



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

KOMPOZITNÍ MATERIÁLY VE STAVBĚ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

THE COMPOSITE MATERIALS IN THE MACHINE-TOOL DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB ČUNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL HOLUB

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Čunek

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

The Composite Materials in the Machine-tool Design

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 2010/11.

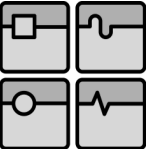
V Brně, dne 26.11.2010



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 2
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Abstrakt

Bakalářská práce obsahuje stručné seznámení s materiály pro konstrukci výrobních strojů, jejich výhodami, nevýhodami a možnostmi použití. Dále je tato bakalářská práce zaměřena hlavně na použití nekonvenčních materiálů pro stavbu výrobních strojů a příklady jejich aplikací v praxi.

Klíčová slova: Nekonenční materiály, obráběcí stroje...

Abstract

Bachelor thesis contains a brief introduction to materials for construction machinery manufacturing, their advantages, disadvantages and potential applications. Furthermore, this bachelor thesis focuses mainly on the use of unconventional materials for the construction of production machinery and examples of their application in practice.

Key words: Unconventional materials, machine-tool...

Bibliografická citace:

ČUNEK, J. *Kompozitní materiály ve stavbě obráběcích strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Holub.

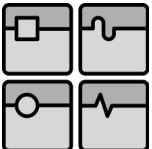
		Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 3
		BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Kompozitní materiály ve stavbě obráběcích strojů“ vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Michala Holuba. Vycházel jsem ze svých znalostí, odborných konzultací, z použitých pramenů a literatury uvedených v Seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 27. května 2011

Autor (podpis)

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 4
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

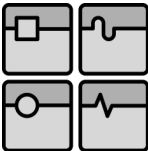
Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Michalu Holubovi za zájem, připomínky, zapůjčené podklady a čas, který věnoval mé práci. Mé poděkování rovněž patří všem mým blízkým za velkou podporu.

Obsah

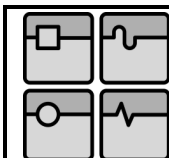
1.	Úvod	7
2.	Požadavky na obráběcí stroje	8
2.1	Vysoká tuhost a nízká hmotnost.....	9
2.2	Materiálové tlumení	9
3.	Přehled materiálů používaných ve výrobních strojích	10
3.1	Konvenční materiály	10
3.1.1	Oceli – svařence z oceli třídy 11	10
3.1.2	Litina – odlitky z šedé nebo tvárné litiny	11
3.2	Nekonvenční materiály	12
3.2.1	Přírodní žula (Granit).....	12
3.2.2	Polymerbeton	13
3.2.3	Vláknové kompozity na bázi uhlíkových vláken	13
3.2.4	Keramika na bázi Al a Si	14
3.2.5	Hybridní struktury a materiály	15
3.2.6	Porovnání vybraných parametrů některých nekonvenčních materiálů	16
4.	Vláknové kompozity	17
4.1	Kritérium pevnosti	17
4.2	Kritérium teplotních roztažností	17
4.3	Technologie výroby vláknových kompozitů.....	18
4.4	Návrh laminátové součásti	18
4.5	Spojování laminátů s kovy.....	19
4.6	Příklady realizovaných aplikací v oblasti strojů	19
5.	Technická keramika.....	19
5.1	Vývoj technické keramiky	20
5.2	Příklady realizovaných aplikací v oblasti strojů	20
6.	Ploymerbetony.....	20
6.1	Složení polymerbetonů.....	20
6.2	Vlastnosti polymerbetonu	21
6.3	Výroba polymerbetonového dílce	21
6.4	Příklady realizovaných aplikací v oblasti strojů	21
7.	Příklady použití a nasazení pro aplikace výrobních strojů	21
7.1	Vřetena obráběcích strojů	21
7.2	Hnací hřídele z uhlíkového laminátu.....	22
7.3	Vřeteníky z kompozitu	22
7.4	Otočné nůžky na plech z uhlíkového laminátu.....	23
7.5	Kompozitní ramena průmyslových robotů.....	24
7.6	Kompozitní manipulátor.....	24
7.7	Portálový robot z uhlíkového laminátu.....	25

7.8	Keramické hřídele	25
7.9	Keramický pracovní stůl	26
7.10	Keramická pinola.....	26
7.11	Nosné struktury výrobních strojů z granitu.....	27
7.12	Polymerbetonové nosné části výrobních strojů.....	27
7.13	Nosné díly z vysokopevnostního cementového betonu Hipercon	28
7.14	Nosné části obráběcích strojů z Hydropolu.....	28
8.	Závěr	29
9.	Bibliografie.....	30
10.	Seznam obrázků.....	32
11.	Seznam tabulek	33

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

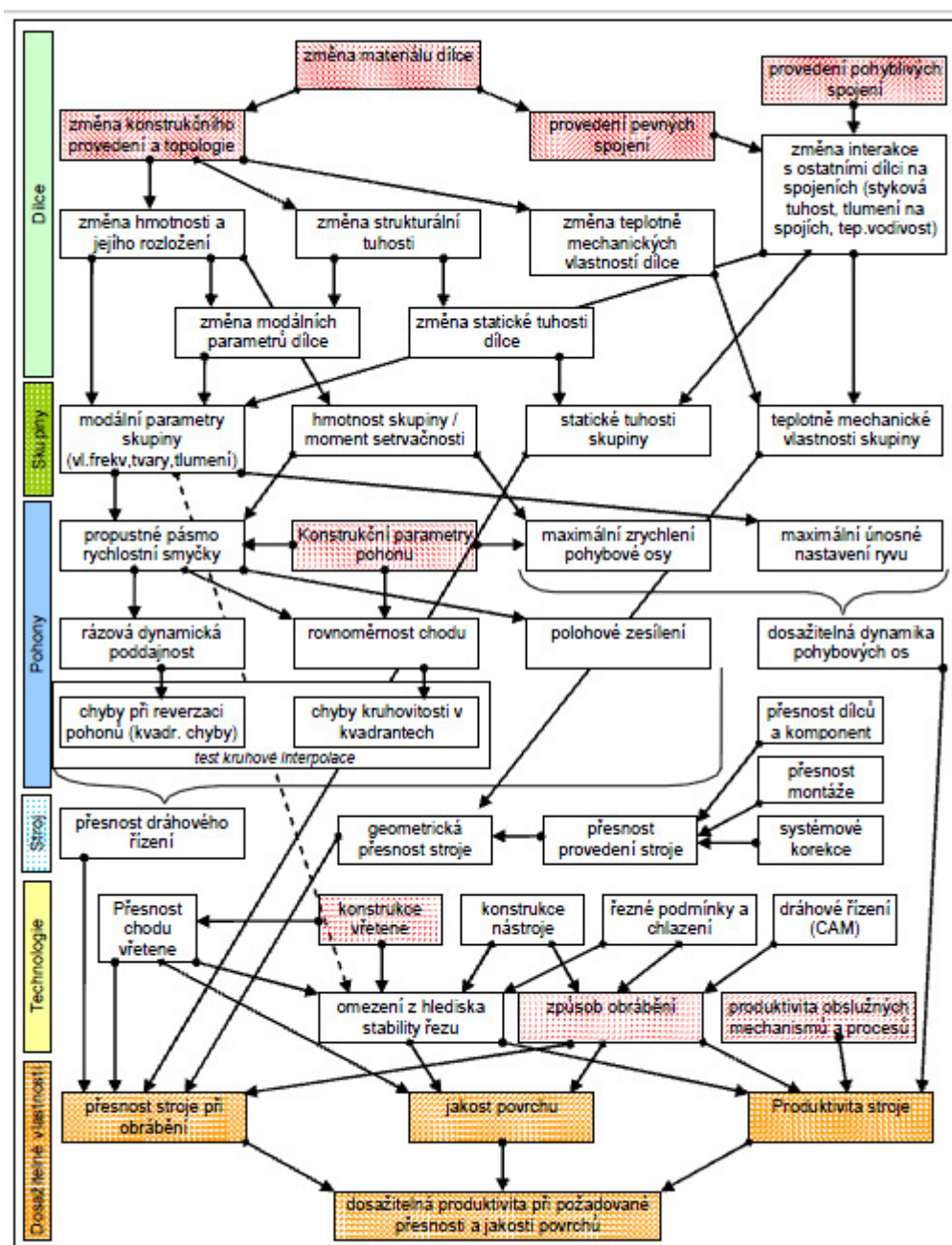
1. Úvod

Mechanické obrábění patří mezi nejstarší a nejrozšířenější strojírenské technologie. Neustálý vývoj nutí výrobce ke zdokonalování a zefektivňování úrovně ve strojírenství a tím spojený nárůst požadavků na kvalitu obrobku je základem technického pokroku v mnoha odvětvích lidské činnosti. Rostoucí požadavky na zvyšování přesnosti výrobků vede ke zdokonalování konstrukce samotných výrobních strojů. Toho lze dosáhnout buď vylepšením konstrukce stroje nebo použitím materiálu, které mají lepší mechanické vlastnosti než materiály běžně používané (konvenční). V současnosti se používání nekonvenčních materiálů při výrobě výrobních strojů mírně zvyšuje, ale i nadále se v drtivé většině používají materiály na bázi Fe-C, které jsou ekonomicky výhodnější. V dnešní době se vzhledem k potřebě zdokonalovat stroje a zároveň nezvyšovat výrobní náklady obvyklé materiály nahrazují spíše hybridními materiálými strukturami, které kombinují tradiční materiály s materiály nekonvenčními, které jsou zde použity jen v nezbytné míře. Samotné nekonvenční materiály se nyní kvůli jejich vysokým nákladům používají zejména u dílců kde nezbytných vlastností nemůžeme dosáhnout použitím oceli nebo litiny. Avšak se zvyšujícími se nároky a se stále se zlepšujícími technologiemi výroby nekonvenčních materiálů můžeme v budoucnosti očekávat používání těchto materiálů i v sériové výrobě.



2. Požadavky na obráběcí stroje

Při stavbě výrobních strojů je důležité aby výsledný stroj dostatečně tuhý, lehký měl vysoké materiálové tlumení a dobrou dynamickou a tepelnou stabilitu. Těchto vlastností lze dosáhnout několika způsoby. Při použití tradičních materiálů lze dosáhnout těchto vlastností vylepšením designu (parametrická, topologická optimalizace). Druhá možnost je použití hybridních struktur což je kombinace konvenčních a nekonvenčních materiálů. A za třetí použitím nekonvenčních materiálů, ale kvůli současným poměrně vysokým nákladům tuto možnost používáme tehdy nelze li požadovaných vlastností dosáhnout předchozími dvěma způsoby. (1)

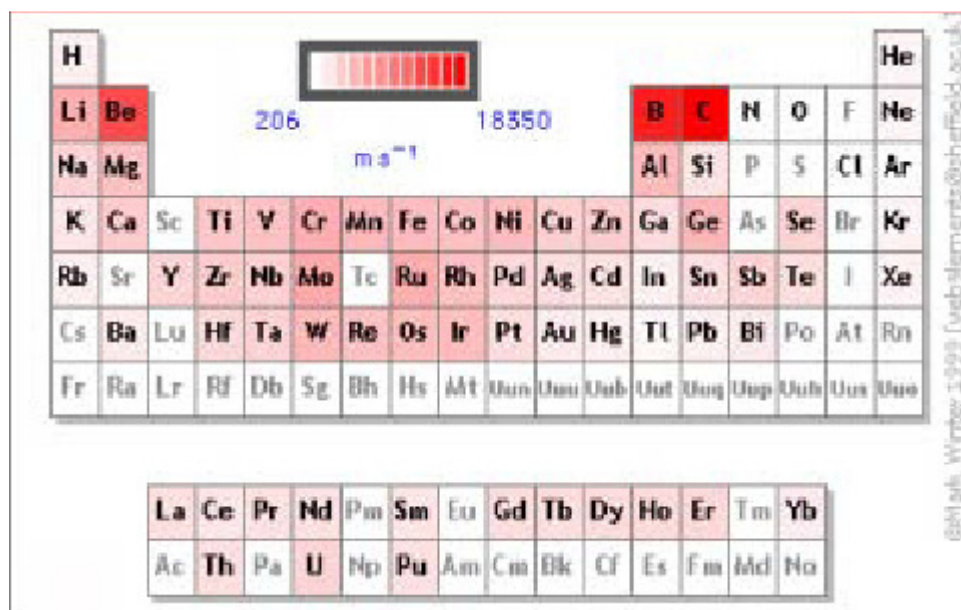


Obrázek 1 Vliv materiálů na stavbu strojů (1)

2.1 Vysoká tuhost a nízká hmotnost

Tyto materiálové charakteristiky společně charakterizuje veličina rychlosti šíření zvuku v materiálu. Z obrázku 2 vyplývá že jako vhodné se tedy jeví zejména materiály na bázi Be (beryllium), B (bór), C (uhlík), Li (lithium), Mg (hořčík), Al (hliník), Si (křemík) a Ti (titan). (1)

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{E_s} \left[mm \cdot s^{-1} \right]$$



Obrázek 2 Rychlost šíření zvuku v materiálu (1)

2.2 Materiálové tlumení

Vysoké materiálové tlumení vykazují zejména materiály složené z více makroskopických fází, nebo materiály s velkým počtem rozhraní mezi jednotlivými složkami. Takže z tohoto hlediska s jako vhodné materiály jeví vláknové či částicové kompozity nebo hybridní struktury. (1)

3. Přehled materiálů používaných ve výrobních strojích

Při stavbě výrobních strojů se nejčastěji používají kovové materiály a to zejména ty na bázi Fe-C, hlavně kvůli jejich cenové dostupnosti a poměrně vysoké úrovni jejich zpracování. Vzhledem k materiálovým vlastnostem, ceně, dostupnosti a zpracovatelnosti lze konstatovat že pro konstrukci výrobních strojů mají nejvýznamnější a nejnadějnější potenciál materiály kompozitní – vlákny vyztužené, sendvičové a hybridní.

		Měrná hmotnost [kg/m³]	Modul pružnosti [GPa]	Měrný modul pružnosti [10 ⁸ .m²/s²]	Náklady a zpracovatelnost pro výrobní stroje
Tradiční	Šedá litina	7100-7300	88-140	12-20	★
	Tvárná litina	7040-7060	160-180	23-26	★ ★
	Svařence z oceli třídy 11	7850	190-210	26-27	★ ★
Nekonvenční	Al slitiny	2600-2800	70-79	25-30	★ ★ ★
	Přírodní žula	2600-3150	30-70	26-27	★ ★ ★
	Polymerní betony	1500-2600	40-50	15-33	★ ★ ★
	Vláknové kompozity na bázi uhlíkových vláken	1700-1980	100-580	54-341	★ ★ ★ ★ ★
	Keramika na bázi Al a Si	3200-3500	270-300	77-94	★ ★ ★ ★ ★
	Hybridní struktury a materiály	1000-3500	70-210	20-210	★ ★ ★ ★

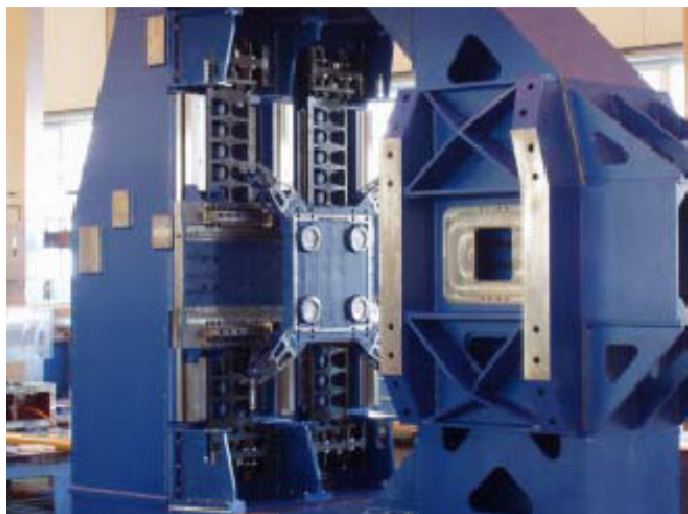
Tabulka 1 Srovnání některých vlastností konvenčních a nekonvenčních materiálů (1)

3.1 Konvenční materiály

Tradiční materiály, nejrozšířenější materiály při výrobě obráběcích strojů jsou to zejména svařence z oceli třídy 11 a odlitky z šedé nebo tvárné litiny.

3.1.1 Oceli – svařence z oceli třídy 11

Výhodami při použití těchto materiálů jsou jejich vysoké hodnoty modulu pružnosti, možnost konstrukce velmi složitých tvarů s velkými přechody tloušťek stěn a je to dobré ekonomické řešení pro kusovou výrobu, malé série nebo dílce s velkým počtem změn. Nevýhodou je malé materiálové tlumení, větší vnitřní pnutí, horší zaškrabávání a horší obrobitelnost než například u litiny. Používají se zejména pro stavbu nosných dílů obráběcích strojů. (1)



Obrázek 3 Nosná struktura obráběcího centra tvořená svařenci (1)

3.1.2 Litina – odlitky z šedé nebo tvárné litiny

Litiny jsou ekonomicky vhodné pro větší série a některé jejich mechanické vlastnosti jako materiálové tlumení a obrobitelnost jsou lepší než u ocelí. Výhodou jsou také v praxi zavedené postupy pro konstrukci a zpracování. Nevýhodou těchto materiálů je malý modul pružnosti, technologické omezení tvarování, proporcí a přechodů a také vzhledem k vysoké ceně forem a jader nevhodnost pro malé série. Používají k výrobě nosných částí strojů. (1)



Obrázek 4 Odlitek stojanu horizontálního frézovacího centra (1)

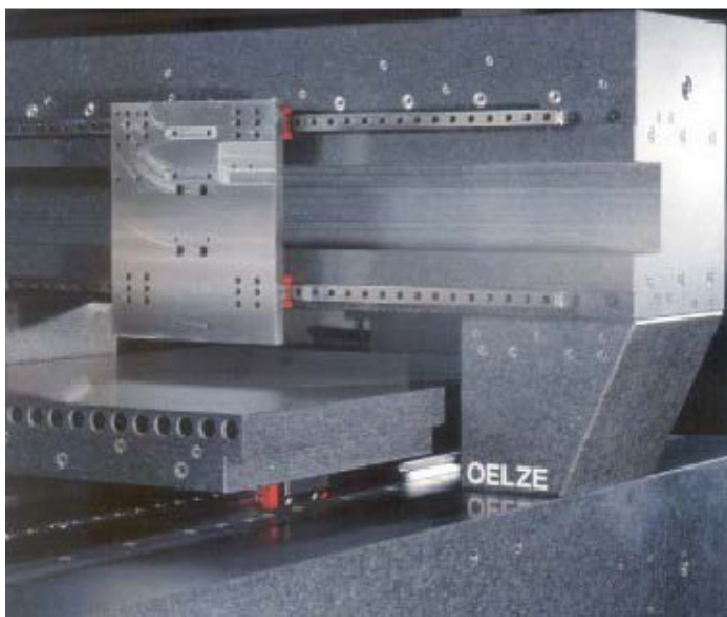
3.2 Nekonvenční materiály

Materiály jimiž nahrazujeme tradiční materiály pro dosažení lepších vlastností výsledných strojů. Jsou to částicové kompozity (polymerbetony a přírodní žula), Vláknové kompozity na bázi uhlíkových vláken, keramika a hybridní struktury.

3.2.1 Přírodní žula (Granit)

Jeden z materiálů používaný při výrobě velmi přesných strojů pro broušení a mikrofrézování. Hlavními výhodami granitu jsou absence vnitřních pnutí, dokonalá rozměrová stálost a dobré materiálové tlumení (na úrovni šedé litiny). Ovšem takovéto dílce jsou velmi náročné na výrobu, kvůli broušení všech ploch, vyžadují komplikované a nákladné spojování s ostatními dílci a poskytují jen velmi omezené možnosti zasáhnout do hotové konstrukce. Používají se především v konstrukci měřicích přípravků - stoly, pravítka, přesných souřadnicových měřicích strojů a speciálních, vysoce přesných obráběcích strojů. Masivní bloky Granitu tvoří většinou nepohyblivé stoly (lože), příčníky apod. (2)

O tom že tento materiál má svoji budoucnost svědčí i fakt že již existují firmy přímo se specializující na výrobu komponentů pro výrobní stroje přímo z tohoto materiálu.

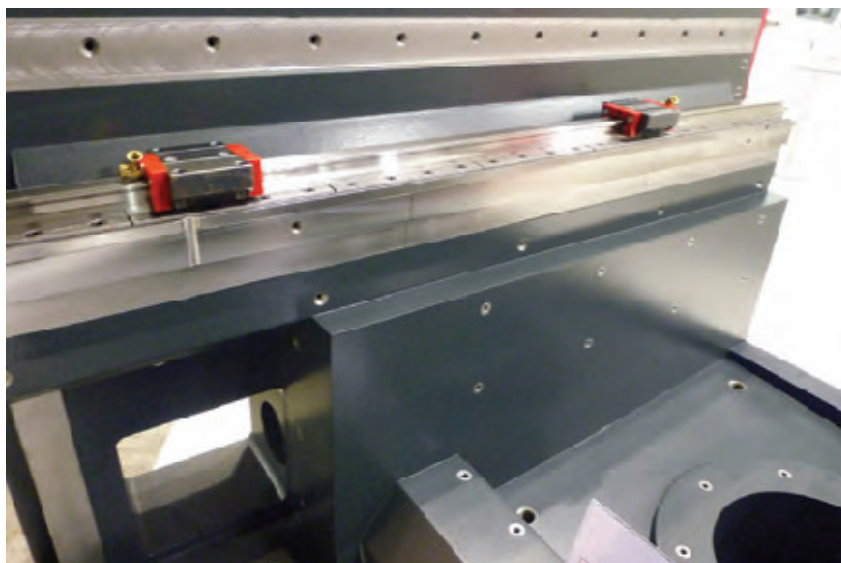


Obrázek 5 Nosná struktura portálového vertikálního centra pro mikrofrézování z granitu (1)

3.2.2 Polymerbeton

Polymerbetony zaznamenaly v poslední době velký rozmach při výrobě nosných částí obráběcích strojů. Při stejné hmotnosti lze u polymerbetonů docílit vyšších parametrů tuhosti než například u šedé litiny. Rámy z polymerbetonů jsou tepelně stabilní, stojan nebo lože z polymerbetonů přenášejí velmi málo tepla od motorů a pohonů na stroji. Polymerbetony se také používají v kombinaci s ocelovými nebo litinovými díly, kdy je dílec vylit polymerbetonem. Polymerbetony mají velmi dobré materiálové tlumení (až 8x větší než šedá litina). Do dílce lze integrovat elektrické a fluidní rozvody a také ocelové inserty pro následné obrobení. Vzhledem k nákladné výrobě je použití polymerbetonů vhodné zejména u velkých sérií. Mezi nevýhody použití polymerbetonů patří komplikované spojování s ostatními dílci konstrukce, omezené možnosti zasáhnout do hotové konstrukce a velmi problematické obrábění. Polymerbetony se používají hlavně pro výrobu rámu a loží výrobních strojů. (2) (1)

V současnosti má již mnoho světových výrobců stroje s polymerbetonovými rámy ve své nabídce.



Obrázek 6 Detail polymerbetonového odlitku (3)

3.2.3 Vláknové kompozity na bázi uhlíkových vláken

Přestože mají kompozitní materiály velký potenciál pro využití na výrobních stojích, tak jsou využívány pouze v omezené míře. To je způsobeno zejména vysokou cenou a technickými nároky, ale také neznalostí techniků a inženýrů jak z těchto materiálů navrhovat dílce, jak je spojovat, jak provádět optimalizace a výpočty. Při použití vláknových kompozitu máme možnost navrhovat dílce s optimálně orientovanou tuhostí. Mají vynikající hodnoty měrného modulu pružnosti, materiálové tlumení větší než u šedé litiny a nízkou nebo v kritických směrech nulovou teplotní roztažnost.

Vysoká cena těchto materiálů je způsobena nákladnou výrobou vzhledem k ceně materiálu, nutnosti obvykle ručního vrstvení a zpracování autoklávovou technologií.

Tyto materiály vyžadují komplikované prostředky pro spojování s ostatními dílci konstrukce a mají omezené možnosti zásahu do hotové konstrukce. Vláknové kompozity se používají zřídka, ale jejich využití je široké. Například suporty soustružnických nožů, manipulační ramena nebo hřídele. (1)

S postupným zdokonalováním a zlevňováním výroby lze očekávat právě u těchto materiálů velkou budoucnost, protože jejich výhody a možnosti využití jsou obrovské.



Obrázek 7 Support soustružnického nože ze silnovrstvého uhlíkového laminátu (1)

3.2.4 Keramika na bázi Al a Si

Výhoda keramiky je zejména v odolnosti vůči vnějším vlivům, rozměrové stálosti a odolnosti vůči teplotním změnám. Polotovary z keramického materiálu se dají obrábět třískovým obráběním. Součásti z těchto materiálů jsou velmi nákladné na výrobu komplikovaně se spojují s ostatními dílci konstrukce a jsou omezené rozměry dostupných polotovarů. Používají se například na nosné části strojů nebo na hřídele.

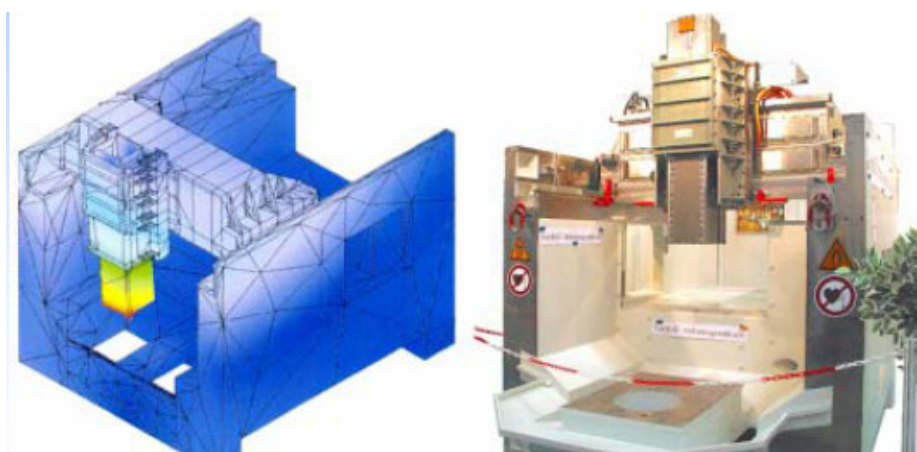
(1)



Obrázek 8 Nosník portálu a support laserového vyřezávacího stroje (1)

3.2.5 Hybridní struktury a materiály

Použitím hybridních materiálů lze dosáhnout specifických vlastností konkrétních dílců. Díky možnosti použití více materiálů pro jeden dílec můžeme využít konkrétních vhodných vlastností pro daný díl. U těchto materiálů je menší nákladnost výroby než u dílců na bázi uhlíkových vláken, ale větší náklady na výrobu a vývoj ve srovnání s dnešními konvenčními postupy. Pro tyto materiály je komplikovaná a nestandardní technologie návrhu optimalizovaných konstrukcí s vysokými nároky na kvalitu simulačních modelů. Je nutné kombinovat technologie přípravy a zpracování polotovarů do několika odlišných a běžně oddělených typů výroby. Hybridní materiály mají největší uplatnění zejména u nosných částí strojů jako jsou například lože nebo rámy. (1)



Obrázek 9 Nosná struktura stroje DMC 85 V linear firmy DMG z Hydropolu. (1)

3.2.5.1 Ocelový svařenec + polymerbetonová výplň

Využívá princip vylití tenkostěnné konstrukce rámu polymerbetonem. Vnější tvar včetně připojovacích prvků nahrazuje formu. Nemusí se provádět drahé žebrovaní. (1)

3.2.5.2 Odlitek z šedé nebo tvárné litiny + výplň pískem

V odlitku se po odlití úmyslně nechávají jádra, které jsou následným smršťováním odlitku pevně sevřena. To má za následek vyšší hmotnost dílce, ale také výrazně vyšší tlumení. Výjimečně jsou dílce plněny pískem až po odlití, v tomto případě je problematické zajištění přetlaku pískové směsi v dutině dílce. (1)

3.2.5.3 Polymerbetonový odlitek vyztužený uhlíkovými vlákny

Dosud se jedná o ojedinělou aplikaci, kde návin z uhlíkového kompozitu vyztužuje rameno manipulátoru tvořené polymerbetonem. Pro snížení hmotnosti jsou jako plnivo užity duté skleněné kuličky. (1)

3.2.5.4 Ocelový svařenec vyztužený uhlíkovým laminátem

Na stroji vyrobeném z tohoto materiálu se podařila snížit hmotnost pohyblivých dílců v ose X a Y o cca 30%, přičemž útlum vlastních tvarů kmitů se zvýšil proti konvenčnímu celoocelovému provedení o 1,5-5,7x. Frekvence většiny vlastních tvarů kmitů vzrostla a stroj vykazuje lepší výsledky při obrábění než konvenční provedení. (1)

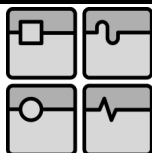
3.2.5.5 Kombinace oceli a Al pěny

Tento materiál se vyrábí ve formě desek, které se dají k sobě svařovat a lze tak z nich vytvářet svařence. Dílec vyhotovený z tohoto materiálu vykazoval o 45% nižší hmotnost, o 10% horší statickou tuhost, o cca 35% vyšší hodnoty vl.frekvencí a především 6 až 10x vyšší hodnoty tlumení vlastních frekvencí. (1)

3.2.6 Porovnání vybraných parametrů některých nekonvenčních materiálů

	přírodní žula	polymerbeton	laminát z uhlíkových středněmodulových vláken	keramika FineXCera na bázi Al
modul pružnosti v tahu/tlaku	$0,47 \cdot 10^5 \text{MPa}$	$0,4-0,5 \cdot 10^5 \text{MPa}$	$1-1,8 \cdot 10^5 \text{MPa}$	$2,7 \cdot 10^5 \text{MPa}$
měrná hmotnost	2850kg/m^3	$2300-2600 \text{kg/m}^3$	1550kg/m^3	3500kg/m^3
poměrné tlumení		$D=0,002-0,03$	$D=0,001-0,05$	
součinitel délkové teplotní roztažnosti	$8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$11,5-14 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$12 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$4,7 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$

Tabulka 2 Vybrané vlastnosti některých nekonvenčních materiálů (1)



4. Vláknové kompozity

4.1 Kritérium pevnosti

Porovnáním hodnot p/E různých materiálů bylo zjištěno, že komponenty z uhlíkového laminátu mohou být lehčí o 10 až 90% než díly z kovových slitin při stejné tuhosti.

Změna velikosti radiálního a tangenciálního napětí, kotoučů stejných rozměrů rotujících stejnými otáčkami, je přímo úměrná hodnotě měrné hmotnosti použitého materiálu. Takže u kotoučů z uhlíkového laminátu budou hodnoty těchto napětí několikanásobně menší než u kovových kotoučů. Proto se kotouče z kvaziizotropního uhlíkového laminátu mohou otáčet dvakrát rychleji než kovové kotouče.

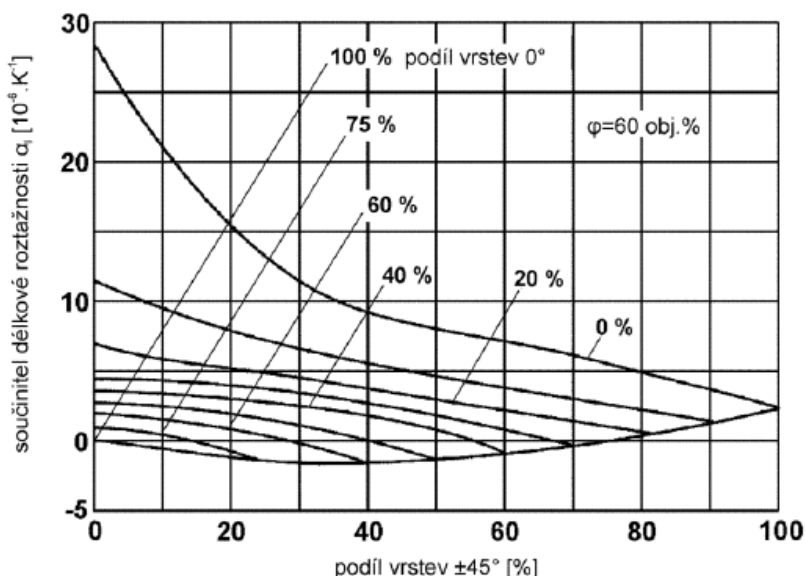
Komponenty na bázi uhlíkového laminátu mají vyšší hodnoty materiálového tlumení a posun vlastních frekvencí do vyšších oblastí. Při krouživém kmitání jsou velikosti vlastní frekvence laminátového hřídele až 3x vyšší než vlastní frekvence u kovového hřídele. Schopnost tlumení závisí na poměru E/p . U laminátů je poměr E/p vyšší než u kovů, takže hřídel z vyztuženého uhlíkového laminátu bude mít při krouživém kmitání oproti kovovému hřídeli stejných rozměrů přibližně 2x vyšší útlum. (4)

4.2 Kritérium teplotních roztažností

Uhlíkové lamináty mají nízké součinitele délkové teplotní roztažnosti.

Teplotní deformace součástí ovlivňuje teplotní roztažnost, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita. Tepelná vodivost jednosměrně vyztužených uhlíkových laminátů ve směru vláken je přibližně stejná jako u oceli ($50 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$), ale kolmo na tento směr je značně nižší. Hodnota měrné tepelné kapacity uhlíkových laminátů ($1,0 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) je srovnatelná s hliníkem ($0,9 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) a zhruba 2 x větší než u oceli.

Měrná tepelná kapacita vztahovaná na objem je u uhlíkového laminátu 1,5 menší než u oceli a 2,5 menší než u hliníku. (4)



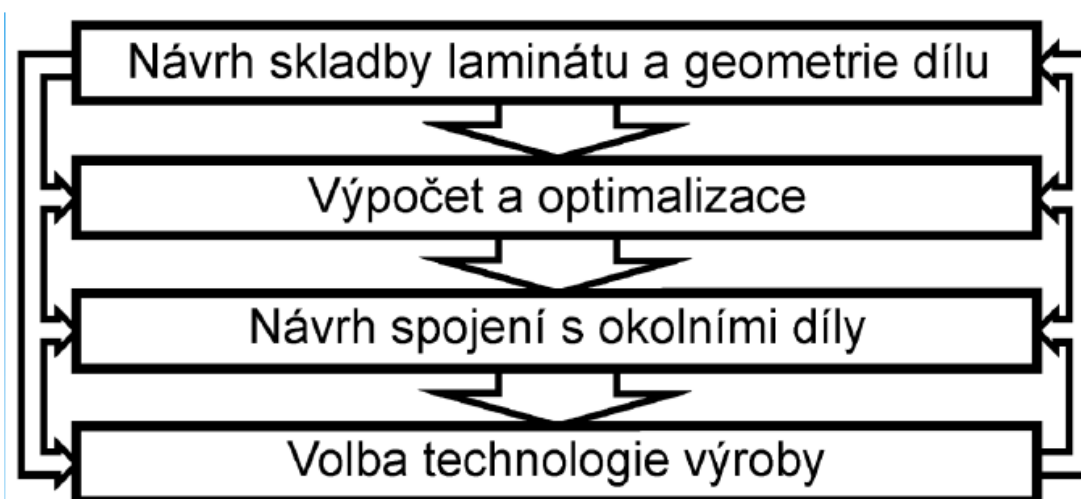
Obrázek 10 Závislost součinitele délkové teplotní roztažnosti ve směru 0° na skladbě laminátu 0° , $\pm 45^\circ$, 90° z uhlíkových HM vláken a epoxidové pryskyřice [RWTH Aachen] (4)

4.3 Technologie výroby vláknových kompozitů

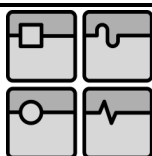
výrobní technologie	objemový podíl vláken v laminátu (obj.%)
pultruze	43 – 83
ovíjení (pletení)	25 – 65
navíjení	45 – 65
RTM	25 – 65
lisování	30 – 50
lisování polotovarů GMT a SMC	15 – 40
pokládání prepregů (autokláv)	50 – 70
stříkání	18 – 35
ruční laminace	10 – 38

Tabulka 3 Srovnání výrobních technologií dle dosažitelného objemového podílu vláken (4)

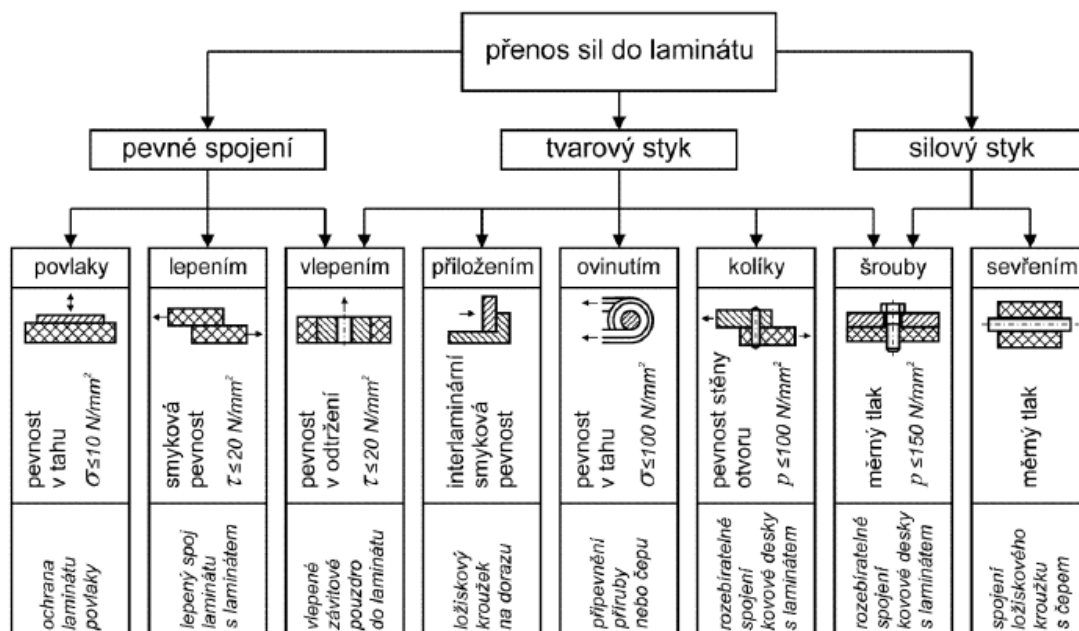
4.4 Návrh laminátové součásti



Obrázek 11 Návrh laminátové součásti (4)



4.5 Spojování laminátů s kovy



Obrázek 12 Spoje, rozhraní laminát – kov (4)

4.6 Příklady realizovaných aplikací v oblasti strojů

- vřetena obráběcích strojů, vřeteníky, rychlé stoly a suporty
- uzavírací jednotka vstřikovacího lisu
- rameno robotu, rychlý manipulátor
- otočné nůžky na plech
- teplotně stabilní ramena měřicích strojů
- vodící tyč nitě pro tkací stroje
- tlakové nádoby, pneumatický sval, centrifugy

5. Technická keramika

Technická keramika je známa spíše v technologii obrábění, kde je využívána pro řezné nástroje. Méně známé aplikace technické keramiky jsou ovšem v konstrukci výrobních strojů a zařízení. Keramické materiály na bázi SiC vynikají vysokou teplotní odolností, velmi nízkým koeficientem teplotní roztažnosti, velmi vysokou tvrdostí, otěruvzdorností, vysokou korozní odolností, nízkou hustotou, nepropustností pro plyny a kapaliny, výbornou tepelnou vodivostí, výbornými kluznými vlastnostmi a mezi keramickými materiály vysokou odolností vůči teplotním šokům. Příkladem využití SiC keramického materiálu může být velmi úspěšné nasazení keramických hřídelů do série pomocných pohonů os pro velice přesné obráběcí stroje. Keramické materiály se nemohou plasticky deformovat, proto u kořenů ostrých strukturálních defektů nemůže dojít k uvolnění koncentrovaného napětí, jako je tomu u kovových materiálů. Odpor proti šíření trhlin je tedy velice nízký. Vzhledem k požadavku na vysokou spolehlivost a bezpečnost konstrukcí je proto nutné používat takové struktury, u kterých byla provedena defektoskopická kontrola. (5)

5.1 Vývoj technické keramiky

Vlastností keramických materiálů byly zkoumány již v 70. letech. Žádný z těchto projektů ovšem nebyl příliš úspěšný pro monolitické keramiky. Vysoké mechanické zatížení, křehkost, složitost tvaru a spojení, ale i kvalita výroby a predikce defektů byly hlavními příčinami neúspěchu.

Nasazování technické keramiky bylo svazováno převážně s problematikou vysokoteplotně zatěžovaných struktur. Technický pokrok ovšem přináší nové možnosti tvorby virtuálních prototypů. Tyto prototypy lze testovat a optimalizovat na různé zatěžovací stavy pomocí výkonných pracovních stanic a špičkových numerických, matematických a statistických programů. Pomocí těchto nástrojů lze vytvořit strukturu, která vyhoví daným podmínkám požadavků zákazníka a umožní i jednodušší technologii výroby. (5)

5.2 Příklady realizovaných aplikací v oblasti strojů

- keramické hřídele
- suporty a desky obráběcích strojů

6. Ploymerbetony

Polymerbeton je nyní jeden z nejčastěji používaných nekonvenčních materiálů pro výrobu nosných částí výrobních strojů. Z polymerbetonu mohou být vyráběny odlitky vážící od několika kilogramů až po několika tunové, čímž poskytuje široké možnosti jeho využití. V současné době se nejčastěji z polymerbetonů odlévají lože a podstavce výrobních strojů, které nacházejí využití ve všech průmyslových odvětvích. (6)

6.1 Složení polymerbetonů

Polymerbeton se skládá z polymerního pojiva a plniva složeného z několika frakcí. Plnivem u těchto materiálů jsou přírodní nerosty, jako jsou SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , nebo jinými částicemi (kovové a skleněné kuličky, kovový prášek). Používaná plniva jsou přírodně nebo synteticky připravená se strukturou vláknitou (např.: mletá skleněná vlákna), destičkovou (např.: tuha) nebo práškovou (např.: vápenec). Polymerbetony používané ve strojírenských aplikacích mají většinou 3 až 4 frakce plniva, přitom rozměry jednotlivých frakcí se pohybují od 0,1mm (kamenná moučka) do 16mm (štěrk, kameny). Pro snížení mezerovitosti se navíc používají skleněné mikrokuličky se zrnitostí 0-200 μm . Většinou se u polymerbetonů jako matrice používají termosety, například epoxidy, polyamidy, melaminy nebo fenol formaldehyd, které jsou dodávány ve formě tekutiny s konzistencí řídkého medu. Tyto jsou pak po dodání katalyzátoru a iniciátoru vytvrzovány buď za pokojových nebo zvýšených teplot. V současné době se ve strojírenství používá zejména epoxidová pryskyřice pro její malou objemovou smrštitelnost po zatvrdnutí. (6)

6.2 Vlastnosti polymerbetonu

- Vysoká statická a dynamická tuhost
- Vysoká schopnost tlumení rázů
- Nízká teplotní vodivost
- Vysoká tepelná kapacita
- Odolnost proti korozi
- Konstrukční variabilita
- Rozměrová přesnost
- Integrace funkčních částí do odlitku
- Možnost recyklace

6.3 Výroba polymerbetonového dílce

Výroba polymerbetonového dílce probíhá v 5-ti fázích. V první fázi se provádí dávkování. Hmotnostní podíl plniva a pojiva je dán výrobcem, ale obvykle bývá kolem 90-93% plniva a 7-10% pojiva. Druhá fáze je míchání. Nejprve se míchají odděleně plniva různých frakcí a pojivo s tvrdidlem, a poté se smíchají všechny složky do výsledné směsi. Ve třetí fázi se provádí odlévání směsi do forem a to buď přímo z míchačky nebo licími pánvemi. Ve čtvrté fázi následuje zhutnění směsi na setřásacích stolech a v páté fázi odstranění formy. (6)

6.4 Příklady realizovaných aplikací v oblasti strojů

- rámy výrobních strojů
- lože obráběcích center

7. Příklady použití a nasazení pro aplikace výrobních strojů

7.1 Vřetena obráběcích strojů

Použitím uhlíkových vláken je možno vyrobit vřetena obráběcích strojů, která budou mít menší průhyb než vřetena vyrobená z oceli, což umožní větší přesnost obrábění. Vřeteno z uhlíkového laminátu může dosahovat kroutícího momentu 500 Nm, otáček 5000 ot/min při výkonu 8,4 kW a posouvající síly 10000N. (4)

	Kovová varianta	Varianta z uhlíkového laminátu
Hmotnost [kg]	13	5,8
Statická tuhost [N/μm]	250	278
Dynamická tuhost [N/μm]	50	59

Tabulka 4 Srovnání kovového a laminátového hřídele (4)

Z tabulky je patrné že při stejné tuhosti dojde ke snížení hmotnosti o více jak 50%. Moment setrvačnosti se sníží o 66% a teplotní pnutí o více než 80%. (4)



Obrázek 13 Frézovací vřeteno IPT Aachen (4)

7.2 Hnací hřídele z uhlíkového laminátu

Z trubek z uhlíkového laminátu lze vytvořit lehčí a tužší hnací hřídele. Vysoká tuhost umožňuje vyšší rychlosti otáčení nebo použití delších hřídelí, které pak nevyžadují další ložiska v místech nastavení. V současnosti jsou i vlepené koncovky schopny přenášet vysoké torzní napětí. Tyto hřídele se používají například pro velmi tuhé hřídele pro CNC soustruhy. (7)



Obrázek 14 Hnací hřídel z uhlíkového laminátu (7)

7.3 Vřeteníky z kompozitu

Velký přínos pro výrobu strojů je zlepšení dynamického tlumení. Vřeteník z uhlíkového laminátu je přibližně o 60% lehčí má téměř dvojnásobné vlastní frekvence, větší dynamické tlumení a větší dynamickou tuhost než ocelová varianta. Jejich snížená reakce na budící frekvence umožňuje vyšší přesnost nebo vyšší řezné rychlosti. (8)



Obrázek 15 Celokompozitový vřeteník vyrobený společností Compotech (8)

7.4 Otočné nůžky na plech z uhlíkového laminátu

Použitím uhlíkového laminátu lze snížit váhu otočné části nůžek až o 75%. Vlivem snížené hmotnosti je možné zvýšit rychlost natáčení o 50%. Doba natáčení laminátových nůžek je 650 ms oproti 1000 ms které dosahuje klasické verze. (4)



Obrázek 16 Laminátové otočné nůžky na plech (4)

7.5 Kompozitní ramena průmyslových robotů

Použitím uhlíkového kompozitu pro konstrukci ramene průmyslového robotu lze výrazně snížit jeho hmotnost a dosáhnout tak lepší dynamiky a menší spotřeby energie. Konstrukce robotu přitom zůstává velmi tuhá, což umožňuje dosahovat velké přesnosti a opakovatelnosti.



Obrázek 17 Průmyslový robot KUKA s ramenem z uhlíkového laminátu (9)

7.6 Kompozitní manipulátor

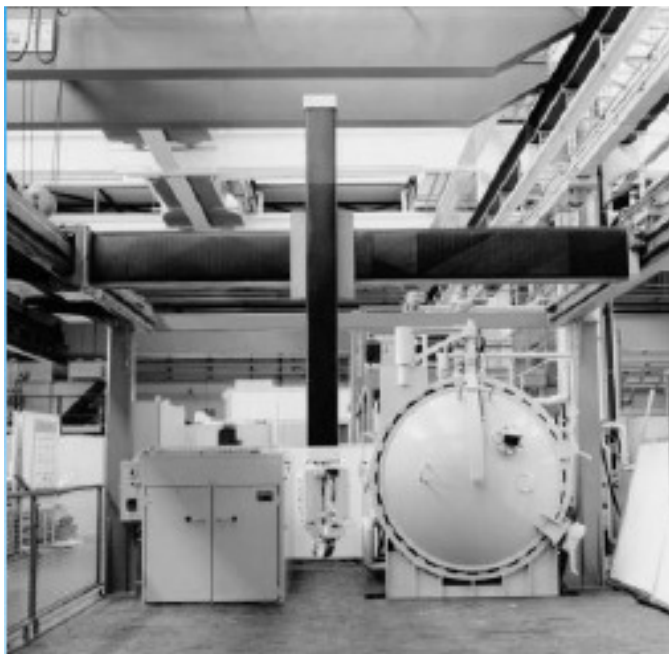
Oproti klasickému provedení dochází ke snížení hmotnosti nosníku o 60% a hmotnosti saní až o 75%. Díky nižší hmotnosti lze dosáhnout zrychlení 1g v osách x, y a maximální rychlost až 60 m/min. (4)



Obrázek 18 Rychlý manipulátor (4)

7.7 Portálový robot z uhlíkového laminátu

Konstrukcí portálového robotu z uhlíkového laminátu dojde ke snížení hmotnosti o 47%, zvýšení maximální rychlosti os o 50% a zvětšení zrychlení z 0,3g na 1g. (4)



Obrázek 19 Portálový robot z uhlíkového laminátu (4)

7.8 Keramické hřídele

Hřídel vyrobená z karbidu křemíku je schopna přenášet vyšší kroutící momenty než ocelové hřídele, čas rychlosti náběhu momentu může dosahovat 1[ms]. Keramika SiSiC tedy má 2x vyšší tuhost ve smyku a 1,8x vyšší tuhost v tahu/tlaku. Další zásadní výhodou je úspora hmotnosti až 60% ve srovnání s ocelovým provedením stejné koncepce. Keramické hřídele se používají například u pomocných pohonů os pro velice přesné obráběcí stroje. (5)



Obrázek 20 Keramické hřídele z materiálu Alumina Ceramic (10)

7.9 Keramický pracovní stůl

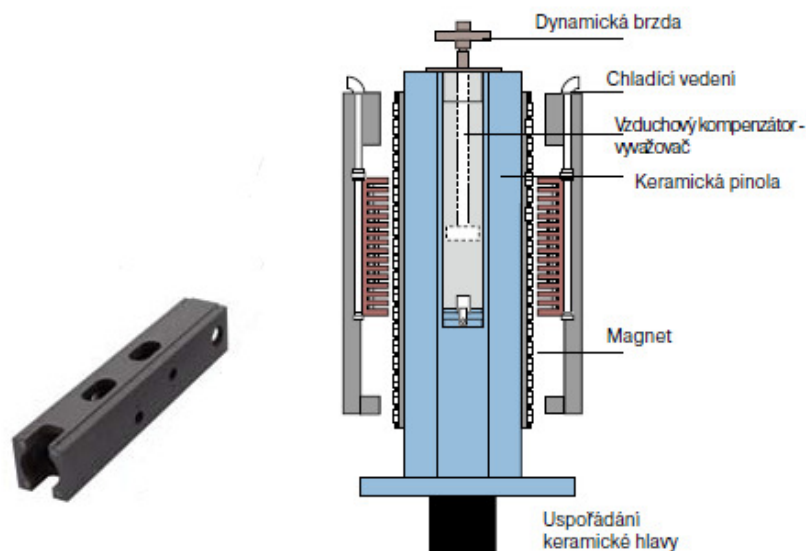
Zajištění vysoké přesnosti obrábění se zlepšenou elektrickou izolací, odolností proti otěru a tuhostí. V porovnání například s ocelí nebo plasty mají keramické komponenty pro konstrukci obráběcích strojů řadu výhod. Tyto komponenty jsou lehčí a tvrdší, mají vysokou tuhost, odolnost proti stárnutí, korozi, chemikáliím a teplotě. Koeficient tepelné roztažnosti u keramických komponentů leží asi v jedné třetině při porovnání s litinou. (11)



Obrázek 21 Keramický stůl EMD stroje firmy Sodici (12)

7.10 Keramická pinola

Použitím keramické pinoly na kluzném vedení lineárního motoru osy Z se zmenší celková hmotnost, což vede ke snížení zatížení motoru. Díky nízkému koeficientu tepelné roztažnosti se minimalizují tepelné deformace způsobené změnami teplot okolí a to zajišťuje vysokou přesnost obrábění. Keramický materiál je dlouhodobě stabilní a její velký elektroizolační odpor umožňuje používat v průběhu obrábění velmi malou energii využívající znamenitou vodivost mezi elektrodou a obrobkem. (12)



Obrázek 22 Keramická pinola EMD stroje firmy Sodici (12)

7.11 Nosné struktury výrobních strojů z granitu

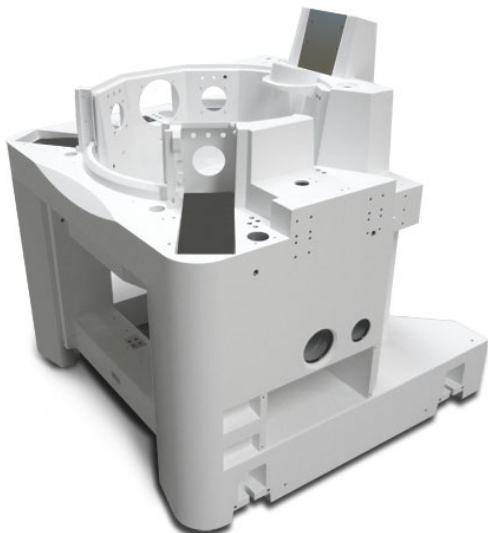
Díky malé teplotní roztažnosti, výbornému tlumení a stálosti granitu lze dosáhnout velké přesnosti u strojů vyrobených z tohoto materiálu. Díky poměrně nízké váze je možné zvětšit tloušťky stěn až trojnásobně ve srovnání s litinou při zachování stejné hmotnosti. Granitové lože vyniká tvarovou stabilitou, vysokou tuhostí, vysokou odolností proti opotřebení a nízkou tepelnou vodivostí. (13) (2)



Obrázek 23 Nosná část stroje pro laserové obrábění (14)

7.12 Polymerbetonové nosné části výrobních strojů

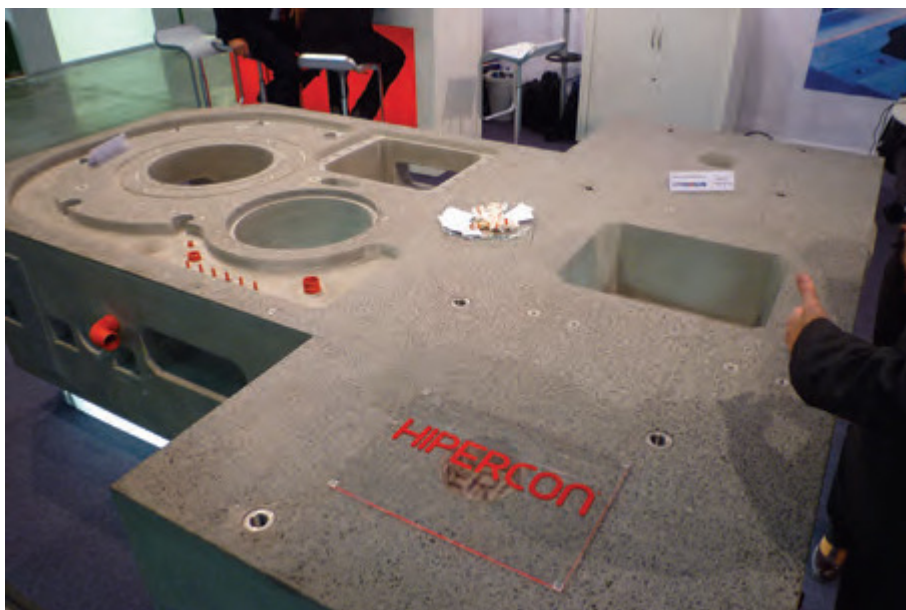
Použitím polymerbetonového rámu pro stavbu obráběcího stroje lze dosáhnout lepší kvality obrobenech ploch a vyšší životnost nástroje. Těchto parametrů dosahují polymerbetonové rámy zejména díky svým tlumícím vlastnostem a tuhosti. Tuhost polymerbetonového rámu je až 3,5x vyšší než u litinové varianty o stejné hmotnosti, a to zejména díky větším tloušťkám stěn rámu. (6)



Obrázek 24 Polymerbetonový rám (15)

7.13 Nosné díly z vysokopevnostního cementového betonu Hipercon

Největšími výhodami použití materiálu Hipercon (High Performance Concrete) jsou vysoká pevnost v tlaku (až 200 N/mm²), nízká vodivost tepla a dobré materiálové tlumení, které nám zaručuje dobré tlumení vibrací. (16)



Obrázek 25 Základové lože firmy Toshulin z Hiperconu (3)

7.14 Nosné části obráběcích strojů z Hydropolu

Hydropol je materiál společnosti FRAMAG, který je založen na kombinaci ocelového svařence vyplněného polymerbetonem. Výhodami tohoto materiálu jsou dobré tlumicí schopnosti, nízká teplotní roztažnost a výhodou vůči celo-betonovým provedením je možnost následného svařování, vrtání nebo řezání závitů. (17)



Obrázek 26 Základové lože z Hydropolu (18)

8. Závěr

V této bakalářské práci se čtenář seznámil s různými materiály použitelnými pro stavbu obráběcích strojů, a to zejména s těmi méně obvyklými – nekonvenčními materiály.

V současnosti jsou krom klasických materiálů, jako jsou litina nebo ocel, asi nejrozšířenější materiály z částicových kompozitů, hlavně polymerbetony a granit. Polyberbetony se začínají hodně prosazovat hlavně pro stavbu nosných částí obráběcích strojů, a to hlavně díky svým tlumícím vlastnostem a nízké teplotní roztažnosti. Již mnoho světových firem produkujících výrobní stroje nabízí ve své nabídce konstrukční celky z těchto nekonvenčních materiálů. Dílce z granitu jsou již také poměrně rozšířenou aplikací a to hlavně u velmi přesných obráběcích strojů nebo přesných měřících strojů, zejména díky jejich výborné rozměrové stálosti.

Polymerbetony a granit se používají hlavně pro nosné části strojů, což jsou například lože a rámy, jako další aplikace pro výrobní stroje se používají z řad nekonvenčních materiálů hlavně vláknové kompozity s uhlíkovými vlákny a keramika. Tyto materiály jsou však stále velice nákladné na výrobu a napříč svému vysokému potenciálu jsou používány jen zřídka. Avšak se zdokonalujícími se technologiemi výroby a zvyšujícími se nároky na obráběcí stroje budou zřejmě komponenty z těchto materiálů stále častěji používány pro konstrukce výrobních strojů.

Dále je nutné brát v potaz zkušenosti konstruktérů s používáním nových materiálů, pro které nejsou jednoznačně stanoveny metodiky pro konstruování. Tyto zkušenosti lze dosáhnout testováním a zkoušením, které může být doplněno a podpořeno využitím simulačních softwarů.

S vyšším využíváním nových (nekonvenčních) materiálů, ve kterých je obrovský potenciál a nasazením nových cenově přijatelnějších výrobních technologií je možné počítat s jejich rozsáhlým uplatněním na trhu v oblasti konstrukce obráběcích strojů.

S materiálovými vlastnostmi těchto konstrukčních materiálů bude možné dosahovat u nových konstrukcí vyšší posuvové rychlosti, snížení energetické náročnosti provozu a zvýšení pracovní přesnosti.

9. Bibliografie

1. **Smolík, J.** *Přehled nekonvenčních materiálů a struktur pro stavbu obráběcích.* místo neznámé : Společnost pro obráběcí stroje a ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Výzkumné centrum pro strojírenskou a výrobní technologii a techniku, 2007.
2. **Valouch, J.** KOVOTECH VALOUCH. *Beton a přírodní žula při výrobě loží a rámů obráběcích strojů.* [Online] 27. 03 2006.
<http://kovotech.kvalitne.cz/view.php?cislocclanku=2006032701>.
3. **Smolík, J., a další.** *Stavba nosných soustav.* místo neznámé : Seminář SpOS a VCSVTT: Obráběcí stroje a technologie na EMO Milano 2009.
4. **Mráz, P.** *Využití vláknových kompozitů při vývoji nových struktur výrobních strojů a robotů.* místo neznámé : Společnost pro obráběcí stroje a ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Výzkumné centrum pro strojírenskou a výrobní technologii a techniku, 2007.
5. **Konsar, M.** Vizi konkurenceschopného strojírenství naplňují špičkové keramické materiály na bázi SiC! *PEMAVAKO.* [Online] <http://pemavako.cz/keramika/vizi-konkurenceschopneho-strojirenstvi-naplnuji-spickove-keramicke-materialy-na-bazi-sic>.
6. **Buksa, J.** Polymerbetonový rám svislého soustruhu. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 60 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Bronislav Foller, Ph.D.
7. Výrobky a aplikace > Hřídele. *Compotech.* [Online]
<http://www.compotech.com/index.aspx?id=15>.
8. Výrobky a aplikace > Machine Building Components. *Compotech.* [Online]
<http://www.compotech.com/index.aspx?id=39>.
9. KR 40 PA. *KUKA.* [Online] http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/medium/kr40_pa/start.htm.
10. zirconia shaft. *alibaba.* [Online] http://www.alibaba.com/product-gs/423111623/zirconia_shaft.html.
11. CERAMIC COMPONENTS. *Sodic.* [Online]
<http://www.sodick.com/technology/ceramics>.
12. AG40L. *Sodic.* [Online] http://www.sodick.org/assets/files/brochures/ag40l_cz.pdf.
13. Essential Facts - Indispensable Knowledge. *OELZE.* [Online] <http://www.oelze-praezision.de/en/designfeatures.htm>.
14. Hard stone unit. *OELZE.* [Online] http://www.oelze-praezision.de/en/SoHartgestein1_e.htm.
15. Mineral casting. *SCHNEEBERGER.* [Online]
<http://www.schneeberger.com/products/mineral-casting/>.

16. High Performance Concrete. *Bögl Reitz*. [Online] <http://www.max-boegl.de/boeglnet/web/show.jsp?nodeId=1000467&lang=en&preview=true>.

17. The advantages of HYDROPOL. *Framag*. [Online] <http://www.framag.com/index.cfm?seite=vorteil-hydropol&sprache=EN>.

18. Composite Material for Machine Tool beds. *Framag*. [Online] <http://www.framag.com/index.cfm?seite=machinenbetten&sprache=EN>.

19. *MM Průmyslové spektrum - Strojírenský měsíčník*. [Online] <http://www.mmspektrum.com/>.

20. **Marek, J. a kol.** *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. místo neznámé : MM publishing, s.r.o., 2010.

21. **Marek, J.** *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. místo neznámé : MM speciál, 2006. ISSN 1212-2572.

10. Seznam obrázků

Obrázek 1 Vliv materiálů na stavbu strojů (1)	8
Obrázek 2 Rychlost šíření zvuku v materiálu (1)	9
Obrázek 3 Nosná struktura obráběcího centra tvořená svařenci (1)	11
Obrázek 4 Odlitek stojanu horizontálního frézovacího centra (1)	11
Obrázek 5 Nosná struktura portálového vertikálního centra pro mikrofrézování z granitu (1)	12
Obrázek 6 Detail polymerbetonového odlitku (3)	13
Obrázek 7 Support soustružnického nože ze silnovrstvého uhlíkového laminátu (1)	14
Obrázek 8 Nosník portálu a support laserového vyřezávacího stroje (1)	14
Obrázek 9 Nosná struktura stroje DMC 85 V linear firmy DMG z Hydropolu. (1).....	15
Obrázek 10 Závislost součinitele délkové teplotní roztažnosti ve směru 0° na skladbě laminátu 0°, ± 45°, 90° z uhlíkových HM vláken a epoxidové pryskyřice [RWTH Aachen] (4).....	17
Obrázek 11 Návrh laminátové součásti (4)	18
Obrázek 12 Spoje, rozhraní laminát – kov (4).....	19
Obrázek 13 Frézovací vřeteno IPT Aachen (4)	22
Obrázek 14 Hnací hřídel z uhlíkového laminátu (7).....	22
Obrázek 15 Celokompozitový vřeteník vyrobený společností Compotech (8)	23
Obrázek 16 Laminátové otočné nůžky na plech (4).....	23
Obrázek 17 Průmyslový robot KUKA s ramenem z uhlíkového laminátu (9)	24
Obrázek 18 Rychlý manipulátor (4).....	24
Obrázek 19 Portálový robot z uhlíkového laminátu (4)	25
Obrázek 20 Keramické hřídele z materiálu Alumina Ceramic (10)	25
Obrázek 21 Keramický stůl EMD stroje firmy Sodici (12)	26
Obrázek 22 Keramická pinola EMD stroje firmy Sodici (12).....	26
Obrázek 23 Nosná část stroje pro laserové obrábění (14)	27
Obrázek 24 Polymerbetonový rám (15)	27
Obrázek 25 Základové lože firmy Toshulin z Hiperconu (3)	28
Obrázek 26 Základové lože z Hydropolu (18).....	28

11. Seznam tabulek

Tabulka 1 Srovnání některých vlastností konvenčních a nekonvenčních materiálů (1).....	10
Tabulka 2 Vybrané vlastnosti některých nekonvenčních materiálů (1)	16
Tabulka 3 Srovnání výrobních technologií dle dosažitelného objemového podílu vláken	18
Tabulka 4 Srovnání kovového a laminátového hřídele (4)	21