

# ODBORNÁ ZPRÁVA O POSTUPU PRACÍ A DOSAŽENÝCH VÝSLEDKÍCH ZA ROK 2019

Příloha k závěrečné zprávě za rok 2019

Číslo projektu: TJ01000292

Název projektu: Pokročilé hybridní pásy pro výrobu kompozit  
přesným vinutím

Předkládá:

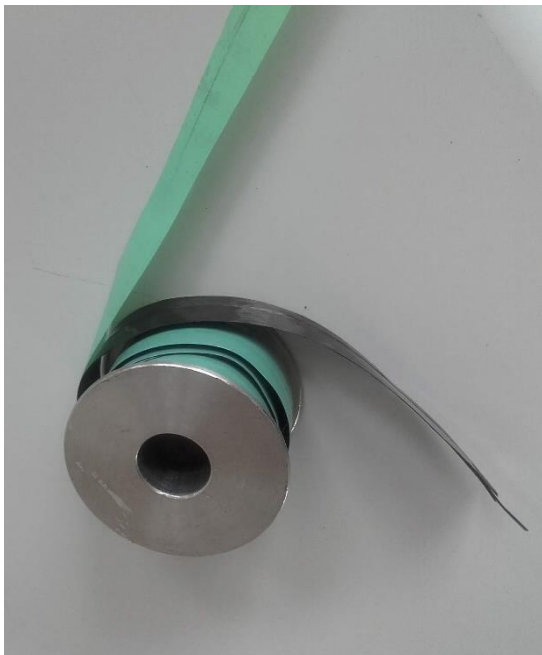
**Název organizace:** Technická univerzita v Liberci

**Jméno řešitele:** Pavel Srb, Martina Novotná, Roman Pulíček, Alžbeta Samková, Karolína Voleská

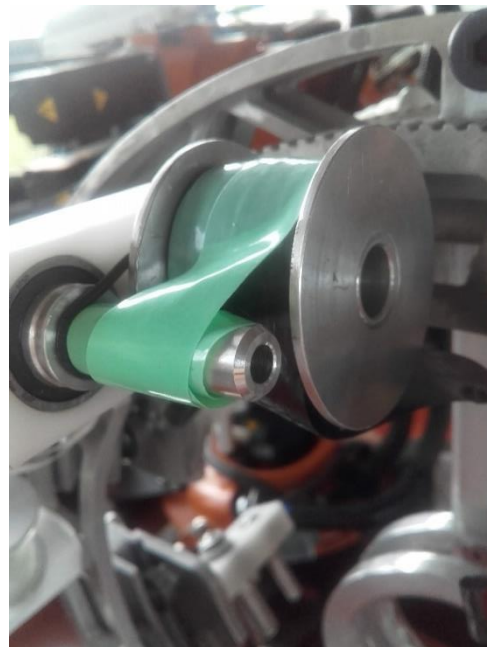
## Chování optimalizované hybridní pásky z rozprostřených vláknenných kabílků v reálných výrobních podmínkách

Původní koncepce robotizovaného systému ovíjení byla navržena pro technologii výroby ovíjených kompozitních dílů tzv. mokrou cestou. Principem původní metody je tvorba návínů suchých vláknenných filamentů současně z několika cívek na nenosné jádro v několika vrstvách a pod různými úhly [1 - 9]. Následně je toto ovínuté jádro ve formě zalito pryskyřicí, vlákna jsou zasyčena a vytvrzena.

Postupem času byla technologie modifikována pro ovíjení prepregových pásek (obr. 1a). Výrazným benefitem využití prepregového materiálu namísto klasických vláken je absence nutnosti sycení a vytvrzení ve formě. Nevýhodou předsycených vláken, pro technologii ovíjení, byla jejich lepivost. Spíše než jako vlákna se totiž chovají jako oboustranná lepicí páska, z tohoto důvodu musí být jednotlivé vrstvy odděleny silikonovou folií. Tato silikonová folie znesnadňuje už převíjení prepregových pásek na vhodné cívky. Při samotném procesu ovíjení je nutné separační folii odvádět a ukládat což komplikuje konstrukci ovíjecí hlavy (obr. 1b). Vzhledem k lepivosti prepregových pásek dochází k výraznému zvýšení namáhání ovíjecí hlavy, zejména v axiálním směru. Rám ovíjecí hlavy byl z tohoto důvodu výrazně zesílen. Vzhledem k uvedenému je tedy ovíjecí hlava složitější s vyšší hmotností, což snižuje její užitečnou hodnotu.



a) Cívka s prepregovou páskou



b) Odvádění separační folie od prepregové pásky

Obr. 1 Cívka s prepregovou páskou

T A

Č R

Vyvinutí hybridních pásek v rámci projektu ZETA se se zanedbatelnou lepivostí umožňuje snadné převinutí pásek na cívky (obr. 2) vhodné velikosti pro technologii ovíjení. Jednotlivé vrstvy nemusí být odděleny separační folií, čímž došlo ke zjednodušení při manipulování s materiálem. Následně při ovíjení není nutný odvod separační folie, který se ukázal jako problematický. Dále omezením lepivosti dochází ke snížení axiálního zatížení ovíjecí hlavy jejíž tuhost může být optimalizována, což povede ke snížení hmotnosti.

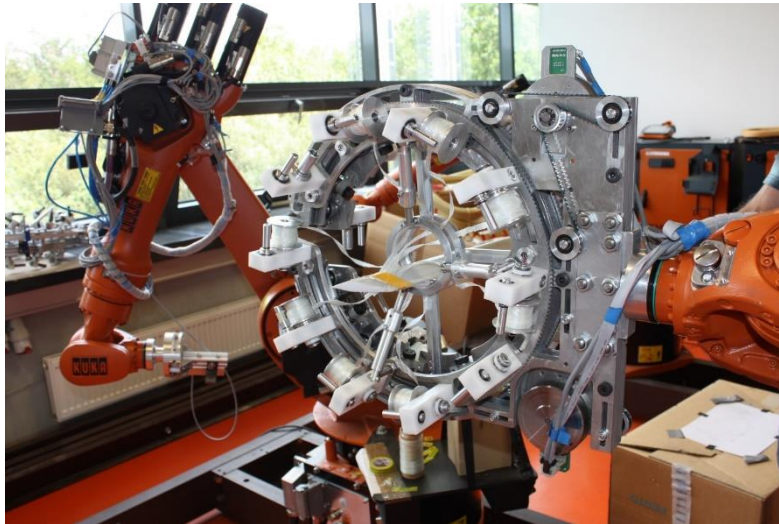


Obr. 2 Ruční převíjení hybridní pásky na cívku pro ovíjecí hlavu.

Pro ovinutí vzorků bylo použito prototypové zařízení pro přesné ovíjení (obr. 3). Zařízení je schopné klást dvě různě směrově orientované vrstvy současně při jednom průchodu jádra. V každé vrstvě může být nanášeno až deset pásek současně. Každá cívka má samostatně nastavitelnou třecí brzdu, která umožňuje optimální nastavení napnutí pásků v průběhu ovíjení. Zařízení využívá ovíjecí hlavu třetí generace a robotické pracoviště umožňujících práci v robo-teamu. Jeden robot nese ovíjecí hlavu a další ovíjené jádro. V případě složitější geometrie ovíjeného rámu mohou být použity pro nesení rámu dva roboty, které si vzájemně rám předávají tak aby byla dodržena kontinuita ovíjecího procesu. Samotné vývojové řešení lze navrhnout z ovíjecího zařízení tvořeného hlavou pro nanášení hybridní pásky, na které jsou uloženy cívky s hybridní páskou v požadovaném počtu cívek. Navíjecí hlava pak plní funkci pravidelného rotačního pokládání hybridní pásky na jádro, které prochází středem hlavy, přičemž jádro nebude rotovat. Zároveň je osa rotace hlavy totožná se střednicí jádra. Dále je ovíjecí zařízení doplněno o úchopné části pro držení jádra, které umožní pohyb jádra při průchodu hlavou definovanou rychlostí. Definovaným poměrem rychlosti rotace hlavy a rychlosti průchodu jádra hlavou mohou být hybridní pásky pokládána s požadovaným množstvím a pod požadovanou úhlovou orientací. Tento princip umožnil vyvinout konstrukční řešení navíjecího systému, které pokládá hybridní pásky pod úhlem  $0^\circ$  (cívka se odvíjí,

# T A Č R

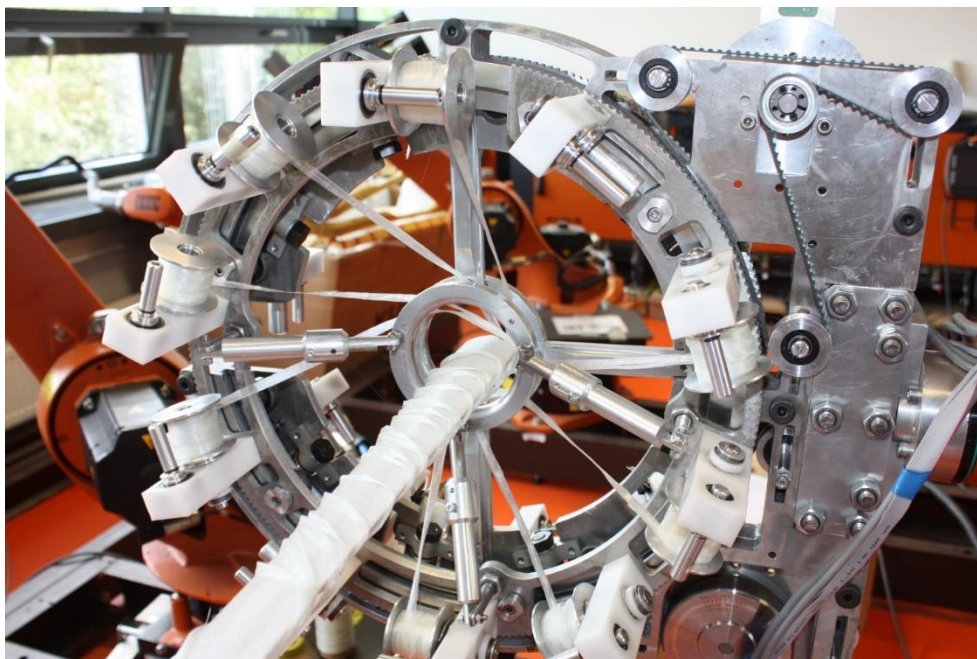
ale hlava nerotuje) nebo pod určitým úhlem např. úhlem  $+30^\circ$  či  $-60^\circ$  (cívka se odvíjí a zároveň hlava rotuje).



Obr. 3 Zařízení pro přesné ovíjení

## VÝROBA KOMPOZITNÍCH RÁMŮ

Po předchozích měřeních, pro snadné navíjení vláken a pro dosažení rovnoměrného pokrytí jádra byl zvolen úhel navíjení hybridní pásky na  $45^\circ$  a  $0^\circ$ . Jako ovíjecí zařízení byl původně navržen otevřený prstenec (pro vstup uzavřeného 3D tvaru) s deseti cívkami pro kladení hybridní pásky na jádro pod zadaným úhlem. Prstenec byl doplněn dalšími šesti cívkami pro vedení hybridní pásky pod úhlem  $0^\circ$ . Na základě prvních experimentů byla navržena nová hlava (původní otevřený prstenec), která se skládá ze dvou oddělitelných částí; rám je osazen celkem třemi sadami cívek po 12 kusech: dvě sady pro ovíjení pod úhlem (jedna sada je součástí oddělitelné části rámu), jedna pro vedení pod úhlem  $0^\circ$ . Pro správné pokrytí celého rámu, a aby nedocházelo ke sklouzávání pásků z rámu byl zvolen optimální úhel  $45^\circ$  (obr. 4). Dále bylo důležité, aby docházelo k co největšímu pokrytí rámu, aby se zajistila co největší tuhost rámu, nezakrytá místa byla identifikována jako slabá místa, kde by mohlo dojít ke zmenšení mechanických vlastností rámu. Při ovíjení bylo nutné aplikovat vyšší předpětí než při použití nesyčených vláken, ale nižší než při ovíjení z prepregů. To poněkud komplikovala ohybová tuhost vyvinutých pásků, která byla vyšší, než u pásků bez matrice. Takto vyrobený rám bude připravený pro testování mechanických vlastností ve všech osách zatížení.



a) Ovinutí počátečních vrstev



b) Kladení pásku pod úhlem 45°



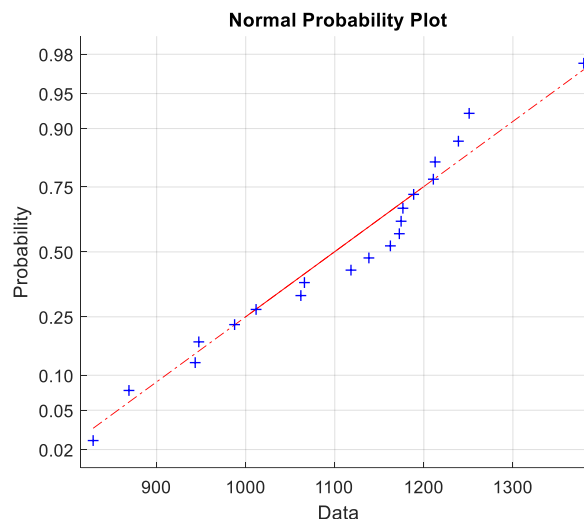
c) Detailní pohled na ovinutý díl

Obr. 4 Ovíjení jádra

## POSOUZENÍ VLASTNOSTÍ OVLIVŇUJÍCÍCH ZPRACOVATELNOSTI HYBRIDNÍCH PÁSEK

Při přesném vinutí jsou důležitými charakteristikami pásek ovlivňujících jejich použitelnost zejména tuhost v ohybu (počáteční moment v ohybu). Pro hodnocení momentu v ohybu byl použit přístroj TH 5. Jeho principem měření síly potřebné k ohybu vzorku o 60° a přepočít přes geometrii vzorku na ohybový moment  $M_o$  [mN cm] podle ČSN 80 0858.

Pro finální hybridní pásky bylo provedeno 25 měření ohybové modulu. Q-Q graf pro ověření normality je na obr. 5



Obr. 5 Q-Q graf pro ověření normality

Je patrné, že lze přijmout předpoklad normality pro analýzu výsledků. Základní statistické charakteristiky ohybového momentu jsou:

Průměr: 1128,7 mN cm

Směrodatná odchylka: 139,99 mN cm

Variační koeficient: 12,4 %

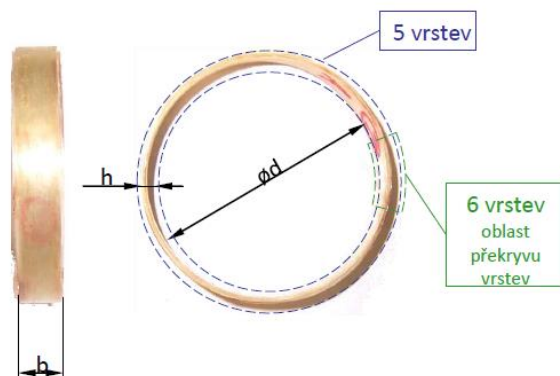
Pološifka 95 % ního intervalu spolehlivosti: 61,97 mN cm

Bylo také testováno chování tzv. „UD lamin“, ve formě kroužku sestaveného z několika vrstev pásky (obr. 6). Pro výrobu kroužků bylo použito hybridní pásky bez popílku (-01) a s obsahem popílku (-02). Bylo provedeno ověření vlivu teploty tvrzení (120, 150, 180°C) na mechanické projevy při stlačování kroužků. Experimenty a analýza výsledků byly provedeny v rámci služby firmou LENAM s.r.o. [10].

Zkušební vzorky mají označení:

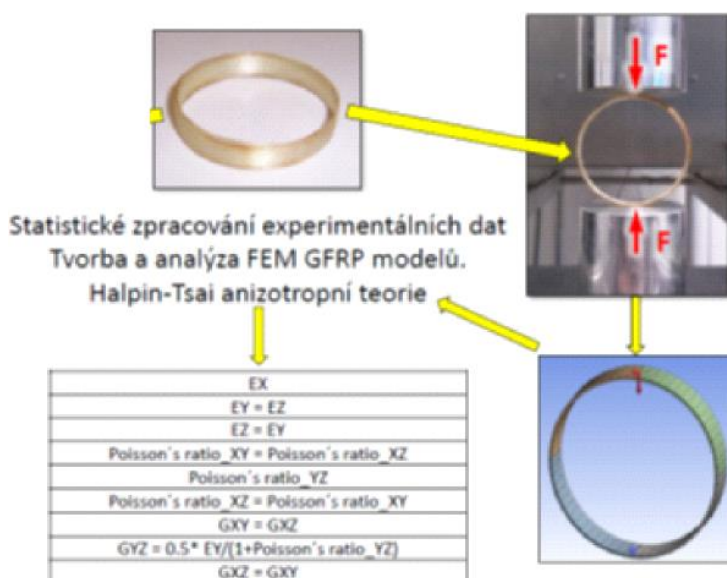
- série 19061-01 - 120, 150, 180 (číslo znamená teplotu ve °C při které byly vzorky vytvrzeny po dobu 60 min),
- série 19061-02 - 120, 150, 180 (číslo znamená teplotu ve °C při které byly vzorky vytvrzeny po dobu 60 min).

V každé skupině byly testovány 2 vzorky a použit průměr (označení ab).



Obr. 6 UD kroužek z hybridní pásky

Schéma měření a vyhodnocení stlačení kroužků z hybridních pásek je na obr. 7.



Obr. 7 Schéma měření a vyhodnocení stlačení kroužků z hybridních pásek

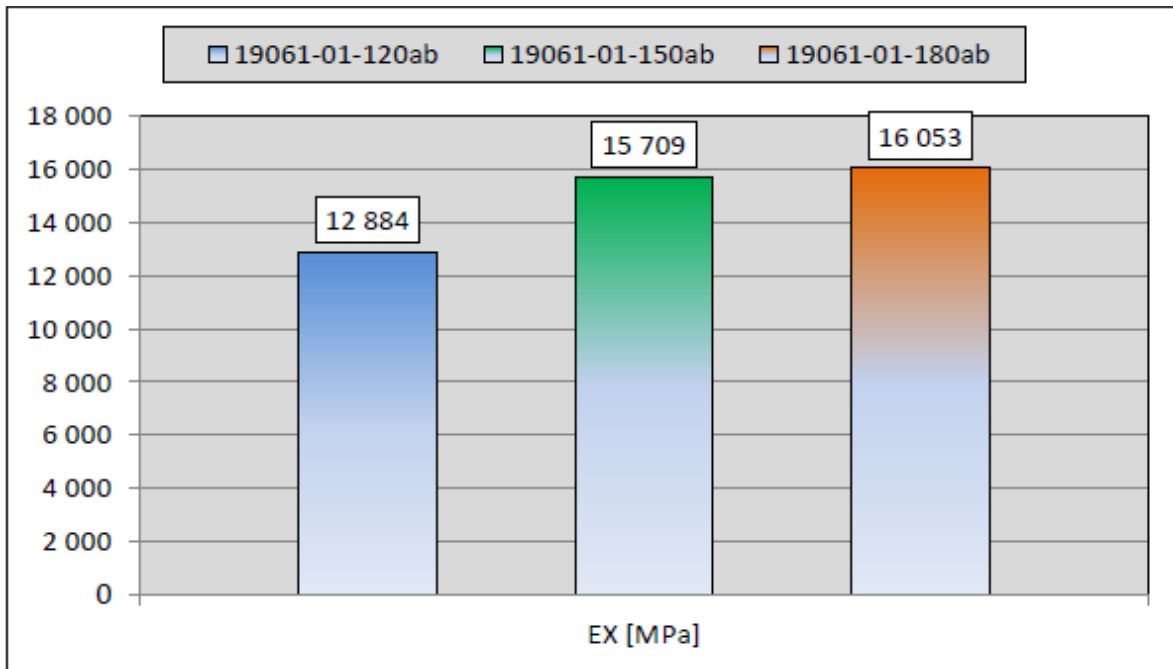
Pro identifikaci elastických konstant kroužků, které lze považovat za příčně izotropní kompozitní strukturu, postačuje k popisu jejich odezvy na vnější zatížení pouze 5 nezávislých elastických konstant.

Tyto elastické konstanty byly identifikovány s využitím Halpin-Tsai anizotropní teorie a firmou LENAM navrženém iteračním algoritmu tak, aby se experimentálně naměřené a statisticky zpracované tuhosti jednotlivých typů vzorků shodovaly s přesností 0,1 % s výsledky numerických simulací na FE modelech sestavených dle rozměrů reálných experimentů. Výsledky jsou uvedeny v tab. 1 a na obr. 8a resp. obr. 8b.

Tabulka 1. Elastické konstanty kroužků v režimu stlačení

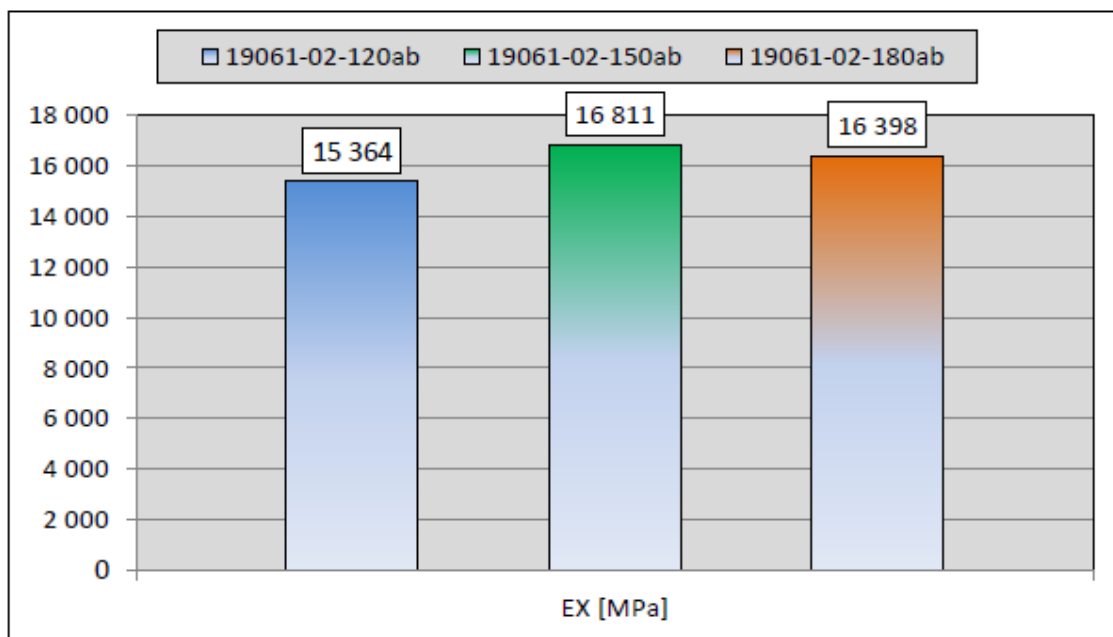
| Model hybridního pásku | 19061-01-120ab | 19061-01-150ab | 19061-01-180ab | Model hybridního pásku | 19061-02-120ab | 19061-02-150ab | 19061-02-180ab |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Fiber volume fraction  | 0.142          | 0.183          | 0.188          | Fiber volume fraction  | 0.178          | 0.199          | 0.193          |
| EX [MPa]               | 12 884         | 15 709         | 16 053         | EX [MPa]               | 15 364         | 16 811         | 16 398         |
| EY [MPa]               | 3 100          | 3 100          | 3 100          | EY [MPa]               | 3 100          | 3 100          | 3 100          |
| EZ [MPa]               | 3 100          | 3 100          | 3 100          | EZ [MPa]               | 3 100          | 3 100          | 3 100          |
| Poisson's ratio_XY     | 0.356          | 0.349          | 0.348          | Poisson's ratio_XY     | 0.350          | 0.346          | 0.347          |
| Poisson's ratio_YZ     | 0.705          | 0.730          | 0.733          | Poisson's ratio_YZ     | 0.728          | 0.739          | 0.736          |
| Poisson's ratio_XZ     | 0.356          | 0.349          | 0.348          | Poisson's ratio_XZ     | 0.350          | 0.346          | 0.347          |
| GXY [MPa]              | 1 123          | 1 123          | 1 123          | GXY [MPa]              | 1 123          | 1 123          | 1 123          |
| GYZ [MPa]              | 909            | 896            | 894            | GYZ [MPa]              | 897            | 891            | 893            |
| GXZ [MPa]              | 1 123          | 1 123          | 1 123          | GXZ [MPa]              | 1 123          | 1 123          | 1 123          |

Je patrné, že přidavek popílku zvyšuje hodnoty tahového modulu. Stejný vliv má také zvyšování teploty vytvrzování.



Obr. 8a Moduly ve směru osy x ze stlačení kroužků z hybridních pásek bez obsahu popílku





Obr. 8b Moduly ve směru osy x ze stlačení kroužků z hybridních pásek s optimálním obsahem popílku

## Závěr

Uvedené informace o testování ohybu a stlačení mohou sloužit pro predikci použitelnosti hybridních pásek také v souvisejících technologiích jako je ovíjení (braiding) resp. pro výrobu tkanin pro kompozita s tkanou výztuží.

## Literatura

- [1] L. Ševčík, P. Tůma, M. Petrů, T. Martinec, R. Kovář, Composite reinforcement, Patent Application no. 2013-1066, 2013
- [2] HARRY, Nicholas Edward. *CLEAN FILAMENT WINDING: PROCESS OPTIMISATION*. United Kingdom, 2012. The University of Birmingham.
- [3] Allen, Abraham K., "A Method for Winding Advanced Composites of Unconventional Shapes using Continuous and Aligned Fibers" (2004). *Brigham Young University*
- [4] Petrů, M., Potěšil, A., Večerník, J., Srb, P., Martinec, T. Zařízení na ukládání vlákně výztuže na jádro vláknové kompozitní konstrukce, UV 30980, 2017
- [5] Petrů, M., Ševčík, L., Kovář, R., Srb, P., Kulhavý, P., Prototyp ovíjecího zařízení ovíjecího zařízení pro kompozitní rámy vyztužené dlouhými vlákny, 2015

[6] Kulhavy, P., Syrovatkova, M., Srb, P., Petru, M., Samkova, A. Irregular winding of pre-preg fibres aimed at the local improvement of flexural properties, *Tekstilec*, Volume 60, Number 4, 2017, s. 310-316, DOI: 10.14502/Tekstilec2017.60.310-316

[7] Kulhavý, P.; Lepšík, P.: Comparison of Modal Characteristic of Carbon Prepreg Tubes Manufactured by Wrapping and Winding, *Journal of Vibroengineering (JVE)*, Vol. 20, Issue 1, 2018.

[8] M. Novotna, P. Kulhavy, Model verification of material properties of wound composite rods in tensile loading, *Journal of Industrial Textiles (JIT)*, 0(00) 1–23, 2018,

[9] A. Gessler, Braided reinforcements for composites, Woodhead Publishing Limited, Germany, 2011.

[10] Potěšil A.: Identifikace elastických konstant hybridních pásků, výzkumná zpráva, LENAM, červen 2019