

Lidija Gomboc Szabó¹, Renate Lützkendorf¹, Marina Weiß-Quasdorf¹, Majda Sfiligoj Smole², Zoran Stjepanović²
¹Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V., Abteilungsleiter Textil- und Werkstoff-Forschung, Rudolstadt

²Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Oddelek za tekstilne materiale in oblikovanje

Analiza vpliva hitrosti preizkušanja na obnašanje tehničnih filamentnih prej pri nateznem preizkusu

Influence Analysis of Test Speed on Technical Filament Yarns Behaviour in Tensile Test

Izvirni znanstveni članek/*Original Scientific Paper*

Prispelo/Received 09-2012 • Sprejeto/Accepted 10-2012

Izvleček

V prispevku sta predstavljena dva različna načina nateznega preizkušanja linijskih tekstilij: natezno preizkušanje pri standardnih pogojih preizkušanja s standardnim dinamometrom in natezno preizkušanje pri velikih hitrostih. Raziskovali smo obnašanje treh tipov tehničnih filamentnih prej: dveh poliamidnih (PA 6.6 in PA 4.6) in polietilenteraftalatnega (PET) multifilamenta visokih trdnosti.

Na podlagi rezultatov raziskave sklepamo, da deformacijska hitrost ($\dot{\epsilon}$) pri vseh treh preizkuševalnih prejah vpliva na natezne lastnosti materiala. To pomeni, da se mehanskih lastnosti in nateznega obnašanja prej pri velikih hitrostih obremenitve ne da pojasnjevati zgolj s podatki, dobljenimi pri standardnih pogojih preizkušanja, temveč je treba uvesti ustrezno metodo z višjimi hitrostmi preizkušanja.

Ključne besede: tehnične multifilamentne preje, konvencionalni natezni preizkus, visokohitrostno preizkušanje, standardni dinamometer, servohidravlična natezna naprava

Abstract

Two different ways of tensile testing of liner textiles, namely the tensile testing under standard conditions with a standard dynamometer and high-speed tensile testing are presented in the article. Within this research, we studied the behaviour of three types of high-tenacity multifilament technical filament yarns, i.e. two polyamide yarns (PA 6.6 and PA 4.6) and polyethylene terephthalate (PET).

Based on the results of the research, we can conclude that the strain rate ($\dot{\epsilon}$) in all three tested yarns affected the material tensile properties. This means that the mechanical properties and tensile behaviour of technical yarns cannot be explained only with the data obtained under standard test conditions. For better understanding of the behaviour of technical yarns, it is necessary to introduce an appropriate method with high-speed testing.

Keywords: technical multifilament yarns, conventional tensile test, high speed tensile test, standard tensile testing machine, servo-hydraulic tensile testing machine

Vodilna avtorja/Corresponding authors:

Mag. Lidija Gomboc Szabó

Tel.: +49 (0) 3672 379 311

e-pošta: gomboc@titk.de

Izr. prof. dr. Zoran Stjepanović

Tel.: +386 2 220 7945

e-pošta: zoran.stjepanovic@um.si

Tekstilec, 2012, letn. 55, št. 4, str. 275–285

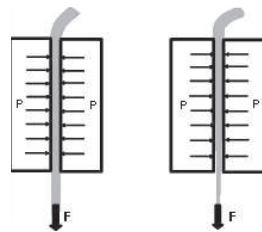
1 Uvod

Tekstilne materiale kot tehnične tekstilije najdemo na vseh področjih vsakdanjega življenja in se od konvencionalnih tekstilij razlikujejo glede na njihove zahteve in zmožnosti. Nekateri tehnični tekstilije so izdelane iz visokozmogljivih vlaken, ki so vlakna s posebnimi uporabnimi lastnostmi. Od drugih vlaken se ločijo predvsem po izjemnih mehanskih lastnostih, najbolj po visoki trdnosti oz. modulu [1, 2, 3]. Tekstilije so izpostavljene dinamičnim obremenitvam ne samo med uporabo, ampak tudi že med samo proizvodnjo, saj za sodobno proizvodnjo prej uporabljamo naprave nove generacije z visokimi deformacijskimi hitrostmi. V nadaljnji izdelavi ploskih tekstilij (tkanin in pletiv) so preje izpostavljene velikim sunkovitim in cikličnim obremenitvam in potem med samo uporabo prihaja do visokih razteznih obremenitev [4]. Še zlasti pri večini tehničnih tekstilij, ki se uporabljajo v avtomobilski industriji, pride pri uporabi do velikih nateznih obremenitev. Natezne lastnosti tekstilnega materiala največkrat pojasnjujemo zgolj s podatki, dobljenimi pri standardnih pogojih preizkušanja z nizkimi deformacijskimi hitrostmi. Za določanje mehanskih lastnosti, podrobneje za pojasnitev nateznega obnašanja (sila/raztezek) prej pri velikih hitrostih obremenitve ustrezne metode preizkušanja ni. Šele podatki, dobljeni pri nateznem preizkusu z velikimi hitrostmi preizkušanja, omogočajo realno oceno obnašanja izdelka oz. materiala pri visokih hitrostih obremenitve.

Kot rezultat nateznega preizkušanja poleg natezne trdnosti in raztezka največkrat podajamo tudi krivuljo sila-raztezek, ki grafično ponazarja odvisnost med natezno silo in raztezkom. Diagram sila-raztezek omogoča izračun deformacijskega dela [3, 5, 6], kakor tudi kontrolo nateznega preizkusa [3, 7, 8], saj je iz oblike krivulje razviden nastanek nepravilnosti med nateznim preizkusom, kot je zdrs preizkušanca iz prižem in podobno.

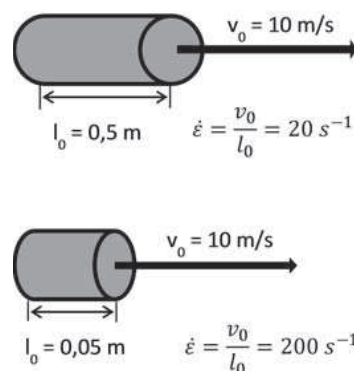
Na rezultate preizkušanja vplivajo poleg lastnosti materiala tudi pogoji merjenja, na primer klimatski pogoji, vrsta merilne naprave in izvedba nateznega preizkusa. Pomembno je omeniti vpliv napak, ki nastane zaradi raztezanja preizkušanca v območju prižem (slika 1) [6, 9, 10, 11], posledica pa je nekorektno zajemanje deformacijskih vrednosti. Ta napaka se poveča z zmanjšanjem vpenjalne dolžine, zato pri manjših vpenjalnih dolžinah omenjene napake ni

več mogoče zanemariti. Tudi s povečanjem tlaka prižem tega raztezanja ni mogoče odpraviti.



Slika 1: Nadaljevanje raztezanja preizkušanca v območju prižem [10]

Zaradi variiranja vpenjalne dolžine in preizkuševalne hitrosti je priporočljivo, da pri dinamičnih obremenitvah vpeljemo dodatni veličini, ki ju imenujemo stopnja raztezanja in hitrost raztezanja ($\dot{\epsilon}$), ki podrobneje določata časovno odvisno deformacijo [12, 16]. Na sliki 2 je shematično prikazana stopnja raztezanja, ki je opredeljena kot razmerje med hitrostjo in vpenjalno dolžino ($1/s$ ali s^{-1}), medtem ko se hitrost raztezanja podaja kot raztezek v odstotkih na časovno enoto ($\%/s$) [12, 13, 14, 15, 16].



Slika 2: Določitev stopnje raztezanja [16]

Cilj raziskave sta bili študija in analiza rezultatov nateznega obnašanja tehničnih prej pri visokih hitrostih preizkušanja, ki omogočajo boljše razumevanje obnašanja prej med postopki izdelave tkanin in pletiv, ter sunkovitimi obremenitvami pri uporabi. Iz literaturnih virov [17–32] vemo, da deformacijska hitrost v večini preizkušanih vzorcev vpliva na natezne lastnosti. V večini primerov se s povečanjem deformacijske hitrosti poveča natezna trdnost ob sočasnem zmanjšanju raztezka.

Čeprav pomen nateznega preizkušanja z visokimi hitrostmi preizkušanja dobiva čedalje večji pomen, pa postopek preizkušanja še ni standardiziran. Za visokohitrostno natezno preizkušanje se uporabljajo različne merilne naprave, ki so bile konstruirane

za preizkušanje mehanskih lastnosti kovin in plastičnih materialov. Ker se principi merjenja in načini izvedbe preizkušanja pri posameznih metodah zelo razlikujejo, dobljenih rezultatov med seboj ni mogoče neposredno primerjati. Pri visokohitrostnem nateznem preizkušanju je problem tudi, da nekatere merilne naprave ne morejo časovno zajemati spremembe sile z raztežkom, saj se preizkus izvede v nekaj milisekundah. Zato se največkrat kot rezultat meritev podajata le pretržna sila in pretržni raztezek [13, 17]. Malo teh merilnih naprav je brez velikih prilagoditev primernih za preizkušanje tekstilij. V sodobni literaturi so za visokohitrostno natezno preizkušanje tekstilnega materiala največkrat navedene naslednje merilne naprave:

- merilna naprava, ki deluje na principu prostega pada,
- merilna naprava, ki deluje na principu rotacije,
- Split-Hopkinson-Tensile-Bar, ki deluje na principu stisnjene zraka,
- merilna naprava Uster Tensojet švicarskega podjetja Uster,
- visokohitrostna natezna naprava, ki deluje na principu servohidravlike.

2 Eksperimentalni del

2.1 Materiali

V raziskavi smo določili mehanske lastnosti tehničnih prej poliamidnega (PA 6.6 in PA 4.6) in polietilentereftalatnega (PET) multifilamenta visokih trdnosti [33]. PA 6.6 multifilament s finostjo 92,4 tex je sestavljen iz 140 monofilamentov, PA 4.6 multifilament s finostjo 94,8 tex iz 140 monofilamentov in PET-multifilament s finostjo 55,6 tex iz 105 monofilamentov.

2.2 Uporabljene metode

Za preizkušanje nateznih lastnosti smo uporabili dve različni natezni napravi. Za natezno preizkušanje pri nizkih hitrostih obremenitve smo uporabili standardni univerzalni dinamometer podjetja Zwick (Zwick Z010), za natezno preizkušanje pri velikih hitrostih obremenitve pa univerzalno servohidravlično natezno napravo podjetja Zwick (Zwick HTM 2008), ki smo jo prej prilagodili za preizkušanje preje. Obe merilni napravi imata avtomatiziran sistem za zajemanje podatkov. Merilni napravi sta prek ustrezne krmilne enote povezani z osebnim računalnikom, s katerim smo izvedli krmiljenje stroja in zajemanje podatkov

Preglednica 1: Stopnje raztezanja, pri katerih so bili natezni preizkusi izvedeni na klasičnem dinamometru Zwick Z 010

Stopnja raztezanja pri različnih vpenjalnih dolžinah (l) in hitrostih preizkušanja (v); [s^{-1}]					
l [m]	v [m/s]				
	0,00083	0,00417	0,00833	0,01667	0,03000
0,025	0,03320	0,16680	0,33320	0,66680	1,20000
0,050	0,01660	0,08340	0,16660	0,33340	0,60000
0,500	0,00166	0,00834	0,01666	0,03334	0,06000

Preglednica 2: Stopnje raztezanja, pri katerih so bili natezni preizkusi izvedeni na servohidravlični natezni napravi Zwick HTM 2008

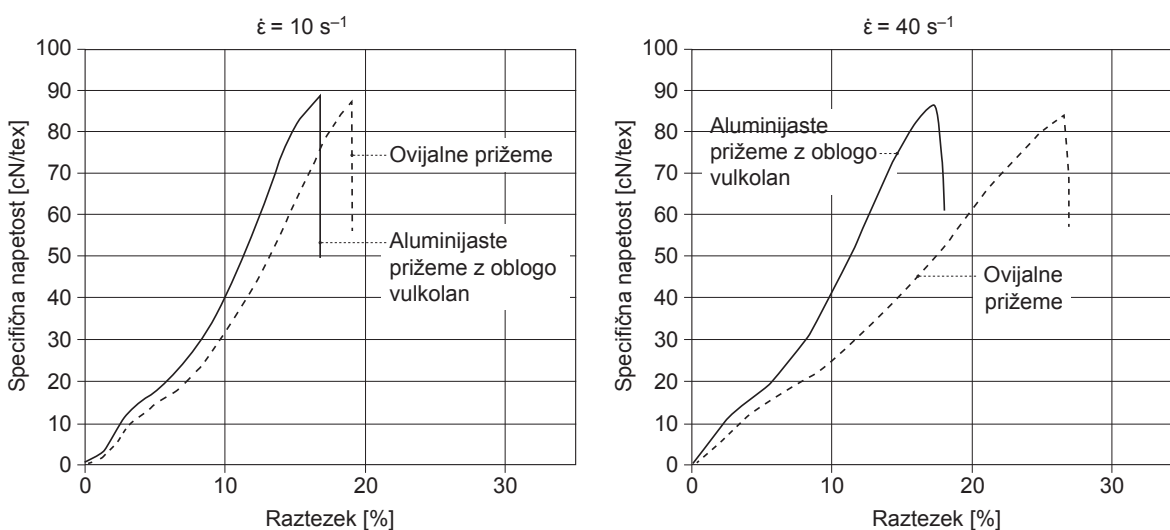
Stopnja raztezanja pri različnih vpenjalnih dolžinah (l) in hitrostih preizkušanja (v); [s^{-1}]									
l [m]	v [m/s]								
	0,5	0,8	1,0	1,2	2,0	2,5	5,0	8,0	10,0
0,020	25,0	40,0	50,0	60,0	100,0	125,0	250,0	400,0	500,0
0,030	16,7	26,7	33,3	40,0	66,7	83,3	166,7	267,0	333,3
0,050	10,0	16,0	20,0	24,0	40,0	50,0	100,0	160,0	200,0
0,125	4,0	6,4	8,0	9,6	16,0	20,0	40,0	64,0	80,0
0,250	2,0	3,2	4,0	4,8	8,0	10,0	20,0	32,0	40,0
0,500	1,0	1,6	2,0	2,4	4,0	5,0	10,0	16,0	20,0

merjenih veličin med izvajanjem preizkusa. Obe napravi omogočata opazovanje odvisnosti med obremenilno silo in deformacijo tako numerično kakor tudi grafično. Vsi preizkusi so potekali v klimatiziranem prostoru, pri standardnih klimatskih pogojih (temperatura $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ in relativna zračna vlažnost $65\% \pm 5\%$ – skladno s standardom DIN EN 139 [34]). Najprej smo izvedli natezni preizkus po standardu DIN EN ISO 2062 pri vpenjalni dolžini 0,5 m in z enakomerno hitrostjo preizkušanja $0,00833\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($500\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). Nato smo vpenjalno dolžino preizkušanca in hitrost preizkušanja spreminjali. Vpenjalno dolžino in hitrost preizkušanja smo variirali pri nižjih in tudi pri visokih hitrostih nateznega preizkušanja. S takšnim modelom preizkušanja smo zajeli območje stopnje raztezanja, in sicer pri nižjih hitrostih preizkušanja smo preizkušali območje med $0,00167\text{ s}^{-1}$ in $1,2\text{ s}^{-1}$, kar je predstavljeno v preglednici 1, ter pri visokih hitrostih preizkušanja območje med 1 s^{-1} in 500 s^{-1} – predstavljeno v preglednici 2. Raziskovali smo tudi vpliv prižem na rezultat preizkušanja z namenom, da izberemo ustrezne prižeme za zanesljivo in trdno vpetje preizkušancev, tako za standardni dinamometer kakor tudi za servohidravlično natezno napravo. Pri standardnem dinamometru smo uporabili pnevmatične aluminijaste prižeme, ki so se za preizkušanje tehničnih prej visoke trdnosti izkazale kot najprimernejše. Ker masa vpenjalnih prižem pri servohidravlični natezni napravi bistveno vpliva na preizkušanje, ni bilo mogoče in smiselno izvesti preizkušanja s pnevmatičnimi ali hidravličnimi prižemami. Zato smo pri preizkušanju prej s servohidravlično natezno napravo (HTM

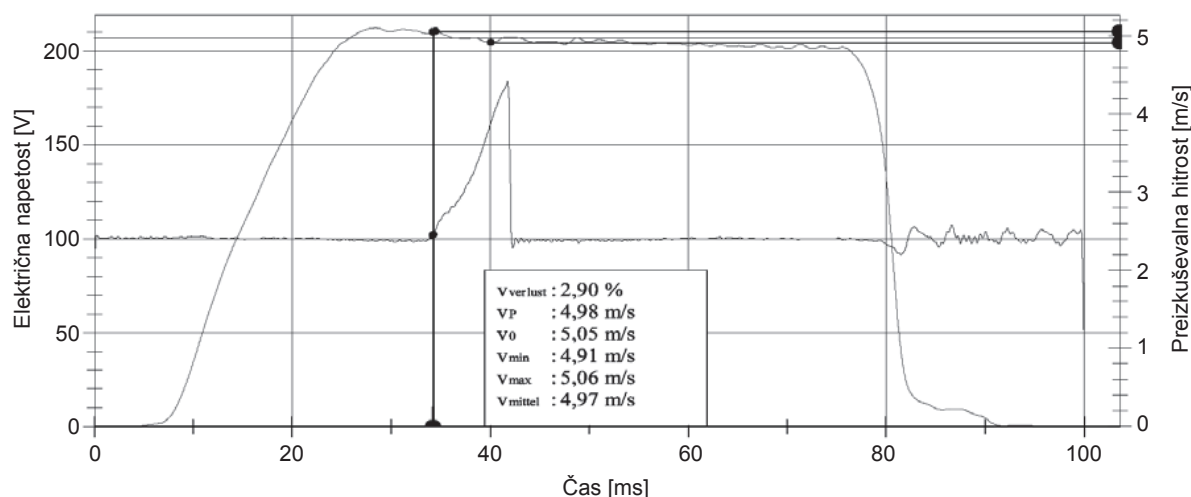
2008) uporabili aluminijaste prižeme, kjer smo preizkušali različne vstavke. Za te aluminijaste prižeme je značilno, da se pritisk, ki je potreben za vpetje preizkušancev, izvede z obeh strani s pomočjo nateznih vijakov. Za zanesljivo vpetje preizkušanca smo uporabili momentni ključ, ki hkrati zagotovi tudi konstanten tlak prižem pri vseh meritvah. Preizkušali smo naslednje vrste vstavkov oz. prižem:

- aluminijaste vstavke z nazobčano površino,
- ovijalne prižeme,
- aluminijaste vstavke z oblogo vulkolan.

Aluminijasti vstavki z nazobčano površino, ki so primerni za preizkušanje plastičnih in kovinskih materialov, so se izkazali za neprimerne, saj nazobčana površina med izvedbo preizkusa precej poškoduje preizkuševalni tekstilni material, posledica tega pa so nizke vrednosti natezne trdnosti. Nato smo preizkušali ovijalne prižeme, pri katerih je nastal problem netočne vpenjalne dolžine, posledica pa je netočno zajemanje raztezka, saj se raztezek nemoteno širi tudi v območje prižem, kar je lepo razvidno iz diagramov na sliki 3. Kot najustreznejši vstavki so se izkazali aluminijasti vstavki z oblogo vulkolan (slika 3), pri katerih ima obloga vulkolan nalogo, da varuje preizkuševalni material, v našem primeru multifilament, pred morebitnimi poškodbami na robovih prižem. Slika 3 prikazuje primerjavo krivulj preizkuševalnega materiala PA 6.6, dobljenih z ovijalnimi prižemami in aluminijastimi prižemami z oblogo vulkolan, pri dveh različnih stopnjah raztezanja, z dvema različnima vpenjalnima dolžinama preizkušanca. Vpenjalna dolžina preizkušanca pri stopnji raztezanja 10 s^{-1} je



Slika 3: Vpliv vrste vpenjalnih prižem na rezultate preizkušanja



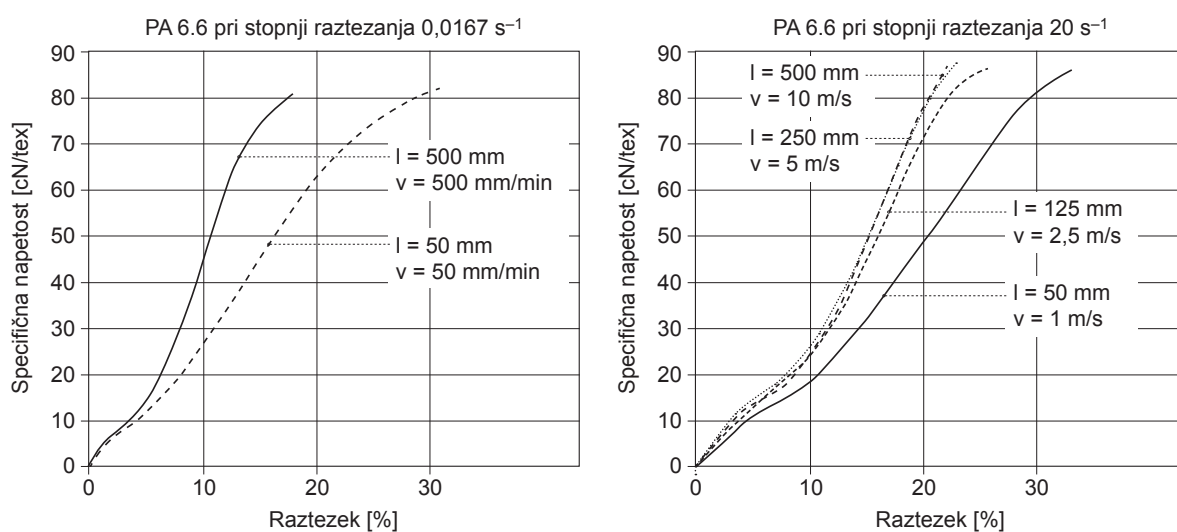
Slika 4: Grafični prikaz preizkuševalne hitrosti skozi celoten natezni preizkus v diagramu sila/preizkuševalna hitrost

bila 0,5 m, medtem ko je bila pri stopnji raztezanja 40 s^{-1} vpenjalna dolžina preizkušanca 0,125 m. Poleg tega, da grafa potrjujeta ustreznost aluminijastih vstavkov z oblogami vulkolan, je iz grafov razvidno, da z zmanjšanjem vpenjalne dolžine pride vpliv neustreznosti vpenjalnih prižem bolj do izraza. Servohidravlična preizkuševalna naprava Zwick HTM 2008 omogoča zagotovitev konstantne preizkuševalne hitrosti z manjšimi odstopanji skozi ves potek preizkušanja, kar je razvidno tudi iz grafičnega prikaza v diagramu sila/preizkuševalna hitrost na sliki 4. Pri visokohitrostnem preizkušanju pa zaradi velikih preizkuševalnih hitrosti v preizkušancu nastane deformacijski impulz [4, 9, 14–18], ki se z večanjem preizkuševalne hitrosti večja in vsekakor tudi bolj ali manj

vpliva na grafični zapis dobljenih podatkov. Tako lahko v zapisu krivulj sila-raztezek zasledimo nihanje signala, zaradi česar smo krivulje, preden smo jih uporabili za končno primerjavo, zgladili s pomočjo programa Origin 8.5. Pri tem je bilo treba nameniti pozornost obliki obeh krivulj, saj med seboj nista smeli preveč odstopati. V nasprotnem primeru bi lahko izgubili pomembne informacije glede vpliva preizkuševalne hitrosti na natezno obnašanje materiala.

3 Rezultati in razprava

Rezultati raziskave, ki so prikazani na sliki 5, so potrdili teorijo o vplivu vpenjalne dolžine preizkušanca

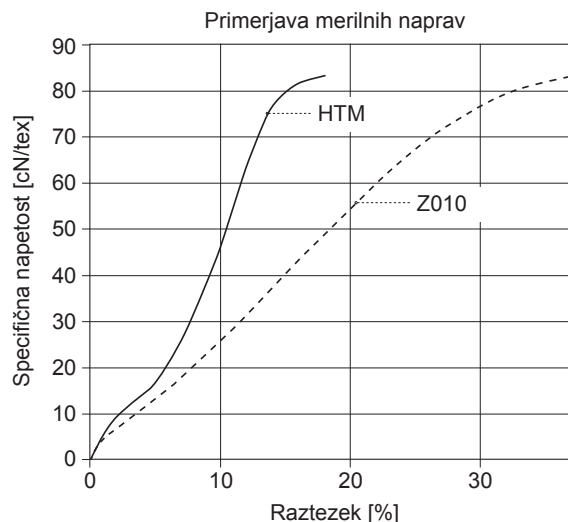


Slika 5: Vpliv vpenjalne dolžine preizkušanca na natezno trdnost in raztezek

na natezno napetost preizkušanca [1, 3, 25, 35, 37–39], t. i. *weakest link-theory*. Iz rezultatov je razvidno, da se natezna napetost z večanjem vpenjalne dolžine zmanjšuje, medtem ko vpliva na raztezek ne moremo pojasniti, ker je nastala merilna napaka, ki se z vsakim zmanjšanjem vpenjalne dolžine poveča. Vzrok napak je v največji meri raztezanje preizkušanca v območju prižem. Iz primerjave rezultatov nateznega preizkusa z nizkimi preizkuševalnimi hitrostmi in rezultati z visokimi hitrostmi preizkušanja je razvidno, da vpliv napak na raztezek pri večjih preizkuševalnih hitrostih ne pride več tako do izraza kot pri manjših preizkuševalnih hitrostih. Razliko lahko pojasnimo z viskoelastičnostjo oz. manjšo možnostjo raztezanja tekstilije pri večjih preizkuševalnih hitrostih v primerjavi s postopkom raztezanja pri manjših preizkuševalnih hitrostih, saj je čas, pri katerem se izvede visokohitrostno preizkušanje, bistveno krajši, kar je razvidno iz preglednice 3. Pri preostalih dveh preizkuševalnih materialih, PA 4.6 in PET, so ugotovitve enake.

Podrobneje smo proučili tudi vpliv vrste merilne naprave na rezultate preizkušanja, primerjali smo rezultate, dobljene s standardnim dinamometrom Z 010 pri stopnji raztezanja $1,2 \text{ s}^{-1}$ z rezultati, dobljenimi s servohidravlično preizkuševalno napravo HTM 2008 pri stopnji raztezanja 1 s^{-1} , ki pomeni najmanjšo mogočo realizirano stopnjo raztezanja s servohidravlično preizkuševalno napravo. Ta primerjava za preizkuševalni material PA 6.6 je prikazana na sliki 6.

Iz diagrama je razvidno, da vrsta merilne naprave ne vpliva na natezno trdnost, saj sta obe krivulji glede natezne trdnosti na enaki vrednostni ravni. Vpliva vrste naprave na raztezek pa ni bilo mogoče primerjati, saj sta bili za preizkušanje uporabljeni različni



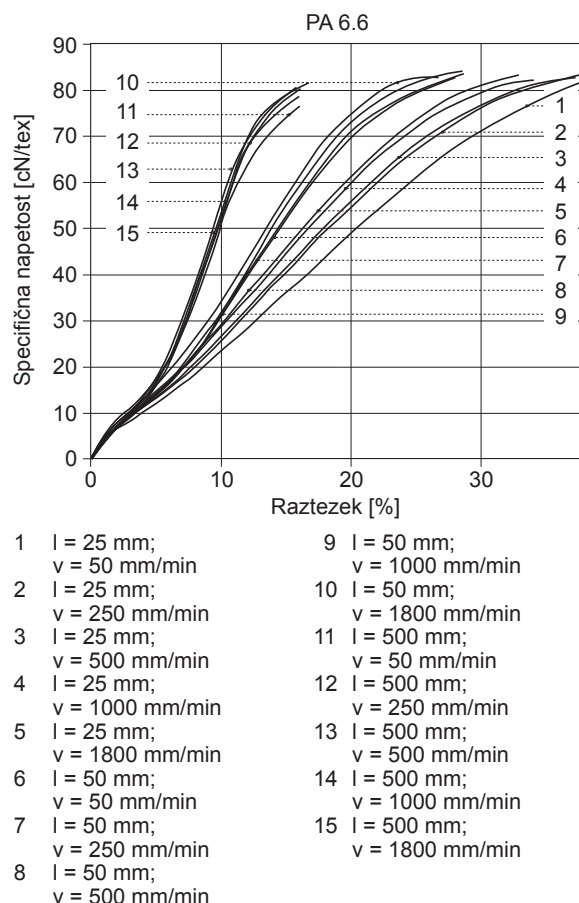
Slika 6: Vpliv vrste merilne naprave na rezultate preizkušanja

vpenjalni dolžini, in sicer pri standardnem dinamometru 0,025 m, pri servohidravlični preizkuševalni napravi pa 0,5 m. Tukaj je bil vpliv napake pri vpenjalni dolžini 0,025 m prevelik, da bi lahko prišli do uporabnih sklepov glede vpliva vrste merilne naprave na raztezek.

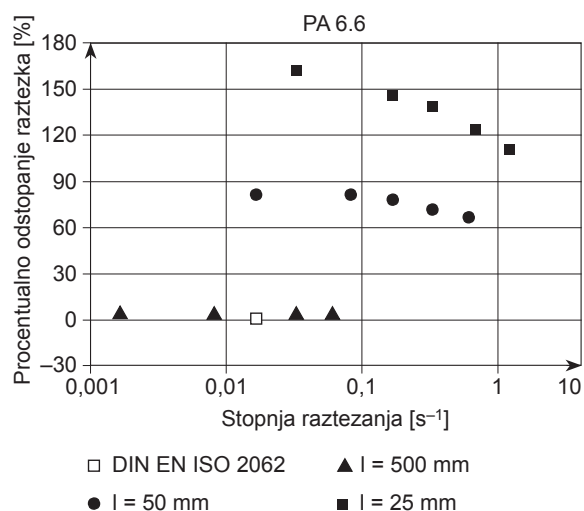
Slika 7 prikazuje vpliv stopnje raztezanja na natezno obnašanje za preizkuševalni material PA 6.6, kjer je zaslediti majhno povečanje specifične napetosti z zvišanjem stopnje raztezanja. To lahko pojasnimo z uporabo majhne vpenjalne dolžine pri večjih stopnjah raztezanja, in sicer se z zmanjšanjem vpenjalne dolžine zmanjša tudi že prej omenjena verjetnost za prisotnost kritične napake (*weakest link*), kar privede do povečanja trdnosti preizkuševalnega materiala. Glede obnašanja raztezka pa lahko pridemo do dveh ugotovitev. Prva je, da se raztezek poveča z

Preglednica 3: Čas preizkušanja pri različnih stopnjah raztezanja

Naprava	Stopnja raztezanja [s^{-1}]	Vpenjalna dolžina [m]	Hitrost [m/s]	Čas preizkušanja [ms]
Z010	0,00167	0,5	0,00083	110000
	0,0167	0,5	0,0083	11000
	1,2	0,25	0,03	400
HTM	1	0,5	0,5	200
	40	0,05	2	5
	40	0,125	5	4
	200	0,05	10	0,7
	500	0,02	10	0,3



Slika 7: Vpliv stopnje raztezanja na natezno obnašanje PA 6.6 za meritve, izvedene na standardnem dinamometru Z 010



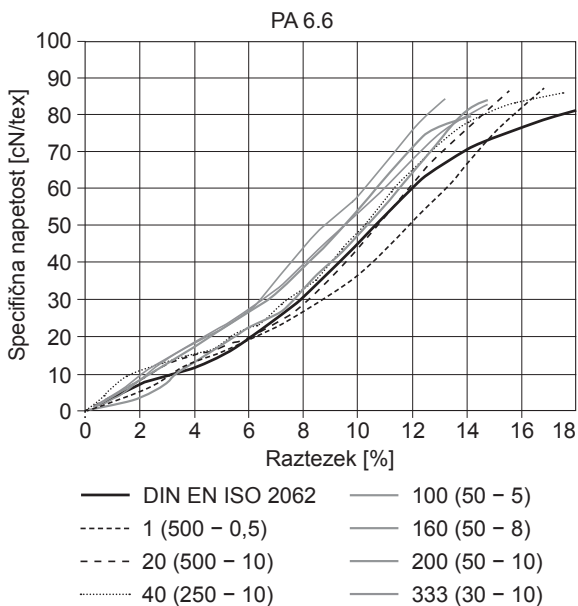
Slika 8: Procentualno odstopanje raztezka pri najvišji natezni napetosti v odvisnosti od stopnje raztezanja za PA 6.6 za meritve, izvedene na standardnem dinamometru Z 010

zmanjšanjem vpenjalne dolžine, kar se lahko pojasni s povečanjem vpliva zaradi raztezanja preizkušanca v območju prižem, pri zmanjšanju vpenjalne dolžine [6, 9–11]. Druga ugotovitev je, da se raztezek s povečanjem preizkuševalne hitrosti zmanjša znotraj preizkuševalne serije z enako vpenjalno dolžino. Vzrok za takšno obnašanje preizkuševalnega materiala je viskoelastično obnašanje materiala [6, 19]. Vpliv hitrosti preizkušanja oz. stopnje raztezanja na raztezek je nazorneje prikazan z diagramom na sliki 8, kjer so nanesene dobljene vrednosti raztezka v odstotkih glede na vrednosti, dobljene po standardu DIN EN ISO 2062.

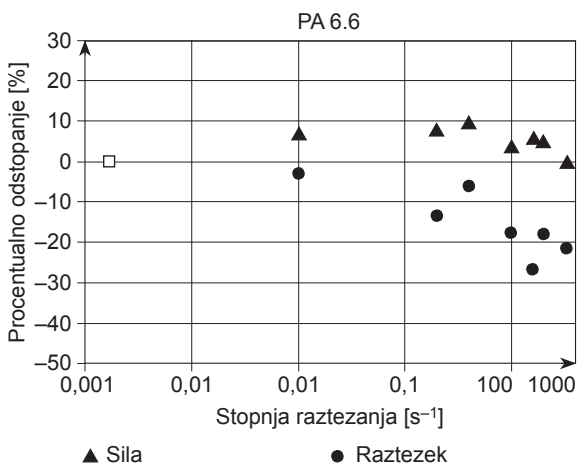
Enako obnašanje nateznih lastnosti je zaslediti tudi za preizkuševalna materiala PA 4.6 in PET, kjer se enako kot pri preizkuševalnem materialu PA 6.6 specifična napetost obeh materialov le malo spremeni s povečanjem hitrosti preizkušanja oz. s povečanjem stopnje raztezanja. Enako kot pri preizkuševalnem materialu PA 6.6 se tudi tukaj kaže povečanje raztezka z zmanjšanjem vpenjalne dolžine, kakor tudi zmanjšanje raztezka s povečanjem hitrosti preizkušanja pri enakih vpenjalnih dolžinah. Osnovni cilj raziskave je bila primerjava rezultatov, dobljenih po standardu DIN EN ISO 2062, z rezultati, dobljenimi z večjimi preizkuševalnimi hitrostmi. Sliki 9 in 10 prikazujeta vpliv hitrosti preizkušanja oz. vpliv stopnje raztezanja na natezno obnašanje preizkuševalnega materiala za meritve, izvedene na visokohitrostni servohidravlični napravi HTM 2008, za multifilamentne preje PA 6.6. Odebeljena krivulja prikazuje rezultate, dobljene po standardu DIN EN ISO 2062, črtkane krivulje kažejo rezultate, dobljene pri nižjih stopnjah raztezanja (od 1 s⁻¹ do 40 s⁻¹), medtem ko polne krivulje prikazujejo rezultate, dobljene z višjimi stopnjami raztezanja (od 100 s⁻¹ do 333 s⁻¹). Vsaka stopnja raztezanja je predstavljena s svojim odtenkom oz. tipom črte, kar je razvidno tudi iz legende, kjer 1(500–0,5) pomeni, da krivulja prikazuje rezultate, dobljene pri stopnji raztezanja 1 s⁻¹, kjer je bila vpenjalna dolžina 0,5 m in hitrost preizkušanja 0,5 m.s⁻¹. Za izračun odstotnega odstopanja na sliki 10 so bili rezultati, dobljeni po standardu DIN EN ISO 2062, izhodišče za izračun odstopanja, hkrati pa je treba povedati, da vrednosti sile pomenijo vrednosti najvišje natezne napetosti.

Če podrobneje pogledamo rezultate za preizkuševalni material PA 6.6, ki so prikazani na slikah 9 in 10, vidimo, da se specifična napetost s povečanjem

hitrosti preizkušanja oz. z zvišanjem stopnje raztezanja rahlo poveča. Zvišanje specifične napetosti glede na rezultate, dobljene po standardu DIN EN ISO 2062, znaša okrog 10 odstotkov pri stopnji raztezanja 40 s^{-1} . Nekoliko večji vpliv hitrosti preizkušanja se kaže pri raztezu, ki se zmanjša tudi do 25-odstotno glede na vrednost raztezka, dobljenega po standardu DIN EN ISO 2062.



Slika 9: Vpliv stopnje raztezanja na obnašanje krivulje sila-raztezek za PA 6.6

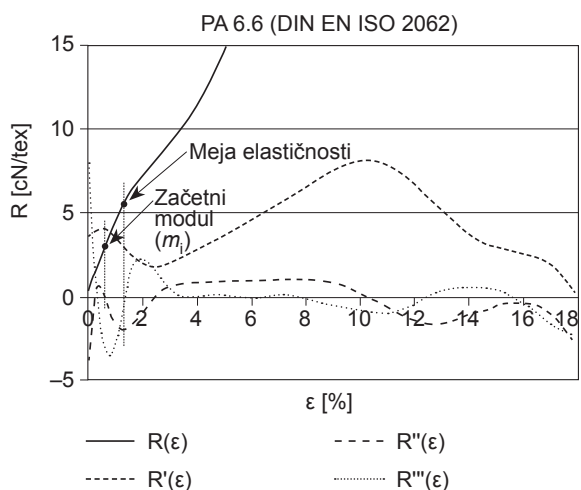


Slika 10: Procentualno odstopanje najvišje natezne napetosti in odstotno odstopanje raztezka pri maksimalni natezni napetosti v odvisnosti od stopnje raztezanja za meritve, izvedene na visokohitrostni servo-hidravlični napravi HTM 2008 za PA 6.6

Enak vpliv preizkuševalne hitrosti oz. stopnje raztezanja opazimo za preizkuševalna materiala PA 4.6 in PET. Pri preizkuševalnem materialu PA 4.6 se je specifična napetost prav tako kot pri preizkuševalnem materialu PA 6.6 povečala za 10 odstotkov, medtem ko se je raztezek zmanjšal s povečanjem stopnje raztezanja za 40 odstotkov. Tudi za preizkuševalni material PET je zaslediti vpliv hitrosti preizkušanja oz. vpliv stopnje raztezanja na natezno obnašanje materiala. Tukaj se je raztezek z zvišanjem stopnje raztezanja zmanjšal za 45 odstotkov, medtem ko se je specifična natezna napetost pri PET zmanjšala za okrog 8 odstotkov pri stopnji raztezanja 1 s^{-1} , naprej pa je ostala nespremenjena.

Opravili smo še matematično analizo R/ϵ krivulj za natančno določitev viskoelastičnih parametrov. Na krivulji odvoda eksperimentalne krivulje smo določili spremembe naklona krivulje specifična napetost-raztezek (R/ϵ) z zvišanjem stopnje raztezanja. Posebej smo se osredinili na dve točki, slika 11, in sicer:

- začetni modul m_1 in
- mejo elastičnosti.



Slika 11: Grafični prikaz krivulje sila/raztezek $R(\epsilon)$, prvega odvoda $R'(\epsilon)$, drugega odvoda $R''(\epsilon)$ in tretjega odvoda $R'''(\epsilon)$ ter točke začetnega modula in meje elastičnosti

Začetni modul m_1 se iz diagrama določi v točki, kjer prvi odvod pomeni prvi lokalni maksimum, drugi odvod pa seka os x, medtem ko se meja elastičnosti iz diagrama določi v točki, kjer drugi odvod pomeni lokalni minimum, tretji odvod krivulje pa seka os x, kar je razvidno iz slike 11. Rezultati odvodov vseh treh preizkuševalnih materialov kažejo, da se z zvišanjem

Preglednica 4: Vpliv stopnje raztezanja na začetni modul m_i

Material	Stopnja raztezanja [s ⁻¹]	ϵ_{mi} [%]	R_{mi} [cN/tex]	m_i [cN/tex]
PA 6.6	333	2,5	9,9	384
	200	0,65	3,2	492
	160	1,1	5,6	509
	100	1,3	5,4	392
	DIN EN ISO	0,6	3	417
PA 4.6	333	2,3	7,5	313
	200	1,5	7,5	487
	160	2,5	12	472
	100	2,3	8,5	352
	DIN EN ISO	0,3	1,5	333

stopnje raztezanja povečuje raztezek, kakor tudi napetost v točki m_p , kar je prikazano v preglednici 4. Enak vpliv stopnje raztezanja se kaže v točki meje elastičnosti. Iz teh rezultatov lahko povzamemo, da se začetno elastično območje krivulj z zviševanjem stopnje raztezanja povečuje, kar potrjuje tudi premik točke meje elastičnosti.

Pri vsaki meritvi smo določili lego pretrga preizkušanca. Razlikovali smo med pretrgi v neposredni bližini zgornje prižeme, pretrgi na sredini preizkušanca in pretrgi v neposredni bližini spodnje prižeme. Položaje pretrgov smo statistično obdelali in ugotovili, da se z zviševanjem stopnje raztezanja povečuje tudi število pretrgov v neposredni bližini prižem, in sicer približno 50 odstotkov pretrgov nastane v neposredni bližini zgornje prižeme oz. gibljive prižeme in približno 25 odstotkov v neposredni bližini spodnje, fiksne prižeme. Ti rezultati kažejo na nastanek deformacijskega impulza, ki se z zviševanjem stopnje raztezanja povečuje in tako vpliva na pretrg preizkušanca v neposredni bližini prižeme, kjer je koncentracija napetosti največja [14].

Ker je v nekaterih virih [3, 4, 36] zaslediti analize pretrgov pri visokih preizkuševalnih hitrostih, ki kažejo na zataljeno oziroma t. i. gobasto obliko pretrgov, smo izvedli analize pretrgov tudi na naših preizkuševalnih vzorcih. Konce pretrgane preje smo opazovali na posnetkih z vrstičnega elektronskega mikroskopa (SEM). Na posnetkih ni bilo zaslediti

gobastih oblik pretrgov, ki naj bi bili posledica zatalitve pretrganega konca filamenta.

4 Sklep

Povzamemo lahko, da rezultati, pridobljeni z visokohitrostno servohidravlično napravo HTM 2008, kažejo, enako kot rezultati, pridobljeni s standardnim dinamometrom Z 010, da hitrost preizkušanja oz. stopnja raztezanja pri vseh treh preizkuševalnih materialih le malo vpliva na natezno napetost. Natezna napetost se pri obeh poliamidnih preizkuševalnih prejah z zviševanjem stopnje raztezanja nekoliko poveča, medtem ko se natezna napetost polietilenteraftalatne preje zniža. Večji vpliv hitrosti preizkušanja oz. stopnje raztezanja je opazen pri raztezu, ki se pri obeh merilnih napravah in vseh treh preizkuševalnih materialih zmanjša z zviševanjem hitrosti preizkušanja oz. z zviševanjem stopnje raztezanja. Razliko v raztezu lahko pojasnimo pri vseh treh preizkuševalnih materialih z visoko elastičnostjo materiala, ki pojasnjuje, da se vsak material drugače odzove ob različnih hitrostih deformacije [6, 19].

Raziskava je potrdila, da hitrost preizkušanja vpliva na obnašanje tehničnih prej pri nateznem preizkusu. Prav tako je potrdila ustreznost nove metode in naprave za visokohitrostno preizkušanje, kakor tudi teorije, da vpenjalna dolžina preizkušanca vpliva na natezno napetost. Hkrati smo ugotovili, da se z zviševanjem stopnje raztezanja povečuje verjetnost pretrga preizkušanca v neposredni bližini prižem, kakor tudi, da se pri višji stopnji raztezanja poveča začetni elastični del krivulje sila-raztezek.

5 Literatura

1. CHAWLA, K. K. *Fibrous materials*. Cambridge : Cambridge university press, 1998.
2. HEARLE, J. W. S. *High-performance fibres*. Cambridge : Woodhead publishing, 2001.
3. MORTON, W. E. in HEARLE, W. S. J. *Physical properties of textile fibres*, Fourth edition. Cambridge : Woodhead publishing limited, 2008.
4. STONE, W. K., SCHIEFER, H. F. in FOX, G. Kraft-Dehnungs-Beziehungen in Garnen, die einer raschen Stossbelastung ausgesetzt werden. *Textil-Praxis*, 1955, p. 1083–1088.

5. FURTER, R. Heutige Möglichkeiten der Qualitätssicherung mittels Gleichmäßigkeits- und Zugprüfungen. *Lenzinger Berichte*, 1984, No. 56, p. 8–15.
6. REUMANN, R. D. *Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungsstechnik*. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
7. DIN 53 816. Einfacher Zugversuch an einzelnen Fasern in klimatisiertem oder nassem Zustand. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1976.
8. POSPISCHIL, H. O. *Prüfmethoden für die Labors der Textilindustrie*: 3. überarb. und erw. Auflage. Leipzig : fv VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1975.
9. BEIER, M. in SCHOLLMMEYER, E. Mechanische Eigenschaften von Polyesterfasern bei kurzzeitiger Zugbeanspruchung, *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 1989, vol. 168(2720), p. 37–52.
10. EP 0 899 555 B1. *Verfahren zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften von langgestrecktem, textilem Prüfgerät und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens*. Europäisches Patentamt, Paris, 1998.
11. GEITEL, K. Beitrag zur Dehnungsermittlung bei kleinen Einspannlängen. *Faserforschung und Textiltechnik*, 1959, vol. 10 (5), p. 204–208.
12. MEYERS, M. A. *Dynamic behavior of materials*. Wiley-IEEE, 1994.
13. XIONG J., GU B. H. in WANG S. Y. Tensile properties of fiber materials under different strain rates. *Journal of Dong Hua University*, 2002 (Eng. Ed.), vol. 19 (2), p. 54–58.
14. REUMANN, R.D. *Studie über das Verhalten von monofiler Polyamid-Spinn- und -Reckseide gegenüber Zugbeanspruchungen bei unterschiedlichen, insbesondere hohen Dehnungsgeschwindigkeiten*: Dissertation. Dresden: Fakultät für Maschinenwesen, 1974.
15. XIAO, X. in LEACH, M. *Intermediate and high strain rate tensile testing of plastic materials*. URL: <http://sem-proceedings.com/05s/sem.org-2005-SEM-Ann-Conf-s021p5-Intermediate-High-Strain-Rate-Tensile-Testing-Plastic-Materials.pdf> [accessed: 15. 04. 2011].
16. FINCKH, H. Hochgeschwindigkeits- Zugprüfung an technischen Garnen. V *Zwick/Roell, 1. Textil Symposium*. Ulm, 2011.
17. MARTIN, H. Die Reißfestigkeit von Textilfäden bei verschiedenen Dehnungsgeschwindigkeiten. *Faserforschung und Textiltechnik*, 1959, vol. 10 (8), p. 371–376.
18. MAURER, G. Schnellzugversuche an Kunststoffen. V *Zwick/Roell: 14. Fachmesse für Prüftechnik*, 2005.
19. BEIER, M. in SCHOLLMMEYER, E. Mechanische Eigenschaften von Polyesterfasern bei kurzzeitigen Zugbeanspruchung, 2. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 1989, vol. 168 (2721), p. 53–79.
20. GUNNARSSON, A. C., WEERASOORIYA, T. in MOY, P. The Effect of Loading Rate on the Tensile Behavior of Single Zylon Fiber. Tom Proulx (Ed). *Dynamic Behavior of Materials, Volume 1. V Proceedings of the 2011 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*. Springer, 2011, p. 195–204.
21. GWINN, K. W., TOTTEN, J. J. in WAYE, D. E. High strain-rate testing of parachute materials [Word Wide Web]. V *13. Aerodynamics decelerator systems technology conference*, Clearwater, FL (United States), 1995. URL: <http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp/> [Accessed: 10.05.2010].
22. HÄTTENSCHWILER, P., PFEIFFER, R. in SCHAUFELBERGER, J. Die Zugfestigkeit von Garnen – neue Erkenntnisse aus der Praxis. *Melliand Textilberichte*, vol. 65, 1984 (1), p. 23 –26.
23. LANGUERAND, D. L., ZHANG, H. MURTHY, N. S., RAMESH, T. K. in SANZOZ, F. Inelastic behavior and fracture of high modulus polymeric fiber bundles at high strain-rates. *Materials Science and Engineering A* 500, 2009, p. 216–224.
24. LIM, J., ZHENG, Q. J., MASTERS, K. in CHEN, W. W. Effects of gage length, loading rates, and damage on the strength of PPTA fibers. *International journal of impact engineering*, 2011, vol. 38 (4), p. 219–227.
25. LIM, J., ZHENG, Q. J., MASTERS, K. in CHEN, W. W. Mechanical behavior of A265 single fibers. *Journal of Materials Science*, 2010, vol. 45, p. 652–661.
26. WANG, Y., YUANMING, X. in JIANG, Y. Tensile behaviour and strength distribution of polyvinyl-alcohol fibre at high strain rates. *Applied Composite Materials*, 2001, vol. 8(5), p. 297–306.
27. WANG, Z. in YUANMING, X. Experimental evaluation of the strength distribution of fibers under high strain rates by bimodal Weibull distribution. *Composites Science and Technology*, 1997, vol. 57, p. 1599–1607.

28. WANG, Z., YUANMING, X. in YANG, B. A statistical model and experimental study of the strain rate and temperature dependence of the strength of fibers. *Applied composite materials*, 1996, vol. 3, p. 89–101.
29. WEN, H., WIE, X. in YUANMING, X. Effect of strain rate on the mechanical behaviors of SiC fiber. *Journal of Materials Science*, 2005, vol. 40, p. 465–468.
30. ZHOU, Y., JIANG, D. in XIA, Y. Tensile mechanical behaviour of T300 and M40J fiber bundles at different strain rate. *Journal of materials science*, 2001, vol. 36, p. 919–922.
31. ZHU, D., MOBASHER, B. in RAJAN S. D. Dynamic tensile testing of Kevlar 49 fabrics. *Journal of materials in civil engineering*, 2011, vol. 23(3), p. 230–239.
32. ZHU, D., MOBASHER, B. in RAJAN S. D. High strain rate testing of Kevlar 49. V *11th international congress and exposition on experimental and applied mechanics*, Society for experimental mechanics, Orlando, 2008, p. 34–35.
33. GOMBOC, L. *Studie zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf das Verhalten von technischen Garnen im Zugversuch : Magisterarbeit*. Maribor : Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2011.
34. DIN EN 139. Textilien – Normalklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung DIN (ISO 139:2005). Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2005.
35. BRAMESHUBER, W., BANHOLZER, B., GRIES, T. in AL-MASRI, A. Methode zur Untersuchung des Versagensmechanismus unter Zugbelastung von Multifilament-Garnen für Betonbewehrung. *Technische Textilien*, 2002, vol. 45 (2), p. 98–99.
36. HEARLE, J. W. S., LOMAS, B. in COOK, W. D. *Atlas of fibre fracture and damage to textiles*. Cambridge: Woodhead & The Textile Institute, 1998.
37. JIANWEN, L. *Untersuchung von Verbundwerkstoffen mit Basalt- und PBO-Fasern-Verstärkung: Dissertation*. Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, 2008.
38. SIPPEL, A. Zur Abhängigkeit der Reißfestigkeit von Fäden von der Einspannlänge. *Faserforschung und Textiltechnik*, 1959, vol. 10 (8), p. 369–371.
39. SIRICHAISIT, J. in YOUNG, J. R. Tensile and compressive deformation of polypyridobisimidazole (PIPD)- based 'M5' rigid-rod polymer fibres. *Polymer*, 1999, vol. 40, p. 3421–3431.