



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

KOMPOZITNÍ MATERIÁLY VE STAVBĚ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

COMPOSITE MATERIALS FOR DESIGN OF PRODUCTION MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ ŠIKUTA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL HOLUB

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Šikuta

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:

Kompozitní materiály ve stavbě obráběcích strojů

v anglickém jazyce:

Composite materials for design of production machines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je provést rešerši kompozitních materiálů ve stavbě obráběcích strojů, uvést vhodné aplikace jejich využití.

Cíle bakalářské práce:

- Provést rešerši kompozitních materiálů
- Příklady použití a nasazení pro aplikace obráběcích strojů

Seznam odborné literatury:

- www.infozdroje.cz

- Marek, Jiří, MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů. 2006. Speciální vydání. Dostupný z WWW: <www.mmspektrum.com>. ISSN 1212-2572.

- NOVOTNÝ, Ondřej, SMOLÍK, Jan. Stavba hlavních nosných dílů. In Obráběcí stroje na EMO Hannover 2001. Praha : [s.n.], 2001. 12. s. 112-120. ISBN 80-238-7849-2.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Holub

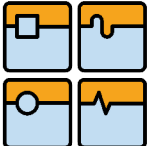
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 26.10.2010

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou kompozitních materiálů ve stavbě obráběcích strojů, přičemž jsou mezi sebou srovnány jejich výhody, nevýhody a fyzikálně-mechanické vlastnosti při současném zhodnocení jejich perspektivnosti a možného uplatnění.

Klíčová slova

Kompozit, polymer, tlumení, tuhost, pevnost

Abstract

This work deals with the question of composite materials in the construction of machine tools, comparing their respective advantages, disadvantages and physical and mechanical properties, as well as assessing their viability and possible applications.

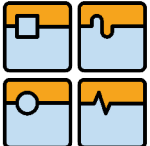
Key words

Composite, polymer, damping, rigidity, strength



Bibliografická citace

ŠIKUTA, L. Kompozitní materiály ve stavbě obráběcích strojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Holub.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Čestné prohlášení

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

V Brně dne 27. 5. 2011

.....
Lukáš Šikuta



Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Holubovi za cenné rady, připomínky a dodané podklady pro vypracování této práce. Dále všem lidem v mém okolí, kteří mě podporovali a dodávali mi sílu a pozitivní energii. Děkuji své mamince, paní Jarmile Šikutové a kamarádům Tomáši Machů a Františku Thorži za projevenou podporu.



Obsah

1 Úvod.....	10
1.1 Požadavky na materiály obráběcích strojů.....	11
2 Kovové materiály.....	12
2.1 Litina.....	12
2.2 Ocelolitina	12
2.3 Ocel.....	13
2.4 Srovnání kovových materiálů	13
3 Kompozitní materiály.....	14
3.1 Částicové kompozity	15
3.1.1 Granit	16
3.1.2 HPC betony	18
3.1.3 Polymerní betony	21
3.1.4 Porovnání částicových kompozit	23
3.2 Vláknové kompozity	24
3.2.1 Uhlíkové kompozity	25
3.2.2 Keramické kompozity	26
3.2.3 Srovnání vláknových kompozit.....	30
4 Hybridní struktury a materiály.....	31
4.1 Hliníkové pěny.....	32
4.2 Srovnání hybridních struktur	34
5 Závěr.....	35
Seznam zkratk	36
Seznam použité literatury.....	37



1 Úvod

Když se řekne kompozitní materiál, většině z nás se vybaví letecký nebo kosmický průmysl. Není to zas až tak dlouhá doba a opravdu tomu tak bylo. Nicméně v poslední době nacházejí kompozity uplatnění ve stále více oblastech lidské činnosti. U obráběcích strojů tomu není jinak a důvodů je hned několik. Kompozity v sobě skýtají velké množství možností, a to od zpřesnění obráběcího procesu po zlevnění samotného obráběcího centra a tím i výroby. Některé typy kompozit, jako například betony, se v konstrukci obráběcích strojů již nějaký čas používají. Jiné, jako uhlíková vlákna či keramika, na své uplatnění teprve čekají. Důvodem je především vysoká cena a absence zkušeností konstruktérů s novými materiály. Zvláštní skupinu tvoří tzv. hybridní materiály, což mohou být konvenční materiály vyztužené kompozity nebo zcela nové struktury současných materiálů jako například metalické pěny tvořící sendvičové struktury.



1.1 Požadavky na materiály obráběcích strojů

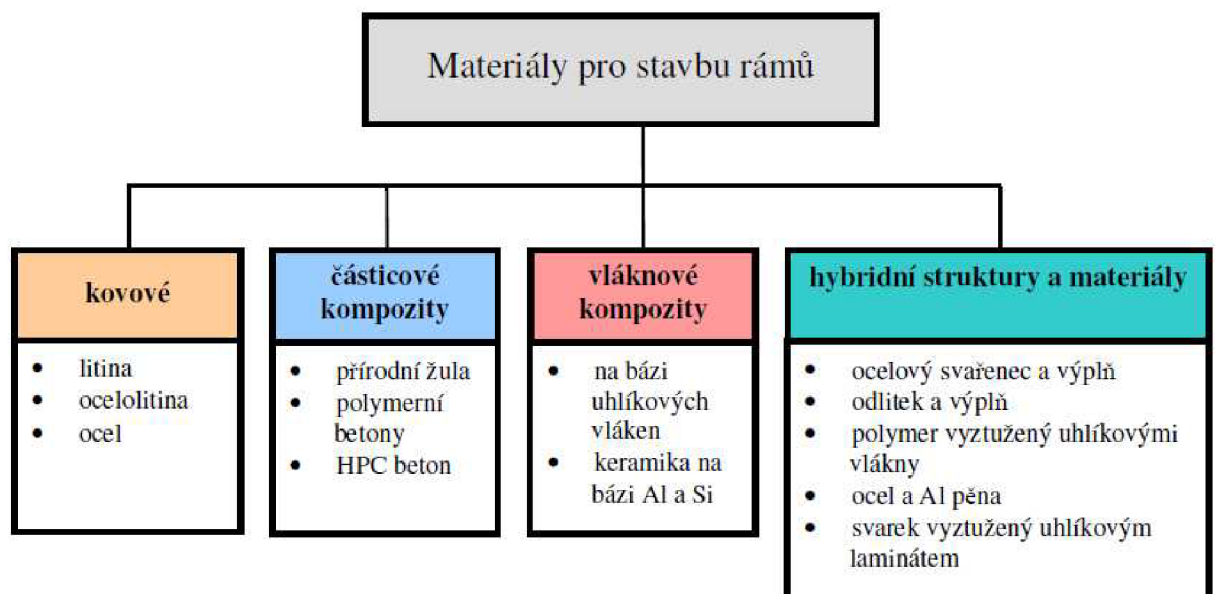
U obráběcích strojů jsou kladeny zdaleka největší požadavky na samotné rámy. Přes rám se přenáší veškeré zatížení, vibrace a teplo. Materiál rámu musí tedy splňovat řadu požadavků, z nichž nedůležitější jsou:

- Pevnost – zabraňuje trvalé deformaci, případně lomu
- Měrná hmotnost – statické a dynamické vlastnosti
- Modul pružnosti – statická a dynamická tuhost
- Tlumení – dynamické vlastnosti
- Tepelná roztažnost – tepelná stabilita
- Vnitřní pnutí – trvalá přesnost (dlouhodobá)
- Kluzné vlastnosti – tření a opotřebení v kluzných zónách

Dále je samozřejmě potřeba zohlednit cenu a dostupnost materiálu. [1]

U ostatních dílů platí ve větší či menší míře to samé, záleží už jen na samotném konstrukčním řešení.

Jak je tedy vidět, na materiály obráběcích strojů jsou kladeny poměrně vysoké požadavky a najít ideální materiál není jednoduchá záležitost. Nejčastěji používanými materiály jsou kovy a nejspíš ještě nějaký čas budou. Jsou levné, jsou s nimi zkušenosti a na běžnou přesnost plně dostačují. Ve stavbě rámu jsou poměrně hodně rozvíjející se skupinou betony, jejichž hlavním pozitivem je cena. Uhlíková vlákna či keramika jsou prozatím spíše exotickými materiály. Kvůli jejich ceně je jejich potenciál použití spíše v oblasti menších součástí, jako například keramické kuličky v ložiskách. Jako velmi perspektivní skupina se jeví hybridní struktury, jež si berou to nejlepší z konvenčních a nekonvenčních materiálů.



Obr. 1.1 – Materiály pro stavbu rámu obráběcích strojů [1]



2 Kovové materiály

Kovové materiály jsou nejrozšířenější materiály používané pro konstrukci obráběcích strojů a v dohledné době nejspíš i budou. Jejich hlavními výhodami je cena, dostupnost a dlouholeté zkušenosti výrobců. Nevýhodou je postupné dosahování hranice jejich fyzikálních vlastností a tím snížený potenciál vyrábět přesnější stroje, který lze do určité míry kompenzovat konstrukcí podpořenou moderními výpočtovými metodami. [2]

2.1 Litina

Litina je slitina železa, uhlíku a dalších prvků, přičemž minimální obsah uhlíku musí být 2,14%. Vyrábí se v tavicí peci při teplotě kolem 1500°C. Podle rychlosti ochlazování se dělí na dvě hlavní skupiny a to na litinu **bílou** a litinu **grafitickou**. [3]

Bílá litina vzniká při rychlém ochlazování. Je velmi tvrdá a křehká. Pro zlepšení vlastností bývá temperována. Po temperování vznikají tyto 3 druhy litin:

- Temperovaná litina s černým lomem
- Temperovaná litina s bílým lomem
- Temperovaná litina s perlitická

Z temperovaných litin se pro obráběcí stroje používá pouze litina s černým lomem. [4,5]

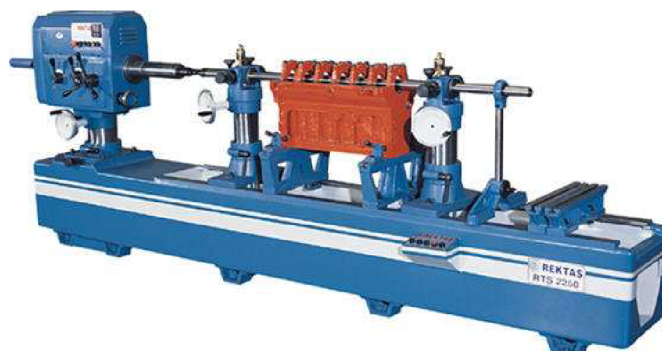
Grafitické litiny vznikají při pomalém ochlazování. Mývají zpravidla lepší vlastnosti než litiny temperované. Grafitické litiny se dělí do tří skupin:

- Litina s lupínkovým grafitem (šedá litina)
- Litina s kuličkovým grafitem (tvárná litina)
- Litina s červíkovitým grafitem

Z grafitických litin se pro obráběcí stroje používá litina šedá a tvárná. [4,5]

2.2 Ocelolitina

Ocelolitina je litá ocel a bývá používána jako kompromis mezi litinou nebo ocelí. Její vlastnosti jsou zpravidla v rozmezí mezi litinami a oceli. Používají se v případech potřeby odlitých dílců s vyšší pevností než má litina.

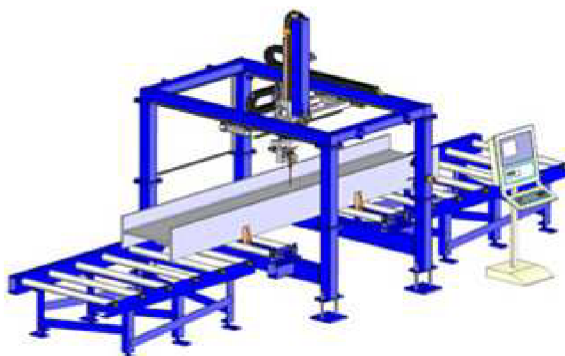


Obr. 2.1 – Horizontální vrtačka z ocelolitiny [28]



2.3 Ocel

Ocelové konstrukce se používají výhradně jako svařované. Největší výhodou ocelových konstrukcí je úspora materiálu, což se projeví v nižší hmotnosti a ceně. Oproti šedé litině je úspora materiálu až 30% při stejných nebo i lepších hodnotách celkové tuhosti rámu stroje a to zejména při ohybovém a krutovém namáhání. Z oceli se dále vyrábí téměř všechny ostatní díly obráběcích strojů, ať se jedná o hřídele, ozubená kola, sklíčidla, ložiska aj. [1]



Obr. 2.2 – Svařovaný rám firmy Ocean Machinery Inc. [29]

2.4 Srovnání kovových materiálů

Tab. 1 – Srovnání vlastností kovových materiálů [1, 13]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu		
	Litina	Ocelolitina	Ocel
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7200	7400	7850
Modul pružnosti [GPa]	80 ÷ 110	170	210
Pevnost v tlaku [MPa]	700 ÷ 1200	-	250 ÷ 1200
Pevnost v tahu [MPa]	150 ÷ 400	400 ÷ 700	400 ÷ 1600
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	10	9,5	11 ÷ 18
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	50	-	47

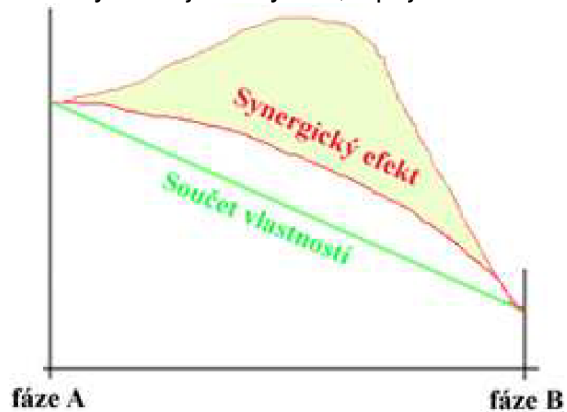
Nejstarší používané materiály pro konstrukci obráběcích strojů jsou litinové. Velmi dobré konstrukce s výborným tlumením, dobrou tepelnou stálostí, avšak ne příliš vysokou pevností a z toho tedy vyplývající vyšší hmotností konstrukce. Dále je zde celá řada technologických omezení, jako nemožnost odlít zcela uzavřené průřezy namáhané na krut, nebo nutnost větší tloušťky odlitku, než je potřeba z hlediska požadované tuhosti. V poslední době převažuje trend „recyklace“ starých litinových rámců, které se konstruovaly značně předimenzované a za desítky let se v nich ustálily všechny chemické procesy, díky čemuž mají lepší vlastnosti než mnohé moderní litinové rámy. [1]

V druhé polovině dvacátého století však začaly pokusy s ocelovými svařovanými konstrukcemi. To vedlo ke značné úspoře materiálu a postupně se k tomuto řešení začíná přiklánět stále více výrobců. Ocelolitinové rámy se používají jen výjimečně.



3 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály tvoří jedna nebo více nespojitých fází, uložených ve fázi spojitě. Tyto fáze mají výrazně odlišné mechanické, chemické nebo fyzikální vlastnosti. Nespojitá fáze mívá vyšší pevnost než fáze spojitá a bývá nazývána jako výztuž, spojitá fáze se nazývá matrice a mívá vyšší plasticitu. Matrice slouží jako pojivo výztuže a přenáší na ni i většinu zatížení. Typickou vlastností kompozitních materiálů je tzv. synergismus, neboli „spolupráce“. To znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší než součet jednotlivých složek. Dalším charakteristickým prvkem je mechanické mísení jednotlivých složek, čímž se kompozity liší např. od slitin, které jsou taktéž heterogenní. Kompozitní materiály lze dělit podle řady kritérií, z nichž nejčastější jsou:



Obr. 3.1 – Synergický efekt [30]

- Podle druhu spojitě fáze
 - kovová
 - polymerní
 - keramická
 - uhlíková
- Podle druhu nespojitě fáze
 - kovová
 - keramická
 - polymerní
 - skleněná
 - uhlíková
- Podle geometrického tvaru nespojitě fáze
 - částicová
 - vláknová [6,7,8]



Obr. 3.2 – Typy výztuže [7]

Nejtypičtější představitel kompozitních materiálů je železobeton, kde je výztuž tvořena ocelovými pruty a matricí samotný beton.



3.1 Částicové kompozity

Částicové kompozity jsou materiály, u nichž nespojitá část bývá nahodile orientována a je tvořena částicemi. Oproti vláknovým kompozitům je objemový podíl částicové výztuže menší, a to od jednotek do desítek procent. Mechanické vlastnosti bývají vlivem nespojitosti výztuže horší než u vláknových kompozit, z čehož vyplývá převažující role matrice při přenosu zatížení. Oproti jiným materiálům mají částicové kompozity vyšší tuhost, lepší tvarovou stálost a lepší otěruvzdornost. Výztuž bývá levnější a často redukuje náklady při výrobě. Mechanické vlastnosti ovlivňuje především chemické složení výztuže, tvar, velikost povrchu a povrchová úprava částic a jejich objemový podíl.

Hlavní výhody částicových kompozit jsou:

- levnější cena
- poměrně jednoduchá výroba (odlívání, práškové procesy aj.)
- vysoký počet různých druhů výztuže a matrice [18]

Částicové kompozity by se daly definovat dle následujících vlastností:

- Všechny částice výztuže mají přibližně stejnou velikost a jsou vzájemně odděleny.
- Nejčastější tvary nespojitě fáze jsou krychle, koule, tyčinka, destička nebo nepravidelný tvar.
- Nespojitá fáze může být kombinována různými druhy materiálů.
- Částice zabraňují rozvoji plastických deformací ve spojitě fázi.
- Přenášení zatížení ze spojitě části na výztuž je nižší než u vláknových kompozitních materiálů.
- Zlepšují tuhost a povrchovou tvrdost a vlastnosti materiálu při zvýšené teplotě. [6]

Ve stavbě obráběcích strojů se jako částicové kompozitní materiály používají žula, polymerní betony a vysokohodnotné betony. Na obrázku žuly je jasně vidět šedá křemíková matrice s černými body amfibolu.



Obr. 3.3 – Žula [31]



3.1.1 Granit

Žula je vyvřelá magmatická hornina tvořena křemenem, živcem a menším množstvím tmavých minerálů. Již dlouhá století se používá ve stavebnictví například jako dlažební kostky, dekorativní materiál interiérů, v sochařství a jinak. V poslední době žula nachází své uplatnění také jako výborný konstrukční materiál obráběcích strojů. Díky svým výborným fyzikálním vlastnostem se používá především pro konstrukci loží vysoce přesných strojů, jako jsou brusky, souřadnicové vyvrtávačky nebo pro měřicí stroje. Masivní bloky žuly tvoří většinou nepohyblivé stoly (lože), příčníky apod. Pracovní plochy jsou velmi precizně opracovány a mohou sloužit i jako vodící plochy. Důvodem pro použití tohoto materiálu je jeho vysoká tuhost, nízký součinitel teplotní roztažnosti, velmi nízký součinitel tepelné vodivosti, vysoká odolnost proti opotřebení atd. Firmy používající granit jsou například ELB, Prävema, Buderus, Microplan Group, Ergbert Reitz Naturstechnik, JFA CNC, East Star, Johann Fischer atd. [10]



Obr. 3.4 – Měřicí stroj firmy Microplan [32]

Tab. 2 – Základní fyzikální vlastnosti některých druhů žuly dle firmy Microplan Group [11]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu			
	Černý granit	Úplně černý	Modrý Lanhelin	Celith
Hustota [kg.m ⁻³]	2 850	3 000	2 700	2 300
Pórovitost [%]	0,09	0,15	0,35	-
Modul pružnosti [GPa]	60 ÷ 105	90 ÷ 103	44 ÷ 58	30 ÷ 40
Pevnost v tlaku [MPa]	244	270	188	120 ÷ 150
Pevnost v tahu [MPa]	24	25	21,5	10 ÷ 15
Součinitel tepelné roztažnosti [K ⁻¹ .10 ⁻⁶]	6,5	5,9	7,4	10 ÷ 15
Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	2	2,5	2	1 ÷ 3
Tvrdoost dle Vickerse [HV]	814	800	880	-
Země původu	Afrika	Indie	Francie	Francie
Barva	Tmavě šedá	Černá	Šedá	Přírodní



Obr. 3.5 – Základ obráběcího stroje z Celithu firmy Microplan Group [33]

je používán pro rozměrné struktury strojů, a to především proto, že je velmi obtížné získat velké bloky žuly z afrických těžišť. Umělá žula, nebo také **Celith**, je díky svým výborným tlumícím vlastnostem a možnosti vyrábět velké bloky, používána pro základy obráběcích strojů. Je to kompozit složený ze dvou složek, jemné (Dioritu) a hrubé (modré žuly), spojených epoxidovými pryskyřicemi. Jednotlivé dílce se dají přímo vytvarovat do požadovaného tvaru, čímž odpadají náklady na obrábění (řezání, frézování, vrtání). V případě potřeby je možné některé prvky přidat lepením. Přímou do struktury je též možno začlenit pneumatické či hydraulické vedení, části přírodní žuly nebo kovové výztuže pro zvýšení pevnosti.[11]

Použití žuly má kromě všech svých výhod i své nevýhody., především co se konstrukčních možností týká. Mezi největší nevýhody patří především prakticky nemožnost provádět změny na již hotové konstrukci, komplikované spojování s ostatními dílci a nákladná výroba jednotlivých dílců. Některé nevýhody odstraňuje Celith, ovšem za cenu mírně zhoršených fyzikálních vlastností, jež mají přírodní žuly.[12]



Obr. 3.6 – Nosná struktura měřicího stroje firmy Jian East Star precision Measure Co [34]



Obr. 3.7 – Bruska firmy Präwema [35]

Jak již z tabulky vyplývá, není pouze jeden druh žuly, ale druhů hned několik, včetně žuly umělé. Každý typ má mírně odlišné vlastnosti, z čehož poté vychází jejich použití. Například **černý granit**, pocházející z Afriky, se používá především pro velmi přesné měřicí přístroje, **úplně černý granit**, pocházející z Indie, zase na středně nebo vysoce přesné výrobní stroje.

Modrý Lanhelin, původem z Francie,



3.1.2 HPC betony

Betony se ve stavbě obráběcích strojů objevily již na počátku dvacátého století. Jednalo se o běžné hydrobetony, bez zjevně zvýšených tlumících či jiných potřebných vlastností, nicméně položily základ tomuto materiálu v oblasti stavby strojů. V prvopočátcích se beton používal spíše výjimečně a to jak na nosné, tak na opěrné části, namáhané jak staticky, tak dynamicky. Většího rozmachu se betonové konstrukce dočkaly v období druhé světové války, kdy bylo jeho hojnější využívání zapříčiněno vytížeností sléváren a oceláren výrobou dílců pro válečné účely. V poválečném období se od betonových konstrukcí opět upouštělo. Zvrat přišel až v letech sedmdesátých, kdy se přední výrobci k betonovým konstrukcím začali vracet. [1,12]

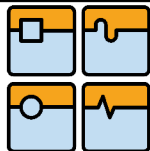


Obr. 3.8 - Rám stroje z Hydropolu firmy Framag [36]



Obr. 3.9 - Rám stroje z Hydropolu firmy Framag [37]

Hlavní rozdíl HPC betonů proti normálním betonům je dodatečné tepelné zpracování a řízené chladnutí, čímž se eliminuje přirozené časové smršťování a dosáhne se tak lepší rozměrové stálosti. Hydrobeton se dá použít například ke zlepšení vlastností stávajících litinových nebo ocelových konstrukcí. Zlepšení se provádí vylitím vnitřního prostoru konstrukce. Tím se podstatně navýší celková tuhost a stabilita stroje (díky vyšší hmotnosti). Další z možností využití je vylití ocelových tenkostěnných konstrukcí betonem, čímž odpadá nutnost žebrování, z čehož posléze plynou finanční úspory. Velkou výhodou je možnost vyrábět dílce za pokojové teploty, což vede k výrazné úspoře. Při výrobě betonového rámu se využívá tradiční technologie odlévání do forem. Formy mohou být jak kovové, tak třeba dřevěné. Dřevěné jsou méně přesné (± 1 mm) a vydrží jen omezený počet cyklů (cca 20 odlití), ale jsou výrazně levnější. Hodí se proto především pro kusovou či malosériovou výrobu. Kovové formy dosahují mnohem vyšší přesnosti (± 0.05 mm) a životnosti až 1000 cyklů. [1]



Stejně jako do umělé žuly, Celithu, se dají do betonových struktur zalít dílce pro důležité funkční plochy. Ty bývají z kovu a volí se z důvodu nemožnosti betonů přenášet příliš vysoké zatížení na malé ploše. Funkční plochy musejí být do rámu zality s potřebně velkou pevností spojení. Je tedy potřeba správný tvar a velikost stykové plochy, aby rozložení sil na základové těleso bylo co nejpříznivější. [1]

Výhodou hydrobetonu proti ocelovým konstrukcím je o řád nižší tepelná vodivost při



stejně teplotní roztažnosti, čímž hydrobetony slouží jako solidní tepelná izolace. Dále vysoká pevnost v tlaku, velmi dobrá přilnavost k ocelovým součástem, možnost zvýšení objemu při tuhnutí pomocí speciálních příměsí, což je žádoucí především u vyplňování dutin litinových a ocelových loží, a vysoké tlumení. Mezi nevýhody patří nízká pevnost v tahu (10x ÷ 15x menší než pevnost

Obr. 3.10 - Lože z HYPERCONU firmy TOSHULIN [9]

v tlaku) a malá odolnost vůči olejům a chemikáliím. Nízká pevnost v tahu se dá odstranit tzv. armováním (vytvořením železobetonu), v případě nutnosti lze také vytvořit beton předepjatý, kdy díky vysokému tahovému napětí kovových vláken je beton touto výplní sám stlačován, což vede k výraznému navýšení pevnosti v tahu. Špatná odolnost vůči chemikáliím lze zmírnit speciálními nátěry. Výrobou hydrobetonových loží se zabývá například rakouská firma Framag s materiálem pod označením Hydropol, německá firma Max Bögl se svým materiálem zvaným HIPERCON, jež používá například firma TOSHULIN nebo firma Demmeler se svým materiálem DemTec. [1,9,10,12,14]

Firma Framag - Hydropol:

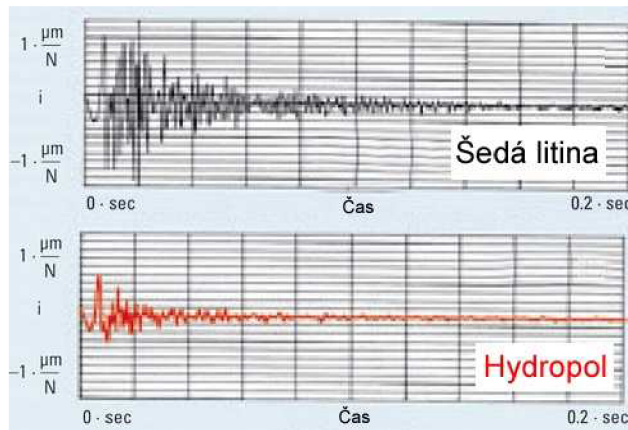
Tab. 3 – Základní fyzikální vlastnosti Hydropolu [36]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu		
	Hydropol	Hydropol Light	Hydropol Superlight
Hustota [kg.m ⁻³]	až 2 500	1 200	700
Modul pružnosti [GPa]	až 60	12	4,5
Pevnost v tlaku [MPa]	až 100	9 ÷ 10	6 ÷ 8



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Hydropol se používá především na nosné části strojů. Hydropol Light a Superlight se používají díky své nízké hmotnosti spíše pro pohyblivé součásti nebo třeba pro frézovací hlavy.



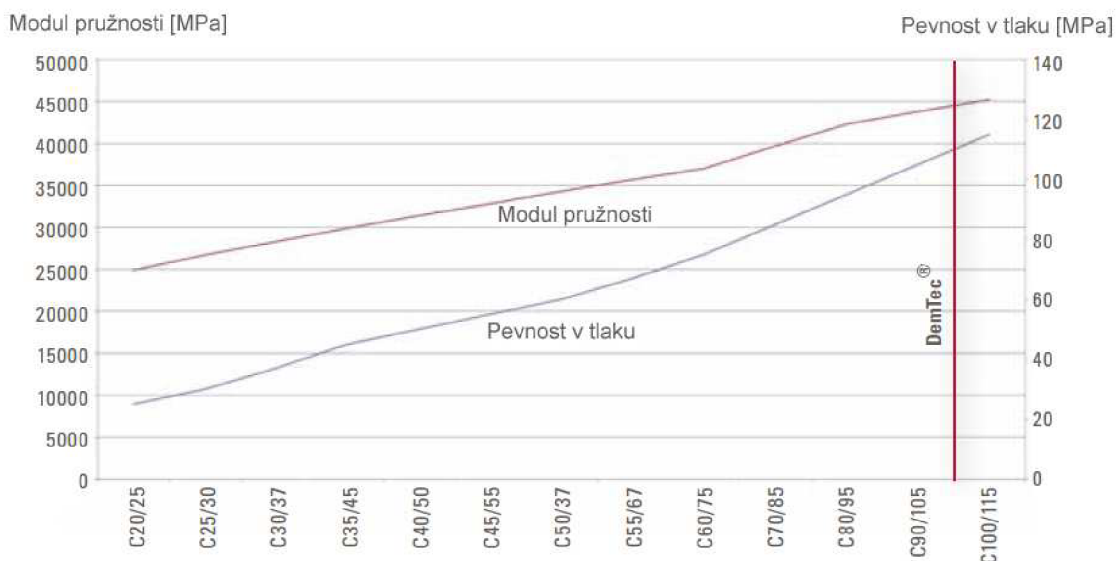
Obr. 3.11 – Tlumení Hydropolu [36]

Firma Max Bögl – HIPERCON:

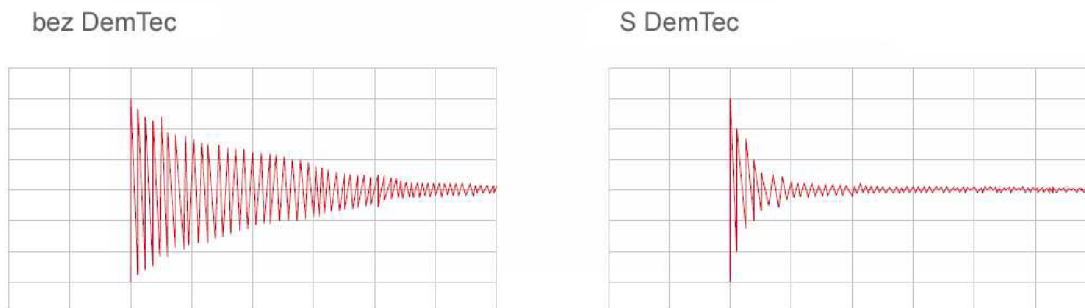
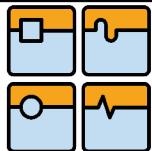
Tab. 4 – Základní fyzikální vlastnosti HIPERCONU [48]

Fyzikální vlastnosti	HIPERCON
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2500÷2700
Modul pružnosti [GPa]	50÷60
Pevnost v tlaku [MPa]	100÷200
Pevnost v tahu [MPa]	8÷10
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	10,6
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1,7

Firma Demmeler – DemTec:



Obr. 3.12 – Pevnost materiálu DemTec [38]



Obr. 3.13 – Tlumení vylitých konstrukcí DemTecem [38]

3.1.3 Polymerní betony



Obr. 3.14 – Rám stroje z minerální litiny RHENOCAST firmy Schneberger [39]

Polymerní betony, nazývány též jako minerální litiny, jsou materiály poměrně nové. Poprvé se v širším měřítku objevily až v roce 1979 na výstavě EMO v Paříži. Výztuž tvoří přírodní nebo umělá keramika, matrici většinou epoxidové pryskyřice (také metacrylátové nebo nenasycené polyesterové pryskyřice). Vylití do forem se provádí na vibračních stolech z důvodu lepší zabíhatelnosti a těsně před vylitím se do směsi přidává tužidlo pro rychlejší tuhnutí

(10-15 minut, nutno zahřát). Polymerní betony mají v podstatě totožné využití jako betony vysokohodnotné a používají prakticky stejnou technologii vylití do forem. Výhodou je vyšší pevnost v tahu a výborná tlumící schopnost, kdy tlumení rázů je až 30x vyšší, než u šedé litiny a 40x vyšší než u ocelí, což zajišťuje mnohem delší životnost obráběcích nástrojů a vysokou jakost obrobené plochy. Do polymerbetonů se dají, stejně jako u umělé žuly nebo HPC betonů, vsadit a zalít potřebné konstrukční prvky přímo do odlévané struktury (vedení, kabely aj.). Oproti normálním betonům mají navíc výbornou chemickou odolnost, což odstraňuje nutnost speciálních nátěrů.

Polymerní betony jsou díky svým tlumícím vlastnostem vhodné pro stavbu rámců frézovacích a brousicích strojů. Využívány jsou nejčastěji v Německu, kde se také soustředí jejich nejvýznamnější výrobci, jako například Mikrosa, Schaudt a Studer, kteří používají především Granitan. Dále firmy Emag (se svým materiálem Mineralit), Colchester, Hermle, Schneberger (RHENOCAST), MBA, Epucet (Epument). [10,15,19]



Firma Schneeberger – RHENOCAST:

Tab. 5 – Základní fyzikální vlastnosti RHENOCASTU [39]

Fyzikální vlastnosti	RHENOCAST
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2 300 ÷ 2 450
Modul pružnosti [GPa]	40 ÷ 45
Pevnost v tahu [MPa]	15 ÷ 20
Pevnost v tlaku [MPa]	100 ÷ 120
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	11,5 ÷ 14
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1,5 ÷ 2
Tepelná kapacita [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1,2

Firma Epucet – Epument:

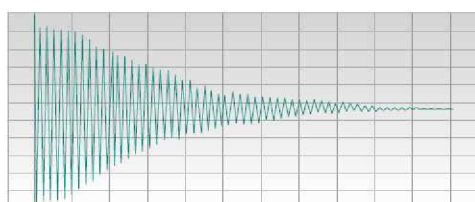
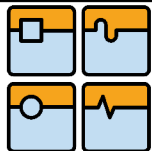
Tab. 6a – Základní fyzikální vlastnosti různých druhů Epumentu [16]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu		
	Epument 145/B	Epument 140/8B	Epument 140/5
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2400	2300	2300
Modul pružnosti [GPa]	40 ÷ 45	35 ÷ 40	30 ÷ 35
Pevnost v tlaku [MPa]	130 ÷ 150	120 ÷ 150	140 ÷ 160
Pevnost v ohybu [MPa]	30 ÷ 35	30 ÷ 35	35 ÷ 45
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	15	16	19,5
Poissonův poměr	0,3	0,29	0,28

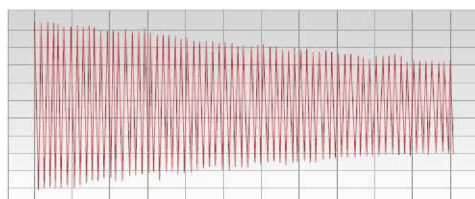
Tab. 6b – Základní fyzikální vlastnosti různých druhů Epumentu 140 ISN, Epumouldu a Eputexu [16]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu		
	Epument 140 ISN	Epumould 100	Eputex WM71
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2700	1600	1100
Modul pružnosti [GPa]	20 ÷ 25	8 ÷ 12	2 ÷ 4
Pevnost v tlaku [MPa]	130 ÷ 150	140 ÷ 160	80 ÷ 120
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	18,5	40	50

Epument 145/B se používá pro odlévání velkých strojních součástí až do 15 tun (např. sloupy, stroje lůžek), Epument 140/8B pro součásti do 2 tun a Epument 140/5 pro části do 500 kg. Všechny tři materiály se navíc používají jako výplně svařovaných konstrukcí. Epument 140 ISN se používá pro umístění vedení, ložisek a jiných částí, Epumould pro dílce s požadovanou vysokou přesností a Eputex pro slepování jednotlivých dílců z minerálních litin dohromady.



Mineralit



Obyčejný beton



Obr. 3.15 – Tlučení Mineralitu a stroj se základem z Mineralitu [40]

3.1.4 Porovnání částicových kompozit

Částicové kompozity se používají v naprosté většině jako nosné soustavy strojů. Výhody oproti tradičním materiálům jsou dobré tlumící vlastnosti, vyšší tepelná kapacita, nižší tepelná vodivost a mnohem nižší tepelná roztažnost. Jelikož se jedná prakticky o přírodní materiály, tak je velkou předností jejich ekologičnost. Nevýhoda je především nízká pevnost v tahu, tlaku a nízký modul pružnosti oproti konvenčním materiálům.

Pokud porovnáme mezi sebou hydrobetony, polymerbetony a granit, zjistíme, že se od sebe poměrně výrazně liší. Granit má téměř ve všech ohledech lepší vlastnosti než betony. Vynikající rozměrová stálost, vyšší pevnost v tlaku a jen o málo nižší pevnost v tahu, tlumení na úrovni šedé litiny a absence vnitřního pnutí. Nevýhoda je především vyšší cena plynoucí z vysokých požadavků na obrobené plochy, kdy je potřeba broušení všech ploch. Další nevýhoda vychází z komplikací při samotné těžbě, kdy nelze získat rozměrově neomezeně velké žulové bloky. Lze tedy jen výjimečně použít opravdu masivní bloky. Toto může odstranit umělá žula, která by se ovšem dala zařadit mezi minerální litiny. Používá stejné technologie lití, rozdíl je pouze ve výztuži, která je tvořena rozemletou žulou. Díky těmto vlastnostem se granit používá především jako základová tělesa měřících strojů, mikrofrézovacích strojů nebo velmi přesných brusek.

Polymerbetony vynikají oproti žule především vyšší pevností v tahu a možností odlít jakýkoliv tvar, jakékoliv velikosti. Dále možnost vylít svařovaných konstrukcí a tím podstatně zvýšit tlumící a tepelné vlastnosti stroje. Jako funkční plochy jsou používány ocelové dílce zalité do samotné konstrukce. Cenově jsou polymerbetonové dílce oproti žule příznivější, především u větších sérií (30 a více za rok). U menších sérií se hodí spíše žula, protože výroba forem, obvykle kovových, je poměrně drahá. Stejně jako žula jsou chemicky netečné vůči chladicí kapalině a olejům. Do hotových konstrukcí, stejně jako u žuly, se dají změny dělat jen velmi omezeně. [1]



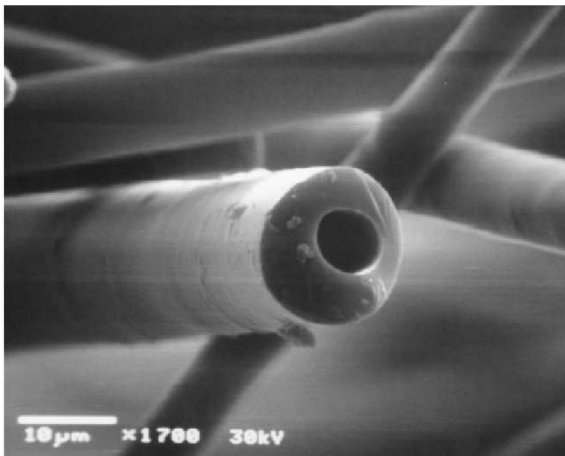
HPC betony jsou, stejně jako polymerbetony, velmi vhodné pro vylepšení stávajících konstrukcí vylitím dutých míst. Díky možnosti dodatečně přidat předpětí lze zabránit tvorbě trhlin a minimalizovat průhyb. Proti polymerbetonům a žule je nevýhoda velmi nízká pevnost v tahu a velmi slabá odolnost proti olejům a emulzním kapalinám. [1]

Tab. 7 – Vlastnosti částicových kompozit [11, 16, 36, 39, 48]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu		
	Granit	Polymerbeton	HPC beton
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2 700 ÷ 3 000	2 300 ÷ 2 500	2 500 ÷ 2 700
Modul pružnosti [GPa]	45 ÷ 105	30 ÷ 45	45 ÷ 60
Pevnost v tlaku [MPa]	188 ÷ 270	100 ÷ 160	100 ÷ 200
Pevnost v tahu [MPa]	21 ÷ 25	20 ÷ 40	8 ÷ 10
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	5,9 ÷ 7,4	12 ÷ 20	10,6
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	2 ÷ 2,5	1,5 ÷ 2	1,7

3.2 Vláknové kompozity

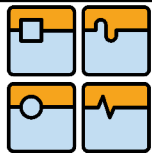
Pomineme-li výskyt vláknových kompozit v přírodě (dřevo aj.), pak lidstvo zná tento druh materiálů již řadu stolení. Pro příklad hliněné cihly s kousky slámy nebo turecké laminované luky, které byly složeny z několika plátků různých druhů dřev. Co se moderního pojetí vláknových kompozit týká, tak historie sahá až do roku 1907, kdy byl udělen patent na bakelit, což byla fenolová pryskyřice s výztuží z asbestových vláken. Největší pokrok byl však učiněn při dobývání vesmíru a v letecké technice všeobecně, kvůli nutnosti maximálně snižovat hmotnost a přitom zachovat potřebnou pevnost.



Obr. 3.16 – Duté uhlíkové nanovláknko [21]

Ve vláknových kompozitech je výztuž tvořena vlákny orientovanými obvykle jedním směrem, uzavřená v různých druzích matrice. Objemový podíl vláknové výztuže je od 5 do 80 procent. Vlákna přenášejí hlavní podíl zátěže díky své spojitosti a díky svému vyššímu obsahu v materiálu. Vlákna mívají průměr od jednoho do sta mikrometrů, mohou mít ale i méně než jeden mikrometr, v podobě krátkých, nespojitých nanovláken. Vlákna mají vždy větší pevnost než těleso ze stejného materiálu. Důvodem je malý příčný průřez vláken - v tenkých vláknech jsou minimalizovány rozměry vad, jak vnitřních, tak povrchových.

Z hlediska fyzikálních vlastností mají vláknové kompozitní materiály naprosto bezkonkurenční kvality. Nevýhodou je rozhodně cena, která je, například u uhlíkových vláken, obrovská. V roce 2006 stál např. 1 kg skleněných vláken 2-3 €, aramidy 20-30 €,

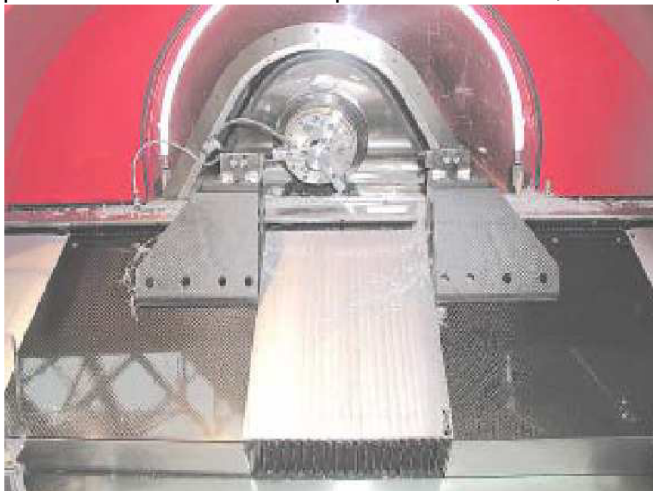


borová vlákna 350 € a uhlíková 1000 €. Další nevýhodou je nezkušenost techniků s těmito materiály. V budoucnu, až se zefektivní výroba, však jistě budou mít vláknové kompozity rozhodující postavení na poli konstrukčních materiálů. [20,21]

Pro konstrukci částí obráběcích strojů z vláknových kompozit se používají především kompozity na bázi uhlíku nebo keramika. Nejčastější využití nacházejí v konstrukci vřeten, vřeteníků, ložisek nebo rámu menších strojů.

3.2.1 Uhlíkové kompozity

V konstrukci obráběcích strojů se kompozity na bázi uhlíkových vláken zatím příliš nevyskytují a v současnosti se této problematice stále věnují spíše výzkumná a vývojová centra. V komerční sféře jsou celouhlíkové konstrukce raritou, používají se spíše jako výztuže ocelových základů. Oproti jiným kompozitním materiálům jsou výhody uhlíkových vláken především velmi malá teplotní roztažnost, velká pevnost v tahu, dobré tlumicí vlastnosti a



Obr. 3.17 – Experimentální soustruh z uhlíkových vláken (Fraunhoferův institut IPT)[12]



Obr. 3.18 – Rám z uhlíkových nosníků pro měřící stroje firmy CompoTech [42]

především velmi malá hmotnost. Tyto vlastnosti předurčují využití tohoto materiálu na vysoce namáhané pohyblivé dílce, přičemž je možné navrhovat součásti s optimální tuhostí. Další výhodou je praktická rezistence vůči korozi.

Mezi nevýhody patří především v současné době stále velmi vysoká cena, komplikované spojování s ostatními dílci, velmi omezené možnosti upravovat již hotové konstrukce a komplikovaný návrh konstrukce jako celku (mechanika laminátů je složitější než homogenních materiálů). [12,20,21]

Pevnost uhlíkových vláken je poměrně hodně rozličná a to v závislosti na technologii výroby, jichž se v současné době používá kolem deseti (např. ovíjení, navíjení, lisování, pultruze aj.) přičemž rozhodujícím parametrem určujícím konečnou pevnost je dosažená hustota (objemový podíl) vláken v laminátu. Jako nejlepší se prozatím jeví pultruze, kdy se dosahuje až 80% podílu vláken v laminátu. Dalším významným faktorem určujícím výsledné vlastnosti je druh pojiva. [22]

Výrobou dílců z uhlíkových vláken se zabývá například česká firma CompoTech s.r.o.

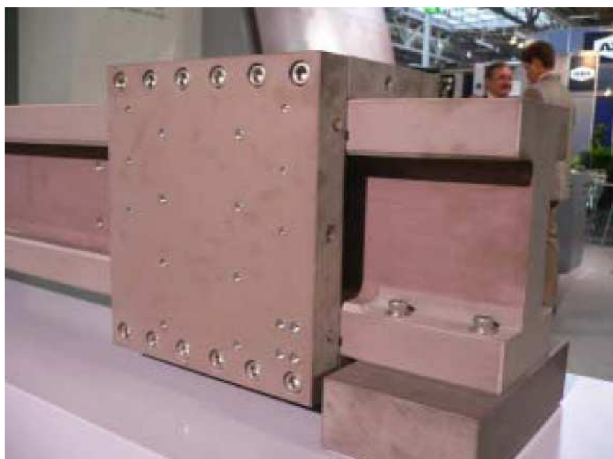


Tab. 8 – Vlastnosti laminátů z uhlíkových kompozit [12]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu		
	Středně modulové	Vysoko modulové	Ultra-vysoko modulové
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1550	1550	1550
Modul pružnosti [GPa]	100 ÷ 180	170 ÷ 200	200 ÷ 370
Poměrné tlumení	0,001 ÷ 0,05	0,001 ÷ 0,05	0,001 ÷ 0,05
Součinitel tepelné roztažnosti [K^{-1}]	12	12	12

3.2.2 Keramické kompozity

Keramické materiály jsou na tom oproti uhlíkovým vláknům, co se stádia vývoje a uplatnění v praxi týče, o poznání lépe. Již nyní se můžeme setkat s vřeteny na bázi SiSiC od



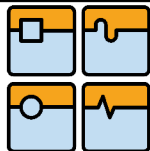
Obr. 3.19 – Nosník portálu laserového obráběcího stroje [12]

společnosti Erwin Junker Grinding Technology a.s. nebo s ložisky s keramickými kuličkami od mnoha různých firem. Hlavními přednostmi jsou velice nízká tepelná roztažnost, poloviční hmotnost v porovnání s oceli a litinami, velmi vysoká pevnost v tlaku a ohybu a vysoká odolnost vůči chemikáliím. Nevýhody jsou především vysoká cena, složité spojení s jinými částmi obráběcích strojů a omezené rozměry dílců. [12]

Vyjma vysoké ceny nejsou tyto nevýhody příliš velkým problémem u konstrukce vřeten nebo valivých těles ložisek. Komplikací jsou při konstrukci nosných těles, kdy je předpoklad potřeby větších, a mnohdy spojovaných, dílců. Proto se v současnosti tomuto problému zatím stále věnují vývojová centra. Nicméně vlastnosti keramiky dávají předjímat, že v budoucnu se s tímto materiálem u rámců, stojanů či příčniců, budeme setkávat stále častěji.

U ložisek je tomu naopak. V současné době se používá mnoho druhů ložisek buď pouze s valivými tělesy z keramiky nebo celo-keramické. Důvodů použití keramiky je vícero a vycházejí z požadavků na ložiska vřeten, které jsou:

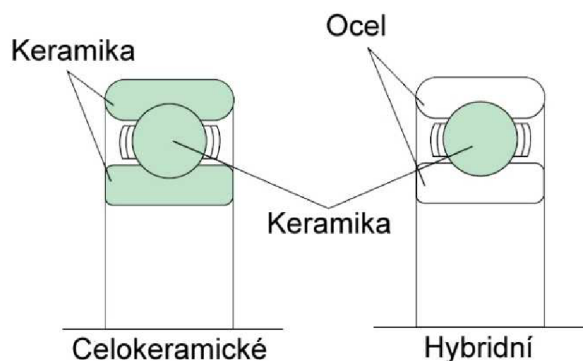
- Vysoká tuhost - malá deformace
- Malé pasivní odpory - tření způsobující zahřátí
- Malé opotřebení - zvětšování vůle
- Klidný chod



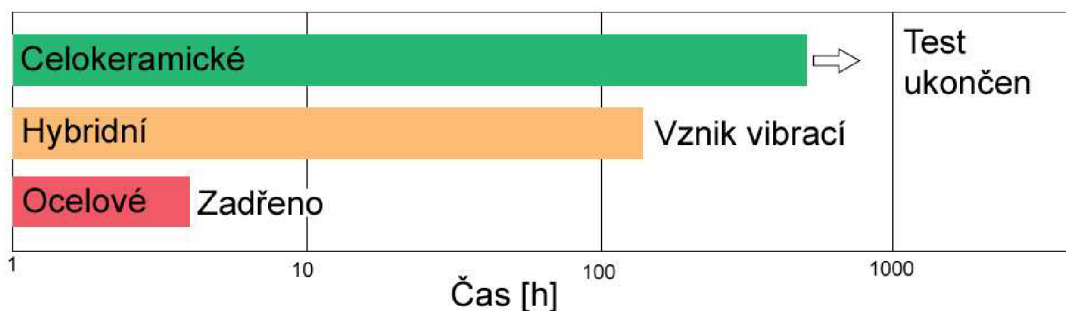
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vysokou tuhost zajišťuje velmi vysoká pevnost v tlaku a vysoká tvrdost, která zároveň zabraňuje rychlému opotřebení. Nízká hmotnost redukuje odstředivé síly a usnadňuje dosažení vyšších otáček. Drsnost povrchu bývá taktéž velmi malá, až Ra 0,01, což vede ke snížení tření. [25]

Hybridní keramická ložiska mají při absenci mazání až 20x vyšší životnost než ložiska ocelová, celo-keramická až 100x. Výrobou hybridních keramických ložisek se zabývá mnoho firem ve světě a i v České republice. Jsou to například SKF, NSK, NKN Fafnir, Red-hill a další.



Obr. 3.20 – Celokeramická a hybridní keramická ložiska [24]



Obr. 3.21 – Životnosti keramických a ocelových ložisek firmy NSK při běhu bez mazání při radiálním zatížení 780N a otáčkách 500 min⁻¹ [24]

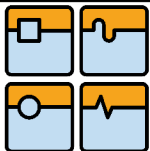
Firma SKF:

Tab. 9 – Vlastnosti ložiskové keramiky firmy SKF [49]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu
	Nitrid křemíku
Hustota [kg.m ⁻³]	3 200
Modul pružnosti [GPa]	310
Tvrdost dle Vickerse [HV]	1 600 HV10
Součinitel tepelné roztažnosti [K ⁻¹ .10 ⁻⁶]	3
Elektrický odpor [Ωm]	10 ¹² (izolátor)



Obr. 3.22 – Hybridní keramická ložiska firmy SKF [43]



Firma NSK:

Tab. 10a – Vlastnosti ložiskové keramiky firmy NSK [24]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu	
	Nitrid křemíku	Karbid křemíku
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	3 200	3 100
Modul pružnosti [GPa]	310	420
Tvrdost dle Vickerse [HV]	1 600	2 200
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	2,8	4,3
Pevnost v ohybu [MPa]	900	600
Odolnost vůči teplotním šokům [$\Delta T, ^\circ\text{C}$]	800	500

Tab. 10b – Vlastnosti ložiskové keramiky firmy NSK [24]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu	
	Oxid hliníku	Oxid zirkonný
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	3 700	5 900
Modul pružnosti [GPa]	350	210
Tvrdost dle Vickerse [HV]	2 000	1 400
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	7,5	10,5
Pevnost v ohybu [MPa]	400	1 100
Odolnost vůči teplotním šokům [$\Delta T, ^\circ\text{C}$]	200	300

Nitrid křemíku se u ložisek pro vřetena obráběcích strojů používá již více než 10 let. Pro představu spolehlivosti těchto ložisek je dobré podotknout, že se používají například i v leteckých motorech, kde spolehlivě pracují díky svým výborným tepelně-mechanickým vlastnostem. V případě agresivnějšího prostředí se používá karbid křemíku, který má vyšší odolnost vůči chemikáliím. [24]



Obr. 3.23 – Keramický hřídel firmy PEMAVAKO [44]

Vřetena z keramiky tak časté jako keramická ložiska nejsou, nicméně už se začínají objevovat. Důvodů pro využití keramiky je mnoho, přičemž ten nejdůležitější je úspora hmotnosti, plynoucí z nižší hustoty a vyšší pevnosti materiálu než u oceli. Nižší hmotnost pozitivně ovlivňuje dynamiku, energetickou náročnost i cenu stroje, jelikož nebude zapotřebí tak výkonný pohon ani masivní rám. [26]

Pro zajímavost, návrhem keramického vřetene se zabývala i česká firma PEMAVAKO s.r.o.

Technickou keramikou dodávají například česká firma CeramTec (ROCAR), ruská firma Sodick (FineXCera) nebo italská firma Microplan.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Microplan:

Tab. 11 – Vlastnosti materiálu Si-SiC dle firmy Microplan [11]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu
	SiSiC
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	3 100
Modul pružnosti [GPa]	370
Pevnost v tlaku [MPa]	850
Pevnost v tahu [MPa]	-
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	160
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	3,7
Tvrдость dle Vickerse [HV]	2 500

CeramTec – ROCAR:

Tab. 12 – Vlastnosti karbidů křemíku firmy CeramTec [50]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu	
	SSiC ROCAR S1	SiSiC ROCAR SiG, SiF
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	3 150	3 070
Modul pružnosti [GPa]	430	340
Pevnost v tlaku [MPa]	3 500	3 500
Pevnost v tahu [MPa]	-	-
Pevnost v ohybu [MPa]	410	340
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	115	120
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	2,8 ÷ 4,6	3,4 ÷ 4,9
Tvrдость dle Vickerse [HV]	2300	1200 (Si) 2700 (SiC)

Sodick - FineXCera:

Tab. 13 – Vlastnosti keramických materiálů ruské firmy SODICK [51]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu	
	FineXCera SA610 (oxid Si)	FineXCera SN810 (nitrid Si)
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	3 500	3 200
Modul pružnosti [GPa]	270	300
Pevnost v tlaku [MPa]	-	-
Pevnost v tahu [MPa]	-	-
Pevnost v ohybu [MPa]	300	800
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	-	-
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	4,7	3,1
Tvrдость dle Vickerse [HV]	1300	1600



3.2.3 Srovnání vláknových kompozit

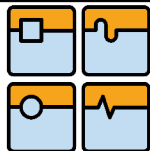
Vláknové kompozity, na rozdíl od částicových, nacházejí využití především v pohyblivých částech strojů. Je to dáno jejich výbornými mechanickými vlastnostmi, kdy například modul pružnosti, pevnost v tahu, tlaku nebo ohybu je až několikanásobně vyšší, než u konvenčních materiálů. Další velkou výhodou je faktická odolnost vůči korozi. Nevýhoda je v současné době především cena a malé zkušenosti. To se však v budoucnu jistě změní. Jak již bylo napsáno výše, vláknové kompozity tvoří dvě hlavní skupiny a to je keramika a uhlíková vlákna.

Technická keramika je v současnosti používána v naprosté většině jako ložiskový materiál, kde pomáhá vytvářet odolnější, spolehlivější a účinnější ložiska. Další oblastí využívající keramické materiály jsou vřetena strojů, kde díky úspoře materiálu dochází ke snížení energetické náročnosti stroje. Při porovnání s uhlíkovými vlákny jsou sice více než dvakrát těžší, pevnostně je však překonávají. Výhodou je též schopnost přenášet stejné zatížení ve všech směrech (uhlíkové vlákna dokážou přenášet garantované zatížení pouze ve směru vláken). Další potenciální oblast využití je ve stavbě rámců, kde se opět uplatní díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem a své tepelné stálosti. Nevýhodou je poměrně velká křehkost oproti konvenčním materiálům a uhlíkovým vláknům. Druhů keramiky je velmi mnoho a prozatím se jeví jako nejperspektivnější keramika na bázi křemíku (používají se nitridy, karbidy nebo oxidy křemíku)

S uhlíkovými vlákny je to trochu složitější. Velmi záleží na druhu použitého pojiva a způsobu výroby, který určuje výslednou hustotu vláken, což je rozhodující faktor udávající výsledné mechanické vlastnosti. Výhodou proti keramice je možnost tzv. vyztužení konvenčních materiálů např. „ovinutím“ vřetene, což je v současné době jediný využitelný způsob uhlíkových vláken vzhledem k jejich vysoké ceně.

Tab. 14 – Srovnání vláknových kompozit [11,12,24,49,50,51]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu		
	Uhlíková vlákna	Keramika na bázi hliníku	Keramika na bázi křemíku
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1550	3 700	3070 ÷ 3 500
Modul pružnosti [GPa]	100 ÷ 370	350	270 ÷ 430
Pevnost v tlaku [MPa]	-	-	850 ÷ 3 500
Tvrdost dle Vickerse [HV]	-	2 000	1 200 ÷ 2 700
Pevnost v ohybu [MPa]	-	400	300 ÷ 900
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	12	7,5	2,8 ÷ 4,9
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	-	-	115 ÷ 160

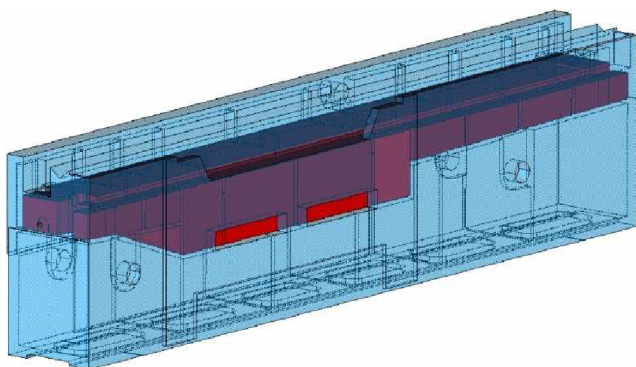


4 Hybridní struktury a materiály

Hybridní struktury a materiály kombinují nekonvenčních materiály jako uhlíková vlákna či Al pěna, s materiály konvenčními (ocel, litina), přičemž vznikají tyto typy hybridních struktur:

- Ocelový svařenec s betonovou výplní
- Litinový odlitek s pískovou výplní
- Polymerbetonový odlitek vyztužený uhlíkovými vlákny
- Ocelový svařenec vyztužený uhlíkovým laminátem
- Kombinace oceli a hliníkové pěny [12]

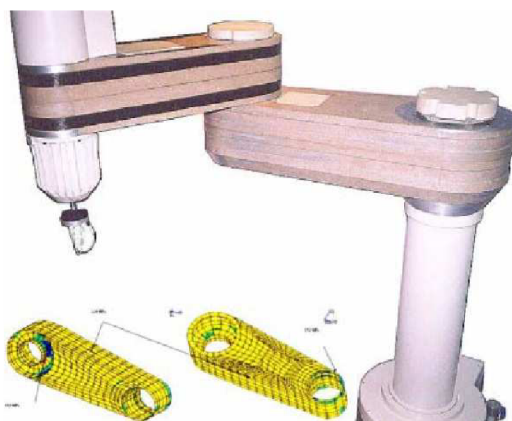
O kovových strukturách s betonovou výplní již bylo psáno v kapitole 3.1.2. Pro shrnutí; výhody takové struktury jsou vyšší tuhost, nižší tepelná vodivost a roztažnost a menší doba útlumu. Litinový odlitek



Obr. 4.1 - Dutina v loži brusky pro zaplnění pískovou směsí [12]

s pískovou výplní je struktura poměrně nová a v poslední době ji začali používat někteří výrobci litinových rámců. Nejprve se jednalo pouze o úmyslně zanechané pískové jádro v odlitku, kde bylo vlivem smrštění dílce pevně obemknuto odlitkem. Takováto struktura je sice těžší, ale zároveň dosahuje mnohem lepšího tlumení. Možnou variantou je též vyplnění odlitku pískem až po jeho zhotovení. Zde

ovšem vyvstává problém s udržení přetlaku pískové směsi v dutině po celou dobu životnosti dílce. Polymerbetonový odlitek vyztužený uhlíkovými vlákny je v současné době raritou. Tento koncept byl použit například u ramena manipulátoru tvořeného polymerbetonem. Ocelový svařenec vyztužený uhlíkovým laminátem je, podobně jako polymer s uhlíkovými vlákny, ojedinělý počín. Toto bylo použito při experimentální konstrukci stroje Hyundai, kde jsou křížové saně horizontálního uspořádání box-in-box tvořeny kombinací ocelového svařence a sendvičů s uhlíkovými lamináty. Toto řešení snížilo hmotnost pohyblivých dílců až o 30%, přičemž útlum vlastních tvarů kmitů se zvýšil proti konvenčnímu celoocelovému provedení víc jak 5x a stroj vykazuje při obrábění lepší výsledky než standardní konvenční provedení. O hliníkové pěně bude řeč v samostatné kapitole. [12]

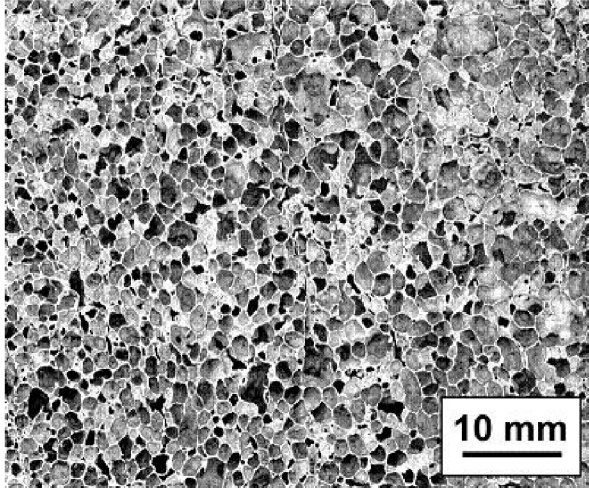


Obr. 4.2 – Rameno manipulátoru vyztužené uhlíkovými vlákny [12]



4.1 Hliníkové pěny

Hliníkové pěny se začaly objevovat v 90. letech dvacátého století, kdy se ve světě téměř současně objevily výsledky vývoje kanadské firmy Alcan, rakouské firmy Mepura

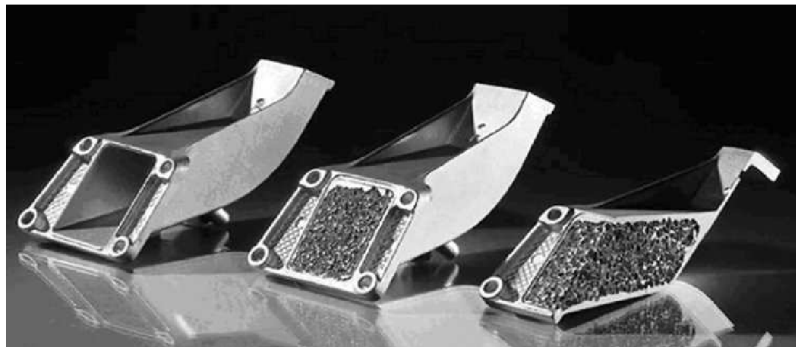


Obr. 4.3 – Struktura Al pěny [45]

Metallpulvergesellschaft a německého ústavu Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) z Brém. Původní okruh uplatnění kovových pěn byl především letecký, námořní a automobilový průmysl, kde se od tohoto produktu očekávala značná úspora hmotnosti. Později našel tento druh materiálu uplatnění i v jiných oborech, jako například kostní náhrady, kde se snoubí požadované vlastnosti jako nízká hmotnost při dostačující pevnosti a k tomu možnost prorůstání tkáně do implantátu, nebo v posledních letech

právě v konstrukci dílců obráběcích strojů pro svou extrémně nízkou hmotnost a velmi dobré tlumení. Mezi další vítané vlastnosti patří vysoká specifická tuhost, nízká tepelná vodivost (cca 10% vodivosti celistvého hliníku) dobré tlumení zvuku, velmi dobrá korozní odolnost a velmi jednoduché opracování. Pevnost hodně závisí na druhu použité slitiny, kdy se používá buď čistý hliník, nebo kombinace hliník-titan, hliník-hořčík-měď aj. Další parametr určující výsledné vlastnosti je způsob výroby, který ovlivňuje výslednou strukturu materiálu.

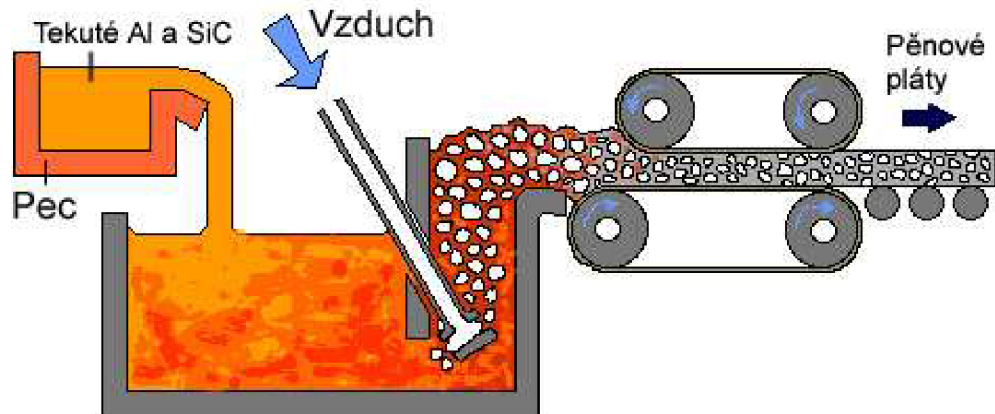
V současnosti se výrobou kovových pěn zabývá mnoho firem po celém světě, přičemž každá používá více či méně odlišné metody výroby a druhy slitin. V praxi se používají buď sendvičové struktury, kdy je kovová pěna vytvořena mezi dvěma ocelovými plechy, nebo se vypěňuje přímo požadovaný dílec.



Obr. 4.4 - Tvarové profily vyplněné hliníkovou pěnou firmy LKR Ranshofen [27]

Naplynění se provádí třemi základními metodami:

- Přidání tuhého polotovaru, jež obsahuje zpěňovadlo
- Externí dodávka plynu do taveniny
- Tepelným rozkladem zpěňovadla v tavenině



Obr. 4.5 – Výroba hliníkové pěny externím dodáváním vzduchu [46]

O postupném využívání Al pěny v konstrukci obráběcích strojů svědčí i použití tohoto materiálu pro konstrukci vřeteníku u sériově vyráběného obráběcího stroje v roce 2007. Další využití se očekává v oblasti nosných těles obráběcích strojů. [12]

Výrobou hliníkových pěn se zabývají například německé firmy Gleich Aluminium (ALPORAS), Alu-Light (Alulight), IFAM, rakouská firma LKR, kanadská firma Cymat Corp. (CYMAT), japonská firma Shinko Wire Company nebo irská firma ACECR se svým stejnojmenným produktem. [27]

Tab. 15 – Hodnoty hliníkových pěn tří firem [47,52]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu		
	ALPORAS	CYMAT	ACECR
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	250	140 ÷ 540	400 ÷ 800
Modul pružnosti [GPa]	0,7	0,02 ÷ 2	0,2 ÷ 1,2
Pevnost v tlaku [MPa]	1,5	0,04 ÷ 7	2,2 ÷ 16
Pevnost v tahu [MPa]	1,6	-	-
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	23,4	-	-
Pórovitost [%]	90 ÷ 92	80 ÷ 98	70 ÷ 85

Tab. 16 – Hodnoty různých druhů hliníkových pěn firmy Alu-Light [53]

Fyzikální vlastnosti	Druh materiálu		
	AlSi	AlMgSi _{0,6}	AlMgSi _{0,6} +T6
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	500 ÷ 550	500 ÷ 550	500 ÷ 550
Modul pružnosti [GPa]	5	5	5
Pevnost v tlaku [MPa]	7	7	12
Pevnost v ohybu [MPa]	8	8	15
Součinitel tepelné roztažnosti [$\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$]	-	-	-
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	6 ÷ 15	6 ÷ 15	6 ÷ 15

Velmi důležitá veličina u kovových pěn je pórovitost, která přímo ovlivňuje výslednou pevnost, přičemž platí – více pórů, nižší pevnost a naopak.



4.2 Srovnání hybridních struktur

Při zvážení výše napsaného je zřejmé, že hybridní struktury, vyjma betonových výplní, v současné době nenacházejí valného užití. Důvody jsou stejné jako u všech novátorských materiálů - malé zkušenosti a mnohdy drahé materiály. Prakticky ve stadiu výzkumu se stále nacházejí kombinace polymeru s uhlíkovou výztuží a svařované konstrukce s uhlíkovou výztuží. Nicméně potenciál je vysoký. Jen nezbytně nutné množství drahých uhlíkových vláken na základu z konvenčního materiálu umožňuje vytvořit konstrukci s vyrovnaným poměrem vlastností – cena.

Litínový odlitek s pískovou výplní je cesta správným směrem. Toto řešení snižuje cenu výroby (odpadá odstraňování pískového jádra) a zlepšuje tlumící vlastnosti konstrukce. Nicméně potenciál tohoto řešení je striktně omezený na lité dílce, což s postupným vzrůstajícím podílem svařovaných nebo betonových konstrukcí na trhu značně snižuje perspektivnost tohoto řešení.

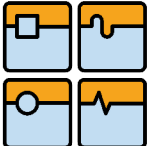
Konstrukce s betonovou výplní jsou na tom oproti předcházejícím řešením lépe, nicméně detailnější řeč o nich byla již v kapitole 3.1.2 a 3.1.4 a proto se jim tato část bude věnovat jen krátce. Možnosti použití jsou buď vylití starší konstrukce a tím zvýšení přesnosti stroje nebo se konstrukce vyplní přímo při výrobě. Výhody jsou především lepší tlumení, nižší tepelná vodivost, kdy beton funguje jako tepelná izolace, ochrana oceli před korozí. Nevýhodou tohoto řešení je zvýšená cena a vyšší hmotnost konstrukce.



Obr. 4.6 – Sendvičové desky[47]

Kovové pěny, a hliníkové obzvláště, se jako konstrukční materiál pro obráběcí stroje jeví jako velmi perspektivní. Jeho nejsilnější devizou je nepochybně extrémně nízká hmotnost (čtvrtinová hustota vody, může tedy plavat na hladině) při dostačující pevnosti a nižší tepelná vodivost než u masivního dílce. Dále velmi dobré tlumení rázů a hluku a v neposlední řadě poměrně levná výroba, která bývá někdy přirovnávána k pečení chleba (typ výroby se zpěňovadlem). Další nezpochybnitelnou výhodou je možnost jednoduchého spojení jednotlivých desek svařením, pájením aj. Výzkum pěnových materiálů stále intenzivně pokračuje. Množství potenciálních kombinací slitin, které by mohly zvýšit pevnost, je stále vysoké. Dále je potřeba najít optimální tloušťku stěny mezi póry a pórovitost, kdy vyšší počet pórů sice snižuje hmotnost, ale zároveň snižuje celkovou pevnost. Tyto vlastnosti ovlivňuje především způsob výroby, a proto se v blízké budoucnosti dají očekávat jejich nové metody.

Nevýhodou všech hybridních materiálů je komplikovaná technologie návrhu optimalizovaných konstrukcí, kdy je výrazně složitější navrhovat nehomogenní struktury oproti homogenním. S tím souvisí i vysoké nároky na konstruktéry a výpočtáře, u nichž je vyžadována znalost vlastností jednotlivých materiálů a potřeb strojů. Další nevýhodou je nutnost kombinace mnohdy rozličných druhů přípravy a zpracování polotovarů plynoucích z jejich výrazné odlišnosti. [12]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 35
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

5 Závěr

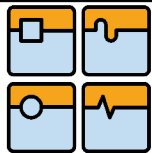
Současná doba se vyznačuje nebývalou pestrostí nejrůznějších materiálů používaných ve stavbě obráběcích strojů. Přitom ještě na počátku druhé poloviny dvacátého století byla jediným, všeobecně uznávaným a používaným materiálem litina a ocel. Přelom sedmdesátých a osmdesátých let znamenal počátek nekonvenčních materiálů v podobě polymerních betonů jakožto levné a dostačující náhrady za litinové rámy a lože strojů. Průběh devadesátých let se nesl v duchu zdokonalování polymerních a vysokohodnotných betonů, přičemž v některých ohledech začaly vykazovat lepší vlastnosti než litinové rámy. Zároveň se výzkumná centra začala zabývat novými typy materiálů jako keramika, uhlíková vlákna nebo sendvičové pláty metalických pěn, což se v podstatě děje do dnešních dnů, neboť firmy, až na výjimky, nebyly schopny sériově vyrábět stroje s těmito typy materiálů. Nicméně vlašťovky v podobě keramických hřídelí firmy Erwin Junker Grinding Technology a.s. nebo rám z nosníků vyztužených uhlíkovými vlákny firmy CompoTech dávají znát, že se právě nacházíme na pomezí malé materiálové revoluce. Tu, kromě již zmíněných dvou příkladů, odstartovaly právě sendvičové struktury, které se již ve větší míře začaly využívat.

V budoucnu lze nadále očekávat pokračující trend zavádění nových materiálů za účelem snižování hmotnosti při stejné nebo vyšší tuhosti a pevnosti dílce a při zachování nebo dokonce snížení výsledné ceny stroje.



Seznam zkratk

AlSi	slitina hliníku a křemíku
AlMgSi0,6	slitina hliníku, hořčíku a křemíku
AlMgSi0,6+T6	slitina hliníku, hořčíku a křemíku
HPC	high performance concrete vysokohodnotný beton
HV	Vickers hardness tvrdost dle Vickerse
SiSiC	silikonizovaný karbid křemíku
SSiC	slinutý karbid křemíku
Ra	drsnost povrchu



Seznam použité literatury

- [1] CNCkonstrukce.cz.[online].[cit.25.02.2011].*Materiály pro nosnou soustavu CNC obráběcího stroje*. Dostupné z www: <<http://www.cnckonstrukce.cz/data/files/v-1-prispevek.pdf>>
- [2] MMspektrum.com.[online].[cit.26.02.2011].*Konstrukční řešení současných obráběcích strojů*. Dostupné z www: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/konstrukcni-reseni-soucasnych-obrabecich-stroju>>
- [3] cs.wikipedia.org.[online].[cit.26.02.2011].*Litina*. Dostupné z www: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Litina>>
- [4] tzs.kmm.zcu.cz.[online].[cit.26.02.2011].*Oceli a litiny*. Dostupné z www: <<http://tzs.kmm.zcu.cz/ocelilitiny.pdf>>
- [5] ime.fme.vutbr.cz.[online].[cit.26.02.2011].*Struktura a vlastnosti grafitických litin*. Dostupné z www: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/savgl/index.php?chapter=1>>
- [6] tfirt.net.[online].[cit.10.03.2011].*Nauka o materiálu*. Dostupné z www: <<http://www.tfirt.net/2sem/naukaomaterialu/celeprednasky1-12.pdf>>
- [7] stefanmichna.com.[online].[cit.10.03.2011].*Kompozitní materiály*. Dostupné z www: <http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf>
- [8] delta.fme.vutbr.cz.[online].[cit.10.03.2011].*Kompozity*. Dostupné z www: <<http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>>
- [9] www.czspos.cz.[online].[cit.10.04.2011].*Stavba nosných soustav*. Dostupné z www: <http://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/13_stavba_nosnych_soustav.pdf>
- [10] MMspektrum.com.[online].[cit.02.04.2011]. *Beton a přírodní žula při výrobě loží a rámu obráběcích strojů*. Dostupné z www: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/beton-a-prirodni-zula-pri-vyrobe-lozi-a-ramu-obrabecich-stroju>>
- [11] microplan-group.com.[online].[cit.03.04.2011].*Materialy*. Dostupné z www: <<http://www.microplan-group.com/mpg/ENG/materials.html>>
- [12] Ing. Jan Smolík - jednodenní odborný seminář konaný dne 9.10.2007 na ČVUT v Praze, fakulta strojní - *KOMPOZITY VE STAVBĚ STROJŮ*
- [13] Marek, Jiří, MM Průmyslové spektrum: *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 2006. Speciální vydání. Dostupný z WWW: <www.mmspektrum.com>. ISSN 1212-2572.
- [14] MMspektrum.com.[online].[cit.10.04.2011]. *Nové technologie při výrobě nosných dílů obráběcích strojů*. Dostupné z www: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-technologie-pri-vyrobe-nosnych-dilu-obrabecich-stroju>>
- [15] cs.wikipedia.org.[online].[cit.15.04.2011].*Polymerbeton*. Dostupné z www: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polymerbeton>>



[16] rampf-gruppe.de.[online].[cit.16.04.2011]. *Mineral casting frames for machine tools*. Dostupné z www: <http://www.rampf-gruppe.de/fileadmin/rampf_downloadcenter/EPUCRET-Mineralgusstechnik/Broschueren/Werkzeugmaschinen/2007-10_EPU_Machinetools_final_GB.pdf>

[17] home.zcu.cz. [online].[cit.16.04.2011]. *Nosné struktury OS - rámy*. Dostupné z www: <home.zcu.cz/~lasova/ZSVS/p3.ppt>

[18] irsm.cas.cz.[online].[cit.17.04.2011]. *Částicové kompozitní materiály a některé jejich bio aplikace*. Dostupné z www: <<http://www.irsm.cas.cz/?Lang=GZE&Menu=20,52,0,0>>

[19] techtydenik.cz.[online].[cit.19.04.2011]. *Vybrané exponáty IMT 2008*. Dostupné z www: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=5053&mark>>

[20] cs.wikipedia.org.[online].[cit.20.04.2011]. *Vláknové kompozity*. Dostupné z www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vl%C3%A1knov%C3%A9_kompozity>

[21] volny.cz.[online].[cit.20.04.2011]. *Vlákna pro kompozity*. Dostupné z www: <<http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>>

[22] Ing. Petr Mráz, PhD. - jednodenní odborný seminář konaný dne 9.10.2007 na ČVUT v Praze, fakulta strojní - *Využití vláknových kompozit při vývoji nových struktur výrobních strojů a robotů*

[23] tzs.kmm.zcu.cz.[online].[cit.20.04.2011]. *Keramické a kompozitní materiály*. Dostupné z www: <<http://tzs.kmm.zcu.cz/keramika2.pdf>>

[24] tec.nsk.com.[online].[cit.07.05.2011]. *Ceramic Bearings for Special Environments*. Dostupné z www: <<http://www.tec.nsk.com/weblibrary/library/Technical%20Journal%20Motion%20and%20Control/Motion%20and%20Control%20No%2008%20%282000-05%29/MC08-03%20Ceramic%20Bearings%20for%20Special%20Environments.pdf>>

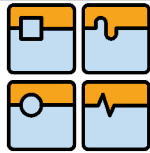
[25] redhill-balls.cz.[online].[cit.07.05.2011]. *Keramické kuličky*. Dostupné z www: <<http://www.redhill-balls.cz/cz/keramika.html>>

[26] pemavako.cz.[online].[cit.08.05.2011]. *Vizi konkurenceschopného strojírenství naplňují špičkové keramické materiály na bázi SiC!* Dostupné z www: <<http://pemavako.cz/keramika/vizi-konkurenceschopneho-strojirenstvi-naplnuji-spickove-keramicke-materialy-na-bazi-sic>>

[27] MMspektrum.com.[online].[cit.13.05.2011]. *Výrobky z hliníkové pěny*. Dostupné z www: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny>>

[28] manufacturer.com.[online].[cit.05.04.2011]. *Line Boring Machine*. Dostupné z www: <<http://www.manufacturer.com/product/i1673925-Line+Boring+Machine.html>>

[29] liberator.oceanmachinery.com.[online].[cit.05.04.2011]. *CNC Beam Coping Machine*. Dostupné z www: <<http://www.liberator.oceanmachinery.com>>



- [30] kmt.tul.cz.[online].[cit.19.03.2011]. *Kompozitní materiály*. Dostupné z www: <http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf>
- [31] departments.fsv.cvut.cz.[online].[cit.17.04.2011]. *Horniny*. Dostupné z www: <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/wwwold/webkurzy/horniny/horniny/horniny_1.html>
- [32] microplan-group.com.[online].[cit.02.04.2011]. *Catalogues - Custom's Solutions*. Dostupné z www: <http://www.microplan-group.com/mpg/Download/Catalogues/customs_2011_01IE_W.pdf>
- [33] microplan-group.com.[online].[cit.03.04.2011]. *The Synthetic Granite*. Dostupné z www: <http://www.microplan-group.com/pagine/prodotti_gb/celith_gb.htm>
- [34] jneaststar.com.[online].[cit.02.04.2011]. *Machinery Component Base series*. Dostupné z www: <<http://www.jneaststar.com/English/ProductView.asp?ID=116&SortID=141>>
- [35] praewema.dvs-gruppe.com.[online].[cit.02.04.2011]. *Profi le Grinding Machine SynchroFine*. Dostupné z www: <http://praewema.dvs-gruppe.com/uploads/tx_xpctypedownloadssimple/schleifen.pdf>
- [36] framag.com.[online].[cit.10.04.2011]. *Base Frames*. Dostupné z www: <<http://framag.com/index.cfm?seite=machinenbetten&sprache=EN>>
- [37] MMspektrum.com.[online].[cit.10.04.2011]. *AMB 2010 – postřehy technika*. Dostupné z www: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/amb-2010-postrehy-technika>>
- [38] demmeler.com.[online].[cit.17.04.2011]. *Maschinenbau – perfektes Zusammenspiel von Mensch und Technik*. Dostupné z www: <http://www.demmeler.com/images/pdf/broschueren/Demmeler_Imagebroschuere_web_de.pdf>
- [39] barmex.com.mx.[online].[cit.17.04.2011]. *Rhenocast*. Dostupné z www: <http://www.barmex.com.mx/pdf/schne_pdf/schneeberger009.pdf>
- [40] emag.com.[online].[cit.19.04.2011]. *Rhenocast*. Dostupné z www: <http://www.emag.com/fileadmin/content/emag-webseite/doks/Prospekte/EMAG_KOEPFER_300_de.pdf>
- [41] emag.com.[online].[cit.19.04.2011]. *Rhenocast*. Dostupné z www: <http://www.emag.com/fileadmin/content/emag-webseite/doks/Prospekte/EMAG_KOEPFER_300_de.pdf>
- directindustry.com.[online].[cit.19.04.2011]. *Automatic machining line for tubes or profiles*. Dostupné z www: <<http://www.directindustry.com/prod/emag-maschinenfabrik/automatics-machining-lines-for-tubes-or-profiles-15447-424190.html>>
- [42] compotech.com.[online].[cit.30.04.2011]. *CompoTech Optical Cube*. Dostupné z www: <<http://www.compotech.com/downloads>>



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

[43] bearingstore-shop.com.[online].[cit.07.05.2011]. *SKF Bering catalogue*. Dostupné z www: <<http://bearingstore-shop.com/2011/01/11/skf-bearings-catalogue/>>

globalspec.com.[online].[cit.07.05.2011]. *Solutions for Wind Power Generator Applications*. Dostupné z www: <<http://www.globalspec.com/newsletter/pub/43/alternative-renewable-energy?vol=3&issue=9&isPastIssue=1>>

[44] Ing. Martin Kosnar - jednodenní odborný seminář - *Progresivní materiály ve stavbě výrobních strojů a zařízení*

[45] ookaboo.com.[online].[cit.13.05.2011]. *Metal foam Pictures*. Dostupné z www: <http://ookaboo.com/o/pictures/topic/13504941/Metal_foam>

[46] library.iyte.edu.tr.[online].[cit.13.05.2011]. *The Applicaton of Aluminium Foam for the Heat and Noise Reduction in Automobiles*. Dostupné z www: <<http://library.iyte.edu.tr/tezler/master/makinamuh/T000343.pdf>>

[47] gleich.de.[online].[cit.13.05.2011]. *Sendvičové desky*. Dostupné z www: <<http://www.gleich.de/cz/sendviove-desky/>>

[48] max-boegl.de.[online].[cit.10.04.2011]. *Machines made of concrete*. Dostupné z www: <<http://www.max-boegl.de/boeglnet/web/binary.jsp?nodeId=1000497&binaryId=1001934&disposition=inline>>

[49] skf.com.[online].[cit.07.05.2011]. *Ložiska – všeobecné údaje*. Dostupné z www: <<http://www.skf.com/files/775121.pdf>>

[50] ceramtec.com.[online].[cit.30.04.2011]. *Materiály*. Dostupné z www: <<http://www.ceramtec.com/co/cz/materialy/00139,0001,0000,5138.php>>

[51] ceramtec.com.[online].[cit.30.04.2011]. *ТОHKИE КEPAМИКИ FineXCera®*. Dostupné z www: <http://www.batex.com.ua/4_1_tablfinexcera.html>

[52] acecr.ir.[online].[cit.13.05.2011]. *Aluminium Foam*. Dostupné z www: <<http://www.acecr.ir/ShowProduct.aspx?FID=KD/h/1TJHJI=>>

[53] alulight.com.[online].[cit.13.05.2011]. *Aluminium Foam*. Dostupné z www: <http://www.alulight.com/en/downloads/alulight_datasheets_en2006.pdf>