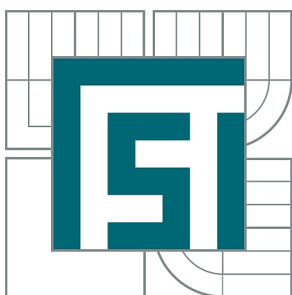




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## MATERIÁLY VE STAVBĚ VÝROBNÍCH STROJŮ

MATERIALS IN THE CONSTRUCTION OF PRODUCTION MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR ŠAFAŘÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ MERENUS

BRNO 2015

student(ka): Petr Šafařík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Materiály ve stavbě výrobních strojů**

v anglickém jazyce:

#### **Materials in the construction of production machines**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je provedení rešerše v oblasti strojírenských materiálů a zhodnocení jejich vlastností. Součástí práce je zhodnocení jejich vlastností a aplikace na přiložené strojní součásti.

Cíle bakalářské práce:

- Historický vývoj strojírenských materiálů
- Základní vlastnosti a rozdělení ocelových materiálů
- Základní vlastnosti a rozdělení litinových materiálů
- Základní vlastnosti a rozdělení neželezných materiálů a kompozitů
- Nejpoužívanější konstrukční materiály ve strojírenství
- Určení materiálu pro danou strojní součást, zhodnocení

Seznam odborné literatury:

Fremunt,P.-Podrábský,T:: Konstrukční oceli. CERM Brno

Dorazil, E. : Kovové materiály. VUT, 1990, Brno

MAREK, J. a kol. Konstrukce CNC obráběcích strojů. MM Speciál. Praha: MM publishing, s.r. o, 2010. 420 s. 2. upravené a doplněné vydání. ISBN: 978-80-254-7980- 3.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Merenus

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 20.11.2014



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan



## **ABSTRAKT**

Cílem této práce je seznámení s materiály používanými ve stavbě výrobních strojů, jejich vlastnostmi, výhodami a nevýhodami. Dále je provedena pevnostní analýza součásti v programu Autodesk Inventor a výběr vhodného materiálu pro danou součást.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Ocel, litina, částicový kompozit, vláknový kompozit, rám.

## **ABSTRACT**

The task of this thesis is to introduce the materials used in the construction of manufacturing machines. Properties of materials are described and also their advantages and disadvantages. The study also contains stress analysis of the components in Autodesk Inventor and selection the appropriate material for a tested component.

## **KEYWORDS**

Steel, cast iron, particle composite, fiber composite, frame.



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠAFAŘÍK, P. *Materiály ve stavbě výrobních strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 41 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Merenus.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Merenuse a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 29. května 2015

.....  
.....

Petr Šafařík



## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat Ing. Ondřeji Merenusovi za rady a poskytnuté podklady. Děkuji mé rodině a blízkým za podporu při studiu. Dále děkuji své přítelkyni Monice Žaludové za podporu a motivaci projevenou při tvorbě této práce.



## OBSAH

1	Úvod .....	10
1.1	Požadavky na materiál výrobních strojů .....	11
2	Kovové materiály.....	12
2.1	Historie zpracování železa.....	12
2.2	Ocel .....	12
2.2.1	oceli obvyklé jakosti.....	13
2.2.2	Uhlíkové oceli .....	13
2.2.3	Slitinové oceli.....	13
2.2.4	Slitinové oceli s velkým obsahem přísad .....	14
2.2.5	Konstrukční nástrojové oceli.....	14
2.3	Oceli na odlitky .....	15
2.3.1	Uhlíkové oceli na odlitky .....	15
2.3.2	Slitinové oceli na odlitky.....	15
2.4	Litina .....	16
2.4.1	Grafitické litiny .....	16
2.5	Srovnání vlastností kovových materiálů ve stavbě nosných soustav .....	18
3	kompozitní materiály .....	19
3.1	Částicové kompozity .....	19
3.1.1	Polymerbeton.....	19
3.1.2	HPC beton .....	20
3.1.3	Srovnání částicových kompozit.....	21
3.2	Vláknové kompozity .....	22
3.2.1	Uhlíková vlákna s epoxidovou pryskyřicí.....	23
3.2.2	Keramické kompozity .....	24
3.2.3	Srovnání vláknových kompozit.....	25
4	Kombinované materiály.....	26
4.1	Hliníková pěna .....	26
4.2	Dem-Tec.....	28
4.3	Hydropol.....	29
4.4	Litinový odlitek a písková výplň.....	30
4.5	Srovnání kombinovaných materiálů.....	30
5	Přírodní materiály .....	31
5.1	Granit (přírodní žula).....	31
6	Pevnostní analýza .....	32
	Závěr.....	36





Použité informační zdroje .....	37
Seznam použitých obrázků.....	40
Seznam použitých tabulek.....	41



# 1 ÚVOD

Zvyšující se požadavky na přesnost výroby a snížení energetické náročnosti strojů nutí výrobce k inovacím konstrukcí nebo použití lepších materiálů. Materiálů, které jsou používány ve stavbě výrobních strojů, je celá škála. Nejstaršími jsou kovové, hlavně tedy litina a ocel. Ty se stále drží na prvních místech díky svým dobrým mechanickým vlastnostem, zažitým způsobům výroby a zpracování a ceně. Další velkou skupinou jsou kompozity. Částicové kompozity jako polymerbeton a cementový beton jsou používány od sedmdesátých let a můžeme se s nimi setkávat stále častěji. Vláknové kompozity, jako uhlíková vlákna a keramika, se používají spíše ojediněle, avšak jejich vzestup můžeme očekávat, protože toho mohou spoustu co nabídnout. Z přírodních materiálů se používá žula. Obrovský potenciál se nachází v kombinovaných materiálech, které obvykle vylepšují vlastnosti kovových materiálů. Jedná se zejména o kombinaci oceli a polymerbetonu nebo ocelových plechů s hliníkovou pěnou, které tvoří sendvičové struktury. S postupným vývojem nekonvenčních materiálů a snižováním jejich ceny můžeme v budoucnu počítat s jejich stále běžnějším nasazením u výrobních strojů.

Tato práce se dále zabývá pevnostní analýzou strojních součástí v programu Autodesk Inventor a následným výběrem vhodného materiálu pro danou strojní součást.

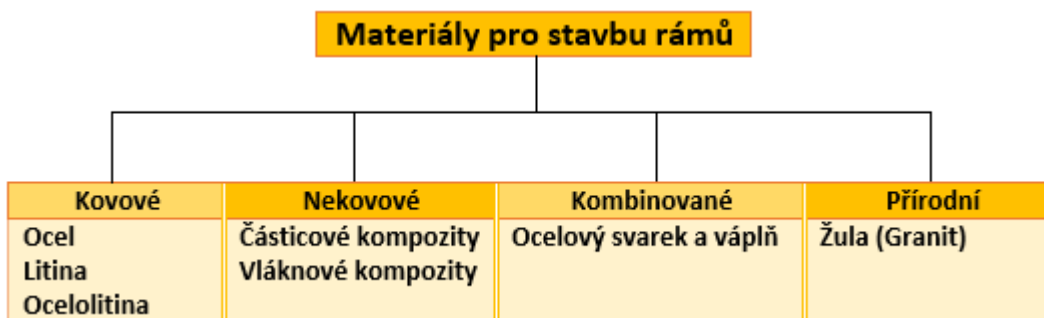


## 1.1 POŽADAVKY NA MATERIÁL VÝROBNÍCH STROJŮ

Vysoké požadavky na přesnost stroje souvisí především s rámem stroje, neboť se jím přenáší veškeré zatížení, vibrace a tepelné deformace. Největší požadavky jsou tedy kladeny na rámy obráběcích strojů. Jsou to zejména tyto požadavky:

- vysoká pevnost
- nízká měrná hmotnost
- vysoké tlumení
- nízká teplotní roztažnost
- nízká teplotní vodivost
- nízká cena

Nejčastěji používané materiály jsou odlitky z litiny a svařence z oceli z důvodů dobrých materiálových vlastností a dlouholetých zkušeností. Do popředí se však začínají dostávat nekonvenční materiály, které mohou nabídnout řadu lepších vlastností. Na obrázku č. 1 je přehled materiálů používaných pro stavbu rámu. [1]



Obrázek 1: Typy materiálů pro stavbu rámu [1]



## 2 KOVOVÉ MATERIÁLY

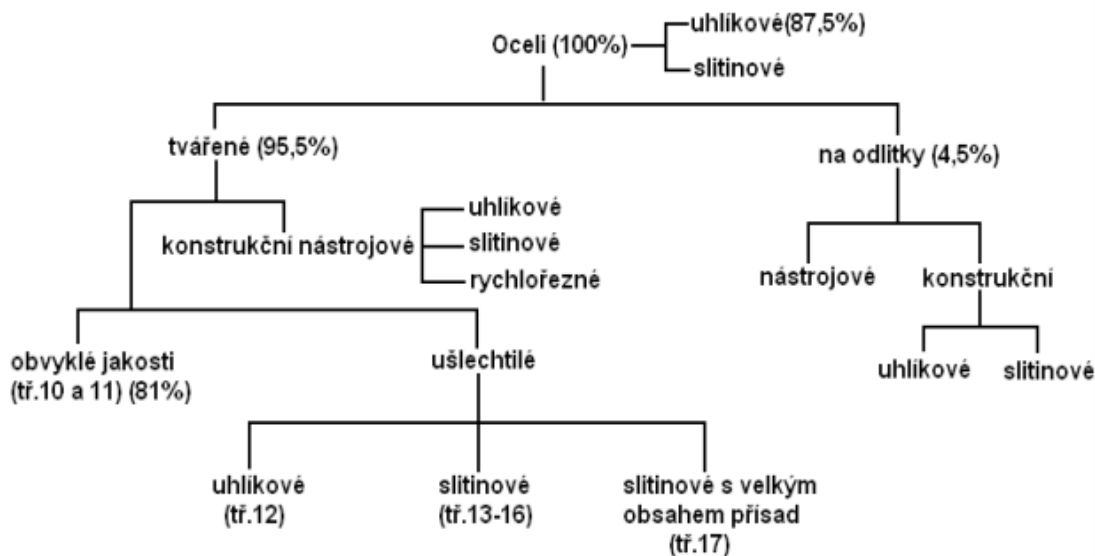
### 2.1 HISTORIE ZPRACOVÁNÍ ŽELEZA

Železo bylo známo již 5000 let př. n. l., avšak člověk nebyl schopen vyvinout teplotu nutnou k roztavení železných rud. Železo začalo vytlačovat bronz 1200 let př. n. l., a to díky vyšší tvrdosti a spoustě nalezišť železných rud. První ocelí byla tzv. svářková ocel, která vznikla tavením železných rud pomocí dřevěného uhlí. Tato ocel byla pórovitá, obsahovala pouhých 0,004 – 0,006 % C, ale byla kujná. Rozmach ve výrobě oceli nastal v období průmyslové revoluce, konkrétně v roce 1855, kdy si nechal Henry Bassemmer patentovat svůj konvertor s kyselou vyzdívkou. Ten ovšem nedokázal odloučit ze železa fosfor a síru. To změnil roku 1878 Gilchrist Thomas konvertorem se zásaditou vyzdívkou. Siemens-Martinské pece, které používaly uzavřenou nístěj a předeheřev topného plynu a vzduchu, se objevily v roce 1864 a na přední pozici ve výrobě oceli se udržely téměř 100 let. Tomu vděčí především schopností dosáhnout vyšších teplot a možností recyklace ocelového odpadu. Roku 1902 se objevily první elektrické obloukové a indukční pece. V dnešní době se používají kyslíkové konvertory s horním vřáněním kyslíku tryskou. [2]

Litina se v Číně objevila už ve 4. století př. n. l., avšak v Evropě byla použita až ve 14. století n. l. a to především ve zbrojním průmyslu. V polovině 19. století se začala litina hojně objevovat v konstrukci strojů, čerpadel, lisů či stojanů. [3]

### 2.2 OCEL

Ocel je slitina železa, uhlíku a dalších přísadových prvků, kde obsah uhlíku nepřesahuje 2,14 %. Je to nejpoužívanější materiál ve strojírenství a její světová produkce v roce 2012 dosáhla rekordní hodnoty 1 548 milionů tun ročně. Ocel je dodávána ve formě mnoha polotovarů jako např. profily (L, T, I, H, U), trubky (kruhové, čtvercové, obdélníkové), tyče (kruhové, ploché, šestihranné, čtvercové), plechy a jiné. Existuje celá škála ocelí, ze kterých můžeme vybírat podle konkrétních požadavků na materiál. Důležitými kritérii při výběru jsou mechanické vlastnosti, chemické složení, pracovní prostředí a cena. [4, 5]



Obrázek 2: Rozdělení oceli [27]



### 2.2.1 OCELI OBVYKLÉ JAKOSTI

Oceli třídy 10 jsou nelegované oceli tvářené, u kterých není zaručeno chemické složení, ale většinou se omezuje maximální obsah fosforu (do 0,09 %) a síry (do 0,06 %). Obsah mědi bývá omezen na 0,3 % kvůli zhoršování svařitelnosti a tváritelnosti. Oceli třídy 10 se používají především na výztuže do betonu nebo kolejnice. Nejsou vhodné pro použití při teplotách pod  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , protože klesá jejich vrubová houževnatost. [6]

Oceli třídy 11 jsou oceli tvářené, obvyklé jakosti. Jsou to nejběžněji používané oceli s obsahem uhlíku do 0,65 %. Zaručuje se u nich minimální pevnost v tahu, mez kluzu a tažnost. Do této skupiny patří oceli na zvláštní použití:

- oceli automatové
- se zvýšenou mezí kluzu
- na hluboké tažení
- žárovevné
- pro nízké teploty
- se sníženým sklonem ke stárnutí

Pro méně zatěžované strojní součásti, jako jsou hřídele, malá ozubená kola, čepy nebo svařované konstrukce, se používají oceli s pevností do 420 MPa (11 373, 11 423). Oceli se zvýšenou mezí kluzu, také označovány jako jemnozrné, (11 483, 11 523, 11 583) se používají na svařované konstrukce, rámy obráběcích strojů, tlakové nádoby a jiné. Pro více namáhané součásti jako např. řetězová kola, pístnice, pera, kolíky, ozubené hřebeny, tělesa fréz, spojky a další se používají oceli s vyšší pevností (11 600, 11 700, 11 800). [7]

Automatové oceli mají vyšší obsah síry nebo fosforu a nízký obsah tvrdých oxidových vměstků. Jsou dobře obrobitelné a mají drobnou třísku. Na výrobních automatech se z automatových ocelí vyrábí šrouby, matice, kolíky a jiné. [8]

### 2.2.2 UHLÍKOVÉ OCELI

Oceli třídy 12 jsou ušlechtilé nelegované a mají zaručeno chemické složení. Obsah uhlíku se pohybuje v rozmezí od 0,07 do 0,9 %. Uhlíkové oceli jsou vhodné pro cementování i zušlechťování. Oceli pro cementování (12 010, 12 020, 12 023, 12 024) mají obsah uhlíku 0,07 – 0,2 % a používají se na vačkové hřídele, řetězová kola, vložky, vodítka, pouzdra apod. [9]

Oceli pro zušlechťování (např. 12 040, 12 050, 12 060, 12 071, 12 081), které mají obsah uhlíku 0,25 – 0,75 %, se nejčastěji používají na ozubené věnce, vřetena, čepy, lamely, spojky, pojistné kroužky, pera, vodící kameny a pružiny. [9]

### 2.2.3 SLITINOVÉ OCELI

Oceli třídy 13 jsou legovány manganem (do 1,8 %) a křemíkem (do 2 %) s obsahem uhlíku od 0,12 do 0,46 %. Do 0,2 % C mají zaručenou svařitelnost. Nejsou vhodné k cementování kvůli vyššímu obsahu Si, hodí se však i na zušlechťování. Zvláštní skupinou ocelí třídy 13 jsou pružinové oceli o obsahu uhlíku 0,6 - 0,8 %. Mají vysokou pružnost, houževnatost, mez únavy a používají se k výrobě velmi namáhaných pružin. Dále jsou významné křemíkové oceli, které se používají na výrobu plechů transformátorů a dynam. [8]



Oceli třídy 14 jsou legovány chromem (do 2 %), dále manganem, křemíkem a hliníkem. Jsou vhodné k cementování, nitrídování či zušlechťování. Pomocí zušlechťování mohou dosáhnout pevnosti 1100 - 1800 MPa. Patří mezi nejpoužívanější slitinové oceli a díky svým vlastnostem a poměrně nízké ceně někdy nahrazují dražší chromniklové oceli (třída 16). Používají se na výrobu ložisek, valivých tělísek, ozubených soukolí, hřídelí, čepů a jiných. [6, 10]

Oceli třídy 15 kombinují přísadu chromu (do 2,5 %) s vanadem (do 0,2 %), nebo s molybdenem (do 0,2 %). Oceli Cr-Mo jsou oproti Cr-V oceli houževnatější, mají však menší pevnost. Používají se na středně a vysoce namáhané hřídele, ojnice, listové pružiny, tlakové nádoby nebo výkrovky. [6, 11]

Oceli třídy 16 používají jako hlavní přísadu nikl (1,5 - 5,2 %) v kombinaci s chromem (do 2 %), vanadem (do 0,25 %), wolframem (do 1,2 %) a molybdenem (do 0,8 %). Jsou vhodné pro součásti pracující za minusových teplot. Jsou vhodné k cementování, kalení, zušlechťování a používají se na vysoce namáhané strojní součásti s houževnatým jádrem a oteruvzdorným povrchem, jako např. drážkové, kardanové nebo vysoce namáhané hřídele, ozubená soukolí, pístní čepy, kladky, velké výkrovky atd. [6, 12]

#### 2.2.4 SLITINOVÉ OCELI S VELKÝM OBSAHEM PŘÍŠAD

Do této kategorie patří oceli třídy 17 obsahující velké procento legur. Je to zejména chrom, jehož obsah je vyšší než 8 %. Tyto oceli jsou rozděleny na oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárovevné. [6]

Korozivzdorné oceli obsahují 12 - 20 % Cr; 0,12 - 0,5 % C; 2 - 14 % Ni (u oceli 17 252 obsah Ni 36 - 40 %) a jako další přísadové prvky se používá Mn a Mo. Díky své schopnosti odolávat korozi či řadě kyselin se používají v potravinářském, chemickém nebo farmaceutickém průmyslu. [6]

Žáruvzdorné oceli jsou schopny odolávat korozi za zvýšených teplot (600 až 1200 °C). Obsah Cr se pohybuje v rozsahu 16 - 27 %. Používají se u součástí pracujících za vysokých teplot, avšak méně mechanicky zatížených. [6]

Žárovevné oceli legované chromem (10 - 12 %) s obsahem uhlíku do 0,25 % jsou schopny pracovat za teplot do 625 °C, mají vyšší vnitřní tlumení a díky přísadě niobu jsou odolnější proti tečení. Další žárovevné oceli jsou na bázi Cr-Ni, Cr-Mo, pracují za teplot do 750 °C. Oceli s přísadou niklu pracují až do 900 °C. Žárovevné oceli se používají na vysoce namáhané součásti pracující při vysokých teplotách, jako třeba oběžná kola a lopatky parních turbín, parovodní potrubí a jiné. [6]

#### 2.2.5 KONSTRUKČNÍ NÁSTROJOVÉ OCELI

Nástrojové oceli uhlíkové jsou vhodné především na ruční nástroje, jako jsou nůžky, nože, pilníky, dřevoobráběcí nástroje, přípravky, kalibry atd. [13]

Nástrojové oceli slitinové jsou používány při nižších rezných rychlostech. Jsou legovány kombinací vanadu, wolframu, chromu, molybdenu, křemíku, manganu nebo niklu. Vyrábí se z nich např. pilové pásy, frézy, vrtáky, soustružnické nože, formy pro plasty a tlakové lití, měřidla atd. [13]



Nástrojové oceli rychlořezné jsou schopny pracovat za vysokých řezných rychlostí a teplot. Nemají sklon k samovolnému popouštění a následnému rychlému otupení, které je způsobeno zahřátím nástroje řezným procesem a jeho postupným chladnutím. Jsou legovány wolframem, vanadem, chromem a někdy i kobaltem. [6, 13]

## 2.3 OCELI NA ODLITKY

Oceli na odlitky mají i při stejném chemickém složení rozdílné vlastnosti než oceli tvářené. Je to dáno rozdílným zpracováním. Oceli tvářené mají jemnější strukturu díky intenzivnímu tváření za tepla. U ocelí na odlitky zůstává hrubší lící struktura, kterou ovlivňuje rychlost chladnutí, tloušťka stěny a lící teplota. Chladnutí (často různých průřezů) způsobuje smršťování odlitku a vznik vnitřních pnutí. Důsledkem toho mají oceli na odlitky horší mechanické vlastnosti než tvářené oceli podobného složení. Tyto nedostatky musí být odstraněny patřičným tepelným zpracováním. Nejčastěji se provádí žihání ke snížení vnitřních pnutí nebo normalizační žihání. [6]

Oceli na odlitky se používají pro tvorbu tvarově složitých součástí, u kterých se požadují lepší mechanické vlastnosti než může nabídnout litina. Řada z nich má zaručenou svařitelnost, a tak může být konečná podoba součásti rozdělena na několik jednodušších odlitků, které se k sobě svaří. [6]

### 2.3.1 UHLÍKOVÉ OCELI NA ODLITKY

Tvoří 60 % z celkového množství vyráběné oceli na odlitky. Obsahují 0,1 – 0,6 % C; 0,2 – 0,5 % Si a 0,4 – 0,8 % Mn. Největší vliv na vlastnosti uhlíkových ocelí na odlitky má obsah uhlíku. S rostoucím obsahem dosahuje vyšší meze pevnosti, avšak snižuje se plasticita a houževnatost. Do 0,25 % C lze odlitky bez problémů svařovat a mohou pracovat za teplot od -40 až do 400 °C. U odlitků s vyšším obsahem C je při svařování nutný předehřev odlitků na přibližně 250 °C. [8]

### 2.3.2 SLITINOVÉ OCELI NA ODLITKY

Používají se tam, kde po pevnostní stránce nevyhovují uhlíkové oceli na odlitky. Jako legury jsou použity Mn, Cr, Mo, Ni a V, podobně jako u tvářených ocelí. Odlitky je nutno zušlechťovat a po zušlechťování dosahují pevnosti v tahu 600 – 1300 MPa. Stejně jako oceli tvářené jsou i slitinové oceli na odlitky vhodné pro speciální použití:

- pro práci za nízkých teplot
- otěruvzdorné
- korozivzdorné
- žáruvzdorné
- žárovevné [8]



Tabulka 1: Mechanické vlastnosti uhlíkových ocelí na odlitky [38]

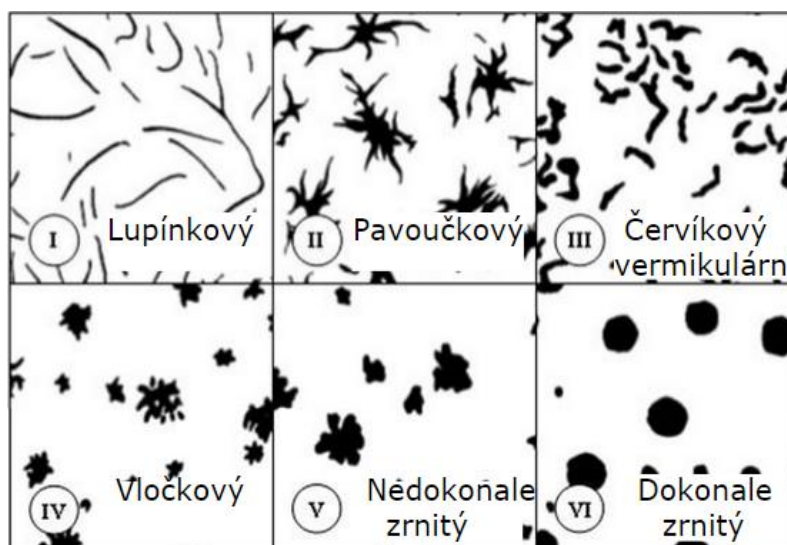
Vlastnosti	Uhlíkové oceli na odlitky	
	Feriticko-perlitická (42 2643)	Manganová (42 2660)
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	7850	7830
Modul pružnosti [GPa]	210,4	199
Mez kluzu [MPa]	230	300
Pevnost v tahu [MPa]	450-600	590-740
Tvrdość HB [-]	130-170	170-210
Součinitel teplotní roztažnosti [ $\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$ ]	11,2	11,2
Tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	39,8	41

## 2.4 LITINA

Litina je slitina železa, uhlíku o obsahu od 2,14 do 6,63 % a dalších prvků (Si, Mn, S, P). Podle chemického složení a rychlosti ochlazování vznikají buď grafitické litiny, nebo bílá litina. [6]

### 2.4.1 GRAFITICKÉ LITINY

Uhlík je zde vyloučen ve formě grafitu v podobě lupínkovité, pavoučkové, červíkovité, vločkovité a nedokonale, nebo pravidelně zrnité. Velikost a tvar grafitu má značný vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Mezi běžně používané grafitické litiny patří šedá, tvárná a temperovaná litina. [6]



Obrázek 3: Tvar grafitu v litině [6]

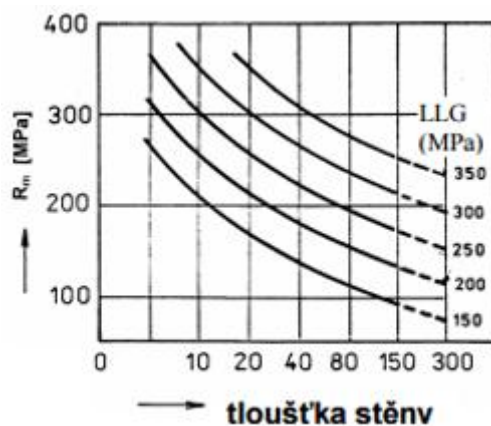
### ŠEDÁ LITINA

Šedá litina obsahuje grafit ve formě lupínků. Je levná a má dobrou slévatelnost. Chemické složení se neudává a volí se tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností. Dalším faktorem ovlivňujícím vlastnosti je rychlost chladnutí a tloušťka stěn. Součásti s tenčí stěnou dosahují vyšší pevnosti než součásti s tlustší stěnou. Tato závislost je znázorněna na obr. č. 3. S rostoucí pevností roste také modul pružnosti, který se pohybuje v rozmezí 80 – 140 GPa. Pevnost v tahu se pohybuje od 100 do 350 MPa a pevnost v tlaku je až čtyřikrát vyšší než





pevnost v tahu. Proto je důležité navrhovat kritické průřezy tak, aby na ně působilo tlakové namáhání. Litiny s lupínkovým grafitem se vyznačují malou vrubovou citlivostí a mají vysokou mez únavy. Používá se na odlitky o tloušťce 4 – 150 mm, jako jsou stojany obráběcích strojů, součásti motorů, převodovek, kompresorů, víka, ozubená kola a jiné. [6, 14]



Obrázek 4: Závislost pevnosti na tloušťce stěny odlitku [14]

### TVÁRNÁ LITINA

V tvárné litině je grafit vyloučen ve formě kulovitých zrn (častěji však nedokonalá zrna). Chemické složení se pohybuje v rozmezí 3,2 – 4 % C; 1,8 – 3 % Si; 0,2 – 0,8 % Mn; max. 0,1 % P; max. 0,05 % S; 0,04 – 0,08 % Mg. Tvárná litina s vyšším obsahem Mn vykazuje vyšší pevnost. S obsahem Mn pod 0,4 % a vyšším obsahem Si dosahuje lepší plasticity, houževnatosti a obrobitelnosti. Oproti šedé litině má lepší mechanické vlastnosti a houževnatost, naopak šedá litina má lepší slévatelnost, vyšší tlumení a menší vrubovou citlivost. Používají se na dynamicky a otěrem namáhané odlitky o tloušťce 5 – 100 mm (např. klikové a vačkové hřídele, vodící a kluzné lišty, rozváděcí kola čerpadel, ozubená kola, válce, písty a jiné). [6, 14]

### TEMPEROVANÁ LITINA

Temperovaná litina se vyrábí temperováním bílé litiny. Jedná se o tepelné zpracování, při kterém dochází ke grafitizaci cementitu. Grafit je vyloučen ve vločkovité formě. Temperováním vzniká:

- temperovaná litina s bílým lomem
- temperovaná litina s černým lomem
- temperovaná litina perlitická

U obráběcích strojů se můžeme setkat hlavně s temperovanou litinou s černým lomem. Avšak z důvodů složitosti výroby se v poslední době ustupuje od výroby temperované litiny a je postupně nahrazována litinou tvárnou (s kuličkovým grafitem). [14]



Tabulka 2: Mechanické vlastnosti grafitických litin [38]

Vlastnosti	Feritická tvárná (42 2303)	Šedá s lupínkovým grafitem (42 2415)	Temperovaná s černým lomem (42 2532)
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	7010	7030	7300
Modul pružnosti [GPa]	169	97,3	-
Mez kluzu [MPa]	230	-	170
Pevnost v tahu [MPa]	370	150	320
Pevnost v ohybu [MPa]	-	320	-
Tvrдость HB [-]	140-180	200	180
Součinitel teplotní roztažnosti [ $\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$ ]	13,1	12,3	10
Tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	32,2	49,4	63,2
Měrná tepelná kapacita [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	0,473	0,473	0,51

## 2.5 SROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ VE STAVBĚ NOSNÝCH SOUSTAV

Nejstarším řešením nosných soustav jsou odlitky z litiny. Toto řešení je výhodné zejména pro větší série. Litiny mají oproti oceli nižší hmotnost přibližně o 8 %, větší tlumení, lepší obrobiteľnosť a třecí vlastnosti. Avšak nižší modul pružnosti znamená potřebu silnějších stěn odlitku, což vede k vyšší hmotnosti a materiálovým nákladům. Další nevýhody jsou spojeny s nutností tvorby modelu a dodržováním konstrukčních zásad odlitků. Nemožnost odlití zcela uzavřených profilů namáhaných na krut musí být kompenzována hustším žebrováním. V odlitcích vzniká pnutí, které musí být odstraněno žíháním.

Svařované rámy z oceli třídy 11 nemají při výrobě žádné tvarové omezení. Mohou být použity normalizované polotovary s různými tloušťkami spojovaných součástí. Při této metodě dochází ke značné úspoře materiálu, což vede ke snížení hmotnosti. S časovou náročností výroby svařovaného rámu se pojí vyšší cena oproti odlitku (pokud nepočítáme náklady spojené s modelem), a proto se používají hlavně pro kusovou výrobu nebo malé série. Nevýhodou je, že při svařování vzniká vnitřní pnutí, které je nutno odstranit. Další nevýhodou je, že nelze použít základní materiál pro vodící plochy a ty musí být následně přišroubovány. Ocel na odlitky se používá na nosné soustavy jen zřídka. [1, 23]



Obrázek 5: Odlitek stojanu horizontálního frézovacího centra z tvárné litiny [23]



Obrázek 6: Svařovaný rám portálového stroje firmy Benazzato S. r. l. [21]



## 3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Za kompozit je považován takový materiál, který se skládá ze dvou nebo více fází, přičemž jedna fáze je spojitá (matrice) a druhá je nespojitá, obvykle s lepšími mechanickými vlastnostmi (výztuž). Jednotlivé fáze si ponechávají své vlastnosti a je možné jednoznačně rozlišit rozhraní mezi jednotlivými fázemi, čímž se odlišují od slitin. Výsledné vlastnosti kompozit vyzdvihují pozitiva a potlačují negativa jednotlivých složek a nejsou dosažitelné jednotlivými složkami samostatně nebo pouhým sečtením jejich vlastností. Tento jev se nazývá synergetický účinek. Kompozity se dělí:

- podle matrice – kovové, polymerní, minerální, keramické, silikátové, skleněné
- podle výztuže – kovové, polymerní, minerální, uhlíkové, keramické, skleněné
- podle tvaru a velikosti výztuže – částicové, vláknové [15]

### 3.1 ČÁSTICOVÉ KOMPOZITY

V částicových kompozitech je výztuž tvořena různě orientovanými avšak rovnoměrně rozptýlenými částicemi, které jsou větší než 1  $\mu\text{m}$ . Jako výztuže je používáno anorganických nerostů, kovových a keramických částic, nebo syntetických dutých či plných kuliček z kovů, skla, plastů a uhlíku. Tvar částic může být kulový, krychlový, destičkový, tyčinkový nebo nepravidelný.

Výsledné mechanické vlastnosti jsou závislé především na velikosti, tvaru, materiálu a objemovém podílu výztuže v matrici. Při použití dvou různých velikostí částic se pórovitost snížila z 26 % na 14,5 % a při použití tří druhů velikostí se zmenšila na 6,5 %. Matrice částicových kompozit bývá polymerní (nejčastěji epoxidové pryskyřice), kovová, nebo keramická.

Důležitou podmínkou při tvorbě částicových kompozit je dodržet minimální rozdíl teplotní roztažnosti všech fází, rozdíl by neměl být větší než  $4 \cdot \text{K}^{-1} \cdot 10^{-6}$ . Je to důležité kvůli eliminaci vnitřních pnutí v materiálu při zvýšení teploty.

Mezi běžné představitele částicových kompozit patří brusné materiály, slinuté karbidy, betony a další. [16]

#### 3.1.1 POLYMERBETON

Polymerbeton je také nazýván jako minerální litina a ve stavbě výrobních strojů se začal hojněji využívat od roku 1979. Je tvořen směsí umělé keramiky nebo přírodního štěrku (např. čedič, pazourek, basalt, granit, gabro, diorit, diabas a jiné hlubinné nerosty) o zrnitosti částic 0,2 – 42 mm a syntetickým pojivem na bázi epoxidové, metakrylátové nebo polyesterové pryskyřice. Polymerbeton se využívá na výrobu rámců, loží, výjimečně příčniců obráběcích strojů nebo jako výplň tenkostěnných ocelových konstrukcí rámců kvůli zlepšení vlastností. Výroba součástí probíhá odlitím do dřevěných nebo kovových forem. Součásti mohou být vyztuženy armováním a mohou do nich být zalaty rozvody elektroniky, hydrauliky a také vodící či připojovací plochy nebo závitové otvory. [17]

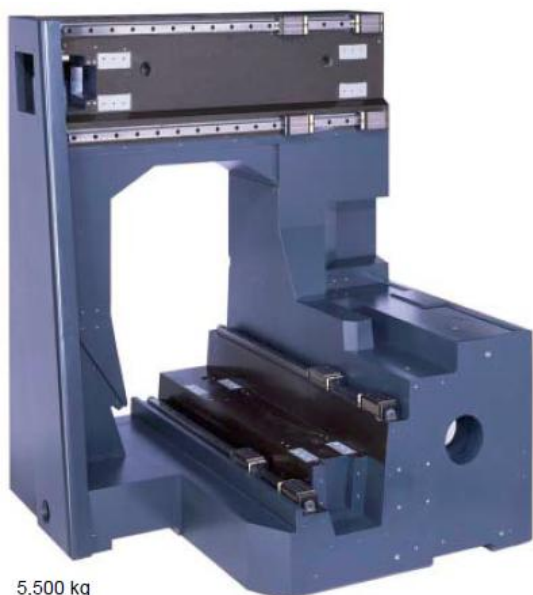
Výhody polymerbetonu jsou vysoká pevnost v tlaku, vysoké tlumící vlastnosti (až 30x větší než u litiny a 40x větší než u oceli), malá tepelná vodivost, chemická stálost, jednoduchost výrobní technologie, odolnost vůči chemikáliím. Mezi nevýhody polymerbetonu patří nutnost výroby formy a s tím spojeny vyšší náklady, nutnost broušení pracovních ploch a zalitých



vodících lišt, malá možnost provádět změny na hotovém dílu. Výroba dílů z polymerbetonu se vyplatí spíše při větším počtu vyráběných kusů. Při výrobě více než 40 strojů ročně klesnou náklady o 30 % vůči strojům vyrobeným z konvenčních materiálů a to hlavně díky možnosti opakovaně použít formu (kovová forma až 1000 odlití). [18, 19]

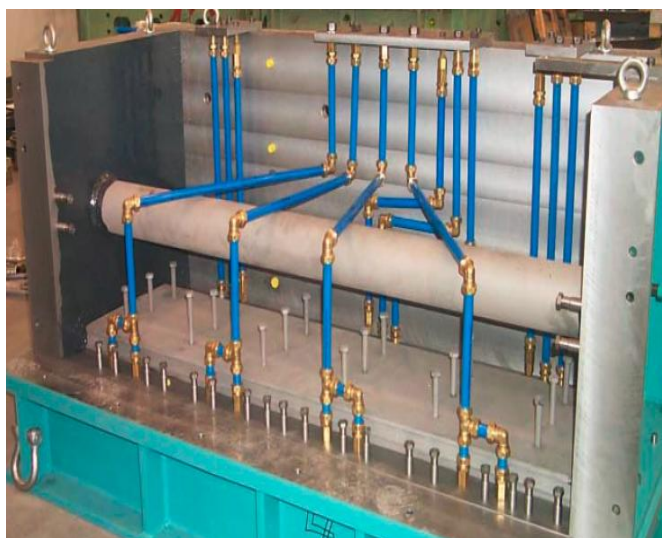
Na výrobu strojů z polymerbetonu se specializují především německé firmy jako např.: Schaudt, Mikrosa, Hermle, Schneeberger, Epucret Mineralgusstechnik a další. [17]

Speciálním případem polymerbetonu je tzv. Celith nebo také umělá žula. Jako výztuž využívá jemné částice dioritu a hrubější částice rozemleté modré žuly, to vše je spojeno epoxidovou pryskyřicí s tužidlem. Oproti přírodní žule lze Celith tvarovat, odlévat, vyztužovat armováním či do něj zalévat energetické, hydraulické rozvody nebo přípojovací prvky stejně jako je tomu u polymerbetonu. Celith se nejčastěji používá k výrobě nosných soustav obráběcích či měřících strojů, může být také využit k vylití tenkostěnné svařované konstrukce a tím zvýšit tlumení vibrací, snížit hlučnost a díky vysoké tuhosti a dobré přilnavosti k ocelovým plochám lze použít tenčí stěny plechů či profilů bez nutnosti žebrovaní svařence. [20]



5,500 kg

Obrázek 7: Polymerbetonový rám HSM stroje firmy MIKRON [23]



Obrázek 8: Forma polymerbetonového odlitku [23]

### 3.1.2 HPC BETON

HPC beton (High performance concrete) je nazýván vysokopevnostním nebo také vysokovýkonnostním betonem. O první nasazení betonů se zasloužil profesor Schlesinger, který v průběhu 1. světové války použil beton při stavbě velkých karuselových soustruhů. V průběhu 2. světové války došlo k četnějšímu používání betonu z důvodu nedostatku klasických kovových materiálů. Návrat k používání betonu ve stavbě rámců NC-strojů nastal kolem roku 1970. [17]

HPC beton je směs písku, šterku, cementu, přísad proti smršťování a vody. Na rozdíl od normálního betonu je hustější a pevnější díky přidavku mikrosilikátu. Dalším rozdílem je dodatečné tepelné zpracování a přesně řízené ochlazování, to má za následek umělé stárnutí a téměř úplné odstranění přirozeného smršťování. Používá se k výrobě nosných dílů nebo jako





výplň ocelových svařenců z důvodů zlepšení statických a dynamických vlastností. Kvůli své vysoké hmotnosti se nehodí pro pohyblivé části obráběcích strojů. [1]

Hlavní přednosti jsou vysoká pevnost v tlaku, malá tepelná vodivost (nemění se přesnost obrábění), vysoká schopnost tlumení, možnost zalít do komponentů elektrické, hydraulické rozvody nebo vodící a připojovací prvky, možnost zlepšení pevnosti v tahu armováním a vytvořit tak předepjatý beton namáhaný pouze tlakem i při vnějším tahovém zatížení. Nevýhodou HPC betonu je malá pevnost v tahu a ohybu u nearmovaných komponentů, náchylnost na působení chemikálií (oleje, chladicí kapaliny, zejména kyseliny v nich obsažené) a náchylnost vůči klimatickým změnám (především vlhkosti vzduchu). [18, 19]



Obrázek 10: Detail broušené plochy a vlepěných závitových pouzder pro lineární vedení [21]



Obrázek 9: Lože karuselu z HPC betonu firmy Toshulin [1]

### 3.1.3 SROVNÁNÍ ČÁSTICOVÝCH KOMPOZIT

Částicové kompozity jsou využívány především na nepohyblivé součásti, jako jsou lože stojany a rámy obráběcích strojů. Disponují řadou lepších vlastností oproti konvenčním materiálům, jako např.: lepší tlumení, nízká tepelná vodivost, nižší materiálové náklady, ekologičnost. Dílce lze vyrábět za pokojových teplot (nižší energetická náročnost), nejvyšší teplota je 45-50 °C při exotermické reakci. Díky nízké výrobní teplotě mohou být do součástí integrovány čidla a akční členy a vytvořit tak inteligentní materiály

Hlavní nevýhoda je náročný postup výroby, který je rozdílný než při odlévání litiny. To zahrnuje rozdílnou tvorbu předlitých otvorů pomocí speciálních dílů nebo ztracených jader (dřevěné kvádry, plastové trubky, pěnové hmoty opatřeny speciální fólií), nutnost zalití připojovacích prvků či vodících lišt a také zakomponování prvků pro přepravu a manipulaci (oka pro lana nebo ve spodní části zalité U-profilu s roztečí na vysokozdvizný vozík). Další nevýhody částicových kompozitů jsou malá pevnost v tahu a ohybu (dá se zlepšit armováním), kvůli nízké tepelné vodivosti může docházet k lokálnímu přehřívání tepelně zatížených míst (u motoru, vřeteníku, zásobníku třísek, kuličkového šroubu), a to musí být bráno v úvahu při samotném návrhu, kdy je tomu možné předejít oddálením tepelných zdrojů, vytvořením tepelně symetrické konstrukce, zabudovat chladicí okruhy nebo zlepšit vodivost kovovým plnivem.



Polymerbeton oproti HPC betonu nereaguje na vlhkost změnou rozměrů, má dobrou odolnost vůči chemikáliím a olejům. U HPC betonu se dá zvýšit chemická odolnost speciálními nátěry. HPC beton se neosvědčil jako materiál, u kterého lze dosáhnout vysoké geometrické přesnosti a tak musí být přípojovací a jiné přesné plochy (pro vodící lišty, odměřovací pravítka, lineární pohony) následně obrobeny. U polymerbetonu lze odlít přesné plochy i se zabudovanými měrkami s přesností několika tisícín mm, čímž odpadá nákladné obrábění podkladových ploch nebo zalitých vodících lišt. Polymerní betony nacházejí daleko větší uplatnění ve stavbě nosných soustav než cementové betony. Většina strojů pro HSC (vysokorychlostní) obrábění má stojany z polymerbetonu a jeho nasazení nezůstalo jen u obráběcích strojů. V dnešní době se můžeme setkat s polymerbetonem také u měřicích, elektrojiskrových, laserových, lapovacích či leštících strojů. Častou aplikací částicových kompozitů je také vylévání svařenců či odlitků kvůli zlepšení tlumících a tuhostních vlastností. [1, 17, 19]

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti částicových kompozit [1, 20]

Vlastnosti	Polymerbeton	HPC beton	Celith
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2300-2500	2200-2500	2300-2500
Poissonova konstanta [-]	0,25-0,3	0,2-0,3	-
Modul pružnosti [GPa]	30-44	50-60	30-40
Pevnost v tlaku [MPa]	140-160	100-200	120-150
Pevnost v tahu [MPa]	10-40	8-10	10-15
Pevnost v ohybu [MPa]	15-50	3-8	-
Dekrement útlumu [-]	0,02-0,03	0,02-0,03	-
Součinitel teplotní roztažnosti [ $\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$ ]	9-18	10,6	9-13
Tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	1-3	1,7	1-3
Měrná tepelná kapacita [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	0.7-1,3	0,9	-

### 3.2 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY

Za první uměle vytvořený vláknový kompozit jsou považovány hliněné cihly vyztužené slámou, které byly použity 800 let př. n. l. na území Izraele a dosahovaly pevnosti v tlaku 7 MPa. Vláknové kompozity jsou tvořeny vlákny o průměru jednotek až stovek mikrometrů, spojenými maticí. Vlákna mají několikanásobně vyšší mechanické vlastnosti než matrice a je jimi přenášeno téměř veškeré zatížení. Mohou být krátkovláknové, kde poměr délky ku průměru vlákna je menší než sto, nebo dlouhovláknové. Dlouhovláknové mají poměr délky ku průměru větší než sto a obvykle je délka vláken rovna délce součásti. Nejpoužívanějšími vlákny jsou uhlíková, skleněná, keramická, kovová, aramidová, polymerní a whiskery. Vlákna jsou dodávána v několika typech polotovarů:

- příze – spředené prameny vláken zpevněné zákruty (0 - 400 zákrutů na 1m)
- pramenec (roving) – rovnoběžné prameny bez zákrutů
- rohože – neuspořádaná vlákna spojena pomocí polymerního pojiva, které se rozpustí v pryskyřicích
- jednosměrné tkaniny – spletené plátno s větším počtem vláken v podélném směru (tzv. osnově) a menším počtem vláken v příčném směru (tzv. útku), průměr vláken v osnově bývá obvykle větší než průměr vláken v útku



- prostorové tkaniny – prostorově uspořádaná vlákna do tří a více směrů spojena pomocí polymerních pojiv rozpustných v pryskyřicích
- pleteniny – spletení vláken do očkovitého tvaru
- prepregy – polymerem (matricí) naimpregnované rohože, tkaniny, rovingové pásy, které se po vytvarování součásti vytvrdí za působení tepla a vakua bez nutnosti přidání pojiva

Matrice má za úkol spojovat jednotlivá vlákna, přenášet do nich napětí a chránit je před oxidací a klimatickými vlivy. Matrice mohou být polymerní (zejména epoxidové), kovové, keramické nebo silikátové.

Hlavní výhody vláknových kompozit jsou vysoká pevnost, tuhost, nízká hmotnost, nízká teplotní roztažnost, odolnost vůči vysokým teplotám a chemikáliím, teplotní a elektrická vodivost. Nevýhody jsou především vysoká cena vláken, náročná a nákladná výroba. Proto se s jejich vývojem začalo hlavně v leteckém a kosmickém průmyslu. Ve stavbě výrobních strojů se vláknové kompozity používají především na pohyblivé součásti, jako jsou vřetena, saně a stoly obráběcích strojů nebo ramena robotů a manipulátorů. [15, 19]

### 3.2.1 UHLÍKOVÁ VLÁKNA S EPOXIDOVOU PRYSKYŘICÍ

Uhlíková vlákna se v 90-ti % vyrábí z polyakrylnitrilových vláken, zbytek se vyrábí ze zbytků po krakování ropy (smoly dehtu, viskózní vlákna). Způsob výroby vláken má vliv na jejich vlastnosti. Karbonizované vlákno (zahříváno na 1000 – 2000 °C) dosahuje pevnosti v tahu až 5650 MPa. Grafitizované vlákno (zahříváno na 2400 – 3000 °C) disponuje naopak vysokým modulem pružnosti (až 531 GPa). V současnosti dodávají výrobci celou řadu rozdílných vláken:

- s vysokou pevností - HS (High Strength), HT (High Tenacity), HST (High Strain)
- s vysokým modulem - HM (High Modulus), VHM (Very High Modulus)
- se středním modulem - IM (Intermediate Modulus), AM (Average Modulus)
- s vysokou tuhostí i pevností - HMS (High Modulus and Strain)

Skvělou vlastností uhlíkových vláken s epoxidovou pryskyřicí je možnost výroby laminátu s různým součinitelem teplotní roztažnosti a to různou kombinací vrstev.

V konstrukci obráběcích strojů zatím nenacházejí širokého uplatnění hlavně kvůli vysoké ceně vláken a náročnému způsobu výroby, ale jejich nasazením se zabývají především výzkumné ústavy. Přesto se však můžeme setkat s uhlíkovými kompozity u ramena robotů KUKA KR 180 PA, který tento materiál používá v sériové výrobě. [19]

Na výrobu dílů z uhlíkových vláken se specializuje česká firma CompoTech. [21]



Obrázek 11: Robot KUKA KR 180 PA s ramenem z uhlíkového vlákna [28]



Obrázek 12: Vřeteník z uhlíkového vlákna [29]



Tabulka 4: Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken [19]

Vlastnosti	Uhlíkové vlákno HM vyztužení II	Uhlíkové vlákno HM vyztužení #	Uhlíkové vlákno HT vyztužení II	Uhlíkové vlákno HT vyztužení #
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1600	1600	1600	1600
Modul pružnosti [GPa]	360	120	144	48
Pevnost v tahu [MPa]	1200	400	2400	800
Pevnost v ohybu [MPa]	15-50	3-8	-	-
Dekrement útlumu [-]	0,02-0,03	0,02-0,03	-	-
Součinitel teplotní roztažnosti [ $\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$ ]	-0,5	-1	0	0,5
Tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	50	1	10	1
Měrná tepelná kapacita [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	1	1	1	1

### 3.2.2 KERAMICKÉ KOMPOZITY

Pro technické účely se používá především karbid křemíku nebo nitrid křemičitý, který našel uplatnění hlavně u ložisek. Vyrábí se hybridní provedení (ložiskové kroužky z oceli a keramické kuličky) nebo celokeramické provedení. Důvody pro nasazení keramiky u ložisek jsou:

- **nízká hmotnost** – o 60 % nižší hmotnost než ocel umožňuje dosahovat vysokých otáček a malých setrvačností (rychlejší rozběh a brzdění)
- **nízký součinitel tření** – vyšší odolnost proti opotřebení, chladnější chod ložisek i při nedostatku maziva
- **vyšší modul pružnosti** – o 50 % vyšší modul pružnosti než ocel, vyšší tuhost ložiska
- **nízký součinitel teplotní roztažnosti** – o 71 % nižší teplotní roztažnost než ocel [22]

Keramika se ve stavbě výrobních strojů používá ojediněle. Můžeme se s ní setkat u nosníku portálu a supportu laseru, desky stolu drátové řezačky nebo vřeteníků či hřídelí. Výhody použití keramiky jsou nižší hmotnost, nízká teplotní roztažnost, rozměrová stálost a možnost obrábění konvenčními metodami. Nevýhodou keramických součástí je především jejich vyšší cena, křehkost, složité spojování s ostatními dílci a omezené rozměry polotovarů. Výrobou součástí z keramiky se zabývá česká firma CeramTec CZ, s. r. o. nebo italská firma Microplan Group. [23, 24]

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti keramických materiálů [30, 31]

Vlastnosti	Karbid křemíku	Nitrid křemíku
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	3100	3250
Poissonova konstanta [-]	0,14	0,28
Modul pružnosti [GPa]	410	297
Pevnost v tlaku [MPa]	3900	5500
Pevnost v ohybu [MPa]	550	689
Maximální pracovní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1650	1000
Součinitel teplotní roztažnosti [ $\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$ ]	4	3,3
Měrná tepelná kapacita [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	0.75	0,9





### 3.2.3 SROVNÁNÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZIT

Vláknové kompozity mají nižší měrnou hmotnost než částicové kompozity i konvenční materiály, proto se používají především na pohyblivé součásti. Vlákenné kompozity na bázi uhlíkových vláken dosahují velmi vysokých hodnot pevnosti i modulu. Velkou výhodou je možnost tvorby součástí s optimálně orientovanou tuhostí a teplotní roztažností pomocí určitého podílu vrstev a skladby vláken. I přes své značné přednosti však nejsou uhlíková vlákna běžně nasazována, a to hlavně kvůli své vysoké ceně, složitosti výroby (nejčastěji ruční vrstvení a vytvrzování v autoklávu) a nedostatku zkušeností návrhu a spojování s ostatními díly.

Technická keramika našla hlavní uplatnění u ložisek a především u strojů pro vysokorychlostní obrábění. Technická keramika je téměř dvakrát těžší než uhlíková vlákna, ale je pevnější a to ve všech směrech stejně (uhlíková vlákna přenáší hlavní zatížení ve směru orientace vláken). Díky své nízké tepelné roztažnosti by mohla keramika najít uplatnění také v konstrukci rámu. Velkou výhodou je možnost opracování polotovarů pomocí třískového obrábění. [19, 23]



Obrázek 13: Keramická deska křížového stolu drátového řezacího stroje [23]

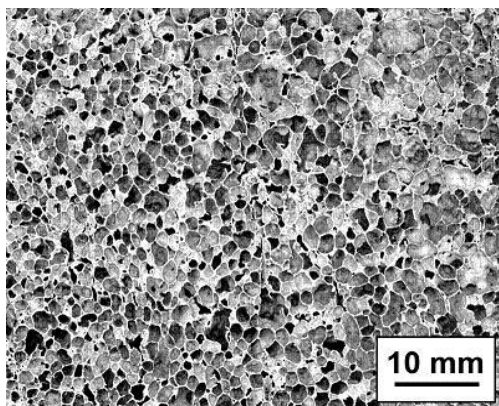


## 4 KOMBINOVANÉ MATERIÁLY

V dnešní době se dostávají do popředí materiály kombinované neboli hybridní. Tyto hybridní struktury jsou nejčastěji kombinací materiálů konvekčních (litina, ocel) a nekonvekčních, které jsou užity v menším množství. Mezi nejčastěji používané patří ocelové sendviče vyplněné hliníkovou pěnou, ocelový svařenec vylitý betonem či polymerbetonem, litinový odlitek s úmyslně ponechaným pískovým jádrem, polymerbeton vyztužený uhlíkovým vláknem nebo svařence vyztužené uhlíkovým laminátem. U většiny z těchto struktur se zatím nedostalo na sériovou výrobu. Jedná se spíše o experimentální zkoušení vlastností a vlivů poměrů jednotlivých materiálů a zjištění možností uplatnění těchto materiálů. Základní myšlenkou je zkombinovat ty nejlepší vlastnosti z více materiálů. [1, 24]

### 4.1 HLINÍKOVÁ PĚNA

Tento materiál se inspiroval přírodními objekty, jako jsou kosti, korály, korek. Jedná se o napěněný čistý hliník nebo slitinu hliníku (přísadovými prvky jsou: měď, křemík, hořčík, titan) s pórovitostí vyšší než 75 %. Velikost pórů se pohybuje od 2 do 25 mm v závislosti na výrobcu a místu použití. [19]



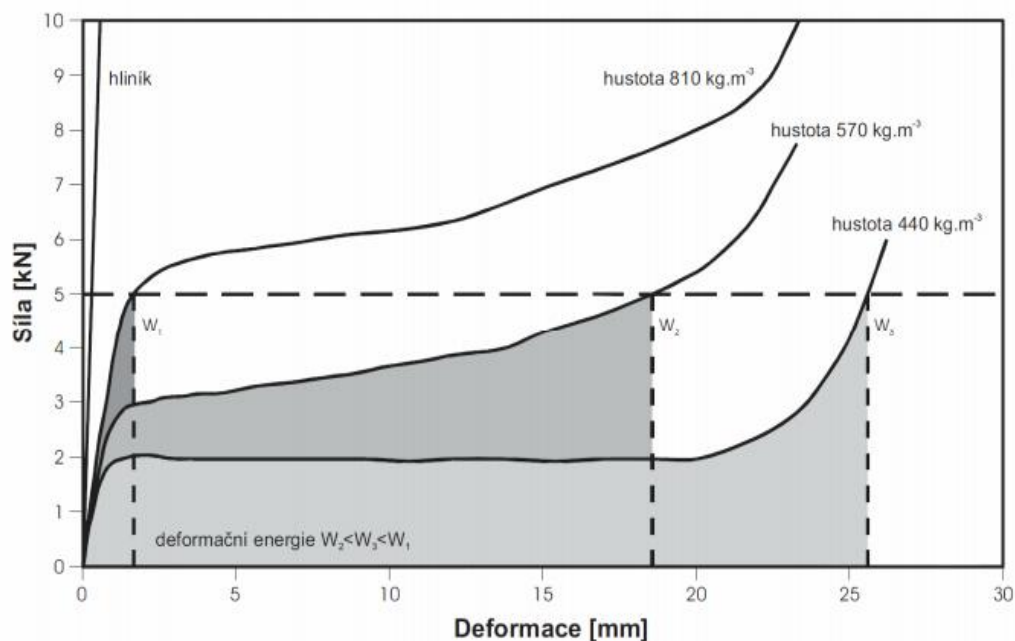
Obrázek 14: Struktura hliníkové pěny [32]

Technologie výroby hliníkové pěny byla patentována v roce 1963. Vytvoření pórů (napěnění) hliníku a jeho slitin se dá realizovat těmito způsoby:

- Smícháním prášku hliníku (hliníkové slitiny) s práškem zpěňovadla ( $\text{TiH}_2$ ,  $\text{ZrH}_2$ ) a následně protlačování vylišované směsi do tvaru plátů nebo tyčí, které jsou vloženy do uzavřené formy. Ohřátím polotovaru nad teplotu tání se chemickou reakcí ze zpěňovadla začne uvolňovat vodík, ten vytvoří bublinky a vyplní celou formu.
- Do taveniny kovu je zavedena tryska, která zde vhání plyn a to vytváří napěněnou strukturu. Jako plyn se používá vzduch, oxid uhličitý, kyslík, argon, dusík a jiné inertní plyny.
- Do taveniny kovu je přidáno 1 – 2 % práškového zpěňovadla  $\text{TiH}_2$ , to začne vytvářet póry. Po napěnění musí tavenina rovnoměrně chladnout. [25]



Výhodami hliníkové pěny jsou vysoká tuhost, malá hmotnost (hustota  $100 - 600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), schopnost pohltit spoustu nárazové energie, což je závislé na hustotě pěny. Při nízké hustotě dojde k hojnému porušování stěn pórů, naopak při vysoké hustotě nedokáže pěna pohltit velké množství nárazové energie. Tento jev můžeme pozorovat na obr. č. 15, kde  $W$  [J] značí deformační energii. Hustota má také vliv na velikost modulu pružnosti v tahu  $E$ , který roste exponenciálně s koeficientem zhruba 1,6 v závislosti na hustotě. Mezi další přednosti patří malá teplotní vodivost, výborné tlumení, výborná zvuková a tepelná izolace, možnost spojovat jednotlivé části pájením nebo svařováním. [19]



Obrázek 15: Průběh deformace v závislosti na síle zatížení [19]

V dnešní době existuje spousta firem specializujících se na výroby z hliníkové pěny např. rakouská firma LKR a jejich produkt METCOMB, Kanadáni Cymat corp se svým SAF (Stabilized Aluminium Foam), Japonci Shinko Wire company s pěnou pod označením ALPORAS, Američané ERG Aerospace s pěnou pod názvem Duocel®. Ve stavbě strojů použil hliníkovou pěnu výzkumný ústav Fraunhofer IWU Chemnitz na saně a dosáhli tak o 72 % nižší hmotnosti, o 18 % vyšší tuhosti v ohybu a desetinásobné tlumení oproti původnímu ocelovému svařenci s pouhým rozdílem větší výšky. Dalším příkladem je nosná soustava stroje firmy Mikromat z ocelovo-hliníkových sendvičů. Jednotlivé vrstvy sendvičů jsou k sobě lepeny, protože pájení nebo mechanické spojování se neosvědčilo. [1, 19, 26]

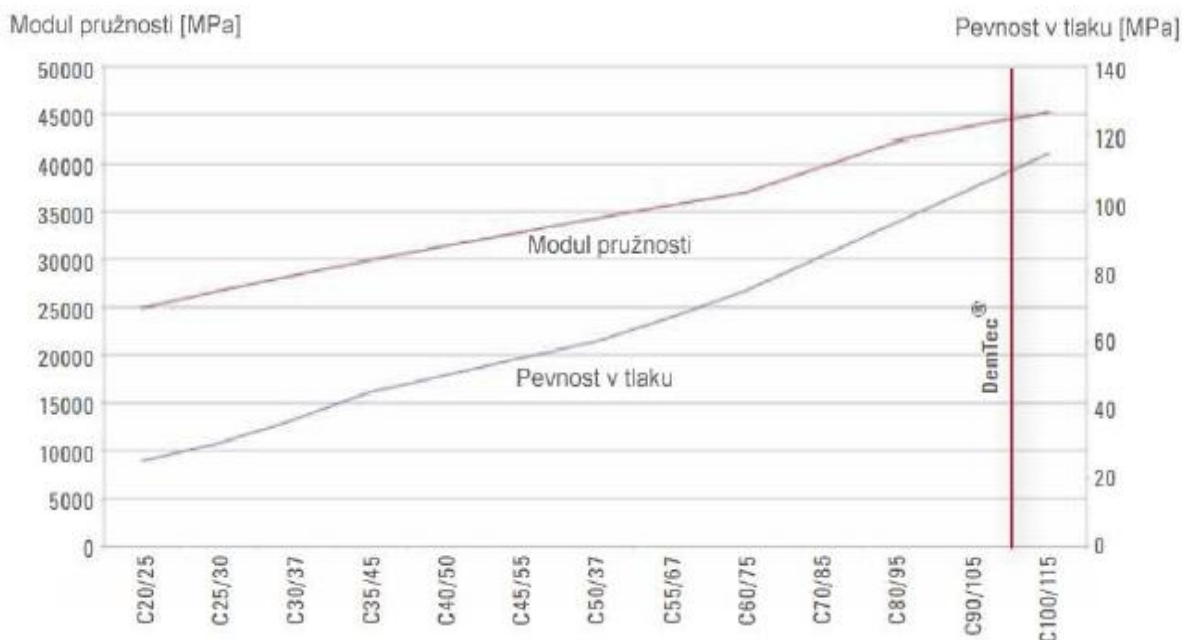


Tabulka 6: Mechanické vlastnosti hliníkové pěny [33, 34]

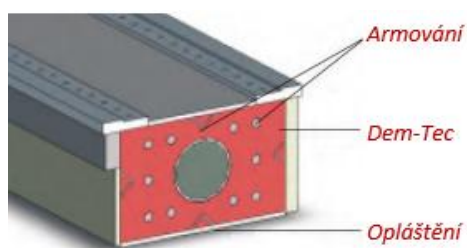
Vlastnosti	ALPORAS	Stabilized Aluminium Foam	Duocel®
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	200 - 250	400	81-324
Pórovitost [%]	-	68	88 - 97
Modul pružnosti v tahu [GPa]	0,4 - 0,35	1,2	0,048 – 0,083
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	0,3 – 0,35	0,92	0,12 – 0,35
Pevnost v tlaku [MPa]	1,7 - 2,2	3,7	2,17
Pevnost v tahu [MPa]	1,6 - 1,9	3,2	1,24
Pevnost v ohybu [MPa]	2,8 - 3,2	5	-
Součinitel teplotní roztažnosti [ $\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$ ]	23,4	-	-
Tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	3,5 - 4,5	4,68	9,7
Měrná tepelná kapacita [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	0,83 - 0,87	-	0,895
Maximální pracovní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	150	300	-

## 4.2 DEM-TEC

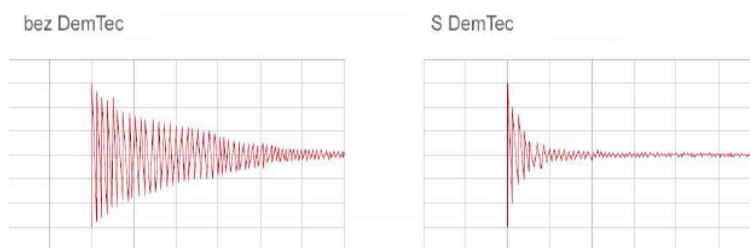
Německá firma Demmeler se specializuje na výrobu nosných dílů obráběcích strojů z hybridního materiálu pod názvem Dem-Tec. Jedná se o opláštěný ocelový svařenec vyztužený podélným armováním, který je vylit cementovým betonem s drobnými drátky (tzv. drátkobeton). Tato kombinace materiálů má za následek vyšší tuhost, vyšší pevnost v tahu, snížení vibrací, lepší tlumení, lepší rozměrovou stálost. Stejně jako je tomu u polymerbetonu nebo HPC betonu lze do Dem-Tecu zalévat energetické hydraulické či pneumatické rozvody. [21]



Obrázek 16: Vlastnosti Dem-Tecu [35]



Obrázek 18: Hybridní materiál Dem-Tec [21]



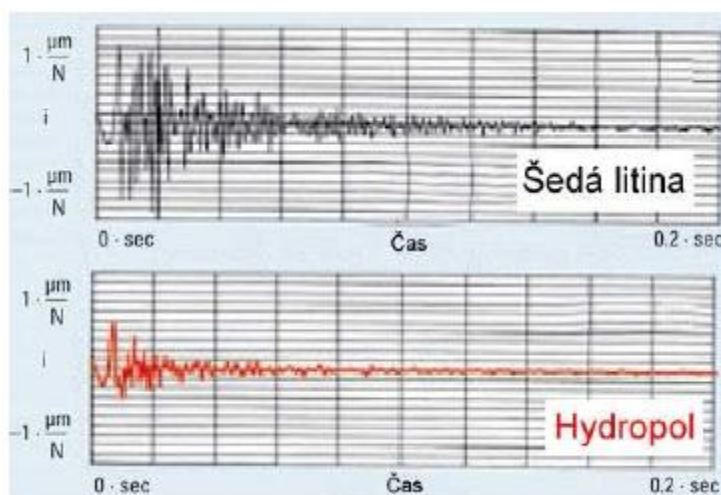
Obrázek 17: Tlumení vylitých konstrukcí Dem-Tecem [35]

### 4.3 HYDROPOL

Hydropol je kombinace ocelového svařence s polymerbetonovou výplní (podobně jako Dem-Tec). Je to produkt rakouské firmy Framag, která je světově známá návrhem a výrobou nosných soustav obráběcích strojů. Součásti vyrobené z Hydropolu vykazují dobré tlumení kmitů, vysokou dynamickou tuhost, tepelnou stabilitu, ale vyšší hmotnost. Kvůli vyšší hmotnosti se Hydropol využívá na nepohyblivé součásti. Framag však představil Hydropol Light a Superlight, které používají jiné druhy výplně polymerbetonu a mají tak nižší hmotnost. Kromě hmotnosti se však snížily i hodnoty modulu pružnosti a pevnost. Verze Light se používá na stojany a příčnický a verze Superlight na vřeteníky a jiné pohyblivé díly. [21]

Tabulka 7: Mechanické vlastnosti materiálu Hydropol [36]

Vlastnosti	Hydropol®	Hydropol Light®	Hydropol superlight®
Hustota [kg·m <sup>-3</sup> ]	2500	1200-1700	700
Modul pružnosti v tahu [GPa]	60	12-17	4,5
Pevnost v tlaku [MPa]	100	9-17	6-8



Obrázek 19: Tlumení konstrukcí vylitých Hydropolem [36]



#### 4.4 LITINOVÝ ODLITEK A PÍSKOVÁ VÝPLŇ

U některých odlitků ponechávají výrobci záměrně v otvorech písková jádra, která jsou po vychladnutí (smrštění) silně sevřena. Takovéto odlitky jsou těžší, ale dosahují lepších hodnot tlumení. Ve zvláštních případech jsou odlitky napěchovány pískem až po jejich odlití. U těchto součástí je problém s udržením přetlaku v dutině po celou provozní dobu. [1]

#### 4.5 SROVNÁNÍ KOMBINOVANÝCH MATERIÁLŮ

Z kombinovaných materiálů se nejvíce používají ocelové svařence vylité polymerbetonem nebo HPC betonem. Takovéto díly vykazují lepší tlumení, teplotní stabilitu (polymerbeton slouží jako izolant), vyšší tuhost, ale i hmotnost. Ocelové opláštění slouží zároveň jako forma, tudíž odpadá tvorba modelu, není zapotřebí žebrování a díky vyšší tuhosti celku lze použít tenčí ocelový profil než u samostatné svařované konstrukce. Polymerbeton má dobrou přilnavost k ocelovým povrchům a pomocí speciálních příměsí lze dosáhnout zvětšování objemu při tuhnutí, což je důležité u vylitého svařence. Polymerbeton je odolný vůči olejům, chemikáliím a tvoří také ochranu proti korozi oceli. Tato kombinace je vhodná zejména pro nepohyblivé součásti kvůli vysoké hmotnosti. Tuto nevýhodu však odstraňuje Hydropol Light a Superlight. Další nevýhody jsou náklady a náročnost spojené s tvorbou svařovaného opláštění, v případě Dem-Tecu ještě i armování. Jako další perspektivní materiál se jeví sendviče z hliníkové pěny, které jsou lehké, dobře tlumí rázy a hluk, dají se lehce spojovat svařováním nebo pájením a jsou lehce obrobitelné. Z hliníkové pěny se dají vyrábět konkrétní součásti za pomoci forem nebo deskovité polotovary, které nachází uplatnění v konstrukci stolů, saní nebo výjimečně i nosných soustav obráběcích strojů. U dalších aplikací se jedná spíše o prototypy a hojně se těchto řešení nevyužilo. [19, 21, 24, 26]





## 5 PŘÍRODNÍ MATERIÁLY

### 5.1 GRANIT (PŘÍRODNÍ ŽULA)

Granit je hlubinná vyvřelá hornina tvořena převážně křemenem a živcem, která se hojně těží v jižní Africe. Ve stavbě výrobních strojů se používá zejména na nepohyblivé lože, příčníky, stoly a pravítka vysoce přesných měřicích a obráběcích strojů (souřadnicové vyvrtávačky, brusky). K hlavním přednostem žuly patří dokonalá rozměrová stálost (žádné vnitřní pnutí), vysoká tuhost, dobré tlumení, vysoká odolnost proti opotřebení, nízká teplotní roztažnost a nízká teplotní vodivost. Velmi přesně a jemně opracované pracovní plochy mohou sloužit i jako vodící plochy. Spojování s ostatními díly probíhá lepením nebo šroubováním do speciálních závitových pouzder nebo T-drážek, které jsou do granitu vleповány.

Hlavní nevýhodou žuly je její vysoká cena, která je spojena s těžbou, řezáním jednotlivých dílů a vrtáním otvorů diamantovými nástroji, nutným broušením všech pracovních ploch a komplikovaným spojováním s ostatními díly.

Na výrobu ráků z granitu se specializují např. firmy Microplan Group, Ergbert Reitz, Naturstechnik, JFA CNC nebo East Star. [17, 18]

Tabulka 8: Mechanické vlastnosti žuly [37]

Vlastnosti	Černý granit	Úplně černý	Modrý Lanhelin
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2850	3000	2700
Pórovitost [%]	0,09	0,15	0,35
Modul pružnosti [GPa]	60-105	90-103	44-58
Pevnost v tlaku [MPa]	244	270	188
Pevnost v tahu [MPa]	24	25	21,5
Součinitel teplotní roztažnosti [ $\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$ ]	6,5	5,9	7,4
Tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	2	2,5	2
Tvrdoost podle Vickerse [MPa]	814	800	880
Původ	Afrika	Indie	Francie
Barva	Tmavě šedá	Černá	Šedá



Obrázek 21: Nosná struktura portálového vertikálního centra pro mikrofrézování [23]



Obrázek 20: Nosná struktura měřicího stroje z přírodní žuly [21]



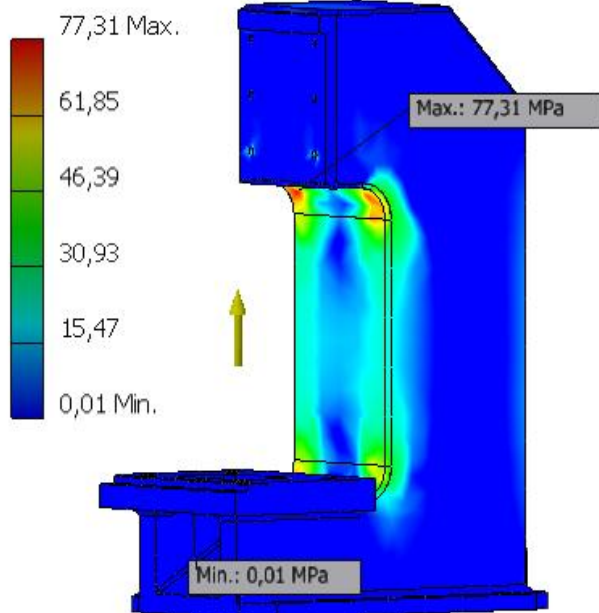
## 6 PEVNOSTNÍ ANALÝZA

V této části bude provedena pevnostní analýza součástí v programu Autodesk Inventor a volba materiálu vhodného pro danou součást.

První součástí je rám hydraulického lisu tvaru C. Jedná se o svařovaný rám z ocelových plechů s vnitřními výztuhami. Rám je zatížen statickou silou 60000 N, která je vyvozena pístnicí.

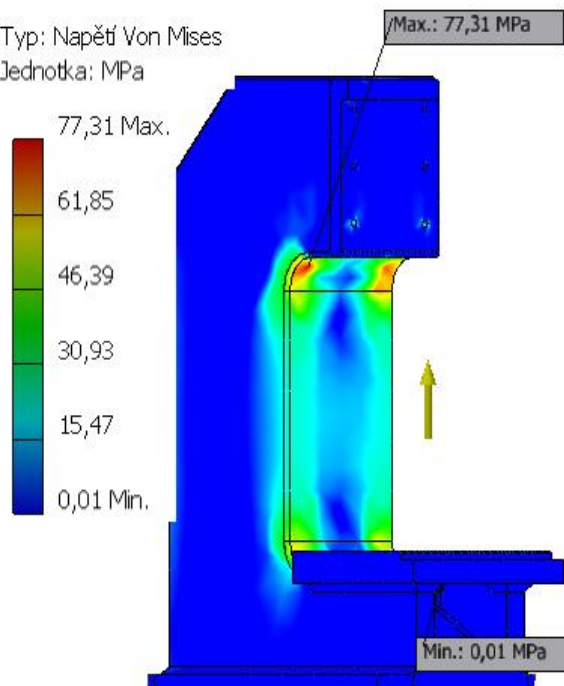
Jako první materiál byla zvolena ocel 11 523 a jako druhý ocel 14 220.

Typ: Napětí Von Mises  
Jednotka: MPa



Obrázek 23: Napětí pro ocel 11 523

Typ: Napětí Von Mises  
Jednotka: MPa



Obrázek 22: Napětí pro ocel 14 220

Pracovní cyklus lisu má snahu rozevírat rám. Největší napětí, které dosahuje hodnoty 77,31 MPa, působí v horní zaoblené části na vnitřní straně rámu (u pracovního prostoru rámu). Průběh napětí můžeme pozorovat na obr. č. 23 a 24. Velikost napětí je shodná pro oba materiály, není totiž závislá na vlastnostech materiálu, ale na velikosti zatěžující síly a plochy, na kterou působí.

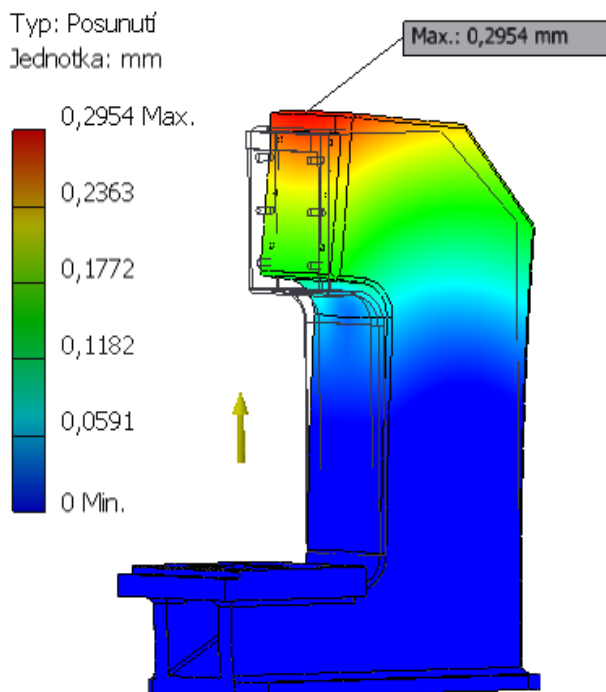
K posunutí rámu dochází především v horní části rámu. Konkrétně je to opěrná plocha, určená k ustavení polohy tělesa hydraulického válce. Jak můžeme pozorovat na obr. č. 25 a 26, je maximální hodnota posunutí (0,2954 mm) opět stejná pro oba materiály. Hodnota posunutí je závislá na modulu pružnosti materiálu a ten je pro většinu ocelí shodný (206 GPa).

Součinitel bezpečnosti dosahuje minimální hodnoty v místě působení největšího napětí. Pro ocel 11 523 je minimální součinitel bezpečnosti 4,59. Tato hodnota je dosti vysoká a poukazuje na předdimenzování rámu. Minimální součinitel bezpečnosti pro ocel 14220 je 8,79, což je téměř dvojnásobek hodnoty bezpečnosti oceli 11 523. Takto vysoká hodnota bezpečnosti

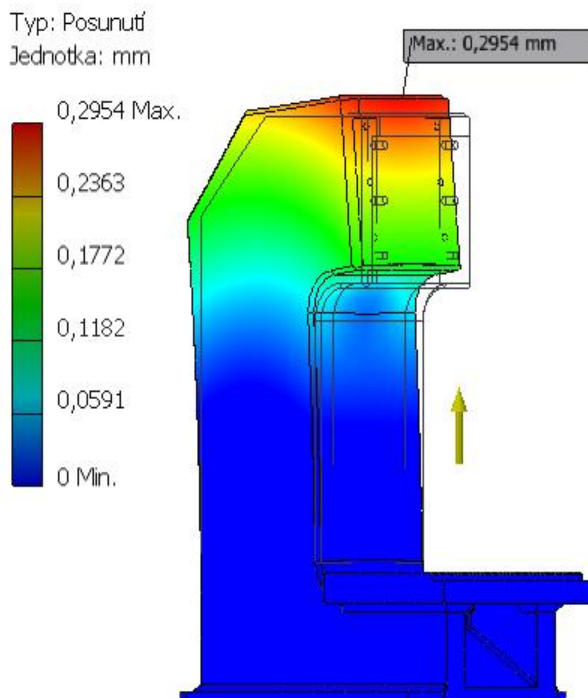




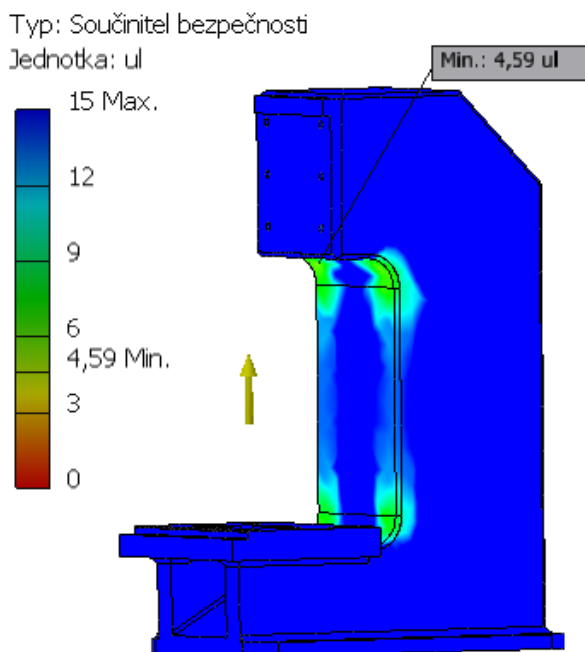
se používá pro zařízení, která mohou přímo ohrožit lidské životy. Na výrobní stroj jako je hydraulický lis je tato hodnota až zbytečně vysoká. Z tohoto důvodu se jeví jako lepší řešení materiálu ocel 11 523, která má vyhovující mechanické vlastnosti, zaručenou svařitelnost a je cenově dostupnější.



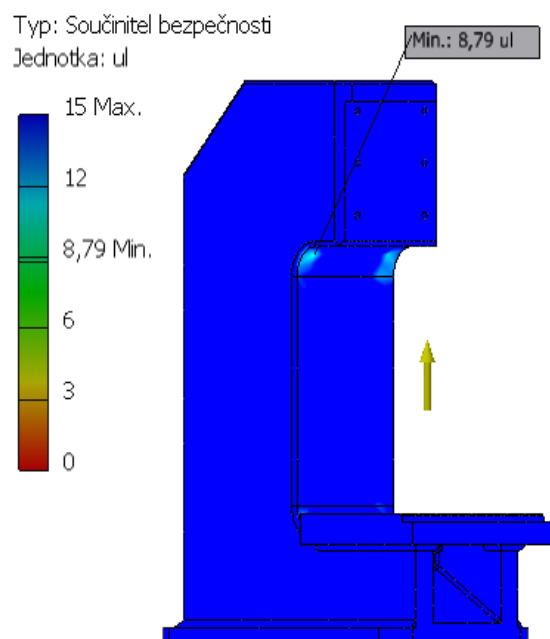
Obrázek 24: Posunutí pro ocel 11 523



Obrázek 25: Posunutí pro ocel 14 220



Obrázek 26: Součinitel bezpečnosti pro ocel 11 523

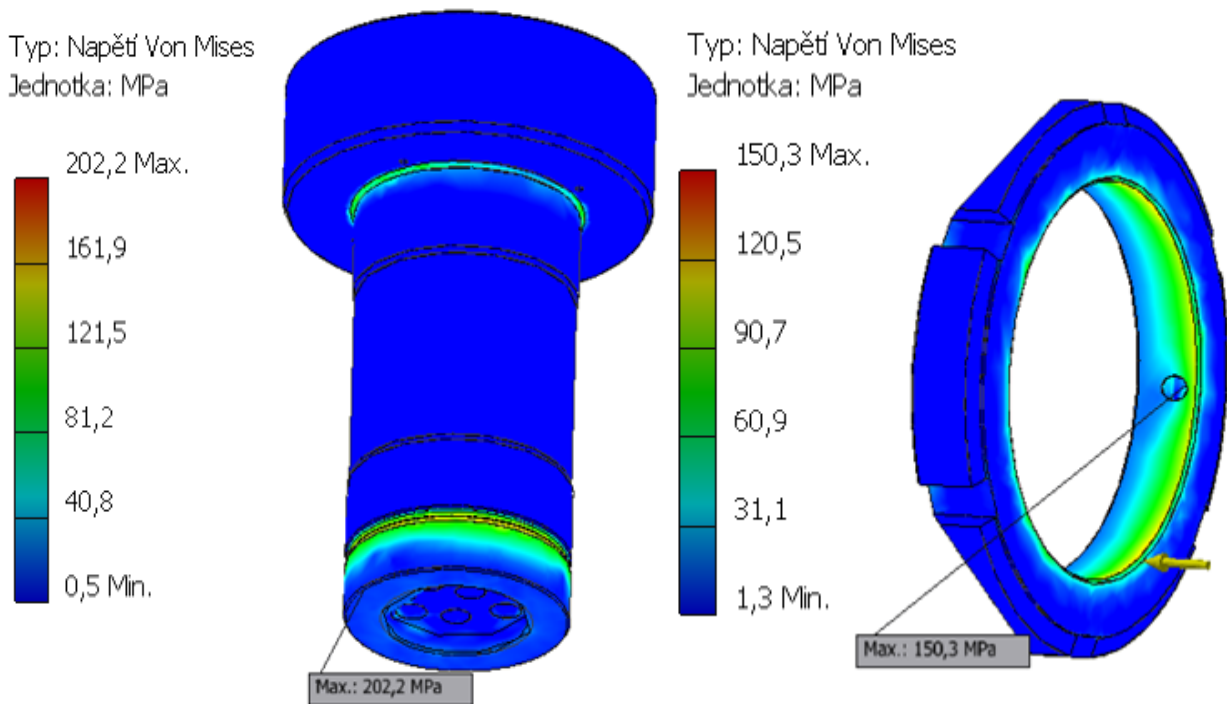


Obrázek 27: součinitel bezpečnosti pro ocel 14 220



Druhou součástí je válec s maticí, který slouží k uchycení hydraulicky ovládaného drapáku k ramenu. Válec je ve spodní části opatřen závitem pro nosnou matici. Ve válci jsou vyvrtány otvory, které slouží k rozvodu tlakové kapaliny. Válec musí být schopen přenášet zatížení v ose 20 000 kg. Pevnostní analýza byla provedena pro ocel 11 600 a pro ocel 15 230.

Největší napětí válce má velikost 202,2 MPa a působí v horní části závitu. Menší nárůst napětí lze pozorovat také ve vrubu horního osazení, kde však hodnota nepřesahuje 100 MPa. Největší napětí matice dosahuje velikosti 150,3 MPa a působí v horní části matice, kde je oslabena otvorem pro závrtný šroub.



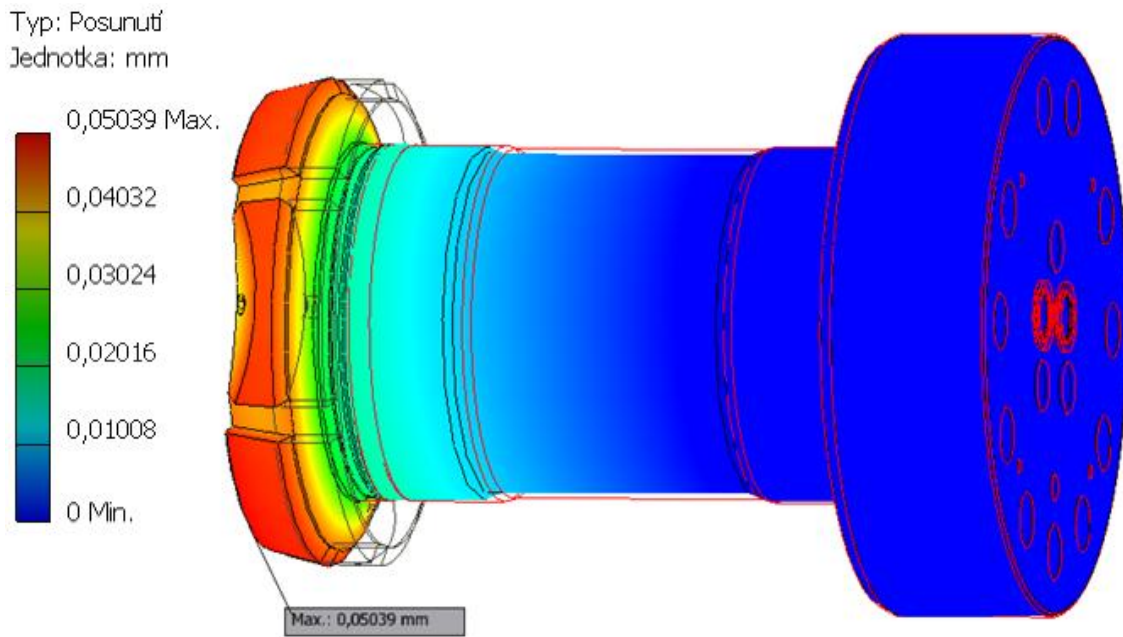
Obrázek 28: Napětí ve válci

Obrázek 29: Napětí v matici

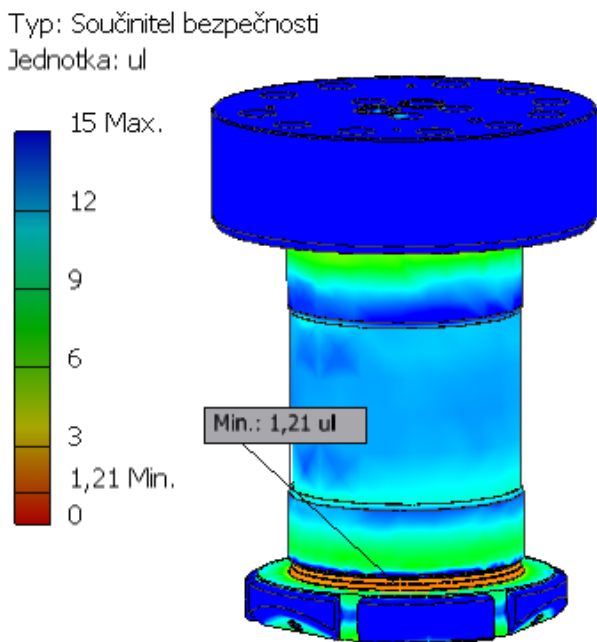
K největšímu posunutí dochází u matice. Hodnota maximálního posunu je 0,05039 mm. Dochází také k mírnému posunutí spodní strany válce, jak lze vidět na obr. č. 30. Hodnoty napětí a posunutí jsou pro obě oceli stejné.

U oceli 11 600 je nejnižší součinitel bezpečnosti v místě nejvyššího napětí 1,21. U oceli 15 230 je součinitel bezpečnosti v tomtéž místě 3,28, což je téměř trojnásobek oproti oceli 11 600.

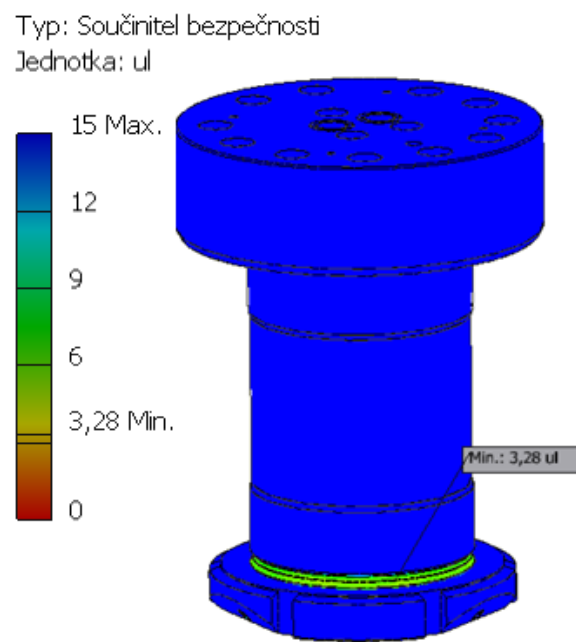
U zařízení jako je hydraulický drapák může docházet ke vzniku rázů, a proto je součinitel bezpečnosti 1,21 nízký. Po pevnostní stránce lépe vyhovuje ocel 15 230, která má i řadu dalších výhod. Jelikož zařízení pracuje s vysokými tlaky hydraulické kapaliny a na jeho čele působí vysoké tření (z důvodu utěsnění rozvodů tlakové kapaliny), je vhodná ocel 15 230, která má vysokou odolnost proti otěru a je možné její vlastnosti zlepšit zušlechťováním.



Obrázek 30: Posunutí matice a válce.



Obrázek 31: Bezpečnost pro ocel 11 600



Obrázek 32:Bezpečnost pro ocel 15 230



## ZÁVĚR

Nejpoužívanější materiály ve stavbě strojů jsou a ještě dlouhou dobu budou oceli, ocelolitiny a litiny. Nenahraditelné jsou především svým širokým spektrem mechanických vlastností a dobrou cenou. Z částicových kompozit se začal hojněji používat polymerbeton, který dosahuje lepších vlastností než HPC beton. Polymerbeton se používá na nosné části strojů, a to především pro HSC (vysokorychlostní) obrábění. Do polymerbetonu mohou být integrovány různé snímače a čidla, které řídí a přenastavují výrobní proces podle aktuálně zjištěných dat. Vznikají tak tzv. inteligentní materiály. Vlákňové kompozity mají nízkou hmotnost, nízkou až volitelnou teplotní roztažnost a svými pevnostními vlastnostmi předčí ocel. Avšak kvůli vysoké ceně a složité výrobě nejsou sériově používány. Žula našla uplatnění u velice přesných měřících a obráběcích strojů kvůli dokonalé rozměrové stálosti. Hybridní struktura jako je svařenec vyplněný polymerbetonem má za následek zvýšení tuhosti nosné soustavy a dochází tak k úspoře materiálu (jak oceli, tak betonu).

U výrobních strojů dochází ke snaze o snižování energetické náročnosti. S tím je spojeno snižování hmotnosti (hlavně pohyblivých) součástí při zachování tuhosti. Po této stránce vyhovují vlákňové kompozity nebo sendvičové struktury z kovových pěn. Touto oblastí se zabývají spíše vývojová centra, kde se snaží vyřešit problematiku návrhu a výpočtů těchto materiálů. S postupným zjednodušením a ustálením výrobních procesů můžeme počítat s širším uplatněním vlákňových kompozit a sendvičů z kovových pěn.

V pevnostní analýze bylo zjištěno, že vhodnějším materiálem pro C-rám hydraulického lisu je ocel 11 523. To hlavně kvůli výborným mechanickým vlastnostem (vysoká bezpečnost), nižší ceně a dobré dostupnosti všech typů polotovarů.

Pro nosný sloup hydraulického drapáku je vhodnějším materiálem ocel 15 230. To hlavně kvůli lepším mechanickým vlastnostem (vyšší bezpečnosti), vysoké odolnosti proti otěru a možnosti zlepšení vlastností zušlechťováním.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] MAREK, J. a kol. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 3., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2014. 684 s. ISBN 978-80-260-6780-1
- [2] geologie.vsb.cz. [online]. [cit.10.03.2015]. *Výroba železa a oceli*. Dostupné z: <[http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyroba\\_zeleza.html#historie](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyroba_zeleza.html#historie)>
- [3] quido.cz. [online]. [cit.10.03.2015]. *Objev litiny*. Dostupné z: <<http://www.quido.cz/objevy/litina.htm>>
- [4] byznys.ihned.cz. [online]. [cit.19.03.2015]. *Světová produkce oceli láme rekordy*. Dostupné z: <<http://byznys.ihned.cz/c1-59601430-svetova-produkce-oceli-lame-rekordy>>
- [5] ferona.cz. [online]. [cit.19.03.2015]. *Ferona sortimentní katalog*. Dostupné z: <<http://www.ferona.cz/cze/katalog/normy.php>>
- [6] DORAZIL, E., HRSTKA, V. *Strojírenské materiály a povrchové úpravy*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1988. 330 s.
- [7] tumlikovo.cz. [online]. [cit.13.04.2015]. *Ušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli třídy 11, jejich složení a tepelné zpracování*. Dostupné z: <<http://www.tumlikovo.cz/neuslechtilé-uhlíkovekonstrukcni-oceli-tridy-11-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/#more-3216>>
- [8] KUZIČKIN, D., MÍŠEK, B., FREMUNT, P. *Konstruktivní ocele tvárnené a na odliatky*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1988. 301 s.
- [9] tumlikovo.cz. [online]. [cit.17.04.2015]. *Ušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli třídy 12, jejich složení a tepelné zpracování*. Dostupné z: <<http://www.tumlikovo.cz/uslechtilé-uhlíkove-konstrukcni-oceli-tridy-12-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/>>
- [10] tumlikovo.cz. [online]. [cit.19.04.2015]. *Nízkolegované konstrukční oceli třídy 14, jejich složení a tepelné zpracování*. Dostupné z: <<http://www.tumlikovo.cz/nizkolegovane-konstrukcni-oceli-tridy-14-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/>>
- [11] tumlikovo.cz. [online]. [cit.20.04.2015]. *Nízkolegované konstrukční oceli třídy 15, jejich složení a tepelné zpracování*. Dostupné z: <<http://www.tumlikovo.cz/nizkolegovane-konstrukcni-oceli-tridy-15-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/>>
- [12] tumlikovo.cz. [online]. [cit.22.04.2015]. *Legované oceli třídy 16, jejich složení a tepelné zpracování*. Dostupné z: <<http://www.tumlikovo.cz/legovane-oceli-tridy-16-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/>>
- [13] tumlikovo.cz. [online]. [cit.23.04.2015]. *Uhlíkové nástrojové oceli třídy 19, jejich složení a tepelné zpracování*. Dostupné z: <<http://www.tumlikovo.cz/uhlíkove-nastrojove-oceli-tridy-19-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/>>
- [14] ROUČKA, J. *Metalurgie litin*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1998, 166 s. ISBN 80-214-1263-1.
- [15] BAREŠ, R. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 325 s.
- [16] fs.vsb.cz.[online]. [cit.07.04.2015]. *Kompozity*. Dostupné: <[http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/339/.content/files/Slide14\\_Kompozity.pdf](http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/339/.content/files/Slide14_Kompozity.pdf)>



- [17] mmspektrum.com.[online]. [cit.20.04.2015]. *Beton a přírodní žula při výrobě loží a rámu obráběcích strojů*. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/beton-a-prirodni-zula-pri-vyrobe-lozi-a-ramu-obrabcich-stroju.html>>
- [18] mmspektrum.com.[online]. [cit.21.04.2015]. *Nové technologie při výrobě nosných dílů obráběcích strojů*. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-technologie-pri-vyrobe-nosnych-dilu-obrabcich-stroju.html>>
- [19] MRÁZ, P., TALÁCKO, J. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. 226 s. ISBN 80-01-03540-9.
- [20] microplan-group.com [online]. [cit.28.04.2015]. *Celith, the syntetic Granite*. Dostupné z: <[http://www.microplan-group.com/pagine/prodotti\\_gb/celith\\_gb.htm](http://www.microplan-group.com/pagine/prodotti_gb/celith_gb.htm)>
- [21] czpos.cz.[online]. [cit.11.03.2015]. *Stavba nosných soustav*. Dostupné z: <[http://www.czpos.cz/akce/20100225.emo2009/13\\_stavba\\_nosnych\\_soustav.pdf](http://www.czpos.cz/akce/20100225.emo2009/13_stavba_nosnych_soustav.pdf)>
- [22] skf.com[online]. [cit.16.05.2015]. *Hybridní ložiska SKF*. Dostupné z: <<http://www.skf.com/cz/industry-solutions/compressors/applications/twin-screw-compressors/twin-screw-process-gas-compressors/skf-hybrid-bearings.html>>
- [23] Ing. Jan Smolík – jednodenní odborný seminář konaný dne 9.10.2007 na ČVUT v Praze, fakulta strojní – *KOMPOZITY VE STAVBĚ STROJŮ*
- [24] mmspektrum.com.[online]. [cit.16.05.2015]. *Technická keramika na bázi karbidu křemíku*. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/technicka-keramika-na-bazi-karbidu-kremiku.html>>
- [25] KŘIVÁNEK, R. *Vlastnosti a použití kovových pěn*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [26] mmspektrum.com.[online]. [cit.02.04.2015]. *Výrobky z hliníkové pěny*. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny.html>>
- [27] ateam.zcu.cz.[online]. [cit.15.03.2015]. *Rozdělení a označení ocelí*. Dostupné z: <[http://www.ateam.zcu.cz/znaceni\\_oceli.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/znaceni_oceli.pdf)>
- [28] kuka-robotics.com.[online]. [cit.19.05.2015]. Dostupné z: <[http://www.kuka-robotics.com/usa/en/pressevents/news/NN\\_041025\\_NewKR180PAArctic.htm](http://www.kuka-robotics.com/usa/en/pressevents/news/NN_041025_NewKR180PAArctic.htm)>
- [29] cz.compotech.com.[online]. [cit.20.05.2015]. *Nosníky osy Z z uhlíkového kompozitu*. Dostupné z: <[http://cz.compotech.com/vrobky\\_a\\_aplikace/vrobky\\_a\\_aplikace/machine\\_building\\_components/z\\_axis\\_beams](http://cz.compotech.com/vrobky_a_aplikace/vrobky_a_aplikace/machine_building_components/z_axis_beams)>
- [30] accuratus.com.[online]. [cit.21.05.2015]. *Silicon carbide properties*. Dostupné z: <<http://accuratus.com/silicar.html>>
- [31] accuratus.com. [online]. [cit.21.05.2015]. *Silicon nitride properties*. Dostupné z: <<http://accuratus.com/silinit.html>>
- [32] commons.wikimedia.org [online]. [cit.20.05.2015]. *Closed cell aluminium foam*. Dostupné z: <[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Closed\\_cell\\_aluminium\\_foam\\_with\\_small\\_cell\\_size.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Closed_cell_aluminium_foam_with_small_cell_size.JPG)>
- [33] hlinik.sk.[online]. [cit.04.05.2015]. *Hliníková pena*. Dostupné z:<[http://www.hlinik.sk/pdf/hli\\_pena.pdf](http://www.hlinik.sk/pdf/hli_pena.pdf)>, material property data



- [34] matweb.com [online]. [cit.05.05.2015]. *Material property data*.  
Dostupné z:  
<<http://www.matweb.com/Search/MaterialGroupSearch.aspx?GroupID=182>>
- [35] demmeler.com [online]. [cit.07.05.2015]. *DEMMELEER Maschinenbau*. Dostupné z:  
<[http://www.demmeler.com/images/pdf/broschueren/Demmeler\\_Imagebroschuere\\_web\\_de.pdf](http://www.demmeler.com/images/pdf/broschueren/Demmeler_Imagebroschuere_web_de.pdf)>
- [36] framag.com. [online]. [cit.08.05.2015]. *Framag Schwingungstechnik*.  
Dostupné z:  
<<http://www.framag.com/index.cfm?seite=schwingungstechnik&sprache=DE>>
- [37] microplan-group.com [online]. [cit.11.05.2015]. *Materials used in metrology*.  
Dostupné z: <<http://www.microplan-group.com/mpg/ENG/materials.html>>
- [38] FÜRBAACHER, I. *Lexikon ocelí: materiálové listy se zahraničními materiály*. Praha: Dashöfer, 2006-. ISSN 1802-3029. Aktualizováno čtvrtletně.





## SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Typy materiálů pro stavbu rámu [1].....	11
Obrázek 2: Rozdělení oceli [27] .....	12
Obrázek 3: Tvar grafitu v litině [6].....	16
Obrázek 4: Závislost pevnosti na tloušťce stěny odlitku [14] .....	17
Obrázek 5: Odlitek stojanu horizontálního frézovacího centra z tvárné litiny [23].....	18
Obrázek 6: Svařovaný rám portálového stroje firmy Benazzato S. r. l. [21].....	18
Obrázek 7: Polymerbetonový rám HSM stroje firmy MIKRON [23] .....	20
Obrázek 8: Forma polymerbetonového odlitku [23].....	20
Obrázek 9: Lože karuselu z HPC betonu firmy Toshulin [1] .....	21
Obrázek 10: Detail broušené plochy a vlepěných závitových pouzder pro lineární vedení [21] .	21
Obrázek 11: Robot KUKA KR 180 PA s ramenem z uhlíkového vlákna [28] .....	23
Obrázek 12: Vřeteník z uhlíkového vlákna [29].....	23
Obrázek 13: Keramická deska křížového stolu drátového řezacího stroje [23] .....	25
Obrázek 14: Struktura hliníkové pěny [32].....	26
Obrázek 15: Průběh deformace v závislosti na síle zatížení [19] .....	27
Obrázek 16: Vlastnosti Dem-Tecu [35].....	28
Obrázek 17: Tlumení vylitých konstrukcí Dem-Tecem [35].....	29
Obrázek 18: Hybridní materiál Dem-Tec [21].....	29
Obrázek 19: Tlumení konstrukcí vylitých Hydropolem [36].....	29
Obrázek 20: Nosná struktura měřicího stroje z přírodní žuly [21] .....	31
Obrázek 21: Nosná struktura portálového vertikálního centra pro mikrofrézování [23].....	31
Obrázek 22: Napětí pro ocel 14 220 .....	32
Obrázek 23: Napětí pro ocel 11 523 .....	32
Obrázek 24: Posunutí pro ocel 11 523 .....	33
Obrázek 25: Posunutí pro ocel 14 220 .....	33
Obrázek 26: Součinitel bezpečnosti pro ocel 11 523 .....	33
Obrázek 27: součinitel bezpečnosti pro ocel 14 220.....	33
Obrázek 28: Napětí ve válci.....	34
Obrázek 29: Napětí v matici .....	34
Obrázek 30: Posunutí matice a válce. ....	35
Obrázek 31: Bezpečnost pro ocel 11 600.....	35
Obrázek 32:Bezpečnost pro ocel 15 230.....	35





## SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti uhlíkových ocelí na odlitky [38] .....	16
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti grafitických litin [38] .....	18
Tabulka 3: Mechanické vlastnosti částicových kompozit [1, 20] .....	22
Tabulka 4: Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken [19] .....	24
Tabulka 5: Mechanické vlastnosti keramických materiálů [30, 31] .....	24
Tabulka 6: Mechanické vlastnosti hliníkové pěny [33, 34] .....	28
Tabulka 7: Mechanické vlastnosti materiálu Hydropol [36] .....	29
Tabulka 8: Mechanické vlastnosti žuly [37] .....	31