

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Protichůdné požadavky při výběru materiálu v konstruování

Autor: Matěj Moulis
Vedoucí práce: Ing. Ivana Slámová, Ph.D.

Akademický rok 2023/2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Matěj MOULIS**
Osobní číslo: **S21B0173P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Konstruování strojů a technických zařízení**
Téma práce: **Protichůdné požadavky při výběru materiálu v konstruování**
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní technické údaje:

Prostudujte metodiku výběru materiálu v případě více omezení a cílů, které jsou kladeny na materiál. Metodiku aplikujte na příkladu.

Osnova práce:

1. Uvedení do problematiky.
2. Rozpracování problému.
3. Aplikace na příkladu.
4. Shrnutí, závěr.

Konzultant: Ing. Dominik Fink

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] ASHBY, Michael F. Materials Selection in Mechanical Design. Fifth Edition. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 978-0-08-100599-6
[2] The GRANTA EduPack materials and proces selection platforms, produkt firmy ANSYS/GRANTA, www.grantadesign.com/education/

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

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2024**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Ing. Zdeněk Chval, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Akademický rok: 2023/2024
Jméno a příjmení studenta: Matěj Moulis
Název bakalářské práce: Protichůdné požadavky při výběru materiálu v konstruování

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Protichůdné požadavky při výběru materiálu v konstruování“ vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

Podpis studenta

Anotační list bakalářské práce

AUTOR	Příjmení Moulis	Jméno Matěj	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Slámová Ph.D.	Jméno Ivana	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU – FST – KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Protichůdné požadavky při výběru materiálu v konstruování		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2024
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	76	TEXTOVÁ ČÁST	56	GRAFICKÁ ČÁST	20
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce obsahuje popis a následnou praktickou ukázkou výběru vhodného materiálu při procesu konstruování na který jsou kladeny protichůdné požadavky. Praktická ukáзка je následně vztažena na výběr materiálu pro brzdový kotouč osobního automobilu.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	materiál, indikátor, hmotnost, vedení tepla, tuhost, pevnost, brzdový kotouč, požadavek, omezení, cíl, funkce, výběr, materiálová mapa, protichůdnost

Summary of bachelor sheet

AUTHOR	Surname Moulis	Name Matěj	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Slámová Ph.D.	Name Ivana	
INSTITUTION	ZČU – FST – KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Conflicting requirements in material selection in mechanical design		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKS	SUBMITTED IN	2024
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	76	TEXT PART	56	GRAPHICAL PART	20
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis includes a description and subsequent practical demonstration of selecting suitable material in the mechanical design, which involves conflicting constraints. The practical demonstration is then related to the selection of material for a car brake disc.
KEY WORDS	material, indicator, weight, heat conduction, stiffness, strength, brake disc, requirement, limitation, function, targets, material chart, conflicting constraints, selection

Obsah

Zadání Bakalářské práce.....	2
Prohlášení o autorství.....	3
Anotační list bakalářské práce	5
Summary of bachelor sheet	6
Přehled použitých zkratk a symbolů	8
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek	9
Seznam Příloh.....	10
1. Uvedení do tématu	11
2. Výběr materiálu v procesu konstruování	12
2.1 Proces konstruování.....	12
2.2 Volba materiálu.....	19
2.2.1 Funkce	21
2.2.2 Omezení.....	21
2.2.3 Cíle	22
2.2.4 Volné proměnné.....	22
2.3 Protichůdné požadavky.....	23
3. Aplikace na příkladu	26
3.1 Volba technického systému	26
3.2 Volba součásti	28
3.2.1 Stanovení funkcí.....	28
3.2.2 Stanovení omezení	29
3.2.3 Stanovení cílů	30
3.2.4 Stanovení volných proměnných.....	31
3.3 Nalezení materiálových indikátorů.....	33
3.4 Určení referenčního materiálu.....	36
3.5 Generování materiálových map	37
3.6 Definice sankčních funkcí	42
3.7 Proces zúžené selekce.....	44
3.8 Finální výběr.....	49
4. Závěr	53
Seznam použitých zdrojů	55

Přehled použitých zkratk a symbolů

FST	-	Fakulta strojní
KKS	-	Katedra konstruování strojů
ZČU	-	Západočeská univerzita v Plzni
EUIPO	-	European Union Intellectual Property Office
E_k	[J]	kinetická energie
I	[mm ⁴]	kvadratický moment setrvačnosti
ω	[rad×s ⁻¹]	úhlová rychlost
σ_t	[MPa]	napětí v tlaku
E	[MPa]	modul pružnosti v tlaku
ε	[-]	poměrné prodloužení
t	[mm]	tloušťka součásti
Δt	[mm]	zmenšení tloušťky součásti
F_t	[N]	tlaková síla
S_d	[mm ²]	velikost povrchu brzdových destiček
k_t	[N×mm ⁻¹]	tuhost součásti
m	[kg]	celková hmotnost součásti
m_a	[kg]	hmotnost hledaného materiálu
m_{a0}	[kg]	hmotnost šedé litiny
ρ	[kg×m ⁻³]	hustota materiálu
q_a	[W×m ⁻²]	teplotní tok hledaného materiálu
q_{a0}	[W×m ⁻²]	teplotní tok šedé litiny
λ	[-]	koeficient tepelné vodivosti
ΔT	[°C]	rozdíl vnějších teplot
T_d	[°C]	teplota disku
T_v	[°C]	teplota proudícího vzduchu

Seznam obrázků

Obrázek 1 - "flow chart" diagram [1].....	13
Obrázek 2 – „funkční struktury“ [1].....	15
Obrázek 3 – „stromový diagram" [1].....	16
Obrázek 4 – „diagram spleťité cesty“ [1].....	18
Obrázek 5 - propojení všech oblastí [1].....	19
Obrázek 6 - schéma specifikace požadavků [1].....	23
Obrázek 7 –Circuit Gilles Villeneuve v Kanadě [18].....	31
Obrázek 8 - znázornění směru síly brzdových destiček [11].....	34
Obrázek 9 - mapa s materiálovými rodinami [10] (Příloha č. I)	37
Obrázek 10 - osa X materiálové mapy [10].....	37
Obrázek 11 - osa Y materiálové mapy [10].....	38
Obrázek 12 - detail materiálových rodin [10] (Příloha č. II).....	38
Obrázek 13 - detail osy X materiálové mapy [10].....	39
Obrázek 14 - detail osy Y materiálové mapy [10].....	39
Obrázek 15 - oblast vhodných materiálů [10] (Příloha č. III).....	39
Obrázek 16 - omezení na pevnost a provozní teplotu [10] (Příloha č. IV)	40
Obrázek 17 - křivka kompromisu [10] (Příloha č. V).....	41
Obrázek 18 - sankční funkce a vhodné materiály [10] (Příloha č. VI).....	42
Obrázek 19 - porovnání modulu pružnosti a ceny [10] (Příloha č. VII)	45
Obrázek 20 - porovnání ceny a hustoty [10] (Příloha č. VIII)	46
Obrázek 21 - porovnání koeficientu tepelné vodivosti a ceny [10] (Příloha č. IX).....	47
Obrázek 22 - výběr s jiným sklonem sankční funkce [10] (Příloha č. X)	50

Seznam tabulek

Tabulka 1 - požadavky na materiál [10].....	32
Tabulka 2 - vlastnosti šedé litiny [10].....	36
Tabulka 3 – známkování.....	44
Tabulka 4 - známkování modulu pružnosti a ceny	45
Tabulka 5 - známkování hustoty.....	46
Tabulka 6 - známkování koeficientu tepelné vodivosti	47
Tabulka 7 - zprůměrování známek	48

Tabulka 8 - porovnání vlastností šedé litiny a vybraného materiálu [10]	49
Tabulka 9 - porovnání vlastností AlN a SiC ₂ [10].....	50
Tabulka 10 - finální porovnání vybraných materiálů [10]	51

Seznam Příloh

- Příloha č. I - mapa s materiálovými rodinami [10] (*Příloha č. I*)
- Příloha č. II - detail materiálových rodin [10] (*Příloha č. II*)
- Příloha č. III - oblast vhodných materiálů [10] (*Příloha č. III*)
- Příloha č. IV - omezení na pevnost a provozní teplotu [10] (*Příloha č. IV*)
- Příloha č. V - křivka kompromisu [10] (*Příloha č. V*)
- Příloha č. VI - sankční funkce a vhodné materiály [10] (*Příloha č. VI*)
- Příloha č. VII- porovnání modulu pružnosti a ceny [10] (*Příloha č. VII*)
- Příloha č. VIII- porovnání ceny a hustoty [10] (*Příloha č. VIII*)
- Příloha č. IX - porovnání koeficientu tepelné vodivosti a ceny [10] (*Příloha č. IX*)
- Příloha č. X- výběr s jiným sklonem sankční funkce [10] (*Příloha č. X*)
- Příloha č. XI – materiálový list Cast iron, gray (šedá litina) [10]
- Příloha č. XII – materiálový list SiC₂ (2 % Al₂O₃) (karbid křemičitý s 2 % oxidu hlinitého) [10]
- Příloha č. XIII – materiálový list SiC₂ (100 % karbid křemičitý) [10]

1. Uvedení do tématu

Výběr materiálu pro konstrukční aplikace je kritickou fází v procesu návrhu, která má zásadní dopad například na vlastnosti, funkčnost, životnost či náklady na výrobu daného produktu. Tento proces není pouze jednoduchým rozhodnutím, ale spíše komplexním postupem, který vyžaduje pečlivé zvážení mnoha faktorů.

Na začátku je třeba důkladně zvážit požadavky na výrobek a jeho zamýšlené použití. To zahrnuje identifikaci klíčových vlastností, jako je pevnost, tuhost, odolnost, teplotní stabilita a další. Tyto požadavky často vycházejí z konkrétních potřeb a prostředí, ve kterém bude výrobek používán. Následně je nutné provést analýzu dostupných materiálů a jejich vlastností, abychom identifikovali ty, které nejlépe splňují stanovené požadavky. Každý materiál má své vlastní charakteristiky a výhody, které je třeba zvážit. Například kovové slitiny mohou nabídnout vysokou pevnost a odolnost, zatímco polymery mohou být lehké a snadno formovatelné.

Často se setkáváme s protichůdnými požadavky, které dokáží celý proces značně ztížit. Například materiál s vysokou pevností může být zároveň křehký, což není ideální pro aplikace vyžadující flexibilitu. Proto je nutné provést kompromis a najít rovnováhu mezi různými vlastnostmi materiálu. Zároveň ve velké většině zadání figuruje důraz na minimalizaci nákladů, což se často neslučuje s výběrem materiálu, u kterého je nutné maximalizovat hledané požadované vlastnosti. Je tedy důležité zvážit nejen technické, ale i ekonomické aspekty a mnoho dalších.

V rámci této práce bude popsán jeden z možných postupů výběru materiálu, jenž musí vyhovět protichůdným požadavkům. A následně bude aplikován na praktickém příkladu výběru materiálu pro brzdový kotouč. Brzdových kotoučů existuje celá řada a jejich použití sahá od jízdního kola, přes automobily až po mnohem větší kolosy, kterými jsou vlaky, či dokonce letadla. Proto bude zvolen brzdový kotouč pro sportovní osobní automobil homologovaný do běžného provozu, do takové kategorie spadá například Ferrari FF. Celý proces bude probíhat za využití softwaru „ANSYS Granta EduPack“, který disponuje rozsáhlou databází materiálů, s jejíž pomocí lze přehledně a graficky zpracovat kroky potřebné pro výběr.

2. Výběr materiálu v procesu konstruování

2.1 Proces konstruování

Před samotným výběrem materiálu je důležité si uvědomit, že proces konstruování je mnohem širší a komplexnější úkon než jen rozhodnutí o použití konkrétního materiálu. Konstruování je složitý proces, který zahrnuje několik dalších kroků a aspektů, jež mají zásadní vliv na výsledný produkt. Pohled na konstruování z větší perspektivy umožňuje pochopit, že tento proces není izolovaným úkonem, ale je součástí celého životního cyklu výrobku. [1]

Každý konstrukční krok má svůj význam a ovlivňuje další fáze vývoje a užívání produktu. Od počátečního návrhu a výběru konceptu, přes detailní návrh a výrobu, až po užívání, a konečnou likvidaci produktu. Všechny tyto kroky a fáze mají vliv na celkovou kvalitu a zkušenost uživatele s výrobkem.

Konstruování je tak specifickou disciplínou, která vyžaduje znalost a porozumění širokého spektra technických, ekonomických, environmentálních a sociálních faktorů. Zahrnuje nejen technické aspekty, ale i strategické plánování a řízení rizik. V důsledku toho je konstruování dynamickým procesem, který se neustále vyvíjí a přizpůsobuje novým technologickým, ekonomickým a environmentálním podmínkám.

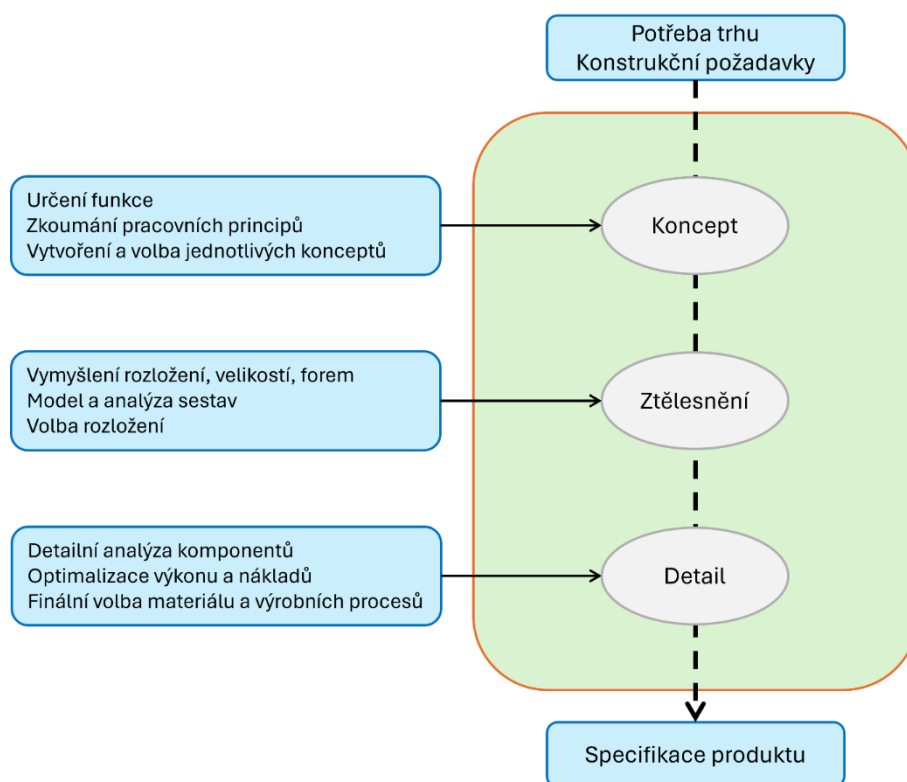
Na začátku života každého výrobku stojí nezbytnost určit tržní potenciál či představit inovativní nápad. Obě tyto možnosti je nutné pečlivě prozkoumat a zhodnotit ještě předtím, než je samotná realizace projektu zahájena. Potřeba trhu se může zdát zřejmá, avšak podrobnější analýza často odhalí skryté potřeby, problémy či nedostatky, které by mohly být řešeny novým produktem. Stejně tak je důležité zvážit inovativní nápady, jež se mohou zdát jedinečné. Prověření jejich jedinečnosti, existence podobných konceptů nebo patentovaných řešení je taktéž nezbytnou součástí prvotní fáze konstruování.

Roku 2022 bylo Úřadem Evropské unie pro duševní vlastnictví (EUIPO) evidováno 174 152 nových přihlášek patentů a inovativních nápadů, které žádají o validaci, což ukazuje na dynamiku a kreativitu evropského trhu. Přestože proces ověřování tržní potřeby a originality nápadu může být časově, a tedy i finančně náročný, je klíčový pro úspěch projektu. Až po důkladném průzkumu a ujištění, že žádná překážka v cestě k realizaci

nestojí, lze přistoupit k návrhu produktu, kde dochází k bližší specifikaci jeho podoby a funkcionality. [2]

Při specifikaci produktu je zásadní stanovit jednotlivé požadavky, které má produkt splňovat. Dosažení optimální formy a funkčnosti produktu vyžaduje přesné a pečlivé definice všech požadavků již na počátku procesu. Tento krok se obvykle uskutečňuje ještě před vytvořením prvního návrhu, protože požadavky mají zásadní vliv na celkový tvar a charakter navrhovaného produktu.

Na konstruování lze nahlížet z různých perspektiv a je na konstruktérech, jaký přístup si zvolí. Při konstruování je možné aplikovat mnoho různých přístupů, přičemž pro dosažení optimálních výsledků je ideální tyto přístupy kombinovat. Přístup popsany v této kapitole lze graficky znázornit pomocí tzv. "flow chart" diagramu, který je zobrazen na obrázku 1 a ukazuje uspořádání jednotlivých fází návrhu, tím určuje cestu k dosažení optimálního výsledku.



Obrázek 1 - "flow chart" diagram [1]

Pro dosažení optimálního řešení je proces návrhu rozdělen do několika fází, z nichž každá má svůj specifický účel a přínos. První z těchto fází je konceptuální část. V této fázi je kladen důraz na minimalizaci vnějších vlivů na jednotlivé konstruktéry,

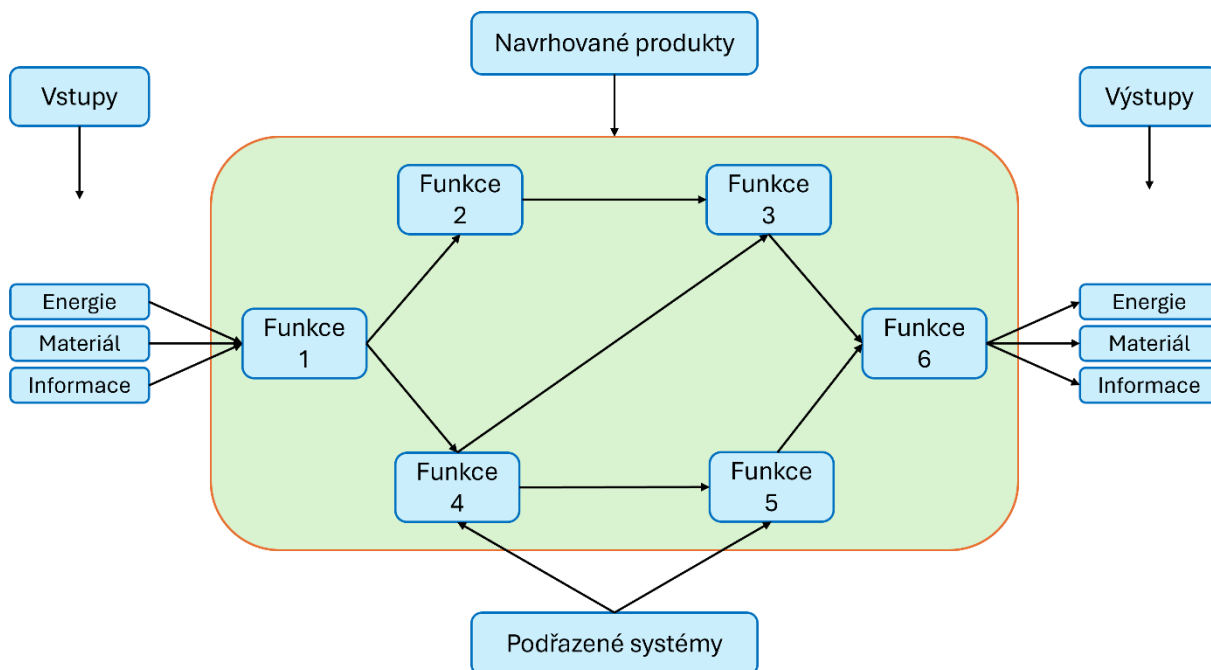
či konstruktérské týmy, jelikož cílem povětšinou není tvorba výrobku dle pomyslné šablony, ale maximální objektivita k řešení zadaného problému.

V konceptuální fázi je klíčové určit funkce produktu tak, aby nebylo určitým stylem podněcováno jejich vykonávání. Tím se zabrání omezení konstruktérových myšlenkových pochodů a umožní se mu zaměřit na široké spektrum kreativních řešení. Konkrétní specifikace funkcí by měly mít formu objektivního vyjádření, například: "Je požadováno, aby produkt byl schopen provádět činnost X." Tímto způsobem se konstruktérovi poskytuje prostor a flexibilita při hledání inovativních a efektivních řešení, které splňují požadavky na kvalitu stanovenou zadavatelem. Je důležité minimalizovat nepřímé ovlivňování konstruktérova myšlení v rámci konceptuální fáze, aby se mu umožnilo zkoumat a vyvíjet širokou škálu možností. Tímto způsobem se zajistí, že konstruktér dokáže dojít k výsledku, který bude odpovídat požadavkům a dosáhne stanovených cílů projektu. [1]

Existuje několik přístupů k řešení daného zadání, přičemž všechny tyto přístupy mohou být z principu správné a mohou se lišit pouze v několika drobných detailech. Právě tyto detaily však hrají v dnešním moderním a dynamickém světě klíčovou roli. I když se zřídka objevuje zcela inovativní přístup, který byl dosud nepředstavitelný. V extrémních technických odvětvích, kde je důraz kladen spíše na výkon než na minimalizaci nákladů či environmentálních emisí, může být tento pokrok velmi rychlý. Jedním z takových odvětví jsou například závody Formule 1, kde nebyla do roku 2022 aplikována žádná finanční omezení pro jednotlivé týmy, což výrazně přispělo k rychlosti pokroku v technickém odvětví. [3]

Komerční sféra, která se běžně označuje jako „mainstream“, je však zaměřena hlavně na minimalizaci nákladů, snižování vlivu na životní prostředí, maximalizaci zisku a minimalizaci času potřebného pro konstrukční fázi samotnou, což výrazně omezuje prostor pro inovace. I malá chyba může vést k nedokonalému výrobku a tím pádem snížení jeho šance úspěchu na trhu. V tomto kontextu je strategický přístup ke konstruování klíčový, protože do procesu vstupuje stále více faktorů a proměnných, které sice mohou ztěžovat a omezovat možnosti, ale zároveň napomáhají k nalezení optimálních řešení. [1]

Pro produkty, jejichž cílem je vykonávat určitou funkci nebo řešit nějaký problém, je důležité získat povědomí o jejich schopnostech. K vizualizaci těchto schopností slouží tzv. "funkčně-strukturní diagram", který je vyobrazen obrázkem 2 a zobrazuje propojení funkcí, jež má navrhovaný produkt vykonávat. Díky vzájemné závislosti požadovaných funkcí tento diagram umožňuje nalézt alternativní možnosti jejich vykonávání. Tímto způsobem lze lépe porozumět a optimalizovat návrh produktu.

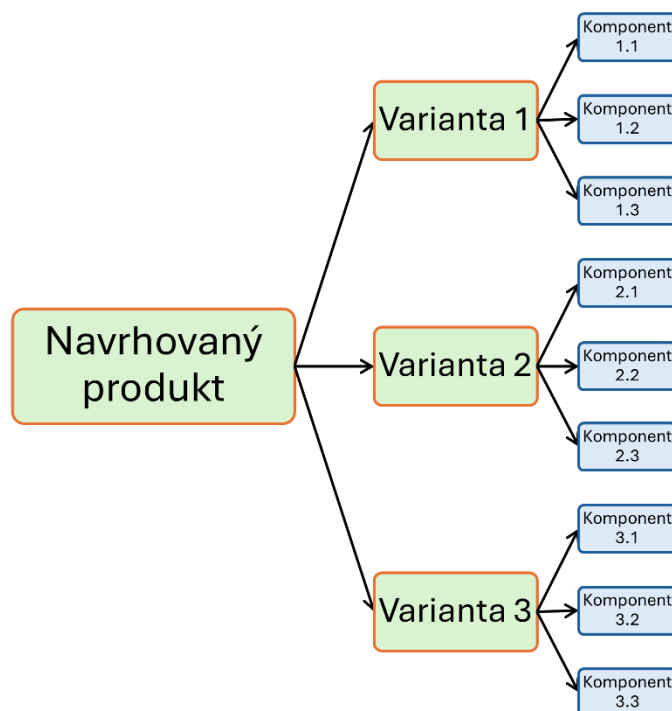


Obrázek 2 – „funkční struktury“ [1]

Po jasném určení požadovaných funkcí a funkčních principů výrobku se konceptuální fáze zaměřuje na zkoumání všech možných přístupů k řešení daného problému. Cílem je poskytnout komplexní přehled o existujících možnostech a detailní popis jednotlivých přístupů. Tento postup je zásadní, protože, jak již bylo zmíněno, detaily často představují klíčový rozdíl mezi jednotlivými variantami. Během této fáze se konstruktéři snaží analyzovat a porozumět různým přístupům, jejich potenciálním výhodám a omezením. Jedná se o zkoumání jednotlivých technických i technologických řešení, materiálů, konstrukčních postupů a dalších faktorů, které mohou ovlivnit výsledný produkt.

Užitečným nástrojem pro bližší specifikace jednotlivých konceptů je tzv. "Stromový diagram" znázorněn na obrázku 3. Rozděluje navrhovaný produkt na různé druhy konceptů a dále určuje komponenty každého z nich. Tento diagram umožňuje lepší orientaci v koncepčních variantách a napomáhá k vyobrazení možnosti realizace

každého z konceptů. Jednotlivé komponenty se nevztahují pouze na produktové části, ale mohou se týkat i výrobních procesů nebo výběru materiálu, což napomáhá ke kompletizaci myšlenek.



Obrázek 3 – „stromový diagram“ [1]

Další fází v procesu návrhu je ztělesnění, což představuje fázi, ve které se jednotlivé koncepty začínají realizovat a dostávat konkrétní podobu. Tato fáze se nazývá ztělesnění, neboť přináší konceptům hrubou podobu a formu. [1]

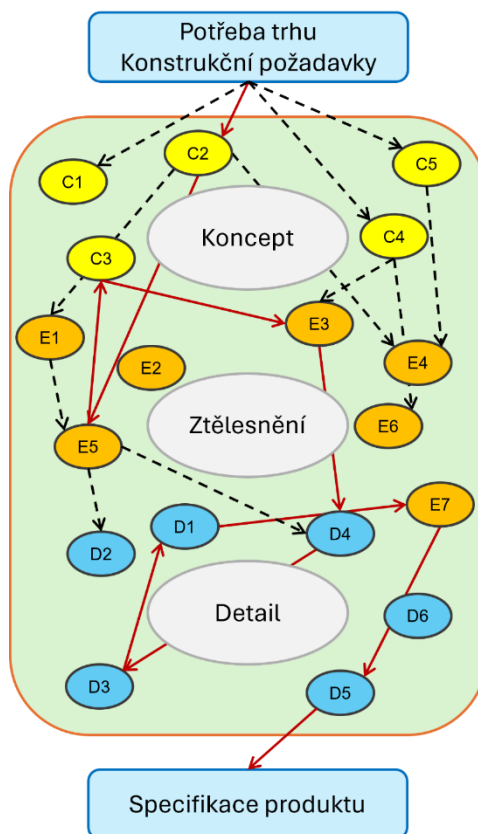
Proces konstruování lze provádět paralelně s několika různými způsoby řešení, kdy finální volba ideálního řešení je určena až v pozdější fázi. To však znamená zvýšenou časovou, a tedy i finanční náročnost, protože každý krok je nutné aplikovat na všechny varianty. S ohledem na efektivitu je tedy důležité již ve fázi návrhu provést výběr a omezit vzniklé možnosti na minimum, pro zvýšení efektivity a rychlosti potřebné pro konečné rozuzlení.

Každý další krok v celém procesu přináší definice nově nalezených omezení, což vede k postupné selekci původního množství navrhovaných řešení. Součástí této fáze je také bližší definice samotného zařízení. Na základě těchto specifikací je původní množství návrhů omezeno na méně možností, jejichž následná analýza a výběr optimálních verzí výsledného produktu jsou konečnou částí fáze ztělesnění.

V poslední fázi návrhu nastává detailní popis produktu, který vychází z informací získaných v předešlých částech. Zde nastává prostor k detailnímu popisu všech oblastí, které se týkají navrhovaného produktu. To znamená nejen detailní popis funkcí, požadavků, omezení, a dalších technických specifikací, nýbrž i detailní popis vnějších vlivů a faktorů, které na daný produkt budou působit. Jelikož je tato fáze poslední fází návrhového procesu, dochází zde taktéž k volbě materiálu, ze kterého budou jednotlivé součásti navrhovaného produktu vyrobeny a zároveň i k určení specifického procesu výroby, jenž je velmi úzce spojen se zvoleným typem materiálu.

Rozhodování o detailech vyžaduje pečlivé zvážení různých faktorů, včetně technických požadavků, uživatelských preferencí, nákladů na výrobu a mnoha dalších. Popsané detaily mohou vést k uvíznutí ve slepé uličce, nebo naopak mohou produkt posunout na zcela novou úroveň. Konstrukteři musí být schopni nalézt rovnováhu mezi inovací a realizovatelností, aby jejich produkt splňoval očekávání zákazníků a zároveň byl konkurenceschopný na trhu. Je tedy nezbytné věnovat dostatečnou pozornost každému detailu a zajistit, aby byl navrhovaný produkt co nejvíce optimalizovaný.

K hledání optimálního řešení přispívají diagramy, které jsou podobné těm, které již byly znázorněny, avšak jsou mnohem podrobnější a přesnější. Jedním z takových diagramů je tzv. "diagram spletné cesty" znázorněn obrázkem 4, jenž zachovává hlavní kategorie podobné "flow chart" diagramu (obrázek 1), ale zahrnuje také menší komponenty spadající do jednotlivých kategorií. V tomto diagramu jsou K – bubliny reprezentující konceptuální varianty, které byly identifikovány v předchozích fázích, Z – bubliny související s procesem ztělesnění a D – bubliny spojené s detailním zpracováním. Každá bublina představuje nápad nebo možné řešení, které vzniklo v průběhu konstruování. [1]

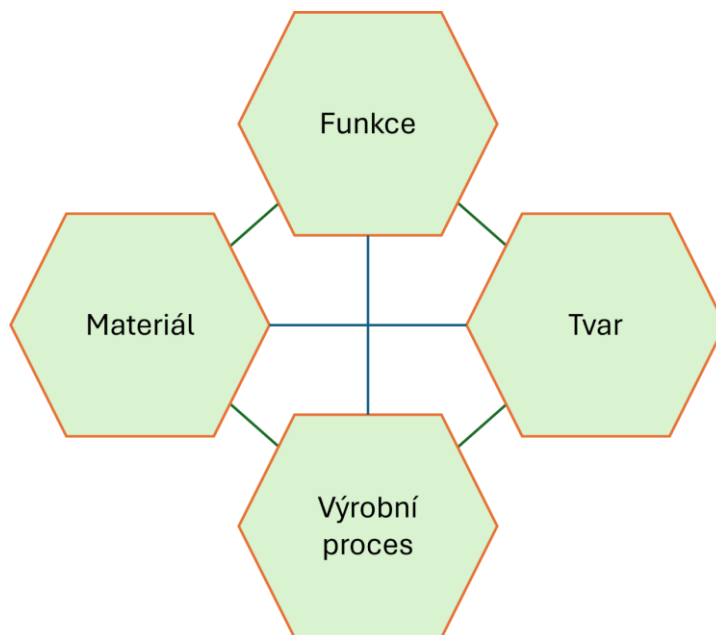


Obrázek 4 – „diagram spletité cesty“ [1]

Díky vizualizaci umožňuje tento diagram spojovat jednotlivé nápady a řešení, která se zdají být funkční. To je prováděno pomocí spojnic, jež se klikatí podél celého diagramu. Pokud je nalezena kombinace bublin vedoucí od začátku diagramu ke konci, naznačuje to realizovatelné řešení. Tímto způsobem se eliminuje riziko ztráty směru a doslovné bloudění po slepých uličkách v konečném určení jednotlivých návrhů.

V procesu konstruování je nezbytné brát v úvahu mnoho různých faktorů, které ovlivňují výsledný produkt. Konstruktor musí do procesu zahrnout nejen funkčnost výrobku, ale také jeho vyrobiteľnosť, zpracovateľnosť, možnosť likvidácie a samozrejme i cenovou dostupnosť. Jedným z kľúčových rozhodnutí v tomto procese je voľba vhodného výrobného procesu. Tá musí byť pečlivo zvažovaná, pretože každý proces má svoje výhody a nevýhody. Konstruktor musí zvažovať, či je vhodné použiť odlievání, obrábění, tváření nebo jinou techniku v závislosti na požadovaných vlastnostech výrobku a nákladech na výrobu. Pro grafické zobrazení lze použít diagram, který pomocí sítě propojených uzlů, znázorňuje propracovanost řešení. Každý uzel na obrázku 5 představuje jednu z vyjmenovaných

oblastí – funkci, materiál, výrobní proces a tvar. Pokud jsou všechny uzly vzájemně propojeny, ideální návrh produktu byl nalezen. [1]



Obrázek 5 - propojení všech oblastí [1]

Dosažení tohoto ideálního stavu není tak jednoduché, jak by se mohlo na první pohled zdát. Na cestě k propojení zmíněných oblastí se mohou objevit různé překážky a omezení, jako jsou technologická omezení, dostupnost materiálů nebo finanční stropy. Z tohoto důvodu je proces konstruování často složitý a vyžaduje pečlivou analýzu všech faktorů.

Díky tomuto komplexnímu pohledu lze zajistit funkčnost a spolehlivost navrhovaného produktu, dosáhnout vyplnění očekávání uživatelů a také vhodnou integraci do svého prostředí. Detailní popis produktu je tak důležitým krokem v procesu návrhu, který maximalizuje jeho komplexnost a úspěch na trhu.

2.2 Volba materiálu

Nadřazenou disciplínou konstruování je však volba materiálu. Každý krok, který konstruktér učiní, je ovlivněn materiálem, jenž pro daný produkt zvolí. Správná volba materiálu může mít dramatický dopad na funkčnost, životnost a celkovou kvalitu konstruovaného produktu. Kvalita návrhu není pouze otázkou provedení precizních výkresů a analýz. Skutečná kvalita produktu je posuzována v průběhu celého jeho životního cyklu. I když může být návrh proveden pečlivě, vhodný materiál je zásadním faktorem v životním cyklu výrobku. Pokud je zvolen nevhodný materiál, náklady a úsilí,

vynaložené na návrh, mohou být ztraceny, protože výsledný produkt nemusí naplňovat očekávání. Například, pokud je výrobek navržen bezchybně, ale je vyroben z materiálu, který nedokáže vydržet náročné podmínky používání, může se stát, že se rychle opotřebí nebo rozbije. To vede k dodatečným nákladům na přepracování nebo úpravu návrhu, za účelem zlepšení odolnosti či životnosti výrobku.

Pro výrobce a distributory je důležité zajistit, zda jejich výrobky splňují očekávání zákazníků, ale také zda jsou konkurenceschopné na trhu. Pokud je výrobek nefunkční z důvodu nevhodně zvoleného materiálu, může dojít k poškození pověsti společnosti, či ztrátě důvěry zákazníků.

Materiálové spektrum lze přirovnat k vesmíru. Podobně jako vesmír, který je zdánlivě nekonečný a složený z miliard částic různých velikostí a vlastností, materiálové spektrum je rozmanité a bohaté na různorodé materiály se specifickými vlastnostmi. Vesmír se lidstvo snaží zjednodušit pomocí rozdělení na menší jednotky, jako jsou galaxie. Podobně i v materiálovém vesmíru jsou hledány způsoby, jak strukturovat a kategorizovat různé materiály. Tyto skupiny materiálů, které mají obvykle podobné složení nebo vlastnosti, jsou v softwaru „ANSYS Granta EduPack“ nazývány materiálovými rodinami, a proto v dalším textu budou tyto skupiny nadále označovány jako materiálové rodiny. Mezi materiálové rodiny patří pěny, keramiky, polymery, kovy, skla, kompozity a mnoho dalších. Každá materiálová rodina má své specifické vlastnosti a použití, proto je důležité jejich pečlivé studium a porozumění, aby bylo možné jejich efektivní využití ve výrobě a konstrukci různých produktů. [10]

Každá kategorie materiálů zahrnuje širokou škálu variant, které mohou být určeny pro okamžité použití, nebo připraveny pro další zpracování. Například v kategorii kompozitu lze nalézt matrice z uhlíkových vláken s obsahem padesáti procent. Tyto matrice nelze použít samostatně, ale když jsou začleněny do kompozitního materiálu spolu s dalšími prvky, mohou poskytnout zcela odlišné vlastnosti, které se mohou ukázat jako vhodné pro konkrétní aplikace.

Pro dosažení výběru vhodného materiálu je nezbytné podstoupit několik kroků, které postupně vyřadí nevhodné varianty. Prozkoumání každého materiálu a pečlivé zvážení

jeho vhodnosti by představovalo nereálný úkol, a proto je nutné uplatnit postup, který systematicky snižuje počet možností na základě stanovených kritérií. [1]

2.2.1 Funkce

Na začátku volby materiálu je klíčové správně definovat funkci požadované součásti, která bude přímo ovlivněna materiálem. Například u motoru automobilu, který je složen z mnoha součástí vyrobených z různých materiálů, je určení funkce zaměřeno pouze na jednu z těchto součástí, kterou dokáže volba vhodného materiálu výrazně ovlivnit a přispět tak k celkové funkčnosti a výkonnosti produktu.

Při určování takové funkce je nezbytné zvážit základní aspekty. Může se jednat o přenos točivého nebo ohybového momentu, tepelnou vodivost, odolnost vůči tlaku či tahu a mnoho dalších. S ohledem na širokou škálu možností je volba materiálu jedním z nejkompexnějších kroků v procesu konstruování vyžadující důkladné posouzení, neboť materiál má zásadní vliv na funkčnost a vlastnosti výsledného produktu. Každý materiál má své výhody a nevýhody, a proto je důležité vybrat takový, který nejlépe splňuje hlavní požadavky projektu.

2.2.2 Omezení

Při výběru materiálu je důležité zvážit jeho schopnost vydržet náročné podmínky, jako je mechanické namáhání, teplotní rozdíly nebo agresivní prostředí. Správný materiál může zlepšit životnost a spolehlivost produktu a minimalizovat potřebu údržby či oprav. Dále je třeba brát v úvahu také ekonomické hledisko. Některé materiály mohou být levnější na pořízení, ale mohou vyžadovat vyšší náklady na údržbu nebo jsou náročnější na zpracování. Z tohoto důvodu je nutné zvážit celkové náklady v průběhu životního cyklu produktu, nejen pořizovací cenu materiálu. V neposlední řadě je důležité myslet i na environmentální aspekty. Některé materiály mohou být šetrnější k životnímu prostředí než jiné a mohou mít menší dopad na ekosystém. V dnešní době je na ekologickou udržitelnost kladen stále větší důraz a volba materiálu může ovlivnit i vnímání produktu zákazníky a veřejností.

2.2.3 Cíle

Při konstrukci nového produktu je primárním úkolem vytvořit výrobek, který efektivně splní své stanovené cíle. Při výběru materiálu jsou přítomny zcela jiné cíle. Ty jsou sice propojeny s hlavními cíli projektu, ale soustředí se primárně na vlastnosti, které má hledaný materiál mít. Tyto cíle mohou zahrnovat snahu o minimalizaci hmotnosti produktu, což může vést ke globálnímu snížení spotřeby materiálu a zlepšení přenosnosti nebo manipulovatelnosti výrobku. Dalším faktorem může být minimalizace nákladů, ať už na samotnou výrobu produktu nebo na nákup daného materiálu. Výběr cenově dostupného materiálu, který zároveň poskytuje potřebné vlastnosti, může být klíčový pro úspěch výrobku na trhu. Jiným důležitým cílem může být dosažení maximální možné životnosti výrobku. Volba odolného materiálu s dlouhou životností sníží náklady na údržbu a opravy, což potenciálně zvýší spokojenost zákazníků a celkovou konkurenceschopnost výrobku na trhu.

Tyto cíle při výběru materiálu mohou být vzájemně provázány a často vyžadují kompromisy. Například snaha o minimalizaci hmotnosti může vést ke zvýšeným nákladům na speciální lehké materiály, zatímco volba levnějšího materiálu může naopak ovlivnit životnost výrobku. Důkladné zvážení důležitosti cílů a jejich vzájemných dopadů je proto klíčové pro úspěšný výběr materiálu.

2.2.4 Volné proměnné

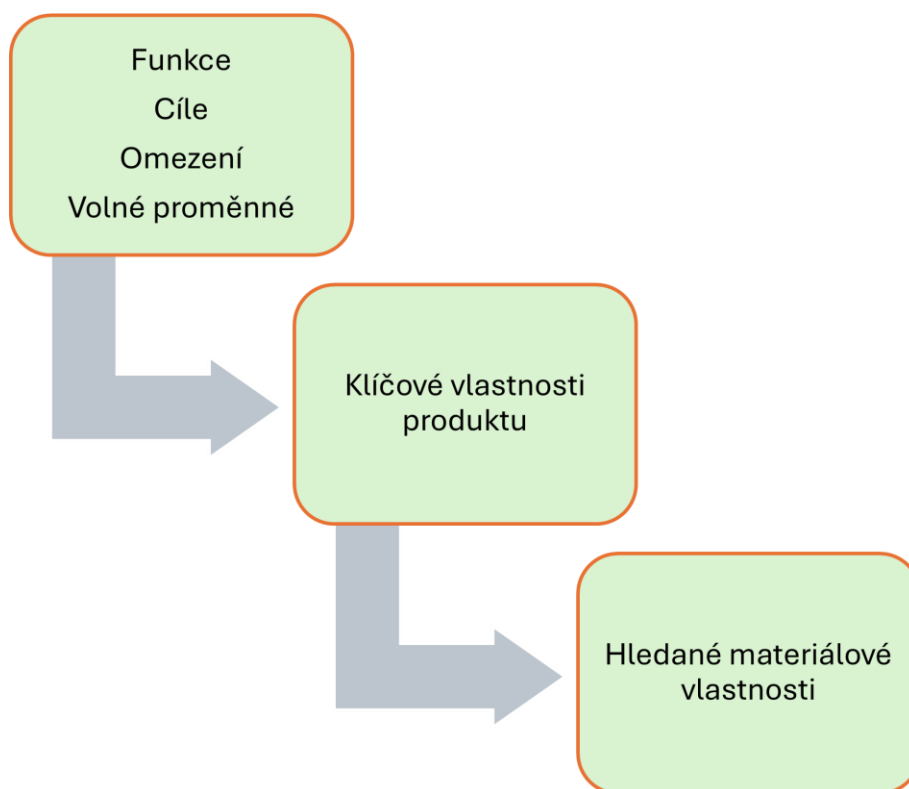
Po definování všech klíčových aspektů a požadavků na materiál, které byly stanoveny zadavatelem či jinak určeny, přicházíme k tzv. volným proměnným. Tyto proměnné jsou charakterizovány tím, že nebyly explicitně definovány a nepředstavují zásadní ovlivnění funkcí ani cílů produktu. [1]

Mezi takové volné proměnné mohou patřit například rozměry výrobku. Zadavatel může stanovit funkční požadavky na produkt, ale nechá otevřenou možnost volby konkrétních rozměrů v souladu se stanovenými požadavky. Ve volbě materiálu může být taktéž ponechána konstruktérovi určitá míra volnosti, pokud nebyla explicitně specifikována v zadání.

Zanechání volných proměnných nemusí být vždy ku prospěchu konstruktéra, jelikož v případě, že jich identifikoval více než jednu, musí nalézt způsob, jak je v následujícím

postupu (práci s obecnými matematickými vztahy) tzv. vyloučit pomocí vyjádření v podobně vlastností, které mají spojitost se všemi čtyřmi popsány požadavky.

Následující schéma (obrázek 6) vizualizuje postup, jenž byl popsán v této kapitole. Po stanovení hlavních funkcí navrhovaného produktu, vyskytujících se omezení, cílů celého procesu a volných proměnných lze definovat klíčové vlastnosti, které by měl navrhovaný produkt mít. Následně je důležité tyto vlastnosti transformovat na materiálové vlastnosti. Tudiž vyloučit veškeré proměnné, jež nejsou přímo spojeny s materiálem. Takovými mohou být například rozměry, bezpečnostní koeficienty, vnější namáhání, konstanty atd.



Obrázek 6 - schéma specifikace požadavků [1]

2.3 Protichůdné požadavky

Každý materiál má své specifické vlastnosti, které hrají klíčovou roli v jeho výkonnosti v různých funkčních oblastech. Často se však setkáváme s protichůdnými požadavky na materiál, kdy se požadované vlastnosti vzájemně vylučují nebo jsou si protikladné. Tato situace komplikuje výběr materiálu, protože materiály mohou excelovat v jedné oblasti, zatímco ve druhé oblasti nemusí dosahovat ani základních potřebných vlastností.

Protichůdné požadavky však nemusí být vždy pouze navzájem se vylučující požadavky, nýbrž se může jednat o hledání opačných extrémů jednotlivých požadavků. Např. v případě volby materiálu pro rám jízdního kola, je nutné najít vysokou pevnost, aby se rám pod vahou cyklisty nezdeformoval, ale zároveň je také požadováno, aby rám byl lehký pro jednodušší manipulaci s kolem a snížení potřebné síly pro uvedení jízdního kola do pohybu. Pro tyto požadavky bude nutné minimalizovat hmotnost, tudíž hledat materiál s nejnižší možnou hustotou a zároveň ale maximalizovat pevnost, která bude pravděpodobně spojena s maximalizací meze pevnosti v ohybu. Z důvodu hledání opačných extrémů lze tyto požadavky označit za protichůdné.

Vzájemně odporující požadavky mohou být mnohdy složité a jejich počet se může pohybovat v řádech stovek a tisíců. V takových situacích je nezbytné stanovit prioritní požadavky, které mají klíčový vliv na funkčnost dané součásti.

Prvním krokem je provedení prvotního výběru materiálů, které splňují tyto klíčové požadavky. Následně je provedena detailní kontrola vybraných materiálů, zda dokážou vyhovět i méně prioritním požadavkům. Tím dochází k postupnému zužování spektra vhodných materiálů.

Tento proces lze chápat jako sérii iterací jednotlivých řešení, kdy se postupně zkoumají a ověřují možnosti, jak dosáhnout optimálního výběru materiálu, který splní co nejvíce požadavků s co nejlepší výkonností. Iterativní přístup umožňuje postupné zlepšování a zdokonalování návrhu v závislosti na identifikovaných požadavcích a omezeních. [1]

Cílem této fáze výběru není pouze jednoduchá volba konkrétního materiálu, jak by se na první pohled mohlo zdát. Místo toho je primárním cílem vytvoření seznamu materiálů, které úspěšně prošly všemi kontrolními procesy a splňují definovaná kritéria, aby mohlo být učiněno finální rozhodnutí. Proto je nutné definovat akceptovatelné ústupky. K tomu je vhodné stanovit několik kompromisů, které obsahují důležité aspekty, jako je například cena vůči schopnosti plnit primární funkci. A určit, jestli bude kladen větší důraz nalezení materiálu, jež zajistí nejnižší cenovku součásti nebo materiálu, který dokáže plnit potřebnou funkci bezchybně a dlouho, ale bude mnohem dražší.

Seznam materiálů vytvořený pomocí předchozích kroků obsahuje stále ještě velmi velké množství jednotlivých druhů. K eliminaci pomůžou zmíněné kompromisy, díky kterým lze

omezit velké množství materiálů na mnohem menší výběr. Poměr ceny a výkonnosti je možné stanovit na několik hodnot vypovídajících o validitě jednoho nebo druhého požadavku, například 5:1 pro cenu, 1:1 pro obě vlastnosti a 1:5 pro výkonnost. Tyto tři kompromisy specifikují tři menší seznamy materiálů, ze kterých se dalšími iteračními operacemi postupně eliminují jednotlivé materiály, dokud „nevyhraje“ jeden konkrétní.

Tyto kompromisy jsou nazývány "sankčními funkcemi", protože v materiálových mapách generovaných v softwaru „ANSYS Granta EduPack“ se jeví jako křivky, determinující oblast výskytu vhodných materiálů z vygenerovaného seznamu a umožňují určit konečné priority na základě specifických potřeb a očekávání. [1][10]

Popisovaný postup a myšlenkové pochody nejsou samozřejmě jedinou metodikou, potřebnou pro vyvození “vhodného“ závěru. Každý konstruktér k výběru materiálu přistoupí podle svého nejlepšího vědomí a svědomí na základě zkušeností, návrhů, či ověřených znalostí. Lze stanovit materiálové požadavky mnohem konkrétnější a zahrnout do nich rovnou i legislativní, či enviromentální regulace. Takový přístup po stanovení veškerých materiálů nabízí ve výsledku velmi specifikovaný výběr, který už není třeba nijak výrazněji omezovat. Úskalí se ale nachází v hledání kompromisu. Díky zavedení velkého množství požadavků hned na začátku výběru se ztíží hledání kompromisů v jednotlivých kategoriích. Těžko určit, zda je potřeba snížit požadavky na výkonnost nebo na cenu bez znalosti vzájemných ovlivnění jednotlivých požadavků, protože jak bylo zmíněno dříve, každá oblast je velmi úzce spjata s tou druhou a naopak. Vzhledem ke komplexnosti výběru se autor této práce přiklání k názoru prof. Ashby, že je důležité si hlavně stanovit hierarchii požadavků a až dle ní přikládat důraz na každý z nich. Určit všechny požadavky na začátku a zaměřovat se na ně najednou, je časově i finančně náročné a zároveň to zvětšuje možný prostor pro chybný úsudek. [4]

3. Aplikace na příkladu

Proces výběru materiálu je velmi komplexní záležitostí. Pro demonstraci výše zmíněných metod není možné vybrat celý technický systém. Každá součást tohoto systému musí projít stejným procesem výběru, ale zároveň plní zcela odlišné funkce a vyhovuje různým potřebám. Z tohoto důvodu není tak rozsáhlý výběr materiálů vhodný pro účely této práce. Hlavním zaměřením je proto výběr jedné konkrétní součásti, která je důležitou částí celého technického systému. Tímto přístupem se eliminuje potřeba dlouhého určování funkcí u každé části zvlášť a lze se soustředit na jeden konkrétní prvek.

3.1 Volba technického systému

Jakožto existující a zároveň zdánlivě jednoduchý technický systém, který je ale životně důležitou součástí každého pohyblivého prostředku, byl určen brzdový systém. Schopnost zastavit vozidlo je primární nutností pro jakýkoliv pohyblivý stroj, a to nejen z hlediska bezpečnosti, ale i z praktického a technického hlediska. Bezpečnost by měla být vždy na prvním místě, i když toto tvrzení nemusí vždy platit.

Princip brzdového systému je však univerzální a aplikovatelný i v jiných oblastech, než je čistě bezpečnost. Například v kategorii závodních vozidel byl v minulosti na brzdy kladen důraz spíše z výkonnostních důvodů než z důvodů bezpečnostních, to už se však samozřejmě změnilo. Při projíždění zatáček na závodních okruzích nelze udržovat neustále plný plyn, jelikož koeficient tření mezi pneumatikami a vozovkou se pohybuje v mezích 0,5 – 0,7. Proto může při zatáčení ve vyšších rychlostech dojít k nedotáčivosti a sklouznutí pneumatik, což znamená, že vozidlo pokračuje v pohybu přímo vpřed, ačkoliv jsou kola natočena ve směru zatáčky. [17]

Koeficient tření je definován jako podíl třecí a normálové síly. Pokud je normálová síla větší než třecí, dochází ke sklouznutí. To lze eliminovat zmenšením normálové síly, tedy síly kolmé na požadovaný směr pohybu vozidla. A protože ta je definována jako hmotnost vynásobená dostředivým zrychlením, lze zmenšením zrychlení zmenšit i pravděpodobnost sklouznutí. [13]

Brzda tedy není potřebná pouze pro bezpečné zastavení vozidla, ale také pro optimalizaci průjezdu zatáčkou snížením rychlosti. V rámci závodů Formule 1, kde je klíčovým cílem minimalizace času stráveného průjezdem, je zcela zásadní zabránit sklouznutí, protože

čím méně vozidlo klouže, tím rychleji může zatáčkou projet. Pro tyto potřeby byla vyvinuta soustava známá jako brzda.

Výrobce brzdových systémů ABE na svých stránkách uvádí: *„První automobily byly zastavovány pomocí pák přitlačujících dřevěnou podložku k ráfku kola nebo jinými brzdnými prostředky používanými u kočárů. První kotoučovou brzdu vynalezl v roce 1902 anglický inženýr Frederic Wilhelm Lanchester, zatímco bubnová brzda byla ve stejném roce patentována Louisem Renaultem“* (ABE Performance 2021). V průběhu času vzniklo mnoho variant brzd, protože každé vozidlo potřebuje specifický typ brzdy nebo jejich kombinaci. Uvažujme například letadlo, které vyžaduje několik brzdových systémů pro bezpečné ovládání. Vzduchová brzda u letadel funguje na principu odporu vzduchu a pomáhá zpomalovat letoun při vysokých rychlostech, jak ve vzduchu, tak na zemi. Nicméně, jakmile letadlo zpomalí, efektivita vzduchové brzdy se limitně blíží k nule. Proto je nutné použít i kotoučové brzdy, které zpomalují rotaci jednotlivých kol a fungují v situacích, kdy vzduchové brzdy ztrácejí svou účinnost, především při stání letadla nebo pomalém pohybu po ranveji. [5]

3.2 Volba součástí

Brzdový systém je složen z mnoha součástí, přičemž každý typ brzd brzdí odlišným způsobem a je složen z různých součástí. Tato práce je zaměřena na automobilové brzdy, a to konkrétně na kotoučové brzdy. Důvodem pro toto zaměření je rostoucí popularita kotoučových brzd ve srovnání s bubnovými brzdami, které byly běžné u starších vozidel. Bubnové brzdy mají výrazně větší třecí plochu než kotoučové, což teoreticky vede k větší účinnosti. Přesto jsou v praxi daleko méně účinné. Hlavní příčinou je vysoká teplota. Bubnové brzdy se tak zahřívají mnohem více než kotoučové, důvodem je problematický odvod tepla, kvůli uzavření brzdového ústrojí do tzv. „bubnu“. [6]

Účinnost kotoučových brzd lze zvýšit nejen prostřednictvím lepšího chlazení, ale také přidáním více třmenů s brzdovými destičkami. Tuto variantu využil například výrobce luxusních limuzín Maybach, který na svůj 6,2 metrů dlouhý a téměř třítunový kolos instaloval brzdy se dvěma protilehlými třmeny s brzdovými destičkami. Tím zajistil dostatečně účinné a bezpečné zastavení vozu. Z tohoto příkladu je patrné, že se kotoučové brzdy mohou lišit v uspořádání a počtu komponentů. Nicméně, jedna věc zůstává neměnná, a tou je samotný brzdový kotouč, který je klíčovou součástí kotoučové brzdy a je potřebný pro každou z variant. Z tohoto důvodu bude předmětem demonstrace metody pro výběr materiálu právě brzdový kotouč určený pro výkonná vozidla homologovaná k běžnému provozu. [7]

3.2.1 Stanovení funkcí

Funkce brzdového kotouče spočívá v přeměně kinetické energie kola na tepelnou energii pomocí brzdových destiček, což vede k postupnému zpomalování vozidla až do jeho úplného zastavení. Brzdové destičky jsou zásadní pro aktivní úlohu v tomto procesu, přičemž brzdový kotouč slouží jako prostředník při přenosu tepla z brzdových destiček do okolního prostředí. Přestože brzdový kotouč není primárním prvkem přeměny energie, bez něj by účinnost brzdového systému byla výrazně omezená.

Tepelná energie, která je vytvářena při brzdění a je absorbována brzdovým kotoučem, musí být odvedena pryč od částí, které nejsou vybaveny pro odolávání vysokým teplotám. Mezi tyto části mohou patřit hadice s hydraulickou kapalinou ovládající brzdový systém, kabely vedoucí k různým senzorům a další klíčové komponenty vozidla. Je důležité zajistit

efektivní odvod tepla z brzdového systému, aby nedocházelo k přehřívání a poškození okolních částí vozidla.

Primární funkcí brzdového kotouče je skutečně odvádění tepla do okolí. Maximální efektivitu této funkce lze dosáhnout výběrem materiálu s co nejvyšším koeficientem tepelné vodivosti. Tímto způsobem se teplo rychleji rozptýlí, čímž se minimalizuje riziko přehřátí brzdového systému.

Při chlazení brzdového kotouče je důležitý koeficient tepelné vodivosti materiálu, jelikož ten udává, jak rychle lze teplo rozprostřít po celém kotouči a zamezit tak přehřátí jedné části. Zároveň je tím zaručena maximální možná plocha pro další jev, kterému se říká přestup tepla. Při něm teplo „přestupuje“ z kotouče do okolního proudícího vzduchu, čímž se snižuje celková teplota kotouče. To je klíčové pro udržení optimálního fungování brzd a minimalizaci rizika přehřátí, zejména při náročném brzdění při vysokých rychlostech. [14]

3.2.2 Stanovení omezení

Omezení při výběru materiálu pro brzdový kotouč jsou klíčovým faktorem, který pomáhá eliminovat nepřipustné varianty a směřovat výběr k optimální volbě. Tato omezení se odvozují z požadavků na funkci brzdového systému a zohledňují různé druhy namáhání, kterým je brzdový kotouč vystaven.

Prvním omezením je tlaková síla, která vzniká v důsledku působení brzdových destiček proti sobě a vyvolává tlakové napětí v kotouči, tudíž má tendenci deformovat kotouč v místě stisku. Vybraný materiál musí být dostatečně odolný vůči tomuto druhu namáhání. Zde dochází k první důležité úvaze, zda je důležitějším omezením tuhost v tlaku nebo pevnost v tlaku.

Jelikož je brzdění cyklicky se opakujícím jevem v nepravidelných intervalech, dochází při něm k opakovanému stlačování a uvolňování destiček, tudíž k dynamickému namáhání brzdového kotouče. Z toho důvodu byla tuhost zvolena jako důležitější vlastnost, jelikož elastická deformace je mnohem výraznější a častější. Pevnost bude zahrnuta jako omezující veličina v materiálových mapách, pro eliminaci materiálů, jež nebudou splňovat hodnotu dosahovanou referenčním materiálem.

Druhým hlavním omezením jsou rozměry kotouče, konkrétně vnější a vnitřní průměry. Výkonná vozidla často používají 20palcová kola, která umožňují instalaci větších brzdových soustav, což zvyšuje jejich účinnost. Pro tento příklad jsou však vnější i vnitřní průměry pevně stanoveny.

3.2.3 Stanovení cílů

Každá volba materiálu pro brzdový kotouč probíhá s určitým účelem, který je nezbytné stanovit předem. Tento účel často přispívá k výkonnosti a funkčnosti celkového brzdového systému. Jedním z mnoha důležitých faktorů, který je třeba zvážit při výběru materiálu, je hmotnost brzdového kotouče a její vliv na chování vozidla.

Brzdový kotouč je pevně spojen s kolem, které je dále spojeno s odpruženou nápravou. Při každém najetí kola na nerovnost přispívá brzdový kotouč svou hmotností k větší celkové hybnosti nápravy. Tato zvýšená hybnost vzniká v reakci najetí na nerovnost a směřuje opačným směrem, což může mít za následek vymrštění nápravy do vzduchu. Příliš velká hmotnost brzdového kotouče by tak mohla vést k nežádoucím důsledkům, zejména v kombinaci s nedostatečným tlumením.

Hmotnost tedy hraje rovněž klíčovou roli v hlavní funkci brzdového systému, kterou je přeměna kinetické energie na tepelnou energii. Kinetická energie rotujícího kotouče je definována vztahem:

$$E_k = \frac{1}{2} I \times \omega^2 \text{ [J]} \quad (0) \text{ [15]}$$

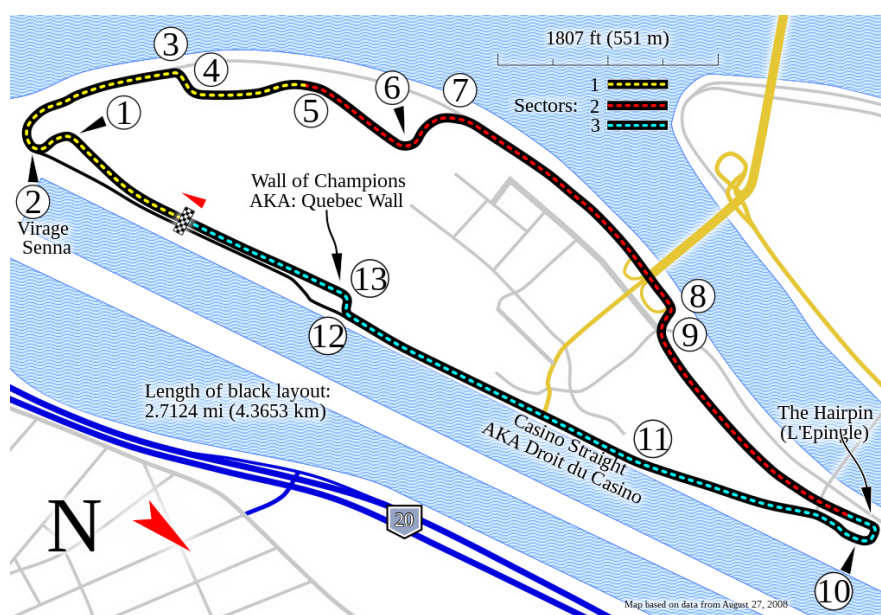
Kde, I představuje setrvačný moment kotouče. Tento setrvačný moment je úzce spojen s hmotností kotouče, a proto čím nižší je hmotnost kotouče, tím menší je kinetická energie, která je potřebná přeměně na tepelnou energii pro zastavení rotačního pohybu kola, a tedy celkového pohybu vozidla.

Jelikož je hmotnost úzce spojena s hustotou materiálu, cílem je tedy vybrat materiál s co nejnižší hustotou, aby se minimalizovala hmotnost brzdového kotouče a tím i kinetická energie, která se musí přeměnit na teplo při brzdění. Takovým způsobem je možné optimalizovat výkon a účinnost brzdového systému.

V oblasti brzdových systémů, zejména u vysokovýkonných vozidel jako jsou monoposty Formule 1, se setkáváme s extrémním kolísáním teplot brzdového kotouče během krátké doby. Představme si situaci monopostu Formule 1, který projíždí závodním okruhem

Circuit Gilles Villeneuve v Kanadě (Obrázek 7). Na rovině dosahuje maximální rychlosti přibližně 295 kilometrů za hodinu, ale kvůli blížící se ostré zatáčce číslo 10 musí zpomalit na 56 kilometrů za hodinu v co nejkratším čase.

Při tom dojde k dramatickému nárůstu teploty brzdového kotouče. Teplota, která byla původně kolem 400 °C, dosáhne až hranice 1000 °C během pouhé jedné sekundy. Tento rapidní nárůst teploty je způsoben intenzivním brzděním z vysokých rychlostí. Po výjezdu ze zatáčky následuje dlouhá rovinka, kde se kotouč opět ochladí na přibližnou hodnotu 400 °C během necelých pěti vteřin díky proudícímu vzduchu a dosažení rychlosti 292 kilometrů za hodinu.[16]



Obrázek 7 – Circuit Gilles Villeneuve v Kanadě [18]

Takové dramatické teplotní změny jsou pro brzdový systém náročné a vyžadují materiál, který je schopen udržet své vlastnosti v extrémním teplotním rozmezí a odolávat velkému tepelnému namáhání.

3.2.4 Stanovení volných proměnných

V rámci návrhu brzdového kotouče není z hlediska místa nijak důležitá jeho tloušťka, jelikož důležitější než úspora místa, je funkčnost. I když není primárním omezením prostor, je důležité zvolit dostatečně robustní tloušťku, aby kotouč dokázal odolávat vzniklým namáháním během brzdění.

Pokud by byl kotouč příliš tenký, hrozila by jeho deformace, a dokonce i trvalé poškození v důsledku extrémního tepelného a mechanického namáhání. Naopak, příliš velká tloušťka by vedla k nadměrné hmotnosti a zvýšené setrvačnosti, tudíž by mohla negativně ovlivnit výkon brzdového systému.

Zároveň se jako volná proměnná bere volba samotného materiálu. Díky použití softwaru "ANSYS Granta EduPack" lze získat širokou škálu materiálů. Je důležité vybrat materiál s vhodnými mechanickými vlastnostmi, tepelnou odolností a schopností odvádět teplo, aby byl brzdový kotouč schopen udržet svou spolehlivost a výkonnost i v extrémních podmínkách brzdění. [10]

Pro shrnutí výše stanovených veličin slouží následující tabulka 1.

Tabulka 1 - požadavky na materiál [10]

Brzdový kotouč	
Funkce	Přeměna kinetické energie na tepelnou
Omezení	Tuhost a pevnost v tlaku – pevně stanoveno
	Vnější (380 mm) a vnitřní (230 mm) průměry – pevně stanoveno
Cíle	Minimalizace hmotnosti m
	Maximalizace koeficientu tepelné vodivosti λ
Volné proměnné	Tloušťka kotouče t
	Volba materiálu

Zdroj: Vlastní zpracování na základě databáze softwaru ANSYS Granta EduPack (2024)

3.3 Nalezení materiálových indikátorů

Požadavky, které jsou na hledaný materiál kladeny, mají určitá specifika. Obecné vztahy pro vlastnosti navrhovaného produktu často obsahují velké množství proměnných. Ne všechny proměnné však lze spojovat přímo s materiálem. Rozměry, koeficienty, či pevně daná namáhání nemají s materiálovými vlastnostmi nic společného. Proto je nutné nalézt takové vlastnosti, jež jsou s materiálem spojeny napřímo. Takovým vlastnostem se říká „materiálové indikátory“. Pokud je jako požadavek určena tuhost v tlaku, z obecného vztahu pro tuhost v tlaku je potřeba eliminovat rozměry, takže ve vztahu (1) zůstane pouze modul pružnosti v tlaku, což naznačuje, že čím větší modul pružnosti materiál bude mít, tím vyšší tuhosti daná součást dosáhne.

$$k_t = \frac{E \times S_d}{t} \text{ [Nmm}^{-1}\text{]} \quad (1) \text{ [13]}$$

$$k_t = \frac{E \times S_d}{t} \quad (2)$$

Úzce spojené vlastnosti s brzdovým kotoučem zjistíme z následujících vztahů:

- Vztahu pro tuhost v tlaku a poměrné zúžení
- Vztahu pro hmotnost kotouče
- Vztahu pro vedení tepla

Vztah pro tuhost v tlaku lze vyjádřit pomocí Hookova zákona, který popisuje vztah mezi vnitřním napětím a deformací pružného tělesa. Pro brzdový kotouč můžeme tento vztah zapsat jako:

$$\sigma_t = E \times \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (3) \text{ [12]}$$

kde:

σ_t je napětí (síla působící na jednotkovou plochu), E je Modul pružnosti v tlaku materiálu (potřebné napětí k dosažení plastické deformace), ε je poměrná deformace kotouče.

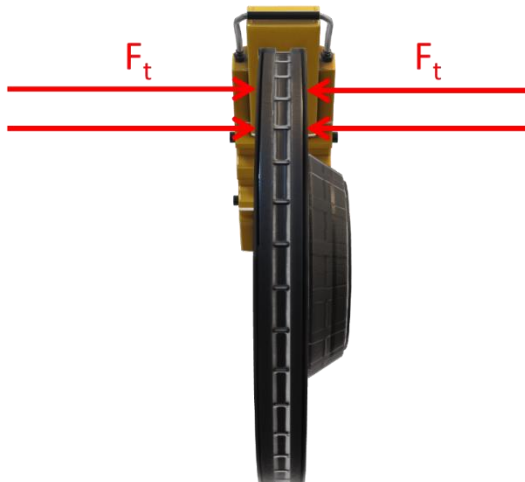
A je definována takto:

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t} \text{ [-]} \quad (4) \text{ [12]}$$

Δt zde zastupuje změnu tloušťky při aplikaci brzdící síly a t původní tloušťku.

Zároveň víme, že brzdové destičky vyvolávají vnitřní napětí v kotouči, které působí proti tlaku vyvolanému destičkami, což lze zapsat vztahem:

$$\sigma_t = \frac{2F_t}{S_d} \text{ [MPa]} \quad (5) \quad [12]$$



Obrázek 8 - znázornění směru síly brzdových destiček [11]

Kde F_t představuje sílu, vyvinutou brzdovými destičkami a S_d velikost povrchu brzdových destiček.

Po kombinaci těchto vztahů dokážeme vyjádřit tuhost kotouče tak, aby se v žádném dalším vzorci nevyskytovala, jelikož se jedná o volnou proměnnou, nelze předem odhadnout její velikost.

$$\frac{F_t}{S_d} = E \times \frac{\Delta t}{t} \quad (6.1) \downarrow$$

$$t = F_t \times \frac{t}{S_d \times E} = \frac{F_t}{k_t} \text{ [mm]} \quad (6.2) \downarrow$$

$$k_t = \frac{E \times S_d}{t} = \frac{F_t}{\Delta t} \text{ [Nmm}^{-1}\text{]} \quad (7) \downarrow [13]$$

$$t = \frac{E \times S_d}{k_t} \text{ [mm]} \quad (6.3)$$

A protože hmotnost kotouče je závislá na tloušťce a hustotě, lze ji vyjádřit za pomoci Modulu pružnosti v tlaku E , plochy destiček S_d a tuhosti k_t

$$m = t \times \rho = \frac{E \times S_d}{k_t} \times \rho \text{ [kg]} \quad (8.1) \downarrow$$

$$m \geq \frac{S_d}{k_t} \times E \times \rho \text{ [kg]} \quad (8.2) \downarrow$$

$$M_1 = E \times \rho \quad (9)$$

Rovnice (9) vyjadřuje první materiálový indikátor M_1 , kterým je vztah ($E \times \rho$). Tento indikátor bude vynesena na osu x v materiálové mapě, pro správné vygenerování ze softwaru „ANSYS Granta EduPack“. [10]

Zbývá už jen zjistit druhý indikátor pro osu y a ten lze vyjádřit pomocí Fourierova zákona, který popisuje hustotu tepelného toku, ve kterém λ představuje tepelnou vodivost materiálu. [14]

$$q_a = \lambda \times \frac{\Delta T}{t} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (10.1) \downarrow [14]$$

$$q_a = \lambda \times \frac{\Delta T \times k_t}{E \times S_d} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (10.2) \downarrow$$

$$q_a \geq \frac{\Delta T \times k_t}{S_d} \times \frac{\lambda}{E} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (10.3)$$

$$\Delta T = T_d - T_V \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (11) [14]$$

$$M_2 = \frac{\lambda}{E} \quad (12)$$

q_a představuje velikost tepelného toku, λ je koeficient vedení tepla a ΔT je rozdíl mezi teplotou disku (T_d) a okolního proudícího vzduchu (T_V). Z rovnice (10.3) byl získán druhý materiálový indikátor M_2 , kterým je podíl koeficientu vedení tepla a modulu pružnosti v tlaku.

3.4 Určení referenčního materiálu

Referenční materiál je klíčový pro tuto metodiku výběru materiálu. Jakmile vznikne možnost porovnat vlastnosti hledaného a referenčního materiálu, je možné určit poměr mezi hledanými vlastnostmi a na základě onoho poměru najít i nejvhodnější materiál. Referenční materiál je většinou nejvíce užívaný materiál pro danou aplikaci. V tomto případě se brzdový kotouč běžně vyrábí ze šedé litiny.

Díky svým vyváženým vlastnostem, a hlavně nízkou cenou se v automobilovém průmyslu masově používá šedá litina. Je velmi odolná proti opotřeбенí, dobře odvádí teplo a zároveň udržuje stálou výkonnost i při intenzivnějším používání. Má ale velmi vysokou hustotu, tudíž je velmi těžká a při vyšších rychlostech může způsobovat nekomfortní jízdu. Navíc nemá dostatečně velké rozmezí provozních teplot, takže v důsledku nadměrného používání například na okruhu dochází k jevu zvanému „vadnutí“ brzd, kdy brzdy v důsledku přehřívání (překročení maximální provozní teploty) ztrácí svou výkonnost. Referenční vlastnosti šedé litiny jsou číselně vyjádřeny v tabulce 2:

Tabulka 2 - vlastnosti šedé litiny [10]

Vlastnosti - Cast iron, gray	Hodnota
Modul pružnosti v tlaku [E]	117 [GPa]
Koeficient tepelné vodivosti [λ]	52,9 [W/m°C]
Hustota [ρ]	7085 [kg/m ³]
Cena [-]	14 [CZK/kg]

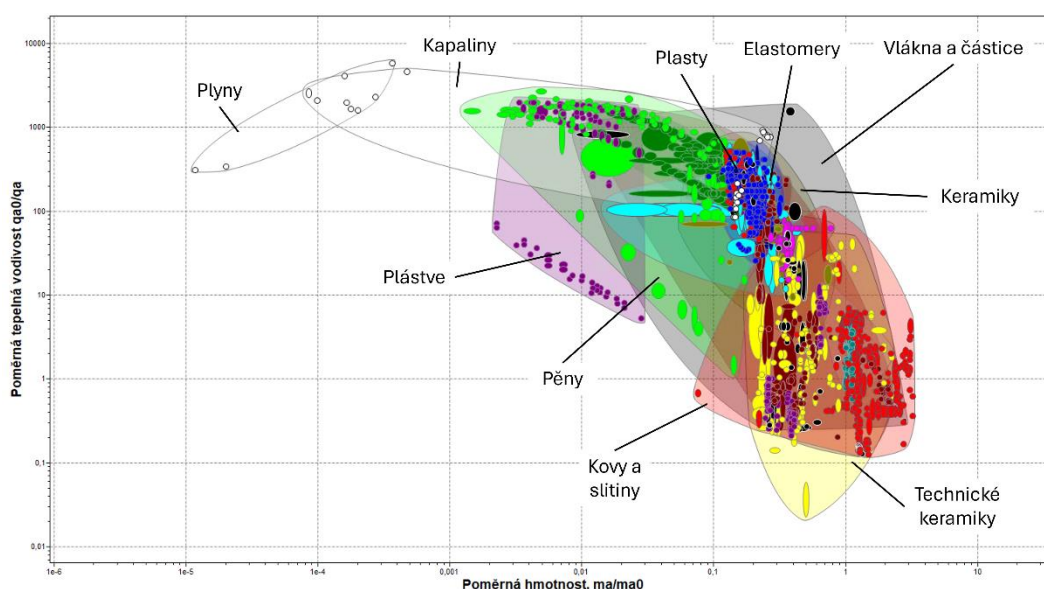
Zdroj: Vlastní zpracování na základě databáze softwaru ANSYS Granta EduPack (2024)

3.5 Generování materiálových map

Materiálové mapy lze zařadit do kategorie grafů, kdy jednotlivé osy popisují vlastnosti zvolené uživatelem a uvnitř dané mapy se nacházejí materiály, které jsou zastoupeny tvarem bublin. Každá bublina má specifický tvar v závislosti na výčtu požadovaných vlastností. Tyto mapy umožňují vměstnat velké množství informací do přehledné a kompaktní podoby.

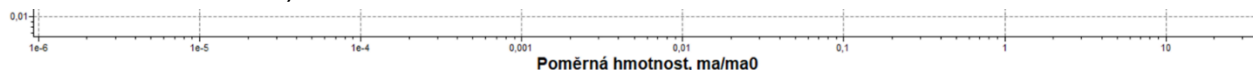
Protože hledaný materiál je porovnáván s referenčním, na osy grafu je potřeba vynést poměrnou hmotnost a poměrnou tepelnou vodivost, díky tomu bude jednodušší pochopit, v jakých oblastech grafu se nachází hledané materiály.

Takto vypadá první vygenerovaná materiálová mapa (Obrázek 9):



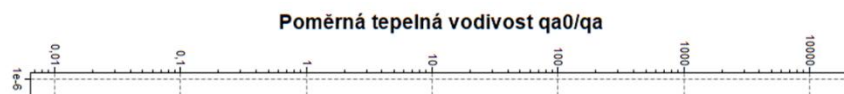
Obrázek 9 - mapa s materiálovými rodinami [10] (Příloha č. I)

Na osu X je vynesena poměrná hmotnost (13) hledaného materiálu a šedé litiny (m_a a m_{a0} na obrázku 10):



Obrázek 10 - osa X materiálové mapy [10]

Na ose Y (dole na obrázku otočenou o 90°) je naopak znázorněna poměrná tepelná vodivost (14) šedé litiny (q_{a0}) a hledaného materiálu (q_a a q_a na brázku 11):

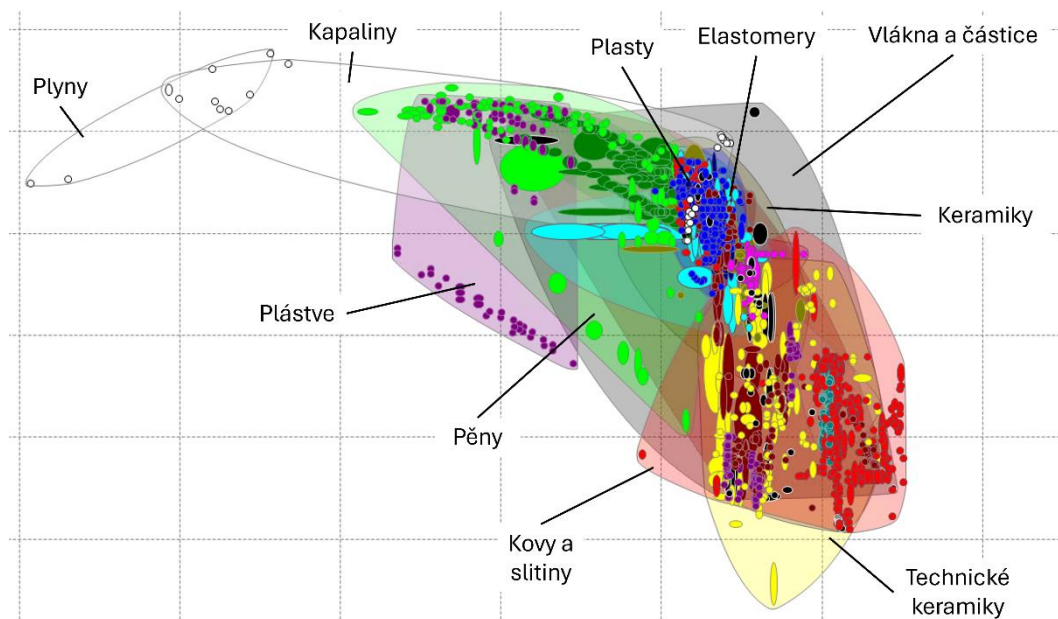


Obrázek 11 - osa Y materiálové mapy [10]

$$\frac{m_a}{m_{a0}} = \frac{E \times \rho}{E_0 \times \rho_0} = \frac{E \times \rho}{117 \times 7085} \quad [-] \quad (13) \downarrow$$

$$\frac{q_{a0}}{q_a} = \frac{E \times \lambda_0}{\lambda \times E_0} = \frac{E \times 52,9}{\lambda \times 117} \quad [-] \quad (14) \downarrow$$

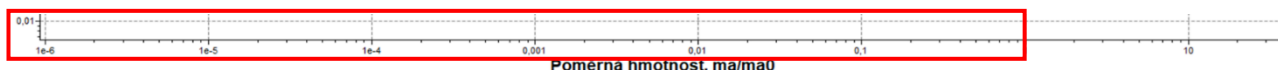
Velké průhledné barevné bubliny na obrázku 12 představují materiálové rodiny, tedy uskupení materiálu, jež se vykazují stejnými základními vlastnostmi. To slouží k přehlednějšímu řazení jednotlivých materiálů.



Obrázek 12 - detail materiálových rodin [10] (Příloha č. II)

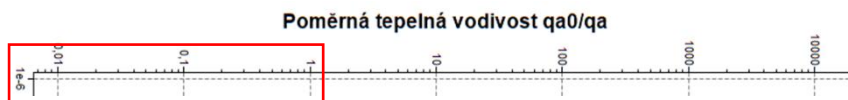
Mapy lze pomyslně rozdělit na čtyři kvadranty. V některých případech přesně v polovině, protože neexistuje žádné kritérium, které by posouvalo dělicí čáru, ale zejména při použití poměrové metody jsou dělicí čáry posunuty. Jelikož se na mapu vynášejí poměrné vlastnosti a jakožto referenční materiál byla určena šedá litina, orientace se neřídí přesnými hodnotami požadovaných vlastností, nýbrž poměrem mezi přesnou hodnotu vlastností šedé litiny a těch hledaných. Následující rovnice naznačují důvod.

Rovnice (13) a (14) vyjadřují poměrné vlastnosti šedé litiny a hledaných materiálů. Obě rovnice jsou složeny z materiálových indikátorů nalezených dříve. Vlastnosti s indexem 0 značí číselně vyjádřené vlastnosti šedé litiny a vlastnosti bez indexu zastupují zbylé materiály. Z rovnice (13) vyplývá, že pokud bude mít nějaký materiál větší součin hustoty a modulu pružnosti než šedá litina, jejich poměr bude větší než 1. A protože cílem je minimalizovat hmotnost, je nutné hledat materiály nacházející se v oblasti menší než 1 (červeně označená oblast na obrázku 13). Tedy po rozdělení na čtyři kvadranty je potřeba se pohybovat v levých dvou.



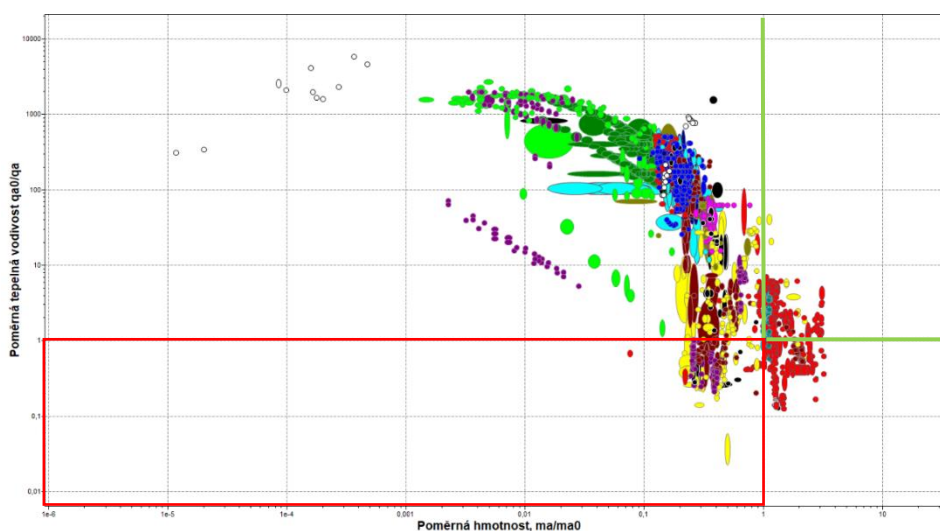
Obrázek 13 - detail osy X materiálové mapy [10]

Koeficient tepelné vodivosti je na rozdíl od hustoty požadován co nejvyšší. Jenže při zachování stejné poměrové rovnice, by se nacházely materiály s vyšším koeficientem tepelné vodivosti nad šedou litinou. To převážně z důvodu přehlednosti u tak velkého množství materiálů není žádoucí, tudíž rovnici (14) je potřeba „převrátit“, aby se materiály s vyšším koeficientem tepelné vodivosti nacházely v oblasti menší než 1, tedy v dolních dvou kvadrantech (červená oblast na obrázku 14).



Obrázek 14 - detail osy Y materiálové mapy [10]

Po sloučení rovnic (13), (14) a pravidel, která obě rovnice stanovují, se hledané materiály budou nacházet v levém dolním kvadrantu obrázku 15.

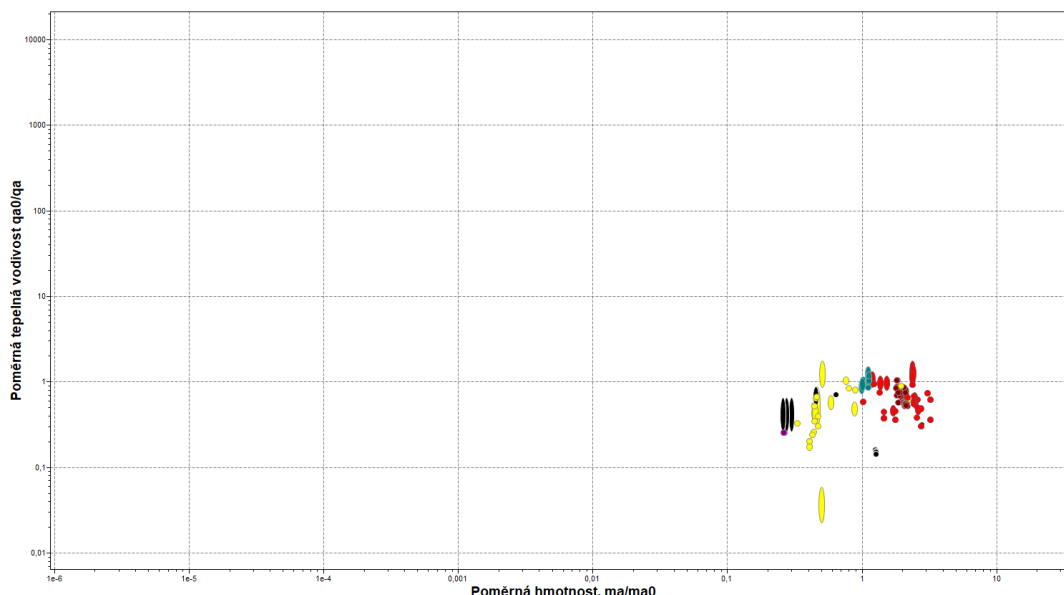


Obrázek 15 - oblast vhodných materiálů [10] (Příloha č. III)

Barevné bubliny v grafu představují jednotlivé materiály. Stejná barva značí totožnou materiálovou rodinu, tudíž materiál se stejnými signifikantními vlastnostmi. Zároveň se v průsečíku zelených čar, jež pomyslně dělí graf na čtyři oblasti, nachází šedá litina. Tímto způsobem lze vizuálně porovnat vhodnost jednotlivých materiálů vzhledem k šedé litině. Vpravo nahoře jsou materiály těžší a zároveň méně vodivé, vpravo dole jsou více vodivé materiály, ale s vyšší hustotou, vlevo nahoře jsou materiály lehčí a méně vodivé, a nakonec vlevo dole jsou materiály lehčí a lépe vodivé

V případě brzdového kotouče pro výkonnostní vozidla homologovaná k silničnímu provozu nedochází k tak vysokým provozním teplotám jako u závodních monopostů Formule 1. Závodní brzdy dosahují teplot i přes 1000 °C, zatímco u sportovních vozů vyskakují teploty na hodnotu kolem 500 °C. S ohledem na udržení výkonnosti a zabránění jevu zvaného "vadnutí", kdy brzdy ztrácejí brzděné vlastnosti po překročení únosné teploty, byl výběr materiálů omezen na takové, jejichž maximální provozní teplota je vyšší než 450 °C, což je maximální provozní teplota šedé litiny. Zároveň budou vyloučeny materiály s menší mezí kluzu v tlaku, než má šedá litina, aby se jednoduše zajistila správnou pevnost při namáhání na tlak. [8]

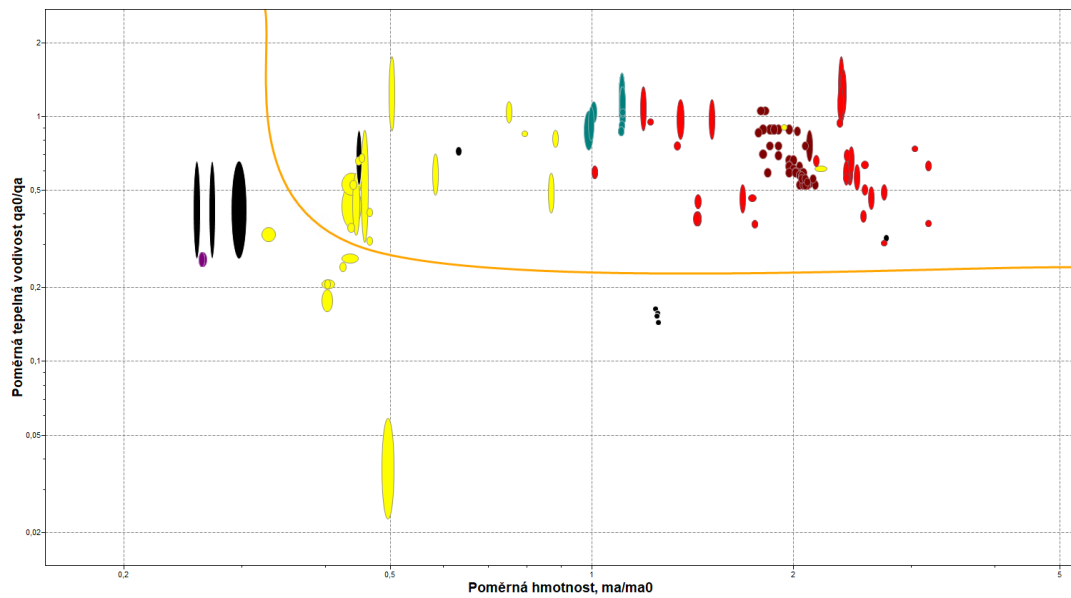
Mapa se upraví do následující podoby (Obrázek 16):



Obrázek 16 - omezení na pevnost a provozní teplotu [10] (Příloha č. IV)

Přiblížení zbylých materiálů a nakreslení křivky kompromisu na obrázku 17, která determinuje zkoumané materiálové pole, je pro výběr vhodného materiálu důležité.

Křivka vylučuje materiály čistě na základě konstruktérova úsudku, proto jsou v tomto případě vyloučeny materiály jako diamant, 100% složený materiál z uhlíkových vláken či sloučeniny Beryllia. Ať už z cenových či legislativních důvodů ani jeden z těchto materiálů není vhodný pro aplikaci na silničním sportovním vozidle.



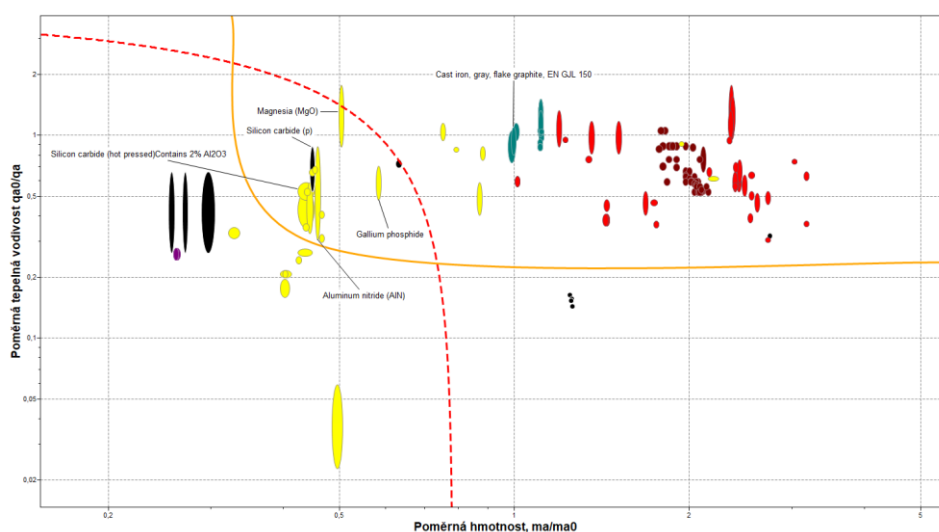
Obrázek 17 - křivka kompromisu [10] (Příloha č. V)

3.6 Definice sankčních funkcí

Vzhledem k rozsáhlosti materiálového spektra je klíčové stanovit, jaké kombinace požadavků jsou na materiál kladeny a jaké jsou jejich přípustné varianty. V tomto případě výkonných produkčních vozidel, kde cena nehraje primární roli, je důležitým faktorem poměr mezi udržením výkonnosti brzdových kotoučů a jejich hmotností. Ke konstrukci brzdového kotouče určeného pro automobily, které často jezdí po okruzích a vyžadují stabilní výkonnost, by byl zvolen sankční poměr 1:5 pro tepelnou vodivost. Tímto způsobem se zajistí, že čím vyšší bude tepelná vodivost, tím lepší budou výkonnostní vlastnosti. Naopak, pokud je cílem minimalizovat hmotnost, buď z důvodu použití na lehkém sportovním voze nebo z preference použití slabších tlumičů, zvolen by byl sankční poměr 5:1 pro hmotnost (Obrázek 18).

Poslední křivka se týká kompromisu mezi hmotností a tepelnou vodivostí, kdy je požadováno dosažení optimálních výsledků u obou parametrů. Zvolené poměry jsou reprezentovány koeficientem α , který v tomto případě nabývá hodnot 1, 5 a 0,2. Zjednodušeně lze říci, že daný poměr určuje, jak moc je jedna vlastnost preferována před druhou. U zvoleného koeficientu $\alpha=5$ dochází k pětinasobně většímu důrazu na minimalizaci hmotnosti než na maximalizaci tepelné vodivosti.

Pro řešený příklad byl zvolen pětkrát větší důraz na minimalizaci hmotnosti, jelikož u sportovního vozu se nepředpokládá, že bude jezdit na okruhu každý den, ale pouze příležitostně. Proto je kladen důraz hlavně na menší hmotnost kotouče, díky tomu lze zaručit větší efektivitu brzdové soustavy.



Obrázek 18 - sankční funkce a vhodné materiály [10] (Příloha č. VI)

Sankční funkce je na mapě znázorněna křivkou, i když ve své podstatě je to přímka s určitým sklonem. Změna v křivku je zapříčiněna logaritmickými souřadnicemi, ve kterých se mapy znázorňují. Omezuje materiálovou oblast z druhé strany, než křivka kompromisu a společně tak určují oblast materiálů, které by měly být stejně vhodné pro dané řešení.

Díky této křivce jsou vybrány materiály, které se hodí pro aplikaci na brzdový kotouč. Protože však databáze obsahuje takřka všechny možné varianty jedné sloučeniny, ze změní žlutých bublin byl vybrán jen nadřazený materiál všem ostatním pro zjednodušení dalšího výběru. Zobrazených materiálů zůstalo pět a je tedy těžké určit nejlepší z nich. K tomu slouží tzv. proces zúžené selekce.

3.7 Proces zúžené selekce

Tato fáze je zaměřena na bližší specifikaci jednotlivých požadavků a vlastností, které mohou ovlivnit výběr materiálů. Tuhost byla specifikována jako důležitá vlastnost a s ní byl propojen modul pružnosti v tlaku.

Cíle byly stanoveny dva: nízká hmotnost a teplotní stabilita. A protože se jedná o součást pro produkční vozidlo, je důležité také přemýšlet nad cenou. Těžko se najde velké množství zákazníků, kteří budou ochotni zaplatit za vůz stejnou částku, jako za vůz Formule 1, když pro materiály zvolíme stejně exotické varianty, jako ve výkonnostní kategorii.

Z těchto požadavků je možné vytvořit tabulku (tabulka 3) a postupně hodnotit jednotlivé materiály od 1 do 6, kde 1 znamená nejmenší vhodnost a 6 největší. Tato hodnocení pomohou lépe porovnat jednotlivé materiály a jejich schopnost splnit požadavky. Zde je výčet materiálů, které byly vybrány za pomoci softwaru „ANSYS Granta EduPack“. Pro ilustraci bude ve výběru zavedena i šedá litina.

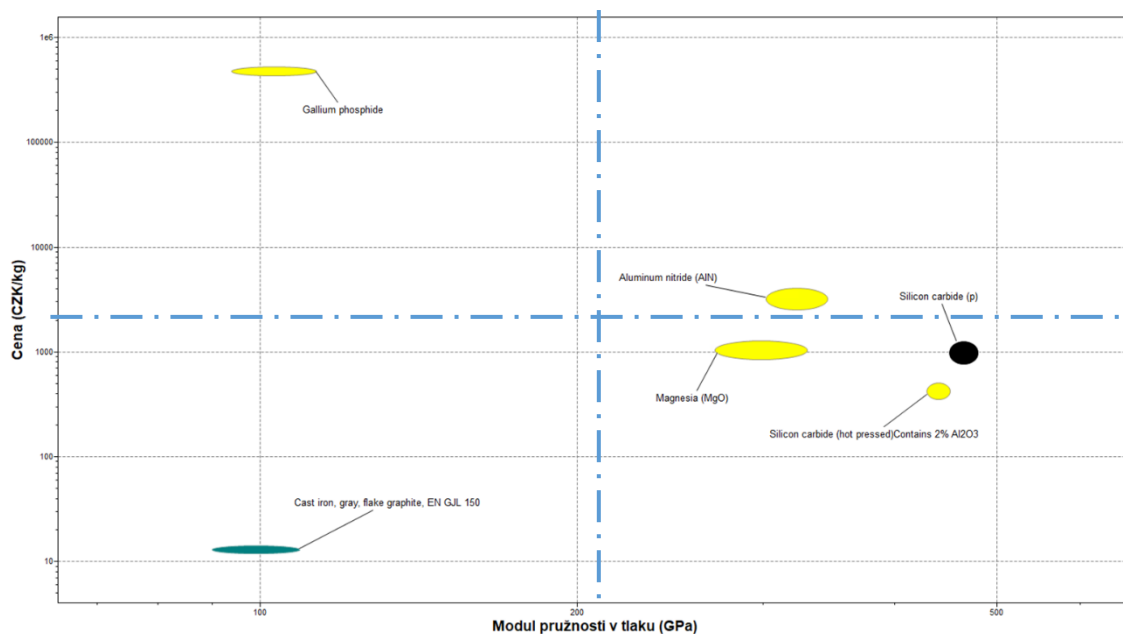
Tabulka 3 – známkování

	Modul pružnosti	Hustota	Koeficient tepelné vodivosti	Cena	Průměr
MgO					
GaP					
SiC₂ (p)					
AlN					
SiC₂ (2 % Al₂O₃)					
Cast iron, gray					

Zdroj: Vlastní zpracování na základě databáze softwaru ANSYS Granta EduPack (2024)

Pro lepší přehlednost grafů bude na ose Y vždy vynesena cena pro lepší vizualizaci poměru cena/výkon, na osu X pak hledané vlastnosti, kvůli zjištění ceny vylepšení vlastností.

Graf lze opět rozdělit na čtyři kvadranty, takže nejideálnější hodnoty se nachází v pravém dolním rohu, naopak v levém horním rohu se nachází materiály, které v porovnání modulů pružnosti v tlaku a ceně dosahují nejméně vhodných hodnot. Modré čáry v obrázku 19 představují pomyslné rozdělení do čtyř kvadrantů.



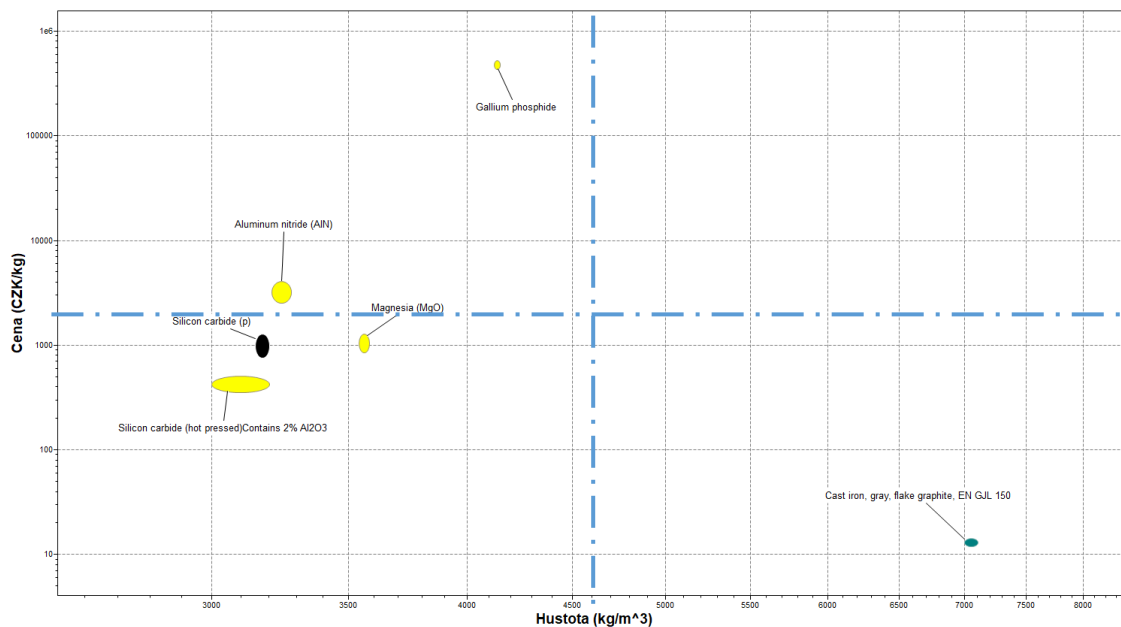
Obrázek 19 - porovnání modulu pružnosti a ceny [10] (Příloha č. VII)

Tabulka 4 - známkování modulu pružnosti a ceny

	Modul pružnosti	Hustota	Koeficient tepelné vodivosti	Cena	Průměr
MgO	3			3	
GaP	2			1	
SiC₂ (p)	6			4	
AlN	4			2	
SiC₂ (2 % Al₂O₃)	5			5	
Cast iron, gray	1			6	

Zdroj: Vlastní zpracování na základě databáze softwaru ANSYS Granta EduPack (2024)

Další vlastnost, jež budeme porovnávat s cenou, je hustota. V tomto případě jsou hledány stejné extrémny. Nejlépe hodnocené materiály se nacházejí v levém dolním kvadrantu obrázku 20 a nejhůře hodnocené v pravém horním.



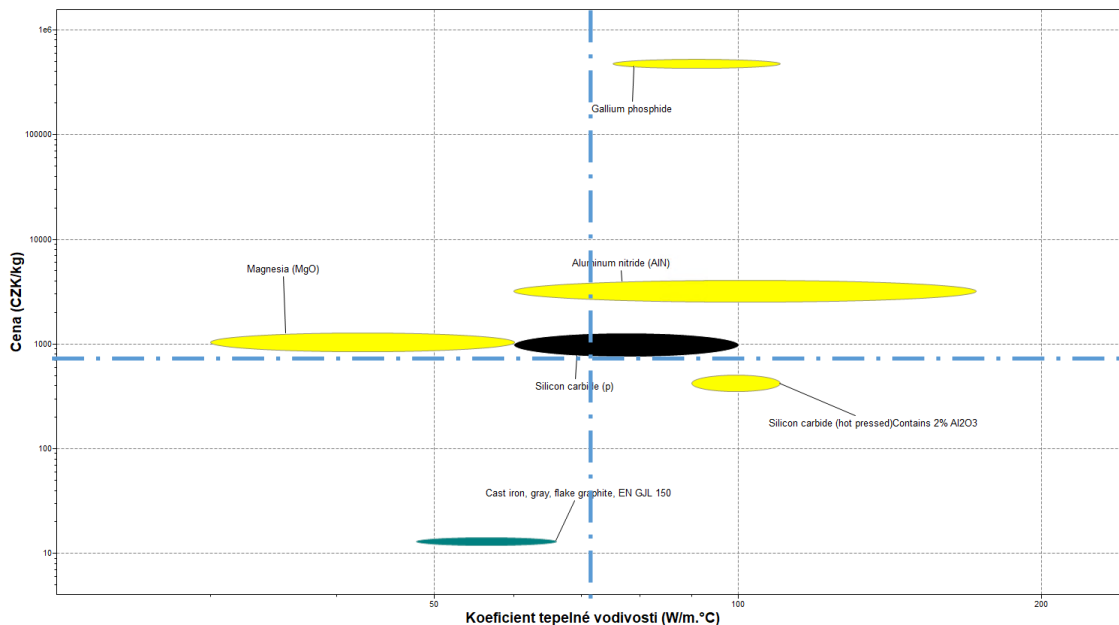
Obrázek 20 - porovnání ceny a hustoty [10] (Příloha č. VIII)

Tabulka 5 - známkování hustoty

	Modul pružnosti	Hustota	Koeficient tepelné vodivosti	Cena	Průměr
MgO	3	6		3	
GaP	2	5		1	
SiC₂ (p)	6	5		4	
AlN	4	4		2	
SiC₂ (2 % Al₂O₃)	5	6		5	
Cast iron, gray	1	1		6	

Zdroj: Vlastní zpracování na základě databáze softwaru ANSYS Granta EduPack (2024)

V poslední předvedené mapě bude porovnání ceny s koeficientem tepelné vodivosti. A protože cílem je najít materiál s nízkou cenou, ale vysokou tepelnou vodivostí, nejlepší materiály se nachází v pravém dolním rohu, nejhorší naopak v levém horním rohu obrázku 21.



Obrázek 21 - porovnání koeficientu tepelné vodivosti a ceny [10] (Příloha č. IX)

Tabulka 6 - známkování koeficientu tepelné vodivosti

	Modul pružnosti	Hustota	Koeficient tepelné vodivosti	Cena	Průměr
MgO	3	6	1	3	
GaP	2	5	5	1	
SiC₂ (p)	6	5	3	4	
AlN	4	4	6	2	
SiC₂(2 % Al₂O₃)	5	6	4	5	
Cast iron, gray	1	1	2	6	

Zdroj: Vlastní zpracování na základě databáze softwaru ANSYS Granta EduPack (2024)

Po oznámkování všech kategorií lze spočítat průměrnou známku a na základě ní zvolit nejvhodnějšího kandidáta (Tabulka 7).

Tabulka 7 - zprůměrování známek

	Modul pružnosti	Hustota	Koeficient tepelné vodivosti	Cena	Průměr
MgO	3	6	1	3	3,25
GaP	2	5	5	1	3,25
SiC₂ (p)	6	5	3	4	4,5
AlN	4	4	6	2	4
SiC₂ (2 % Al₂O₃)	5	6	4	5	5
Cast iron, gray	1	1	2	6	2,5

Zdroj: Vlastní zpracování na základě databáze softwaru ANSYS Granta EduPack (2024)

Pomyslným vítězem s průměrnou známkou 5 vychází *karbid křemičitý*, který zároveň obsahuje 2 % oxidu hlinitého. Zároveň samozřejmě lze usoudit, že šedá litina vyhrává pouze v kategorii ceny, což je logické, protože se masově používá pro automobilový průmysl. Všechny ostatní vlastnosti však měla takřka nejhorší. Především hustota, na kterou byl kladen největší důraz, je v porovnání se všemi ostatními materiály takřka dvojnásobná.

3.8 Finální výběr

Jako nejvhodnější materiál z devíti vybraných se jeví SiC₂ neboli karbid křemičitý. Díky svým skvělým elastickým vlastnostem a aktuální ceně tento materiál předčil všechny ostatní.

Karbid křemičitý spadá do materiálové rodiny technických keramik. Ve výběru figurovaly jeho dvě varianty a zvítězila ta, která se vyrábí lisováním za tepla a obsahuje 2 % oxidu hlinitého. S cenou mezi 360 a 510 CZK za kilogram k 01.04.2024 patří mezi levnější varianty v porovnání s ostatními vybranými materiály. Karbid křemičitý se vyznačuje vynikajícími elastickými vlastnostmi, což mu umožňuje odolávat opakovaným namáháním při vysokých intenzitách, jak dokazuje modul pružnosti v tlaku o velikosti 445 GPa. S bodem tání kolem 2 400 °C je schopen snášet extrémně vysoké teploty, což je více než dostatečné s ohledem na provozní teploty brzdového kotouče viz. kapitola 3.2.3 této práce. Zároveň i rozsah provozních teplot, který se pohybuje od -273 °C do 1350 °C, dává dostatečnou rezervu pro použití v širokém spektru podmínek, včetně extrémně chladných oblastí. Karbid křemičitý je rovněž odolný vůči vnějším vlivům a jeho poloviční hustota ve srovnání se šedou litinou představuje značnou úsporu hmotnosti. Jedinou významnou nevýhodou je nemožnost 100% recyklace, což brání opětovnému použití po dosažení konce životního cyklu brzdového kotouče. [10]

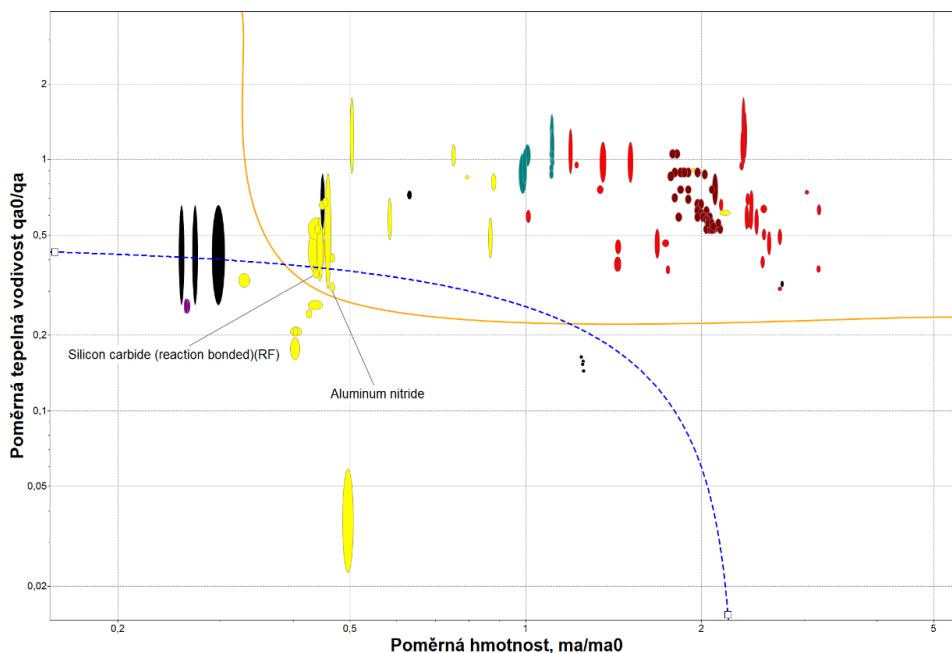
Porovnání vlastností šedé litiny a Karbidu křemičitého jsou znázorněny v tabulce 8:

Tabulka 8 - porovnání vlastností šedé litiny a vybraného materiálu [10]

Vlastnost	Cast iron, gray	SiC ₂ (2 % Al ₂ O ₃)
Modul pružnosti v tlaku [E]	117 [GPa]	442 [GPa]
Koeficient tepelné vodivosti [λ]	52,9 [W/m°C]	100 [W/m°C]
Hustota [ρ]	7085 [kg/m ³]	3050 [kg/m ³]
Cena [-]	14 [CZK/kg]	420 [CZK/kg]

Zdroj: Vlastní zpracování na základě databáze softwaru ANSYS Granta EduPack (2024)

Pokud by bylo zadáno zaměřit se hlavně na výkonnost, volba koeficientu $\alpha = 0,2$ jen lehce změnila podobu grafu, jelikož sankční funkci omezující pole vhodných materiálu dá tato hodnota jiný sklon. To zapříčiní jiné omezení oblasti. Modifikovaná mapa na obrázku 22:



Obrázek 22 - výběr s jiným sklonem sankční funkce [10] (Příloha č. X)

Je vidět, že ačkoliv má sankční funkce nižší sklon, určila materiály za stejné oblasti jako předchozí, jen jejich modifikace se liší. Nitrid hlinitý figuroval již v předchozím výběru, zatímco stoprocentní karbid křemičitý byl vyloučen z důvodu zjednodušení velkého množství modifikací. Zde však sankční funkce zvolila pouze tyto dva materiály, a požadované vlastnosti jsou znázorněny v tabulce 9:

Tabulka 9 - porovnání vlastností AlN a SiC₂[10]

Vlastnost	AlN	SiC ₂
Modul pružnosti v tlaku [E]	330 [GPa]	400 [GPa]
Koeficient tepelné vodivosti [λ]	175 [W/m°C]	150 [W/m°C]
Hustota [ρ]	3300 [kg/m ³]	3130 [kg/m ³]
Cena [-]	3000 [CZK/kg]	443 [CZK/kg]

Zdroj: Vlastní zpracování na základě databáze softwaru ANSYS Granta EduPack (2024)

Karbid křemičitý předčí nitrid hlinitý v každé zkoumané oblasti krom tepelné vodivosti a je po použití metody zúženého výběru vhodnějším z těchto dvou vybraných materiálů. Jelikož byl výběr zaměřen více na funkčnost, jinými slovy byl hledán materiál s větším koeficientem tepelné vodivosti, je nutné ověření pravdivosti předchozích tvrzení, to znamená porovnání s materiálem, který byl vybrán za účelem větší úspory hmotnosti.

Tabulka 10 - finální porovnání vybraných materiálů [10]

Vlastnost	Cast iron, gray	SiC ₂ (2 % Al ₂ O ₃)	SiC ₂
Modul pružnosti v tlaku [E]	117 [GPa]	442 [GPa]	400 [GPa]
Koeficient tepelné vodivosti [λ]	52,9 [W/m°C]	100 [W/m°C]	150 [W/m°C]
Hustota [ρ]	7085 [kg/m ³]	3050 [kg/m ³]	3130 [kg/m ³]
Cena [-]	14 [CZK/kg]	420 [CZK/kg]	443 [CZK/kg]

Zdroj: Vlastní zpracování na základě databáze softwaru ANSYS Granta EduPack (2024)

Jak je z tabulky 10 vidět, karbid křemičitý s obsahem 2 % Al₂O₃ se vyznačuje nižší hustotou, než čistý karbid křemičitý, ale zároveň dosahuje nižší tepelné vodivosti. Tyto vlastnosti ukazují, že předpoklady obou výběrů byly pravdivé. Všechny podrobné vlastnosti se nacházejí v přílohách č. **XI**, **XII** a **XIII**.

Zároveň lze konstatovat, že při použití karbidu křemičitého s příměskem oxidu hlinitého bude na kotouči ušetřeno 67 gramů oproti 100 % sloučenině SiC₂, což ve světě výrazných ekologických omezení a snaze výrobců co nejvíce minimalizovat hmotnost automobilů může hrát značnou roli. V porovnání s šedou litinou je úspora samozřejmě velká, jenže velikost brzdových kotoučů u běžných osobních aut bývá často mnohem menší a zároveň se kotouče často odlehčují otvory pro zlepšení chlazení, tudíž z pohledu pevného kotouče je hodnota dosahující 17 kilogramů nereálná.

Při aplikaci výpočtu na běžný brzdový kotouč pro vozy Škoda vyrobený ze šedé litiny by jeho hmotnost byla necelých 4,5 kilogramu. V takovém případě již výsledná hodnota není daleko od reality. Přesně z tohoto důvodu není použití šedé litiny pro sportovní vozy, které potřebují větší brzdové kotouče, reálné. Zároveň je v praxi brzdovým kotoučům

zvětšována povrchová plocha tvorbou různých děr a ventilačních prolisů, což samozřejmě přispívá ke snížení hmotnosti. Takové úpravy jsou však součástí know-how jednotlivých výrobců, přičemž každý k nim přistupuje jinak. Proto jsou předchozí výsledky a postupy idealizovány pro potřeby této práce.

I přesto však výsledek nelze považovat za nesmyslný, jelikož karbid křemičitý je běžně používán v praxi při výrobě brzdových kotoučů. Jen jeho podoba není taková, jako v tomto idealizovaném případě. Na sportovních vozidlech je možné najít brzdový kotouč vyrobený z vláken karbidu křemičitého, který je ale vložen do uhlíkové matrice, jež má za úkol ušetřit další váhu a hlavně snížit pravděpodobnost výskytu křehkého lomu neboli zvýšit vrubovou houževnatost celého kotouče. [9][10]

4. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo demonstrovat metodu výběru materiálu na brzdovém kotouči dle profesora Ashby. Nejprve byly specifikovány samotné funkce brzdového kotouče, jako jsou přeměna kinetické energie na tepelnou a odvod vzniklého tepla. Dalším úkolem bylo stanovit omezení, mezi které se řadí tuhost a pevnost v tlaku, protože na kotouč působí brzdové destičky ve směru proti sobě a zároveň stanovit rozměry. Čím větší je kotouč, tím větší je účinnost. Ráfky kol, používané na sportovní vozy se však pohybují v určitých rozměrových mezích, tudíž ani brzdový kotouč nemůže být nekonečně velký. Při výběru materiálu byla cílem především minimalizace hmotnosti a maximalizace tepelné vodivosti.

Na základě těchto specifikací byly určeny protichůdné požadavky, tedy minimalizace hustoty materiálu a zároveň maximalizace koeficientu tepelné vodivosti s přihlédnutím k rozumné ceně. Pokud se investuje hodně finančních prostředků, lze koupit i lehký a výborně teplo vodivý materiál, jenže z důvodu aplikace na konvenční sportovní vůz, jenž je homologován pro běžný provoz, bylo potřeba zvážit i cenu materiálu. Tyto tři hlavní parametry byly vodítkem k pomyslnému cíli.

Materiálová mapa v softwaru „ANSYS Granta EduPack“, byla vytvořena za pomoci materiálových indikátorů, jakými byly poměrná hmotnost běžně používané šedé litiny s hledaným materiálem a poměrná tepelná vodivost. Ukázala oblast, kde by se hledané materiály mohly vyskytovat. Díky následnému omezování a zužování počátečního výčtu materiálů bylo určeno pět stejně vhodných pro danou aplikaci.

Konečný výběr byl proveden metodou zúžené selekce, kdy byly všechny tyto materiály porovnány mezi sebou a na základě parametrů byly oznámkovány tak, aby průměrná známka určila nejvhodnější materiál ze všech pěti referenčních a zároveň poukázala na výkonnost vůči běžně používané šedé litině. [10]

Tento výběr určil karbid křemičitý s příměskem 2 % oxidu hlinitého jako nejvhodnější materiál. V porovnání s šedou litinou je tento materiál lepší ve všech hledaných vlastnostech až na cenu. Ta je výrazně vyšší, což je ale zapříčiněno hlavně nízkou cenou šedé litiny. A je vhodné připomenout, že masová výroba z jakéhokoliv materiálu dokáže výrazně snížit jeho cenu.

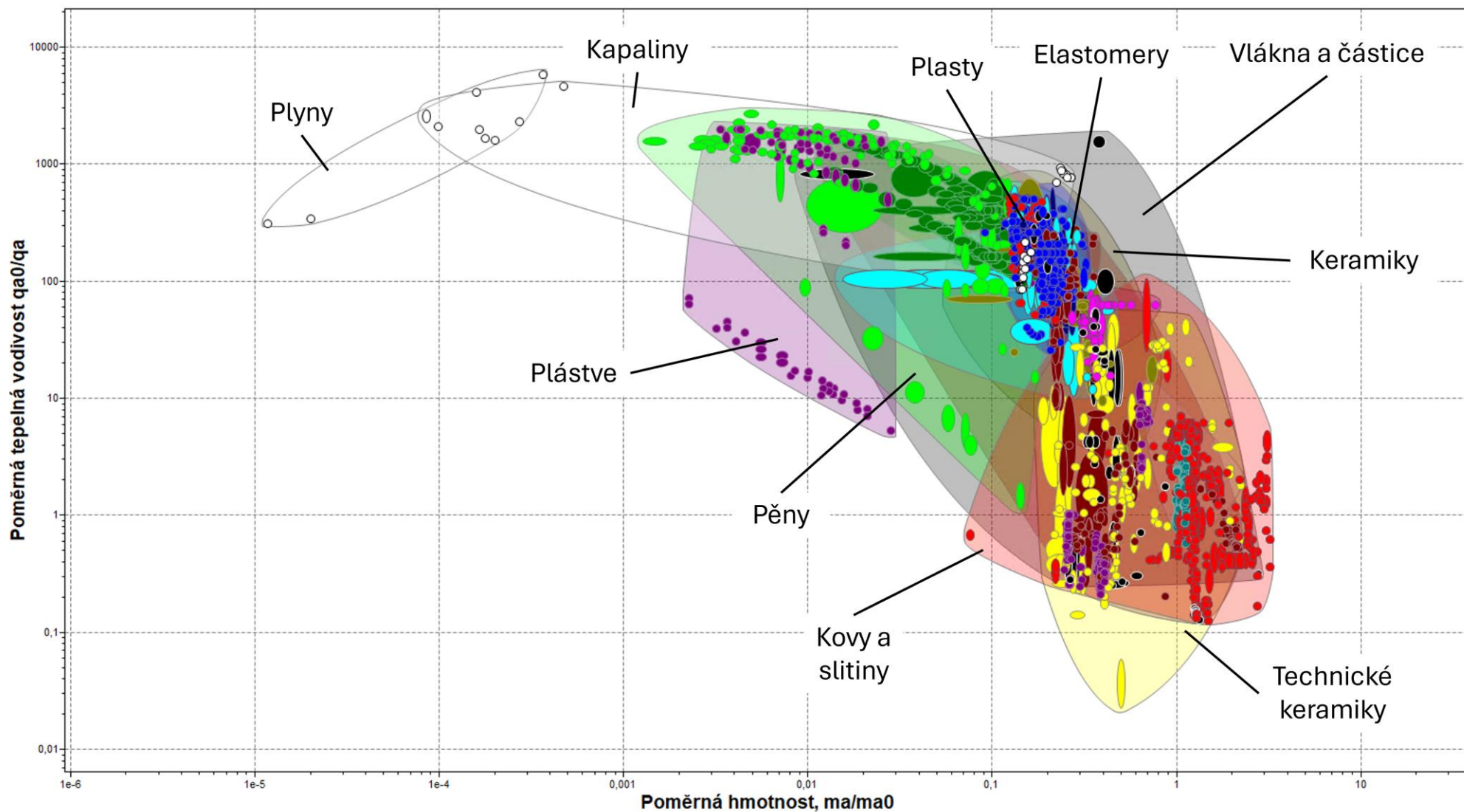
Pro ověření pravdivosti vyjádření byl proveden ještě druhý výběr, tentokrát s větším důrazem na tepelnou vodivost. Ukázalo se, že nejvhodnějším materiálem je opět karbid křemičitý, oproti předchozímu však bez obsahu jiných prvků. Při porovnání obou dvou vybraných bylo zřejmé, že splňují požadované předpoklady. Karbid křemičitý s obsahem 2 % oxidu hlinitého je lehčí, ale zároveň má nižší koeficient tepelné vodivosti. To dokazuje, že oba výběry zaměřené na dva různé výsledky byly provedeny správně. [10] Velkou nevýhodou vybraných materiálů je však křehkost, což je typickou vlastností technických i přírodních keramik. V praxi jsou proto vlákna karbidu křemičitého vkládána do matrice z uhlíkových vláken, které značně zvyšují vrubovou houževnatost a zajišťují tak delší životnost a spolehlivost celého kotouče. Protože databáze „ANSYS Granta EduPack“ neobsahuje rozšíření o tvorbu hybridních materiálů, ani žádné jejich zástupce (pouze jejich samostatné části, prázdné matrice apod.), byl v této práci určen materiál, jenž se v praxi pro výrobu brzdového kotouče opravdu používá, avšak v kombinaci s dalšími materiály pro zlepšení vlastností. [9] [10]

Seznam použitých zdrojů

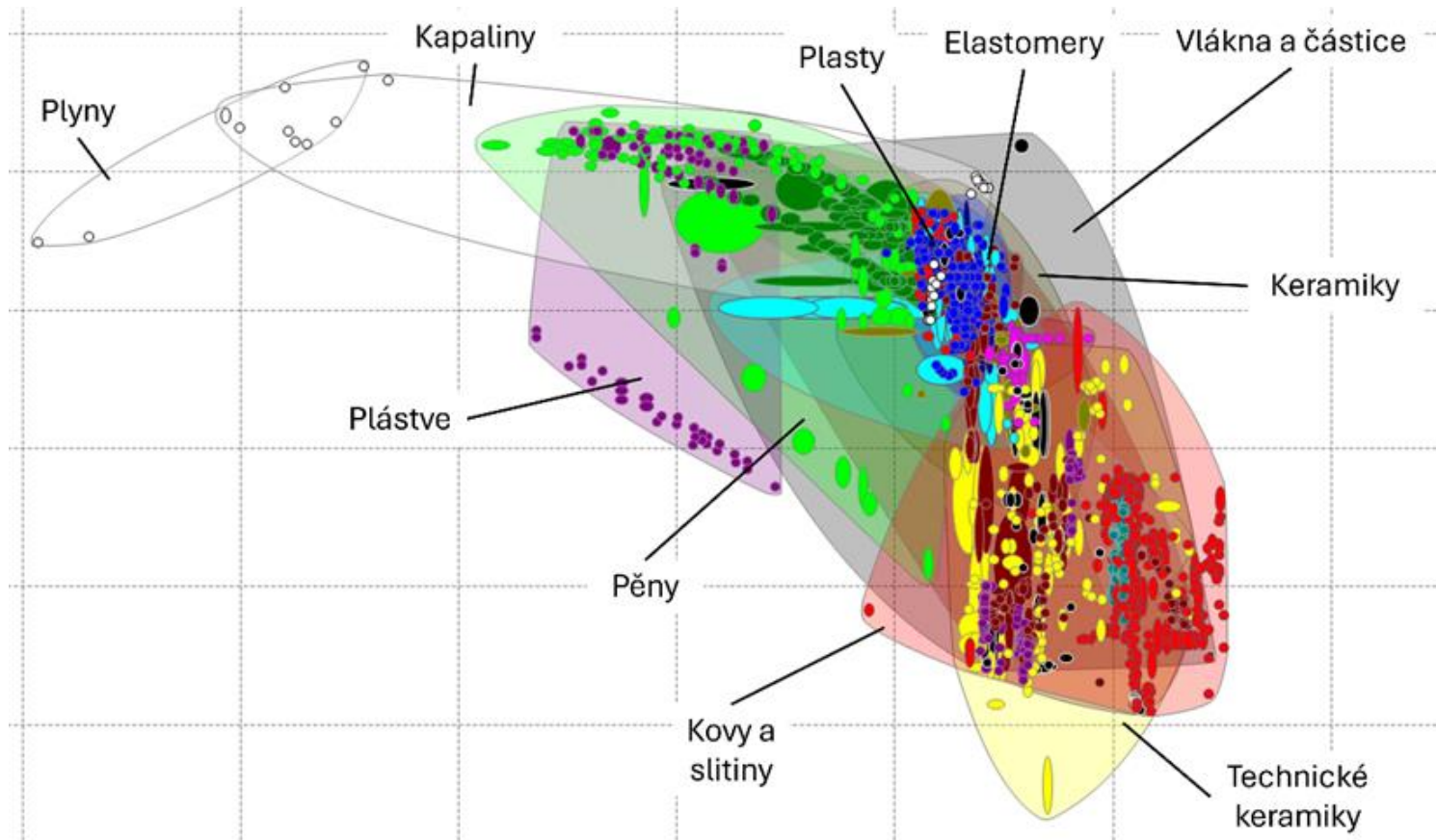
- [1] Materials selection in mechanical design. 4th ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, c2011. ISBN 978-1-85617-663-7.
- [2] EUROPEAN UNION INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE. *Consolidated Annual Activity Report 2022*. Online. 2023. Dostupné z: https://euipo.europa.eu/tunnel-web/secure/webdav/guest/document_library/contentPdfs/about_euipo/annual_report/Annual_Activity_Report_2022_en.pdf. [cit. 2024-05-09].
- [3] MOTORSPORTNETWORK. *F1 COST CAP: WHAT IS IT AND HOW DOES IT WORK?* Online. 2022. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/f1/news/f1-cost-cap-what-is-it-how-it-works/10379799/>. [cit. 2024-04-05].
- [4] INDUSTRIAL METALLURGISTS, LLC. *Materials Selection: Design Requirements*. Online. 2018. Dostupné z: <https://www.imetllc.com/materials-selection-design-requirements/>. [cit. 2024-04-23].
- [5] ABE PERFORMANCE. *HISTORIE BRZDOVÝCH SYSTÉMŮ*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.abebrakes.com/cs/informace-cs/historie-brzdovych-systemu/>. [cit. 2024-05-03].
- [6] CZECH NEWS CENTER A.S. *Bubnová brzda stále žije. A má i své výhody!* Online. 2018. Dostupné z: <https://www.auto.cz/bubnova-brzda-stale-zije-a-ma-i-sve-vyhody-125216#>. [cit. 2024-05-12].
- [7] SAFE BRAKING. *NAME THE BRAKES: Dual Front Calipers*. Online. 2018. Dostupné z: <https://safebraking.com/name-the-car/>. [cit. 2024-05-09].
- [8] BREMBO. *F1 Infographics*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.brembo.com/en/car/formula-1/f1-infographics>. [cit. 2024-04-05].
- [9] COMPOSITI MAGAZINE. *Carbon-ceramic brake discs: special materials for exceptional performance*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.compositimagazine.it/carbon-ceramic-brake-discs-special-materials-for-exceptional-performance/>. [cit. 2024-05-09].
- [10] ANSYS Granta EduPack 2023 R1 Version: 23.1.1

- [11] *Brake Disk and Caliper*. Online. 2021. Dostupné z: <https://sketchfab.com/3d-models/brake-disk-and-caliper-5feda9dbf20a49cf9fd29d550e55e4b9>. [cit. 2024--5-11].
- [12] LEINVEBER, Jiří a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [13] Doc. Ing. KUBEC, Ph.D., Václav a Doc. Ing. KRÁTKÝ, Jaroslav. *STUDIJNÍ POKLADY K PŘEDMĚTŮM ČÁSTI A MECHANISMY STROJŮ 1*. Online. 2019. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kks/cms1/studijni-materialy.html>. [cit. 2024-05-12].
- [14] MAREŠ, Radim. *Kapitoly z termomechaniky*. Plzeň: Západočeská univerzita, c2008. ISBN 978-80-7043-706-3.
- [15] *Kinetická energie rotačního pohybu*. Online. 2023. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/fyzika/kineticka-energie-rotacniho-pohybu/>. [cit. 2024-05-18].
- [16] JONES, Bruce. *Okruhy F1 z ptačí perspektivy*. Svojtka&co, 2023. ISBN 978-80-256-3342-7.
- [17] Friction and Automobile Tires. Online. 2018. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Mechanics/frictire.html> [cit. 2024-05-20].
- [18] Circuit Gilles Villeneuve. Online. 2024. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Circuit_Gilles_Villeneuve [cit. 2024-05-20].

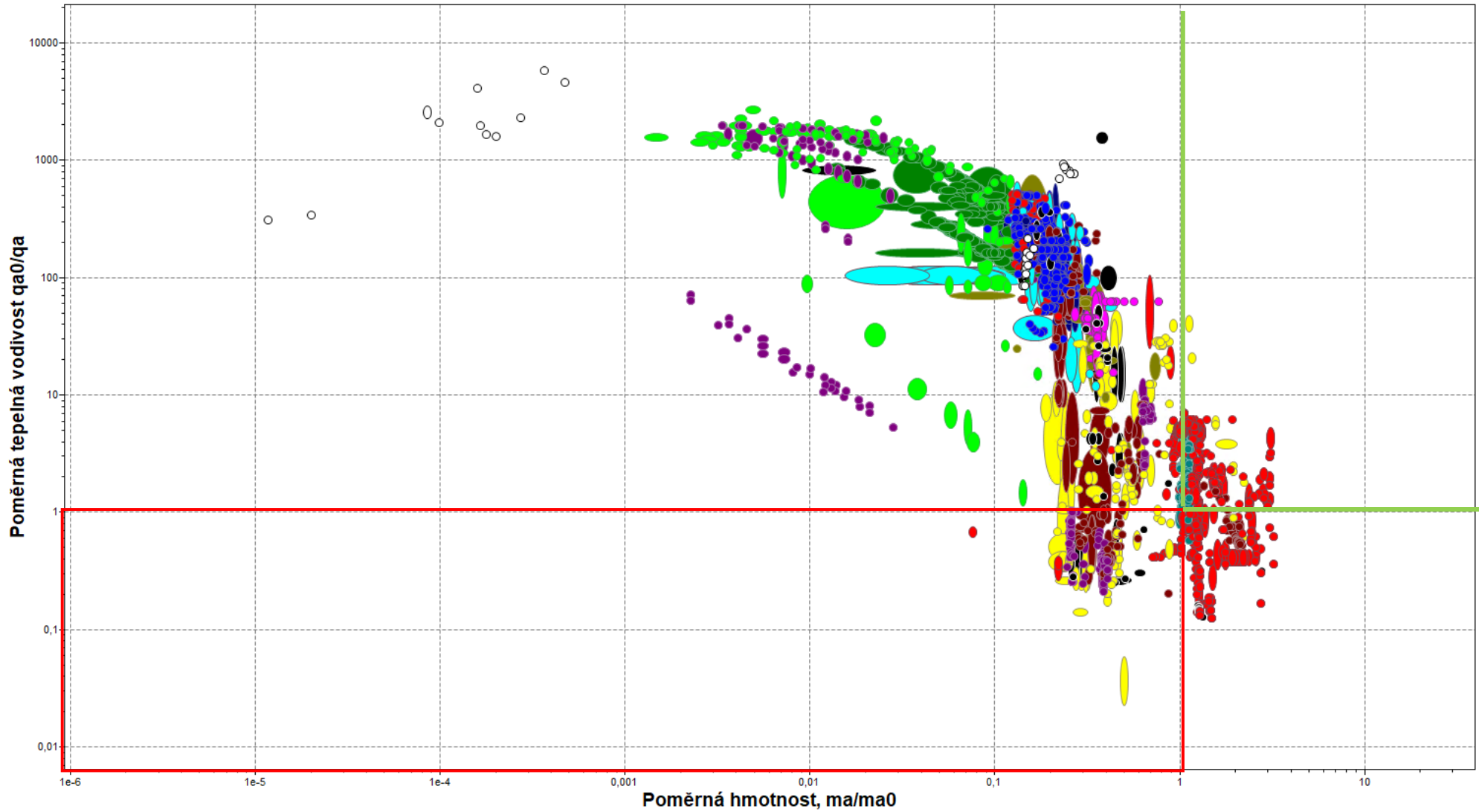
PŘÍLOHA č. I



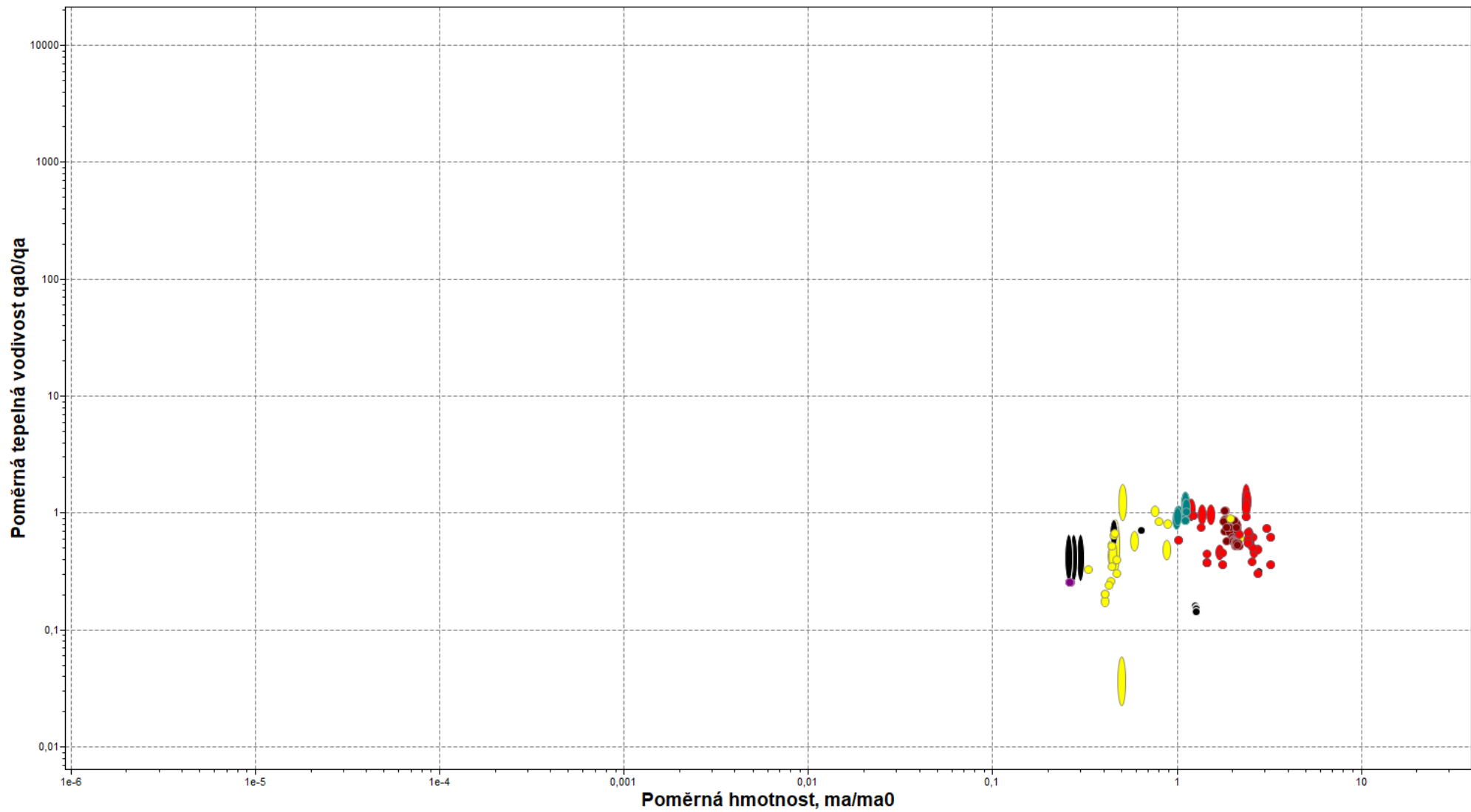
PŘÍLOHA č. II



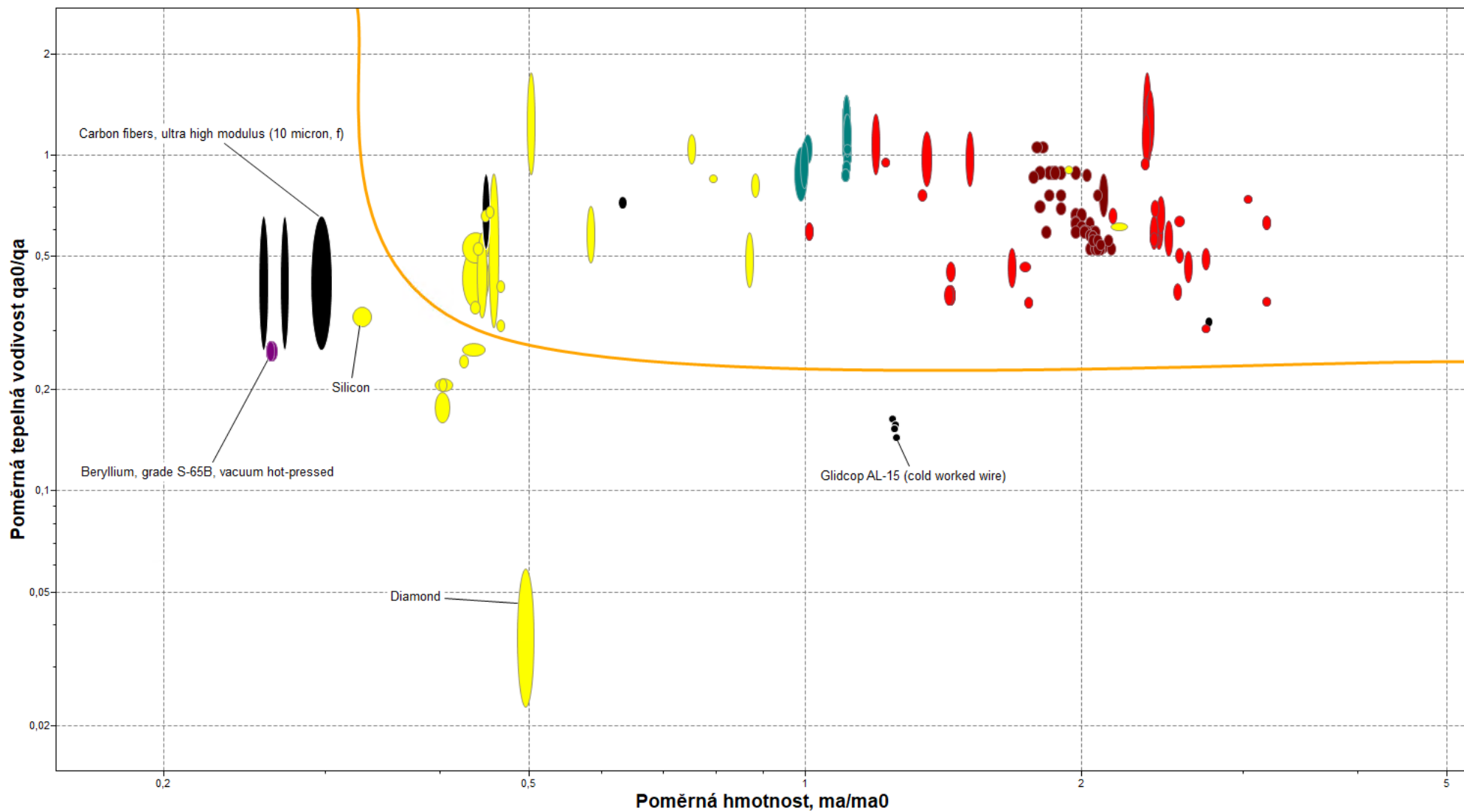
PŘÍLOHA č. III



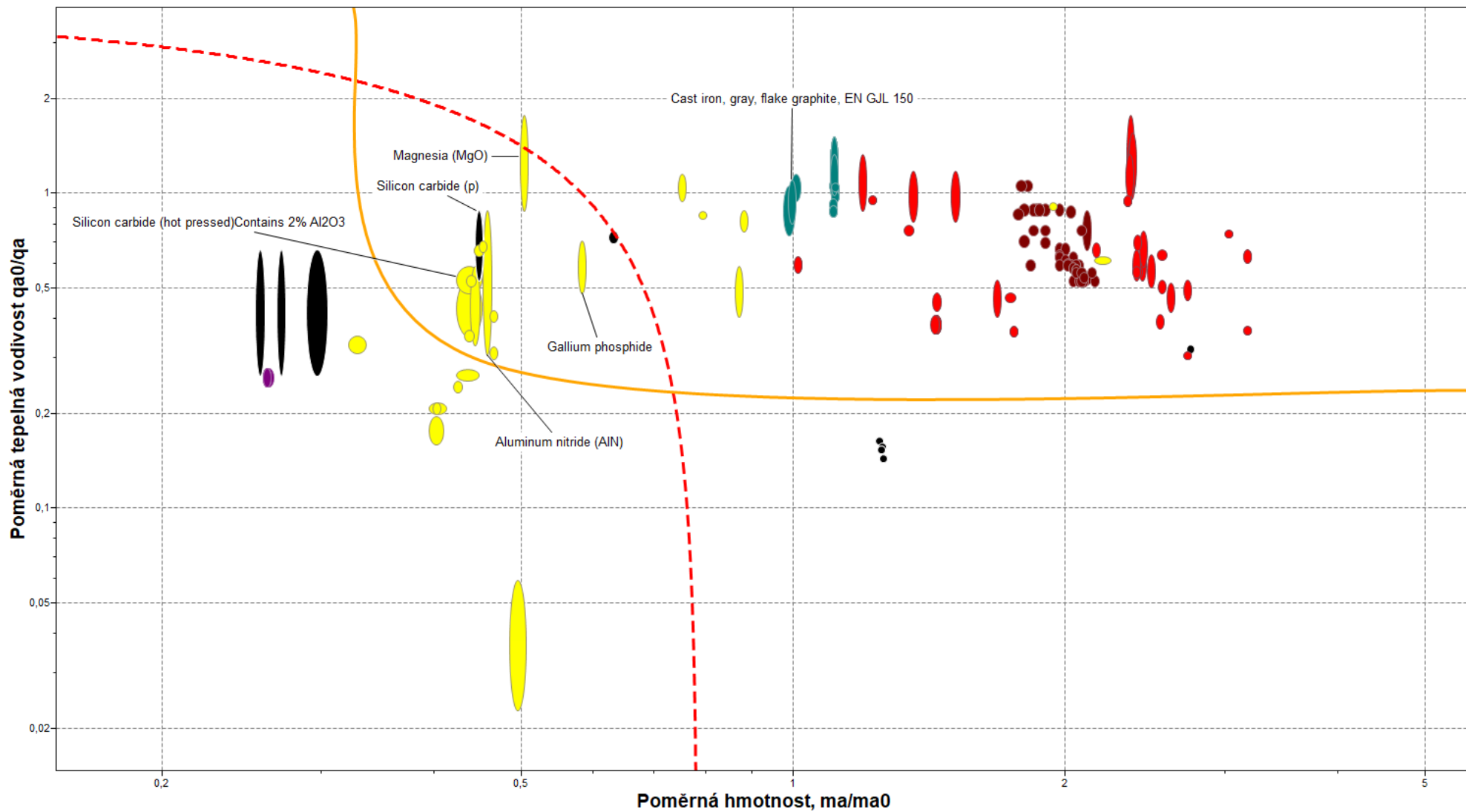
PŘÍLOHA č. IV



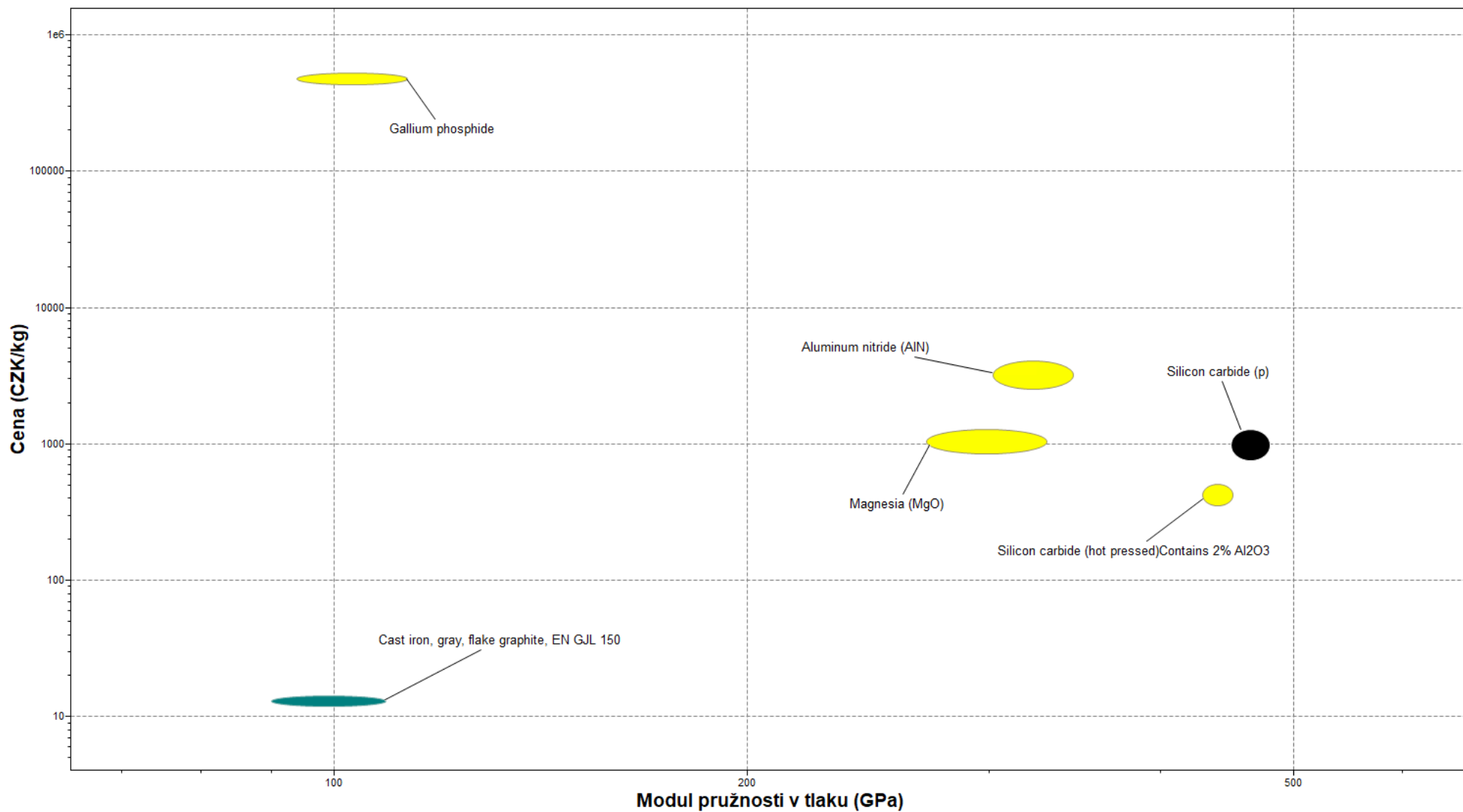
PŘÍLOHA č. V



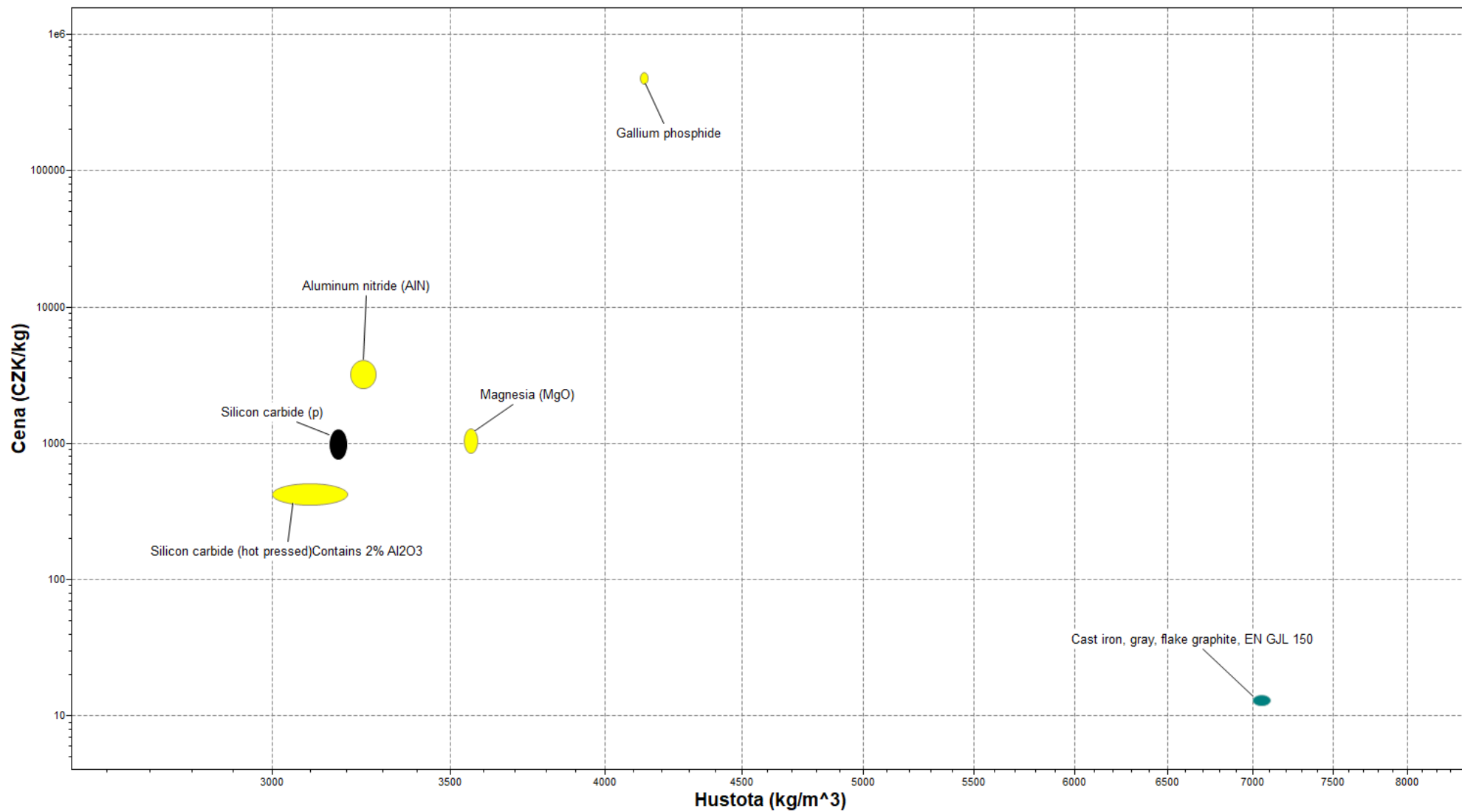
PŘÍLOHA č. VI



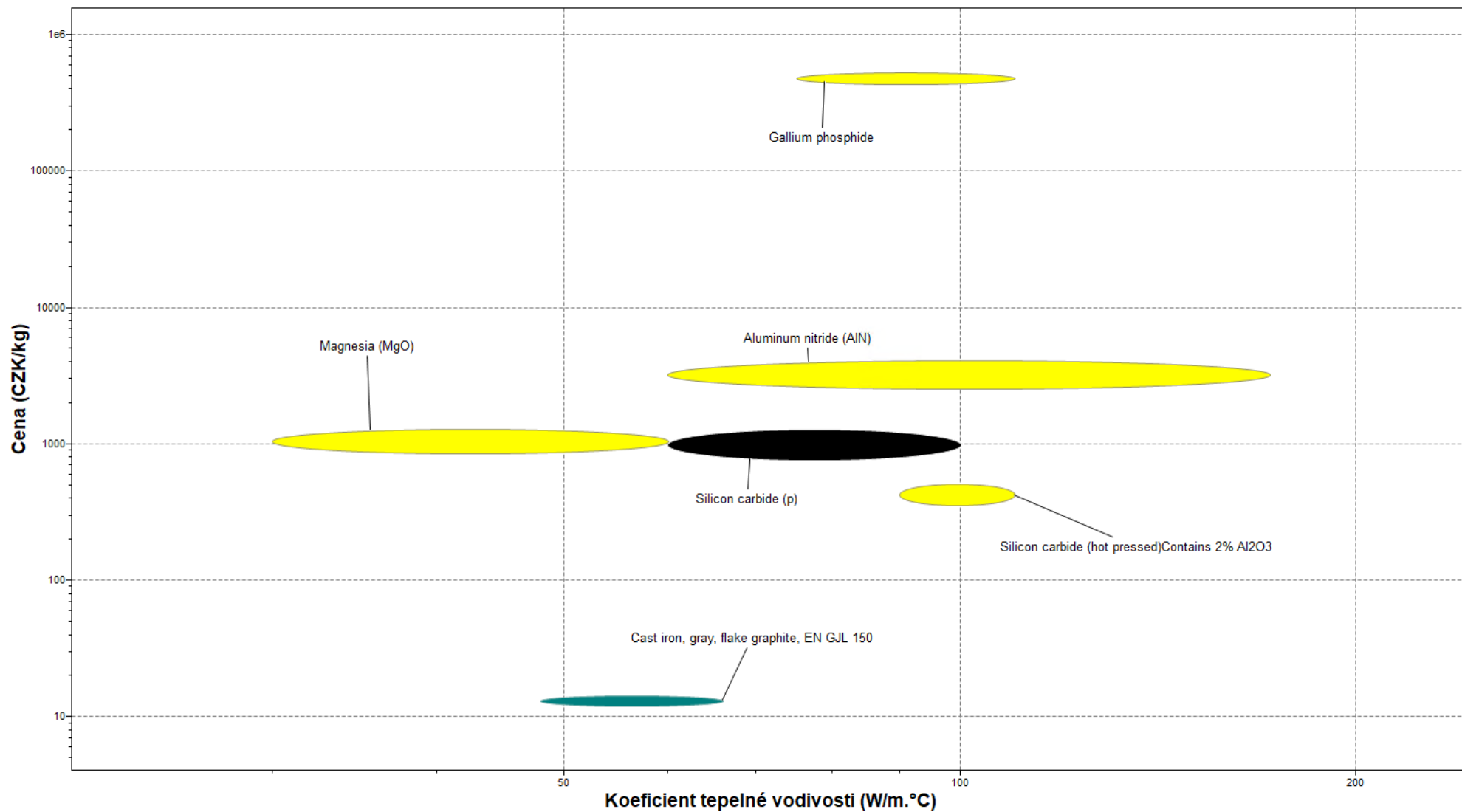
PŘÍLOHA č. VII



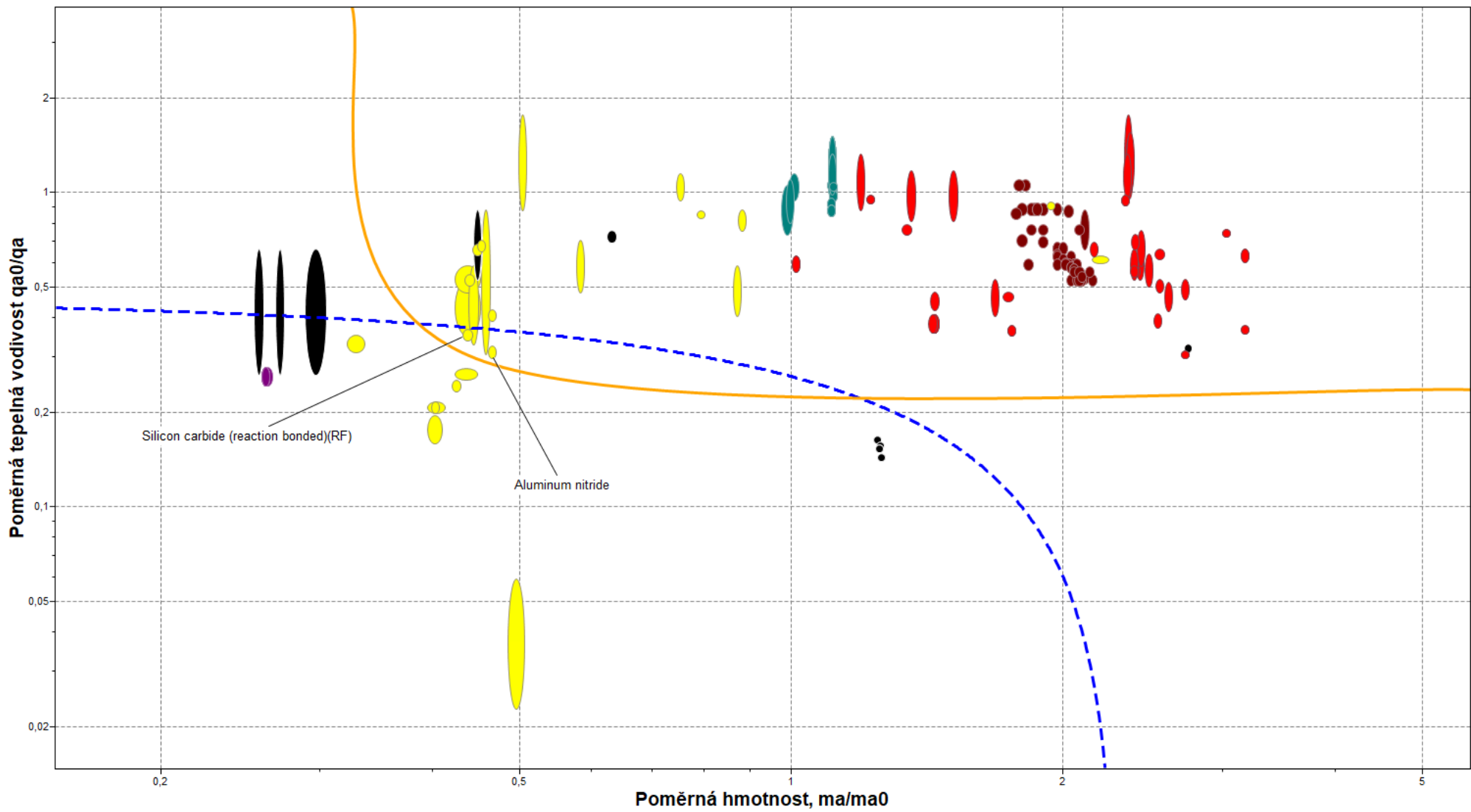
PŘÍLOHA č. VIII



PŘÍLOHA č. IX



PŘÍLOHA č. X



General information

Designation

Cast iron, gray, flake graphite, EN GJL 150, BS EN 1561:1997 (record based on BS 1542:1990 BS grade 150)

UNS number

F11701

Typical uses

Brake discs and drums, camshafts, cylinder liners, piston rings, machine tool structural parts, engine blocks.

Composition overview

Compositional summary

Fe93-94 / C3.2 / Si2.6 / Mn0.6 / P0.1 (impurities: S<0.15)

Material family

Metal (ferrous)

Base material

Fe (Iron)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

C (carbon)	3,2			%
Fe (iron)	93,4	-	93,5	%
Mn (manganese)	0,6			%
P (phosphorus)	0,1			%
S (sulfur)	0	-	0,15	%
Si (silicon)	2,6			%

Price

Price	* 12	-	14,2	CZK/kg
Price per unit volume	* 8,39e4	-	1,01e5	CZK/m ³

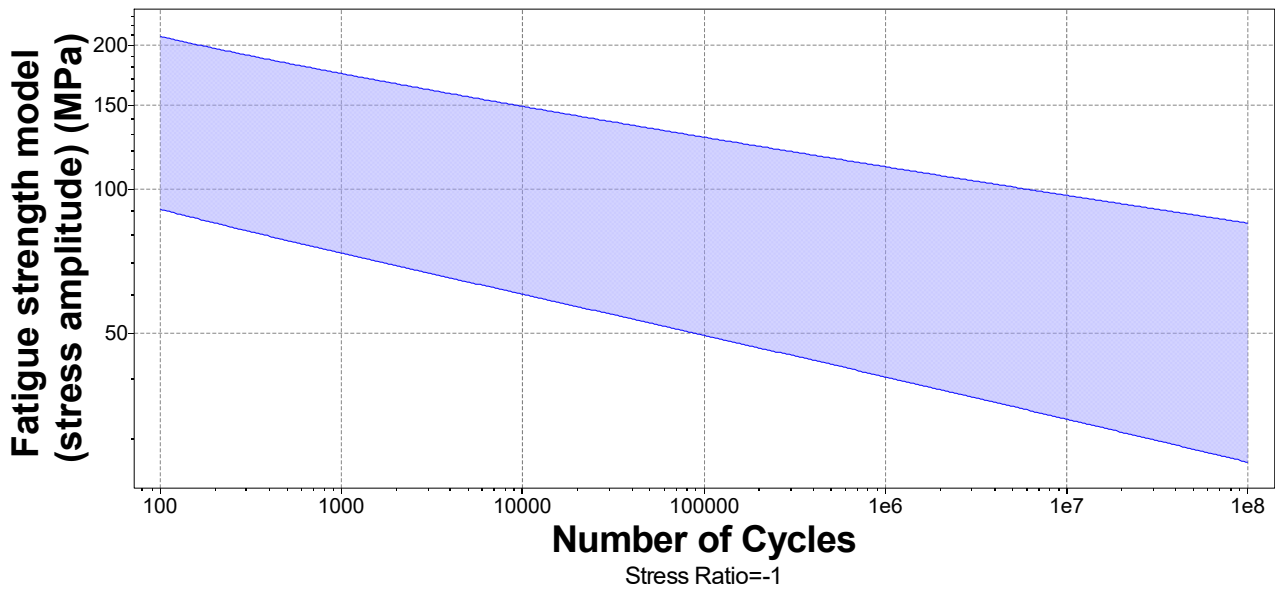
Physical properties

Density	7e3	-	7,1e3	kg/m ³
---------	-----	---	-------	-------------------

Mechanical properties

Young's modulus	90	-	109	GPa
Specific stiffness	12,8	-	15,5	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	97	-	117	MPa
Tensile strength	150	-	250	MPa
Specific strength	13,8	-	16,6	kN.m/kg
Elongation	* 1	-	2	% strain
Tangent modulus	4,6e3			MPa
Compressive strength	* 190	-	235	MPa
Flexural modulus	* 90	-	109	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 110	-	140	MPa
Shear modulus	35	-	44	GPa
Bulk modulus	61	-	78	GPa
Poisson's ratio	0,255	-	0,265	
Shape factor	25			
Hardness - Vickers	105	-	265	HV
Elastic stored energy (springs)	46,9	-	69,9	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	40	-	80	MPa
Fatigue strength model (stress amplitude)	* 33	-	97	MPa

Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles



Impact & fracture properties

Fracture toughness	* 19	- 23	MPa.m ^{0.5}
Toughness (G)	* 3,6	- 5,4	kJ/m ²

Thermal properties

Melting point	1,13e3	- 1,25e3	°C
Maximum service temperature	350	- 450	°C
Minimum service temperature	-150	- -50	°C
Thermal conductivity	48	- 66	W/m.°C
Specific heat capacity	* 470	- 510	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	11	- 13	µstrain/°C
Thermal shock resistance	77,2	- 105	°C
Thermal distortion resistance	3,94	- 5,62	MW/m
Latent heat of fusion	* 270	- 275	kJ/kg

Electrical properties

Electrical resistivity	78	- 82	µohm.cm
Electrical conductivity	2,1	- 2,21	%IACS
Galvanic potential	* -0,49	- -0,41	V

Magnetic properties

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

Optical, aesthetic and acoustic properties

Transparency	Opaque	
Acoustic velocity	3,57e3 - 3,94e3	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	0,01 - 0,035	

Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	No
-----------------------------------	----

Processing properties

Metal casting	Excellent
Metal cold forming	Unsuitable
Metal hot forming	Unsuitable

Metal press forming	Unsuitable
Metal deep drawing	Unsuitable
Machining speed	42,7 m/min
Weldability	Poor
Notes	Preheating and post weld heat treatments are required
Carbon equivalency	4,1

Durability

Water (fresh)	Acceptable
Water (salt)	Limited use
Weak acids	Acceptable
Strong acids	Unacceptable
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Limited use
Organic solvents	Excellent
Oxidation at 500C	Acceptable
UV radiation (sunlight)	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	Excellent
Notes	Graphite lubricates, improving resistance.
Flammability	Non-flammable

Corrosion resistance of metals

Stress corrosion cracking	Slightly susceptible
Notes	Rated in chloride; May be susceptible in halide, ammonia, nitrogen, acidic, caustic, carbonate environments

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production (virgin grade)	28,9	-	31,8	MJ/kg
Sources	19.4 MJ/kg (Dhingra, Overly, Davis, 1999); 23 MJ/kg (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007); 29.2 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 32.8 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 34.7 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 35.4 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 37.2 MJ/kg (Sullivan and Gaines, 2010); 38 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 45.4 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 17.4 MJ/kg (Ecoinvent v3.7.1); 21.3 MJ/kg (Ecoinvent v3.7.1)			
Embodied energy, primary production (typical grade)	* 17,5	-	20,5	MJ/kg
CO2 footprint, primary production (virgin grade)	2,16	-	2,38	kg/kg
Sources	0.396 kg/kg (Voet, van der and Oers, van, 2003); 1.81 kg/kg (Voet, van der and Oers, van, 2003); 2.23 kg/kg (Voet, van der and Oers, van, 2003); 2.3 kg/kg (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007); 2.74 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); 1.34 kg/kg (Ecoinvent v3.7.1); 1.61 kg/kg (Ecoinvent v3.7.1)			
CO2 footprint, primary production (typical grade)	* 1,33	-	1,55	kg/kg
Water usage	* 41,8	-	46,2	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Casting energy	* 10,1	-	11,2	MJ/kg
Casting CO2	* 0,757	-	0,837	kg/kg
Casting water	* 19,1	-	28,7	l/kg
Vaporization energy	* 1,09e4	-	1,2e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 815	-	901	kg/kg
Vaporization water	* 4,53e3	-	6,8e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 0,76	-	0,84	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,057	-	0,063	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 3,32	-	3,67	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,249	-	0,275	kg/kg

GRANTA EDUPACK

Grinding energy (per unit wt removed)	* 6,17	- 6,82	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0,463	- 0,511	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

Recycling and end of life

Recycle	✓		
Embodied energy, recycling	* 7,72	- 8,53	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 0,607	- 0,671	kg/kg
Recycle fraction in current supply	49,4	- 54,6	%
Downcycle	✓		
Combust for energy recovery	✗		
Landfill	✓		
Biodegrade	✗		

Notes

Warning

V. brittle. Tensile properties given are for standard test pieces: they fall off significantly as section-width increases. In thick sections, yield stress and elastic limit may be significantly lower than given here. See BS 1452:1990 for more details.

Other notes

BS 1452:1990 doesn't specify composition, but specifies minimum mechanical properties. Hence, composition info. is approximate. Low end of ranges for ductility and fracture toughness are for irons with relatively high phosphorus contents.

Standards with similar compositions

The following information is taken from ASM AlloyFinder 3 - see link to References table for further information.

- GB 9439(88) HT 150 (China)
- AFNOR NFA32101 FGL200A (France)
- AFNOR NFA32101 FGL250A (France)
- DIN WNr 0.6015 (Germany)
- DIN 1691 GG15 (Germany)
- UNI 5007 G15 (Italy)
- NS 722 SjG200 (Norway)
- AS 1830(86) T180 (NSW Australia)
- GOST 1412 SCh18 (Russian Federation)
- SS 140115 115 (Sweden)
- BS 1452 180 (United Kingdom)
- ASME SA278 25 (USA)
- ASTM A278(93) 25 (USA)
- ASTM A278M(93) 175 (USA)
- ASTM A48(94) 25A (USA)
- ASTM A48(94) 25B (USA)
- ASTM A48(94) 25C (USA)
- ASTM A48(94) 25S (USA)

Links

[ProcessUniverse](#)

[Producers](#)

[Reference](#)

[Shape](#)

General information

Designation

Silicon carbide, hot pressed, contains 2% Al₂O₃

Typical uses

Mechanical seal faces, bearings, turbocharger bearings, gas turbine rotors, high temperature devices, laboratory test equipment, hydraulic plungers

Composition overview

Compositional summary

SiC / 2% Al₂O₃

Material family	Ceramic (technical)
Base material	Carbide

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Al ₂ O ₃ (alumina)	2	%
SiC (silicon carbide)	98	%

Price

Price	* 356	-	509	CZK/kg
Price per unit volume	* 1,07e6	-	1,63e6	CZK/m ³

Physical properties

Density	3e3	-	3,2e3	kg/m ³
Porosity (closed)	0			%
Porosity (open)	0	-	0,05	%

Mechanical properties

Young's modulus	429	-	451	GPa
Specific stiffness	136	-	148	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	* 381	-	420	MPa
Tensile strength	* 381	-	420	MPa
Specific strength	* 122	-	137	kN.m/kg
Elongation	* 0,08	-	0,1	% strain
Compressive strength	* 2,29e3	-	2,52e3	MPa
Flexural modulus	* 429	-	451	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 457	-	504	MPa
Shear modulus	* 187	-	196	GPa
Bulk modulus	* 204	-	215	GPa
Poisson's ratio	* 0,13	-	0,17	
Shape factor	15			
Hardness - Vickers	* 684	-	756	HV
Elastic stored energy (springs)	* 165	-	201	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 324	-	378	MPa

Impact & fracture properties

Fracture toughness	* 3	-	3,5	MPa.m ^{0.5}
Toughness (G)	* 0,0205	-	0,0277	kJ/m ²

Thermal properties

Melting point	2,3e3	-	2,5e3	°C
Maximum service temperature	1,32e3	-	1,38e3	°C
Minimum service temperature	-273			°C
Thermal conductivity	90	-	110	W/m.°C
Specific heat capacity	663	-	677	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	2,7	-	2,8	μstrain/°C
Thermal shock resistance	* 312	-	350	°C
Thermal distortion resistance	32,7	-	40,1	MW/m
Latent heat of fusion	* 1,01e3	-	1,14e3	kJ/kg

Electrical properties

Electrical resistivity	* 1e9	-	3,16e10	μohm.cm
Electrical conductivity	* 5,46e-9	-	1,72e-7	%IACS
Dielectric constant (relative permittivity)	* 7	-	9	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	* 0,001	-	0,005	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	* 5	-	10	MV/m

Magnetic properties

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

Optical, aesthetic and acoustic properties

Refractive index	2,66	-	2,7	
Transparency	Opaque			
Acoustic velocity	1,17e4	-	1,22e4	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 2e-5	-	5e-5	

Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	No
-----------------------------------	----

Durability

Water (fresh)	Excellent	
Water (salt)	Excellent	
Weak acids	Excellent	
Strong acids	Excellent	
Weak alkalis	Excellent	
Strong alkalis	Acceptable	
Organic solvents	Excellent	
Oxidation at 500C	Excellent	
UV radiation (sunlight)	Excellent	
Halogens	Limited use	
Metals	Limited use	
Flammability	Non-flammable	
Oxygen index	100	%

Primary production energy, CO₂ and water

Embodied energy, primary production (virgin grade)	114	-	126	MJ/kg
--	-----	---	-----	-------

Sources

120 MJ/kg (Ecoinvent v3.7.1)

GRANTA EDUPACK

Embodied energy, primary production (typical grade)	114	-	126	MJ/kg
CO2 footprint, primary production (virgin grade)	6,75	-	7,47	kg/kg
Sources				
7.11 kg/kg (Ecoinvent v3.7.1)				
CO2 footprint, primary production (typical grade)	6,75	-	7,47	kg/kg
Water usage	33,5	-	101	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Grinding energy (per unit wt removed)	* 148	-	163	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 11,1	-	12,3	kg/kg

Recycling and end of life

Recycle	✘
Downcycle	✔
Combust for energy recovery	✘
Landfill	✔
Biodegrade	✘

Notes

Warning

Attacked by HF and strongly oxidizing acids. Readily attacked by chlorine and fluorine above 1675K. Poisson's ratio varies widely in data sources, from 0.13 to 0.23.

Links

ProcessUniverse
Producers
Reference
Shape

General information

Designation

Silicon carbide, reaction bonded (RF)

Typical uses

Mechanical seal faces, tilting bearing pads, x-ray mirror substrates, combustion cans, flare stack nozzles, pump shaft sleeves, burner nozzles, abrasive discharge nozzles.

Composition overview

Compositional summary

SiC

Material family Ceramic (technical)

Base material Carbide

Microstructure

Grain size: 9-11µm

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

SiC (silicon carbide)	100	%
-----------------------	-----	---

Price

Price	* 356	- 509	CZK/kg
Price per unit volume	* 1,09e6	- 1,59e6	CZK/m ³

Physical properties

Density	3,06e3	- 3,13e3	kg/m ³
Porosity (closed)	* 0	- 0,01	%
Porosity (open)	0		%

Mechanical properties

Young's modulus	400	- 420	GPa
Specific stiffness	129	- 136	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	* 191	- 210	MPa
Tensile strength	* 191	- 210	MPa
Specific strength	* 61,5	- 67,9	kN.m/kg
Elongation	0,05		% strain
Compressive strength	* 1,9e3	- 2,1e3	MPa
Flexural modulus	* 400	- 420	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	381	- 420	MPa
Shear modulus	* 161	- 169	GPa
Bulk modulus	* 256	- 269	GPa
Poisson's ratio	0,23	- 0,24	
Shape factor	15		
Hardness - Vickers	2,86e3	- 3,15e3	HV
Elastic stored energy (springs)	* 44,2	- 53,8	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 162	- 189	MPa

Impact & fracture properties

Fracture toughness	3,8	- 4,2	MPa.m ^{0.5}
--------------------	-----	-------	----------------------

Toughness (G)	0,0352	-	0,043	kJ/m ²
---------------	--------	---	-------	-------------------

Thermal properties

Melting point	2,25e3	-	2,35e3	°C
Maximum service temperature	1,32e3	-	1,38e3	°C
Minimum service temperature	-273			°C
Thermal conductivity	144	-	156	W/m.°C
Specific heat capacity	1,08e3	-	1,12e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	4,2	-	4,3	µstrain/°C
Thermal shock resistance	* 109	-	121	°C
Thermal distortion resistance	33,9	-	36,8	MW/m
Latent heat of fusion	* 1,6e3	-	1,8e3	kJ/kg

Electrical properties

Electrical resistivity	1e9	-	1e10	µohm.cm
Electrical conductivity	1,72e-8	-	1,72e-7	%IACS
Dielectric constant (relative permittivity)	* 7	-	9	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	* 0,001	-	0,005	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	* 5	-	10	MV/m

Magnetic properties

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

Optical, aesthetic and acoustic properties

Refractive index	2,66	-	2,7	
Transparency	Opaque			
Acoustic velocity	1,14e4	-	1,17e4	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 2e-5	-	5e-5	

Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	No			
-----------------------------------	----	--	--	--

Durability

Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Excellent			
Weak acids	Excellent			
Strong acids	Excellent			
Weak alkalis	Excellent			
Strong alkalis	Acceptable			
Organic solvents	Excellent			
Oxidation at 500C	Excellent			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Halogens	Limited use			
Metals	Limited use			
Flammability	Non-flammable			
Oxygen index	100			%

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production (virgin grade)	114	-	126	MJ/kg
--	-----	---	-----	-------

GRANTA EDUPACK

Sources

120 MJ/kg (Ecoinvent v3.7.1)

Embodied energy, primary production (typical grade)	114	-	126	MJ/kg
CO2 footprint, primary production (virgin grade)	6,75	-	7,47	kg/kg

Sources

7.11 kg/kg (Ecoinvent v3.7.1)

CO2 footprint, primary production (typical grade)	6,75	-	7,47	kg/kg
Water usage	33,5	-	101	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Grinding energy (per unit wt removed)	* 123	-	136	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 9,23	-	10,2	kg/kg

Recycling and end of life

Recycle	✘
Downcycle	✔
Combust for energy recovery	✘
Landfill	✔
Biodegrade	✘

Notes

Warning

Attacked by HF and strongly oxidizing acids. Readily attacked by chlorine and fluorine above 1675K. Poisson's ratio varies widely in data sources, from 0.13 to 0.23.

Links

ProcessUniverse
Producers
Reference
Shape