

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: Mohanapriya Venkataraman , Jiří Militký, Alžbeta Samková

Porovnání pásky z rozprostřených vláknenných kabílků s alternativními řešeními

1. Úvod

Kompozity mají oproti klasickým konstrukčním materiálům mnoho výhod. Hlavní výhodou je jejich nízká hmotnost, odolnost proti korozi a vysoká únavová pevnost. Lze sestavit kompozity z různých materiálů, kde jednotlivé složky dodávají potřebnou mechanickou pevnost, tuhost nebo funkční vlastnosti. Kompozity jsou složeny z matricové fáze a dispergované fáze. Jejich celkové vlastnosti jsou odlišné od vlastností kterékoliv ze složek.

Matricová fáze s kontinuálním charakterem má následující role:

- udržuje vlákna pohromadě a pomáhá přenosu zátěže,
- zlepšuje tuhost a tvarovou stabilitu,
- izoluje výztuž (každé vlákno může v případě delaminace působit nezávisle),
- definuje vlastnosti povrchu,
- chrání výztuž před působením koroze a mechanickým poškozením.

Výztužná fáze v tomto případě tvořená vláknennými kabílků je zodpovědná za:

- definování strukturálního uspořádání,
- geometrii kompozitu,
- odolnost při zatížení kompozitu,
- pevnost, tuhost, přenáší 70 až 90% zatížení,
- tepelnou stabilitu.

Hlavní výhody kompozit ve srovnání s tradičními kovovými materiály:

Nízká měrná hmotnost. Hustota ρ kompozit je ve srovnání s kovy velmi nízká, přičemž počáteční modul výztuže E je blízký kovům. Díky tomu je možné vyrábět kompozity s mechanickými vlastnostmi podobnými kovům (z hlediska pevnosti a tuhosti), ale s velmi nízkou hmotností.

Únava. Kompozity mají vysokou úroveň únavové pevnosti. Tradiční kovy, jako je ocel, vykazují úroveň únavové pevnosti kolem 50% své statické pevnosti, zatímco u kompozit se dosahuje až 90%.

Odolnost proti korozi. Koroze se vyskytuje u tradičních kovů, při reakci s vodou nebo vzduchem. Pro většinu aplikací je pak nutné použít speciální povlaky, které mohou negativně ovlivnit další mechanické vlastnosti. Vnější povrch kompozitu je obecně polymerní a odolnost proti působení koroze je velmi vysoká.

Stabilita tvaru. Protože je objemový koeficient tepelné roztažnosti kompozitního materiálu mnohem nižší než u kovů, dosahují vyšší úrovně rozměrové stability. Kompozitní materiál si dokáže uchovat své tvary, když je vystaven tepelným gradientům, změnám tlaku a vlivům vlhkosti.

Multifunkčnost. Kombinace všech komponentů, které tvoří kompozity, umožňuje přidávání různých plniv schopných modifikovat mechanické, tepelné a jiné vlastnosti relativně jednoduchým způsobem.

Materiály

Skleněná vlákna (SV) se běžně používají jako výztužná fáze v kompozitech, protože jsou nehořlavá, pevná, odolná proti otěru a zároveň cenově výhodná (oproti jiným typům vláken často užívaným v kompozitech, např. uhlíkovým).

Epoxidová pryskyřice (EP) je vynikající reaktoplastickou pryskyřicí. Má dobré mechanické vlastnosti, je nevodivá, chemicky a tepelně odolná a má velmi dobrou přilnavost ve srovnání s běžně používanými polyesterovými pryskyřicemi.

Kompozity (EP / SV) jsou často průmyslově používaným kompozitním materiálem. Mají nízkou měrnou hmotnost, vysokou pevnost, velký modul a dobrou odolnost proti korozi. Jsou používány pro ochranné přilby, neprůstředné bariéry, listy rotorů vrtulníků, kontejnery, části trupů civilních letadel a některé sportovní potřeby.

Tkaniny a pásy na bázi skla mají obecně vysokou pevnost spolu s relativně nízkou hustotou, vysokou tepelnou odolností, dobrou izolační charakteristikou, odolností vůči mikroorganismům a také dobrou chemickou odolností vůči olejům, tukům a organickým rozpouštědlům, kyselinám a zásadám. Tyto vlastnosti lze využít při použití v konečných kompozitních aplikacích [1-7].

2. Použité materiály

Výroba a vývoj vysoce funkčních skleněných vláken vychází z náročných požadavků na použití kompozitních materiálů a inovativního vývoje technologie skleněných vláken. V tab. 1 jsou shrnuty typické vlastnosti skleněných vláken od čínského výrobce.

Tabulka 1. Typické vlastnosti skleněných vláken od Hengshi Co. Čína

Vlastnosti	norma	jednotka	hodnota
Hustota	ASTM D1505	kg m ⁻³	2580
Tepelná roztažnost	ASTM C338	K ⁻¹	5,51 10 ⁻⁶
Teplota měknutí	ASTM C338	°C	921
Počáteční modul	Akustická	GPa	89

Typické vlastnosti skleněných multifilů od slovenského dodavatele jsou shrnuty v tab. 2.

Tabulka 2. Typické vlastnosti skleněného rovingu SL od Johns Manville Co. (Slovensko)

Vlastnosti	jednotka	hodnota
Jemnost	tex	1200
Průměr filamentů	μm	16
Pevnost v tahu	N	450

Vybrané vlastnosti hybridní pásky (kompozitní skleněný roving fúzovaný s polypropylenovými vlákny) Hengshi Co., Čína, jsou shrnuty v tab. 3.

Tabulka 3. Mechanické vlastnosti pásky CHT od výrobce

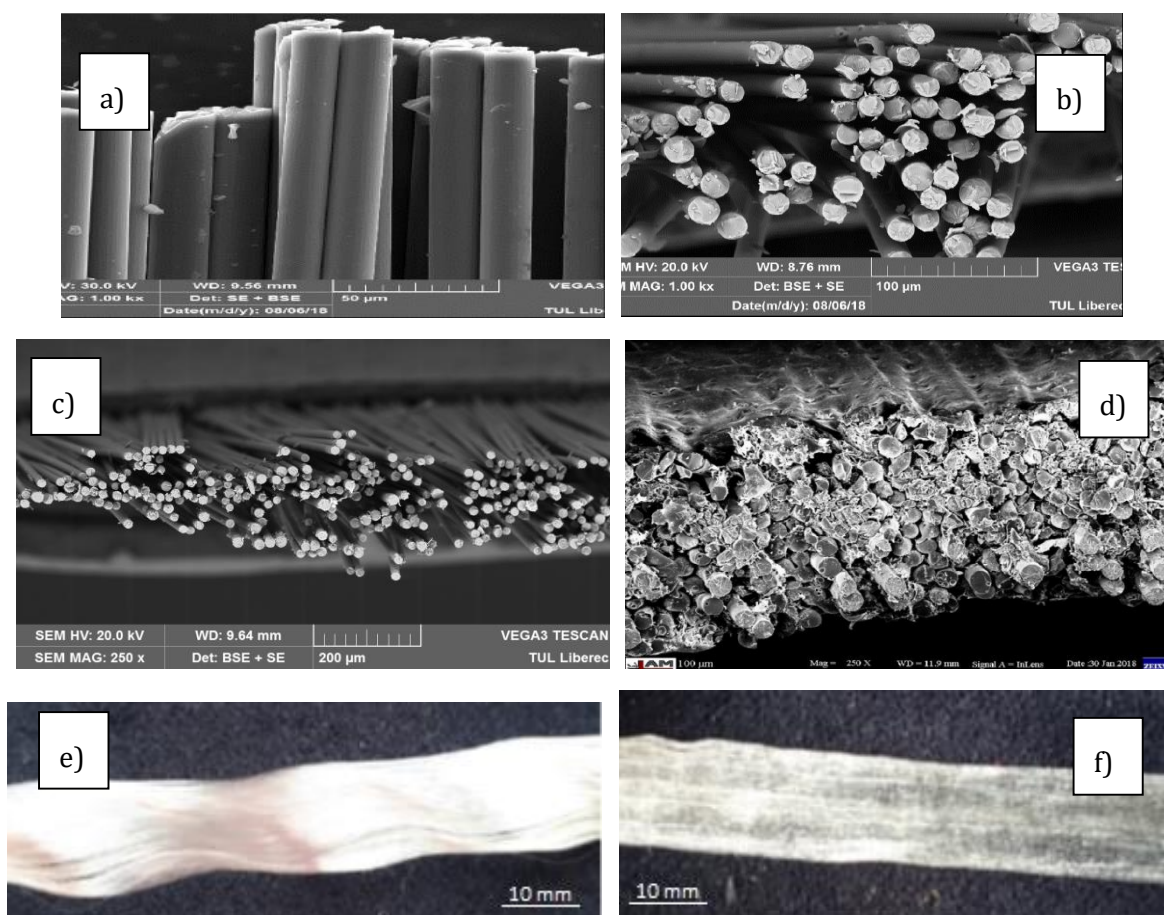
Vlastnosti	jednotka	průměrná hodnota
Obsah skleněných vláken	%	60
Pevnost v tahu	MPa	620
Modul v tahu	GPa	33
Ohybová pevnost	MPa	390
Modul ohybu	GPa	25

Jedním z cílů této práce je srovnání pokročilé formy rovingu (obdélníkového průřezu) ze Slovenska a multifilů z čínských skleněných vláken s aktivními hybridními páskami připravenými technologií řízeného rozprostření na TUL v rámci projektu Zéta a s hybridní páskou (lineární kompozit) připravenou kombinací skleněných rovingů a polypropylenových vláken s následným tepelným pojením. Pro porovnání byly vybrány pásky, které jsou běžně dostupné na trhu a zároveň se nejvíce blíží námi připravené hybridní pásce. Specifikace materiálů je uvedena v tab. 4

Tabulka 4. Specifikace vybraných materiálů

Materiál	Skleněné filamenty	Pryskyřice	Výrobce	Zkratka
Roving	ASTM D1505	ne	Slovensko	SL
Roving	ER-12-988	ne	Čína	CH
Hybridní páska	ASTM C338	CHS-EPOXY 200 V 55	Česká Republika – TUL a Večerník	SLT
Hybridní páska	ER-12-988	Polypropylen	Čína	CHT

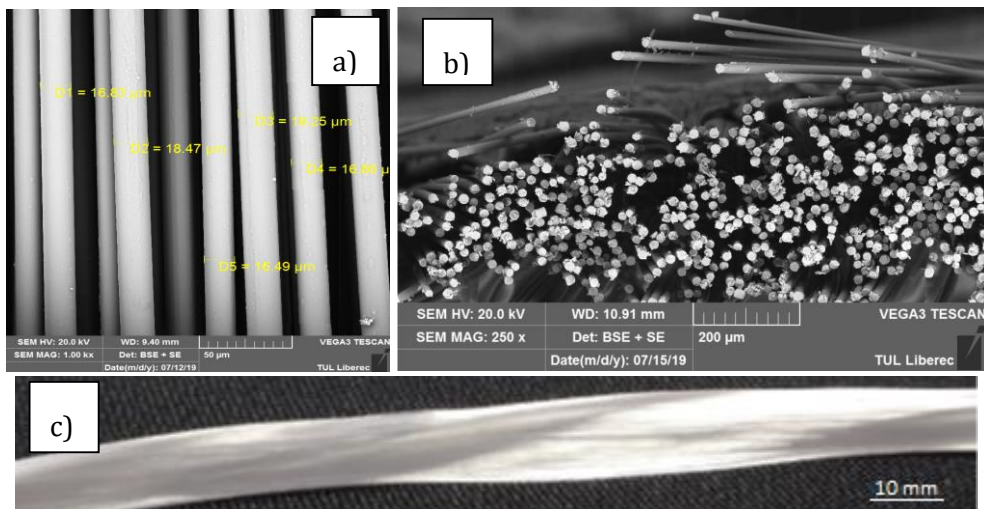
K přípravě hybridních pásek SLT (viz Obr. 1d) byly použity skleněné rovingy StarRow 1200 od slovenského dodavatele (viz obr. 1b). Skleněná vlákna jsou vyrobena z hlinitokřemičitanového E- skla v souladu s ASTM D 578.



Obr. 1 Materiál SL a SLT (a) skleněná vlákna po mechanickém namáhání, (b) a (c) průřez skleněnými vlákny, (d) aktivní hybridní pásek (e) podélný pohled na roving, (f) podélný pohled na aktivní hybridní pásek

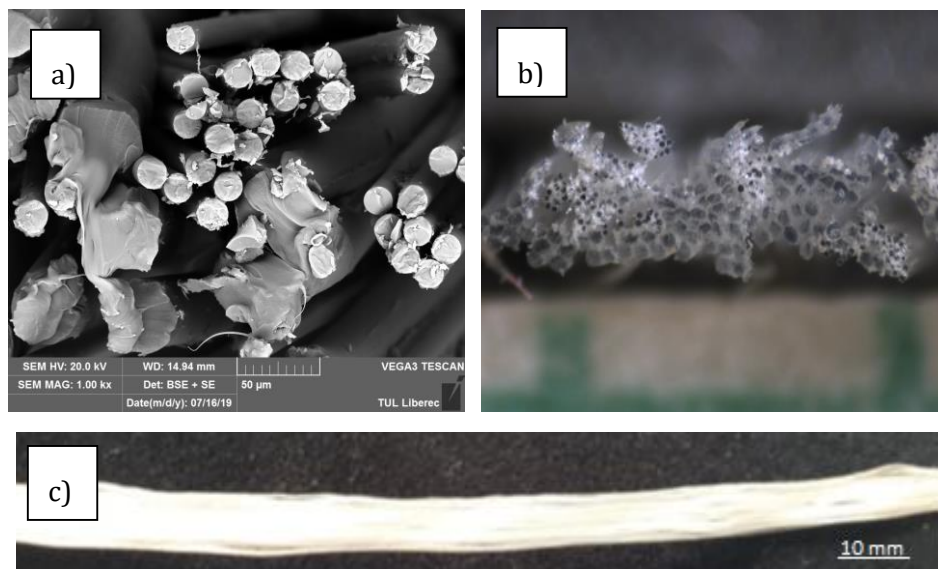
Mechanicky rozprostřené rovingy SLT byly potaženy disperzí epoxidové pryskyřice CHS-EPOXY 200 V 55 s katalyzátorem a předem vytvrzovány při 80 °C po dobu 24 hodin. Z obr. 1 je patrné, že rovingy a aktivní hybridní pásy mají přibližně pravoúhlý průřez a jednotlivá vlákna jsou relativně stejná. Roving je mírně zvlněný, pásy jsou rovné.

Pro srovnávací účely byly vybrány skleněné pásy CH od čínského výrobce (viz obr. 2).



Obr. 2 Materiál CH (a) skleněná vlákna v podélném pohledu, (b) příčný pohled na skleněná vlákna, (c) podélný pohled na roving

Z obr. 2 je patrné, že rovingy mají přibližně obdélníkový průřez a jsou mírně zvlněné. Geometrie hybridní pásky s polypropylenovým termoplastem (materiál CHT) je znázorněna na obr. 3.



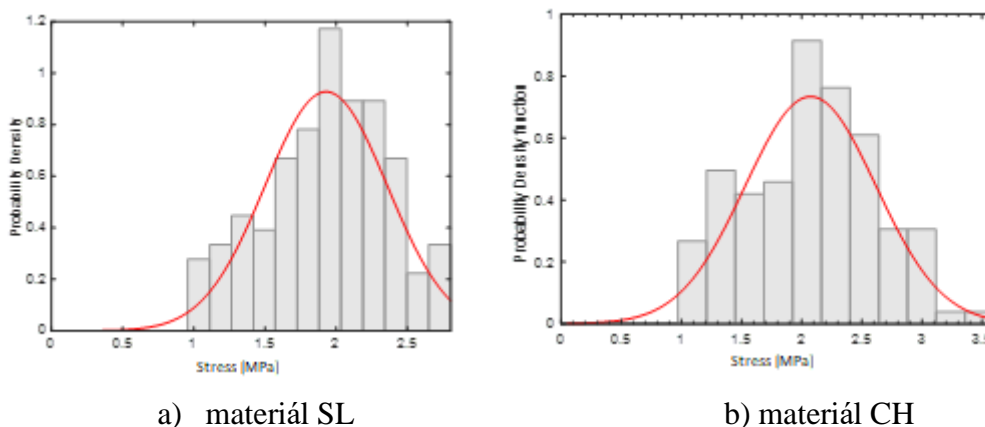
Obr. 3 Materiál CHT (a) příčný řez skleněnými a pp vlákny, (b) průřez pásky, (c) podélný pohled na pásku

Pásky CHT jsou také mírně zvlněné s relativně plochým obdélníkovým průřezem a nemají tak pravidelné uspořádání jako pásky SLT, protože při jejich výrobě se nepoužívá rozprostření kombinované s paralelizací. Jednotlivé filameny v materiálech CH a SL byly získány přímým oddělením z rovingů.

3. Predikce distribuce pevnosti

3.1 Predikce distribuce pevnosti filamentů

Hlavním cílem modelování a statistické analýzy je specifikace distribuce pevnosti a odhad příslušných parametrů na základě experimentálních pevností. Vlákna separovaná ručně od materiálů SL a CH byla testována na tahovém zkušebním stroji za standardních podmínek. Zatížení při přetržení byla měřena při upínací délce 10 mm při rychlosti prodloužení 10 mm/min. Údaje o zatížení byly přepočteny na napětí při přetrhu (pevnost). Pro analýzu a odhad parametrů bylo použito 120 měření. Experimentální rozdělení pevnosti vláken je znázorněno na obr. 4.



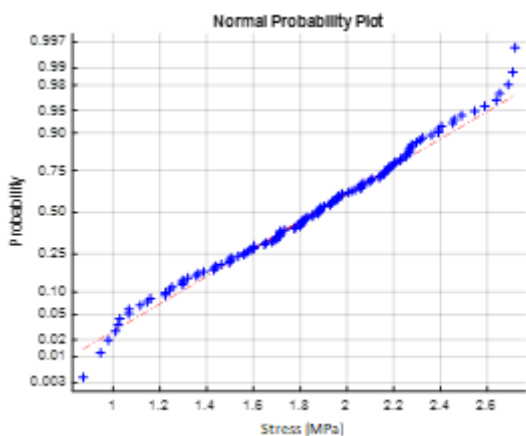
Obr. 4 Experimentální rozdělení pevnosti filamentů (červená křivka je hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení)

Základní statistické charakteristiky pevnosti jednotlivých vláken jsou uvedeny v tab. 5.

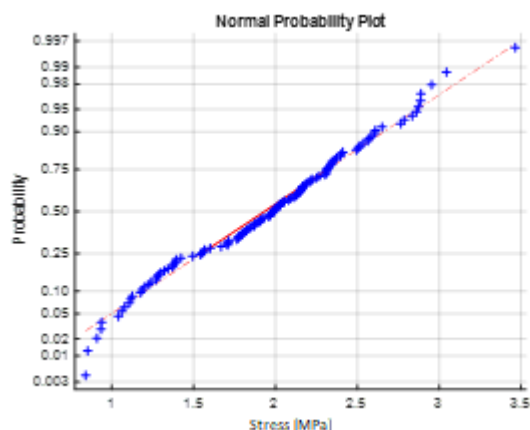
Tabulka 5. Základní statistické vlastnosti pevnosti vláken

<i>Materiál</i>	<i>Střední hodnota [GPa]</i>	<i>Směrodatná odchylka [GPa]</i>	<i>Variační koeficient [%]</i>
Filamenty CH	2,07	0,55	26,32
Filamenty SL	1,93	0,43	22,37

Ve srovnání s vlákny z materiálu SL jsou vlákna z materiálu CH pevnější. Kvantilový graf pro posouzení normality [8] (viz obr. 5) ukazuje mírné systematické rozdíly od předpokladu normality dat, zejména pro vlákna z SL.



a) materiál SL



b) materiál CH

Obr. 5 Q-Q graf pro ověření normality dat (červená čára je ideální tvar pro normální rozdělení)

3.2 Predikce distribuce pevnosti paralelně uspořádaných vlákných svazků

Roviny SL a CH byly testovány na tahovém zkušebním stroji za standardních podmínek. Zatížení při přetrhu byla měřena při upínací délce 200 mm. Údaje o zatížení byly přepočteny na napětí při přetržení (pevnost). Pro analýzu a odhad parametrů bylo použito 120 měření. Základní statistické charakteristiky pevnosti jsou uvedeny v tab. 6.

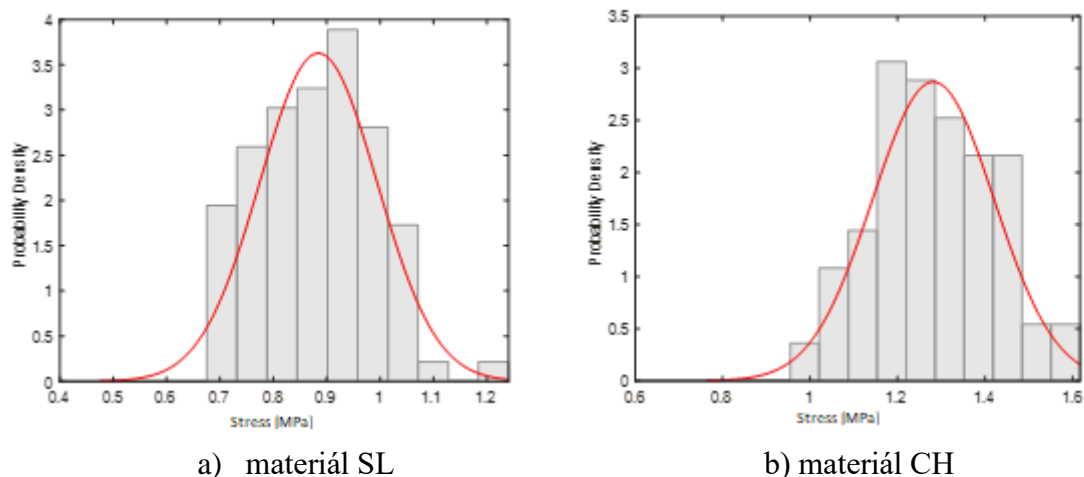
Tabulka 6. Charakteristiky pevnosti a parametry Weibullova rozdělení

Materiál	Střední hodnota [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Prahová hodnota A [GPa]	Weibull tvar C [-]	Weibull měřítko B [GPa]
CH	1,28	0,14	0,89	3,09	0,44
SL	0,88	0,11	0,57	3,10	0,35

Z experimentálních pevností byly metodou Weibullových momentů odhadnuty parametry (A, B, C) Weibullova rozdělení [8]

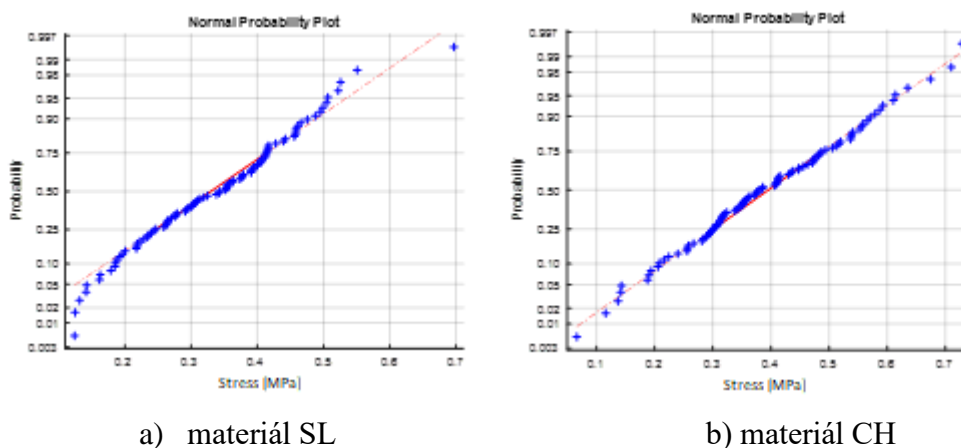
$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma - A}{B}\right)^C\right)$$

Experimentální rozdělení pevnosti rovingů je znázorněno na obr. 6.



Obr. 6 Experimentální rozdělení pevnosti rovingů (červená křivka je hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení)

Ve srovnání s materiálem SL jsou kablíčky z materiálu CH pevnější. Q-Q grafy pro ověření normálního rozdělení (viz obr. 7) zobrazují mírné rozdíly v oblasti konců od předpokladu normality dat. Tyto rozdíly jsou mnohem vyšší pro SL.



Obr. 7 Q-Q graf pro ověření normality dat (červená čára je ideální tvar pro normální rozdělení)

3.3 Predikce distribuce pevnosti hybridních pásek

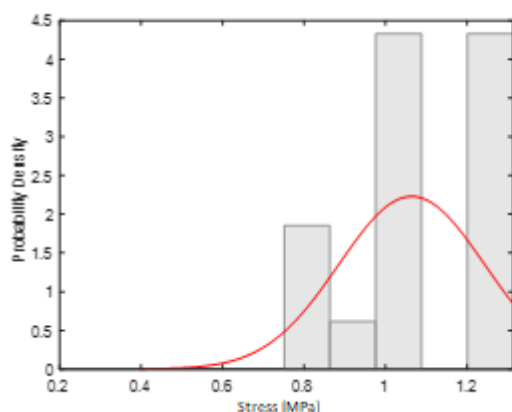
Pásy SLT a CHT byly testovány na tahovém zkušebním stroji za standardních podmínek. Zatížení při přetržení byla měřena při upínací délce 200 mm. Údaje o zatížení byly přepočteny na napětí při přetržení (pevnost). Pro analýzu a predikci parametrů byly provedeno 120 měření pásky typu CHT a 25 měření pásky typu SLT (kvůli omezenému množství materiálu). Základní statistické charakteristiky pásky jsou uvedeny v tab. 7.

Tabulka 7. Charakteristiky pevnosti pásky a parametry Weibullova rozdělení)

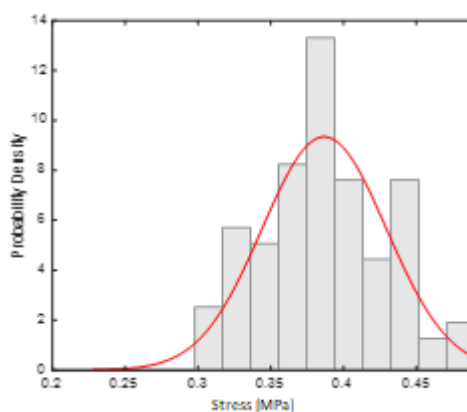
Materiál	Střední hodnota [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Prahová hodnota A [GPa]	Weibull tvar C [-]	Weibull měřítko B [GPa]
CHT	0,39	0,04	0,28	2,84	0,13
SLT	1,06	0,18	0,36	4,49	0,77

Průměrná pevnost SLT je vyšší než průměrná pevnost SL (0,88 GPa), což ukazuje na platnost směšovacích pravidel (pevnost v kompozitu převyšuje pevnost nejsilnější složky).

Pevnost CHT je ve srovnání s pevností SLT velmi malá, a proto je aktivní hybridní páska s epoxidovou pryskyřicí mnohem pevnější než hybridní páska s polypropylenovou složkou. Experimentální rozdělení pevností pásek je znázorněno na obr. 8.



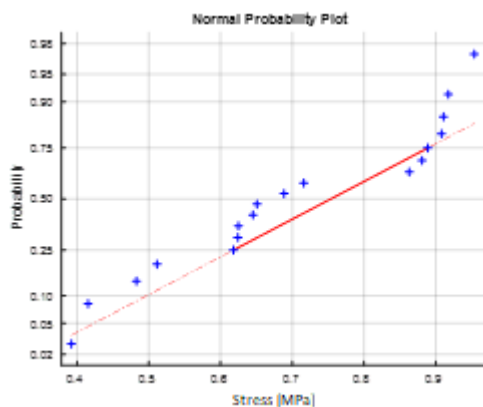
a) materiál SLT



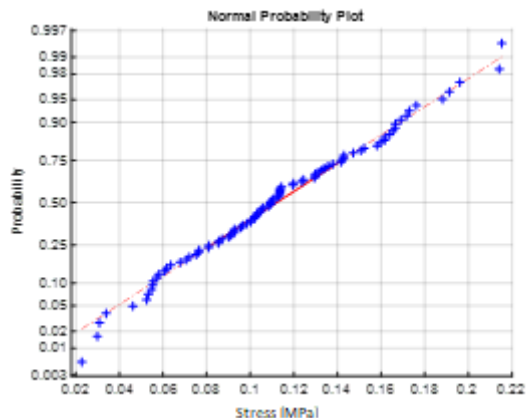
b) materiál CHT

Obr. 8 Experimentální rozdělení pevnosti pásek (červená křivka je hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení)

Vzhledem k malému množství vzorků SLT není po částech konstantní neparametrický odhad funkce hustoty pravděpodobnosti založený na histogramu příliš použitelný. Q-Q graf pro normální rozdělení (viz obr. 9) ukazuje mírné rozdíly v oblasti konců od předpokladu normality a to pro obě pásky. Tyto rozdíly jsou mnohem vyšší u pásky SL díky malému počtu vzorků.



a) materiál SLT



b) materiál CHT

Obr. 9 Q-Q graf pro ověření normality dat (červená čára je červená čára je ideální tvar pro normální rozdělení)

4. Závěr

Ze snímků SEM je patrné, že skleněná vlákna v aktivních hybridních páskách SLT jsou rovnoměrně uspořádána po délce v celé pásce a stejnoměrně obklopena epoxidovou pryskyřicí a zároveň kompatibilita mezifázového rozhraní je dobrá. Distribuci pevnosti vláken lze úspěšně modelovat Weibullovým rozdělením. Rozložení tahové pevnosti rovingů lze také popsat pomocí Weibullova rozdělení. Pro prediktivní účely byly vypočteny charakteristiky pevnosti (průměrná hodnota a směrodatná odchylka) z parametrů (A, B, C) Weibullova rozdělení. Bylo zjištěno, že hybridní páska SLT vyvinutá v rámci projektu ZETA má výborné mechanické vlastnosti v tahu.

Literatura:

- [1] Artemenko S. E.: *Polymer composite materials made from carbon, basalt, and glass fibres. Structure and properties*. Fibre Chem. **No. 3**, 226-229 (2003)
- [2] Artemenko S.E., Kadykova Y. A.: *Polymer composite materials based on carbon, basalt, and glass fibres*, Fibre Chem., **No. 1** 37-39 (2008)
- [3] Singha K.A.: *Short Review on Basalt Fibre*, Int. J. Text. Sci. **4**, 19-28 (2012)
- [4] Cerny M., Glogar P., Golias V., Hruska J., Jakes P., Sucharda Z., Vavrova I.: *Comparison of mechanical properties and structural changes of continuous basalt and glass fibres at elevated temperatures*, Ceramics – Silikáty, **2**, 82-88 (2007)
- [5] Militký J., Kovačič V., Bajzík V.: *Mechanical Properties of Basalt Filaments*, Fiber. Text. East. Eur. **15**, 49-53 (2007)

T A

Č R

- [6] Kovačević S., Ujević D., Brnada S., Šajatović B.: *Structural Multi-layered Composite Textiles Materials*, Textile Science and Economy III. Ed. Pavlović M, Zrenjanin M: University of Novi Sad., Technical faculty, 50-67 (2011)
- [7] Šomođi Ž., Kovačević S., Dimitrovski K.: *Fabric Distortion After Weaving - An Approximate Theoretical Model*. 5th International Textile, Clothing and Design Conference 2010 - Magic World of Textile. Dragčević Z, Hursa Šajatović A, Vujašinović E, Eds.: p. 729-734, Dubrovnik October 2010
- [8] Meloun M., Militký J. : *Statistical Data Analysis*, Woodhead New Delhi 2011