

Posudek disertační práce

Uchazeč: **Ing. Viktor Kulíšek**

Název disertační práce: **Vliv nekonvenčních materiálů na dynamické vlastnosti nosných dílců obráběcích strojů**

Studijní obor: **Konstrukční a procesní inženýrství**

Školitel: **Ing. Jan Smolík, Ph.D.**

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

Oponent: **Doc. Ing. Tomáš Mareš, Ph.D.**

Aktuálnost tématu disertační práce

Těžiště práce spočívá v posouzení přínosu použití vláknových kompozitů v konstrukci nosných dílců obráběcích strojů. Na tyto dílce jsou kladeny vysoké požadavky na statickou a dynamickou tuhost. Důraz je kladen na analýzu smykadel, která jsou navržena jako celokompozitní konstrukce nebo jako hybridní konstrukce, tvořené vnějším kovovým pláštěm a vnitřní kompozitní výztuží.

S využitím metod experimentální modální analýzy jsou zkoušeny různé typy konstrukcí smykadel a analyzovány jejich vlastnosti a to jak samotných smykadel, tak i smykadel v celkové sestavě obráběcího stroje. 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 navržené postupy pro relevantní modelování a možné hmotnostní redukce dílů.

V práci je také zkoumán vliv daných změn na dynamické chování sestavy nosných těles obráběcího stroje.

Aktuálnost tématu disertační práce je vynikající.

Splnění cílů disertační práce

Cíle disertační práce a způsoby jejich dosažení jsou jasně formulovány v kapitole 3. Shrnutí dosažených výsledků je v kapitole deváté. Na základě studia předložené práce je zřejmé, že **cíle disertační práce byly beze zbytku splněny.**

Metody a postupy řešení

Metody řešení problémů stanovených v cílech disertační práce jsou založené na experimentálním výzkumu a výpočtových simulacích. Práce je zaměřena na stavbu nosných dílců a možnosti zlepšení užitných vlastností stroje uplatněním lehkých nosných materiálových struktur z vláknových kompozitů. V práci je systematicky studováno výsledné chování sestavy nosných dílů stroje při změně jejich tuhosti, hmotnosti a tlumení.

Postup při řešení cílů práce je přehledně graficky znázorněn na obrázcích 11 a 12. Nejprve byly navrženy vhodné materiálové vzorky a referenční tělesa z izotropních materiálů ekvivalentní tuhosti nebo ekvivalentních vnějších rozměrů. Tyto vzorky byly použity pro zkoušky statické tuhosti a zkoušky modálních vlastností a pro ověření přístupů modelování pomocí MKP a posouzení shody výsledků predikce MKP s výsledky experimentálních zkoušek.

Dále byla navržena vhodná 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 (modelová nebo reálná) obráběcích strojů, jejichž tuhost, hmotnost a tlumení může významně ovlivňovat chování celého stroje.

Vlastní práce je rozdělena do dvou oblastí – první, která se věnuje dílcům, je popsána zejména v kapitole 5 a 6, druhá, která se věnuje sestavám, je popsána v kapitole 7 a 8.

Poznatky z kapitoly 5 a 6 vedou k odvození závěrů o reálně dosažitelné hmotnostní úspoře, nebo změně statické tuhosti. Dále bylo řešeno ovlivnění dynamických vlastností sestavy stroje. Posouzení vlivu změny materiálu nosných těles na dynamické vlastnosti sestav bylo provedeno dvěma způsoby: pomocí experimentálních zkoušek v kapitole 7 a pomocí výpočtového posouzení v kapitole 8.

Pro výpočty metodou konečných prvků byly použity metody pro výpočet vlastností vrstvy jednosměrového kompozitu z parametrů vláken, matrice a předpokládaného objemového podílu, metody vyhodnocení tlumení, metoda výpočtu dynamických vlastností stroje (frekvenční přenosové funkce dynamické poddajnosti) a metoda sestavení výpočtového modelu stroje, který v zjednodušené formě umožňuje sestavit matici tlumení sestavy nosných dílců, do které vstupují parametry tlumení jednotlivých dílců i spojovacích rozhraní. Ve spojení s maticí tuhosti a hmotnosti sestavy následně tato metoda umožňuje výpočet dynamického chování stroje.

Měření a experimentální vyhodnocení modálních vlastností kompozitních komponent byly provedeny pracovníky akreditované zkušební laboratoře Ústavu výrobních strojů a zařízení FS ČVUT v Praze ve spolupráci s disertantem. Pro všechna měření bylo použito ústředny Brüel & Kjær 3560C, modálního kladiva Brüel & Kjær 8206-003 a jednoosých nebo tříosých akcelerometrů z produkce společnosti Brüel & Kjær.

V práci jsou ověřovány výpočtové modely na bázi MKP s výsledky experimentální modální analýzy (EMA). Pečlivé propojení a vyvážení experimentálního a teoretického výzkumu zvyšuje důvěryhodnost a spolehlivost obdržovaných výsledků.

Metody a postupy řešení použité k dosažení vytyčených cílů jsou vhodné a přiměřené k

současnému stavu poznání.

Výsledky disertace – konkrétní přínosy disertanta

Použitelnost navržené metodologie MKP analýzy je podpořena dobrou shodou výsledků numerických simulací a odpovídajících experimentálních měření.

Provedené statické výpočty a experimentální měření ukazují, že:

- Statická ohybová tuhost kompozitních nosníků je srovnatelná s izotropními vzorky.
- Porovnání průhybu v místě podpor uložení a v místě zavedení síly ukazuje výrazný nedostatek ortotropního vláknového kompozitu – nižší „lokální“ tuhost v místě spojovacího rozhraní kompozitní konstrukce.
- Integrace poddajných tlumících vrstev se během zkoušek výrazně neprojevila z hlediska charakteristiky síla-posuv.

Experimentální modální analýzy ukázala, že

- Vlivem nejmenší statické tuhosti a tlumení ocelového nosníku byly nejhorší dynamické tuhosti dosaženy u ocelového svařence. Při porovnání dynamické poddajnosti z frekvenční přenosové funkce ocelového nosníku byly vyhodnoceny hodnoty řádově vyšší než u ostatních zkušebních těles.
- U litinového vzorku byla vlivem jeho dobrého tlumení a vysoké tuhosti vyhodnocena dynamická poddajnost nízkých hodnot, která byla lepší než u kompozitového vzorku bez tlumících vrstev. Z hlediska provedeného měření byly na prvních ohybových tvarech vyhodnoceny poddajnosti menší než na dalších tvarech tělesa.
- Nejmenší hodnota dynamické poddajnosti byla vyhodnocena u navíjeného kompozitního vzorku s tlumícími vrstvami. Tento vzorek měl nejvyšší statickou tuhost v ohybu a zároveň velmi vysoký útlum.
- U vzorku deskového kompozitního vzorku s tlumícími vrstvami) byla dynamická poddajnost přibližně dvakrát až třikrát nižší než u stejného vzorku bez tlumících vrstev. Zde se efekt přídavných vrstev projevil podstatně více než při pouhém vyhodnocení vlastních frekvencí a útlumu.

Z výpočtových modelů plyne:

- Statická tuhost ocelového smykadla byla nejnižší, přibližně o 15 % nižší než vůči referenčnímu smykadlu ze šedé litiny.
- Statická tuhost obou deskových smykadel je téměř totožná s tuhostí litinového tělesa (u kompozitů pokles o 4 %, respektive 6 %). Vzhledem k výrazně nižší hmotnosti (téměř ¼ hmotnosti vůči litině) došlo k výraznému zvýšení vlastních frekvencí. První ohybová frekvence je u obou deskových smykadel o 100 % výše, než je hodnota ohybu u litinového smykadla.
- Nejlepších vlastností dosáhlo smykadlo navíjené, které nemělo přídavnou poddajnost vlivem spojovacích rozhraní desek a příložek. Při velmi podobné hmotnosti s hmotností deskových smykadel dosáhlo navíjené smykadlo vyšší tuhosti (o 14 % vyšší vůči litinovému referenčnímu tělesu) i vyšších vlastních frekvencí.
- Porovnání statické tuhosti mezi MKP a experimentální zkouškou ukazuje nepřesnost výpočtového modelu z hlediska lokální deformace kompozitních vzorků v místě uložení. Z daného důvodu je MKP predikce odlišná od

experimentu.

Z provedené experimentálně-výpočtové studie disertant stanovuje závěry, které popisují výhody a nevýhody aplikace vláknových kompozitů do silnostěnných materiálových vzorků, které jsou zaměřeny na vysokou tuhost a vysoké tlumení.

Studie silnostěnných nosných těles pro obráběcí stroje s uplatněnými vláknovými kompozity je popsána v kapitole šesté se závěrem, že

Nejvhodnějším způsobem numerického modelování metodou konečných prvků je použití skořepinové náhrady (plošné nebo objemové). Při pouze tuhostní analýze lze s výhodou využít zjednodušení dle ABD matice a příčných smykových tuhostí a výrazně tím i snížit výpočetní čas v porovnání s řešením skořepiny s kompletní definicí kompozitní skladby.

Přínos pro vědu spočívá zejména v získání poznatků o tlumení nosných dílců vysoké tuhosti 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.

Význam pro praxi a pro rozvoj vědního oboru

Pro praxi je velmi významné porovnání mechanických vlastností reálně vyrobených silnostěnných kompozitních struktur s výsledky výpočtových modelů pomocí metody konečných prvků. Dále jsou významné získané poznatky o možnosti hmotnostní redukce při zachování statické tuhosti silnostěnných struktur a demonstrace možného dosažení lepších dynamických vlastností použitím celokompozitní struktury nebo struktury na bázi kompozit-kov. Velmi významná je navržená metodika numerického modelování a návrhu celokompozitových a hybridních nosných prvků obráběcích strojů.

Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň

Práce je velice pěkně graficky provedena. Je logicky a přehledně organizována a napsána elegantní češtinou prakticky bez chyb a s velmi malým počtem překlepů.

Dotazy a připomínky

- Z práce vyplývá, že pokud se pracuje jen s jednotlivými tělesy stroje, tak lze použitím kompozitové nebo hybridní struktury dosáhnout příznivější dynamické poddajnosti a tlumení. Po zapojení tohoto tělesa mezi běžné nosné díly z oceli nebo litiny však celá soustava své chování téměř nezmění. Máte nějaké vysvětlení tohoto jevu?

- Z výsledků práce plyne, že významnou roli hraje tlumení na pevných spojích i na pohyblivých uloženích a vedeních. Měl byste nějaká doporučení pro další výzkum tohoto jevu?

Závěrečné zhodnocení disertace

Na základě výše uvedeného posouzení vědeckého významu, dosažených výsledků, organizace, stylu a teoretické správnosti práce ji hodnotím velmi kladně. Předložená doktorská práce vyhovuje všem kladeným požadavkům a proto ji doporučuji k další obhajobě. V případě úspěšné obhajoby doporučuji udělit Ing. Viktorovi Kulíškovi titul doktor, ve zkratce Ph.D.

V Praze dne 8.VI.2022

Doc. Ing. Tomáš Mareš, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky