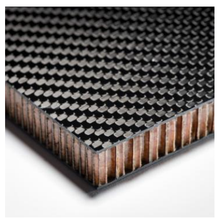
Návrh technologie výroby sendvičových jader z přírodních materiálů

Petr Čagan
Ústav strojírenské technologie

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Proč přírodní vlákna?

- Současným trendem je snižovat emise a využívat obnovitelné zdroje
- Přes výtečné mechanické vlastnosti konvenčních kompozitů jsou jejich energetická náročnost a emise vysoké
- Přírodní vlákna nabízí konkurenceschopné specifické mechanické vlastnosti
- Přírodní vlákna (NFRP) jsou dnes využívána hlavně v designu, nábytkářství a motosportu
- O sendvičových aplikacích NFRP pojednává zatím pouze výzkum – i ten je velmi omezený

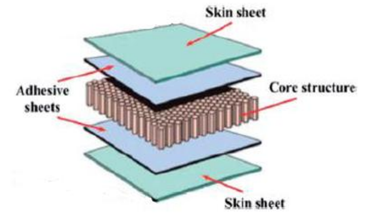


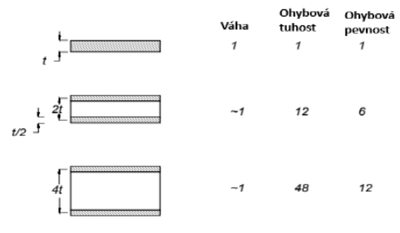
Konvenční kompozit s potahy z uhlíkových vláken

Parametr	Konopné vlákno	Lněné vlákno	Skleněné vlákno	Uhlíkové vlákno
Energetická spotřeba [MJ/kg]	3,4	11,4	48,3	310
Emise CO [kg/kg]	0,64	0,52	20,4	25
Mez pevnosti v tahu [MPa]	500 – 900	310 – 1000	2000 – 3500	3500 – 4900
Hustota [g/cm]	1,50	1,48	2,60	1,80

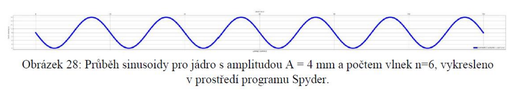
Návrh tvarového jádra

- Sendvič je odlehčený nosník skládající se ze dvou tuhých povlaků a relativně lehkého jádra
- Jádro inspirované přírodní architekturou klepeta *straška pavího (mantis shrimp)*
- CAD model jádra – prostorová sinusoida
- Model plochy jádra vytvořen v programu Rhino 3D pomocí pluginu Grasshopper
- Vyrobeny dvě varianty formy s různou amplitudou a frekvencí sinusoidních vln $z = A \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \sin(k \cdot y)$

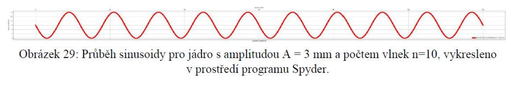




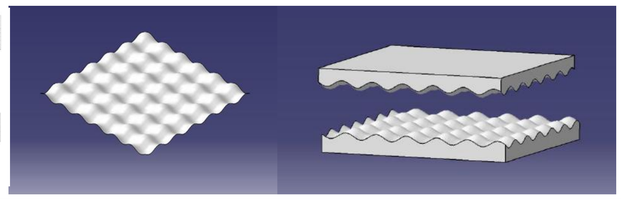
	Váha	Ohybová tuhost	Ohybová pevnost
t	1	1	1
2t	~1	12	6
4t	~1	48	12



Obrázek 28: Průběh sinusoidy pro jádro s amplitudou A = 4 mm a počtem vlnek n=6, vykresleno v prostředí programu Spyder.

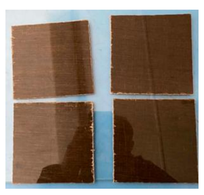


Obrázek 29: Průběh sinusoidy pro jádro s amplitudou A = 3 mm a počtem vlnek n=10, vykresleno v prostředí programu Spyder.



Výroba sendviče s přírodní výztuží

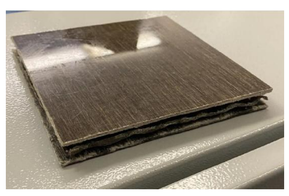
Potahy: lněný jednosměr
8x FlaxTape 100
kvaziizotropní skladba
v_f= 0,27; w_f=0,38
Vakuová infuze



Jádro: konopná netkaná rohož
2x FibriLight H150
v_f= 0,27; w_f=0,33
Ruční nasycení s vytvrzením ve vakuu

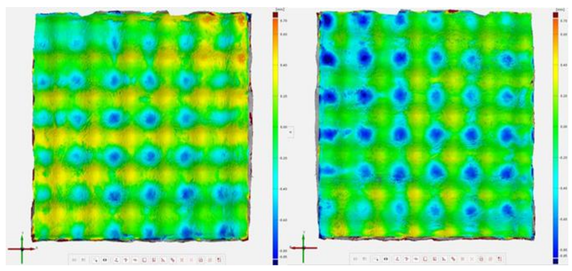
Matrice: Epoxid LG700/HG700

Výsledný sendvič byl vyroben slepením jednotlivých komponent epoxidem.

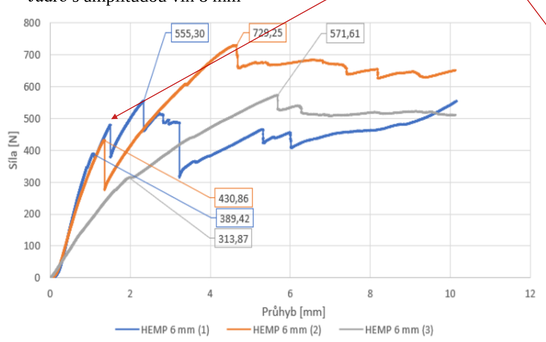


Testy prvotních vzorků

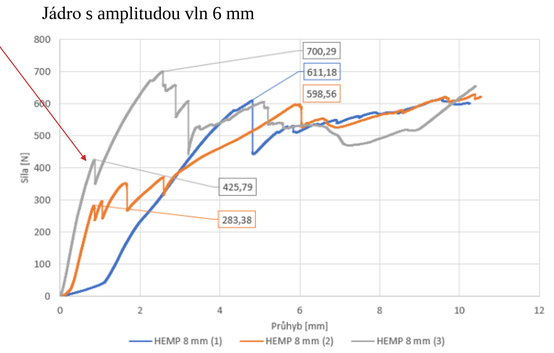
- Analýza odchylek pomocí 3D skenu jádra odhalila špatné vytvarování vrcholů jádra
- Při ohybu se objevily četné delaminace (propady v grafech) spoje jádro-potah, následovala destrukce jádra
- Po delaminaci se struktura přestává chovat jako sendvičový panel



Jádro s amplitudou vln 8 mm

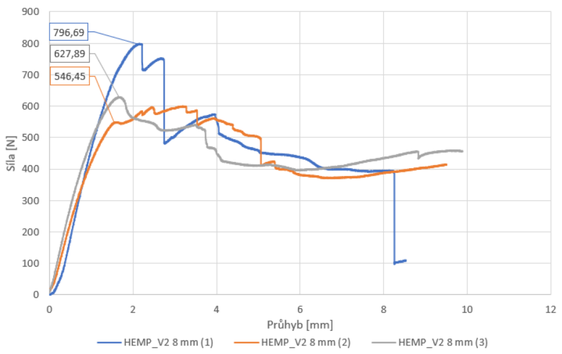


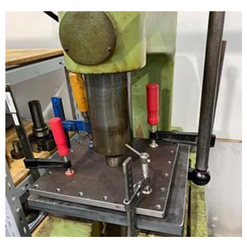
Jádro s amplitudou vln 6 mm



Úprava výrobního procesu

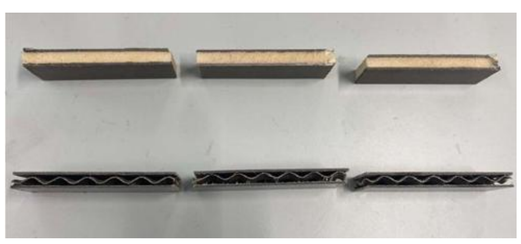
- Cílem bylo odstranění delaminací
  - Výroba jádra: Stlačení formy lisem při vytvrzování
  - Spoj jádro-potah: Epoxid LG700/HG700 → Lepidlo 3M DP490
- Při využití vyššího tlaku byla vyrobitelná pouze varianta s 6 vlnami
- Vyroben referenční vzorek s pěnovým jádrem AIREX + lněné potahy





Ruční lis zajistil úplné dovření formy.

Upravené sendviče již při ohybu nevykazovaly delaminace a jejich ohybová tuhost se zvýšila.



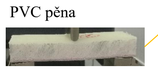
Testy upravených vzorků a porovnání s referenčními sendviči

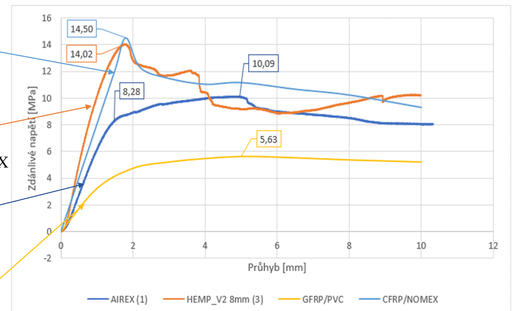
Voština NOMEX

Přírodní jádro HEMP

Polymerní pěna AIREX

PVC pěna





Název varianty	HEMP_V2 sinusoida	CFRP/NOMEX	AIREX	GF/PVC
Tloušťka jednoho potahu [mm]	2,01	1	2,01	2
Tloušťka jádra [mm]	8	20	10	20
Mezní zdánlivé napětí [MPa]	14,8	14,5	9,99	5,63
Mezní napětí v potazích [MPa]	17,67	57,2	13,53	13,12
Mezní smyková pevnost jádra [MPa]	0,89	0,73	0,68	0,52
Specifická smyková pevnost jádra [MPa/(kg/m³)]	0,0096	0,0152	0,0113	0,0087

ALSHAHRANI, Hassan a AHMED, Azzam. *Study on Flexural Behavior of Glass Fiber Reinforced Plastic Sandwich Composites Using Liquid Thermoplastic Resin*. Online. Polymers. 2015, roč. 14, č. 19, čl. 4045. ISSN 2073-4360. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/polym14194045. [cit. 2026-05-20].

SUBHANI, T. *Mechanical Performance of Honeycomb Sandwich Structures Using Three-Point Bend Test. Online. Engineering*, Technology & Applied Science Research. 2019, roč. 9, č. 2, s. 3955-3958. ISSN 1792-8036. Dostupné z: https://doi.org/10.48084/etasr.2597. [cit. 2026-05-21].

Závěr:

- Sendvič s přírodními vlákny je svou ohybovou tuhostí srovnatelný se strukturou z uhlíkových vláken a aramidovou voštinou a jeho mechanické vlastnosti převyšují komerční pěnové varianty
- Jádro z konopného vlákna vydrželo ve smyku největší napětí ze všech srovnávaných variant
- Ty stejné potahy přenesli o 30 % větší mezní napětí s přírodním jádrem než s pěnovým jádrem AIREX
- Pro komerční zavedení je potřeba další výzkum – aplikace vyspělejších materiálů a technologií výroby