

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

VLIV NEKONVENČNÍCH MATERIÁLŮ NA DYNAMICKÉ VLASTNOSTI NOSNÝCH DÍLCŮ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

ING. VIKTOR KULÍŠEK

DOKTORSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM: STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

STUDIJNÍ OBOR: KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ

ŠKOLITEL: ING. JAN SMOLÍK, PH.D.

ŠKOLITEL SPECIALISTA: PROF. ING. MILAN RŮŽIČKA, CSc.

TEZE DISERTACE K ZÍSKÁNÍ AKADEMICKÉHO TITULU "DOKTOR", VE ZKRATCE "PH.D."

PRAHA

2021

Název anglicky: Influence of Non-Conventional Materials on Dynamic Behaviour of Machine Tool Structural Parts.

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu výrobních strojů a zařízení Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Viktor Kulíšek

Ústav výrobních strojů a zařízení, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07 Praha 6
v.kulisek@rcmt.cvut.cz

Školitel: Ing. Jan Smolík, Ph.D.

Ústav výrobních strojů a zařízení, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07 Praha 6
j.smolik@rcmt.cvut.cz

Školitel-specialista: Prof. Ing. Milan Růžička, CSc.

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Fakulta strojní ČVUT
v Praze
Technická 4, 166 07 Praha 6
milan.ruzicka@fs.cvut.cz

Oponenti:

Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D., Fakulta strojní ZČU v Plzni

Doc. Ing. Tomáš Mareš, Ph.D., Fakulta strojní ČVUT v Praze

Ing. Bohuslav Cabrnock, Ph.D., Výzkumný a zkušební letecký ústav, Praha

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.
v zasedací místnosti A-119 na Fakultě strojní ČVUT v Praze, Horská 3, Praha 2,
před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Konstrukční a
procesní inženýrství

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT
v Praze, Technická 4, Praha 6.

Prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
předseda oborové rady oboru Konstrukční a procesní inženýrství
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Anotace

Disertační práce se zabývá přínosem vláknových kompozitů do konstrukce nosných dílců obráběcích strojů, u kterých jsou kladeny vysoké požadavky na statickou a dynamickou tuhost. Je zaměřena na analýzu smykadel, která jsou navržena jako celokompozitní konstrukce nebo jako hybridní konstrukce, jež jsou tvořené vnějším kovovým pláštěm a vnitřní kompozitní výztuží. S využitím metod experimentální modální analýzy jsou zkoušeny různé typy konstrukcí smykadel a analyzovány jejich vlastnosti v podobě samotných smykadel i v sestavě obráběcího stroje, nebo uzlu stroje, případně alespoň s vlivem spojovacích rozhraní. Pro vyhodnocení jsou použita referenční celokovová tělesa stejných vnějších rozměrů a připojovacích rozhraní. Spolu s výsledky experimentálních zkoušek byly provedeny výpočtové práce založené na metodě konečných prvků. Jejich výstupem jsou postupy pro relevantní modelování a výsledky možné hmotnostní redukce dílů. Výsledky ukazují vliv vstupní tuhosti, tlumení a hmotnosti při změně materiálové struktury na vlastnosti nosného tělesa – smykadla. Zároveň je zde zkoumán vliv daných změn na dynamické chování sestavy nosných těles obráběcího stroje.

Summary

The dissertation thesis Influence on Non-Conventional Materials on Dynamic Behaviour of Machine Tool Structural Part is focused on application of fibre composites to structural parts with high static and dynamic stiffness demands. Z-axis glides or spindle rams are analysed when designed as composite designs or hybrid material structures, which combine metal designs with inner composite reinforcements. Using methods of experimental modal analysis, different designs were analysed both in terms of structural body and in the assembly of machine tool or simplified assembly with the influence of machine tool connection interfaces. For the results evaluation, a comparison with isotropic reference parts of corresponding outer dimensions and connection interfaces positioning is used. Together with experimental analysis, finite element based analysis were performed with aim to analyse possible weight reduction of new light weight designs with static stiffness corresponding to the reference steel or ductile cast iron based parts. Results demonstrate the influence of the stiffness, mass and damping change on the behaviour of Z-axis glides, and also on the behaviour of the machine tool structural parts assembly.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Souhrn a diskuze současného stavu poznání.....	1
2.1	Nové materiály v konstrukci nosných dílců výrobních strojů	2
2.2	Vliv nosných dílců na dynamickou tuhost sestavy	4
2.3	Shrnutí rešerše.....	5
3	Cíle disertační práce	6
4	Popis metod vedoucí k splnění cílů	6
5	Shrnutí výsledků a dílčích cílů práce	10
5.1	Určení statické tuhosti a hmotnostní redukce kompozitních a hybridních nosných těles	10
5.2	Ověřené výpočtové modely silnostěnných dílců z vláknových kompozitů	15
5.3	Modální vlastnosti kompozitních a hybridních nosných dílců ...	15
5.4	Určení vlivu změny tuhosti a tlumení dílce na dynamické vlastnosti sestavy pomocí experimentálních zkoušek	17
5.5	Určení vlivu změny tuhosti a tlumení dílce na dynamické vlastnosti sestavy pomocí výpočtového modelu.....	20
5.6	Shrnutí vlivu tuhosti a tlumení kompozitních dílců na dynamické vlastnosti sestavy stroje	25
6	Závěr a diskuze.....	26
6.1	Přínos pro vědu a praxi	26
6.2	Možnosti dalšího výzkumu problematiky	27
	Seznam citované literatury	28
	Publikace autora vztahené k disertační práci	31

1 Úvod

Nosné dílce výrobních strojů jsou tradičně vyráběny z litiny (šedé nebo tvárné) nebo ocelových svařenců. Tyto materiály umožňují díky vysokému modulu pružnosti dosáhnout vysoké statické tuhosti dílců, na druhou stranu jejich vysoká měrná hmotnost omezuje dynamické chování výrobních strojů a představuje tak omezení ve zvyšování výkonů výrobních strojů. Nevýhody vysoké měrné hmotnosti lze částečně kompenzovat využitím optimalizačních nástrojů na bázi metody konečných prvků, které umožňují dosáhnout optimálního rozmístění nosného materiálu z hlediska tuhosti a hmotnosti. Další možností změny mechanických parametrů nosných dílců výrobních strojů je částečně nebo zcela nahradit tradiční konstrukční materiál materiálem novým, jehož aplikace by přinesla zvýšení dynamických vlastností stroje. V úvahu připadá použití tuhých a lehkých materiálových struktur – vláknových kompozitů, které umožňují odlehčit a případně vyztužit nosné komponenty pohybových os výrobních strojů.

Tato disertační práce je zaměřena na aplikaci vláknových kompozitů do nosných dílců obráběcích strojů. Je zacílena na výzkum dosažení požadované dynamické tuhosti dílce, potažmo sestavy nosných dílců stroje, buď plnou nebo částečnou náhradou tradičních izotropních materiálů ortotropním kompozitem na bázi vysoko-modulových uhlíkových vláken. V práci jsou určeny vlastnosti nosných dílů z vláknových kompozitů se zaměřením na statickou tuhost a modální vlastnosti a možnou hmotnostní redukci. Je rozvíjena schopnost a přesnost predikce jejich vlastností pomocí výpočtových nástrojů se zahrnutím velmi specifické aplikace vláknových kompozitů do silnostěnných komponent s vysokými nároky na statickou tuhost. Hlavním přínosem je určení změny dynamické tuhosti nosného dílce a sestavy nosných dílců vlivem změny tuhosti a tlumení materiálové struktury z oceli nebo litiny na vláknový kompozit. A to jak pomocí experimentálních zkoušek založených na modální analýze dílů, respektive sestav, tak pomocí vývoje výpočtového modelu, který umožňuje posouzení vlivu tuhosti a tlumení komponenty na celkovou dynamickou tuhost stroje se zahrnutím dominantního vlivu tlumení spojovacích rozhraní.

2 Souhrn a diskuze současného stavu poznání

Zvyšování užitných vlastností výrobních strojů (přesnost výrobku, jakost povrchu, výrobní výkon, spolehlivost, hospodárnost a spotřeba energie) je nutnou podmínkou vyšší konkurenceschopnosti nových výrobních strojů uváděných na trh. Z analýz [1], [2] vyplývá přínos nových materiálů pro přesnost, jakost, snížení spotřeby energie, v menší míře i pro výrobní výkon. Jednou z možných cest je ve zvýšení dynamické tuhosti sestavy nosných dílců stroje pomocí materiálové změny v konstrukci nosných prvků. To vychází z poznatků o mezní třísce a limitech obrábění, viz Tlustý a Poláček [3], [4] a Altintas [5]. Tlustý a Poláček [3] představili vztah pro výpočet meze stability – mezní šířku třísky, v jehož jmenovateli vystupuje

minimální hodnota reálné složky dynamické poddajnosti sestavy obráběcího stroje, nástroje a obrobku. Případné snížení dynamické poddajnosti pomocí zvýšení statické tuhosti, nebo tlumení sestavy stroje, se projeví v možnosti stabilně odebrat třísku větší tloušťky a tím zvyšovat produktivitu.

Skupina vhodných materiálů pro stavbu pohybových os je určena požadavkem na zvyšování vlastních frekvencí a snižování setrvačných hmot. Z těchto požadavků plyne nutnost použití materiálů, jejichž modul pružnosti je přibližně stejný nebo vyšší než modul pružnosti litiny nebo oceli. Jelikož je většina nosných komponent výrobních strojů zatížena ohybovým namáháním, použití materiálu nižšího modulu by znamenalo nutnost aplikace většího množství materiálu pro dosažení stejné tuhosti. To by v případě dodržení vnějších rozměrů komponenty znamenalo umísťovat materiál blíže neutrální ose, a tudíž méně efektivně vzhledem k ohybové tuhosti. Vláknové kompozity, obzvláště v případě (ultra)-vysoko-modulových vláken, mohou podmínku vysoké tuhosti a nízké hmotnosti splnit a nabízí tak potenciál k úspěšné aplikaci ve výrobních strojích.

2.1 Nové materiály v konstrukci nosných dílců výrobních strojů

Analýzu přínosu „light-weight“ designu pro obráběcí stroje provedl Kroll [7], hlavními faktory pro vylepšení vlastností bylo snížení hmotnosti při zachování statické tuhosti, což je teoreticky možné pomocí vláknových kompozitů. Autor citoval výsledky studie, kdy 30% redukce hmotnosti pohybových os vedla k 5% zvýšení zrychlení a následnému zvýšení produktivity stroje. Velký přehled kompozitních aplikací pro obráběcí stroje provedl Möhring [8] a [10], který analyzoval přínosy statické tuhosti a nízké hmotnosti vzhledem k požadavkům obráběcích strojů, možnosti přesnosti a kapacity jejich výroby a k ceně materiálových vstupů. Poslední dva faktory v současné době představují limity k hromadnému nasazení daných materiálových struktur. Möhring dále v [9] uvedl, že velký potenciál, respektive technologie budoucnosti, je v uplatnění hybridních struktur s potahy z oceli nebo vláknových kompozitů a výplní z pěnových jader nebo betonů

Většina aplikací kompozitů do nosných komponent pohybových os typu smykadel byla zveřejněna pouze ve fázi konstrukčních, technologických a výpočtových studií. Z hlediska nosných komponent provedl Lee [13] výzkum aplikace hybridní sendvičové struktury kompozit-kov pro stavbu osy X a osy Y vysoko-rychlostního obráběcího centra s výslednou 30% redukcí hmotnosti pohybových os při 1,5násobném až 5,7násobném zvýšení tlumení. Studii experimentálního celokompozitního smykadla prezentoval Uher [14] s 54% hmotnostní úsporou a 1,9násobným zvýšením dynamické tuhosti oproti referenčnímu ocelovému smykadlu. Případové studie „light-weight“ designu do obráběcích strojů prezentoval Merlo [15], který se zabýval lehkými a tlumenými strukturami – vláknovými kompozity a hliníkovou pěnou. Na případové studii kompozitního smykadla kruhového průřezu, s hliníkovými přírubami a dalšími spojovacími rozhraními ukázal možnost hmotnostní redukce až o 40 % při zvýšení tlumení.

Další studií publikoval Mohring [16], kde představil několik kompozitových variant smykadel. Cena smykadel byla 4,5 až 10násobně vyšší oproti tradičním strukturám, zároveň u nich dosáhl 30% až 50% hmotnostní redukce a snížení teplotních deformací.

Mimo přínosy z hlediska statické tuhosti a hmotnosti umožňují vláknové kompozity i další benefity k užitným vlastnostem obráběcích strojů. Kono [11] a Kondo [12] prezentovali možnost zvýšení přesnosti hybridních ocelovo-kompozitních vřeten z hlediska teplotně-mechanického chování, které bylo dosaženo snížením teplotní roztažnosti vřetene. U studie hybridního vřetene došlo ke snížení teplotních deformací přibližně o 30 % v porovnání s ocelovým řešením. Přes pozitivní výsledky ale bylo konstatováno, že optimální návrh z vláknového kompozitu může narazit na problém dosažení potřebné hodnoty statické tuhosti, pokud jsou dodrženy vnější rozměry izotropního řešení.

Hybridní kuličkový šroub představil Neugebauer [17], u kuličkového šroubu bylo kombinací vnějšího ocelového pláště a vnitřní kompozitní výztuže dosaženo 10násobně menší teplotní roztažnosti v porovnání s tradičním kuličkovým šroubem. Vývoj probíhá také u hřídelí vřeten Brecher [18], Bang [19]. Shrnutí vývoje vláknových kompozitů v německých výzkumných ústavech prezentoval Mráz v [20] a [21] se zaměřením na kompozitní superty soustruhů, ramena robotů a hřídele elektrovřeten vyvinuté ve Fraunhoferově IPT institutu a RWTH Aachen.

Mimo kompozitní struktury, nebo hybridní struktury založené na kombinaci vláknový kompozit – kov jsou také zkoumány další hybridní struktury, jejichž cílem je snížit hmotnost při zachování statické tuhosti komponent pohybových os. Příkladem jsou například aplikace sendvičových panelů, které kombinují ocelové svařence s hliníkovou pěnou, viz například Neugebauer [23], kde je zmíněn i další benefit v podobě zvýšeného tlumení struktury. Aplikace a přínosy změny ocelového svařence v sendvičovou strukturu na bázi ocelového pláště a hliníkové pěny popsal výpočtově ve své disertační práci Smolík [2], který popsal možnost odstranění hmotného žebrování pomocí lehké hliníkové pěny, s možným zvýšením tuhosti, pokud by došlo k přesunu materiálu ze žebrování do vnějšího pláště. Aggogeri [24] publikoval porovnání sendvičové struktury na bázi hliníkové pěny, vláknových kompozitů a tradičních materiálů na modelu strukturálního tělesa, sendvičová struktura s hliníkovou pěnou zde dosáhla 20 až 30násobného zvýšení tlumení oproti tradičnímu materiálu, vláknový kompozit dosáhl pouze 2-3násobného zvýšení tlumení.

Hybridní konstrukci na bázi jádra z polymerního kompozitu a potahu z vláknového kompozitu prezentoval Cho [25] s výslednou 36% redukcí hmotnosti a zvýšením schopnosti útlumu. Jinou aplikací s výsledkem –zvýšením tlumení prezentoval Kepczak [26], který analyzoval vliv aditivních částic u polymerních kompozitů na tlumení těles. Vrba [27] ve své disertační práci prezentoval vliv částicových kompozitů na bázi kameniva a pryže a epoxidového pojiva v hybridních strukturách kov – kompozit na dynamické vlastnosti nosných dílců. Vlivem aplikace částicových kompozitů došlo k násobnému zvýšení tlumení

nosných těles. Vliv výplňového materiálu na dynamické chování nosného dílce publikoval také Sonawane [28], který za pomoci výpočtů MKP a experimentálních zkoušek navrhl hybridní vyplňované stojany se zvýšenými vlastními frekvencemi, nicméně bez většího komentáře směrem k vlivu na dynamické chování stroje s danou strukturou.

2.2 Vliv nosných dílců na dynamickou tuhost sestavy

Aplikace vláknových kompozitů, jako lehkých a tuhých materiálů, je ve shodě s budoucími trendy ve vývoji nosných struktur strojů, dle Zulaiky [6] bude hlavním trendem dematerializace dílců. Klíčová otázka pro přínosné a hospodárné uplatnění vláknových kompozitů je, jak se projeví změna tuhosti, tlumení a snížení hmotnosti komponenty z kompozitu na dynamických vlastnostech stroje, zejména na dynamické tuhosti sestavy. Výše popsané publikace většinou popisují výsledky aplikace kompozitů nebo, hybridních struktur do oblasti konstrukce nosných dílců obráběcích strojů. Autoři publikací analyzují přínos samotného tělesa, a to s ohledem na redukci jeho hmotnosti nebo zvýšení tlumení. Příklad vlivu aplikace vláknových kompozitů na tlumení nosné struktury (jak v kompozitní, tak hybridní formě kompozit-kov) prezentoval Kim [29], který dosáhl zvýšení tlumení až o 530 % oproti referenčnímu duralovému dílci. Lee [13] prezentoval 1,5 až 5,7krát vyšší tlumení hybridního dílce oproti kovu.

Existuje velmi málo publikací, ve kterých je diskutován přínos změny materiálu na dynamické chování komplexní sestavy nosných dílců, nebo případně na užité vlastnosti stroje. Jednou z mála publikací, ve které je aplikace vláknových kompozitů vztažena nejen na mechanické vlastnosti, ale i na užité vlastnosti stroje, je [22], ve které Lee publikoval zvýšení výrobního výkonu dosažením o 23 % většího rozměru mezní třísky, zvýšení výkonu bylo dosaženo pomocí kompozitního vřetena.

Mimo přístupů založených na experimentálních zkouškách je nutno zmínit i přístupy predikce dynamické tuhosti sestavy, které jsou založené na výpočtových metodách. S rozvojem metody konečných prvků došlo k jejímu výraznému použití v oblasti návrhu obráběcích strojů, optimalizace jejich nosných struktur – topologické i parametrické, s cílem zvýšit efektivitu rozmístění nosného materiálu při dosažení co nejvyšší statické tuhosti a vhodné hmotnosti. Přístupy tohoto typu k návrhu strojů popisuje například Kolář [30].

Pro modelování dynamického chování sestavy nosné struktury stroje bývá často použito metody modálního rozkladu. Tato metoda umožňuje provést redukci výsledků modální analýzy MKP do modálních souřadnic a tyto výsledky převést do popisu ve stavovém prostoru. Následně každému tvaru přiřadit parametry proporcionálního tlumení a vypočítat dynamickou charakteristiku sestavy. Přístup popsal například Veselý [31] a Sulitka [32] z hlediska vývoje obráběcích strojů na FS ČVUT v Praze, kde je zároveň popsáno i další doplnění modelu o spojení s parametry pohonů. Nevýhoda tohoto, jinak efektivního postupu, spočívá v nemožnosti specifikace vlivu tlumení jednotlivých komponent na celkové

tlumení stroje. Jeho použití na posouzení vlivu tuhosti a tlumení kompozitních komponent na celkovou dynamickou charakteristiku sestavy je tak možné pouze v případě, kdy by se prokázalo, že tlumení samotného dílce neovlivňuje výsledné tlumení sestavy.

V posledních letech byly provedeny rozsáhlé výzkumné a vývojové práce, zaměřené na vývoj schopnosti predikovat dynamické chování obráběcího stroje s využitím metody konečných prvků. Tímto tématem se zabývají především německé výzkumné týmy okolo Brechera [33], Zaeha a Semma [34], [35], [36], [37], [38]. V rámci těchto prací vznikají postupy, jak implementovat do modelu dynamického chování stroje, se zahrnutím lineárního i nelineárního projevu, tlumení komponent a spojovacích rozhraní včetně vlivu tření. Tyto metody používají experimentální identifikaci vlivu jednotlivých prvků tlumení (například tlumení kolejnic a hnízd lineárního vedení) a vyvíjí přístupy, jak tyto vlivy implementovat do globálního dynamického chování stroje pro například sestavení maticí tlumení modelu celého stroje. Výsledky těchto prací ukazují schopnost modelování dynamického chování sestavy stroje, nicméně zatím je stále otázkou, do jaké míry jsou dané výsledky prediktivní a do jaké míry je nutno výpočtové modely a jejich vstupy ladit pro jednotlivé stroje s využitím alespoň částečného experimentálního ověřování.

2.3 Shrnutí řešerše

Je velmi obtížné posoudit například, jestli lze navrhnout novou nosnou komponentu v rámci „light-weight“ postupu například se sníženou statickou tuhostí, sníženou hmotností a zvýšeným tlumením, které by vedlo k vyšší dynamické tuhosti a tak bylo schopno kompenzovat redukovanou statickou tuhost. Je velmi obtížné využít data prezentovaná v literatuře a odvodit obecná pravidla pro návrh nových materiálových struktur nosných dílců, která by vedla k zvýšení hlavních užitných vlastností obráběcích strojů. Například Möhring v [8] podmiňuje úspěšné uplatnění těchto materiálů systematickým uplatněním metod pro návrh a optimalizaci, které musí být vyvinuty.

Jednou z klíčových otázek pro přínosné a hospodárné uplatnění vláknových kompozitů je, jak se projeví zvýšený útlum a snížená hmotnost komponenty (kompozitní či hybridní) při možné změně statické tuhosti (oproti dílci z oceli) na dynamických vlastnostech stroje – zejména na dynamické tuhosti. A z ní odvozených užitných vlastností stroje – například možném zvýšení mezní třísky vlivem změny dynamické tuhosti. Spolehlivé zodpovězení této otázky by umožnilo již ve fázi návrhu zohlednit, do jaké míry je náhrada konstrukčního materiálu –litiny nebo oceli pomocí kompozitní nebo hybridní struktury (o výrazně vyšší ceně) přínosná. Jak ukázala řešerše, tato otázka není téměř řešena. Většina publikací se omezuje na porovnání mechanických parametrů dílce, bez dalšího přesahu pro užitné vlastnosti stroje. Jednotlivé publikace řeší částečná témata, například porovnávají, o kolik může být vybraný díl lehčí než díl z oceli, případně jestli má

lepší tlumení. Výsledky nejsou vztažené až na úroveň vlivu na celkové chování stroje.

Otevírá se zde tedy téma pro experimentální výzkum i vývoj výpočtových modelů nosné struktury stroje, který by umožnil posuzovat vliv jednotlivých komponent a jejich mechanických vlastností (tuhost, hmotnost, útlum) na celkové dynamické vlastnosti stroje.

3 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je objasnit přínos aplikace vláknových kompozitů do nosných struktur obráběcích strojů s ohledem na dynamické chování sestavy nosných dílců stroje a dále určit přínos pro hlavní užité vlastnosti stroje, tj. produktivitu obrábění nebo přesnost a jakost povrchů obrobku.

Dílicí cíle disertační práce lze stanovit v následujících bodech:

1. Určit reálně dosažitelné parametry statické tuhosti a hmotnosti silnostěnných kompozitních struktur vůči nosným dílcům z izotropního materiálu na vhodných zkušebních vzorcích, které reprezentují vzorky a nosná tělesa obráběcích strojů
2. Navrhnout a ověřit metodiku výpočtového modelování, tj. určit jakým způsobem lze v rámci metody konečných prvků modelovat silnostěnné dílce z vláknových kompozitů pro obráběcí stroje a jaká je přesnost výpočtových modelů vůči výsledkům experimentálních zkoušek reálných těles.
3. Určit modální vlastnosti (vlastní frekvence, tvary a tlumení) modelových nosných těles z vláknových kompozitů i hybridní konstrukce kompozit – kov a určit možnosti změny tlumení nosného dílce vlivem změny materiálové struktury.
4. Realizací experimentálních zkoušek určit vliv změny tlumení a tuhosti nosných dílců na celkové vlastnosti sestavy nosných dílců obráběcích strojů.
5. Sestavit postupy a metodiku výpočtu pro vytvoření komplexního výpočtového modelu, který umožní analyzovat statické a dynamické vlastnosti sestavy části nebo celého stroje ve vazbě na vliv tuhost a tlumení jednotlivých nosných dílců a spojovacích rozhraní. Cílem je zjistit, do jaké míry je přínosná změna tuhosti a zejména změna tlumení nosného dílce.
6. Určit potenciál přínosu vláknových kompozitů z hlediska jejich tuhosti, hmotnosti a tlumení na dynamickou tuhost obráběcího stroje a jeho užité vlastnosti

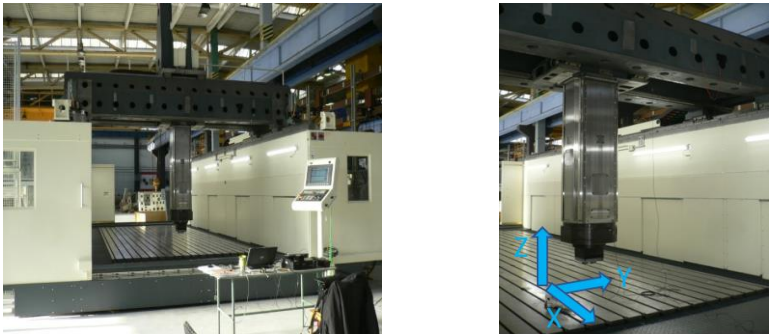
4 Popis metod vedoucích k splnění cílů

Vlastní práce byla zaměřena do několika oblastí, které jsou zde stručně vysvětleny.

Byly navrženy vhodné materiálové vzorky, které reprezentovaly silnostěnné kompozity a referenční tělesa z izotropních materiálů ekvivalentních vnějších rozměrů. Při návrhu těles byla snaha použít vlákna s maximální možnou tuhostí (charakterizováno modulem pružnosti vlákna 780 GPa), která jsou běžně dostupná na trhu.

- Tyto vzorky byly použity pro zkoušky statické tuhosti a zkoušky modálních vlastností. Z výsledků byly určeny závěry o možnosti redukce hmotnosti náhradou oceli nebo litiny pomocí vláknových kompozitů, a to s přihlédnutím k ohybové tuhosti i celkové statické tuhosti. Zároveň byly posouzeny modální parametry kompozitů vůči referenčním vzorkům.

Dále byla navržena tělesa nosných dílců obráběcích strojů s uplatněním vláknových kompozitů, případně využita existující vhodná tělesa z dostupných výzkumných projektů. Všechna tělesa, která jsou v disertační práci analyzována, představují smykadla obráběcích strojů (pohybová osa Z), viz Obr. 1. Smykadla obecně představují člen sestavy nosných dílců stroje, který je v řetězci základ – lože – příčník – smykadlo – frézovací vřeteno / hlava – nástroj jako poslední z rozměrově významných dílců. Oproti rozměrům průřezu mají většinou výrazně převyšující rozměr délky a v sestavách strojů vykazují významnou ohybovou poddajnost. Jejich tuhost, hmotnost a tlumení významně ovlivňují chování celého stroje. Smykadla tak představují vhodný nosný díl pro analýzu možnosti aplikace kompozitních materiálů do oblasti obráběcích strojů.



Obr. 1: Nosná struktura obráběcího stroje s detailem na smykadlo (stroj řady MCV společnosti TAJMAC – ZPS).

Tělesa nosných dílců měla vyřešena spojovací rozhraní pro kolejnice lineárního vedení, připojení vřetene, případně náhrady daných rozhraní. Byly tak provedeny zkoušky nejen samotných těles, ale i zkoušky sestavy stroje, nebo alespoň dílčí sestavy dílců s vlivem spojovacích rozhraní.

- Na dílců byly provedeny experimentální zkoušky modálních vlastností pro popis vlastních frekvencí, tvarů a tlumení a porovnání vlastností reálných

kompozitních dílců s vlastnostmi referenčních těles stejných vnějších rozměrů z izotropního materiálu.

- Dále byly vhodným postupem sestaveny výpočtové modely MKP silnostěnných kompozitních těles, výsledky modelů byly porovnány s výsledky experimentálních zkoušek pro ověření přístupu modelování.
- Ověřené MKP modely byly použity pro analýzu statické tuhosti a porovnání kompozitních nebo hybridních dílců vůči jejich referenčním kovovým dílcům pro definici reálné změny hmotnosti a tuhosti.

Výsledky byly použity k určení závěrů o reálně dosažitelné hmotnostní úspoře, nebo změně statické tuhosti, pokud se při konstrukci kompozitní nebo hybridní struktury použije stejný stavební prostor jako u ocelového nebo litinového dílce. Následně bylo v práci řešeno ovlivnění dynamických vlastností sestavy stroje nebo sestavy uzlu stroje tělesy. To bylo provedeno dvěma způsoby: pomocí experimentálních zkoušek a pomocí výpočtového posouzení s využitím odvozeného modelu.

Určení vlivu tuhosti, hmotnosti a tlumení dílce na sestavu nosných dílců experimentálním způsobem bylo provedeno pomocí experimentální modální analýzy. Z experimentálních měření modálních vlastností byly vyhodnocovány frekvenční přenosové funkce, frekvence a tlumení, případně vlastní tvary. Pro popis tlumení byl zvolen parametr poměrného útlumu ζ . Všechna měření byla vyhodnocena za předpokladů platných pro lineární modální analýzu, pro tlumení byl použit viskózní model tlumení – viz [39]. Pro vyhodnocení modálních parametrů bylo použito jednoho nebo více z modelů: CMIF (Complex Mode Indicator Function), metody LSCE (Least Squares Complex Function), metody RFP (Rational Fraction Polynomial) a metody CFit (Circle Fit). Jejich podrobnější popis je uveden v [40], [41], [42]. Výsledné tlumení bylo vyhodnoceno jako průměrná hodnota z parametrů vyhodnocených výše zmíněnými metodami.

Schéma experimentálního vyhodnocení přínosu kompozitních materiálů na dynamické vlastnosti nosných dílců a sestav výrobních strojů bylo následující.

1. Byly provedeny zkoušky pomocí experimentální modální analýzy, při kterých byly vyhodnoceny změny modálních vlastností nosných dílců vlivem změny materiálové struktury.
2. Dále byly provedeny zkoušky modálních vlastností sestav nosných dílců s využitím zkušebních strojů, reálného stroje nebo alespoň uložení nosných dílců pomocí provizorních spojovacích rozhraní.
3. Z obou typů experimentálních zkoušek byly určeny závěry pro přínos změny tuhosti a tlumení komponenty na celkové dynamické chování sestavy.
4. Dále byly ze zkoušek samotných nosných dílců určeny parametry tlumení těchto dílců a porovnán efekt změny materiálu.

Určení závěrů o přínosu kompozitních materiálů na dynamické vlastnosti sestavy nosných dílců pomocí výpočtových modelů vyžadovalo vyhodnotit vliv změny

tuhosti, hmotnosti a tlumení nosné komponenty na dynamické chování sestavy nosných dílů s danou komponentou. Problematika predikce dynamického chování sestavy dílů je v rámci MKP běžně řešená například pomocí harmonické analýzy. Z hlediska tvorby matice tlumení je používán zejména Rayleighův model tlumení, který přiřazuje parametr α a β celé sestavě těles. Další možností je přiřadit poměrné tlumení ζ – opět celému modelu. K těmto tradičním nástrojům zabudovaných v komerčně dostupných programech pro MKP lze přiřadit i další postupy, jako je například využití modální analýzy s exportem vlastních tvarů a frekvencí do stavového prostoru a využití následného zadání proporcionálního tlumení na redukovanou sestavu, viz řešerše a [31], [32]. S využitím posledního přístupu byl analyzován změny tuhosti a hmotnosti jednotlivých nosných komponent na celkovou dynamickou tuhost stroje, a to z hlediska změny amplitudy dynamické tuhosti a frekvenčního posuvu v rámci zkoumaného rozsahu frekvenční přenosové funkce. Přístup ale neumožňuje analyzovat, jak se projeví změna tlumení jednotlivé nosné komponenty na průběhu dynamické tuhosti.

Pro výpočet dynamické tuhosti byl použit model, který řeší základní mechanickou rovnici (1) v transformaci z fyzikálních souřadnic do modálních dle rovnice (2), kdy ϕ_i je vektor i-tého vlastního tvaru. Využitím výhod zápisu v modálních souřadnicích lze pak základní mechanickou rovnici zjednodušit do tvaru (3), kde I je diagonální jednotková matice, a Ω^2 je matice vlastních čísel.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} . \quad (1)$$

$$\{x\} = \sum_1^n \{\phi_i\} y_i , \quad (2)$$

$$[I]\{\ddot{y}\} + \{\Phi\}^T [C] \{\Phi\} \{\dot{y}\} + [\Omega^2] \{y\} = [\Phi]^T \{F\} , \quad (3)$$

Stěžejní otázkou je sestavení matice tlumení C tak, aby v sobě obsahovala vliv jednotlivých komponent sestavy nosných dílů stroje. Tj. aby byly v matici tlumení C obsaženy vlivy tlumení jednotlivých nosných komponent z odlišných materiálů, valivých hnízd a kolejnic lineárních vedení (nebo kluzných vedení, či hydrostatických kapes), pevných spojení, apod.“

V rámci výpočtového modelu byla matice tlumení transformovaného modelu zjednodušena na sestavení vztahem (4).

$$[\Phi]^T [C] [\Phi] = [\Phi]^T \sum_{j=1}^m \left(\frac{2\zeta_j}{\Omega} \right) [K_j] [\Phi] . \quad (4)$$

Tento přístup používá poměrné tlumení ζ_i každé komponenty, která vstupuje do výpočtového modelu. Pro tvorbu matice tlumení je nutné znát příspěvek K_i jednotlivé komponenty modelu do globální matice tuhosti a jeho poměrné tlumení ζ_i .

V rámci disertační práce byly využity na základě experimentálních výsledků určené parametry tlumení jednotlivých konstrukčních materiálů nosných dílců. Zároveň byly použity odladěné hodnoty tlumení náhrad spojovacích rozhran. Výsledný model využívá tvorbu matice tlumení dle (4). Při při zadaných parametrech tlumení nosných materiálů a tlumení spojovacích rozhraní modelu je tlumení vybraného módu sestavy při predikci dynamického chování shodné s tlumením očekávaným.

Určení vlivu tuhosti, hmotnosti a tlumení dílce na sestavu nosných dílců výpočtovým způsobem bylo provedeno následovně:

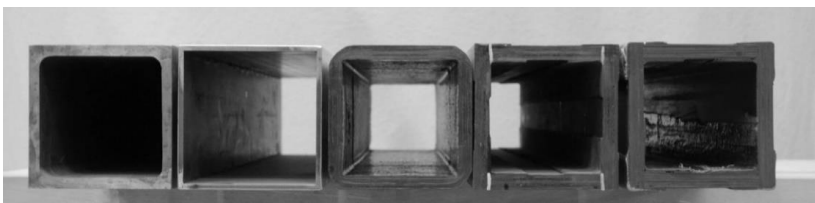
- Bylo použito ověřených výpočtových modelů MKP nosných dílů s uplatněním vláknových kompozitů, které byly následně implementovány do výpočtového modelu sestavy nosných těles.
- Byl sestaven výpočtový model, do kterého byly použity identifikované parametry tlumení nosných těles se zohledněním změny tlumení tělesa při náhradě litiny nebo oceli vláknovým kompozitem. V modelu byly odhadnuty parametry tlumení spojovacích rozhraní a to tak, aby výsledná dynamická charakteristika stroje na zvoleném vlastním tvaru sestavy odpovídala modelu využívajícího proporcionálního tlumení. Následně byly vyhodnoceny závěry o vlivu změny tuhosti, hmotnosti a tlumení jednotlivého nosného dílce na dynamické chování celého stroje.
- Byly použity standardní výpočtové modely využívající zadání proporcionálního tlumení na celou sestavu nosných dílců a porovnáno dynamické chování stroje při použití tradičních materiálů a kompozitních materiálů s odlišnou tuhostí a hmotností.

5 Shrnutí výsledků a dílčích cílů práce

Struktura kapitoly výsledků odpovídá dílčím cílům práce a stručně tak popisuje jejich plnění.

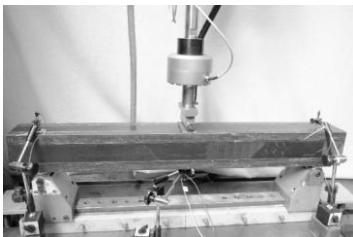
5.1 Určení statické tuhosti a hmotnostní redukce kompozitních a hybridních nosných těles

Byly navrženy zkušební materiálové vzorky tří uzavřených profilů ze silnostěnných kompozitních struktur, které využívaly dostupná vlákna co nejvyšší možné tuhosti, a k nim referenční tělesa z oceli a šedé litiny o stejných vnějších rozměrech 130x130x1170 (vše mm). Jeden vzorek byl celistvě navjéné konstrukce, dva vzorky byl z lepebných kompozitních desek s výztuží spojů.

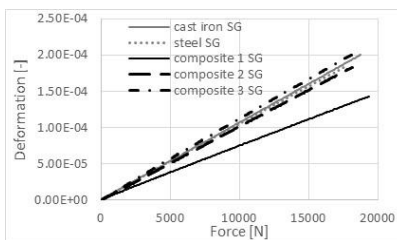


Obr. 2: Základní vzorky zkušebních struktur vysoké tuhosti (zleva litina, ocel, navíjený kompozit a kompozitní vzorky deskové konstrukce).

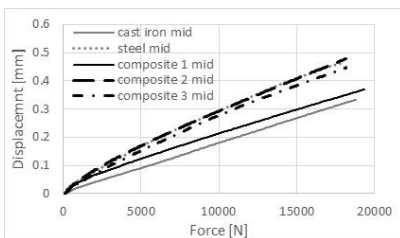
Posouzení statické tuhosti vzorků bylo provedeno pomocí experimentálních zkoušek (třibodovým ohybem, viz Obr. 3) a pomocí výpočtových modelů. Výsledky experimentálních zkoušek jsou znázorněny na Obr. 5 a Obr. 6 v podobě odezvy průhybu na zatížení silou, která charakterizuje statickou tuhost $k=F/y$. Přičemž na Obr. 5 je odezva snímána na spodním vlákně nosníku v místě pod zatížením, zatímco Obr. 6 je odezva měřena na horní stěně nosníku v místě nad podporou. Třetím typ vyhodnocení je na Obr. 4, kde je odezva zatížení a deformace z tenzometrů na spodní stěně nosníků a je úměrná ohybové tuhosti EJ nosníku. Výsledky jsou vyhodnoceny v Tab. 1.



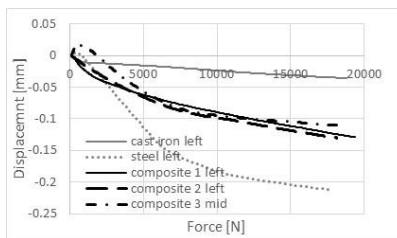
Obr. 3: Zkouška modelových těles pomocí 3bodového ohybu.



Obr. 4: Třibodový ohyb profilů – deformace z tenzometrů.



Obr. 5: Třibodový ohyb profilů – průhyb spodní stěny pod aktuátorem.



Obr. 6: Třibodový ohyb– průhyb horní stěny nad podporou uložení.

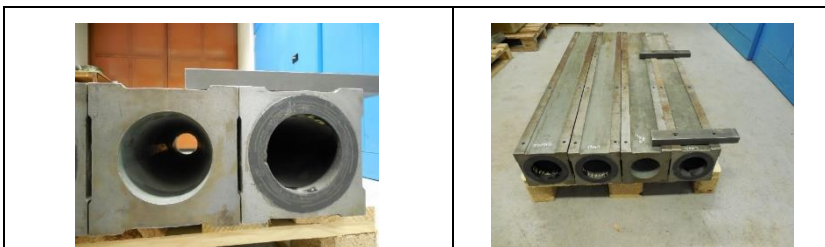
Tab. 1: Porovnání mechanických vlastností zkušebních profilů.

	Litina	Ocel	Kompozit1	Kompozit2	Kompozit3
Hmotnost [kg]	43,4	23,2	11,2	11,9	11,5
Tloušťka stěny [mm]	10	5	13	14	14
1. frekvence [Hz]	493	390	915	687	762
Ohybová tuhost EJ [N.mm ²]	1,52e12	1,57e12	2,22e12	1,61e12	1,47e12
Tuhost F/y [N/mm]	55 503	34 068	46 903	34 123	35 953

Analýza ukazuje, že při zachování stejných vnějších rozměrů lze s využitím komerčně dostupných a cenově přijatelných uhlíkových vláken dosáhnout 50% hmotnostní úspory při porovnání s ocelovým svařencem a 70% hmotnostní úspory při porovnání se šedou litinou, pokud je dílec srovnáván z hlediska ohybové tuhosti, viz Obr. 4. Z hlediska výrobních strojů je ale největší důraz daný na tuhost, kterou charakterizuje poměr síla – deformace (posuv), viz Obr. 5 a Obr. 6. Při zahrnutí lokálních deformací v místě uložení nebo zavedení sil je možná hmotnostní redukce výrazně nižší. Tyto závěry platí za předpokladu dodržení stejných vnějších rozměrů. Ve všech případech to ale znamenalo nutnost zvýšení tloušťky stěny při aplikaci vláknového kompozitu oproti vzorku z oceli nebo litiny.

Hlavním plněním tohoto cíle byla analýza celokompozitních a hybridních smykadel o rozměrech reálných komponent obráběcích strojů. Tuhost zkoušených těles se pohybovala v rozmezí 10 N/μm až 100 N/μm a odpovídala spektru tuhostí smykadel obráběcích strojů. Analyzována byla celokompozitní smykadla průřezů 350x350 nebo 230x275 a hybridní smykadla kombinující kovový plášť s vnitřní kompozitní výztuží průřezů 170x170, 350x350 a 400x420. U některých smykadel byly integrovány poddajné tlumivé vrstvy do stěn kompozitu, aby došlo k dalšímu zvětšení dynamické tuhosti dílce. Výsledky analýz jsou pro vybraná tělesa stručně prezentovány v Tab. 4 až Tab. 3.

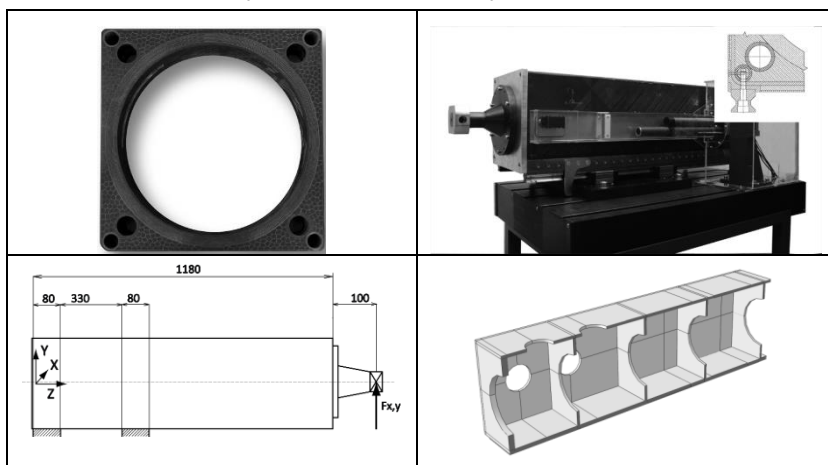
Tab. 2: Modelová hybridní smykadla na bázi tvárné litiny a kompozitní výztuže.



Tab. 3: Porovnání statické poddajnosti a hmotnosti modelových hybridních smykadel

Vzorek	Hmotnost [kg]	u_{FX} [$\mu\text{m}/\text{kN}$]	u_{FY} [$\mu\text{m}/\text{kN}$]
Litina - TMN4	142,5	61,0	49,1
Hybrid TMN1	104,5	61,4	47,6
Hybrid TMN2	104	69,5	53,2
Hybrid TMN3	103,5	73,0	57,9

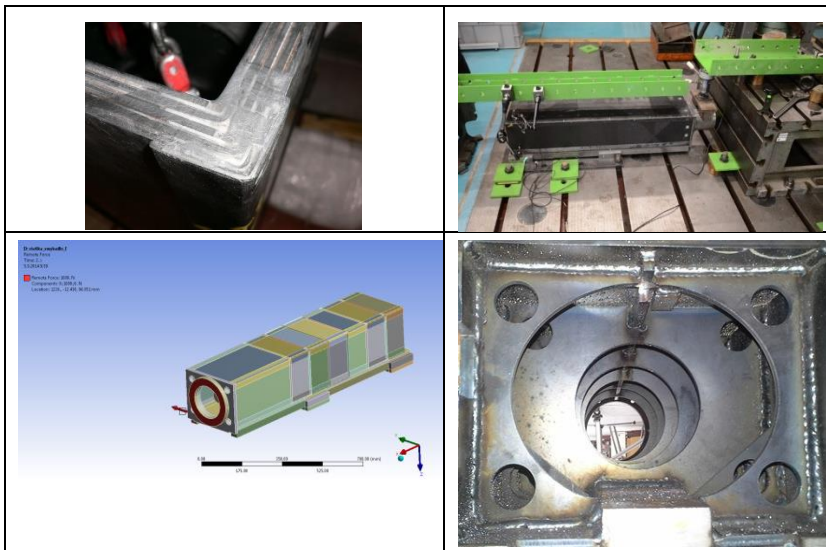
Tab. 4: Navíjené celokompozitní smykadlo 350x350x1200



Tab. 5: Porovnání statické tuhosti a hmotnosti navíjeného kompozitního smykadla s ocelovými referenčními o tl. 10 mm.

Těleso	Hmotnost	K_x -Khoriz.	K_y -Kvert
[-]	[kg]	[N/ μm]	[N/ μm]
Ocelové duté sm.	150	25,9	55,9
Ocelové žebrované sm.	220	46,5	56,1
Navíjené kompozitní sm.	130	43,0	57,5

Tab. 6: Deskové kompozitní smykadlo 350x350x1200 a referenční ocelová verze.



Tab. 7: Porovnání statické tuhosti a hmotnosti deskového kompozitního smykadla s ocelovým referenčním.

Těleso	Hmotnost	Tloušťka stěny/žebra	Ky/Khor.	Kz/Kvert.
[-]	[kg]	[mm]	[N/μm]	[N/μm]
Referenční ocelové sm.	112	10/8	55,3	64,5
Deskové kompozitní sm.	45	19/11	26,4	57,5

Byly určeny tyto závěry. U celokompozitních smykadel bylo dosaženo 40-45% hmotnostní redukce při dosažení ekvivalentní statické tuhosti s ocelovým žebrovaným svařencem. Při zachování stejných vnějších rozměrů je cenou za hmotnostní úsporu zvýšení tloušťky stěny a násobné zvýšení ceny struktury. Větší redukce hmotnosti není téměř možná, neboť celokompozitní dílce v oblasti struktur s extrémně vysokými požadavky na statickou tuhost mají zhoršené chování vlivem lokálních deformací v místě spojovacích rozhraní, viz rozdíl v K_y a K_x v Tab. 7 kompozitního smykadla.

S využitím stejných vláken byla definována možná hmotnostní redukce o 25 % až 30 % při náhradě referenčních smykadel z tvárné litiny hybridní konstrukcí na bázi vnějšího kovového pláště a vnitřní výztuže z vláknového kompozitu. Tato aplikace je finančně příznivější než celokompozitní řešení. Dále umožňuje tvořit spojovací rozhraní způsobem běžným v konstrukci obráběcích strojů a z hlediska tuhosti není omezena možnými lokálními deformacemi při zavádění zatížení a uložení jako tomu je u řešení celokompozitního.

5.2 Ověřené výpočtové modely silnostěnných dílců z vláknových kompozitů

Přechod od běžně používaných tenkostěnných kompozitních konstrukcí na silnostěnná kompozitní nebo hybridní tělesa obráběcích strojů si vyžádal nutnost ověření, s jakou přesností lze predikovat chování daných struktur. Výsledky výzkumu určily jako vhodné prvky objemových skořepin, které umožňují modelovat kompozitní konstrukce i s využitím několika prvků po tloušťce stěny a vystihovat tak chování silnostěnného kompozitu se složitou vnitřní strukturou.

Porovnáním výsledků zkoušek experimentální modální analýzy s výsledky MKP výpočtů byly ověřeny výpočtové modely jak silnostěnných kompozitních struktur, tak hybridních struktur kompozit – kov. Demonstrace viz Obr. 7 a Tab. 8.



Obr. 7: Prototyp hybridního smykadla a jeho výpočtový model

Tab. 8: Porovnání MKP vs experiment pro prototyp hybridního smykadla.

Mód	fEXP [Hz]	fMKP [Hz]	Pozn.
1	326	327	1. ohyb – směr A
2	328	336	1. ohyb – směr B
3	524	572	krut

U celokompozitních těles lze navrženou modelovací technikou dosáhnout rozdílu mezi MKP a EMA do hodnoty přibližně 15 % při porovnání frekvencí odpovídajících stejnému tvaru. U hybridních těles je shoda mezi MKP a EMA lépe dosažitelná. Model prototypu hybridního smykadla byl ověřen s rozdílem mezi MKP a EMA u vlastních frekvencí pouze v rozmezí 1 až 5 %.

S dodržением navrženého modelovacího postupu lze modelovat silnostěnná kompozitní tělesa i se zahrnutím možných materiálových a výrobních nepřesností. Výsledná odchylka je sice větší, než je tomu u běžných izotropních materiálů, ale stále přijatelná z hlediska posouzení vlastností v sestavě nosných dílců.

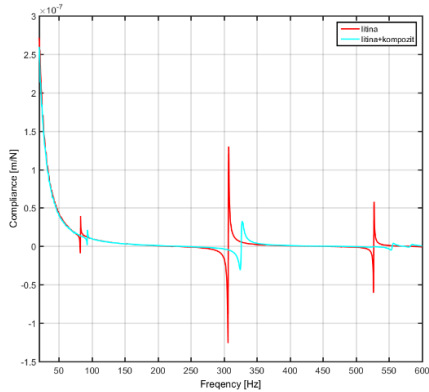
5.3 Modální vlastnosti kompozitních a hybridních nosných dílců

Nosné dílce byly zkoušeny za pomoci metod experimentální modální analýzy. Vyhodnocení přínosu kompozitu na modálních vlastnosti dílce bylo provedeno

srovnáním s výsledky referenčního nosného dílce z izotropního materiálu o stejných vnějších rozměrech a stejných připojovacích bodů. Demonstrace přístupu je na Obr. 8 a Obr. 9, kde je zobrazeno zavěšení prototypu smykadla obráběcího stroje a porovnání vyhodnoceného průběhu dynamické poddajnosti tělesa z tvárné litiny a hybridního tělesa z tvárné litiny s kompozitní výztuží. Vyhodnocení frekvencí a tlumení prvních pěti vlastních tvarů je v Tab. 9. I přes zvýšenou hmotnost od kompozitní výztuže došlo vlivem vyztužení tělesa k zvýšení vlastních frekvencí a výraznému snížení amplitud dynamické poddajnosti.



Obr. 8: Prototyp hybridního smykadla při EMA tělesa.



Obr. 9: Porovnání reálné složky dynamické poddajnosti prototypu hybridního smykadla s referenčním při měření samotných těles – směr Y.

Tab. 9: Porovnání frekvencí a tlumení referenčního a hybridního smykadla.

	Litinové smykadlo		Hybridní smykadlo	
	f [Hz]	ζ [%]	f [Hz]	ζ [%]
1	306,5	0,15	326,1	0,46
2	309,3	0,11	328,3	0,18
3	478,3	0,06	523,8	1,08
4	526,7	0,06	554,5	0,35
5	604,8	0,12	583,0	0,48

Obdobně byla zkoušena celokompozitní tělesa a modelová hybridní smykadla a vyhodnoceny závěry o zvýšení dynamických vlastností samotných dílců. Jedním z výstupů práce jsou určené hodnoty tlumení nosných těles (smykadel), které byly získány z výše popsaných zkoušek.

Samotná nosná tělesa z izotropního materiálu (ocel, litina) měla průměrné tlumení přibližně okolo hodnot $\zeta=0,04-0,1$ %. Tyto parametry byly získány pro ocelová smykadla 350x350x1200 ($\zeta=0,05-0,10$ %), referenční modelové smykadlo 170x170x1265 z tvárné litiny ($\zeta=0,04$ %) a prototyp hybridního smykadla 400x420x2530 z tvárné litiny ($\zeta=0,10$ %)

Celokompozitní smykadla

- Navíjené kompozitní smykadlo 350x350x1200 mělo průměrné tlumení 4násobně vyšší, než bylo tlumení referenčních ocelových smykadel ($\zeta=0,40$ %)
- Deskové kompozitní smykadlo 230x275x1100 mělo průměrné tlumení řádově vyšší, než bylo tlumení ocelových / litinových smykadel vlivem tlumících vrstev. Bylo vyhodnoceno průměrné tlumení $\zeta=2,70$ %.

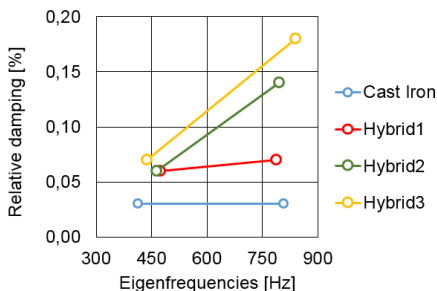
Hybridní smykadla na bázi vnějšího pláště (tvárná litina) a vnitřní kompozitní výztuže o rozměrech 170x170x1265

- Průměrné tlumení ($\zeta=0,08 - 0,13$ %) bylo 2 až 3násobně vyšší než u referenčního smykadla z tvárné litiny ($\zeta=0,04$ %). Nejnižší tlumení bylo u celokompozitní výztuže bez tlumících vrstev.
- Prototyp hybridního smykadla na bázi vnějšího pláště (tvárná litina) a vnitřní kompozitní výztuže o rozměrech 400x420x2530 měl průměrné tlumení ($\zeta=0,33$ %) 3násobně vyšší než u referenčního smykadla z tvárné litiny ($\zeta=0,10$ %).

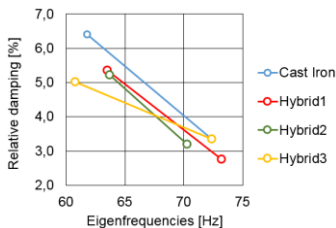
5.4 Určení vlivu změny tuhosti a tlumení dílce na dynamické vlastnosti sestavy pomocí experimentálních zkoušek

Zásadním přínosem práce je vyhodnocení modálních vlastností nosných těles a sestav a porovnání dynamické tuhosti a tlumení izotropních a kompozitních – hybridních dílců jako samotných dílců a těles v sestavě stroje s vlivem spojovacích rozhraní. Následující závěry odpovídají na otázku, jestli je možné navrhovat nosné dílce nových strojů s redukovanou hmotností a částečně redukovanou statickou tuhostí, která by zároveň byla kompenzována výrazně vyšším tlumením dílce.

Demonstrace porovnání tlumení je na Obr. 10 a Obr. 11 pro hybridní modelové smykadla v konfiguraci bez vlivu uložení a s vlivem uložení nosného dílce na zkušební stroj ETB-1, který má spojovací rozhraní obvyklé v obráběcích strojích. Vlivem montáže, tlumení spojovacích rozhraní stroje a dalšími efekty byl vliv zvýšeného tlumení samotných hybridních komponent zcela potlačen. Paradoxně nejvyšší tlumení bylo vyhodnoceno u sestavy s litinovým dílcem, který jako samotné těleso měl tlumení nejnižší. Uvedené výsledky platí při porovnání těles, jejichž spojovací rozhraní pro upevnění smykadla i upevnění náhrady vřetene byly zcela totožné.

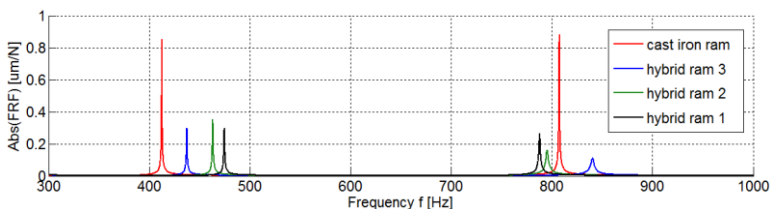


Obr. 10: Porovnání tlumení na první a druhém vlastním tvaru zavěšených modelových smykadel.

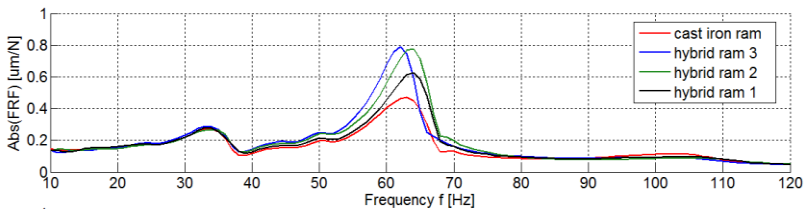


Obr. 11: Porovnání tlumení smykadel upnutých do standu zkušebního stroje.

Na Obr. 12, respektive Obr. 13 jsou zobrazeny frekvenční přenosové křivky dynamické poddajnosti samotných těles, respektive sestavy zkušebního zařízení. Zavěšené dílce měly vlivem dostatečné tuhosti a vysokého tlumení nízké amplitudy dynamické poddajnosti, nicméně u sestavy se zvýšené tlumení dílců zcela neprojevilo. Nejnižší amplitudy dynamické poddajnosti dosáhla sestava s litinovým smykadlem, následně sestava s hybridním smykadlem celokompozitní výztuže. To přitom mělo srovnatelnou, nebo nižší statickou poddajnost než samotné litinové smykadlo, viz Tab. 3, a násobně vyšší tlumení.

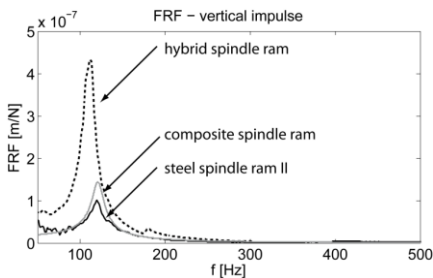


Obr. 12: Porovnání dynamické poddajnosti zavěšených modelových hybridních smykadel.

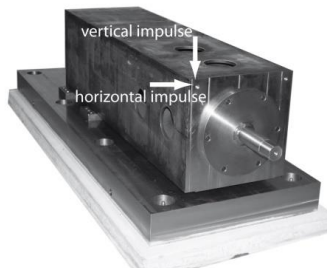


Obr. 13 Porovnání dynamické poddajnosti modelových hybridních smykadel uložených ve zkušebních zařízení ETB1.

Obdobně je na Obr. 14 vyneseno porovnání dynamické poddajnosti celokompozitního a ocelového smykadla z Tab. 4, které bylo vyhodnoceno z měření při upnutí na základ, viz Obr. 15. Kompozitní smykadlo o hmotnosti 130 kg mělo vůči ocelovému smykadlu o hmotnosti 220 kg zvýšenou dynamickou poddajnost o 40 % při téměř identické statické tuhosti, zvýšení tlumení tělesa se v sestavě neprojevovalo.



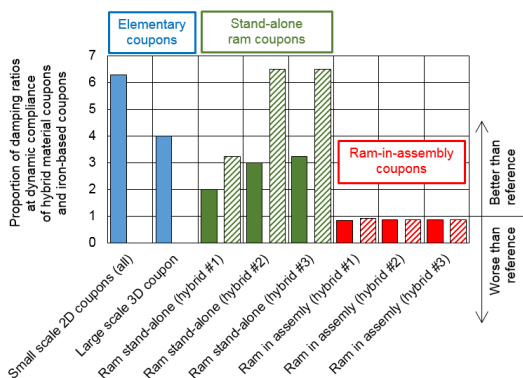
Obr. 14: Porovnání dynamické poddajnosti celokompozitního smykadla s ocelovým smykadlem.



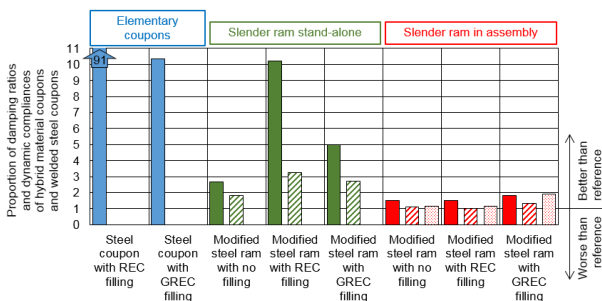
Obr. 15: Konfigurace porovnání dynamické poddajnosti smykadel s vlivem uložení.

Výsledné porovnání možnosti změny tlumení vlivem aplikace kompozitních materiálů vůči izotropním referenčním tělesům od zkušebních vzorků přes nosné dílce a sestavu nosných dílců je pro odlišné typy kompozitu vyhodnoceno na Obr. 16 a Obr. 17. Obě porovnání demonstrují, že aplikace kompozitů vede k násobnému zvýšení tlumení u samotných dílců.

Nicméně, původně násobné zvýšení tlumení samotných těles se vlivem tlumení spojovacích rozhraní téměř neprojevovalo ve zvýšeném tlumení sestavy s vysoce zatlumeným nosným dílcem. Hodnoty tlumení sestavy s hybridním tělesem jsou porovnatelné s výsledky tlumení sestavy s referenční izotropní strukturou stejných rozměrů a připojovacích rozhraní. Pro zvýšení dynamických vlastností výrobních strojů není možné navrhovat nosné dílce nových strojů s redukovanou hmotností a částečně redukovanou statickou tuhostí, která by zároveň byla kompenzována výrazně vyšším tlumením dílce.



Obr. 16: Porovnání poměru tlumení kompozitního-hybridního vzorku vůči referenčnímu izotropnímu tělesu (litina) na kritické frekvenci (lepší tlumení při poměru vyšším než 1).



Obr. 17: Porovnání poměru tlumení kompozitního-hybridního vzorku vůči referenčnímu izotropnímu tělesu (ocel) na kritické frekvenci (lepší tlumení při poměru vyšším než 1)

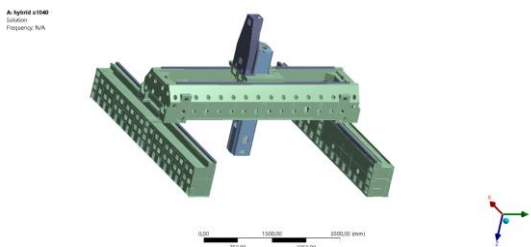
5.5 Určení vlivu změny tuhosti a tlumení dílce na dynamické vlastnosti sestavy pomocí výpočtového modelu

Byl určen přístup pro formulaci matice tlumení sestavy nosných dílů stroje, viz vztah (4). Zvolený přístup spočívá v sestavení matice tlumení v modálních souřadnicích, kde pod indexem j vystupuje jednotlivá složka výpočtového modelu (jednotlivá nosná komponenta nebo komponenta spojovacích rozhraní) a jí odpovídající parametr průměrného tlumení ζ . Výhoda tohoto řešení spočívá v možnosti specifikovat jednotlivou část výpočtového modelu (jednotlivé nosné dílce nebo jednotlivá spojovací rozhraní – tuhostní náhrady hnízd valivých vedení, tuhostní náhrady pohonů) a přiřadit jim parametr tlumení, který se následně podílí na formulaci globální matice tlumení.

Z hlediska nevýhod tohoto přístupu se jedná zejména zjednodušení tlumení nosných komponent na průměrnou hodnotu poměrného útlumu ζ . Je obecně známo, že každý vlastní tvar kmitání má své vlastní průměrné tlumení. Dále jsou zanedbány nelinearity v chování sestavy nosných dílců, ke které dochází u reálných sestav například vlivem tření ve spojovacích rozhraní. Na model lze tedy pohlížet jako na matematickou aproximaci dynamického chování stroje. S vědomím uvedených zjednodušení lze postup použít jako nástroj, jak vůči sobě porovnat dynamické chování sestavy nosných dílců s možností změny tlumení jednotlivých dílců.

Metodika byla aplikována na model obráběcího stroje, který využíval prototyp hybridního smykadla Obr. 18. Dále byl aplikován na model zkušebního zařízení ETB-1 s modelovými hybridními smykadly, viz Obr. 21. V obou případech se jednalo o sestavy nosných komponent, které obsahovaly náhrady spojovacích rozhraní, která jsou obvyklá v prostředí obráběcích strojů (hnízda valivých vedení, náhrady pastorků nebo kuličkových šroubů, uložení stroje).

Parametry poměrného tlumení ζ_i nosných těles, které vstupují do vztahu (4) byly určeny z výsledků experimentální modální analýzy samotných těles z odlišných konstrukčních materiálů s využitím získaných průměrných hodnot poměrných útlumů. Parametry tlumení tuhostních náhrad spojovacích rozhraní komponent, uložení stroje, apod. byly odhadnuty na základě numerických zkoušek modelu. Cílem pro odhad parametrů spojovacích náhrad bylo, aby na zvoleném tvaru s významnou amplitudou dynamické poddajnosti bylo dosaženo poměrné hodnoty tlumení celé sestavy stroje v očekávané hodnotě (například $\zeta = 3\%$, které odpovídá tlumením očekávaným ze zkušeností z experimentů).



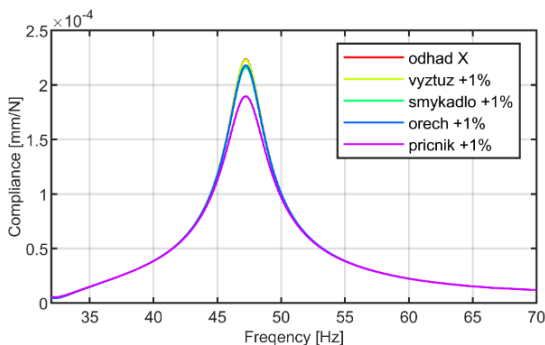
Obr. 18: Zjednodušená část obráběcího stroje pro výpočet příspěvků tlumení dílců dynamické poddajnosti.

Parametry tlumení jednotlivých částí modelu stroje s prototypem hybridního smykadla jsou uvedeny v Tab. 10. Hodnoty náhrad spojovacích rozhraní byly určeny tak, aby výsledná frekvenční přenosová charakteristika dynamické poddajnosti odpovídala referenční dynamické poddajnosti na zkoumaném kritickém módu. Z porovnání tlumení náhrad spojovacích rozhraní a nosných komponent vyplývá, že poměrné tlumení spojovacích rozhraní je řádově vyšší než tlumení nosných komponent.

Tab. 10: Parametry tlumení ζ pro sestavení matice C stroje řady MCV

Prvek	Tlumení ζ [%]
Nosné prvky z šedé i tvárné litiny	0,2
Kompozitní výztuž	0,4
Tlumení náhrad kuličkových šroubů	1,5
Tlumení náhrad pastorek – hřeben	2,0
Tlumení náhrad vozíků lineárních vedení os X, Y a Z	21,1
Tlumení náhrad patek uložení lože	40

S využitím parametrů tlumení komponent z Tab. 10 byla provedena citlivostní studie, kdy u jednotlivých nosných těles bylo uměle zvýšeno tlumení ζ o hodnotu 1,0 %. Toto zvýšení lze také interpretovat tak, že průměrné tlumení kompozitní výztuže bylo zvýšeno na 1,4 %, tj. na 7násobek tlumení klasického izotropního dílu. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 19.

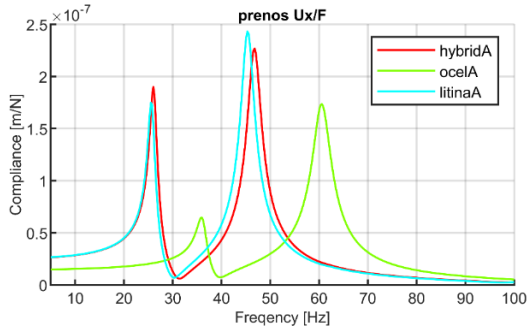


Obr. 19: Citlivostní studie tlumení nosných komponent na dynamickou poddajnost kritického tvaru stroje s hybridním smykadlem.

Výsledky ukázaly, že vliv tlumení výztuže smykadla na dynamickou poddajnost daného tvaru je zcela zanedbatelný. Výsledky ve směru osy X ukazují, že pro danou sestavu nemá smysl se snažit zvýšit dynamickou tuhost stroje lepením zatlužené kompozitní výztuže dovnitř smykadla. Případné zvýšení tlumení celého smykadla o 1 % se projevilo snížením amplitudy dynamické poddajnosti o 3 %, což lze opět uvažovat za zanedbatelný výsledek.

S využitím standardního způsobu modelování a zadání proporcionálního tlumení na celou sestavu byl dále analyzován vliv tuhosti a hmotnosti nosných komponent. Výpočty redukovaného modelu byly provedeny pro průměrné hodnoty modálního útluhu $\zeta=3$ % v celém frekvenčním rozsahu stroje a byly posouzeny varianty se

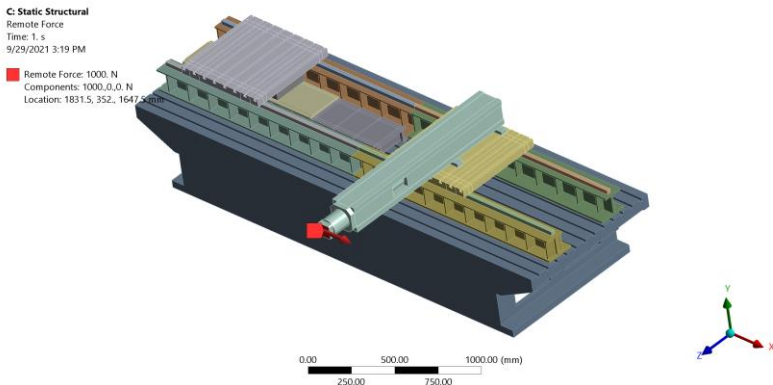
smykadlem z tvárné litiny, hybridním smykadlem a dále změna příčnicku z litiny na ocelový svařenec na celé sestavě stroje.



Obr. 20: Vliv tuhosti a hmotnosti smykadla (litina, hybrid) a příčnicku (ocel vs litina) na modelu stroje.

Predikovaná hodnota poklesu dynamické poddajnosti modelem s proporcionálním tlumením ukázala pokles poddajnosti o 7 % vlivem kompozitní výtzuže smykadla při zanedbatelném zvýšení vlastních frekvence systému.

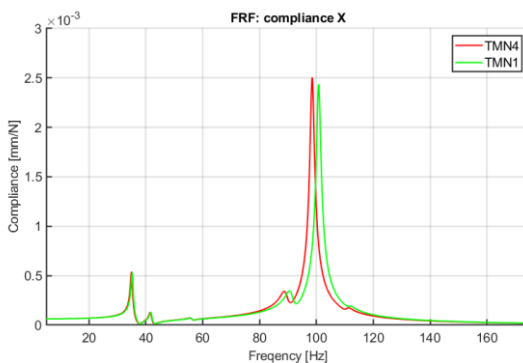
Obdobně byla provedena analýza vlivu tuhosti, hmotnosti a tlumení komponent s využitím modelových smykadel a zkušebního zařízení ETB-1. Parametry tlumení nosných komponent a spojovacích rozhraní modelu ETB-1 jsou uvedeny v Tab. 11, porovnání dynamické poddajnosti verze sestavy s referenčním a s hybridním smykadlem je na Obr. 22.



Obr. 21: Geometrie modelu zkušebního zařízení ETB-1 s upevněným modelovým smykadlem.

Tab. 11: Parametry tlumení ζ pro sestavení matice C sestavy ETB-1

Prvek	Tlumení ζ [%]
Nosné prvky z šedé litiny (lože)	0,25
Ocelové nosné prvky (podpory, stoly, vřeteno, kolejnice,	0,15
Nosné prvky z tvárné litiny (plášť smykadla)	0,20
Kompozitní výztuž	0,30
Tlumení náhrad vozíků lineárních vedení os X, Y a Z	19,5
Tlumení náhrad kuličkového šroubu	0,5
Tlumení náhrad patek uložení lože	1,1



Obr. 22: Vliv tuhosti a hmotnosti smykadla (litina – TMN4, odlehčený hybrid TMN-1) na dynamickou poddajnost sestavy stroje ETB-1.

Přínos hybridních komponent s redukovanou hmotností (modelová hybridní smykadla na zkušebním zařízení ETB-1) byl z hlediska celkového projevu dynamického chování stroje minimální. Redukce hmotnosti smykadla o 27 % se v sestavě stroje projevila minimálním zvýšením frekvencí (z 98,5 Hz na 100,8 Hz), které je z hlediska chování sestavy stroje zanedbatelný. Výpočtový model predikoval 3% až 6% pokles dynamické poddajnosti sestavy vlivem aplikace kompozitní výztuže odlehčeného smykadla v porovnání s chováním sestavy s referenčním tělesem.

Z hlediska sestaveného výpočtového modelu, kterým byl hodnocen příspěvek tlumení a tuhosti nosných komponent na dynamické vlastnosti sestav, byly určeny následující závěry:

- Identifikované parametry tlumení ζ nosných struktur, které byly použity v modelu, byly obdobné parametrům tlumení ζ nosných těles z výsledků experimentálních zkoušek. Pro tyto hodnoty bylo odhadnuto tlumení

spojovacích rozhraní (náhrady hnízd kolejnic lineárních vedení) a to tak, aby výsledný průběh dynamické poddajnosti ve stanoveném frekvenčním rozsahu odpovídal amplitudou očekávané hodnotě při použití proporcionálního tlumení na zvoleném tvaru. Porovnání parametrů tlumení nosných struktur ($\zeta \sim 0,1 - 0,4 \%$) nosných dílců a odhadnutých parametrů tlumení spojovacích rozhraní ($\zeta \sim 20 \%$) jednoznačně určuje oblast zájmu, kde leží možnost snížení dynamické poddajnosti zvýšením tlumení.

- Navržený výpočtový model a parametry tlumení nosných komponent a spojovacích rozhraní ukazují, že cesta k zvýšení užitečných vlastností strojů existuje zejména ve výzkumu spojovacích rozhraní, jejichž statická tuhost a zejména tlumení se mnohem výrazněji podílí na celkové dynamické tuhosti sestavy.
- Navržený postup modelování sestavy nosné struktury stroje lze s výhodou použít pro budoucí posuzování plánovaných konstrukčních změn a úprav strojů. Model umožňuje na kvalitativní úrovni posoudit výhodnost dílčích konstrukčních změn pro dosažení vyšší dynamické tuhosti stroje.

5.6 Srhnutí vlivu tuhosti a tlumení kompozitních dílů na dynamické vlastnosti sestavy stroje

Provedené výpočtové i experimentální zkoušky možné náhrady nosných těles z oceli nebo litiny pomocí vláknových nebo hybridních struktur nevedou k pozitivním závěrům ohledně ovlivnění užitečných vlastností obráběcích strojů. Z hlediska „light-weight“ návrhových přístupů pro dílce, u kterých jsou požadované statické tuhosti v rozmezí $10 \text{ N}/\mu\text{m}$ až $100 \text{ N}/\mu\text{m}$ jsou dosažené hmotnostní redukce o 25% až 45% vůči nosným dílcům tradiční konstrukce sice výrazné, ale v sestavě nosných těles se změna hmotnosti dílce neprojevila výrazným pozitivním ovlivněním dynamického chování sestavy. Provedené zkoušky na zkušebním zařízení ETB-1 demonstrovaly zanedbatelný posun vlastních frekvencí sestavy s odlehčenou strukturou, stejně tak jako výpočty stroje s vyztuženým hybridním smykadlem.

Samotné odlehčení hmotné nosné komponenty, která v kontextu celé sestavy stroje nebo odlehčované pohybové skupiny představuje pouze zlomek hmotnosti, nenabízí velký potenciál pro zvýšení užitečných vlastností stroje vlivem vyšších dynamických parametrů. Je otázkou, jaká hmotnostní redukce by byla možná, pokud by celý stroj byl navržen z kompozitních dílců. I za předpokladu 40% hmotnostní redukce všech nosných struktur pohybových skupin je omezením vstupní cena kompozitních materiálů, která je v současné době násobně vyšší než u tradiční litiny nebo ocelových svařenců. Je zřejmé, že v aplikacích s menšími požadavky na statickou tuhost sestavy a s vysokými požadavky na dynamické chování pohybových os je větší potenciál pro aplikaci „light-weight“ vláknových kompozitů do nosných dílců strojů. Nicméně, v oblasti zkoumaných těles – nosných struktur pohybové osy Z je potenciál dle získaných poznatků zatím malý.

Oblastí, kde se vláknové struktury v nosných dílcích obráběcích strojů, mohou výrazně uplatnit, je konstrukce rotačně symetrických dílců s požadavky na výrazné snižování setrvačných hmot, zvyšování vlastních frekvencí. Tj., dílců typu vřeten, nástrojů nebo náhonových hřídelů, kde hmotnostní redukce v řádu desítek procent umožní zvýšení produktivity nebo dalších vlastností stroje. S přihlédnutím k výsledkům předložené práce lze pro tyto struktury vztáhnout stejné závěry – navrhovat struktury s přihlédnutím k maximální statické tuhosti pro namáhání daného dílce, zbytečně nezvyšovat tlumení pomocí integrace tlumících vrstev se zvýšenou poddajností.

6 Závěr a diskuze

Předložená disertační práce přináší nové poznatky k možnosti zlepšování vlastností obráběcích strojů pomocí vláknových kompozitů a hybridních struktur kombinujících vláknové kompozity a kovové materiály. Pro nové výsledky byla systematicky analyzována skupina zvolených zkušebních vzorků a dále nosná tělesa obráběcích strojů – smykadla s vysokými požadavky na statickou tuhost, u kterých by redukce hmotnosti mohla vést k zvýšení dynamických vlastností stroje. Byly získány nové výsledky ohledně dosažitelné statické tuhosti, hmotnosti a tlumení nových materiálových struktur nosných dílů ze silnostěnných vláknových kompozitů nebo z nich tvořených hybridních struktur. Oproti publikovaným aplikacím „light-weight“ přístupů obráběcích strojů byly výsledky rozšířeny nejen o porovnání samotných těles, ale také o posouzení vlivu změny tuhosti, tlumení a hmotnosti dílce na tlumení a dynamickou tuhost sestavy nosných dílců.

Byly získány parametry tlumení nových materiálových struktur, a to jak celokompozitních nosných těles, tak hybridních dílců, které v kombinaci s navrženou modelovací technikou umožňují posouzení dynamického chování stroje už v rámci návrhu nosné struktury stroje. V rámci navrženého výpočtového postupu, který využil identifikované parametry tlumení, bylo paralelně k experimentálním zkouškám provedeno vyhodnocení přínosu light-weight designu a byly navrženy parametry tlumení spojovacích rozhraní pro budoucí využití modelu.

Z hlediska globálního cíle práce lze určit, že zvyšování dynamických vlastností stroje pomocí kompozitních materiálů nemá u obráběcích strojů v dnešní době velký přínos. Výsledné snížení amplitudy dynamické poddajnosti se pohybovalo pod hranicí 10 % vůči použití tradičních konstrukcí za cenu výrazně vyšších výrobních nákladů.

6.1 Přínos pro vědu a praxi

Přínos pro vědu spočívá v získání poznatků o tlumení nosných dílců vysoké tuhosti pro obráběcí stroje a jeho změně vlivem aplikace nových materiálových struktur, které přináší redukcii hmotnosti, změnu statické tuhosti a násobné zvýšení tlumení. Pomocí vhodně stanovených experimentálních zkoušek byly popsány vlastnosti

kompozitních a hybridních strukturálních dílců a zároveň vyhodnocen vliv změny materiálové struktury nejen na samotný díl, ale i na sestavu nosných těles. Identifikované parametry lze použít při budoucím rozvoji výpočtových metod pro produktivnější návrhy nových nosných struktur.

Došlo k ověření výpočtových postupů ve specifické oblasti aplikace vláknových kompozitů, která klade nároky na použití jiných typů než běžně používaných výpočtových modelů. Dále byly získány poznatky o možnosti hmotnostní redukce při zachování statické tuhosti silnostěnných struktur. Výsledky experimentálních zkoušek ukazují na velmi nízký vliv tlumení komponenty nosného tělesa na tlumení nosné struktury stroje. A umožňují tak zjednodušovat návrhové přístupy pro posuzování nových konstrukcí sestav obráběcích strojů – například predikcí dynamického chování použitím postupů modální redukce se zadáním proporcionálního tlumení na celou nosnou strukturu.

6.2 Možnosti dalšího výzkumu problematiky

Z hlediska celokompozitních i hybridních těles, u kterých je větší potenciál na redukcii hmotnosti pohybových os, se jako vhodné téma jeví provést studie, kde místo přínosu jedné komponenty k dynamickému chování stroje by byl navržen stroj nový se snahou o maximální odlehčení všech komponent pohybových os.

Jako vhodnou oblast dalšího výzkumu odlehčování pohybových os za cílem vylepšení užitných vlastností stroje lze dále jmenovat oblast rotačních symetrických struktur s vysokými nároky na provozní otáčky nebo vlastní frekvence. Přínos vláknových kompozitů zde bude vyšší než u nosných struktur typu smykadel. Kompozitní nástroje, části vřeten nebo náhonové hřídele se v omezené míře začínají vyskytovat v obráběcích strojích, větší výskyt je opět omezen dostupností systematických nástrojů pro spolehlivý konstrukční i výpočtový návrh těles, a to nejen z hlediska statické tuhosti a dynamického chování, ale i z hlediska návrhu spojovacích rozhraní se zanedbatelnou lokální deformací. Celkově nadějnou oblastí je aplikace vláknových kompozitů do nosných struktur s cílem vylepšovat jejich rozměrovou stálost vlivem nízké teplotní roztažnosti.

Z hlediska modelování dynamického chování je dnešní doba ve znamení rozvoje výpočtových modelů pro predikci celového chování stroje, tvorby digitálních dvojčat strojů a možného virtuálního modelování obrábění. Snaha o virtuální prototypování celých strojů ve fázi jejich návrhu je v souladu s možností efektivního odlehčeného návrhu nosné struktury stroje. Z hlediska silnostěnných vláknových kompozitů v nosných strukturách je jejich použití v takových modelů spojeno s mnohem větší pracností než u klasických izotropních materiálů. To vybízí k rozvoji výpočtových metod, které umožní spolehlivé zjednodušení a modelování ortotropních konstrukcí.

Směrem pro zvýšení dynamických vlastností stroje z hlediska zvýšení stability mezní třísky a potažmo produktivity obrábění je výzkum spojovacích rozhraní s vysokou statickou tuhostí, vysokým tlumením a ideálně nízkým ovlivněním

možné akcelerace pohybových os. Přínosy zde budou mnohem větší, než by vznikly aplikací kompozitních odlehčených struktur s vysokým tlumením.

Seznam citované literatury

- [1] Strategická agenda výzkumná agenda oboru strojírenská výrobní techniky [online]. [Praha]: Technologická platforma Strojírenská výrobní technika, 16.12.2009. [vid 30.9.2015]. Dostupné z. http://www.tpsvt.cz/docs/strat_vyzkumna_agenda.pdf
- [2] SMOULÍK, Jan. *Nosné díly obráběcích strojů z nekonvenčních materiálů*. Praha, 2007. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [3] TLUSTÝ, Jiří a Miloš POLÁČEK. Beispiele der behandlung der selbsterregten Schwingung der Werkzeugmaschinen. FoKoMa, Hanser Verlag, Munchen [1957].
- [4] TLUSTÝ, Jiří a Miloš POLÁČEK. The Stability of Machine Tools Against Self Excited Vibrations in Machining. In: *Proceedings of the International Research in Production Engineering Conference*. Pittsburgh, USA: ASME, 1963, s. 465-474.
- [5] ALTINTAS, Yusuf a Manfred WECK. Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding. In: *CIRP Annals*, 2004, Vol. 53, Issue 2, p. 619-642, ISSN 0007-8506. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60032-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60032-8)
- [6] ZULAIKA, Juanjo a Francisco Javier CAMPA. New Concepts for Structural Components. *Machine Tools for High Performance Machining*. Springer: 2009, s. 47-73. ISBN 978-1-84800-379-8.
- [7] KROLL, L.; P. BLAU; M. WABNER, et al. Lightweight Components for Energy-Efficient Machine Tools. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 148-160, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.04.002>
- [8] MÖHRING, Hans-Christian, Christian BRECHER, Eberhard ABELE, et al. Materials in Machine Tools Structures. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2015, vol 64, i. 2, s. 725-748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.005>
- [9] MÖHRING, Hans-Christian. Advanced Materials in Machine Tool Structures. In: *Proceedings of The 16th International Machine Tool Engineers' Conference*. Tokyo: Japan Machine Tool Builders' Association, 2014, s. 76-88.
- [10] MÖHRING, Hans-Christian. Composites in Production Machines, In: *Procedia CIRP* 2017, Vol. 66, 2017, p. 2-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.04.013>
- [11] KONO, Daisuke., Soichiro MIZUNO, Toshiyuki MURAKI, Masamitsu NAKANAMI. A Machine Tool Motorized Spindle with Hybrid Structure of Steel and Carbon Fiber Composite. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol. 68, 2019, p. 389-392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.022>
- [12] KONDO, Ryo, Daisuke KONO, Atshushi MATSUBARA. Evaluation of Machine Tool Spindle Using Carbon Fiber Composite. In: *International Journal of Automation Technology*. 2020, Vol. 14, Issue 2, p. 294-303. DOI: [10.20965/ijat.2020.p0294](https://doi.org/10.20965/ijat.2020.p0294)
- [13] LEE, Dai Gil, Jung Do SUH, Hak Sung KIM a Jong Ming KIM. Design and Manufacture of Composite High Speed Machine Tool Structures. *Composite*

Science and Technology. August 2004, vol. 64, i. 10-11, s. 1523-153. ISSN 0266-3538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2003.10.021>

[14] UHER, Ondřej, Jan SMOLÍK a Milan RŮŽIČKA. Novel Concept of Three-Dimensional Thick Composite Structure From Pitch Based Carbon Fibre for Machine Tool Application. In *Proceedings of 17th International Conference on Composite Materials - ICCM-17*. Edingburgh: 27-31/7/2009, s. 156-164.

[15] MERLO, Angelo, D. RICCIARDI, Anna CREMONA, et al. Advanced composite materials in precision machine tools sector – Applications and perspectives. In: *Proceedings of 17th International Conference on Composite Materials*. 2009: Edingburgh, Scotland

[16] MÖHRING, Hans-Christian, Mathias MULLER, Jens KRIEGER, et al. Intelligent Lightweight Structures for Hybrid Machine Tools. In: *Production Engineering*. 2020, Vol. 14, p. 583-600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11740-020-00988-3>

[17] NEUGEBAUER, Reimund, WABNER, M., IHLENDFELDT, S., et al. Design Principles Inspired by Bionics for Energy Efficient Machine Tools. In: *Resource-Efficient Powertrain Technologies*, Proceedings of ICMC 2012. Chemnitz: August 2012, 221-245. ISBN 978-3-942267-40-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.096>

[18] BRECHER, Christian, Ralf SCHUG, Sebastian SCHMITZ, a Ulf BORNER. Design and Manufacture of a Carbon Fibre Spindle Rotor. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2007, vol. 14, i. 3, s. 219–227. ISSN 0792-1233. DOI: <https://doi.org/10.1515/SECM.2007.14.3.219>

[19] BANG, Keyung Geun a Dai Gil LEE. Design of Carbon Fiber Composite Shafts for High Speed Air Spindles. *Composite Structures*. February 2002, vol. 55, i. 2, s. 247-259. ISSN 0263-8223. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00146-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00146-5)

[20] MRÁZ, Petr. *Aplikace nekonvenčních materiálů v konstrukci manipulátorů a robotů*. Praha, 2001. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.

[21] MRÁZ, Petr a Jaroslav TALÁČKO. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*. Vydání první. Nakladatelství ČVUT, Praha, 2006. ISBN 80-01-03540-9.

[22] LEE, Dail Gil, Hyo-Chol SIN, Nam P. SUH. Manufacturing of a Graphite Epoxy Composite Spindle for a Machine Tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 1985, vol 34, i. 1, p. 365-369.

[23] NEUGEBAUER, Reimund, Thomas HIPKE. Machine Tools With Metal Foam. In: *Advanced Engineering Materials*. Vol. 8, i. 9, 2006, p. 858-863. ISSN: 1527-2648. [20 March 2011]. DOI: 10.1002/adem.200600095

[24] AGGOGERI, Francesco, Alberto BORBONI, Angelo MERLO, et al. Vibration Damping Analysis of Lightweight Structures in Machine Tools." In *Materials* (2017), Vol. 10. DOI:10.3390/ma10030297

[25] CHO, Sung-Kyum, Hyun-Jun KIM, Seung-Hwan CHANG. The Application of Polymer Composites to the Table-Top Machine Tool Components for Higher Stiffness and Reduced Weight. In: *Composite Structures*. Vol. 93, i. 2, 2011, p. 492-501. ISSN 0263-8223.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.08.030>

- [26] KEPCZAK, Norbert. Influence of the Addition of Styrene-Butadiene Rubber on the Dynamic Properties of Polymer Concrete for Machine Tool Applications. In: *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 11 (7) 1-11, 2019, DOI: 10.1177/168714019865841
- [27] VRBA, Pavel. Využití nekonvenčních materiálů ve stavbě nosných soustav obráběcích strojů. Praha, disertační práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2017
- [28] SONAWANE, Harshad, T. SUBRAMANINA. Improved Dynamic Characteristics for Machine Tool Structures Using Filler Materials. In: 16th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations. 2017, Vol. 58, p. 399-404. ISSN 2212-8271 . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.239>
- [29] KIM, Ju-Ho, Seung-Hwan CHANG. Design of μ -CNC Machining Centre with Carbon/Epoxy Composite–Aluminium Hybrid Structures Containing Friction Layers for High Damping Capacity. *Composite Structures*. 2010, vol. 92, s. 2128-2136.
- [30] KOLÁŘ, Petr, Matěj SULITKA, Jaroslav ŠINDLER. Development Methods for High Performance Machine Tools. In: Proceedings of 2. Wiener Produktionstechnik Kongress - WPK 2014. Vienna, Austria, 2014. pp. 333-342, ISBN 978-3-903015-00-5.
- [31] VESELÝ, Jan a Matej SULITKA. Machine Tool Virtual Model. *Modern Machinery Science Journal*. December 2009, s. 146-153. ISSN 1805-0476 [online]
- [32] SULITKA, Matěj, Petr STRAKOŠ, Lukáš NOVOTNÝ a Jan VESELÝ. *Závěrečná zpráva projektu 1.4.3*. Praha, 2006. Veřejná výzkumná zpráva č. V-06-047. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [33] BRECHER, Christian., Marcel FEY, Stephan BAUMLER. Damping Models for Machine Tool Components of Linear Axes. In *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2013, Vol. 62, pp. 399-402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.142>
- [34] REBELEIN, Christian, Jan VLACIL, Michael F. ZAEH. Modeling of the Dynamic Behaviour of Machine Tools: Influences of Damping, Friction, Control and Motion. In: *Prod. Eng. Res. Devel.* (2017) 11:61-74. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11740-016-0704-5>
- [35] SEMM, Thomas, Maximilian SPANNAGL, MICHAEL F. ZAEH. Dynamic Substructuring of Machine Tools Considering Local Damping Models. In. *8th CIRP Conference on High Performance Cutting*. Procedia CIRP, 2018, Vol. 77, pp. 670-674. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.180>
- [36] SEMM, Thomas, Christian REBELEIN, Michael F. ZAEH. Prediction of the Position Dependent Dynamic Behavior of a Machine Tool Considering Local Damping Effects. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2019, Vol. 27, pp. 68-77. DOI: 10.1016/j.cirpj.2019.08.001
- [37] SEMM, Thomas, Michale B. NIERLICH, Michael F. ZAEH. Substructure Coupling of Machine Tool in Arbitrary Axis Positions Considering Local Linear Damping Models. In *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2019, Vol. 141 (7). DOI: 10.1115/1.4043767
- [38] ZAEH, Michael F., Christian REBELEIN, Thomas SEMM. Predictive Simulation of Damping Effects in Machine Tools. In: *CIRP Annals -Manufacturing Technology*, Vol. 69, 2019, p. 393-396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.03.018>

- [39] DE SILVA, Clarence W. *Vibration and Shock Handbook*. CRC Press: 2005. ISBN 0-8493-1580-9.
- [40] ALLEMANG, Randal J., et al, *Vibrations: Analytical and Experimental Modal Analysis*, UC-SDRL-CN-20-263-662, 1998, 160 pp.
- [41] ALLEMANG, Randal J., et al, *Vibrations: Experimental Modal Analysis*, UC-SDRL-CN-20-263-663/664, 1999, 250 pp.
- [42] RICHARDSON, Mark H. and David L. FORMENTI, Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials, In *Proceedings of the 1 st International Modal Analysis Conference*, 1982, pp. 167-181.
- [43] *Tips and Tricks: Structural Damping*. ANSYS MEMO, number STI: 001021A. ANSYS: October 21, 2000.

Publikace autora vztahované k disertační práci

- [A1] KULÍŠEK, Viktor, Milan RŮŽIČKA, Pavel VRBA, Jan SMOLÍK, Miroslav Janota. *Physico-mechanical Properties of Composite Structural Parts for Machine Tools*. In: *Materials Today – Proceedings*, Vol 12, p. 288-297, 2019, ISSN 2214-7853. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.03.126
- [A2] KULÍŠEK, Viktor, Petr KOLÁŘ, Pavel VRBA, Jan SMOLÍK, a kol. *On Passive Damping in Machine Tool Hybrid Structural Parts*. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 114, Issue 7-9, p. 1925-1952, 2021, ISSN 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-021-06865-2
- [A3] KULÍŠEK, Viktor, Miroslav JANOTA, Milan RŮŽIČKA, a Pavel VRBA. *Application of Fibre Composites in a Spindle Ram Design*. *Journal of Machine Engineering*. 2013, vol. 13, no. 1, p. 7-23. ISSN 1895-7595.
- [A4] KULÍŠEK, Viktor, Milan RŮŽIČKA, Pavel VRBA, Jan SMOLÍK, et al. *Porovnání mechanických vlastností modelových nosných vzorků pro obráběcí stroje*. In: *Konference mechanika kompozitních materiálů a konstrukcí 2018*. Plzeň: *Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd*, 2018, p. 29-34. ISBN 978-80-261-0776-7.
- [A5] Kulíšek, Viktor, Milan RŮŽIČKA, Ondřej UHER, et al. *Aplikace vláken typu PITCH do nosných komponent výrobních strojů*. In: *Mezinárodní konference Polymerní kompozity 2017 - Sborník*. Praha: *Česká společnost pro mechaniku*, 2017. p. 34-41. ISBN 978-80-906713-0-0.
- [A6] KULÍŠEK, Viktor, Milan RŮŽIČKA, Tereza KAŠPÁRKOVÁ a Robin POUL. *Modelling of Composite Spindle Rams*. In: *Computational Mechanics 2015*. Pilsen: *University of West Bohemia*, 2015, ISBN 978-80-261-0568-8.
- [A7] UHER, Ondřej, Robin POUL, Tereza KAŠPÁRKOVÁ, Viktor KULÍŠEK, et al. *Composites in Machine Tool Applications*. In: *Proceedings of The 16th International Machine Tool Engineers' Conference*. Japan, 2014, p. 109-118.
- [A8] RŮŽIČKA, Milan, Viktor KULÍŠEK, Lukáš JIRAN, et al. *Tuhost a tlumení kompozitních konstrukcí*. In: *Konference mechanika kompozitních materiálů a konstrukcí mk2 2014*. Plzeň: *Západočeská univerzita, Fakulta aplikovaných věd*, 2014. p. 19-26. ISBN 978-80-261-0355-4.

- [A9] KULÍŠEK, Viktor, Jan SMOLÍK, Milan RŮŽIČKA a Petr KOLÁŘ. Influence of Material Stiffness and Damping on Dynamic Behaviour of Production Machines. In: Computational Mechanics 2018. Pilsen: University of West Bohemia, 2018, p. 51-52, ISBN 9887-80-261-0819-1.
- [A10] RŮŽIČKA Milan, Viktor KULÍŠEK, Jiří HAD, a Ondřej PREJZEK. Finite Element and Experimental Study of Novel Concept of 3D Fibre Cell Structure. In: *Proceedings of 17th ICCM* [CD-ROM]. Edinburg: ICCM, 27-31st July 2009. ISSN 1465-8011.
- [A11] JANOTA Miroslav, Viktor KULÍŠEK, Pavel VRBA, a Petr KOLÁŘ. Comparison of Damping of Materials Used in Construction of Machine Tools. In Proceedings of 25th International Congress on Sound and Vibration. 2018, 8-12th July, Japan, Hiroshima, p. 2999-3006. ISBN 978-1-5108-6845-8
- [A12] KULÍŠEK, Viktor, Tomáš MAREŠ, Lukáš JIRAN, et al. DV#7-1 (2012) Verifikované výpočetní modely pro predikci tuhosti a modálních vlastností komponent z nekonvenčních materiálů. Praha, 2012. Výzkumná zpráva č. V-12-060. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, 80 s.
- [A13] KULÍŠEK, Viktor, Miroslav JANOTA, Jiří KUŽELKA, et al. DV#7-2 (2013) Experimentálně vyhodnocené tlumení nekonvenčních a hybridních materiálů. Praha, 2013. Výzkumná zpráva č. V-13-046. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, 49 s.
- [A14] KULÍŠEK, Viktor, Tomáš MAREŠ, Milan RŮŽIČKA, a kol. DV#7 (2014) Verifikované výpočtové modely silnostěnných kompozitních struktur. Praha, 2014. Výzkumná zpráva č. V-14-054. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [A15] KULÍŠEK, Viktor, Miroslav JANOTA Pavel VRBA, et al. WP7 – Dynamické chování sestavy nosných prvků modelového stroje s uplatněním litinových nebo hybridních komponent kompozit – litina, TAJMAC-ZPS. Praha, 2018. Výzkumná zpráva č. V-18-046. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [A16] KULÍŠEK, Viktor, Milan RŮŽIČKA, Jana HORNOVÁ, et al. WPO7 – Model stroje MCV7032 s uplatněním kompozitních materiálů. Praha, 2019. Výzkumná zpráva č. V-19-069. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [A17] HAD, Jiří, Viktor KULÍŠEK, Zdeněk POŠVÁŘ, et al. Výpočtové a experimentální postupy pro zjišťování vlastností hybridních kompozitních struktur - výpočtová část. Praha, 2015. Výzkumná zpráva č. 12105/2015/56. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky.
- [A18] RŮŽIČKA, Milan, Viktor KULÍŠEK, Petr MORES a Pavel VRBA. Hnací hřídel. Užitétný vzor číslo 31655, 2018, Česká Republika.

