

**ODBORNÁ ZPRÁVA  
O POSTUPU PRACÍ A DOSAŽENÝCH VÝSLEDKÁCH  
ZA ROK 2017**

Číslo projektu: TJ01000292

Název projektu: Pokročilé hybridní pásy pro výrobu kompozit  
přesným vinutím

Předkládá: Ing. Mohanapriya Venkataraman, Ph.D.

Název organizace: Technická univerzita v Liberci

Jméno řešitele: Ing. Mohanapriya Venkataraman, Ph.D.

**Praktické výhody pásek v porovnání s rovingy a kabílky -  
přehled, výsledky a závěry z provedených zkoušek mechanických vlastností pásků a  
porovnání výsledků s vlastnostmi kabílků a rovingu**

**1. Úvod**

Účelem této zprávy je porovnání základních mechanických charakteristik skleněného rovingu a skleněné pásky obsahující tento roving s epoxidovou nevytvrzenou pryskyřicí. Pro porovnání byly také hodnoceny základní mechanické charakteristiky izolovaných skleněných vláken. Byly také ověřeny možnosti využití laserového řezání vzorků (obr. 2d) a mechanického řezání (obr. 2b)). Výsledky jsou podkladem pro zkoumání stability pásek ve skladování pomocí techniky urychleného stárnutí.

**2. Charakteristika materiálu:**

Výchozím materiálem byl E-skleněný roving StarRov 086 1200 firmy Johns Manville jemnosti 1200 tex a jemnost jednotlivých vláken určená výrobcem byla 16  $\mu\text{m}$ . Při použití hustoty 2550  $\text{kg m}^{-3}$  pro sklo je jemnost vláken rovna 5,1 dtex a počet vláken v rovingu je  $N_v = 2353$ .

Byly měřeny základní tahové charakteristiky v tahovém módu tj. pevnost, tažnost a počáteční modul. Jako vzorky byly použity:

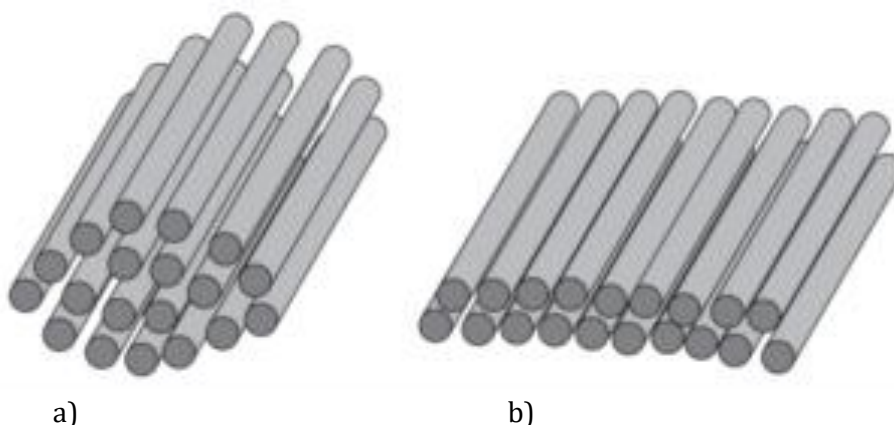
Vzorek V jednotlivá vlákna oddělená z výchozího rovingu

Vzorek 1 – výchozí roving, označení sklo bez úpravy

Vzorek 2 – páska z rovingu impregnovaného epoxidovou pryskyřicí a tužidlem, označení sklo s úpravou

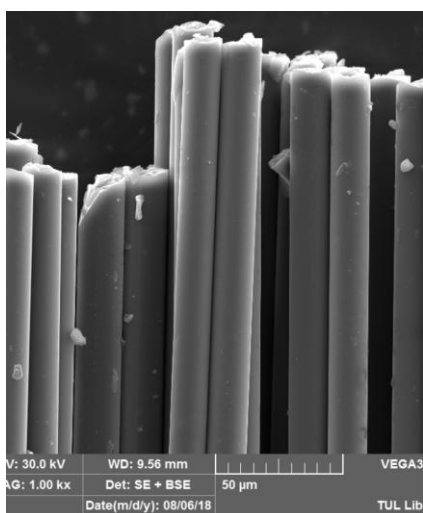
Vzorek 3 – páska, ze které byly epoxidová pryskyřice a tužidlo odstraněny v acetonu, označení sklo očištěné.

Důvodem pro zkoumání rozdílů mezi původním rovingem a páskou, kde byla fáze pryskyřice odstraněna je skutečnost, že páska má kompaktnější paralelní uspořádání a není částečně rozvolněná a navlněná (schematicky viz obr. 1).

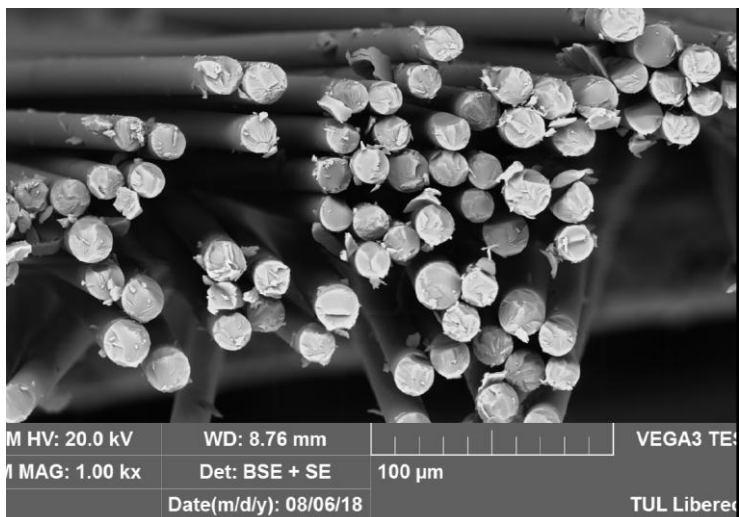


Obr. 1 Schematické uspořádání a) rovingu, b) pásky

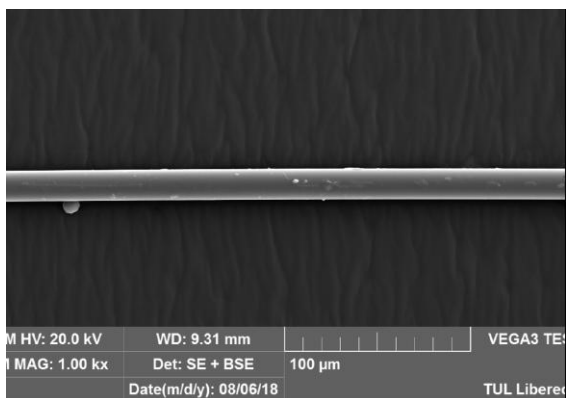
Na našem původním zařízení pro výrobu pásky dochází bezprostředně po jejím vytvoření k on-line impregnaci, takže bylo použito pro porovnání mechanických charakteristik rovingu a pásky bez nánosu následné rozpuštění fáze pryskyřice.



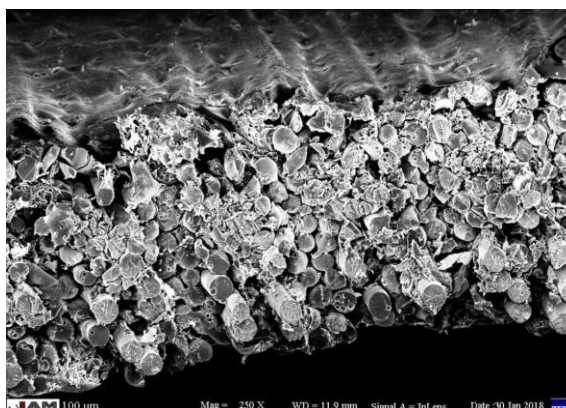
a)



b)



c)



d)

Obr. 2 a) skleněná vlákna v rovingu- podélný pohled, b) skleněná vlákna v rovingu – příčný řez, c) izolované skleněné vlákno, d) páska

### 3. Tahové charakteristiky vláken

Měření bylo provedeno na aparatuře Vibroskop/Vybrodyn při upínací délce 10 mm a rychlosti příčnicku 10 mm/min, tj. rychlosti deformace 1/min. Byly odloučeny vybočující hodnoty způsobené především přetrhem v čelistech, takže pro analýzu bylo použito celkem 39 měření.

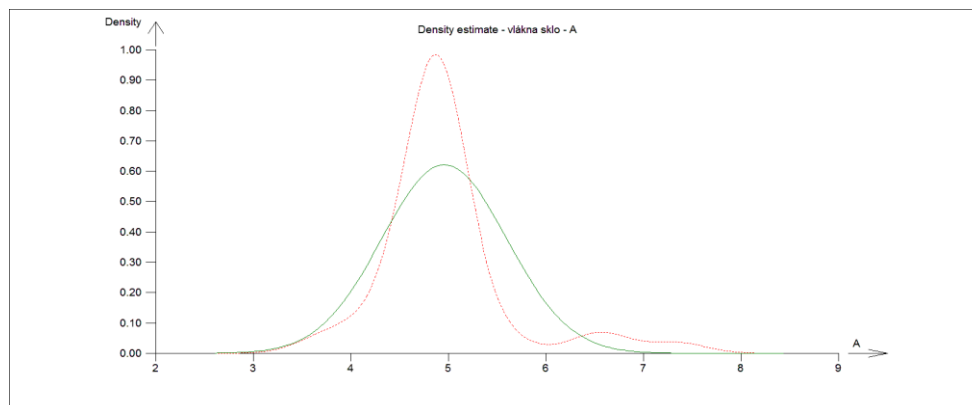
Bylo velice náročné oddělit z rovingu (obr. 2b) jednotlivá vlákna a měřit je, neboť se lámala a měla zvýšenou soudržnost díky povrchové preparaci (obr. 2a,c).

Pro zamezení variability způsobené kolísáním jemnosti jsou uvedeny jen pevnost a modul v cN a nikoliv jako relativní charakteristiky vztažené na tex. Byly zjištěny tyto statistické charakteristiky:

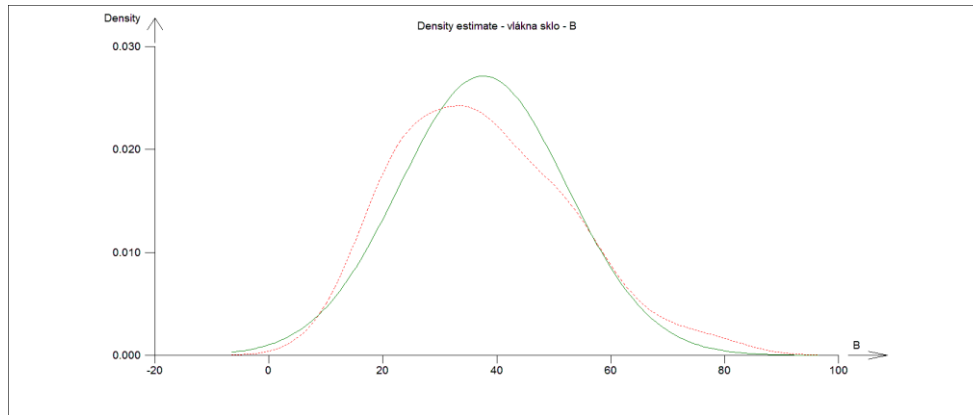
- průměrná jemnost vláken 4,96 (4,75; 5,17) dtex, medián jemnosti vláken 4,88 dtex,
- průměrná pevnost vláken 37,63 (32,86; 42,39) cN, medián pevnosti vláken 35,97 cN,
- průměrná tažnost vláken 5.67 (5,06; 6.28) %, medián tažnosti vláken 5.4 %
- průměrný modul vláken 717.68 (611,59; 823,77) cN, medián modulu vláken 634.35 cN

Hodnoty v závorkách jsou meze 95% ních intervalů spolehlivosti středních hodnot jemnosti, pevnosti a tažnosti. Je patrné, že robustní medián se výrazně projevil pouze u odhadů počátečního modulu. Vzhledem k linearitě křivek zatížení-deformace lze také snadno odhadnout průměrný počáteční modul vláken v tahu jako podíl pevnosti a tažnosti. Po dosazení vyjde průměrný modul roven 653,3 cN, což je výrazně méně než modul jako průměr modulů jednotlivých měření, ale velmi blízké mediánu.

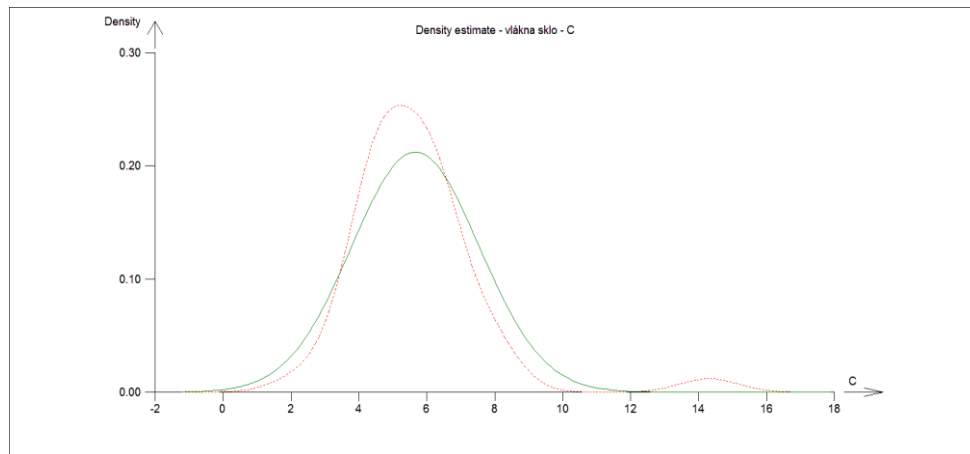
Na základě testů šikmosti a špičatosti lze zamítnout hypotézu o normalitě rozdělení pro jemnost a tažnost vláken. V obou případech jde o rozdělení výrazně sešikmená směrem k vyšším hodnotám. Lepší informace poskytují neparametrické odhady hustoty rozdělení založené na jádrové funkci (parametr vyhlazení je 0.65) získané v software QC expert, které jsou uvedeny na obr. 3, 4, 5, 6 (zeleně je znázorněna hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení počítaná z odhadů aritmetický průměr a výběrový rozptyl).



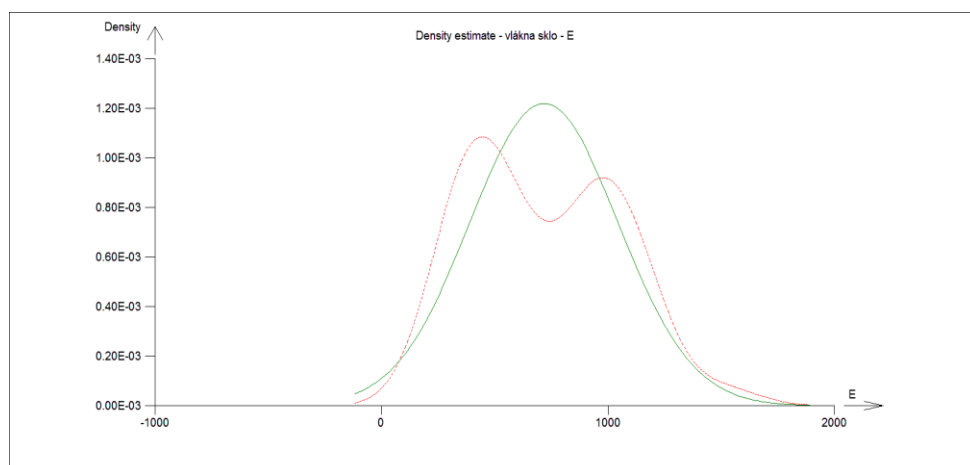
Obr. 3 Jemnost vláken v dtex



Obr. 4 Pevnost vláken v cN



Obr. 5 Tažnost vláken v %



Obr. 6 Modul vláken v N

Je patrné, že jednoduché testy normality neidentifikovaly případ bimodálního rozdělení počátečního modulu. Pro rozdělení pravděpodobnosti pevnosti vyhovuje normální rozdělení, i když lepší výsledky (podle korelace v P-P grafech) poskytuje Weibullovo, lognormální nebo Gama rozdělení (korelační koeficient vyšší než 0,99).

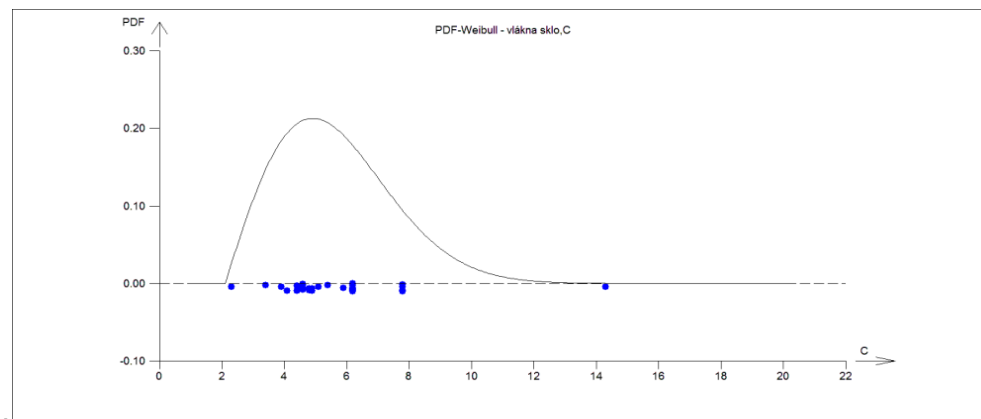
Je známo, že pro křehký lom odpovídající mechanismu porušení nejslabšího článku je kumulativní pravděpodobnost porušení  $F(V, \sigma_f)$  závislá na úrovni napětí  $\sigma_f$  a objemu vlákna  $V$ . Pro tento mechanismus porušení platí, že

$$F(V, \sigma_f) = 1 - \exp(-R(\sigma_f))$$

kde  $R(\sigma_f)$  je tzv. specifická funkce risku, která má pro Weibullovo rozdělení tvar

$$R(\sigma_f) = \left( \frac{\sigma_f - A}{B} \right)^C$$

kde  $A$  je prahová hodnota,  $B$  je parametr měřítka a  $C$  je parametr tvaru. Na obr. 7 je znázorněna hustota pravděpodobnosti aproximujícího Weibullova rozdělení (parametr  $A=10.22$ ,  $B=30.92$  a  $C=1.97$ ) spolu s daty. Výpočet byl proveden v software QC expert.

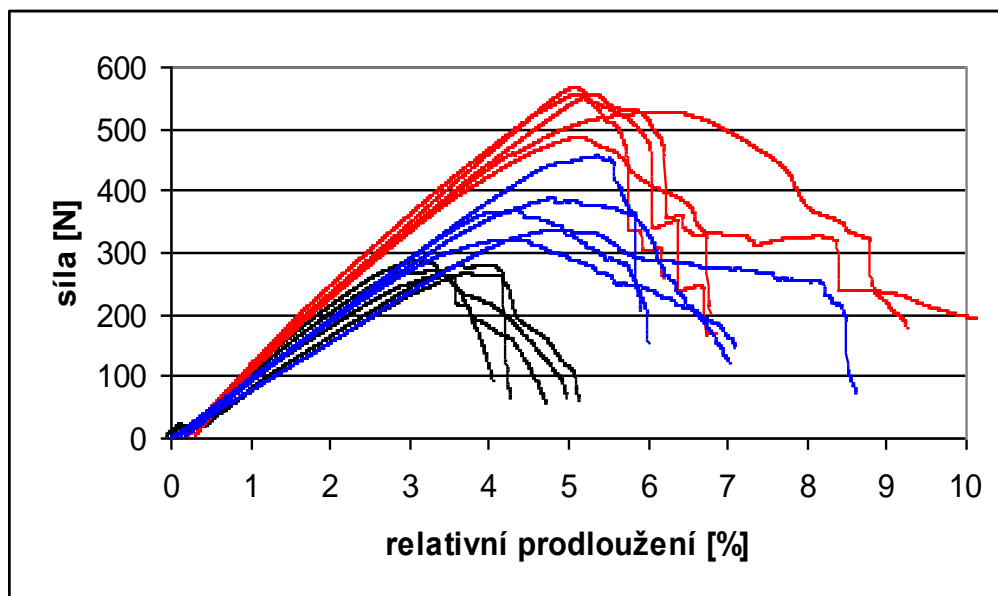


Obr. 7 Aproximující hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro pevnost vláken v N

Parametr tvaru  $C$  blízky ke 2 ukazuje na malou asymetrii.

#### 4. Mechanické charakteristiky rovingu a pásků

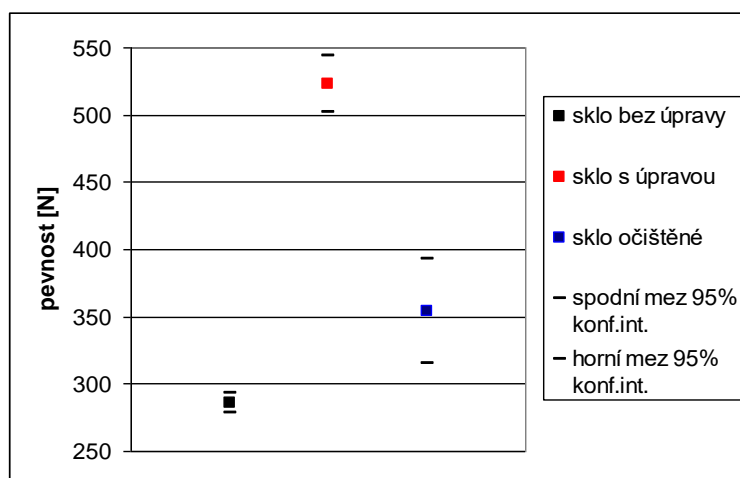
Pro měření na dynamometru Instron byla použita hlava 1000 N s pneumatickými čelistmi a pryží, upínací délka 200 mm. Rychlost příčnicku byla 50 mm/min, tj. rychlost deformace 0,25/min. Tloušťka pásku byla naměřena 0,16 mm (nebyly zohledněny rozdíly s a bez pryskyřice) a šířka pásku vyšla 4 mm. Vybrané tahové křivky jsou na obr. 8.



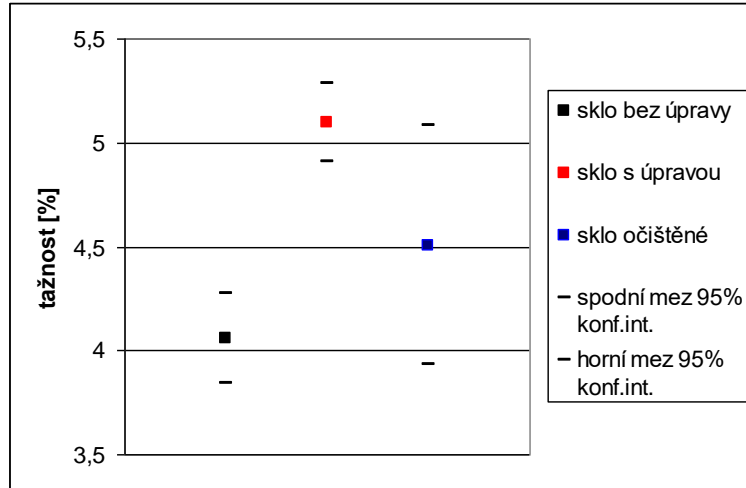
Obr. 8 Vybrané tahové křivky pásků, červená - sklo s úpravou (vzorek 2), modrá - sklo – očištěné (vzorek 3), černá – sklo bez úpravy (vzorek 1)

Je patrné, že zvýšená paralelizace a těsnější uspořádání zvyšují výrazně pevnost pásky oproti rovingu, zejména v přítomnosti složky pryskyřice. Pevnost, tažnost a modul vzorků 1, 2 a 3 jsou spolu s 95 % ními intervaly spolehlivosti uvedeny na obr. 9, 10 a 11.

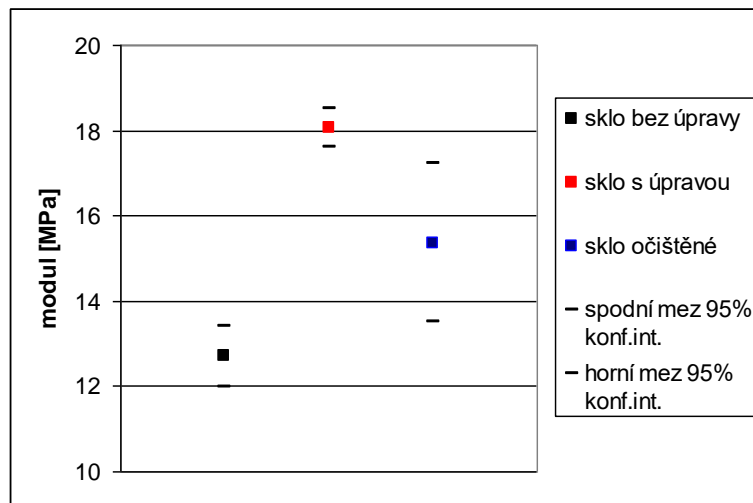
Z těchto obr. je zřejmé, že příprava pásek vede k výraznému zvýšení mechanických charakteristik. Použití pásky s obsahem pryskyřice zajišťuje také lepší zpracovatelnost a omezuje problémy s impregnační uspořádané struktury.



Obr. 9 Pevnost v N



Obr. 10 Tažnost v %



Obr. 11 Počáteční modul v MPa

Modul v MPa je vztažen u všech vzorků na konstantní plochu  $4 \times 0,16 = 0,64 \text{ mm}^2$ . Nejvyšší hodnoty pevnosti (522,75 N), tažnosti a modulu dosahuje páska s epoxidovou pryskyřicí, nejmenší hodnoty původní roving (pevnost 285,59 N). Hodnoty těchto vlastností u pásky bez pryskyřice (pevnost 353,92 N se pohybují mezi hodnotami pásky s pryskyřicí a rovingem. Vysoká variabilita však indikuje nedokonalé odstranění pryskyřice.

Je zajímavé, že z idealizované představy, že pevnost svazku vláken je součinem pevnosti jednoho vlákna a jejich počtu vyjde ideální počet vláken pro roving  $N_v = 285,59 / 0,37 = 772$  vláken a pro pásku bez pryskyřice  $N_v = 353,92 / 0,37 = 957$  vláken. Při zanedbání vlivu pevnosti pryskyřice vyjde pro pásku s pryskyřicí  $N_v = 522,75 / 0,37 = 1413$  vláken. Počtu vláken 2353 určeným z údajů výrobce (jemnost rovingu a průměr jednoho vlákna) pak odpovídá ideální pevnost rovingu  $2353 \cdot 0,37 = 870,61 \text{ N}$ .



T A

Č R

Využití pevnosti vláken v pevnosti rovingu je pak  $V = 100 \cdot 285.59 / 870.61 = 32.8 \%$ , využití pevnosti vláken v pásce bez pryskyřice je  $V = 100 \cdot 353.92 / 870.61 = 40.65 \%$  a využití pevnosti vláken v pásce s pryskyřicí je  $V = 100 \cdot 522.75 / 870.61 = 60.04 \%$ . Po vytvrzení pryskyřice hodnota využití pevnosti vláken v pevnosti pásky zřejmě ještě výrazněji vzroste.

## 5. Závěr

Bylo ověřeno, že při nízkém výkonu laseru (W) nedochází k výraznému „roztékání“ polymerní fáze pásku a dojde k omezení vzniku úlomků vlivem křehkého lomu při mechanickém řezání. Bylo prokázáno, že již jednoduchou úpravou rovingu na pásku dojde ke zlepšení využití pevnosti vláken. Možné problémy, které souvisí se stabilizací dokonaleji uspořádané struktury a zhoršenou penetrací kapalných složek matrice, lze výrazně omezit použitím pásek s pre-stabilizovanou pryskyřicí, která bude mít dostatečnou životnost při skladování. Také zpracovatelnost křehkých materiálů z jemných elementů, kdy se projevuje větší poškození materiálů, selepší použitím pásek obsahujících pryskyřici.