	$M_4 = (\Phi_{B_{max}}^e \cdot E)^{1/2} / \rho$

V rámci procesu výběru jsou v programu Granta EduPack tvořeny materiálové mapy. Ty jsou nezbytné pro určité kroky výběru, navíc je díky nim jednodušší se v problematice orientovat. Postup výběru je ovlivněn hlavně faktem, že existují dvě hlavní omezení – tuhostní a pevnostní.

### 5.1.2 Zpřesnění výběru aplikací omezení

Rámová trubka musí současně splnit pevnostní a tuhostní požadavky, tedy nesmí dojít k jejímu porušení nebo nadměrné deformaci. Z charakteru provozování kola plynou ještě další omezení. Rám musí odolávat vlhkému prostředí bez vzniku koroze, nabízí se tedy vyřazení všech nekoroziivzdorných materiálů. To by však bylo zbytečně ukvapené rozhodnutí, protože odolnost proti korozi lze vyřešit například ochranným nátěrem. Vždy je třeba ponechat co nejvíce možností a aplikovat jen ta omezení, která jsou pro správné fungování součástí nezbytná, a nelze je nijak obejít (11 str. 117).

V každém rámu budou při jeho výrobě vznikat jisté mikroskopické vady (defekty), nejčastěji při svařování jednotlivých trubek. Z toho plyne důležitá vlastnost, kterou by měl materiál pro rám mít, a to lomová houževnatost (15 str. 34). Ta vyjadřuje odolnost proti iniciaci lomu z existujícího defektu (16). Trendem v oblasti cyklistiky je dnes vedení brzdových a dalších lanek kvůli jejich ochraně vnitřkem rámových trubek. Pro vstup lanka musí být vyvrtán otvor, který se při namáhání rámové trubky bude chovat jako vrub a koncentrovat napětí. Další otvory, a tedy další vruby, jsou nutné pro uchycení košíku na lahev. Z výše uvedeného plyne, že bude posuzována také vrubová houževnatost. Lomová a vrubová houževnatost je znázorněna na Obr. 6, vlastnosti se zlepšují směrem k pravému hornímu rohu. Je patrné, že z výběru musí být pro křehkost vyřazeny všechny stavební materiály, keramika (17 str. 16) a sklo. Kvůli nízké tuhosti nepřipadají v úvahu pěnové materiály ani elastomery (Obr. 7).

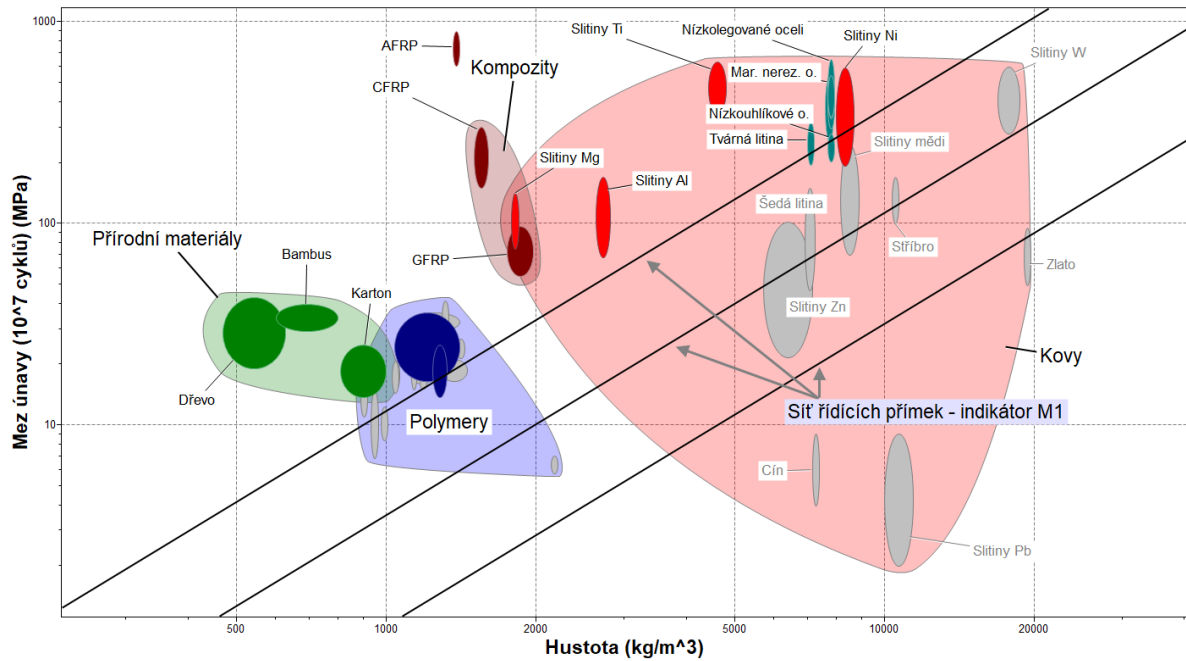


Obr. 6: Lomová a vrbová houževnatost materiálů

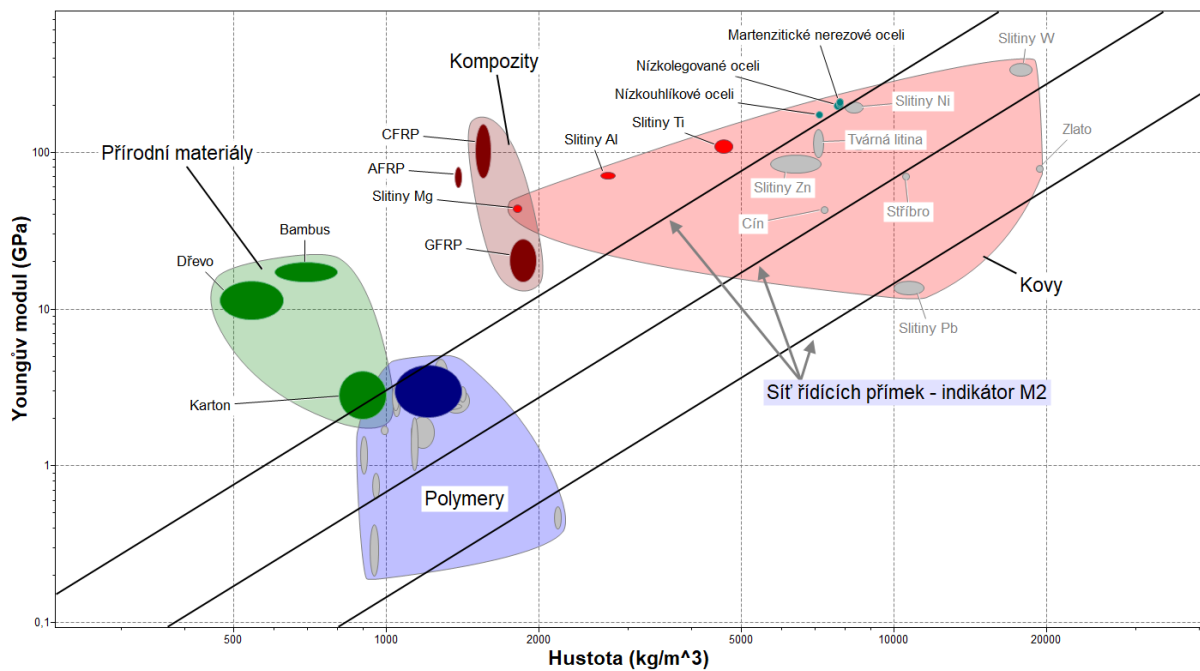


Obr. 7: Ukázka nízkých hodnot modulu pružnosti elastomerů a pěnových materiálů

Z hlavních skupin materiálů zůstávají kovy, kompozity, polymery a přírodní materiály. Ačkoliv byla aplikována všechna známá omezení, množina zbylých materiálů zůstává stále příliš velká. Pro izolování menšího počtu excelentních kandidátů je třeba vytvořit vhodné materiálové mapy a vynést řídicí přímky. Pro pevnostní omezení je vynášen indikátor  $M_1$  do mapy  $\sigma_c - \rho$  (Obr. 8). Pro tuhostní omezení je vynášen indikátor  $M_2$  do mapy  $E - \rho$  (Obr. 9).



Obr. 8: Izolování malé skupiny materiálů s excelentními pevnostmi při nízké hmotnosti



Obr. 9: Izolování malé skupiny materiálů s excelentními tuhostmi při nízké hmotnosti

V tabulce 3 Tabulka 3 je izolovaný okruh materiálů, ze kterých je možné vyrobit lehký rám kola. Výběr materiálů vznikl jako průnik nevyřazených materiálů z Obr. 8 a Obr. 9. Jedná se o materiálové skupiny, ještě tedy nejde o konkrétní zástupce. Materiály z tabulky 3 Tabulka 3 jsou v dalším kroku porovnány mezi sebou a seřazeny od nejlepšího k nejhoršímu.

Tabulka 3: Skupiny materiálů, které umožňují výrobu lehkého rámu při splnění pevnostních a tuhostních požadavků

Kompozity
Slitiny titanu
Slitiny hliníku
Slitiny hořčíku
Polymery
Martenzitické nerezové oceli
Uhlíkové oceli
Nízkolegované oceli
Přírodní materiály

### 5.1.3 Seřazení materiálů

Tato kapitola porovnává a řadí materiály z tabulky 4 Tabulka 4. Na tomto místě je provedena rešerše běžně používaných materiálů. Ashbyho metoda odhalila vhodné skupiny materiálů, nyní je třeba z každé skupiny zvolit konkrétního zástupce. Z materiálů uvedených v tabulce 4 Tabulka 4 se rámy kol v praxi vyrábí.

V rámci skupiny kompozitních materiálů je možnost výběru ze tří různých zástupců. CFRP je zkratka pro Carbon fiber reinforced polymer, v překladu tedy kompozit s polymerní maticí a výztuhou z uhlíkových vláken. Dalším kompozitním materiálem je GFRP, neboli Glass fiber reinforced polymer, u něhož je výztuž tvořena skelnými vlákny. Nejlepší mechanické vlastnosti má kompozit AFRP (Aramid fiber reinforced polymer), jelikož jeho výztuž tvoří aramidová (kevlarová) vlákna. Pro další řazení byl z této kategorie vybrán kompozit CFRP, který je v praxi nejrozšířenější.

Z přírodních materiálů je možné použít dřevo, karton a bambus, který je díky nejlepším hodnotám mechanických vlastností vybrán do dalšího řazení. Nejhorší poměr tuhosti a hmotnosti mají polymery. Při ještě přísnějším výběru by nemohly obstát. Je ale důležité zmínit, že vlastnosti polymerních materiálů se v průběhu let zlepšují, a brzy třeba bude jejich použití možné. Nyní ale v dalších krocích Ashbyho metody nejsou zahrnuty. Do výběru se dále dostaly slitiny titanu, hliníku, hořčíku, uhlíkové, nízkolegované a vysokopevnostní oceli. V případě vysokopevnostních ocelí je dále používán obchodní název Reynolds 953. Jde o martenzitickou nerezovou ocel AISI 440C vyráběnou společností Reynolds Technology. Ocel AISI 440C samozřejmě produkuje i jiní výrobci, ale právě Reynolds Technology ji dodává přímo ve formě jednotlivých rámových trubek připravených ke svařování.

Tabulka 4: Konkrétní materiály pro následné seřazení podle materiálových indikátorů

Skupina materiálů	Konkrétní vybraný zástupce
Kompozity	CFRP
Slitiny titanu	Ti-6Al-4V
	Ti-3Al-2,5V
Slitiny hliníku	Al 6061 T6
	Al 7020 T6
Slitiny hořčíku	Mg AZ61A
Vysokopevnostní oceli	AISI 440C (obchodní název Reynolds 953)
Nízkolegované oceli	AISI 4130 (25CrMo4)
Nízkouhlíkové oceli	AISI 1020 (označovaná Hi-Ten)
Přírodní materiály	Bambus

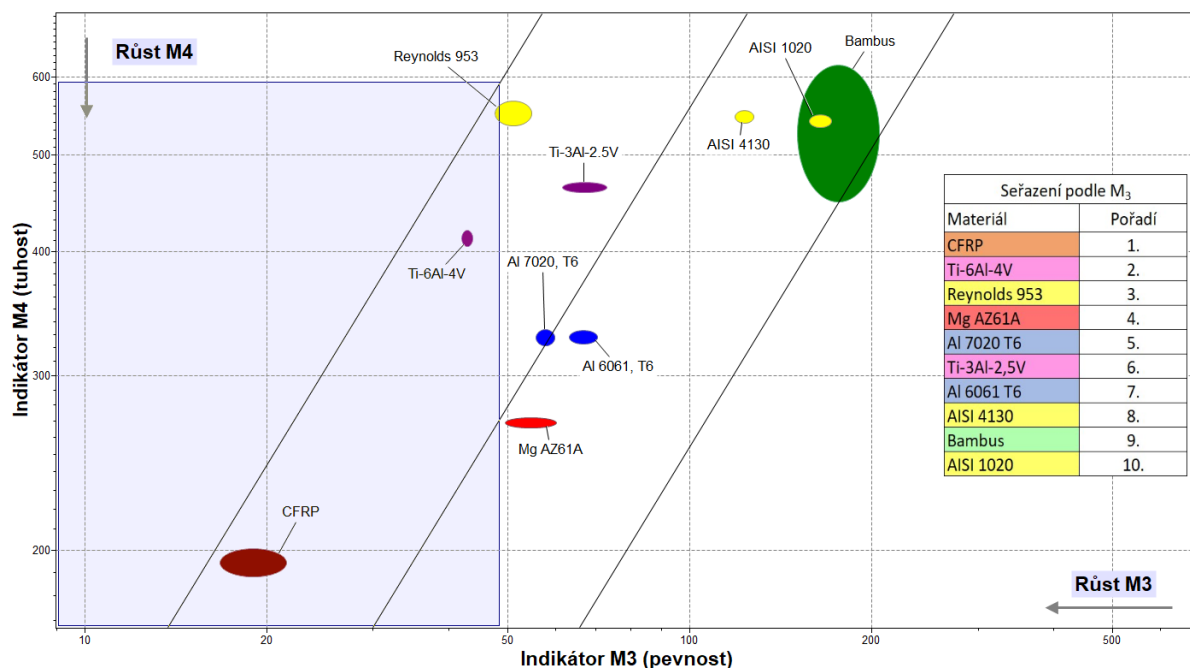
Nejlepší materiál je ten, který umožní výrobu nejlehčího rámu za současného splnění pevnostních i tuhostních požadavků. Cíl je tedy jeden (hmotnost), ale omezení dvě (pevnost a tuhost). Jedno omezení by znamenalo jednoduché seřazení podle hodnot jediného materiálového indikátoru. Zde jsou kvůli dvěma omezením materiálové indikátory dva a seřazením podle každého zvlášť vychází rozdílné výsledky.

Je vhodné použít názornější grafickou metodu. Ta spočívá ve vytvoření materiálové mapy pro dvě omezení. Na osy jsou vynášeny převrácené materiálové indikátory  $M_3 = \rho / (\Phi_{B_{max}}^f \cdot \sigma_c)^{2/3}$  a  $M_4 = \rho / (\Phi_{B_{max}}^e \cdot E)^{1/2}$ . Převrácená hodnota indikátorů znamená, že nejlepší volbou je materiál v levém dolním rohu mapy. Do mapy jsou vyneseny řídicí přímky se sklonem 1, tentokrát ale nereprezentují materiálový indikátor. Průsečík řídicích přímek se svislou osou vyjadřuje míru zatížení, které později v provozu působí na rám kola. Pokud by v tuto chvíli byly k dispozici hodnoty zatížení rámu při jízdě, pak by bylo možné vypočítat průsečík přesně. Úkolem této práce však není simulovat zatížení rámu kola, stačí tedy uvést, jak by se případně s hodnotami mechanického napětí pracovalo.

Ačkoliv je cílem stále minimální hmotnost, volba materiálu se může lišit podle intenzity zatěžování kola v pozdějším provozu. Je logické, že pro extrémně namáhané sjezdové rámy mohou být vhodné jiné materiály, než například pro dráhová kola. Postup tedy musí být rozdělen na výběr materiálu pro více a méně zatěžované rámy.

### 5.1.3.1 Výběr materiálu pro více namáhaný lehký rám

Více namáhanými rámy jsou myšleny ty, které jsou vystaveny rázovým přetížením. Jde například o rámy sjezdových a freeride kol. Výběr materiálu je proveden pomocí obdélníkového pole, jehož jeden roh zůstává v levém dolním rohu mapy a druhý roh se posouvá po řídicí přímce (Obr. 10). Posouváním rohu obdélníku se pole zvětšuje a jsou do něj přidávány další materiály. Pořadí, v jakém jsou materiály do obdélníkového pole přidávány, odpovídá seřazení podle indikátoru  $M_3$ . Čím vyšší je zatížení rámu, tím výše je umístěná řídicí přímka, po které se posouvá roh obdélníku.



Obr. 10: Výběr nejlepšího materiálu pro více namáhaný lehký rám

Na první pohled není pochyb, že nejlepším materiálem pro lehký a intenzivně zatěžovaný rám je kompozit z uhlíkových vláken a polymerní matrice (CFRP). Leží totiž v levém dolním rohu mapy, což znamená vysoké hodnoty obou indikátorů  $M_3$  a  $M_4$ . Na dalších místech v pořadí vhodnosti je titanová slitina Ti-6Al-4V a vysokopevnostní ocel Reynolds 953. Správnost grafické metody (mapa na Obr. 10) potvrzuje tabulka umístěná v pravé části Obr. 10, kde jsou materiály seřazeny podle hodnot indikátoru  $M_3 = (\Phi_{B_{max}}^f \cdot \sigma_c)^{2/3} / \rho$ .

Je třeba si uvědomit, že pokud se určitý materiál umístil hůře, neznamená to, že ho nelze použít. Samozřejmě lze vyrobit rám zatěžovaného (sjezdového) kola z hliníku 6061 T6, který je až sedmým v pořadí. Při stejných požadavcích na celkovou pevnost bude ale hliníkový rám těžší, než například rám z vysokopevnostní oceli Reynolds 953. Je tomu tak proto, že Al 6061 T6 má nižší pevnost, než ocel Reynolds 953. Aby bylo vyhověno pevnostním požadavkům sjezdových kol, musí být hliníku použito více. Jeho hustota je sice oproti oceli zhruba třetinová, pevnost je ale 6x nižší.

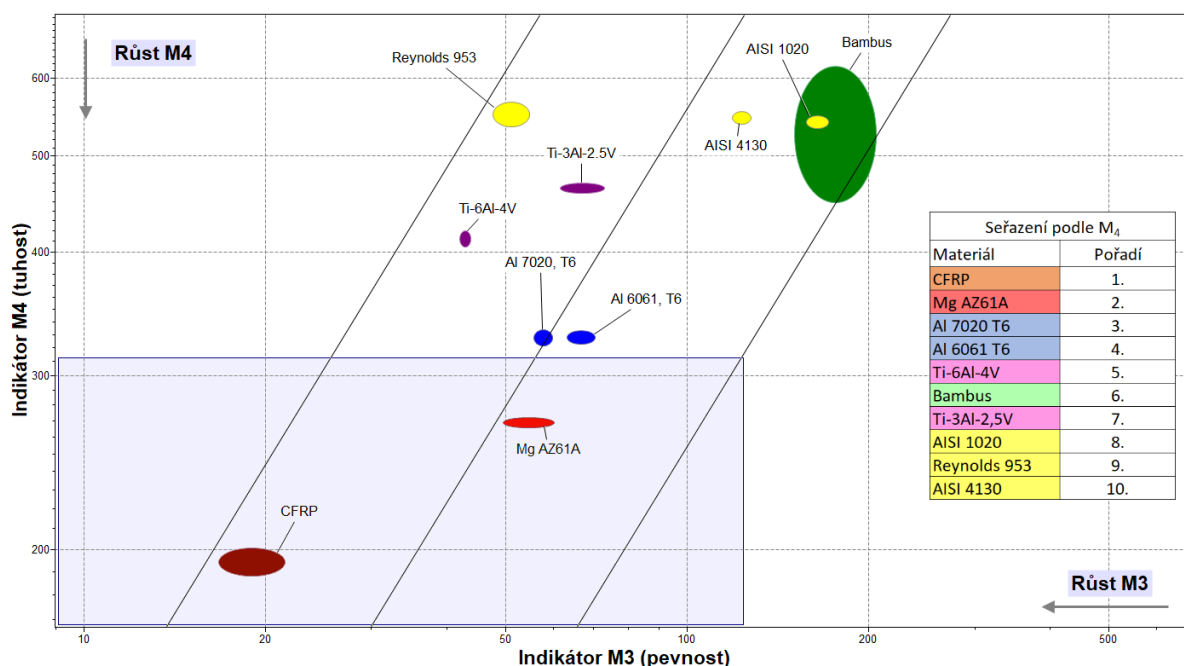
### 5.1.3.2 Výběr materiálu pro méně namáhaný lehký rám

Méně zatěžovanými rámy jsou myšleny například rámy dráhových kol. Dráhová kola nejsou v provozu vystavována rázovým přetížením při dopadech. Samozřejmě na ně působí šlapací síly, které jsou zejména u špičkových závodníků značné. Tyto síly ale na rám působí spíše lokálně v oblasti středového uložení. Není třeba jim přizpůsobovat celkovou konstrukci rámu, stačí jen zesílit oblast kolem středového složení (Obr. 11), což má na celkovou hmotnost rámu zanedbatelný vliv. U rámu dráhových kol je důležitá zejména tuhost pro okamžitý přenos sil z pedálů na zadní kolo bez ztrát.



Obr. 11: Zesílené středové složení dráhových kol

U zatěžovaných konstrukcí je na prvním místě vždy pevnost. Pouze pokud to velikost zatížení dovolí, lze volit materiály s nižší hustotou, které mají nižší mez pevnosti. V tomto případě nižší hodnoty zatížení umožňují zvolit jiné materiály, než tomu bylo u sjezdových kol. Opět je pro výběr použita grafická metoda, tedy obdélníkové pole, jehož pravý horní roh se posouvá po řídicí přímce (Obr. 12). Umístění řídicí přímky v mapě odpovídá zatížení, kterému je v pozdějším provozu rám vystaven. Zde je tedy řídicí přímka níže, než tomu bylo v předchozím případě. Seřazení podle indikátoru  $M_4$  potvrzuje správnost grafické metody. Z Obr. 12 vyplývá, že nejlepší volbou je CFRP, stejně jako v předchozím případě. Na dalších místech se ale pořadí liší. Po kompozitu následuje hořčík a slitiny hliníku. Opět platí, že je možné zvolit i materiály hůře umístěné. Dráhové kolo samozřejmě lze vyrobit třeba z vysokopevnostní oceli Reynolds 953 (9. místo). Rám pro daný účel ale bude „zbytečně“ pevný a těžký. Oproti tomu slitina hliníku bude zcela vyhovovat pevnostním a tuhostním požadavkům a přitom poskytne lehčí rám.



Obr. 12: Výběr nejlepšího materiálu pro méně namáhaný lehký rám

#### 5.1.4 Kontrola dokumentace

Kontrola dokumentace odhalila, že ze všech skupin materiálů z tabulky 3 se buď rámy kol běžně vyrábí, nebo existují alespoň funkční prototypy. Ashbyho metoda výběru tedy odhalila všechny materiály, které jsou v praxi používány, nebo je použít lze. Toto je důležité zjištění, neboť ukazuje na to, že bez předešlých znalostí či rešeršní činnosti lze takto nalézt všechny okruhy vhodných materiálů.

Nyní je třeba zjistit, zda i pořadí vhodnosti materiálů odpovídá realitě. Seřazení podle indikátoru  $M_3$  ukazuje, že nejvhodnějším materiálem pro výrobu lehkých, extrémně zatěžovaných kol (např. sjezdových) je kompozit CFRP následovaný titanem a ocelí Reynolds 953. Katalogy výrobců ale odhalují, že nejčastěji jsou sjezdové rámy vyráběny z hliníkových slitin. Kompozitní rámy jsou druhé nejčastější, třetí místo patří vysokopevnostním ocelím. Titanové a hořčikové rámy se prakticky nevyskytují.

Proč se tedy nevyrábí převážně karbonové (CFRP) rámy, když má tento materiál papírově nejlepší vlastnosti? Má totiž zásadní nevýhodu. Pevnost kompozitů se liší v závislosti na směru působení sil. V určitém směru jsou kompozity velmi křehké. Úder například od odletujícího kamení v průběhu závodu může fatálně narušit strukturu rámu. Ohrožené části karbonového rámu musí být opatřeny ochranou rámových trubek (Obr. 13). Méně náchylný k tomuto porušení je kompozit AFRP s výztuhou z kevlarových vláken. Takové rámy jsou ale velmi vzácné.

S rozvojem lepidel je možné spojovat rámové trubky z různých materiálů. Oblíbená je kombinace hliníkové přední části a karbonové zadní stavby (18). Hliník má stejné vlastnosti bez ohledu na směr (izotropie), není tedy náchylný k prasknutí kvůli úderům do spodní části rámu. Zadní stavba z kompozitu rám odlehčuje. Tuto kombinaci z databáze Granta samozřejmě není možné získat. Ashbyho metoda uvažuje celou komponentu vždy z jednoho typu materiálu.





Obr. 13: Ochrana karbonové rámové trubky

Titan Ti-6Al-4V obsadil druhé místo díky skvělému poměru hmotnosti a pevnosti. Má i další skvělé vlastnosti, většina z nich ale není v kategorii sjezdových kol potřebná, proto není pro výrobu moc využíván. Například skvěle tlumí vibrace a otřesy. To se ale více projeví při delší jízdě, při krátkých závodech ve sjezdu je komfort cyklisty upozaděn. Většinu nárazů navíc tlumí odpružení kola. Hořčík je extrémně náchylný ke korozi (19), při sjezdových závodech je vlivem odletujících kamenů poškozován ochranný nátěr rámu a hořčík proto není vhodný.

Kola typu freeride jsou převážně z hliníku. Při jejich výrobě totiž nejde o dosažení minimální hmotnosti za každou cenu. Je pravda, že lehčí kolo je obratnější. Rám ale tvoří jen malou část celkové hmotnosti kola. Z většiny se na váze podílí ostatní komponenty, hlavně ráfky, pláště a odpružená vidlice. Hliníkový rám může být až o 1 kilogram těžší, ale je vždy o desítky tisíc korun levnější než rám karbonový (20).

Seřazení podle indikátoru  $M_4$  ukazuje, že pro výrobu dráhových kol je nejlepší kompozitní materiál CFRP. Další pořadí ale neodpovídá realitě, hliníkové rámy jsou rozšířenější než hořčíkové. Existuje pro to jednoduché vysvětlení. Hliníkové slitiny jsou lépe tvarovatelné. Dráhová kola musí mít aerodynamický profil rámových trubek, který je z hliníku snazší vytvořit.

Ashbyho metoda dokáže seřadit materiály podle jejich papírových vlastností, avšak nejlepší umístění určitého materiálu nemusí znamenat, že je výrobcem nejvíce používán. Kontrola dokumentace dokáže odhalit i nedostatky, které neplynou z mechanických vlastností. Jde například o dostupnost materiálu v dané lokalitě. Náchylnost karbonových rámu k poškození úderem z určitého směru také nelze z databáze předem vyčíst. Do pořadí vhodnosti se nepromítne ani náročnost zpracování, a je tak možné, že materiál s nejlepšími vlastnostmi nakonec nelze pro výrobu použít. Všechny tyto informace poskytne až kontrola dokumentace, kterou je tedy vždy nutné provést.

## 5.2 Výběr materiálu pro levný rám

Tato kapitola se zabývá výběrem materiálu pro co nejlevnější rám kola, který současně vyhoví z hlediska pevnosti i tuhosti.

### 5.2.1 Odvození konstrukčních požadavků

Konstrukční požadavky jsou stejné jako v minulé kapitole, jen cíl je jiný (zde minimální cena). Materiálové indikátory se liší ve jmenovateli, kde je nyní místo hustoty součin ceny a hustoty.

Tabulka 5: Konstrukční požadavky na co nejlevnější rám a odvozené materiálové indikátory

Konstrukční požadavky	Funkce	Přenos ohybového momentu
	Omezení	Pevnost - nepřekročena $\sigma_k$ ani $\sigma_c$
		Tuhost - malé hodnoty elastické deformace
	Cíl	Minimální výsledná cena
	Volné proměnné	Volba materiálu
Tvar a rozměry průřezu		
Materiálové indikátory	Pevnost	$M_5 = \sigma_c^{2/3} / C \cdot \rho$
	Tuhost	$M_6 = E^{1/2} / C \cdot \rho$
	Pevnost + tvar	$M_7 = (\Phi_{B_{max}}^f \cdot \sigma_c)^{2/3} / C \cdot \rho$
	Tuhost + tvar	$M_8 = (\Phi_{B_{max}}^e \cdot E)^{1/2} / C \cdot \rho$

### 5.2.2 Zpřesnění výběru aplikací omezení

Aplikovaná omezení jsou shodná s těmi z minulé kapitoly, takže ani selektované skupiny materiálů (Tabulka 6) se neliší.

Tabulka 6: Skupiny materiálů, které umožňují výrobu levného rámu při splnění pevnostních a tuhostních požadavků

Kompozity
Slitiny titanu
Slitiny hliníku
Slitiny hořčíku
Polymery
Martenzitické nerezové oceli
Uhlíkové oceli
Nízkolegované oceli
Přírodní materiály

### 5.2.3 Seřazení materiálů

Materiály z tabulky 7 jsou seřazeny s využitím grafické metody. Pořadí je ověřeno pomocí indikátorů  $M_7$  a  $M_8$ . Opět je zapotřebí rozdělit výběr podle toho, o jak zatěžovaný rám se jedná.

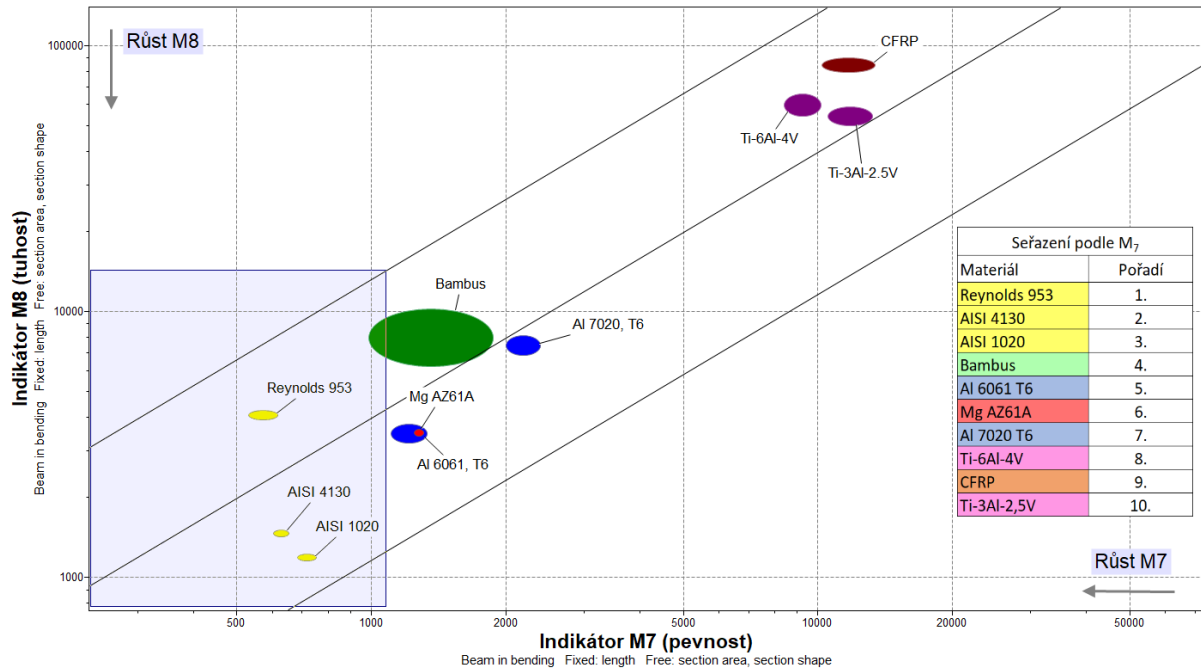
Tabulka 7: Konkrétní materiály pro následné seřazení podle materiálových indikátorů

Skupina materiálů	Konkrétní vybraný zástupce
Kompozity	CFRP
Slitiny titanu	Ti-6Al-4V
	Ti-3Al-2,5V
Slitiny hliníku	Al 6061 T6
	Al 7020 T6
Slitiny hořčíku	Mg AZ61A
Vysokopevnostní oceli	AISI 440C (obchodní název Reynolds 953)
Nízkolegované oceli	AISI 4130 (25CrMo4)
Nízkouhlíkové oceli	AISI 1020 (označovaná Hi-Ten)
Přírodní materiály	Bambus

#### 5.2.3.1 Výběr materiálu pro více namáhaný levný rám

Zde je dobrým příkladem rám BMX kola. To musí být uzpůsobeno agresivnímu stylu jízdy a současně finančním možnostem cílové skupiny, kterou je hlavně mladší generace. Je vytvořena mapa, na jejíž osách jsou převrácené hodnoty materiálových indikátorů  $M_7$  a  $M_8$ . V mapě jsou konstruovány řídicí přímky se sklonem  $l$ .

Seřazení grafickou metodou probíhá prostřednictvím obdélníkového pole, jehož roh se posouvá po řídicí přímce a do kterého postupně přibývají další materiály. Pořadí, v jakém materiály do tohoto pole přibývají, odpovídá seřazení podle indikátoru  $M_7$ . Poloha řídicí přímky v mapě odpovídá zatížení, které na rám působí v provozu. U BMX kol je toto zatížení poměrně velké.

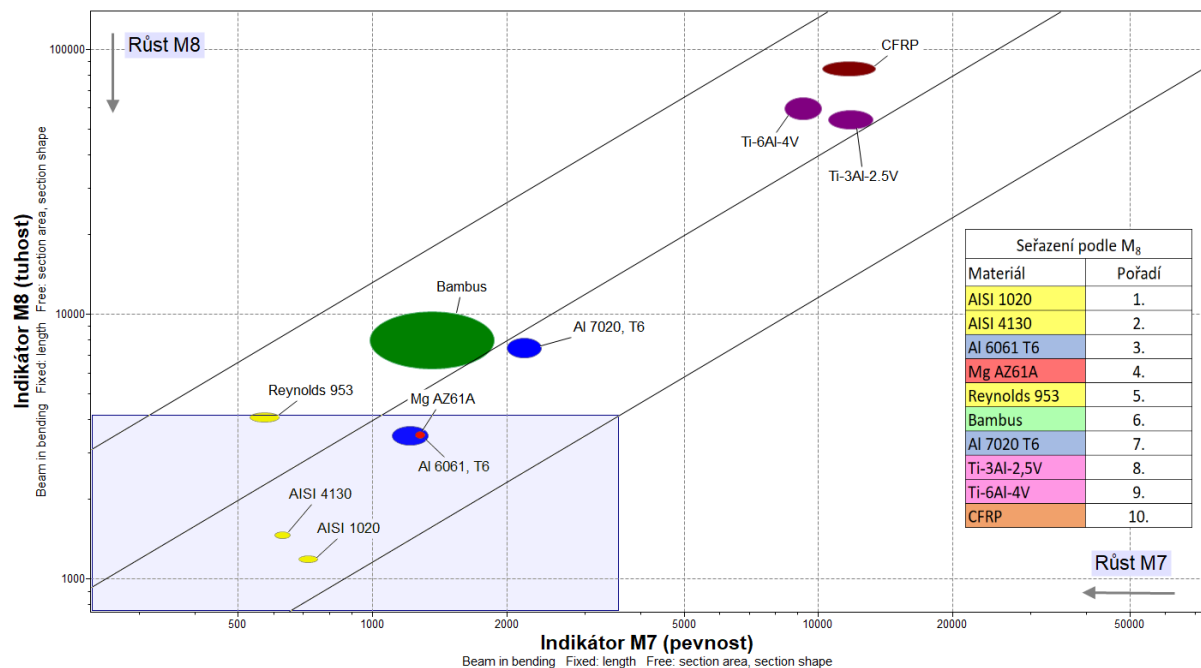


Obr. 14: Výběr nejlepšího materiálu pro více namáhaný levný rám

Pomyslné stupně vítězů jsou zde kompletně obsazeny ocelí. Nejlepší volbou pro více namáhané levné rámy je vysokopevnostní ocel Reynolds 953. Vysoko se umístil bambus, limity jeho použití jsou zmíněny dále.

### 5.2.3.2 Výběr materiálu pro méně namáhaný levný rám

Příkladem méně namáhaného levného rámu je například rám městského kola. Takové kolo není konstruováno pro pohyb v terénu nebo jinak náročnou jízdu a obecně se u něho předpokládá nižší provozní zatížení.



Obr. 15: Výběr nejlepšího materiálu pro méně namáhaný levný rám

Přední příčky jsou opět obsazeny ocelí, Reynolds 953 je však nyní umístěná hůře. Je to dáno její extrémní pevností, která je u městských kol zbytečná. Městská kola se vyrábí převážně z oceli AISI 1020, zde dosažené výsledky zcela odpovídají skutečnosti.

#### 5.2.4 Kontrola dokumentace

Ashbyho metoda opět dokázala nalézt vhodné okruhy materiálů. Při volbě toho nejlepšího však není možné slepě věřit seřazení podle materiálových indikátorů. U několika nejvýše postavených kandidátů je třeba prostudovat dostupnou dokumentaci. V první řadě jsou vyhledány katalogy výrobců BMX a městských kol.

V případě BMX je mezi výrobci nejpoužívanějším materiálem nízkolegovaná ocel Cr-Mo (AISI 4130). Levnější alternativou je AISI 1020, dražší pak hliník. Proč nejsou BMX kola vyráběna z vysokopevnostních ocelí, které mají podle výsledků Ashbyho metody nejlepší vlastnosti a současně přijatelnou cenu? Jde především o dostupnost trubek vhodných pro svaření rámu. Nabídka výrobců trubek Columbus a Dedacciai na území ČR zahrnuje především materiál AISI 4130 (21), méně pak ocel AISI 1020. V nabídce zcela chybí jakékoliv vysokopevnostní oceli typu AISI 440C. V případě BMX kol tedy výběr vhodného materiálu Ashbyho metodou neodpovídá praxi, nejde však o nedostatek této metody. Přesně pro tyto situace je závěrečným krokem kontrola dokumentace.

Relativně vysoko se umístil bambus díky dobrému poměru pevnosti a hmotnosti a také nízké ceně. Problémem při výrobě bambusových rámu je spojování jednotlivých tyčí dohromady, protože vyžaduje převážně ruční práci. Výrobu nelze automatizovat, a z toho důvodu jsou bambusové rámy raritou rozšířenou jen mezi nadšenci. Databáze uvádí cenu za kilogram kolem 45 Kč. Tato cena ale nezahrnuje značný podíl ruční práce, které je při výrobě bambusového rámu zapotřebí.

Konečnou cenu výrobku musí odhadnout konstruktér a zahrnout do ní všechny důležité náklady. Cena za materiál uváděná v databázi tvoří ve většině případů jen zlomek konečné ceny produktu. K ní je nutné přidat náklady na dopravu, které se odvíjí od dostupnosti materiálu v konkrétní lokalitě. Dále pak cenu za přetvoření materiálu na finální výrobek. Výrobní technologie mohou být u některých materiálů mnohem dražší než u jiných.

### 5.3 Kompromis mezi cenou a hmotností

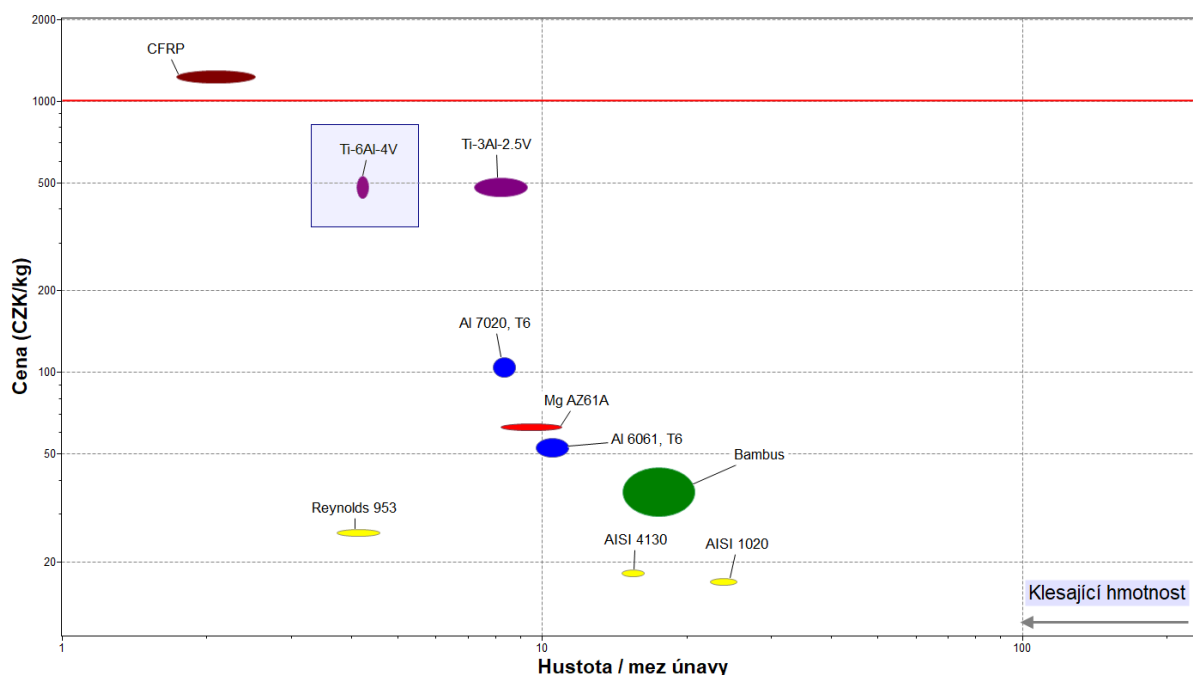
Jak bylo již uvedeno, při výběru rámu pro špičkového cyklistu bude hrát roli každý gram, cena přitom nebude důležitá. Opačným případem je třeba městské kolo, které bude parkováno na ulici a jeho majitel s ním bude absolvovat jen krátké cesty. Takové kolo musí být hlavně levné pro snížení rizika krádeže. Doprava po městě na kole není cyklistický závod, proto vyšší hmotnost nebude tolik vadit.

Profesionální závodníci a zájemci o městská kola mají zcela vyhraněné cíle. První chce co nejlehčí rám bez ohledu na cenu, druhý zmiňovaný požaduje co nejlevnější rám a vůbec přitom nehledí na hmotnost. Zákazníci s takto jasnými cíli tvoří ale jen malou část poptávky.

Většina zákazníků bude hledat jistý kompromis mezi cenou a hmotností, tedy kolo s přijatelnou cenou a současně nízkou hmotností. V předchozích kapitolách byl cíl vždy jeden, minimální hmotnost nebo minimální cena. Nyní jde o konflikt dvou cílů. Postup v případě jednoho omezení byl jiný než v případě dvou omezení. Toto platí i pro případy jednoho a dvou cílů, postupy jsou navzájem odlišné.

Konflikt protichůdných cílů lze vyřešit dvěma způsoby. Je možné jeden z cílů formulovat jako omezení a dále postupovat jako v případě samostatného cíle. Druhou možností je využití řídicí přímky k nalezení optimálního poměru cena-hmotnost.

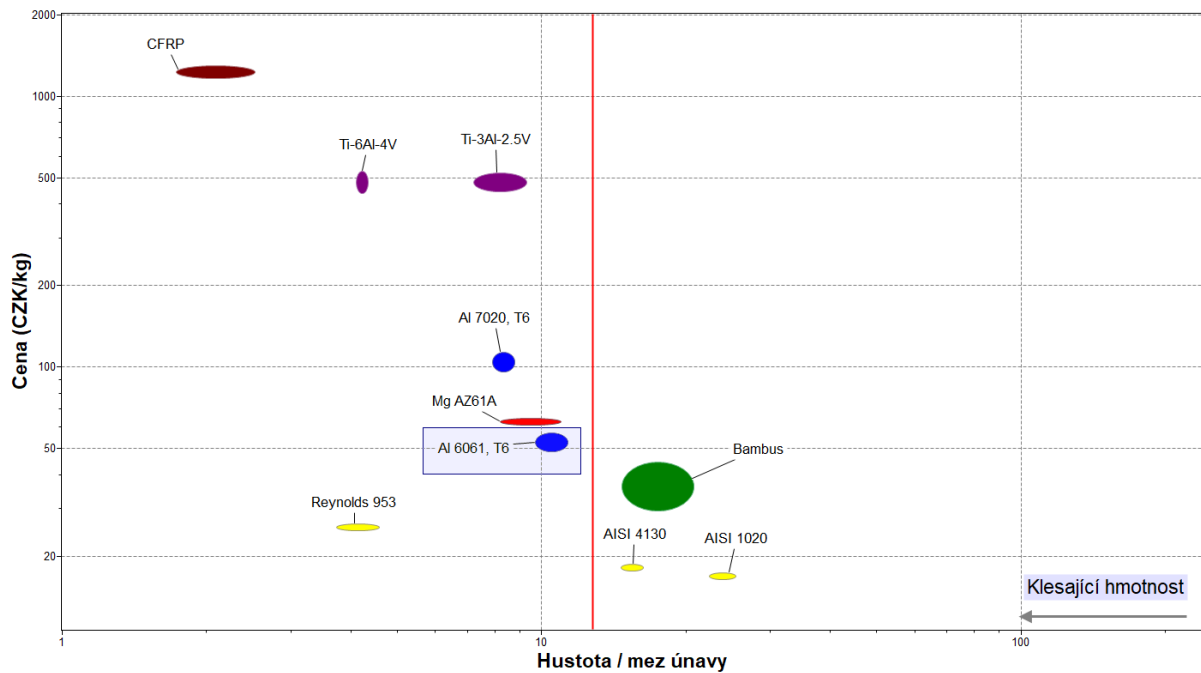
Vyjádření jednoho z cílů jako omezení znamená stanovit maximální přípustnou cenu a pro tu hledat nejlehčí variantu (Obr. 16). Parametry se zlepšují směrem k levému dolnímu rohu mapy. Maximální přípustná cena například 1000 Kč/kg vyřadí z možností kompozit CFRP. Nejlehčí rám s cenou materiálu nejbližší k 1000 Kč/kg je vyroben ze slitiny titanu Ti-6Al-4V.



Obr. 16: Výběr nejlehčího materiálu pro stanovenou maximální cenu

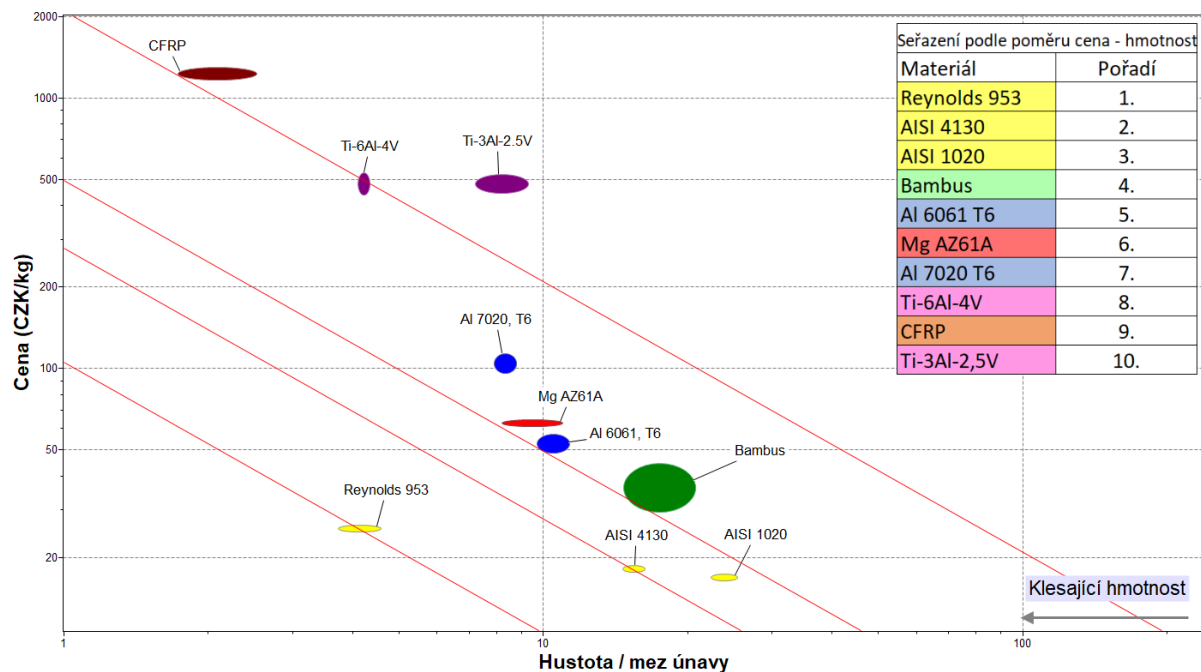
Maximální cenu je samozřejmě možné volit libovolně. Postup lze použít i opačně, tedy stanovit maximální přípustnou hmotnost rámu a hledat nejlevnější materiál (Obr. 17). V databázi Granta nelze zadat objem výsledného produktu (rámu) a vypočítat tak hmotnosti rámu z jednotlivých materiálů. Místo toho je použita měrná hustota na jednotku pevnosti

materiálu. Čím větší je pevnost, tím méně materiálu je nutné použít pro splnění pevnostních požadavků. Takto je zajištěno, že vlastnosti se zlepšují v mapě směrem doleva.



Obr. 17: Výběr nejlevnějšího materiálu pro stanovenou maximální hmotnost

Pokud jde o nalezení ideálního poměru hmotnosti a ceny, pak je třeba v materiálové mapě (Obr. 18) zkonstruovat řídicí přímkou se sklonem -1. Jejím posouváním vzhůru jsou postupně protínány jednotlivé materiály. Jako první protne přímkou bublinu materiálu Reynolds 953, ten je hledanou volbou s nejlepším poměrem ceny a hmotnosti. Další pořadí znázorňuje tabulka pravé části Obr. 18.



Obr. 18: Hledání materiálu pro rám s nejlepším poměrem ceny a hmotnosti

## 6 Rešerše materiálů používaných pro výrobu rámu kol

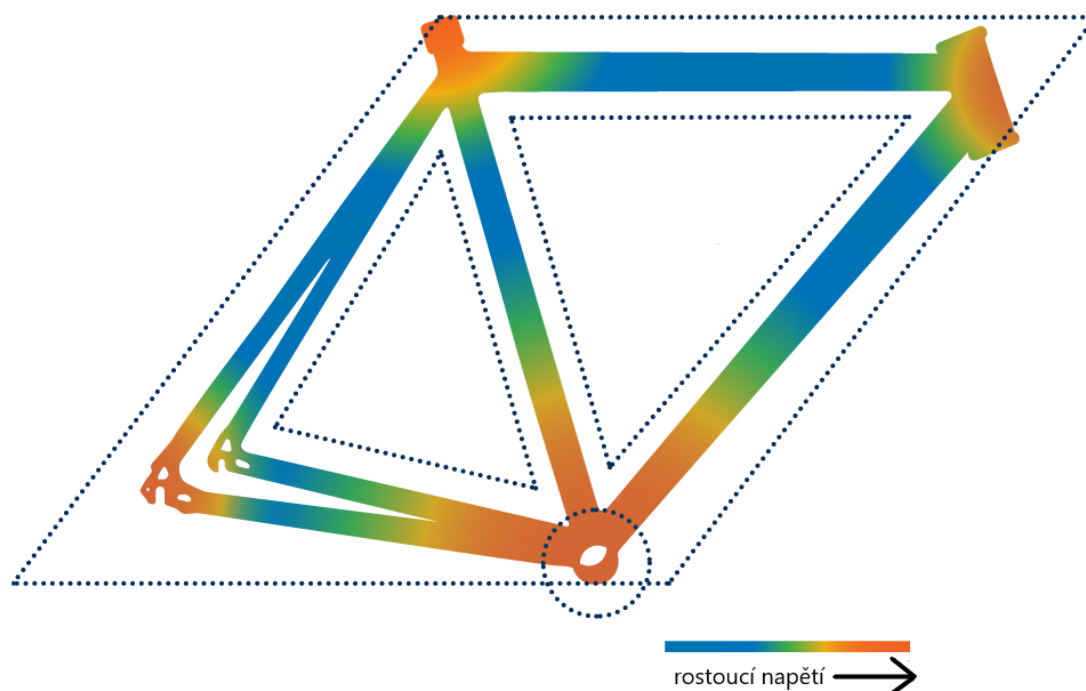
Ideálními vlastnostmi, které by rám kola měl mít, jsou tuhost, nízká hmotnost, pevnost a životnost. Neméně důležitá je i schopnost tlumení vibrací a odpovídající cena. Při výběru vhodného materiálu je také nutné přihlídnout k tomu, zda je na trhu vhodný polotovár pro konečnou výrobu rámu. V případě kovových materiálů se rám vyrábí tvarováním a následným svařováním trubek. Výrobci trubek tak mají značný vliv na nabídku v cyklistickém odvětví. Při volbě materiálu rozhodují nejen vlastnosti, ale také cena. Ta je dána hlavně jeho dostupností a obtížností zpracování (22).

### 6.1 Ocel

V minulosti tento materiál ve výrobě rámu převažoval, pak byl ale vytlačen hliníkem a karbonem (CFRP) (23). Kvůli menší poptávce ze strany zákazníků klesla i nabídka ocelových trubek vhodných ke svařování rámu (22). Předností oceli je její pevnost a schopnost pohlcovat vibrace. Z toho důvodu vnímá cyklista při jízdě větší pohodlí. Díky dlouhé historii používání ocelových rámu je dnes dobře známo, jak se ocel chová. Oproti hliníku a karbonu má například větší rozdíl mezi hodnotami meze kluzu a pevnosti. Před případným prasknutím je tak cyklista dopředu varován plastickou deformací v kritickém místě (24). Navíc je ocelový rám velmi jednoduše opravitelný, nejnáze ze všech ostatních (25).

Mezi používanými ocelmi jsou rozdíly v ceně, pevnosti i dalších vlastnostech. Nejlevnější variantou je nízkouhlíková ocel AISI 1020 označovaná jako Hi-Ten (high tensile). Její předností je nízká cena. Nevýhodami jsou nutnost protikorozních povrchových úprav a vyšší finální hmotnost rámu (26). Další variantou je ocel legovaná chromem a molybdenem AISI 4130 s vyšší pevností, díky které lze použít trubky s tenčí stěnou a hmotnost tak snížit. Legury zlepšují odolnost proti atmosférické korozi. Předním výrobcem trubek pro rámy kol je společnost Reynolds Technology a ocel 4130 tvoří základ pro jejich trubky Reynolds 525 a 725 (27). Právě tato společnost vyrábí vysokopevnostní ocelové trubky označované jako Reynolds 953 s mezí pevnosti přesahující 2000 MPa (28). Kromě skvělých materiálů je vynálezem Reynolds Technology také výroba trubek s dvojitou (trojitou) mocností stěn (Obr. 20) (29). Rámy jsou nejvíce zatěžované v blízkosti spojů jednotlivých trubek (Obr. 19), tam je tedy tloušťka stěny největší. Menší namáhání ve střední části trubky dovoluje stěnu ztenčit, čímž se uspoří hmotnost. Ocel Reynolds 953 je navíc nerezová a tím odpadá další velká slabina oceli. Svými vlastnostmi se tedy zmiňovaná slitina 953 dostává na úroveň prémiového titanu, a přestože moderní technologie výrobu zdražují, pořád se cena ani zdaleka neblíží 500 Kč/kg titanu (14).





Obr. 19: Schéma rozložení napětí při zatížení rámu v provozu (30)



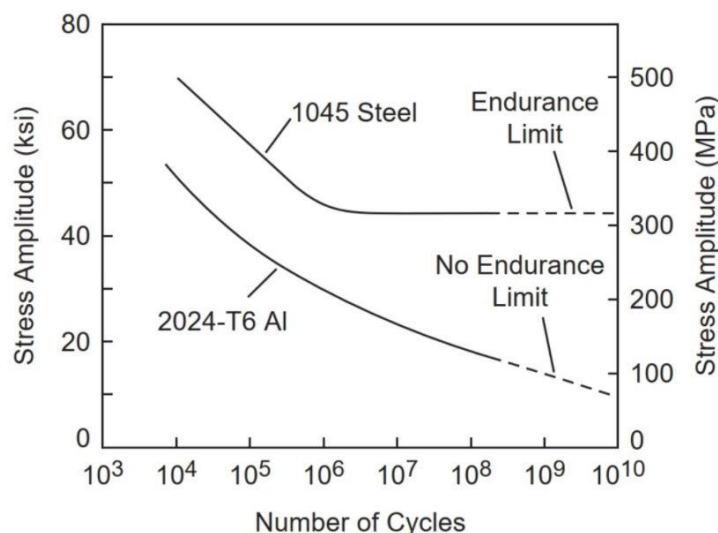
Obr. 20: Proměnlivá tloušťka stěn (30)

## 6.2 Hliník

Hliníkové slitiny jsou v cyklistickém odvětví dnes nejčastější volba. Jejich přednostmi jsou korozivzdornost, nízká hmotnost a také relativně nízká cena. Nižší je však také pevnost a tuhost, což bylo zpočátku řešeno trubkami velkého průměru. Takové rámy pevnostně vyhovovaly, ale jejich vysoká tuhost měla za následek dramatické snížení komfortu. Přestože díky vývoji už je schopnost tlumení rázů daleko vyšší, hliníkové rámy se dosud zcela nezbavily nálepky těch „méně pohodlných“ (31). Při výrobě hliníkových rámových trubek se využívá metody hydroformingu, kdy je materiál vložen do negativní formy a směs horké vody a oleje pod tlakem mu dá požadovaný tvar (32). U hliníkových trubek se stejně jako u ocelových může měnit tloušťka stěny po délce trubky.

Jak bylo již zmíněno v kapitole o vlastnostech materiálů, rámy kol jsou vystavovány dynamickému namáhání, a proto je důležitá jejich únavová charakteristika. Z Wöhlerova diagramu oceli na Obr. 21 je vidět mez únavy, tedy hodnota napětí, které ani po nekonečném počtu zátěžných cyklů nevyvolá ve struktuře porušení. U většiny hliníkových slitin tato mez

neexistuje a s rostoucím počtem cyklů Wöhlerova křivka stále klesá. Z toho důvodu je jako mez únavy brána nejvyšší hodnota napětí, při které ještě hliník vydrží  $10^8$  zátěžných cyklů (33) (34).



Obr. 21: Únavová křivka oceli oproti hliníku (35)

### 6.3 Kompozitní materiály

Pojmem kompozitní materiál nebo kompozit je označován takový materiál, který je složen z dvou nebo více fází, jenž se navzájem liší svými vlastnostmi (36). Základními fázemi kompozitního materiálu jsou matrice a výztuž. Matrice je spojitá v celém objemu součásti a poskytuje uložení a ochranu výztuži, která má v případě rámu kol podobu vláken. Pro správné rozložení a přenos zatížení bez porušení je důležitá adheze mezi oběma fázemi. Matrice může být kovová, keramická, uhlíková nebo polymerní, přičemž k výrobě rámu kol se používá poslední zmiňovaná. Vlákna výztuže mohou být skelná, uhlíková nebo aramidová.

Nejčastěji používaná vlákna jsou ta uhlíková, proto se kompozitní rámy často označují jako karbonové. V předchozích kapitolách byly kompozitní materiály s polymerní matricí a uhlíkovými vlákny označovány zkratkou CFRP. V roce 1965 bylo společností DuPont vynalezeno syntetické para-aramidové vlákno, obchodně nazvané kevlar (37). Kevlar je méně častou výztuží, má však oproti uhlíkovým vláknům některé výhody, které budou dále zmíněny. Nejlevnější (38) a nejméně rozšířenou variantou pro výrobu rámu je kompozit se skelnými vlákny (GFRP).

Pro kompozity je charakteristická synergie, tedy že výsledné vlastnosti jsou lepší, než samotný součet vlastností jednotlivých složek (36). Hlavní výhodou je možnost dobře definovat vlastnosti vyrobené součásti. Kompozity jsou anizotropní materiál, jejich vlastnosti se liší v závislosti na směru uložení vláken výztuže. V kapitole o tuhosti je uvedeno, že u rámu kola je žádoucí, aby se boční tuhost lišila od vertikální. Toho přesně je možné správným uspořádáním vláken dosáhnout. Další výhodou je nízká hmotnost díky hustotě kolem  $1900 \text{ kg/m}^3$ . Při správném používání vydrží kompozitní rám desetiletí, nepodléhá totiž korozi ani únavě tak jako kovové materiály (39).

Proměnlivost vlastností v závislosti na směru může být i na škodu. Právě proto, že rám je stavěn na zatížení působící pouze z určitých směrů, úder z jiného směru může způsobit nenávratné poškození. Typicky se tak děje při pádu, neopatrné manipulaci nebo úderem předmětů odletujících od kol. Pokud se jako výztuž použije kevlar místo uhlíkových vláken, pak odolnost proti těmto poškozením stoupá. Často je kevlar zpevněn pouze spodní část

rámu v blízkosti středového složení, protože právě ta nejvíc trpí při jízdě v terénu. Náročná výroba kompozitních materiálů s sebou nese také vyšší pořizovací náklady. Karbonové rámy se tedy nejčastěji vyskytují v profesionální cyklistice, kde se více hledí na hmotnost a boční tuhost než na cenu.

## 6.4 Titan

Titan je nejméně častým a také nejdražším materiálem pro výrobu kol. Porovnání s ostatními používanými kovy ukazuje, že je o 45 % lehčí než ocel a dvakrát pevnější než hliník. Za normálních teplot je vysoce korozivzdorný, proto se titanové rámy většinou nenatírají ani nelakují a místo toho se nechává vyniknout jejich specifický kovový vzhled. Díky vysokým hodnotám únavové pevnosti mají titanové rámy extrémně dlouhou životnost. Poskytují také vysoký jízdní komfort, a to díky dobré schopnosti tlumení vibrací. Pro výrobu ráků se v současnosti používají dvě různé slitiny: Ti-3Al-2,5V a Ti-6Al-4V. Hlavní rozdíl je v mechanických vlastnostech a obtížnosti zpracování, kdy druhý zmiňovaný je pevnější, ale také obtížněji svařitelný. Při vyšších teplotách má titan obecně tendenci korodovat a je nutné jej svařovat v ochranné atmosféře. Právě tyto vysoké nároky na technologie způsobují, že je nejdražší ze všech používaných materiálů. Kvůli obtížnosti zpracování nemají titanové rámové trubky proměnlivou tloušťku stěny.

## 6.5 Hořčík

Navzdory svému potenciálu se rámy z hořčíkových slitin nikdy nevyrobily masově. Hlavními přednostmi je nízká hmotnost a vysoký jízdní komfort. Také životnost a dobrý poměr pevnosti ku hmotnosti staví hořčík minimálně na úroveň ostatních používaných materiálů (40). Jeho nevýhodou je ale nízká odolnost proti korozi. Ačkoliv hořčík nedominuje při výrobě ráků, používá se hojně pro ostatní komponenty, hlavně pro díly přední odpružené vidlice (41).

## 6.6 Ostatní materiály

Při rešeršní činnosti byly objeveny také méně tradiční materiály, ze kterých lze skutečně vyrobit funkční rámy.

### 6.6.1 Bambus

Postup výroby bambusového rámu zahrnuje velké množství ruční práce. Je složité porovnávat ho s ostatními rámy, protože kritická místa ve spojích jednotlivých bambusových tyčí jsou většinou řešena jinými materiály. Ve výsledku tedy jde o kompozit, který ale v databázi Granta chybí.

Před samotnou výrobou jednotlivé bambusové tyče několik měsíců schnou. Poté jsou spojeny pomocí hliníkových rámových spojek (mufny), čímž vzniká lichoběžníkový tvar. Bambusové tyče jsou do rámových spojek vleповány, a poté je celý spoj omotan sisalem máčeným v pryskyřici. Následuje jemné broušení a finální bezbarvý nátěr (42).

### 6.6.2 Dřevo

Dřeviny byly v cyklistice předchůdcem dnešních kovů a kompozitů. Dnes jde především o designovou záležitost. Výrobu tvoří z velké části opět ruční práce, čemuž odpovídá i cena ráků. Ceny dřevěných ráků od českého výrobce Samorost začínají na 45 000 Kč (43).

### **6.6.3 Karton**

Karton je velmi netradičním materiálem. První prototyp vznikl jako ekologický projekt s cílem zužitkovat nepotřebné kartonové obaly (44). Kolo je plně funkční a váží jen 9 kilogramů. Jednotlivé části jsou spojeny lepidlem a odolnost proti vlhkosti je zajištěna speciálním nátěrem. Konstruktor prvního prototypu v návaznosti na úspěch projektu založil společnost Cardboard Technology, která má v současné době zaregistrováno přes 150 patentů a užitých vzorů. Kromě jízdních kol produkuje kartonová dětská odrážedla a invalidní vozíky.

### **6.6.4 Plast**

O masovou výrobu plastových rámců se neúspěšně pokoušela švédská společnost Itera (45). Počáteční nadšení zákazníků vystřídala nespokojenost s nízkou kvalitou. Firma ukončila činnost po pouhých 3 letech fungování (45). Plastové rámy lze vyrábět vstřikováním a technologie je dnes dobře zvládnutá. Problémem je nízká tuhost plastů. Rámy jsou buď moc těžké nebo málo tuhé (12). V současné době se výrobou plastových rámců zabývá ekologický projekt Muzzicycle, který recykluje plastový odpad.

## 7 Závěr

Bakalářská práce se zabývala metodou výběru materiálu podle prof. Michaela F. Ashbyho. Metoda byla nejprve obecně vysvětlena a poté použita při volbě materiálu pro rámy jízdních kol. V celé práci se vyskytují materiálové mapy vytvořené v databázi Ansys Granta EduPack.

Ashbyho metoda spočívá v definování konstrukčních požadavků (funkce, omezení, cíl, volné proměnné) na vyráběnou součást. Funkce vystihuje účel výrobku. Omezeními jsou hodnoty mechanických a jiných vlastností, které materiál musí mít. Cílem je parametr, který je třeba minimalizovat nebo maximalizovat. Zpravidla jde o hmotnost, cenu, objem nebo dopad na životní prostředí. Volné proměnné jsou veličiny, které nejsou předem dány a konstruktér je volí. Jde o typ použitého materiálu, tvar součásti apod. Z konstrukčních požadavků je odvozen materiálový indikátor. Poté se začnou vyřazovat nevhodné materiály, které nemají mechanické a další vlastnosti dané omezeními. Zbývající materiály jsou seřazeny dosazením svých parametrů do materiálového indikátoru. Materiál s nejlepší hodnotou nejlépe vyhovuje stanovenému cíli. Posledním krokem je kontrola dokumentace u materiálů na předních pozicích. Často jsou takto odhaleny nedostatky, kvůli nimž nelze materiál použít. Může jít o příliš náročné zpracování, lokální nedostupnost nebo špatné zkušenosti s použitím daného materiálu pro podobné účely. Naopak se může stát, že dokumentace potvrdí správnost volby materiálu, protože už je pro podobné účely úspěšně využíván. Celý proces je přehledně zobrazen v kapitole 4 na Obr. 2.

Klíčovou kapitolou bakalářské práce je případová studie, která se zabývá výběrem vhodného materiálu pro rám jízdního kola. Ashbyho metodou výběru je izolováno několik skupin materiálů, které jsou na základě svých vlastností vhodnou volbou pro výrobu rámu. Jde například o slitiny titanu, hliníku, vysokopevnostní oceli nebo kompozitní materiály. Nyní je třeba ověřit, zda jsou tyto výstupy Ashbyho metody správné, tedy zda se vybrané materiály v praxi skutečně využívají. Za tímto účelem je provedena rešerše, jejíž výsledky jsou uvedeny v tabulce 8 Tabulka 8. Je patrné, že okruh vhodných materiálů nalezených Ashbyho metodou se shoduje se skutečným stavem věcí, tedy že se tyto materiály pro výrobu rámu běžně používají, nebo byly vyrobeny funkční prototypy.

Tabulka 8: Seznam materiálů, které se pro výrobu rámu v praxi používají

Vhodné materiály pro výrobu rámu nalezené Ashbyho metodou		Materiály používané v sériové výrobě	
		Konkrétní materiál	Nadřazená skupina
Slitiny titanu		Ti-6Al-4V Ti-3Al-2,5V	Slitiny titanu
Slitiny hliníku		Al 6061 T6 Al 7020 T6	Slitiny hliníku
Kompozitní materiály		CFRP	Kompozitní materiály
Slitiny hořčíku		Mg AZ61A	Slitiny hořčíku
Oceli		AISI 440C AISI 4130 AISI 1020	Oceli
		Materiály používané v kusové výrobě	
Bambus	Přírodní materiály	Bambus	Přírodní materiály
Dub, akát, jasan		Dřeviny	
Karton		Karton	
Polyester	Polymery	PE	Polymery

Ze všech materiálů z tabulky 8 Tabulka 8 lze rám kola vyrobit. V závislosti na typu vyráběného rámu bude ale jeden materiál vždy nejlepší. Ashbyho metoda dokáže materiály

seřadit podle vhodnosti pro dané použití, a to za pomoci materiálových indikátorů. Lze takto nalézt například nejlepší materiál pro lehké horské kolo nebo nejlepší materiál pro levné městské kolo. Takto sestavený žebříček, kterému vévodí nejlepší materiál pro konkrétní typ rámu, lze opět porovnat s realitou. Toto porovnání ovšem ukazuje, že papírově nejlepší materiál vybraný Ashbyho metodou nemusí být v praxi tím nejvhodnějším. Rozdíl je dobře vidět například u rámu sjezdového horského kola, kdy se na základě mechanických vlastností jeví jako nejlepší materiál CFRP (kompozit z uhlíkových vláken a polymerní matrice). Kompozitní materiály s vláknovou výztuží jsou anizotropní, jejich vlastnosti tedy nejsou stejné ve všech směrech. Následkem toho mohou být rámy náchylné k prasknutí při úderu z určitého směru, například za jízdy od odletujících kamenů. Řešením může být dodatečná ochrana ohrožených částí rámu, což ale zvyšuje konečnou hmotnost. Právě skvělý poměr pevnosti ku hmotnosti je nejsilnější stránkou CFRP a tato výhoda se zde ztrácí.

Z výše uvedených skutečností vyplývá velká důležitost posledního kroku Ashbyho metody, tedy kontrola dokumentace. Ta musí ověřit, zda je materiál na prvním místě žebříčku opravdu tím nejvhodnějším pro konkrétní použití. V případě CFRP zcela jistě existují dokumenty, které tuto slabou stránku zmiňují, popřípadě o ní konstruktér sám ví. Další rozpory mezi nejlepším materiálem dle Ashbyho a skutečně nejvýhodnější volbou mohou vznikat v důsledku toho, že v databázi materiálů je uváděna pouze cena za jednotku hmotnosti materiálu. Tato částka neodráží technologie potřebné pro přetvoření materiálu na finální produkt. Databáze dále neuvádí, ve formě jakého polotovaru je materiál dostupný, což samozřejmě není nedostatkem databáze, protože nabídka materiálů a polotovarů se liší v závislosti na geografické poloze. Absence vhodného polotovaru na trhu může znemožnit použití určitého materiálu.

Ashbyho metoda výběru materiálu je velmi spolehlivá při eliminaci nevhodných kandidátů na základě jejich vlastností. Zbylé materiály jsou s využitím materiálových indikátorů seřazeny tak, že na prvním místě je materiál nejvíce vyhovující stanoveným cílům. Zkušenosti však ukazují, že správnost tohoto pořadí je nutné podrobit dalšímu zkoumání. Z různých důvodů, které často ani nesouvisí s vlastnostmi konkrétního materiálu, je někdy nutné volbu přehodnotit. I na tohle prof. Ashby při tvorbě metodiky myslel, a tak závěrečným krokem výběru materiálu je ověření dosažených výsledků prostudováním dostupné dokumentace.

Metoda prof. Ashbyho je shledána velmi užitečnou a spolehlivou pro výběr materiálu. Při její aplikaci na konkrétní problém je ale vyžadována určitá úroveň orientace konstruktéra v dané problematice. Některé kroky metody se spoléhají na softwarovou podporu databáze materiálů Ansys Granta EduPack. Dosažené výsledky je vždy nutné validovat i s použitím jiných zdrojů informací o materiálech, než je tato databáze.

## Seznam použité literatury

- [1] Dieter, George E. a Schmidt, Linda C. *Engineering design*. New York : Design Council, 2015. 9780071326254.
- [2] *E-konstruktor*. 30. Červenec 2013.  
<https://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/hodnoty-mezí-pevnosti-kluzu-unavy-a-dovolených-napětí-pro-ocel>.
- [3] *E-konstruktor*. 14. Červenec 2015.  
<https://e-konstruktor.cz/novinka/pevnost-a-tuhost-jaky-je-mezí-nimi-rozdíl>.
- [4] Hájíček, Štěpán. Prohnout, ale neohnout. *iVelo*. 28. Únor 2017.  
[https://www.ivelocz/casopis\\_clanek/53x11-2008-2-ukazka1/](https://www.ivelocz/casopis_clanek/53x11-2008-2-ukazka1/).
- [5] What is the Best Material to Reduce Vibration? *Sorbothane*.  
<https://www.sorbothane.com/what-is-the-best-material-to-reduce-vibration.aspx>.
- [6] Wolf, David. Vibrace šasi Rootsova dmyhadla. *VUT v Brně*. 2016.  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=128645](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=128645).
- [7] Trojanová, Zuzana. Co jsou to HIDAMETS. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. 1994
- [8] Únava materiálu. *Ústav fyziky materiálu Akademie věd ČR*.  
[www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P10.ppt](http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P10.ppt).
- [9] J.C.Pang, S.X.Li, Z.G.Wang, Z.F.Zhang. General relation between tensile strength and fatigue strength of metallic materials. *Materials science and engineering*. 564, 2013.
- [10] Millar, M, a další. Loads, Stresses and deflections in Bicycle Frames. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 1986, 21.
- [11] Ashby, Michael F. *Materials selection in mechanical design - 4th ed*. USA : Butterworth-Heinemann, 2011. 0080952232.
- [12] Ing. Mazínová, Ivana. Katedra konstruování strojů. *Fakulta strojní*. 2016.  
<http://hdl.handle.net/11025/24952>.
- [13] Université de Technologie de Compiègne. Ashby method for materials selection.  
[http://www.utc.fr/~hagegebe/UV/MQ12/CORRECTIONS\\_TD/%5BASHBY99%5D%20-%20CM\\_1.pdf](http://www.utc.fr/~hagegebe/UV/MQ12/CORRECTIONS_TD/%5BASHBY99%5D%20-%20CM_1.pdf).
- [14] Granta Design Limited. *Ansys Granta Edu-Pack material database*. 2019.
- [15] Achillas, Ch & Georgios, Baniyas & Tzetzis, D. & Kyratsis, Panagiotis & Moussiopoulos, Nicolas. INVESTING IN PRODUCT DESIGN EDUCATION IN TIMES OF ECONOMIC CRISIS. *International Journal of Product Design*. 5, 2014, Sv. 23, 41.
- [16] Zkoušky lomové houževnatosti.  
[https://www.opi.zcu.cz/download/Zk\\_sireni\\_trhlin%2009\\_10.pdf](https://www.opi.zcu.cz/download/Zk_sireni_trhlin%2009_10.pdf).
- [17] Jonšta, Zdeněk. Technické materiály. *Vysoká škola báňská*. 2012.  
<http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TM2/Technicke%20materialy%20II.pdf>.
- [18] Downhill bikes technology. *Atherton bikes*.  
<https://www.athertonbikes.com/technology>.

- [19] Bc. Pořícký, Vladislav. Hodnocení koroze u vybraných typů hořčíkových slitin. *VUT Brno*. 2009. [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=17608](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17608).
- [20] Donahue, Pat. Carbon vs. aluminium frames. *GearLab*. 26. Březen 2019. <https://www.outdoorgearlab.com/expert-advice/carbon-vs-aluminum-mountain-bike-frames-the-showdown>.
- [21] *Airoocycling* <https://www.airoocycling.cz/>.
- [22] Štěřba, Robert. *Rámová alchymie*. Praha.
- [23] Menšík, Mirek. GIVE Group s.r.o. <https://www.give.cz/a/titan-hlinik-karbon-aneb-ktery-material-je-pro-ram-jizdniho-kola-nejlepsi>.
- [24] Science of cycling. *Exploratum*. <https://www.exploratorium.edu/cycling/frames3.html>.
- [25] Alfano Frameworks. Steel frame repairs. <https://www.alfanoframeworks.com/steel-frame-repairs>.
- [26] Writer, B. Hi-Ten Steel Frames. *Brainy biker*. <https://brainybiker.com/are-hi-ten-steel-frames-bad-bmx-fixed-gear-etc/>.
- [27] Reynolds technology. Listopad 2013. [https://www.reynoldstechnology.biz/wp-content/uploads/2015/08/rtl\\_steel\\_alloys\\_extract.pdf](https://www.reynoldstechnology.biz/wp-content/uploads/2015/08/rtl_steel_alloys_extract.pdf).
- [28] Reynolds Technology. Reynolds 953. <https://www.reynoldstechnology.biz/materials/steel/s-953/>.
- [29] Butted tubing. *Reynolds Technology*. [https://www.reynoldstechnology.biz/faqs/what-is-buttet-tubing/?fbclid=IwAR15sSoIA0UfGEggKcVyLoU3u5TIhQCZnEHqc511kxgNF-stk\\_p1BUyTovk](https://www.reynoldstechnology.biz/faqs/what-is-buttet-tubing/?fbclid=IwAR15sSoIA0UfGEggKcVyLoU3u5TIhQCZnEHqc511kxgNF-stk_p1BUyTovk).
- [30] Science behind the sport. *West Virginia University*. <https://sciencebehindthesport.wvu.edu/science-behind-cycling/frames>.
- [31] Přínos tvarování průřezů rámových trubek. *iVelo*. 28. Únor 2017. [https://www.ivelocz/casopis\\_clanek/velo-2005-4-ukazka1/](https://www.ivelocz/casopis_clanek/velo-2005-4-ukazka1/).
- [32] Merida bikes. Technologie hliníkových slitin. <https://www.merida-bikes.com/cs-cz/p/technologie/technologie-hlinikovych-slitin-147.html>.
- [33] Vlašic, Ing. František. Hodnocení mechanických vlastností slitin na bázi Al Mg s využitím metody AE. *Ústav konstruování*. 2009. [http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/644/pojednani\\_vlasic.pdf/](http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/644/pojednani_vlasic.pdf/).
- [34] Zinn, Lennard. Aluminium frame, crankarm fatigue. 13. Listopad 2013 <https://www.velonews.com/gear/technical-faq-aluminum-frame-crankarm-fatigue/>.
- [35] Matmatch. What is fatigue strength. <https://matmatch.com/learn/property/fatigue-strength>.
- [36] Plundrák, David. Využití kompozitních materiálů pro stavbu rámu jízdních kol. Brno : VUT v Brně - Fakulta strojního inženýrství, 2011.



- [37] Stephanie L. Kwolek profile. *Science History Institute*. 9. prosinec 2017. <https://www.sciencehistory.org/historical-profile/stephanie-l-kwolek>.
- [38] Lokhesh, Kumar N. a Bhavana, Madhuri I. Design and Fabrication of Bicycle Frame Using Fiber Reinforced Plastic. *International Journal for Research*. 2017, Sv. 5.
- [39] Zinn, Lennard. Carbon fiber fatigue. *VeloNews*. <https://www.velonews.com/gear/technical-faq-bottom-brackets-carbon-fiber-fatigue/>.
- [40] Hořčík od Meridy. *Štěrbka kola*. <https://www.sterba-kola.cz/item/horcik-od-meridy-srovnani-parametru-materialu>.
- [41] Hrouda, Vladimír. *Slitiny hořčíku a jejich aplikace ve veloprůmyslu*. Brno : VUT - Fakulta strojního inženýrství, 2010.
- [42] *Bamboo bikes*. <https://www.my-boo.com/production-313.html>.
- [43] Krynek, Ondřej. Dřevěné rámy Samorost. *Designmag*. 22. Květen 2014. <https://www.designmag.cz/technika/48805-samorost-vyrabi-ceska-jizdni-kola-s-drevenymi-ramy.html>.
- [44] Desai, Rajiv. Cardboard bicycle. *Redbull*. 20. únor 2017. <https://www.redbull.com/cz-cs/kolo-z-kartonu-papir-video>.
- [45] Itera plastic bikes. *Rolling Spoke*. 12. Listopad 2014. <https://rollingspoke.com/itera-plastic-bike/>.
- [46] Haman, Martin. Design rámu horského kola. *VUT v brně*. 2010. [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28930](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28930).
- [47] Vít, Ladislav. *Problematika konstrukce rámu cyklistického kola*. Plzeň : ZČU - FST, 2016.
- [48] Šulc, Jakub. *Namáhání rámu bicyklu*. Praha : ČVUT, 2018.
- [49] Mička, Jan. Únavová životnost ocelových vzorků při axiálním, torzním a kombinovaném axiálně-torzním namáhání. *VUT v Brně*. 2016. [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=127255](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127255).
- [50] Londry, Leisha A. Peterson and Kelly J. Bicycling Magazine's Newsletter for the Technical Enthusiast. *Bike Tech*. 1986, Sv. 5, 2.
- [51] Cejp, Janovec. Struktura a vlastnosti materiálu. *Nauka o materiálu*. [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3\\_2\\_\\_struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3_2__struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf).
- [52] Performance index. *Ansys Granta EduPack Help*. 2019. [http://support.grantadesign.com/resources/cesedupack/2019/help/topic1.htm?rhcsh=1#t=html%2Fchart%2Fpif\\_about.htm](http://support.grantadesign.com/resources/cesedupack/2019/help/topic1.htm?rhcsh=1#t=html%2Fchart%2Fpif_about.htm).

## **PŘÍLOHA č. 1**

### **Materiálové listy z databáze Granta EduPack**

### General information

#### Designation

High Strength Carbon Fiber/Epoxy Composite, 0.90° Biaxial lamina.

Material was produced from woven fabric prepreg, fiber volume fraction nominally 0.48 - 0.56. Autoclave cure at 120-180 °C, 6-7 bar.

#### Tradenames

Cycron; Fibredux; Scotchply

#### Typical uses

Lightweight structural members in aerospace, automotive components, sporting goods, springs, pressure vessels.

### Composition overview

#### Compositional summary

Epoxy + Carbon fiber reinforcement

Material family	Plastic (thermoset)
Base material	EP (Epoxy resin)
% filler (by weight)	60 - 65 %
Filler/reinforcement	Carbon
Filler/reinforcement form	Woven fabric, Biaxial lay-up
Polymer code	EP-CF60

### Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	35	-	40	%
Carbon (fiber)	60	-	65	%

### Price

Price	* 1.17e3	-	1.3e3	CZK/kg
Price per unit volume	* 1.8e6	-	2.09e6	CZK/m <sup>3</sup>

### Physical properties

Density	1.54e3	-	1.61e3	kg/m <sup>3</sup>
---------	--------	---	--------	-------------------

### Mechanical properties

Young's modulus	62.7	-	68.7	GPa
Specific stiffness	39.6	-	43.8	MN/m/kg
Yield strength (elastic limit)	627	-	910	MPa
Tensile strength	627	-	910	MPa
Specific strength	398	-	579	kN/m/kg
Elongation	0.88	-	1.41	% strain
Compressive modulus	57.2	-	63.4	GPa
Compressive strength	655	-	937	MPa
Flexural modulus	63	-	69	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	627	-	910	MPa

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

Shear modulus	3.5			GPa
Bulk modulus	* 7.86	-	10.2	GPa
Poisson's ratio	0.058			
Shape factor	8			
Hardness - Vickers	* 10.8	-	21.5	HV
Hardness - Rockwell M	* 80	-	110	
Hardness - Rockwell R	* 117	-	128	
Elastic stored energy (springs)	3.08e3	-	6.14e3	kJ/m <sup>3</sup>
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	* 345	-	592	MPa

### Impact & fracture properties

Fracture toughness	* 37.9	-	50.3	MPa.m <sup>0.5</sup>
Toughness (G)	22.2	-	38	kJ/m <sup>2</sup>
Impact strength, notched 23 °C	* 109	-	137	kJ/m <sup>2</sup>

### Thermal properties

Glass temperature	100	-	180	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	* 279	-	337	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	* 250	-	305	°C
Maximum service temperature	* 140	-	220	°C
Minimum service temperature	* -123	-	-73	°C
Thermal conductivity	* 1.08	-	2.2	W/m.°C
Specific heat capacity	* 949	-	1.09e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 5.51	-	29.3	µstrain/°C
Thermal shock resistance	* 380	-	2.1e3	°C
Thermal distortion resistance	* 0.0511	-	0.288	MW/m

### Electrical properties

Electrical resistivity	* 1.71e5	-	5.64e5	µohm.cm
Electrical conductivity	3.06e-4	-	0.00101	%IACS
Galvanic potential	0.14	-	0.22	V

### Magnetic properties

Magnetic type	Non-magnetic
---------------	--------------

### Optical, aesthetic and acoustic properties

Transparency	Opaque			
Acoustic velocity	6.29e3	-	6.62e3	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.0014	-	0.0033	

### Critical materials risk

Contains >5w% critical elements?

No

### Absorption & permeability

Water absorption @ 24 hrs	* 0.0416	-	0.063	%
---------------------------	----------	---	-------	---

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

**Durability**

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Acceptable
Strong acids	Unacceptable
Weak alkalis	Limited use
Strong alkalis	Excellent
Organic solvents	Limited use
Oxidation at 500C	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Good
Flammability	Slow-burning

**Primary production energy, CO2 and water**

Embodied energy, primary production	* 616	-	679	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 42.8	-	47.2	kg/kg
Water usage	* 1.25e3	-	1.38e3	l/kg

**Processing energy, CO2 footprint & water**

Autoclave molding energy	* 20.9	-	23	MJ/kg
Autoclave molding CO2	* 1.67	-	1.84	kg/kg
Autoclave molding water	* 13.6	-	20.4	l/kg
Compression molding energy	* 3.33	-	3.68	MJ/kg
Compression molding CO2	* 0.266	-	0.294	kg/kg
Compression molding water	* 6.31	-	9.46	l/kg
Matched die (preform) molding energy	* 9.62	-	10.6	MJ/kg
Matched die (preform) molding CO2	* 0.77	-	0.849	kg/kg
Matched die (preform) molding water	* 8.93	-	13.4	l/kg

**Recycling and end of life**

Recycle	✗			
Recycle fraction in current supply	0.1	%		
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 31.2	-	32.8	MJ/kg
Combustion CO2	* 3.11	-	3.27	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			

**Links**

ProcessUniverse
Producers
Reference
Shape

**General information**

<b>Designation</b>	6061, wrought
Condition	T6 (Solution heat-treated and artificially aged)
UNS number	A96061
EN name	EN AW-6061 (EN AW-AlMg1SiCu)
EN number	3.3211
<b>Typical uses</b>	Transportation equipment, heavy duty structures, marine uses, pipe, furniture, bridges, rail, towers, pylons.

**Composition overview**

**Compositional summary**

Al86.599 / Mg0.8+1.2 / Si0.4+0.8 / Cu0.15+0.4 / Cr0.04+0.35 (impurities: Fe<0.7, Zn<0.25; Mn<0.15, Ti<0.15, Other<0.15)

<b>Material family</b>	Metal (non-ferrous)
<b>Base material</b>	Al (Aluminum)

**Composition detail (metals, ceramics and glasses)**

Al (aluminum)	* 95.8	-	98.6	%
Cr (chromium)	0.04	-	0.35	%
Cu (copper)	0.15	-	0.4	%
Fe (iron)	0	-	0.7	%
Mg (magnesium)	0.8	-	1.2	%
Mn (manganese)	0	-	0.15	%
Si (silicon)	0.4	-	0.8	%
Ti (titanium)	0	-	0.15	%
Zn (zinc)	0	-	0.25	%
Other	0	-	0.15	%

**Price**

Price	* 49.2	-	57.1	CZ/Kkg
Price per unit volume	* 1.32e5	-	1.56e5	CZ/km <sup>3</sup>

**Physical properties**

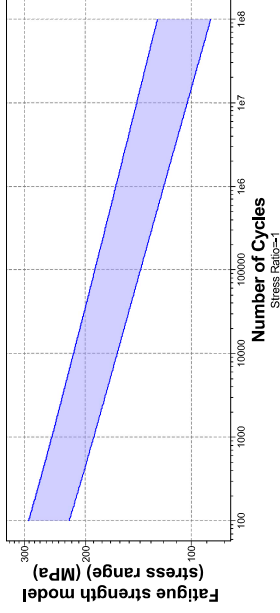
Density	2.69e3	-	2.73e3	kg/m <sup>3</sup>
---------	--------	---	--------	-------------------

**Mechanical properties**

Young's modulus	66.6	-	70	GPa
Specific stiffness	24.5	-	25.8	MN/m <sup>3</sup> kg
Yield strength (elastic limit)	240	-	280	MPa
Tensile strength	290	-	338	MPa
Specific strength	88.4	-	103	kN/m <sup>3</sup> kg
Elongation	10	-	14.4	% strain

Compressive modulus	67.9	-	71.3	GPa
Compressive strength	* 240	-	280	MPa
Flexural modulus	* 66.6	-	70	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 240	-	280	MPa
Shear modulus	25.6	-	26.9	GPa
Shear strength	186	-	217	MPa
Bulk modulus	* 66.6	-	70	GPa
Poisson's ratio	0.325	-	0.335	
Shape factor	24.8			
Hardness - Vickers	100	-	107	HV
Hardness - Brinell	90	-	100	HB
Elastic stored energy (springs)	423	-	572	kJ/m <sup>3</sup>
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	* 112	-	131	MPa
Fatigue strength model (stress range)	* 103	-	143	MPa

**Parameters:** Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles



**Impact & fracture properties**

Fracture toughness	* 30	-	36	MPa·m <sup>0.5</sup>
Toughness (G)	13.3	-	18.9	kJ/m <sup>2</sup>

**Thermal properties**

Melting point	580	-	650	°C
Maximum service temperature	130	-	150	°C
Minimum service temperature	-273	-		°C
Thermal conductivity	152	-	169	W/m·°C
Specific heat capacity	878	-	914	J/kg·°C
Thermal expansion coefficient	22.7	-	23.9	µstrain/°C
Thermal shock resistance	150	-	177	°C
Thermal distortion resistance	* 6.5	-	7.3	MW/m

Latent heat of fusion	384	-	393	kJ/kg
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	3.9	-	4.1	µhm.cm
Electrical conductivity	42.1	-	44.2	%IACS
Galvanic potential	-0.79	-	-0.71	V
<b>Magnetic properties</b>				
Magnetic type	Non-magnetic			
<b>Optical, aesthetic and acoustic properties</b>				
Transparency	Opaque			
Acoustic velocity	4.95e3	-	5.08e3	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	1e-4	-	0.002	
<b>Critical materials risk</b>				
Contains >5wt% critical elements?	Yes			
Notes	Al (aluminum) added to the 2018 US critical minerals list			
<b>Processing properties</b>				
Metal casting	Unsuitable			
Metal cold forming	Excellent			
Metal hot forming	Excellent			
Metal press forming	Acceptable			
Metal deep drawing	Acceptable			
Machining speed	85.3			m/min
Weldability	Good			
Notes	Preheating is not required, post weld heat treatments required			
<b>Durability</b>				
Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Acceptable			
Weak acids	Excellent			
Strong acids	Excellent			
Weak alkalis	Acceptable			
Strong alkalis	Unacceptable			
Organic solvents	Excellent			
Oxidation at 500C	Unacceptable			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Galling resistance (adhesive wear)	Limited use			
Notes	Aluminum alloys perform poorly when galvanized, when melted with steels.			
Flammability	Non-flammable			
<b>Corrosion resistance of metals</b>				
Stress corrosion cracking	Not susceptible			

Notes	Rated in chloride. Other susceptible environments: Halkie, water			
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	190	-	210	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	12.6	-	13.9	kg/kg
Water usage	1,13e3	-	1,25e3	l/kg
<b>Processing energy, CO2 footprint &amp; water</b>				
Roll forming, forging energy	6.03	-	6.67	MJ/kg
Roll forming, forging CO2	0.452	-	0.5	kg/kg
Roll forming, forging water	4.13	-	6.2	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	11.8	-	13	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	0.884	-	0.977	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	6.59	-	9.88	l/kg
Wire drawing energy	43.4	-	48	MJ/kg
Wire drawing CO2	3.25	-	3.6	kg/kg
Wire drawing water	16.4	-	24.5	l/kg
Metal powder forming energy	22.2	-	24.6	MJ/kg
Metal powder forming CO2	1.78	-	1.96	kg/kg
Metal powder forming water	24.2	-	36.3	l/kg
Vaporization energy	1,55e4	-	1,71e4	MJ/kg
Vaporization CO2	1,16e3	-	1,28e3	kg/kg
Vaporization water	6,46e3	-	9,69e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	1.34	-	1.48	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	0.1	-	0.111	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	9.1	-	10.1	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	0.682	-	0.754	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	17.7	-	19.6	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	1.33	-	1.47	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	155	-	171	MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	11.6	-	12.8	kg/kg
<b>Recycling and end of life</b>				
Recycle	✓			
Embodied energy, recycling	32.4	-	35.8	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	2.54	-	2.81	kg/kg
Recycle fraction in current supply	40.5	-	44.7	%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✗			
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			
<b>Notes</b>				
<b>Other notes</b>				

Immediate strength extrusion alloy. Prices of Aluminum alloys fluctuate greatly and are dependent on batch size, unit size, forming methods, etc.

**Standards with similar compositions**

- Australia: 6061 to AS 1734, 6061 to AS 1866, 6061 to AS 1867, 6061 to AS 2848.1, 6061A to AS 2848.1
- Canada: 0.6061 to CSA HA-4, 0.6061 to CSA HA.5, 0.6061 to CSA HA.6, 0.6061 to CSA HA.7, 0.6061 to CSA HA.7.1, 0.6061 to CSA HA.8
- Europe: EN AW-6061 to CEN EN 573-3
- France: EN AW-6061 to NF A50-411, 6061 to NF A50-451
- Germany: 3.3211/AlMgSiCu to DIN 1725-1
- International: AlMgSiCu to ISO 209-1
- Japan: 6061 to JIS H4120, A6061FD to JIS H4140, A6061FH to JIS H4140, A6061P to JIS H4000, A6061S to JIS H4100, A6061TB to JIS H4180, A6061TD to JIS H4080, A6061TE to JIS H4080
- Russia: 1330 to GOST 4784, AD33 to GOST 4784
- UK: 6061 to BS 1471, 6061 to BS 1473, 6061 to BS 1474, 6061 to BS 1475
- USA: 6061, 6061 to AMS 4025, 6061 to AMS 4026, 6061 to AMS 4027, 6061 to AMS 4043, 6061 to AMS 4053, 6061 to AMS 4115, 6061 to AMS 4116, 6061 to AMS 4117, 6061 to ASTM B209M, 6061 to ASTM B210M, 6061 to ASTM B211M, 6061 to ASTM B221M, 6061 to ASTM B234, 6061 to ASTM B241M, 6061 to ASTM B241M, 6061 to ASTM B309, 6061 to ASTM B313B313M, 6061 to ASTM B316B316M, 6061 to ASTM B343B343M, 6061 to ASTM B349, 6061 to ASTM B352, 6061 to ASTM B352M, 6061 to ASTM B352M, 6061 to MIL-F-17132, 6061 to MIL-P-25995B, 6061 to QQ-A-22516, 6061 to QQ-A-25011, 6061A, 6062, B632/B632M, 6061 to MIL-F-17132, 6061 to MIL-P-25995B, 6061 to QQ-A-22516, 6061 to QQ-A-25011, 6061A, 6062, UNS-A90601
- Venezuela: 6061 to COPANT 862
- Yugoslavia: 3.5456.00/AlMgSiCu to JUS C.C2.100
- Tradenames: ALCOA 6061 COLD FINISHED BAR, ALUMINUM C58, ANTICORODAL-082, BAW 6061, KAISER ALUMINUM 6061

**Links**

ProcessUniverse
Producers
Reference
Shape

**General information**

<b>Designation</b>	7020, wrought
Condition	T6 (Solution heat-treated and artificially aged)
UNS number	A97020
EN name	EN AW-7020 (EN AW-AlZn4.5Mg1)
EN number	3.4335

**Typical uses**

Transportable bridging, weapons industry, armour plating, Engineering-Corps equipment.

**Composition overview**

**Compositional summary**

AlB156 / Zn4.5 / Mg1.4 / Mn0.05-0.5 / Cr0.1-0.35 / Zr0.08-0.2 (impurities: Fe<0.4, Si<0.2, Ti<0.05, Other<0.15)

Material family	Metal (non-ferrous)
Base material	Al (Aluminum)

**Composition detail (metals, ceramics and glasses)**

Al (aluminum)	* 91.4	-	94.8	%
Cr (chromium)	0.1	-	0.35	%
Cu (copper)	0	-	0.2	%
Fe (iron)	0	-	0.4	%
Mg (magnesium)	1	-	1.4	%
Mn (manganese)	0.05	-	0.5	%
Si (silicon)	0	-	0.35	%
Ti (titanium)	0	-	0.05	%
Zn (zinc)	4	-	5	%
Zr (zirconium)	0.08	-	0.2	%
Other	0	-	0.15	%

**Price**

Price	* 96.3	-	113	CZK/kg
Price per unit volume	* 2.66e5	-	3.19e5	CZK/m <sup>3</sup>

**Physical properties**

Density	2.75e3	-	2.81e3	kg/m <sup>3</sup>
---------	--------	---	--------	-------------------

**Mechanical properties**

Young's modulus	70	-	74	GPa
Specific stiffness	25.1	-	26.7	MN.m/kg
Yield strength	318	-	352	MPa
Tensile strength (elastic limit)	361	-	399	MPa
Specific strength	114	-	127	kN.m/kg

**Elongation**

Compressive strength	* 318	-	352	MPa
Flexural modulus	* 70	-	74	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	318	-	352	MPa
Shear modulus	25	-	27	GPa
Bulk modulus	65	-	72	GPa
Poisson's ratio	0.325	-	0.335	
Shape factor	21			

**Hardness - Vickers**

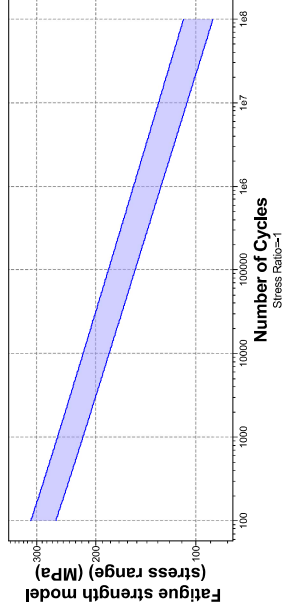
119 - 131 HV

Elastic stored energy (springs) 702 - 862 kJ/m<sup>3</sup>

Fatigue strength at 10<sup>7</sup> cycles \* 116 - 118 MPa

Fatigue strength model (stress range) \* 106 - 129 MPa

[Fatigue](#), Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7 cycles



**Impact & fracture properties**

Fracture toughness	* 33	-	35	MPa.m <sup>0.5</sup>
Toughness (G)	15.1	-	17.1	kJ/m <sup>2</sup>

**Thermal properties**

Melting point	605	-	645	°C
Maximum service temperature	80	-	100	°C
Minimum service temperature	-273			°C
Thermal conductivity	137	-	143	W/m.°C
Specific heat capacity	875	-	911	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	22.7	-	23.9	µstrain/°C
Thermal shock resistance	187	-	212	°C
Thermal distortion resistance	* 5.81	-	6.21	MW/in
Latent heat of fusion	384	-	393	kJ/kg



**Electrical properties**

Electrical resistivity	4,8 - 5	µhm.cm
Electrical conductivity	34,5 - 35,9	%IACS
Galvanic potential	-0,78 - -0,7	V

**Magnetic properties**

Magnetic type	Non-magnetic
---------------	--------------

**Optical, aesthetic and acoustic properties**

Transparency	Opaque	
Acoustic velocity	5,01e3 - 5,17e3	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	1e-4 - 0,002	

**Critical materials risk**

Contains >5wt% critical elements?	Yes
Notes	Al (aluminum) added to the 2019 US critical minerals list

**Processing properties**

Metal casting	Unsuitable	
Metal cold forming	Limited use	
Metal hot forming	Limited use	
Metal press forming	Acceptable	
Metal deep drawing	Limited use	
Machining speed	116	m/min
Weldability	Poor	
Notes	Preheating is not required, post weld heat treatments required	

**Durability**

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Acceptable
Weak acids	Excellent
Strong acids	Excellent
Weak alkalis	Acceptable
Strong alkalis	Unacceptable
Organic solvents	Excellent
Oxidation at 500C	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	Limited use
Notes	Aluminum alloys perform poorly when self-mated but can be processed without galling when mated with steels.
Flammability	Non-flammable

**Corrosion resistance of metals**

Stress corrosion cracking	Susceptible
Notes	Rated in chloride. Other susceptible environments: Halide, Water

**Primary production energy, CO2 and water**

Embodied energy, primary production	* 187	-	206	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 12,4	-	13,7	kg/kg
Water usage	* 1,1e3	-	1,21e3	l/kg

**Processing energy, CO2 footprint & water**

Roll forming, forging energy	* 7,91	-	8,74	MJ/kg
Roll forming, forging CO2	* 0,593	-	0,665	kg/kg
Roll forming, forging water	* 4,93	-	7,4	l/kg
Extrusion, hot rolling energy	* 15,5	-	17,2	MJ/kg
Extrusion, hot rolling CO2	* 1,16	-	1,29	kg/kg
Extrusion, hot rolling water	* 8,19	-	12,3	l/kg
Wire drawing energy	* 57,5	-	63,5	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 4,31	-	4,76	kg/kg
Wire drawing water	* 21,7	-	32,5	l/kg
Metal powder forming energy	* 22,5	-	24,9	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 1,8	-	1,99	kg/kg
Metal powder forming water	* 24,6	-	36,9	l/kg
Vaporization energy	* 1,58e4	-	1,71e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 1,16e3	-	1,28e3	kg/kg
Vaporization water	* 6,46e3	-	9,69e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 1,62	-	1,79	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,121	-	0,134	kg/kg
Coarse machining water (per unit wt removed)	* 11,9	-	13,2	MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 0,883	-	0,987	kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 23,3	-	25,8	MJ/kg
Fine machining water (per unit wt removed)	* 1,75	-	1,93	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 155	-	171	MJ/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 11,6	-	12,8	kg/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)				

**Recycling and end of life**

Recycle	✓			
Embodied energy, recycling	* 31,9	-	35,3	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 2,51	-	2,77	kg/kg
Recycle fraction in current supply	40,5	-	44,7	%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			

**Notes**

**Other notes**  
Prices of Aluminum alloys fluctuate greatly, and are dependent on batch size, unit size, forming methods, etc.

**Keywords**

UNIDAL, Aluuisse-Lonza Group (SWITZERLAND); UNIDUR-100, Aluminium Walzwerke Singen GmbH (GERMANY);

**Standards with similar compositions**

- Austria:
  - 7005 to AS 2848.1
- Austria:
  - ALZn4.5Mg1 to ONORM M3430
- Denmark:
  - 7005 to DS 3012
- Europe:
  - EN AW-7005 to CEN EN 573-3, EN AW-7020 to CEN EN 573-3
- France:
  - 7020 to NF A50-411, 7020 to NF A50-451, 7020 to NF A50-501
- Germany:
  - 3433/ALZn4.5Mg1 to DIN 1725-1
- Hungary:
  - AlZn4.5Mg1 to MSZ 3714/1
- International:
  - AlZn4.5Mg1 to ISO 209-1, ALZn4.5Mg1.5Mn to ISO 209-1
- Norway:
  - 17410 to NS 17410
- Russia:
  - 1911 to GOST 4784
- USA:
  - 7005, 7005 to ASTM B221M, 7020, UNS A97005, UNS A97020
- Tradenames:
  - ALUMINUM X7005, UNIDUR-100

**Links**

Process/Universe	
Producers	
Reference	
Shape	

**General information**

<b>Designation</b>	Ti-6Al-4V
<b>Condition</b>	Aged
<b>Typical uses</b>	Gas turbines, aircraft, deicing and air conditioning ducting, condenser tubes, surgical implants, ultrasonic devices, lacing wire, welding wire, cryogenic vessels and components.

**Composition overview**

**Compositional summary**

Ti88-91 / Al5.5-6.8 / V3.5-4.5 (Impurities: Fe<0.4, O<0.2, C<0.1, N<0.05, H<0.012, Other<0.4)

<b>Base material</b>	Metal (non-ferrous)
	Ti (Titanium)
<b>Composition detail (metals, ceramics and glasses)</b>	
Al (aluminum)	5.5 - 6.75 %
C (carbon)	0 - 0.1 %
Fe (iron)	0 - 0.4 %
H (hydrogen)	0 - 0.0125 %
N (nitrogen)	0 - 0.05 %
O (oxygen)	0 - 0.2 %
Ti (titanium)	* 88 - 91 %
V (vanadium)	3.5 - 4.5 %
Other	0 - 0.4 %

**Price**

Price	* 441 - 527 CZK/kg
Price per unit volume	* 1,98e6 - 2,38e6 CZK/m <sup>3</sup>

**Physical properties**

Density	4.42e3 - 4.43e3 kg/m <sup>3</sup>
---------	-----------------------------------

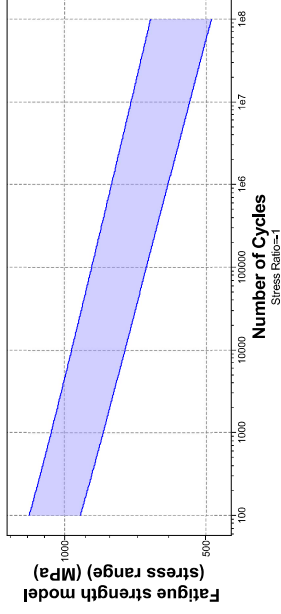
**Mechanical properties**

Young's modulus	111 - 119 GPa
Specific stiffness	25.1 - 26.9 MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	1,02e3 - 1,08e3 MPa
Tensile strength	1,16e3 - 1,27e3 MPa
Specific strength	231 - 244 kN.m/kg
Elongation	8 - 13 % strain
Compressive strength	* 1,1e3 - 1,15e3 MPa
Flexural modulus	* 111 - 119 GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	1,02e3 - 1,1e3 MPa
Shear modulus	40 - 45 GPa

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

Bulk modulus	123 - 153 GPa
Poisson's ratio	0.35 - 0.37
Shape factor	11
Hardness - Vickers	380 - 420 HV
Hardness - Brinell	361 - 400 HB
Elastic stored energy (springs)	4,49e3 - 5,12e3 kJ/m <sup>3</sup>
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	* 613 - 638 MPa
Fatigue strength model (stress range)	* 542 - 722 MPa

**Fatigue strength model (stress range)** \* 1e9 cycles



**Impact & fracture properties**

Fracture toughness	82 - 100 MPa.m <sup>0.5</sup>
Toughness (C)	58.9 - 86.4 kJ/m <sup>2</sup>

**Thermal properties**

Melting point	1,61e3 - 1,66e3 °C
Maximum service temperature	350 - 420 °C
Minimum service temperature	-273 °C
Thermal conductivity	7.1 - 7.3 W/m.K
Specific heat capacity	560 - 570 J/kg.K
Thermal expansion coefficient	8.7 - 9.1 µstrain/°C
Thermal shock resistance	976 - 1,08e3 °C
Thermal distortion resistance	* 0,788 - 0,831 MW/m
Latent heat of fusion	360 - 370 kJ/kg

**Electrical properties**

Electrical resistivity	168 - 170 µΩm.cm
Electrical conductivity	1,01 - 1,03 %ACS
Galvanic potential	* -0,12 - -0,04 V

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

**Magnetic properties**

Magnetic type	Non-magnetic
---------------	--------------

**Optical, aesthetic and acoustic properties**

Transparency	Opaque
Acoustic velocity	5.01e3 - 5.19e3 m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	0.001 - 0.005

**Critical materials risk**

Contains >5wt% critical elements?	Yes
Notes	Al (aluminum) and Ti (titanium) added to the 2018 US critical minerals list

**Processing properties**

Metal casting	Excellent
Metal cold forming	Limited use
Metal hot forming	Acceptable
Metal press forming	Acceptable
Metal deep drawing	Limited use
Machining speed	11.9 m/min
Weldability	Good
Notes	Preheating and post-weld heat treatments are not required

**Durability**

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Acceptable
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Acceptable
Organic solvents	Excellent
Oxidation at 500C	Excellent
UV radiation (sunlight)	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	Limited use
Notes	High tendency to gall can be overcome by anodizing.

**Flammability**

Flammability	Non-flammable
--------------	---------------

**Corrosion resistance of metals**

Stress corrosion cracking	Susceptible
Notes	Rated in chloride. Other susceptible environments: Halids, organic liquids, dry nitrogen, lactose

**Primary production energy, CO2 and water**

Embodied energy, primary production	* 655 MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 38.4 - 42.3 kg/kg
Water usage	* 187 - 207 l/kg

**Processing energy, CO2 footprint & water**

Casting energy	* 12.8 MJ/kg
Casting CO2	* 0.963 kg/kg
Casting water	* 24.3 - 36.5 l/kg
Roll forming, forging energy	* 16.4 - 18.1 MJ/kg
Roll forming, forging CO2	* 1.23 - 1.36 kg/kg
Roll forming, forging water	* 8.55 - 12.8 l/kg
Extrusion, hot rolling energy	* 32.5 - 35.9 MJ/kg
Extrusion, hot rolling CO2	* 2.44 - 2.69 kg/kg
Extrusion, hot rolling water	* 15.4 - 23.2 l/kg
Wire drawing energy	* 121 MJ/kg
Wire drawing CO2	* 9.08 - 10 kg/kg
Wire drawing water	* 45.6 - 68.4 l/kg
Metal powder forming energy	* 45.6 - 50.7 MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 3.65 - 4.05 kg/kg
Metal powder forming water	* 49.9 - 74.8 l/kg
Vaporization energy	* 1.46e4 MJ/kg
Vaporization CO2	* 1.09e3 - 1.21e3 kg/kg
Vaporization water	* 6.07e3 - 9.11e3 l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 2.89 - 3.19 MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.217 - 0.24 kg/kg
Coarse machining water (per unit wt removed)	* 24.6 - 27.2 l/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 1.85 - 2.04 MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 48.8 - 53.9 MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 3.66 - 4.04 kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 146 - 161 MJ/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 10.9 - 12.1 MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	

**Recycling and end of life**

Recycle	✓
Embodied energy, recycling	* 82.8 - 91.5 MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 6.5 - 7.18 kg/kg
Downcycle	✓
Combust for energy recovery	✓
Landfill	✓
Biodegrade	✗

**Notes**

**Other notes**

Most widely used of all titanium alloys. Bars and forgings may be heat treated to a range of strength levels and is used in highly stressed structures. Weldable alloy.

Brinell Hardness, 3000kg load, 10mm ball

**Standards with similar compositions**



**General information**

<b>Designation</b>	Ti-3Al-2.5V (Grade 9)
<b>UNS number</b>	R56320
<b>Tradenames</b>	Ti-3Al-1.2.5V ALLOY, Haynes (USA); Ti-3Al-2.5V, Sandvik (Sweden);

**Typical uses**

Tubing in aircraft and engine hydraulic systems, pipes and vessels, foil for honey-comb applications, sporting equipment - golf club shafts, tennis rackets, bicycle frames, etc.

**Composition overview**

**Compositional summary**

Ti89-96 / Al2.5-3.5 / V2-3 (impurities: Fe<0.25, C<0.08, N<0.02)

<b>Material family</b>	Metal (non-ferrous)
<b>Base material</b>	Ti (Titanium)

**Composition detail (metals, ceramics and glasses)**

Al (aluminum)	2.5	-	3.5	%
C (carbon)	0	-	0.08	%
Fe (iron)	0	-	0.25	%
N (nitrogen)	0	-	0.02	%
Ti (titanium)	• 93.2	-	95.5	%
V (vanadium)	2	-	3	%

**Price**

Price	• 447	-	523	CZK/kg
Price per unit volume	• 2e6	-	2,35e6	CZK/m <sup>3</sup>

**Physical properties**

Density	4,47e3	-	4,49e3	kg/m <sup>3</sup>
---------	--------	---	--------	-------------------

**Mechanical properties**

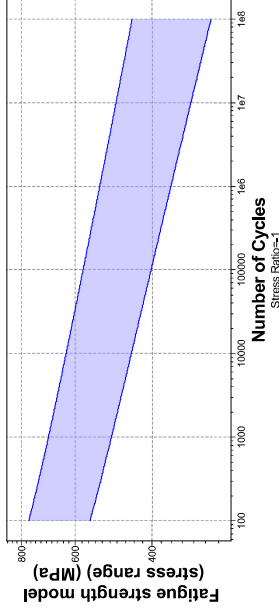
Young's modulus	91	-	95	GPa
Specific stiffness	20.3	-	21.2	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	483	-	620	MPa
Tensile strength	621	-	750	MPa
Specific strength	108	-	138	kN.m/kg
Elongation	15	-	20	% strain
Compressive strength	• 580	-	744	MPa
Flexural modulus	• 91	-	95	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	531	-	682	MPa
Shear modulus	33	-	36	GPa
Bulk modulus	101	-	122	GPa

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

**Poisson's ratio**

Shape factor	17	0.35	-	0.37
Hardness - Vickers	• 103	-	113	HV
Hardness - Brinell	• 92	-	100	HB
Elastic stored energy (springs)	1,27e3	-	2,04e3	kJ/m <sup>3</sup>
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	• 363	-	432	MPa
Fatigue strength modal (stress range)	• 325	-	483	MPa

**Parameters:** Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7 cycles



**Impact & fracture properties**

Fracture toughness	• 70	-	75	MPa.m <sup>0.5</sup>
Toughness (G)	52.6	-	60.6	kJ/m <sup>2</sup>

**Thermal properties**

Melting point	• 1,62e3	-	1,63e3	°C
Maximum service temperature	327	-	402	°C
Minimum service temperature	-273	-	-	°C
Thermal conductivity	7.5	-	7.7	W/m.K
Specific heat capacity	• 535	-	545	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	7.9	-	8.1	µstrain/°C
Thermal shock resistance	648	-	835	°C
Thermal distortion resistance	• 0.933	-	0.967	MW/m
Latent heat of fusion	360	-	370	kJ/kg

**Electrical properties**

Electrical resistivity	120	-	126	µohm.cm
Electrical conductivity	1.37	-	1.44	%IACS
Galvanic potential	• -0.09	-	-0.01	V

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

**Magnetic properties**

Magnetic type	Non-magnetic
---------------	--------------

**Optical, aesthetic and acoustic properties**

Transparency	Opaque
Acoustic velocity	4.51e3 - 4.61e3 m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.001 - 0.002

**Critical materials risk**

Contains >5wt% critical elements?	Yes
Notes	Al (aluminum) and Ti (titanium) added to the 2018 US critical elements list

**Processing properties**

Metal casting	Limited use
Metal cold forming	Limited use
Metal hot forming	Acceptable
Metal press forming	Acceptable
Metal deep drawing	Limited use
Machining speed	14.6 m/min
Weldability	Excellent
Notes	Pneumatic and post-weld heat treatments are not required

**Durability**

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Acceptable
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Acceptable
Organic solvents	Excellent
Oxidation at 500C	Acceptable
UV radiation (sunlight)	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	Limited use
Notes	High tendency to gall can be overcome by anodizing.

**Flammability**

Flammability	Non-flammable
--------------	---------------

**Corrosion resistance of metals**

Stress corrosion cracking	Susceptible
Notes	Rated in chloride. Other susceptible environments: Halide, organic liquids, dry hydrogen fluoride

**Primary production energy, CO2 and water**

Embodied energy, primary production	* 622 - 686 MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 36 - 39.7 kg/kg
Water usage	* 148 - 164 l/kg

**Processing energy, CO2 footprint & water**

Casting energy	* 12.6 - 13.9 MJ/kg
Casting CO2	* 0.941 - 1.04 kg/kg
Casting water	* 23.8 - 35.6 l/kg
Roll forming, forging energy	* 9.57 - 10.6 MJ/kg
Roll forming, forging CO2	* 0.718 - 0.793 kg/kg
Roll forming, forging water	* 5.64 - 8.46 l/kg
Extrusion, hot rolling energy	* 18.9 - 20.8 MJ/kg
Extrusion, hot rolling CO2	* 1.41 - 1.56 kg/kg
Extrusion, hot rolling water	* 9.61 - 14.4 l/kg
Wire drawing energy	* 69.9 - 77.3 MJ/kg
Wire drawing CO2	* 5.25 - 5.8 kg/kg
Wire drawing water	* 26.4 - 39.5 l/kg
Metal powder forming energy	* 44.5 - 49.3 MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 3.56 - 3.94 kg/kg
Metal powder forming water	* 48.6 - 72.9 l/kg
Vaporization energy	* 1.46e4 - 1.61e4 MJ/kg
Vaporization CO2	* 1.09e3 - 1.21e3 kg/kg
Vaporization water	* 6.07e3 - 9.11e3 l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 1.87 - 2.06 MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.14 - 0.155 kg/kg
Coarse machining water (per unit wt removed)	* 14.4 - 15.9 MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 1.08 - 1.19 kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 28.3 - 31.3 MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 2.13 - 2.35 kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 146 - 161 MJ/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 10.9 - 12.1 kg/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	

**Recycling and end of life**

Recycle	✓
Recycled energy, recycling	* 79.6 - 88 MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 6.25 - 6.91 kg/kg
Downcycle fraction in current supply	21.8 - 24.1 %
Downcycle	✓
Combust for energy recovery	✓
Landfill	✓
Biodegrade	✗

**Notes**

Half 6-4 offers 20 to 50% higher strength than C.P. grades, but is more formable than Ti-6Al-4V.

**Keywords**

Ti-3Al-2.5V Demeasius Bishop Tube Co. (USA); OMC 3Al-2.5V Manufacturer unknown (1); ALLVAC 3-2.5, Teledyne Altrac, Vasco Mfg. (USA); Ti-3Al-2.5V, Wuh Chang (USA);

**Standards with similar compositions**

- Germany: 3.7195 to DIN 17851, TiAl3V2.5 to DIN 17851
  - Japan: TAB 3250 to JIS H4657, TAT 3250CF to JIS H4637, TAT 3250CL to JIS H4637, TAT 3250F to JIS H4637, TAT 3250L to JIS H4637, TAT 3250W to JIS H4637, TAT 3250WCF to JIS H4637, TAT 3250WCL to JIS H4637, TAT 3250WF to JIS H4637, TAT 3250WL to JIS H4637, YTAB 325 to JIS Z3331, YTAW 325 to JIS Z3331
  - USA: 3Al-2.5V to AMS 4943D, ERTH-9 to AWS A5.16, ERTH-9ELL to AWS A5.16, F-28 to ASTM B381, F-9 to ASTM B381, Grade 28 to ASTM B338, Grade 28 to ASTM B348, Grade 28 to ASTM B861, Grade 28 to ASTM B862, Grade 28 to ASTM B863, Grade 9 to ASTM B265, Grade 9 to ASTM B337, Grade 9 to ASTM B338, Grade 9 to ASTM B338, Grade 28 to ASTM B862, Grade 9 to ASTM B863, UNS R56320, UNS R56321, UNS R56323
- Trademarks:  
 RMI 3AL-2.5V, TI 3-2.5, Ti-3Al-2.5V, TITANIUM 3 AL-2.5 V, UTA3V

**Links**

Process/Universe
Producers
Reference
Shape



**General information**

<b>Designation</b>	ASTM AZ61A, wrought
UNS number	M11610, M11611
US name	ASTM AZ61A, MIL-AZ61A, SAE AZ61A, AWS ER AZ61A, AWS RAZ61A
EN name	~EN-MA21140, ~EN-MA10MgAZ621, ~EN-MBZ1140, ~EN-M10MgAZ621
EN number	~3.5612
ISO name	~MgAZ621,
JIS (Japanese) name	~MB2, ~MS2, ~MT2
<b>Typical uses</b>	Aerospace and defense applications.

**Composition overview**

**Compositional summary**

Mg91.94 / Al6.87 z / Zn0.4-1.5 / Mn0.15-0.5 (impurities; Si<0.1, Cu<0.05, Fe<0.005, Ni<0.005, Other<0.3)

<b>Material family</b>	Metal (non-ferrous)
<b>Base material</b>	Mg (Magnesium)

**Composition detail (metals, ceramics and glasses)**

Al (aluminum)	5.8	-	7.2	%
Cu (copper)	0	-	0.05	%
Fe (iron)	0	-	0.005	%
Mg (magnesium)	90.6	-	93.6	%
Mn (manganese)	0.15	-	0.5	%
Ni (nickel)	0	-	0.005	%
Si (silicon)	0	-	0.1	%
Zn (zinc)	0.4	-	1.5	%
Other	0	-	0.3	%

**Price**

Price	* 62.2	-	63.6	CZK/kg
Price per unit volume	* 1,12e5	-	1,19e5	CZK/m <sup>3</sup>

**Physical properties**

Density	1,863	-	1,81e3	kg/m <sup>3</sup>
---------	-------	---	--------	-------------------

**Mechanical properties**

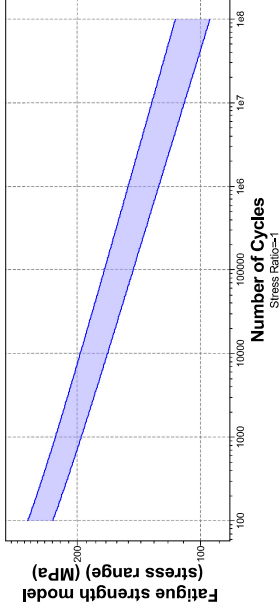
Young's modulus	44	-	46	GPa
Specific stiffness	24.4	-	25.5	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	165	-	220	MPa
Tensile strength	285	-	305	MPa
Specific strength	91.4	-	122	kN.m/kg

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

**Elongation**

Compressive strength	* 110	-	150	MPa
Flexural modulus	* 44	-	46	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	170	-	180	MPa
Shear modulus	16	-	18	GPa
Bulk modulus	36	-	41	GPa
Poisson's ratio	0.3	-	0.31	
Shape factor	23			
Hardness - Vickers	55	-	70	HV
Elastic stored energy (springs)	308	-	529	kJ/m <sup>3</sup>
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	* 115	-	125	MPa
Fatigue strength model (stress range)	* 109	-	131	MPa

**Reference:** Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles



**Impact & fracture properties**

Fracture toughness	* 16	-	18	MPa.m <sup>0.5</sup>
Toughness (G)	5,7	-	7,19	kJ/m <sup>2</sup>

**Thermal properties**

Melting point	* 450	-	620	°C
Maximum service temperature	* 190	-	210	°C
Minimum service temperature	-273			°C
Thermal conductivity	77	-	79	W/m.°C
Specific heat capacity	1e3	-	1,01e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	27.3	-	27.5	µstrain/°C
Thermal shock resistance	134	-	179	°C
Thermal distortion resistance	* 2,81	-	2,88	MW/in
Latent heat of fusion	358	-	367	kJ/kg

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

**Electrical properties**

Electrical resistivity	14.1 - 14.5	µhm.cm
Electrical conductivity	11.9 - 12.2	%IACS
Galvanic potential	-1.59 - -1.51	V

**Magnetic properties**

Magnetic type	Non-magnetic
---------------	--------------

**Optical, aesthetic and acoustic properties**

Transparency	Opaque	
Acoustic velocity	4.94e3 - 5.05e3	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	0.003 - 0.008	

**Critical materials risk**

Contains >5wt% critical elements?	Yes
Notes	Al (aluminum) added to the 2018 US critical minerals list

**Processing properties**

Metal casting	Unsuitable	
Metal cold forming	Limited use	
Metal hot forming	Excellent	
Metal press forming	Acceptable	
Metal deep drawing	Limited use	
Machining speed	283	m/min
Weldability	Excellent	
Notes	Preheating may be required, post weld heat treatment is required	

**Durability**

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Acceptable
Weak acids	Limited use
Strong acids	Unacceptable
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Acceptable
Organic solvents	Excellent
Oxidation at 500C	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	Acceptable
Notes	Can be machined without lubricant due to galling resistance when mated with steel

**Flammability**

Flammability	Non-flammable
--------------	---------------

**Corrosion resistance of metals**

Stress corrosion cracking	Slightly susceptible
Notes	Resist in chloride. Other susceptible environments: Potassium bicarbonate

**Primary production energy, CO2 and water**

Embodied energy, primary production	298	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	41.5	kg/kg
Water usage	937	l/kg

**Processing energy, CO2 footprint & water**

Roll forming, forging energy	4.79	MJ/kg
Roll forming, forging CO2	0.359	kg/kg
Roll forming, forging water	3.6	l/kg
Extrusion, hot rolling energy	9.3	MJ/kg
Extrusion, hot rolling CO2	0.697	kg/kg
Extrusion, hot rolling water	5.53	l/kg
Wire drawing energy	34.1	MJ/kg
Wire drawing CO2	2.56	kg/kg
Wire drawing water	12.9	l/kg
Metal powder forming energy	20.7	MJ/kg
Metal powder forming CO2	1.66	kg/kg
Metal powder forming water	22.6	l/kg
Vaporization energy	1.45e4	MJ/kg
Vaporization CO2	1.08e3	kg/kg
Vaporization water	6.03e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	1.15	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	0.0863	kg/kg
Coarse machining water (per unit wt removed)	7.24	l/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	0.543	kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	14	MJ/kg
Fine machining water (per unit wt removed)	1.05	l/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	145	MJ/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	10.8	kg/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)		

**Recycling and end of life**

Recycle	✓	
Embodied energy, recycling	45.5	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	3.57	kg/kg
Recycle fraction in current supply	36.8	%
Downcycle	✓	
Combust for energy recovery	✓	
Landfill	✓	
Biodegrade	✗	

**Notes**

**Standards with similar compositions**

- France:  
G-A6Z1 to NF A65-717
- Germany:  
3.5612 to DIN 17291, MgAl6Zn to DIN 17291
- International:  
Mg-4Al6Zn1Mn to ISO 3116
- Japan:  
MBZ to JIS H4203, MSZ to JIS H4204, MT2 to JIS H4202
- UK:  
2L 503 to BS 2L 503, MAG-E-121 to BS 3373, MAG-F-121 to BS 3372
- USA:  
AZ61 to ASTM B107/B107M, AZ61A to ASTM B275, AZ61A to ASTM B91, AZ61A to MIL R-6944B, AZ61A to SAE J469, ER AZ61A, A to AWS A5.19, RA-Z61A to AWS A5.19, UNS M11610, UNS M11611
- Tradenames:  
A.M. 57 S, AZIM, DOWAL AZ61X, ELECTRON AZ IM, ELECTRON Z-1-B, ELEKTRON A6, ELEKTRON AZ61, ELEKTRON AZIM, MELMAG AZ61 BATTERY PLATE, REVERE J-1, WHITE LIGHT AZ61A

**Links**

Process/Universe
Producers
Reference
Shape

**General information**

<b>Designation</b>	AISI 440C, wrought
<b>Condition</b>	Tempered at 316°C
<b>UNS number</b>	S44004
<b>US name</b>	~ASTM
<b>EN name</b>	X105CrMo17
<b>EN number</b>	1.4125

**Typical uses**

Processing of potentially corrosive liquids e.g. chemicals/alcoholes/sewage, structural uses in corrosive environments, e.g. nuclear plants, ships, offshore oil installations, underwater cables and pipes

**Composition overview**

**Compositional summary**

Fe/76-83 / Cr/16-18 / C/0.95-1.2 (impurities: Mn<1, Si<1, Mo<0.75, P<0.04, S<0.03)

<b>Material family</b>	Metal (ferrous)
<b>Base material</b>	Fe (Iron)

**Composition detail (metals, ceramics and glasses)**

C (carbon)	0.95	-	1.2	%
Cr (chromium)	16	-	18	%
Fe (iron)	* 78	-	83	%
Mn (manganese)	0	-	1	%
Mo (molybdenum)	0	-	0.75	%
P (phosphorus)	0	-	0.04	%
S (sulfur)	0	-	0.03	%
Si (silicon)	0	-	1	%

**Price**

<b>Price</b>	* 25	-	26.4	CZK/kg
<b>Price per unit volume</b>	* 1.93e5	-	2.08e5	CZK/m <sup>3</sup>

**Physical properties**

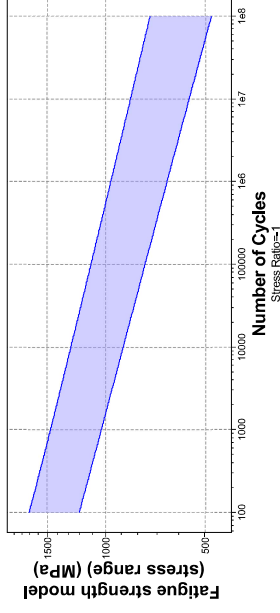
<b>Density</b>	7.7e3	-	7.9e3	kg/m <sup>3</sup>
----------------	-------	---	-------	-------------------

**Mechanical properties**

<b>Young's modulus</b>	190	-	210	GPa
<b>Specific stiffness</b>	24.3	-	27	MN.m/kg
<b>Yield strength (elastic limit)</b>	1.71e3	-	2.09e3	MPa
<b>Tensile strength</b>	1.77e3	-	2.17e3	MPa
<b>Specific strength</b>	219	-	268	kN.m/kg
<b>Elongation</b>	* 1	-	2	% strain
<b>Compressive strength</b>	* 1.71e3	-	2.09e3	MPa

<b>Flexural modulus</b>	* 190	-	210	GPa
<b>Flexural strength (modulus of rupture)</b>	1.71e3	-	2.09e3	MPa
<b>Shear modulus</b>	73	-	83	GPa
<b>Bulk modulus</b>	140	-	163	GPa
<b>Poisson's ratio</b>	0.275	-	0.285	
<b>Shape factor</b>	12			
<b>Hardness - Vickers</b>	590	-	690	HV
<b>Hardness - Rockwell B</b>	* 100	-	119	HRB
<b>Hardness - Rockwell C</b>	53	-	60	HRC
<b>Hardness - Brinell</b>	550	-	610	HB
<b>Elastic stored energy (springs)</b>	7.35e3	-	1.09e4	kJ/m <sup>3</sup>
<b>Fatigue strength at 10<sup>7</sup> cycles</b>	* 638	-	737	MPa
<b>Fatigue strength model (stress range)</b>	* 559	-	842	MPa

**Fatigue**, Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7 cycles



**Impact & fracture properties**

<b>Fracture toughness</b>	* 12	-	28	MPa.m <sup>0.5</sup>
<b>Toughness (G)</b>	0.818	-	3.46	kJ/m <sup>2</sup>

**Thermal properties**

<b>Melting point</b>	1.37e3	-	1.48e3	°C
<b>Maximum service temperature</b>	* 256	-	306	°C
<b>Minimum service temperature</b>	-73	-	-43	°C
<b>Thermal conductivity</b>	23	-	27	W/m.°C
<b>Specific heat capacity</b>	450	-	500	J/kg.°C
<b>Thermal expansion coefficient</b>	9	-	11	µstrain/°C
<b>Thermal shock resistance</b>	822	-	1.1e3	°C
<b>Thermal distortion resistance</b>	* 2.21	-	2.84	MW/m
<b>Latent heat of fusion</b>	* 260	-	285	kJ/kg

## CES 2019 Stainless steel, martensitic, AISI 440C, tempered at 316°C



### Electrical properties

Electrical resistivity	55 - 65	µhm.cm
Electrical conductivity	2,65 - 3,13	%IACS
Galvanic potential	* -0,19 - -0,11	V

### Magnetic properties

Magnetic type	Magnetic
---------------	----------

### Optical, aesthetic and acoustic properties

Transparency	Opaque	
Acoustic velocity	4,59e3 - 5,19e3	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 1,9e-4 - 2,5e-4	

### Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	Yes
-----------------------------------	-----

### Processing properties

Metal casting	Unsuitable	
Metal cold forming	Unsuitable	
Metal hot forming	Acceptable	
Metal press forming	Limited use	
Metal deep drawing	Unsuitable	
Machining speed	6,71	m/min
Weldability	Poor	

Notes: Preheating and post-heat treatments are required

Weldability - MIG	Not recommended
Weldability - plasma	Not recommended
Weldability - SAW	Not recommended
Weldability - TIG	Not recommended
Brizability	Good
Carbon equivalency	4,15 - 5,12

### Durability

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Acceptable
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Limited use
Organic solvents	Excellent
Oxidation at 500C	Excellent
UV radiation (sunlight)	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	Excellent

Notes: Tempering at a low temperature increases hardness and therefore galling resistance.

### Flammability

Flammability	Non-flammable
--------------	---------------

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

## CES 2019 Stainless steel, martensitic, AISI 440C, tempered at 316°C



### Corrosion resistance of metals

Pitting resistance equivalent number (PREN)	16	-	20,5
Pitting and crevice corrosion resistance	Low (<20)		
Stress corrosion cracking	Susceptible		

Notes: Raised in chloride; Other susceptible environments: Hydrogen sulfide

Intergranular (weld line) corrosion resistance	Restricted
Inorganic acids	Restricted
Organic acids	Restricted
Alkalis	Restricted
Humidity / water	Good
Sea water	Restricted
Sour oil and gas	Restricted

### Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	* 66,7	-	73,6	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 5,12	-	5,64	kg/kg
Water usage	* 115	-	127	l/kg

### Processing energy, CO2 footprint & water

Roll forming, forging energy	* 15,6	-	17,3	MJ/kg
Roll forming, forging CO2	* 1,17	-	1,3	kg/kg
Roll forming, forging water	* 8,23	-	12,4	l/kg
Extrusion, hot rolling energy	* 31	-	34,2	MJ/kg
Extrusion, hot rolling CO2	* 2,32	-	2,57	kg/kg
Extrusion, hot rolling water	* 14,8	-	22,2	l/kg
Wire drawing energy	* 115	-	128	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 8,66	-	9,57	kg/kg
Wire drawing water	* 43,5	-	65,2	l/kg
Metal powder forming energy	* 36,4	-	40,3	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 2,91	-	3,23	kg/kg
Metal powder forming water	* 39,7	-	59,6	l/kg
Vaporization energy	* 1,05e4	-	1,2e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 815	-	900	kg/kg
Vaporization water	* 4,53e3	-	6,79e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 2,78	-	3,07	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,208	-	0,23	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 23,5	-	26	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 1,76	-	1,95	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 46,5	-	51,4	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 3,49	-	3,86	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 109	-	120	MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	* 8,15	-	9	kg/kg

### Recycling and end of life

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

Recycle	✓		
Embodied energy, recycling	* 14.6	-	16.1 MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 1.14	-	1.27 kg/kg
Recycle fraction in current supply	35.5	-	39.3 %
Downcycle	✓		
Combust for energy recovery	✓		
Landfill	✓		
Biodegrade	✗		

## Notes

### Keywords

SLATER TYPE 440-C, Slater Steels (USA);

### Standards with similar compositions

- Canada: 440C to CSA G110.3
- China: 11Cr17 to GB 1220, 11Cr17 to GB 4226, 11Cr17 to GB/T 4356
- France: Z100CD17 to AFNOR NF A35-575
- India: 105Cr18Mn650 to IS 6529, 105Cr18Mn650 to IS 6911, X108Cr17Mo to IS 1570/5, X108Cr17Mo to IS 6603
- Italy: X102CrMn17KU to UNI 29553
- Japan: S440C to JIS G4303, SUS440C to JIS G4308, SUS440C to JIS G4309
- Mexico: 440C to NMX-B-83
- South Korea: STS 440C to KS D 3706, STS440C to KS D 3702
- USA: 440C to ASTM A473, 440C to FED QQ-S-763F, 440C to MIL-B-913, 440C to MIL-S-862B, 440C to SAE J467, S44004 to ASTM A276, S44004 to ASTM A314-87, S44004 to ASTM A493-95, S44004 to ASTM A580/A580M-98, S44004 to ASTM A959, UNS S44004
- Tradenames: AL TECH STAINLESS TYPE 440C, ALLEGHENY LUDLUM 440C, CMXC, EASTERN N-7, LESCALL OY 440C, VAC-ARC, RNO 100, SLATER TYPE 440C, SOLEIL D8, SS CUT C, STERLING STAINLESS BHPX, UNILLOY 440 C, UNILLOY 440 F

## Links

Process/Universe	
Producers	
Reference	
Shape	

**General information**

<b>Designation</b>	AISI 4130
<b>Condition</b>	Normalized
<b>UNS number</b>	G41300, ~H41300, ~K13047
<b>US name</b>	AMS 6345, AMS 6346, AMS 6348, AMS 6350, AMS 6356, AMS S 6759, AMS 6370, AMS 6371
<b>EN name</b>	30CrMo4
<b>EN number</b>	1.7216, 1.7220, 1.7221, 1.7226, 1.7230
<b>Typical uses</b>	
General construction, general mechanical engineering, automotive, pressure vessels, pipework	

**Composition overview**

**Compositional summary**

Fe97.98 / Cr0.8-1.1 / Mn0.4-0.6 / CO.28-0.33 / Si0.15-0.35 / Mo0.15-0.25 (impurities: S<0.04, P<0.035)

<b>Material family</b>	Metal (ferrous)
<b>Base material</b>	Fe (Iron)

**Composition detail (metals, ceramics and glasses)**

<b>C (carbon)</b>	0.28	-	0.33	%
<b>Cr (chromium)</b>	0.8	-	1.1	%
<b>Fe (iron)</b>	* 97.3	-	98.2	%
<b>Mn (manganese)</b>	0.4	-	0.6	%
<b>Mo (molybdenum)</b>	0.15	-	0.25	%
<b>P (phosphorus)</b>	0	-	0.035	%
<b>S (sulfur)</b>	0	-	0.04	%
<b>Si (silicon)</b>	0.15	-	0.35	%

**Price**

<b>Price</b>	* 17.9	-	18.6	CZK/kg
<b>Price per unit volume</b>	* 1.465	-	1.4665	CZK/m <sup>3</sup>

**Physical properties**

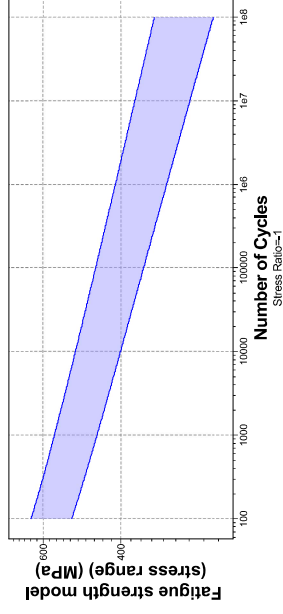
<b>Density</b>	7.79e3	-	7.87e3	kg/m <sup>3</sup>
----------------	--------	---	--------	-------------------

**Mechanical properties**

<b>Young's modulus</b>	200	-	210	GPa
<b>Specific stiffness</b>	25.5	-	26.9	MN.m/kg
<b>Yield strength (elastic limit)</b>	483	-	534	MPa
<b>Tensile strength</b>	621	-	686	MPa
<b>Specific strength</b>	61.6	-	68.2	kN.m/kg
<b>Elongation</b>	5	-	18	% strain
<b>Compressive strength</b>	* 483	-	534	MPa

<b>Flexural modulus</b>	* 200	-	210	GPa
<b>Flexural strength (modulus of rupture)</b>	483	-	534	MPa
<b>Shear modulus</b>	76	-	79.9	GPa
<b>Bulk modulus</b>	185	-	195	GPa
<b>Poisson's ratio</b>	0.32	-	0.333	
<b>Shape factor</b>	46			
<b>Hardness - Vickers</b>	183	-	223	HV
<b>Elastic stored energy (springs)</b>	569	-	695	kJ/m <sup>3</sup>
<b>Fatigue strength at 1.07 cycles</b>	* 299	-	347	MPa
<b>Fatigue strength modal (stress range)</b>	* 279	-	372	MPa

**Parameters:** Stress Rate = -1, Number of Cycles = 1e7/cycles



**Impact & fracture properties**

<b>Fracture toughness</b>	* 72	-	114	MPa.m <sup>0.5</sup>
<b>Toughness (G)</b>	26.4	-	60.7	kJ/m <sup>2</sup>

**Thermal properties**

<b>Melting point</b>	1,46e3	-	1.51e3	°C
<b>Maximum service temperature</b>	445	-	496	°C
<b>Minimum service temperature</b>	* -73	-	-48	°C
<b>Thermal conductivity</b>	41.5	-	45	W/m.°C
<b>Specific heat capacity</b>	461	-	480	J/kg.°C
<b>Thermal expansion coefficient</b>	12.4	-	13.1	µstrain/°C
<b>Thermal shock resistance</b>	183	-	207	°C
<b>Thermal distortion resistance</b>	* 3.24	-	3.55	MW/m
<b>Latent heat of fusion</b>	* 265	-	280	kJ/kg

**Electrical properties**

<b>Electrical resistivity</b>	20	-	25	µohm.cm
-------------------------------	----	---	----	---------

Electrical conductivity	6,9	-	8,62	%IACS
Galvanic potential	- 4,5	-	- 0,42	V
<b>Magnetic properties</b>				
Magnetic type	Magnetic			
<b>Optical, aesthetic and acoustic properties</b>				
Transparency	Opaque			
Acoustic velocity	5,05e3	-	5,19e3	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	7e-4	-	8,7e-4	
<b>Critical materials risk</b>				
Contains >5wt% critical elements?	No			
<b>Processing properties</b>				
Metal casting	Unsuitable			
Metal cold forming	Excellent			
Metal hot forming	Excellent			
Metal press forming	Excellent			
Metal deep drawing	Limited use			
Machining speed	24,4		m/min	
Weldability	Good			
Notes	Preheating and post weld heat treatments are required			
Carbon equivalency	0,537	-	0,7	
<b>Durability</b>				
Water (fresh)	Acceptable			
Water (salt)	Limited use			
Weak acids	Limited use			
Strong acids	Unacceptable			
Weak alkalis	Acceptable			
Strong alkalis	Limited use			
Organic solvents	Excellent			
Oxidation at 500C	Acceptable			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Galling resistance (adhesive wear)	Acceptable			
Flammability	Non-Flammable			
<b>Corrosion resistance of metals</b>				
Stress corrosion cracking	Slightly susceptible			
Notes	Raised in chloride. May be susceptible in halide, ammonia, nitrogen, acidic, caustic, carbonate environments			
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	30,8	-	33,9	MJ/kg
Source(s)				

 Values marked \* are estimates.  
 No warranty is given for the accuracy of this data

CO2 footprint, primary production	2,26	-	2,49	kg/kg
Source(s)	0,398 kg/kg (Met. van der end Oers, ven, 2003); 1,75 kg/kg (Ecovent (V2), 14, kg/kg) (Met. van der end Oers, ven, 2003); 2,23 kg/kg (Met. van der end Oers, ven, 2003); 2,3 kg/kg (Norgate, Jahnensah, Eptonk, 2007); 2,94 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2,7 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2,87 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2,89 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 3,03 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 3,27 kg/kg (Hammond and Jones, 2008)			
Water usage	* 47,9	-	53	l/kg
<b>Processing energy, CO2 footprint &amp; water</b>				
Casting energy	* 10,8	-	12	MJ/kg
Casting CO2	* 0,813	-	0,899	kg/kg
Casting water	* 20,5	-	30,8	l/kg
Roll forming, forging energy	* 4,39	-	4,86	MJ/kg
Roll forming, forging CO2	* 0,329	-	0,364	kg/kg
Roll forming, forging water	* 3,43	-	5,14	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	* 8,5	-	9,4	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	* 0,638	-	0,705	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	* 5,18	-	7,78	l/kg
Wire drawing energy	* 31,1	-	34,4	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 2,33	-	2,58	kg/kg
Wire drawing water	* 11,7	-	17,6	l/kg
Metal powder forming energy	* 37,8	-	42	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 3,02	-	3,36	kg/kg
Metal powder forming water	* 41,3	-	62	l/kg
Vaporization energy	* 1,09e4	-	1,2e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 815	-	901	kg/kg
Vaporization water	* 4,53e3	-	6,863	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 1,09	-	1,21	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,0618	-	0,0905	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 6,64	-	7,34	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,488	-	0,55	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 12,8	-	14,1	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0,96	-	1,06	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 109	-	120	MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	* 8,15	-	9,01	kg/kg
<b>Recycling and end of life</b>				
Recycle				
Embodied energy, recycling	* 8,1	-	8,96	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 0,636	-	0,703	kg/kg
Recycle fraction in current supply	39,9	-	44	%
Downcycle				
Combustor for energy recovery				
Landfill				

 Values marked \* are estimates.  
 No warranty is given for the accuracy of this data



Biodegradable



## Notes

### Warning

Some rare heat treatments of certain alloys may produce values for mechanical properties outside the given ranges, e.g. AISI 9255; tempered at 205C

## Keywords

B5C-SRc95, British Steel plc (UK); TKS 34CRMO4, ThyssenKrupp Stahl AG (GERMANY); TKS 25CRMO4, ThyssenKrupp Stahl AG (GERMANY); A-1251, AFORA (Aceros Alore S.A.) (SPAIN); A-1250, AFORA (Aceros Alore S.A.) (SPAIN);

## Standards with similar compositions

- Argentina: IFRAM 4130 to IAS
- Australia: 4130 to AS 1444, 4130H to AS 1444
- Austria: 4130 to ON B90, 4130H to ON B90
- Canada: 15131 to CSN 415131
- India: 30Cr4Mo2 to IS 15704, IS 963 to IS 963
- Italy: 30Cr4Mo4 to UNI 6403, 30Cr4Mo4 to UNI 7845, 30Cr4Mo4 to UNI 7874
- Japan: SCM 1 to JIS G4105, STH 21 to JIS G3429, STKS1 to JIS G3441, STKS3 to JIS G3441
- Mexico: 4130 to NMX-B-203-SCFI, 4130 to NMX-B-300, 4130H to NMX-B-288, 4130H to NMX-B-300
- Pan America: 4130 to COPANT 334, 4130 to COPANT 514
- Poland: PN-H-9403004, 30HMA to PN-H-8403004
- Romania: 25MnCr11 to STAS, 33MnCr11q to STAS 9382/4
- UK: 30Cr4Mo4 to BS EN 10297-1
- USA: 4130, 4130 to ASTM A29A29M, 4130 to ASTM A331-95, 4130 to ASTM A513, 4130 to ASTM A519, 4130 to ASTM A829/A829M, 4130 to ASTM A866, 4130 to DoD-F-24669/1, 4130 to SAE J404, 4130H to ASTM A331-95, 4130H to SAE J1975, G41300 to ASTM A1031, G41300 to ASTM A506, G41300 to ASTM A507, G41300 to MIL-S-46059, Grade 11 to ASTM A946-95, Grade 3 to ASTM A983/A983M, Grade E Class 55 to ASTM A372/A372M, Grade E Class 65 to ASTM A372/A372M, Grade E Class 70 to ASTM A372/A372M, MIL-T-16736 to MIL-T-16736B, UNS G41300, UNS F41300, UNS K13047, UNS K13147
- VERTOMAR: ABERCO 4130, HARDWEAR 500F, KROPP 23, RO AR-321, RO AR-340, RO AR-360, RO AR-400, RO AR-300/311, VERTOMAR CM30, VL-30

## Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

**General information**

<b>Designation</b>	AISI 1020
<b>Condition</b>	Normalized
<b>UNS number</b>	G10200
<b>US name</b>	ASTM MT 1020, ASTM M1020, ASTM 1020, ASME G10200, ASME G10170, ASME 1017, ~SAE 040 X, Y, Z, ~SAE 0355, ~SAE 035C, ~SAE 0395, ~SAE 035A, ~SAE 035 X, Y, Z, ~ASTM A336, ~ASTM 1018 Class A, ~ASME G10210, ~ASME 10180, ~ASME 1021
<b>EN name</b>	S240CP, ~P355NB, ~P310NB, ~HS15
<b>EN number</b>	~1.0021
<b>ISO name</b>	E235 Quality A, ~CE20E4, ~CC21A
<b>GB (Chinese) name</b>	~ML204L
<b>JIS (Japanese) name</b>	SWRM20, SWRCH20A, SG 255, ~SWRCH10A, ~STKM12C, ~STKM12B, ~STKM12A, ~SPHT 2

**Typical uses**

Forgings, machined parts, shafts, car wheel hubs, general haulage gear

**Composition overview**

**Compositional summary**

Fe98.1-99.5 / Mn0.3-0.6 / C0.17-0.23 (impurities: S<0.05, P<0.04)

<b>Material family</b>	Metal (ferrous)
<b>Base material</b>	Fe (Iron)
<b>C (carbon)</b>	0.17 - 0.23 %
<b>Fe (Iron)</b>	• 99.1 - 99.5 %
<b>Mn (manganese)</b>	0.3 - 0.6 %
<b>P (phosphorus)</b>	0 - 0.04 %
<b>S (sulfur)</b>	0 - 0.05 %

**Composition detail (metals, ceramics and glasses)**

<b>Price</b>	• 16.6 - 17.3 CZK/kg
<b>Price per unit volume</b>	• 1.365 - 1.3665 CZK/m <sup>3</sup>
<b>Density</b>	7.863 kg/m <sup>3</sup>

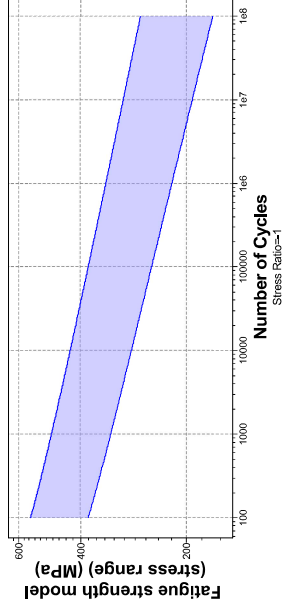
**Mechanical properties**

<b>Young's modulus</b>	205 - 215 GPa
<b>Specific stiffness</b>	26.1 - 27.4 MN.m/kg
<b>Yield strength (elastic limit)</b>	310 - 350 MPa

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

<b>Tensile strength</b>	395 - 490 MPa
<b>Specific strength</b>	39.5 - 44.6 kN.m/kg
<b>Elongation</b>	28 - 43 % strain
<b>Compressive strength</b>	• 310 - 350 MPa
<b>Flexural modulus</b>	• 205 - 215 GPa
<b>Flexural strength (modulus of rupture)</b>	310 - 350 MPa
<b>Shear modulus</b>	79 - 84 GPa
<b>Bulk modulus</b>	158 - 175 GPa
<b>Poisson's ratio</b>	0.285 - 0.295
<b>Shape factor</b>	59
<b>Hardness - Vickers</b>	125 - 150 HV
<b>Elastic stored energy (springs)</b>	229 - 291 kJ/m <sup>3</sup>
<b>Fatigue strength at 10<sup>7</sup> cycles</b>	• 223 - 260 MPa
<b>Fatigue strength model (stress range)</b>	• 192 - 302 MPa

**Parameters:** Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7 cycles



**Impact & fracture properties**

<b>Fracture toughness</b>	• 43 - 63 MPa.m <sup>0.5</sup>
<b>Toughness (G)</b>	9.08 - 18.3 kJ/m <sup>2</sup>

**Thermal properties**

<b>Melting point</b>	1,48e3 - 1,52e3 °C
<b>Maximum service temperature</b>	• 340 - 356 °C
<b>Minimum service temperature</b>	• -68 - -38 °C
<b>Thermal conductivity</b>	50 - 54 W/m.°C
<b>Specific heat capacity</b>	465 - 505 J/kg.°C
<b>Thermal expansion coefficient</b>	11.5 - 12.5 µstrain/°C
<b>Thermal shock resistance</b>	121 - 141 °C
<b>Thermal distortion resistance</b>	• 4.1 - 4.58 MW/m

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

Latent heat of fusion	• 270	-	275	-	KJ/kg
<b>Electrical properties</b>					
Electrical resistivity	16	-	18	-	µhm.cm
Electrical conductivity	9.58	-	10.8	-	%IACS
Galvanic potential	• -0.51	-	-0.43	-	V
<b>Magnetic properties</b>					
Magnetic type	Magnetic				
<b>Optical, aesthetic and acoustic properties</b>					
Transparency	Opaque				
Acoustic velocity	5.11e3	-	5.24e3	-	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	• 0.00101	-	0.00121	-	
<b>Critical materials risk</b>	No				
Contains >5wt% critical elements?	No				
<b>Processing properties</b>					
Metal casting	Unsuitable				
Metal cold forming	Acceptable				
Metal hot forming	Excellent				
Metal press forming	Excellent				
Metal deep drawing	Acceptable				
Machining speed	39.6				
Weldability	Good				
Notes	Preheating and post weld heat treatments are required				
Carbon equivalency	0.22	-	0.33	-	
<b>Durability</b>					
Water (fresh)	Acceptable				
Water (salt)	Limited use				
Weak acids	Limited use				
Strong acids	Unacceptable				
Weak alkalis	Acceptable				
Strong alkalis	Limited use				
Organic solvents	Excellent				
Oxidation at 500C	Acceptable				
UV radiation (sunlight)	Excellent				
Notes	Galling resistance (adhesive wear)				
Aluminum bronze as the most suitable mating material to minimize galling.					
<b>Flammability</b>	Non-flammable				
<b>Corrosion resistance of metals</b>					
Stress corrosion cracking	Not susceptible				
Notes					

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

	Railed in chloride. Other susceptible environments: Nitrate, hydroxide, carbonate, ammonia				
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>					
Embodied energy, primary production	30.8	-	33.9	-	MJ/kg
Notes	19.4 MJ/kg (Cheng, Overly, Davis, 1999); 23 MJ/kg (Norgate, Jhansahah, Rankin, 2007); 27.9 MJ/kg (Ecovent v2.2); 29.2 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 30.1 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 31.2 MJ/kg (Sala and Gassan, 2010); 39 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 45.4 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008)				
<b>CO2 footprint, primary production</b>					
CO2 footprint, primary production	2.26	-	2.49	-	kg/kg
Notes	0.98 kg/kg (West, van der and Oers, van, 2003); 1.25 kg/kg (Ecovent v2.1); 1.61 kg/kg (West, van der and Oers, van, 2003); 2.23 kg/kg (West, van der and Oers, van, 2003); 2.3 kg/kg (Norgate, Jhansahah, Rankin, 2007); 2.44 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2.77 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2.87 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2.89 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 3.03 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 3.27 kg/kg (Hammond and Jones, 2008)				
<b>Water usage</b>	• 43.1	-	47.7	-	l/kg
<b>Processing energy, CO2 footprint &amp; water</b>					
Casting energy	• 11	-	12.2	-	MJ/kg
Casting CO2	• 0.826	-	0.913	-	kg/kg
Casting water	• 20.9	-	31.3	-	l/kg
Roll forming, forging energy	• 2.94	-	3.25	-	MJ/kg
Roll forming, forging CO2	• 0.221	-	0.244	-	kg/kg
Roll forming, forging water	• 2.81	-	4.21	-	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	• 5.6	-	6.19	-	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	• 0.42	-	0.464	-	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	• 3.95	-	5.92	-	l/kg
Wire drawing energy	• 1.52	-	1.68	-	kg/kg
Wire drawing CO2	• 7.62	-	11.4	-	l/kg
Wire drawing water	• 38.9	-	42.8	-	MJ/kg
Metal powder forming energy	• 3.11	-	3.43	-	kg/kg
Metal powder forming CO2	• 42.4	-	63.5	-	l/kg
Metal powder forming water	• 1.09e4	-	1.2e4	-	MJ/kg
Vaporization energy	• 815	-	901	-	kg/kg
Vaporization CO2	• 4.53e3	-	6.9e3	-	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	• 0.874	-	0.966	-	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	• 0.0655	-	0.0724	-	kg/kg
Coarse machining water (per unit wt removed)	• 4.46	-	4.93	-	MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	• 0.335	-	0.37	-	kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	• 8.45	-	9.34	-	MJ/kg
Ginding energy (per unit wt removed)	• 0.654	-	0.7	-	MJ/kg
Ginding CO2 (per unit wt removed)	• 109	-	120	-	MJ/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	• 8.15	-	9.01	-	kg/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	• 8.15	-	9.01	-	kg/kg
<b>Recycling and end of life</b>					
Recycle	✓				
Embodied energy, recycling	• 8.1	-	8.96	-	MJ/kg

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

CO2 footprint, recycling	• 0.636	-	0.703	kg/kg
Recycle fraction in current supply	39.9	-	44	%
Downcycle	✓			
Combust for energy/recovery	✗			
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			

## Notes

### Keywords

CS 1020, Steelmark-Eagle & Globe (AUSTRALIA); LASALLE 1018, LaSalle Steel Co. (USA);

### Standards with similar compositions

- Australia: S1020 to AS 1442, S1020 to AS 1443, S1020 to AS 1446
- Austria: CZSP to ONORM M3167
- China: GB650 to GB 13788, ML20A1 to GB/T 6478, Q235 to GB/T 3524
- Europe: EN10028-2 to EN 10028-2, S235 to MSZ 500
- India: 17C5 to IS 8053, ERW-3 to IS 3074, Grade 8 to IS 7887, Grade 8 to IS 8952
- International: CC21A to ISO 4954
- Italy: C21 to UNI 6922, CB20FF to UNI 7356
- Japan: SWRCH20A to JIS G3507, SWRM 20 to JIS G3505
- Mexico: 1020 to NMX-B-301, MT1020 to NMX-B-201, MT1020 to NMX-B-203-SCHI
- North America: 1020 to COPANT 330, 1020 to COPANT 331, 1020 to COPANT 333
- South Korea: SWRCH20A to KS D 3592, SWRM 20 to KS D 3554
- Spain: 18KA-DF to UNE 36032, 20KA-DF to UNE 36032, F7516 to UNE 36032, F7517 to UNE 36032
- UK: 040A20 to BS 9701
- USA: 1020, 1020 to ASTM A29A29M, 1020 to ASTM A512-96, 1020 to ASTM A513, 1020 to ASTM A519, 1020 to ASTM A569/A569M, 1020 to D9D-F-2466971, 1020 to FED QQ-S-639B, 1020 to FED QQ-S-698, 1020 to FED QQ-W-461H, 1020 to MIL-S-1952A, 1020 to MIL-T-3820, 1020 to SAE J403, 1023, 1023 to ASTM A513, 1023 to ASTM A566/A566M, 1023 to SAE J403, 3032 to AMS 5022E, C2 to MIL-S-16789A, CS1020 to MIL-S-11310E, CS10200 to ASTM A595, Grade B, ASTM A730, M1020, M1020 to ASTM A29A29M, M1020, ASTM A575-96, M1020, SAE J403, MT1020 to ASTM A512-96, MT1020 to ASTM A513, MT1020 to ASTM A519, MT1020 to ASTM A787, UNS G10200, UNS G10200 to UNS, UNS G10230, UNS K01900, UNS K02000, UNS K02004, UNS K11900
- Tradenames: ASCOMETALXC18, B-W STANDARDIZED, CS1020, MARREL M5, POMPEY PFC 2, TOLEDO 15, UNION MC QUAND-EHN, V2

## Links

### Process/Universe

#### Producers

#### Reference

#### Shape

**Description**

Image



**Caption**

1. Bamboo green woods © PublicDomainPictures at Pixabay [Public domain] 2. Bamboo hut © Suc at Pixabay [Public domain] 3. Lamp made of bamboo © at Pixabay [Public domain]

**The material**

Bamboo is nature's gift to the construction industry. Think of it: a hollow tube, exceptionally strong and light, growing so fast that it can be harvested after a year, and - given a little longer - reaching a diameter of 0,3 meters and a height of 15 meters. This and its hard surface and ease of working makes it the most versatile of materials. Bamboo is used for building and scaffolding, for roofs and flooring, for pipes, buckets, baskets, walking sticks, fishing poles, window blinds, mats, arrows and furniture. Tonkin bamboo is strong and flexible (fishing poles). Tall bamboo is used for structural applications (houses or furniture). Eela bamboo is the fastest growing and is used as a source of cellulose for the production of cellulose or Rayon.

**Composition (summary)**

Cellulose/Hemicellulose/Lignin/12% H2O

**General properties**

Density	602	-	797	kg/m <sup>3</sup>
Price	* 29,8	-	44,5	CZK/kg

**Mechanical properties**

Young's modulus	15,1	-	19,9	GPa
Yield strength (elastic limit)	* 35,8	-	44,1	MPa
Tensile strength	160	-	319	MPa
Elongation	* 2,3	-	2,8	% strain
Hardness - Vickers	* 3,49	-	4,3	HV
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	29,3	-	39,4	MPa
Fracture toughness	* 5,69	-	7,01	MPa·m <sup>0,5</sup>

**Thermal properties**

Maximum service temperature	118	-	142	°C
Thermal conductor or insulator?	Good insulator			
Thermal conductivity	0,148	-	0,195	W/m.°C

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data

Specific heat capacity  
Thermal expansion coefficient

1,67e3	-	1,7e3	J/kg.°C
2,59	-	4,11	µstrain/°C

**Electrical properties**

Electrical conductor or insulator?

Poor insulator

**Optical properties**

Transparency

Opaque

**Eco properties**

Embodied energy, primary production	32,5	-	35,9	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	1	-	1,11	kg/kg
Recycle				✗

**Supporting information**

Typical uses

Building & construction, scaffolding, furniture, pulp & paper making, ropes, reinforcement for concrete, frames for earty aircraft, pipes, baskets, walking sticks, fishing poles, window blinds, mats, arrows and furniture.

**Links**

ProcessUniverse

Values marked \* are estimates.  
No warranty is given for the accuracy of this data