

# VLIV NEKONVENČNÍCH MATERIÁLŮ NA DYNAMICKÉ VLASTNOSTI NOSNÝCH DÍLCŮ OBRÁBĚČÍCH STROJŮ

Autor: Ing. Viktor Kulíšek, školitel: Ing. Jan Smolík, Ph.D., školitel specialista Prof. Ing. Milan Růžička, CSc.  
Studijní obor: Konstrukční a procesní inženýrství, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

## 1. MOTIVACE PRÁCE

Dynamické vlastnosti nosné struktury obráběčích strojů jsou jedním z hlavních určujících parametrů pro produktivitu obrábění a přesnost a jakost obrobků. Tradiční materiály (litiny, oceli) dosahují vysoké tuhosti v nosných dílcích, ale i s využitím moderních optimalizačních metod představuje jejich měrná hmotnost omezením pro další zvyšování dynamických vlastností. Možné odlehčení pohybových os strojů nabízí vláknové kompozity jako konstrukční materiály s nízkou měrnou hmotností, dobrým tlumením a vysokou směrově orientovanou tuhostí.

Je otázkou, do jaké míry je aplikace celo-kompozitní nebo hybridní konstrukce kov – kompozit efektivní pro komponenty pohybových os. Požadavky na vysokou tuhost vedou u kompozitů k silnostěnným strukturám vysoké výrobní ceny. Klíčovou otázkou je, jak se změní dynamická tuhost samotného dílce vůči tradičním izotropními strukturám a jaký je vliv změny dynamické tuhosti a odlehčení komponenty na dynamické chování sestavy obráběčího stroje.

## 2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

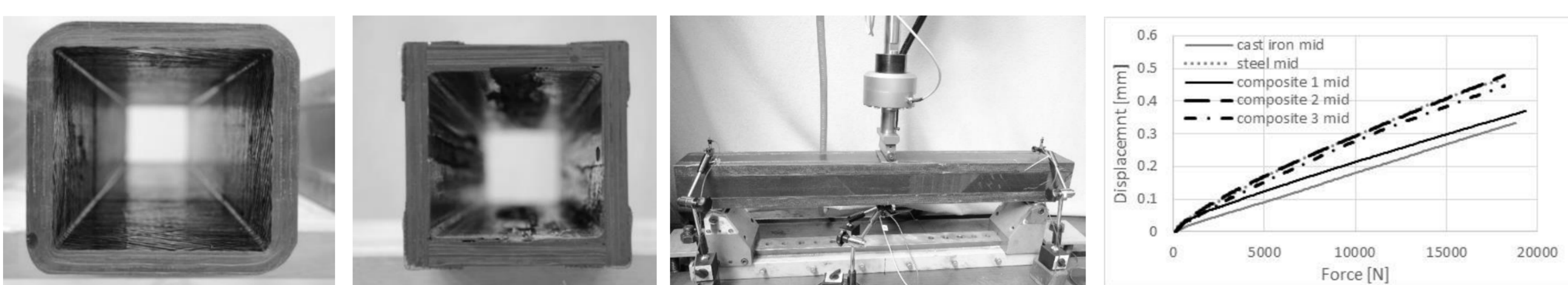
Hlavním cílem je určit přínos aplikace vláknových kompozitů do nosných struktur obráběčích strojů s ohledem na dynamické chování sestavy nosných dílců stroje. Dílčí cíle jsou následující:

- Určit dosažitelné parametry statické tuhosti a hmotnosti silnostěnných kompozitních struktur vůči nosným dílcům z oceli nebo litiny. Navrhnout a ověřit metodiky výpočtového modelování silnostěnných kompozitních nebo hybridních nosných dílců
- Určit modální vlastnosti kompozitních a hybridních nosných těles
- Experimentálně a výpočtově určit vliv změny tuhosti, hmotnosti a tlumení dílce na dynamické vlastnosti sestavy stroje a určit přínos vláknových kompozitů pro obráběčí stroje

## 3. VLIV KOMPOZITŮ NA STATICKOU TUHOST A REDUKCI HMOTNOSTI

Určení reálně dosažitelné statické tuhosti a hmotnostní redukce bylo provedeno pomocí experimentálních a numerických zkoušek a porovnáním těles s kovovými referenčními strukturami stejných vnějších rozměrů a připojovacích rozhraní. Byla použita ultra-vysoko-modulová uhlíková vlákna pro dosažení vysoké tuhosti, některá tělesa s přídatnými poddajnými tlumivými vrstvami pro vysoké tlumení a dynamickou tuhost.

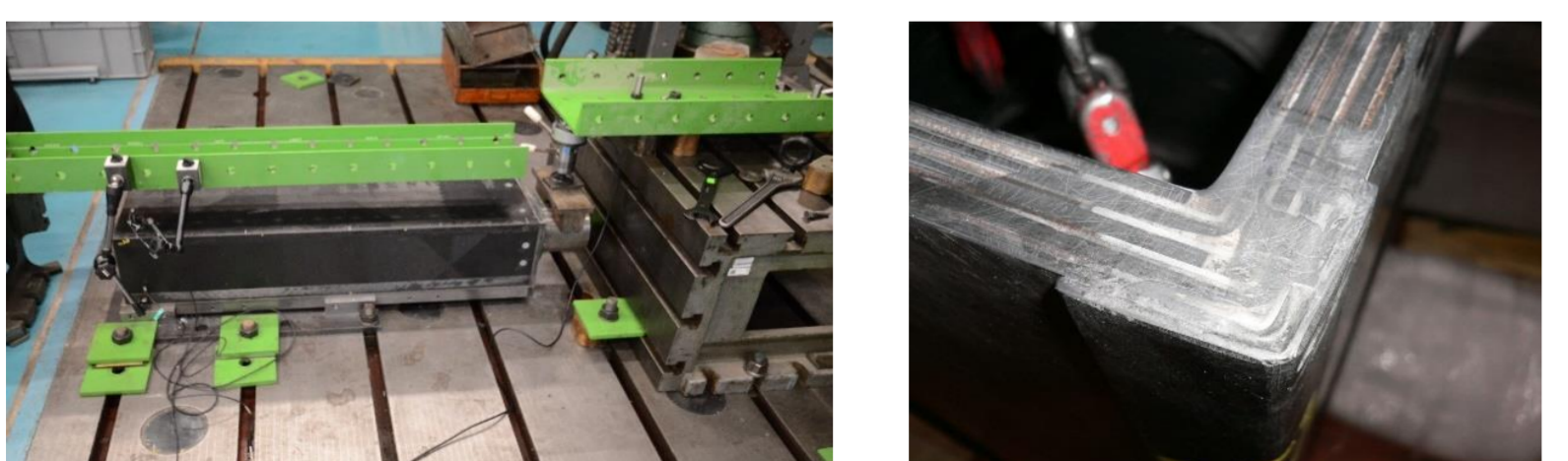
- Silnostěnné kompozitní vzorky z ultra-vysoko-modulových uhlíkových vláken s redukcí hmotnosti 50-70% litině a oceli, přibližně 1,3 násobné zvýšení tloušťky stěny u nejtuzšího kompozitu vůči litině stejné tuhosti



- Celokompozitní smykadla s 40-45% redukcí hmotnosti vůči reálným ocelovým dílcům stejných vnějších rozměrů a připojovacích rozhraní s výrazným vlivem lokálních deformací ve spoji



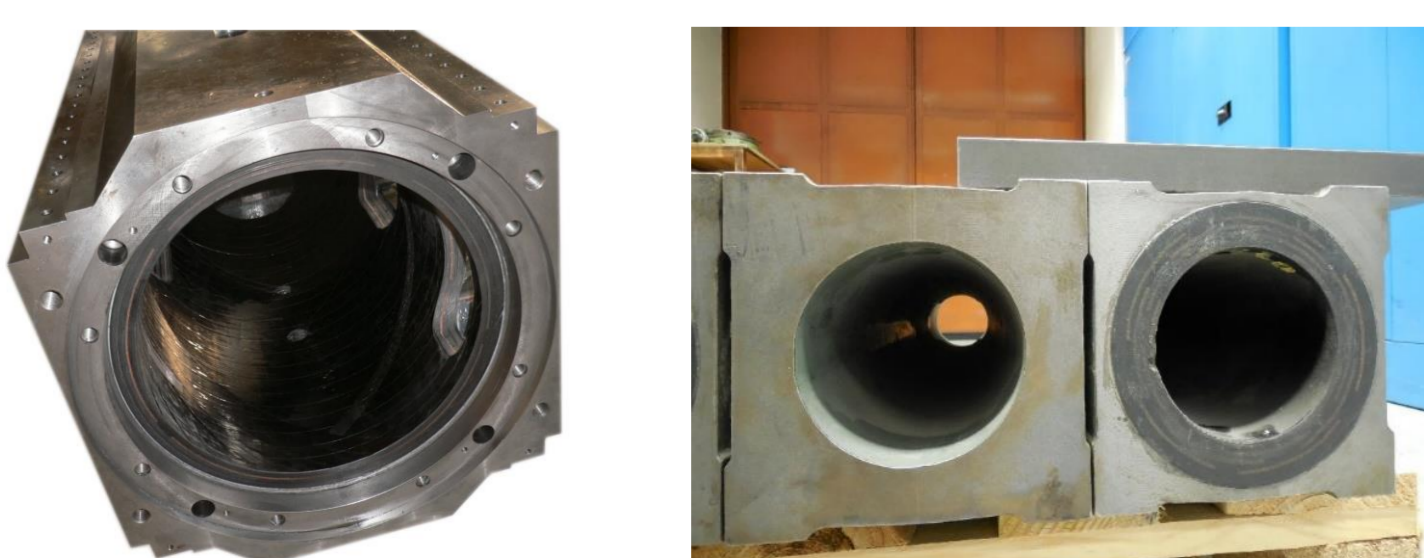
Smykadlo	Hmotnost [kg]	Khor [N/μm]	Kvert [N/μm]
Ocel	150	26	56
Ocel + žebra	220	47	56
Kompozit	130	43	58



Smykadlo	Hmotnost [kg]	Khor [N/μm]	Kvert [N/μm]
Ocel	112	55	65
Kompozit *	45	26	58

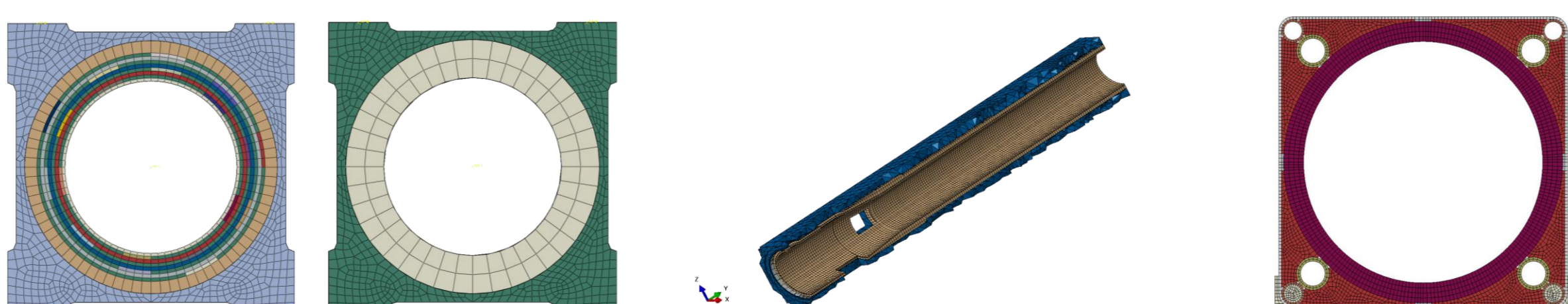
Všechna tělesa značená \* obsahují poddajné tlumivé vrstvy v kompozitní výztuži

- Hybridní smykadla na bázi kovového pláště a vnitřní kompozitní výztuže s hmotnostní redukcí 25-30% vlivem redukce kovového pláště nebo s přidanou nízkou hmotou a výrazným vyztužením



Smykadlo	Hmotnost [kg]	Khor [N/μm]	Kvert [N/μm]
Tvárná litina	142	16,4	20,4
Hybrid 1	104	16,3	21,0
Hybrid 2*	104	14,4	18,8
Hybrid 3*	104	13,7	17,7

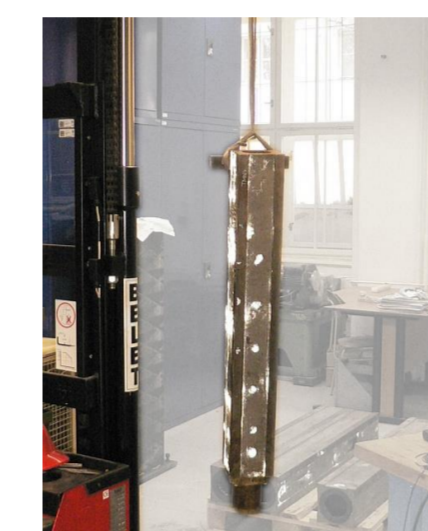
- Navržená metodika pro modelování silnostěnných kompozitních výztuží, ověření s výsledky experimentální modální analýzy. Rozdíl MKP - experiment v rámci 10-15 % u celokompozitních těles, do 5 % u hybridních.



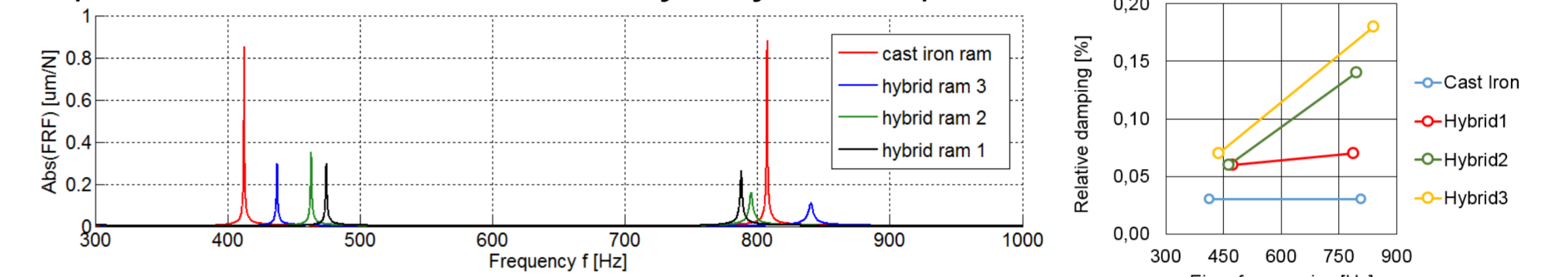
## 4. VLIV KOMPOZITNÍCH A HYBRIDNÍCH STRUKTUR NA DYNAMICKÉ VLASTNOSTI NOSNÝCH DÍLCŮ A VLASTNOSTI SESTAV STROJE

Experimentální přístup – modální analýza dílců a sestav stroje

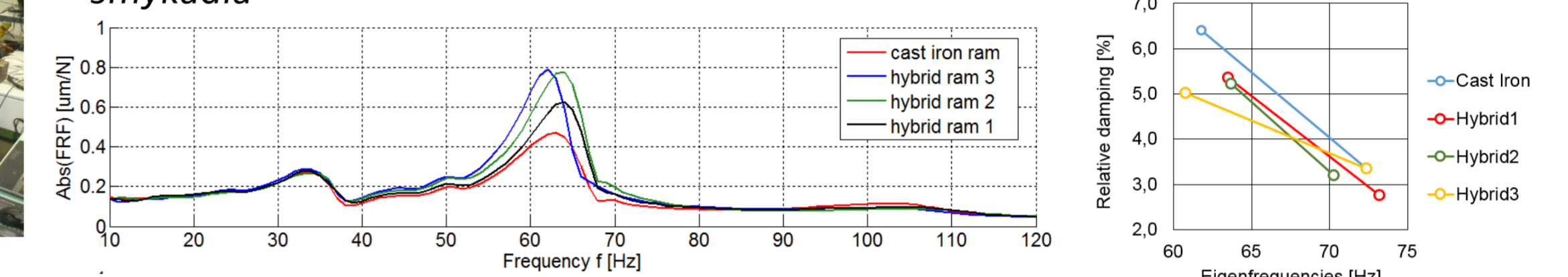
- Identifikace parametrů tlumení a dynamické tuhosti samotných dílců pro určení vlivu kompozitu
- Vyhodnocení změny dynamické tuhosti a tlumení v sestavě stroje s vlivem dalších komponent a spojovacích rozhraní



Změna dynamické tuhosti a tlumení vůči tvárné litině hybridních smykadel při redukované hmotnosti dílce – výrazný vliv kompozitu



Změna dynamické tuhosti a tlumení sestavy stroje vlivem změny materiálu smykadla

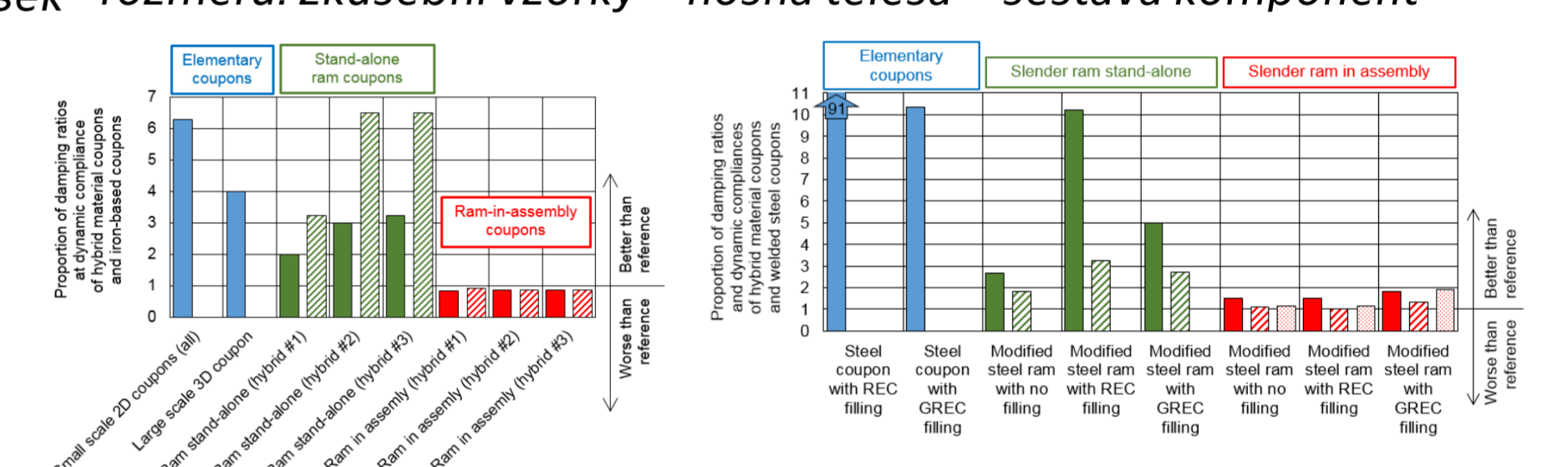


- Výrazné zvýšení tlumení samotných těles, v sestavě ale bez výrazného vlivu na celkovou dynamickou tuhost a tlumení sestavy nosných dílců
- Zvýšení dynamické tuhosti dílce vlivem integrace poddajných tlumivých vrstev do kompozitu, v sestavě stroje ale s negativním přínosem vlivem redukované statické tuhosti

Tab. 1 – průměrné parametry tlumení nosných těles z experimentálních zkoušek

Materiál smykadla	Poměrné tlumení ζ [%]
Ocelové svařence	0,05-0,10
Tvárná litina	0,04-0,10
Celokompozit*	0,40-2,0*
Hybrid kov-kompozit	0,08-0,13

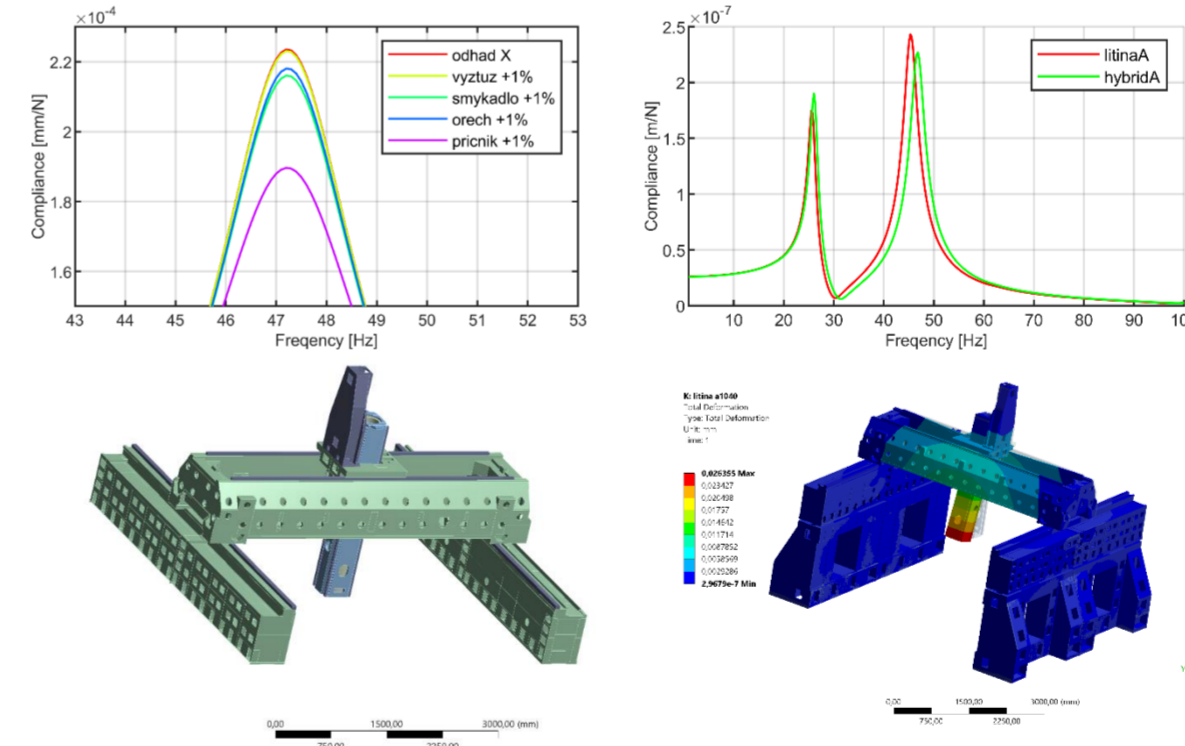
Tlumení dílce kompozitem v poměru s referenčním kovem stejných rozměrů: zkušební vzorky – nosná tělesa – sestava komponent



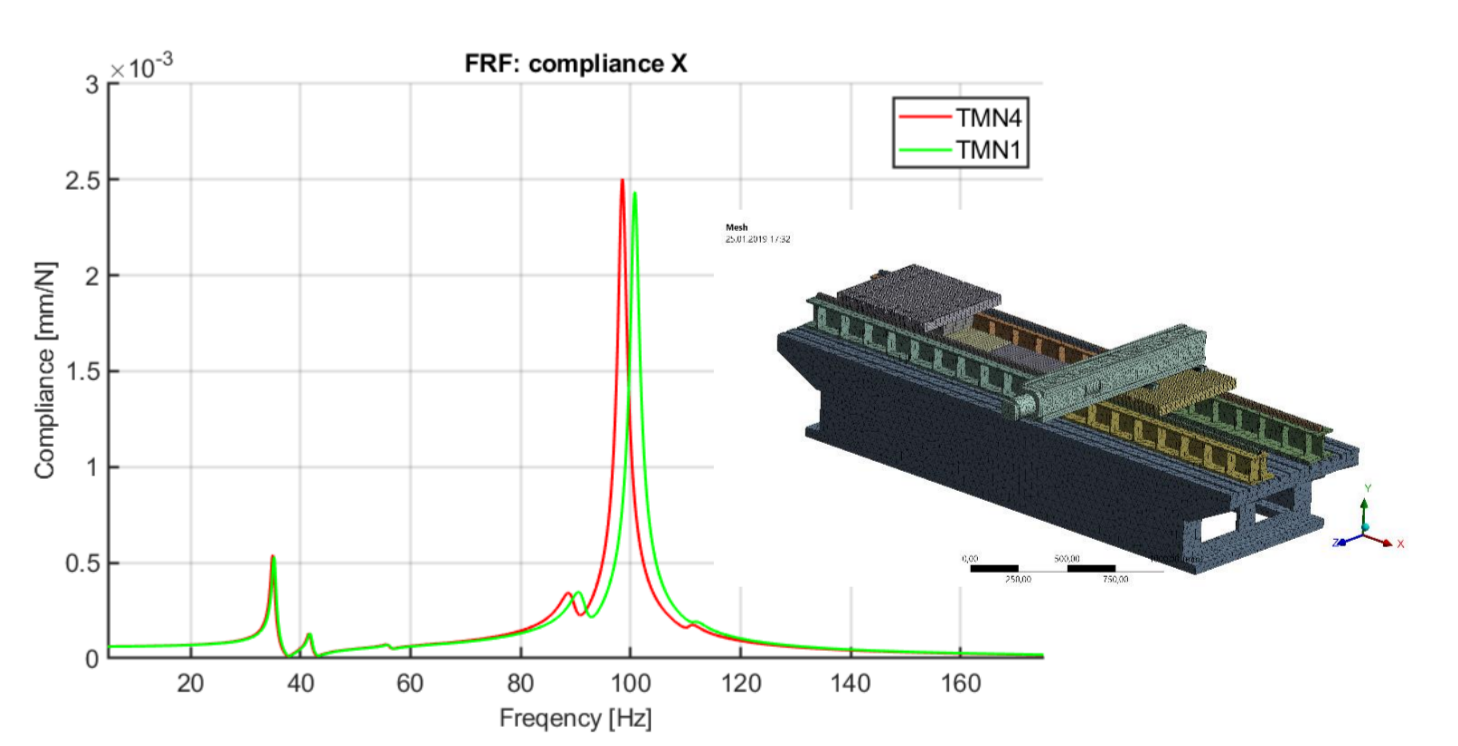
## Výpočtový přístup

- Využití ověřených přístupů pro modelování silnostěnných kompozitů
- Formulace globální matice tlumení  $[\Phi]^T [C] [\Phi] = [\Phi]^T \sum_{j=1}^m \left( \frac{2\zeta_j}{\omega_j} \right) [K_j] [\Phi]$
- Odhad tlumení spojovacích rozhraní, zejména náhrad hnízd valivých vedení  $\zeta_j \sim 20\%$  (10-30% dle konfigurace stroje) a využitím průměrného poměrného tlumení  $\zeta_j$  jednotlivých nosných komponent (tab. 1)
- Závěry vlivu tlumení ve shodě s vlivem experimentálních zkoušek
- Redukce hmotnosti 30 % smykadla – zvýšení dynamické tuhosti sestavy pouze do 5-10%

Vliv zvýšení tlumení nosné komponenty na dynamickou tuhost sestavy stroje (vlevo), změny tuhosti náhradou tvárné litiny hybridní strukturou kompozitu (vpravo)



Vliv změny tuhosti a tlumení smykadla na dynamickou tuhost sestavy zkušebního stroje v místě náhrady nástroje, hybrid 1 (TMN1) vs tvárná litina (TMN4)



## 5. ZÁVĚRY

Nově byly určeny parametry dosažitelné statické tuhosti, hmotnosti a tlumení struktur nosných dílců ze silnostěnných kompozitních a hybridních struktur. Zásadním přínosem je určení vlivu změny tuhosti, tlumení a hmotnosti dílce na dynamické vlastnosti sestavy stroje, formulace parametrů tlumení nosných dílců a spojovacích rozhraní ve výpočtovém modelu stroje. Samotné výsledky ukázaly, že lze dosáhnout výrazné redukce hmotnosti dílců. Z hlediska dynamických vlastností sestav strojů ale přínos k dynamické tuhosti a posunu vlastních frekvencí není výrazný.

## VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA

- [1] KULÍŠEK, Viktor, Petr KOLÁŘ, Pavel VRBA, Jan SMOLÍK, et al. 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.