

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



Katarína Zelová

Mačkavost plošných textilií

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Název disertační práce: **MAČKAVOST PLOŠNÝCH TEXTILIÍ**

Autor: **Ing. Katarína Zelová**

Obor doktorského studia: textilní technika

Forma studia: kombinovaná

Školící pracoviště: Katedra oděvnictví Fakulta textilní Technická univerzita v Liberci

Školitel: Ing. Ludmila Fridrichová, Ph.D.
Katedra hodnocení textilií Fakulta textilní Technická univerzita v Liberci

Školitel specialista:

Liberec 2013

1. Předmět a cíl práce

Na základě provedené literární rešerše a dosažených výsledků různých autorů v oblasti mačkavosti plošných textilií lze konstatovat důležitost rychlých a přesných metod hodnocení mačkavosti. Metody, které umožňují především simulaci reálného chování textilií, jsou ve světě pořád žádané a autoři jim věnují velké úsilí. Důležitost a aktuálnost řešení této problematiky potvrzuje také článek Sima a kol. [1]. Podobně jako v této disertační práci se autor snaží inovovat metodu měření úhlu zotavení, kterou pak používá pro vyhodnocení vlivu nových nemačkových úprav bavlněných textilií.

Studie výzkumů ukazují, že mačkavost je anizotropní vlastnost a její řešení si zaslouží ještě hlubší analýzu a další studie. Většina prací proměřuje pouze vybrané směry a navržené metodiky hodnocení neporovnává s reálným zmačknáním při nošení. Nejen volba směru, ale také vhodná metoda, i tvar vzorku může ovlivnit výsledné hodnoty posouzení mačkavosti. Jen málo studií se věnuje relaxačním vlastnostem textilií, především rychlosti zotavení. Chybí metody, které by pomohly vyšetřit hodnotu okamžitého zotavení textilií. Získali bychom z měření reálnou hodnotu, která by nahradila přibližnou hodnotu doposud získávanou výpočtem.

Základním cílem této práce je zkoumat anizotropii mačkavosti a analyzovat viskoelastické chování plošných textilií po zmačknání. V předložené disertační práci si proto dále klademe za cíl:

- navrhnout inovativní řešení v oblasti měření mačkavosti pomocí úhlu zotavení, experimentálně ověřit anizotropii mačkavosti a schopnost zotavení textilií;
- statisticky posoudit vliv konstrukčních parametrů a mechanických vlastností textilií na jejich mačkavost;
- na základě statistické analýzy stanovit model pro predikci úhlu zotavení, resp. pro predikci mačkavosti vybrané skupiny materiálů;
- posoudit vliv konstrukčních parametrů textilií na viskoelastické vlastnosti plošných textilií a ověřit možnost jejich modelování pomocí reologických modelů;
- doporučit vhodný reologický model pro modelování zotavení textilií.

2. Přehled současného stavu problematiky

Mačkavost je jedna z důležitějších vlastností pro hodnocení vzhledu tkanin. Tato vlastnost je závislá na užití technologii výroby, materiálovém složení, struktuře textilie, směru přehybu textilie, ale také na teplotě a vlhkosti, která vzniká při aktivitě nositele. Většina tkanin je pravidelně hodnocena subjektivní vizuální metodou na základě etalonů. Nicméně kvůli nedostatkům vizuálního hodnocení zmačkaného povrchu a její časové náročnosti je vyvinuto několik objektivních metod pro hodnocení zmačkaného povrchu. V mezinárodním měřítku se výzkumem mačkavosti textilií zabývali výzkumníci již v 50. letech minulého století. Provedené výzkumy směřují k hodnocení vlivu technologie výroby, druhu vlákna, příze, vazby, finálních úprav na mačkavost textilií. Jsou navrhované alternativní metody hodnocení, které směřují k co nejobektivnějšímu popisu a simulaci reálného procesu zmačknání.

Bylo navrženo vícero experimentálních metod pro hodnocení mačkavosti textilií. Sochor [2] je rozděluje na metody vizuální, metody měření vzdálenosti krajů, úhlové metody a speciální metody. Jsou to metody hodnocení, které například vycházejí ze zmačknání textilií v ruce, nebo z měření úhlů či vzdálenosti zotavených krajů. Setkáváme se i s metodou nošením, jak je patrné z práce Saltera [3].

Z mezinárodních metod pro zkoušení mačkavosti jsou nejčastěji používané dvě normované metody. Metoda dutého válce Wrinkle recovery tester AATCC 128 nebo standard ISO 9867 [4] a metoda úhlu zotavení Crease recovery AATCC 66 – 2008 nebo standard ISO 2313 [5]. V roce 1961 byla normována metoda hodnocení mačkavosti textilií pomocí úhlu zotavení ČSN 800819 měřenou na přístroji UMAK, která byla nahrazena normou EN 22313 (ISO 2313) [6].

AATCC 66 je tradiční úhlová metodou hodnocení textilií, nicméně, zde není dostatečně realisticky popsáno mačkání, protože vzorek textilie je přehýbán pouze ve dvou směrech (osnova a útek), což neodpovídá skutečnému zmačkání tkaniny při nošení. Existují ale studie, v nichž se autoři snaží odstranit nedostatky této metody, jako např.: Fan [7], Mihajlovič a kol. [8], Mihajlovič [9], Nikolič [10], Sinohara [11], Perepelkin a kol. [12], Geršak [13], Aliakbar a Hadi [14] atd.

3. Použité metody

3.1 Inovovaná metoda hodnocení mačkavosti plošných textilií

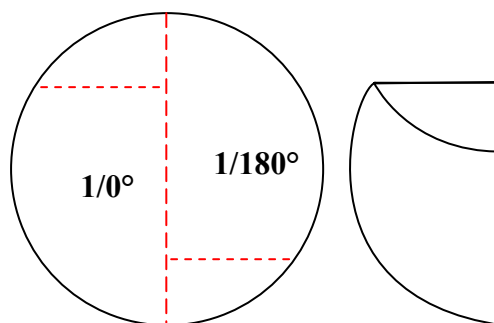
Měření mačkavosti metodou úhlu zotavení dle české normy je realizované na přístroji UMAK. Ruční měření úhlu zotavení bylo nevhodné, proto bylo navrženo snímání úhlu, po odlehčení textilie pomocí web kamery. Inovační kroky spočívaly ve:

- změně tvaru zkušební vzorku, která přispěla k rozšíření měření ve více směrech pootočení textilie vzhledem k osnově – zkoumání anizotropie zotavení,
- objektivním snímáním úhlu zotavení, vytvoření pracovního měřicího systému s příslušným počtem měřících stanic,
- měření úhlu zotavení pomocí softwaru Nis elements.

Prvním inovačním krokem bylo proto odstranění nebo eliminace nežádoucího kroutícího efektu vzniklého při relaxaci obdélníkových vzorků. Tento problém byl částečně vyřešen nahrazením obdélníkového tvaru vzorku vzorkem kruhovým, resp. půlkruhovým o průměru 4,5 cm. Velikost přehýbané části vzorku je závislá na plošné hmotnosti textilie. Pokud je plošná hmotnost od 100–500 g/m² je přehyb vzorku textilie 10 mm. Detailní schéma střížení a přehýbání vzorku znázorňuje obr. Obr. 1.

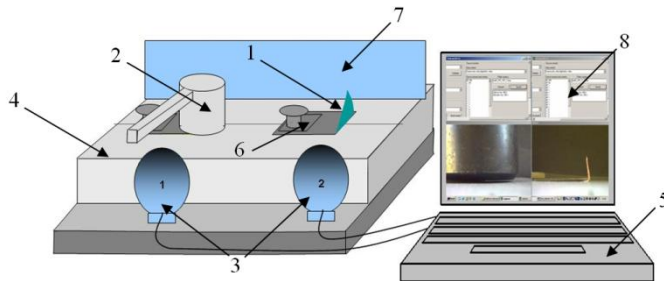
V inovované metodice navrhujeme proměřit zkoumanou vlastnost ve všech pootočeních textilie od 0° až 330° po každých 30°. Jedna sada vzorků pro měření úhlu zotavení obsahuje 76 půlkruhových vzorků střížených a přehýbaných ve všech zmíněných směrech.

Princip měření vychází z měření na přístroji UMAK, kde zatížení i relaxace probíhá na tom samém místě. Inovované měřicí zařízení, viz obr. Obr. 2, se skládá z pracovního stolu s příslušným počtem pracovních míst (4), dvě pracovní místa a s příslušným počtem web kamer (3). Pracovní místo je tvořeno z přídržné lamely (6), pod kterou je vložen vzorek textilie (1), který je přehnut a zatížen kilovým závažím (2). V zadní části pracovního stolu je umístěno stínítko (7) pro bezproblémové snímání úhlu zotavení. Web kamery jsou připojeny k PC (5), pomocí kterého je řízen veškerý proces nastavení a snímání úhlu zotavení. Vytvořený software „Angle“ (8) umožňuje nastavit libovolnou frekvenci zaznamenávání úhlu zotavení. Součástí softwaru je také měření úhlu zotavení, které nebylo příliš přesné, a proto byl k měření úhlu zotavení z pořízených digitálních fotografií použit

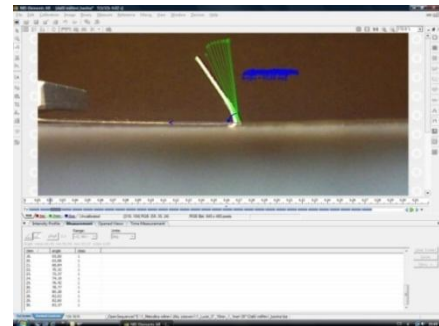


Obr. 1. Příprava vzorku pro měření

software NIS elements (9). Součástí tohoto softwaru je funkce „measure free Angle“, která umožňuje interaktivní měření úhlů. Využití softwaru NIS pro měření úhlu zotavení textilie, která relaxovala pět minut pomocí této funkce je znázorněno na obr. Obr. 3. Navržená objektivní metoda měření mačkavosti pomocí úhlu zotavení byla představena v článku Fridrichová a Zelová [KZ1], [KZ3].



Obr. 2. Navržené měřicí pracoviště pro snímání úhlu zotavení



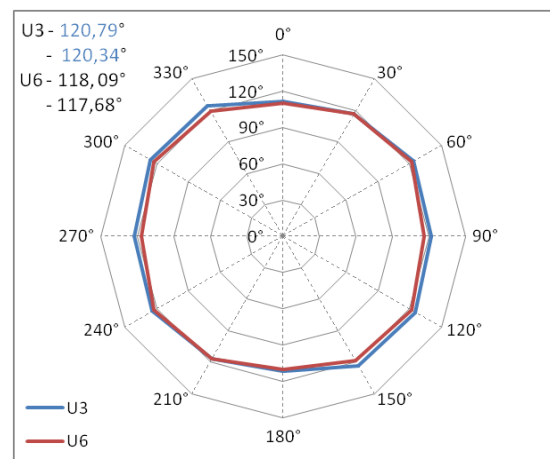
Obr. 3. Měření úhlu zotavení Nis elements

Podle provedených experimentálních zkoušek v době zotavení textilie je rozevírání vzorku zpočátku velmi rychlé, s narůstajícím časem zpomaluje, až ustaluje. Podle našich poznatků z experimentálních měření je pro analýzu mačkavosti doba zotavení pět minut dostatečná. Po tuto dobu zotavení bylo prostřednictvím web kamery pořízeno 24 digitálních fotografií. Časový interval záznamu úhlu zotavení byl následující: (1–10 s) - každou jednu sekundu, (10–60 s) - každých pět sekund, (60–300 s) - každou minutu.

3.2 Případy anizotropního chování úhlu zotavení

Většina autorů publikovaných studií na anizotropii mačkavosti plošných textilií např. [8], [11], [12] měří vzorky pouze v prvním kvadrantu, resp. pro směry pootočení 0–90°, poté získané hodnoty kopírují dle symetrie do zbývajících kvadrantů. Autoři předpokládají, že osa symetrie leží v přímce 0° a 180° a zbylé úhly také kopírují dle osové symetrie např. 30° a 330°. Naše výzkumy potvrzují, že osa symetrie je v přímce 60° a 240° a proto lze doporučit anizotropii kopírovat dle středové souměrnosti. Při hodnocení mačkavost tedy symetrii vykazují hodnoty úhlu zotavení ve směrech 0° a 180°, 30° a 210°, atd. Hodnocení anizotropie úhlu zotavení lze, v případě porovnávání textilií s blízkými parametry mačkavosti, použít jako charakteristiku, která pomůže odhalit kvalitu zotavení resp. nemačkavosti textilie. Z vytvořených obrázků polárních diagramů pro jednotlivé tkaniny vystupují parametry jako velikost úhlu zotavení pro různé směry a parametr symetrie úhlu zotavení, které mohou poukázat na kvalitu hodnocené vlastnosti. Jak chápat anizotropii zotavení textilií vysvětlíme dle následujících obrázků polárních diagramů.

Případ 1: obr. 4 porovnává dvě tkaniny, u kterých lze pozorovat symetrické zotavení (polární diagram obou tkanin má tvar kružnice) a svědčí o identickém zotavení tkanin ve všech směrech. Vzhledem k symetričnosti mačkavosti vykazují obě textilie stejnou kvalitu mačkavosti. Rozhodujícím parametrem kvality mačkavosti textilie bude tedy velikost úhlu zotavení. Vyšších hodnot úhlu zotavení nabývá vzorek textilie U3 (modrá křivka). Z polárního



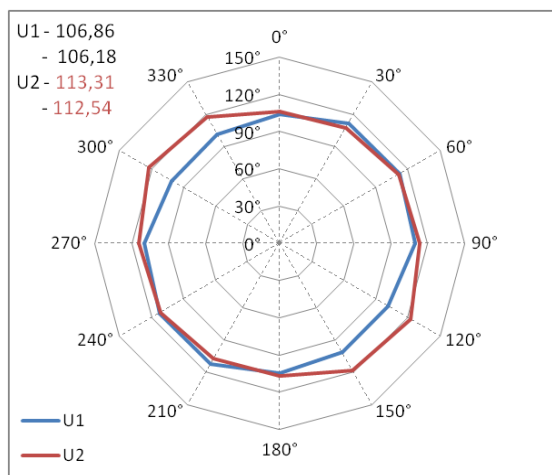
Obr. 4. První případ anizotropie

diagramu lze pozorovat vyšší hodnoty u tohoto vzorku ve většině zkoušených směrů. Hodnota celkového průměrného úhlu zotavení ze všech hodnocených směrů je uvedena v levém horním rohu grafu (první hodnota - aritmetický průměr $120,79^\circ$, druhá hodnota - harmonický průměr $120,34^\circ$) určily také nižší mačkavost textilie U3.

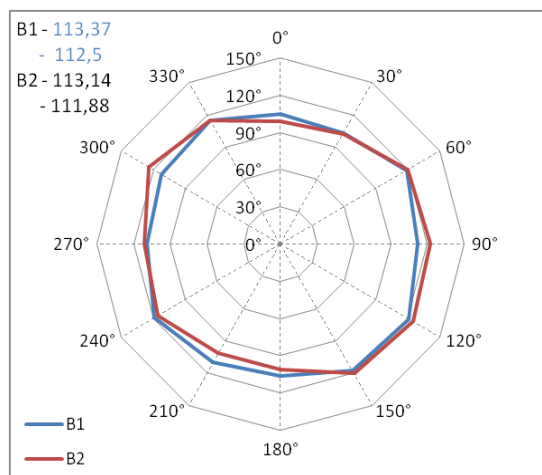
Případ 2: obr. 5 porovná dvě textilie, u jedné z nich byl prokázán sklon k anizotropnímu chování k větším hodnotám úhlu zotavení právě v diagonálních směrech a to ve směrech: 120° a 300° , 150° a 330° . Ve zbylých diagonálních směrech a také ve směrech osnovy a útku obě textilie vykazují shodné zotavení. Zde vlivem většího zotavení a odhalení projeveného anizotropního chování lze textilií U2 určit za jako méně mačkovou. V případě hodnocení mačkavosti pouze ze směrů osnovy a útku, by toto určení nebylo možné, nebo by bylo složitější, jelikož v těchto směrech obě textilie vykazují podobné hodnoty úhlu zotavení. V tomto případě se projevil prioritní parametr mačkavosti a to velikost úhlu zotavení, který se zvýšil hlavně v diagonálním směru.

Případ 3: obr. 6 ukazuje na prioritní parametr kvality textilie, tedy na symetričnost hodnocené mačkavosti. Jsou zde porovnávány textilie s velmi blízkými hodnotami zotavení. Textilie B1 (modrá křivka v polárním diagramu) vykazuje symetričtější zotavení, a také vzhledem k menšímu rozptylu úhlu zotavení lze textilií označit za méně mačkovou.

Vysvětlené případy jak číst v anizotropním chování úhlu zotavení ukázaly, že nemačkové textilie jsou takové, které mají vyšší úhel zotavení, symetricky rozloženého v polárním diagramu. Textilie vykazuje izotropní chování úhlu zotavení.



Obr. 5. Druhý případ anizotropie

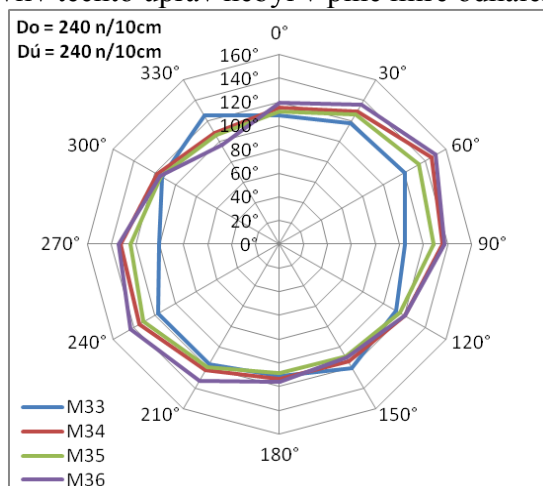


Obr. 6. Třetí případ anizotropie

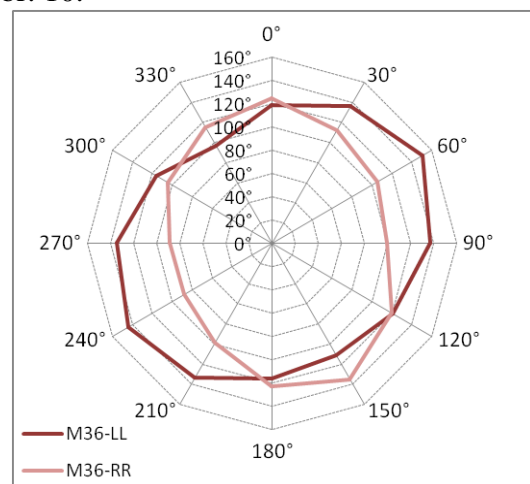
Prínos navrhované metody a metodiky hodnocení mačkavosti textilií pomocí úhlu zotavení lze shrnout do následujících bodů:

- Ruční měření a odečet úhlu zotavení byly nahrazeny digitálním záznamem pomocí web kamery. Nový software „Angle“ umožnil, že snímání obrazu úhlu zotavení lze provádět v různých časech a s různou četností.
- Díky vhodně nastavené snímací sekvenci úhlu zotavení lze sledovat podrobněji celý proces zotavení a to již od první sekundy. K záznamům se lze kdykoli vrátit.
- Navržená metodika umožnila změřit okamžitý úhel zotavení, tj. úhel zotavení v první sekundě po odlehčení textilie. Tento úhel byl dosud určován pouze výpočtem dle Sommerova vztahu [15]. Porovnáním teoretického a experimentálně zjištěného okamžitého úhlu zotavení, bylo zjištěno, že experimentální hodnota je průměrně o cca 15 % nižší. Experimentálně zjištěnou hodnotou jsme proto nahradili ne zcela přesný výpočet hodnoty okamžitého úhlu zotavení.

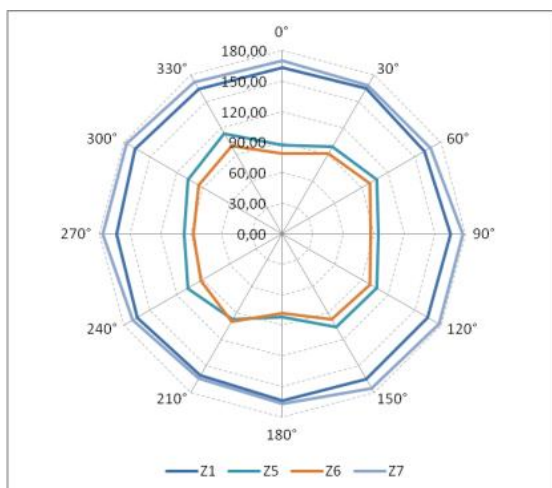
- Z analýzy vyplynula důležitost měření vzorku v prvních sekundách zotavení. Tvar křivky zotavení v prvních sekundách naznačuje tendenci materiálu k mačkavosti. Byly zaznamenány tvary křivek pro tkaniny z vlny, bavlny a lnu, viz publikace [KZ4]. Průběh zotavení, může sloužit také k analýze vliv nemačkových úprav na rychlost zotavení, jak uvádí Gonzales a Rowland [16].
- Inovovaná metodika měření simuluje reálné mačkání textilií tím, že se měří mačkavost na textiliích v různých směrech pootočení (0° až 330°), respektive vyšetřuje se anizotropie mačkavosti. Je možné sledovat vliv vazby, obr. 7, vliv způsobu přeložení textilie líc-líc nebo rub-rub obr. 8, vliv materiálového složení, obr. 9 na anizotropii úhlu zotavení.
- Navržený kruhový tvar vzorku snížil efekt kroucení okrajů zkušebních vzorků, který byl typický pro obdélníkové vzorky. Úpravou vzorku na kruhový tvar se snížila spotřeba materiálu pro experimentální měření anizotropie.
- Zpřesnili jsme výpočet koeficientu mačkavosti. Hodnota je počítána z úhlu zotavení v různých směrech přeložení.
- Z analýzy získaných dat je patrné, že nadměrné snížení jedné soustavy nití od druhé mělo vliv na anizotropii úhlu zotavení textilií. Textilie s příliš velkým rozdílem mezi dostavou osnovy a útku byly mačkové více. Zvyšující se počet útkových nití snižuje mačkavost textilie, avšak pouze do doby, než počet nití v útku začne převyšovat počet nití v osnově. V tomto případě se mačkavost začne zvyšovat.
- Při navrhování tkanin plátňové vazby, tj. vazby s pravidelným provázáním osnovních a útkových nití, je vhodné volit textilie s menší dostavou nití. Zvyšujeme-li rovnoměrně počet osnovních a útkových nití, zvyšuje se mačkavost tkaniny.
- Mezi textilie s dobrými relaxačními vlastnostmi a větší nemačkovostí patří textilie s volnější strukturou, např. s keprovou a atlasovou vazbou. Jejich struktura předurčuje textilie k menší mačkavosti.
- Bělení, barvení či potisk textilie snížily výslednou hodnotu mačkavosti textilie v porovnání s reznou textilií. Vliv těchto úprav, se projevil většími hodnotami úhlu zotavení v diagonálních směrech. V případě použití klasické metody úhlu zotavení (měření ve směru osnovy a útku), by vliv těchto úprav nebyl v plné míře odhalen.
- Bělení, barvení či potisk textilie snížily výslednou hodnotu mačkavosti textilie v porovnání s reznou textilií. Vliv těchto úprav, se projevil většími hodnotami úhlu zotavení v diagonálních směrech. V případě použití klasické metody úhlu zotavení by vliv těchto úprav nebyl v plné míře odhalen, obr. 10.



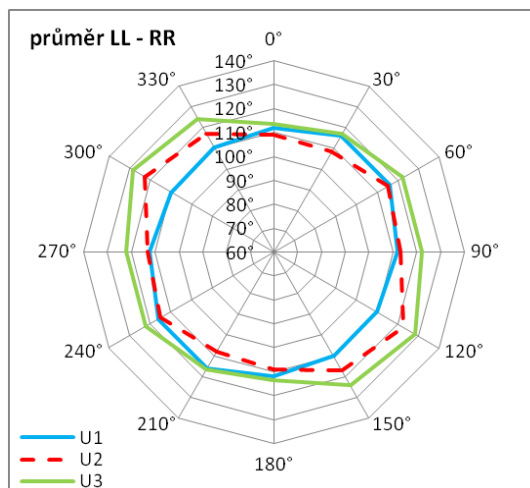
Obr. 7. Polární diagram 100% bavlněné textilie s vazbou: plátno (modrá), atlas (červená), K1/2 (zelená), K1/4 (fialová)



Obr. 8. Vliv způsobu přeložení textilie LL a RR na anizotropii uhlu zotavení (100% bavlněná textilie, vazba kepr K1/4)



Obr. 9. Vliv materiálového složení na anizotropii úhlu zotavení (Z1-100%PI, Z7-100%WO, Z5, Z6 - 100%LI).



Obr. 10. Vliv úpravy textlie na anizotropii úhlu zotavení (100% bavlněná textlie: U1 rezná, U2 bělená, U3 barvená)

3.3 Porovnání klasické a inovované metody s reálným nošením

Experimentem nošení bylo potvrzeno, že mačkovost je anizotropní vlastnost, viz obr. 11 (tvorba záhybů) a její hodnocení pouze ve dvou směrech je nedostačující. Lze konstatovat, že navrhovaná inovovaná metodika měření úhlu zotavení (proměření všech dvanácti směrů pootočení) vhodně popisuje reálné zmačkání textilií během užívání výrobku.

Výsledky prokázaly, že hodnoty úhlu zotavení získané klasickou metodou na přístroji UMAK nekorespondují s experimentem po osmi hodinách nošení ani s experimentem dlouhodobého nošení (po šestnácti hodinách nošení). Textilie U1 (rezná) byla dle klasické metody úhlu zotavení, viz tab. Tab. 1., označena za nejméně mačkovou (přirazené pořadí číslo 6), avšak dle testu dlouhodobého nošení a zatížení textilie během spánku, kdy spolupůsobila teplota, vlhkost a hmotnost lidského těla, vykazovala tkanina U1 největší zmačkání (přirazené pořadí číslo 1).



Obr. 11. Zmačkání textlie U1 – tvorba záhybů při reálném užívání výrobku

Tab. 1. Sestavené pořadí textilií pro jednotlivé metody hodnocení mačkovosti

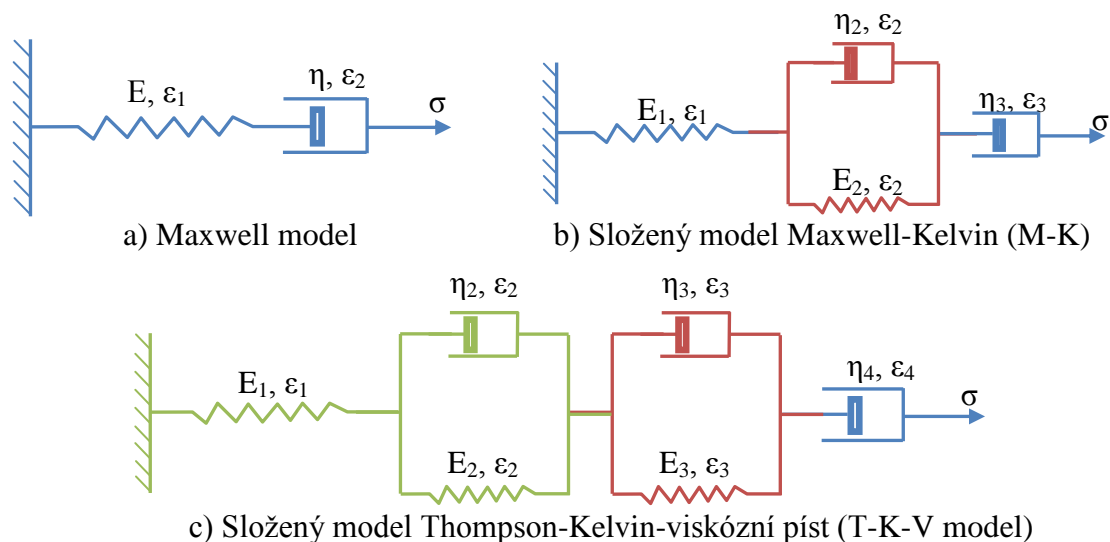
Mat.	Inovovaná metoda		Klasická metoda UMAK		Experiment nošení	
	$\alpha_{300} [^\circ]$	$\alpha_{300}^{\text{har}} [^\circ]$	$\alpha_{300} [^\circ]$	$\alpha_{3600} [^\circ]$	8 hod	16hod
U1	1	1	6	6	1	1
U2	2	2	4	4	2	2
U3	6	6	2	3	6	6
U4	3	3	1	2	3	3
U5	4	4	3	1	4	4
U6	5	5	5	5	5	5

Textilie U3 (barvená) se po osmi hodinách i po dlouhodobém zatížení jevila jako nejméně zmačkaná, což je zřejmé i z výsledků pořadí inovovanou metodou i experimentem nošení. Ani

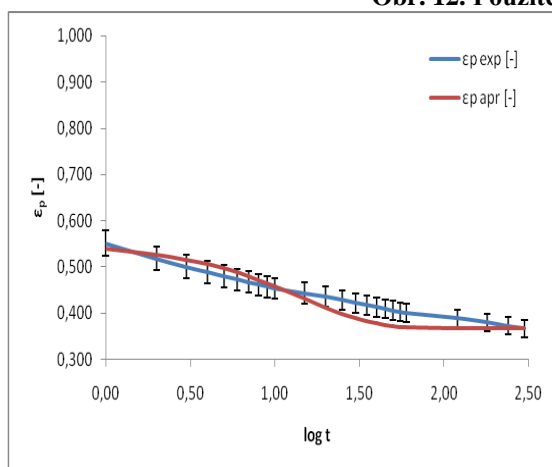
v tomto případě pořadí textilií zjištěné klasickou metodou UMAK, která vychází z hodinového zatížení vzorku, nebylo shodné s reálným zmačkáním textilie během nošení a zatížení oděvu.

3.4 Návrh reologického modelu pro modelování zotavení textilií

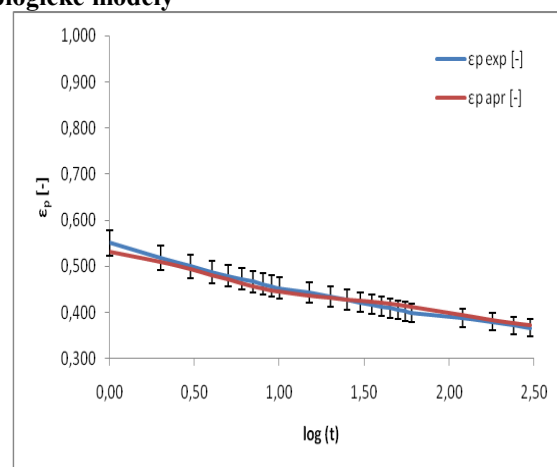
Na základě experimentálního měření úhlu zotavení textilií byly hledány takové kombinace základních modelů, které umožnily popsat elastické, viskoelastické i plastické deformace. Měření úhlu zotavení textilií bylo porovnáváno s výpočtem podle níže uvedených reologických modelů, viz obr. 12. Byl ověřený Maxwellův reologický model a), reologický model doporučený Dong [17], tj. reologický model b) složený model Maxwell-Kelvin i nově navržený reologický model tj. reologickým modelem c) složený model Thompson-Kelvin-viskózní píst. Na základě křivky zotavení, respektive průběhu deformace byly dle navrženého algoritmu vyjádřeny reologické parametry jednotlivých členů reologického modelu (modul pružnosti E a koeficient viskozity η), viz publikace [KZ2]. Z výsledků vyplynulo, že čím vyšší je hodnota modulu E , tím menší je úhel zotavení a textilie má vyšší mačkavost, potvrdily se výsledky Hristian a kol. [18]. Výsledky modelování reologickými modely ukazují obr. 13, 14.



Obr. 12. Použité reologické modely



Obr. 13. Porovnání experimentální a teoretické křivky - M-K model reologický model



Obr. 14. Porovnání experimentální a teoretické křivky - T-K-V model

4. Přehled dosažených výsledků

Dosažené výsledky předložené disertační práce odpovídají třem stanoveným cílům. Byla představená inovovaná metodika měření úhlu zotavení, která umožnila získat časový záznam zotavení textilií. Soubor testovaných textilií (režné tkaniny utkané dle požadavků a textilie běžně dostupné na trhu) umožnil stanovit vliv vybraných parametrů textilií (vazba, dostava, materiálové složení, úpravy) na výslednou hodnotu mačkavosti. Byl navržen predikční regresní model mačkavosti textilií, který vychází z analýzy mechanických vlastností textilií (měřeny pomocí systému KES) a úhlu zotavení měřeného inovovanou metodou. Byl navržen reologický model reálně popisující zotavení textilií.

4.1 Inovovaná metodika měření mačkavosti plošných textilií

Prvním cílem byla inovace metody měření mačkavosti pomocí úhlu zotavení. Navržené inovace (úprava tvaru vzorku, princip měření úhlu ve dvanácti směrech pootočení vzhledem k osnově, snímání úhlu zotavení pomocí web kamery) přispěly ke zdokonalení této metody. Byly porovnávány výsledky měření úhlu zotavení inovované metody s klasickou metodou UMAK a s metodou nošení.

Experiment nošení odhalil nedostatky současné klasické metody měření úhlu zotavení na přístroji UMAK, a naopak, poukázal na velmi dobré simulační vlastnosti inovované metody. Potvrdil, že mačkavost je anizotropní vlastnost a její měření pouze pro směry osnovy a útku není dostačující a nepopisuje reálné zmačkání textilií. Proto je použití metody UMAK v některých případech nedostačující.

Dalším přínosem inovované metody je možnost zaznamenat úhel zotavení již v první vteřině po odlehčení, tzv. experimentálně stanovit skokový úhel zotavení, který byl dosud určován pouze výpočtem, který vychází z úhlu zotavení změřeného v páté a šedesáté minutě relaxace vzorku. Bylo potvrzeno, že experimentálně zjištěný okamžitý (skokový) úhel je ve skutečnosti průměrně o 15 % nižší než okamžitý úhel stanovený výpočtem dle Sommerova vztahu. Z toho plyne, že dosavadní výpočty neplnohodnotně popisovaly elastické zotavení a rychlost zotavení v počátku relaxace, což jsou důležité parametry pro hodnocení mačkavosti textilií.

Zkoumání anizotropie a její znázornění pomocí polárního diagramu je dalším výstupem této práce. Anizotropní mačkové chování bylo ovlivněno množstvím vazných bodů v místě ohybu textilie. Získané křivky v polárním diagramu měly tvar buď nesouměrné elipsy, který ukazuje na anizotropii, či tvar kružnice, ukazující na izotropní zotavení textilií. Z výsledků vyplynulo, že při srovnávání problémových textilií s podobným mačkovým chováním respektive úhlu zotavení lze jako nemačkovou označit textilii, která vykazuje symetrii, tedy izotropní chování úhlu zotavení.

Byl potvrzen vliv rozložení vazných bodů na mačkavost. Volnější struktura tkanin např. vlivem vazby keprové či atlasové předurčila textilie k vyšším hodnotám úhlu zotavení a také k anizotropnímu chování. Anizotropní chování úhlu zotavení bylo prokázáno jak pro složení textilií líc-líc tak i rub-rub, avšak tvary polárních obrazců zotavení byly sice pootočeny, ale po zprůměrování tvořily symetrický obrazec. Pravidelné provázání osnovních a útkových nití u vazby plátňové určují její velkou mačkavost. V diagonálních směrech byly hodnoty úhlu zotavení větší než ve směru osnovy či útku, čímž se ukázal sklon k anizotropnímu chování u této vazby. Mezi zotavením pro složení textilie líc-líc, nebo rub-rub se objevily pouze mírné difference, avšak křivka v polárním diagramu se zásadně lišila od elipsového tvaru např. keprové vazby.

Na základě experimentálního měření lze konstatovat, že pokud chceme vytvořit textilii s menší mačkavostí, počet osnovních a útkových nití by měl být podobný. Příliš velké rozdíly, nižší či převyšující počet útkových nití dostavu osnovy vede k větší mačkavosti textilie.

Materiálové složení je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících relaxační schopnost i anizotropii zotavení textilií a tím i výslednou mačkavost textilií. Největší rychlosti zotavení dosahují textilie na počátku relaxace (první dvě sekundy). Rozdíly rychlosti zotavení pro jednotlivé materiály jsou malé, ale přesto nejrychlejších časů dosahuje vlna a polyester, jakožto nemačkový materiál. V průběhu zotavení se relaxační rychlost zpomaluje a ustaluje, proto konečnou hodnotu mačkavosti textilií již zásadně neovlivňuje. Materiály s dobrými elastickými vlastnosti (vlněné, polyesterové tkaniny) vykazovaly nejmenší procento viskoelastické deformace a to 11 %, ale součet elastické a viskoelastické deformace patřil mezi největší. Z toho plyne, že nemačkavost textilií je především závislá na okamžitém zotavení, tzn. na elastické deformaci. Vyšší procento této deformace předurčuje textilií k malým trvalým deformacím a tím ke kvalitnějšímu estetickému vzhledu oděvu. Nemačkové textilie mají hodnotu elastické deformace až kolem 80 % a plastickou deformaci 5 až 10 %. Mačkové textilie dosahují polovičních hodnot elastické deformace, tzv. 40 % avšak 30 % až 50 % plastické deformace. Proto při návrhu tkaniny s nejmenší mačkavostí by bylo optimální maximalizovat procenta obou složek (elastické a viskoelastické) např. vhodnou vazbou či dostavou. Tato textilie se bude lépe vyrovnávat s deformací v průběhu nošení oděvu. V procesu relaxace oděvu, např. na ramínku, se v důsledku většího podílu viskoelastické složky bude textilie lépe a rychleji zotavovat.

4.2 Statistická analýza vícerozměrných dat a vytvoření regresního modelu pro predikci úhlu zotavení

Druhým cílem práce byla tvorba predikčního modelu mačkavosti. Pomocí vícerozměrné statistické analýzy metodou hlavních komponent byla nalezena vhodná kombinace vlastností textilií, která byla použita v predikci mačkavosti. Z provedené analýzy vyplývá, že devět původních sledovaných znaků lze zredukovat na dvě latentní proměnné, zvané hlavní komponenty PC1 a PC2. Do hodnoty první komponenty se promítají mechanické vlastnosti textilií a druhá komponenta souvisí s geometrickými vlastnostmi textilií. Obě dvě komponenty dohromady vysvětlovaly 96 % korelační matice a pouze 4 % byl šum. Z hlediska analýzy objektů lze pro reprezentovanou sadu bavlněných režných materiálů konstatovat, že vazba keprová K1/4 a pětivazný atlas vykazují podobné chování. Tyto materiály tvoří shluky jak v grafu komponentního skóre, tak v dendrogramech. Potvrzují to i podobné tvary ikonových grafů. PCA i korelační analýza potvrdily silnou negativní závislost úhlu zotavení na ohybových a smykových charakteristikách, respektive se zvětšující se hodnotou těchto charakteristik se zmenšuje úhel zotavení, což způsobí zvýšení mačkavosti textilie.

Pro predikci mačkavosti pomocí úhlu zotavení lze pro podobnou skupinu testovaných textilií doporučit lineární regresní modely pod označením C vyjádřen rovnicí $y = b_0 + b_1 2HG5$, model H vyjádřen rovnicí $y = b_0 + b_1 h + b_2 2HG5$, model J vyjádřen rovnicí $y = b_0 + b_1 h + b_2 B + b_3 2HG5$. Nebo vlastní lineární regresní model L7, který byl vyjádřen vzájemnou relací ohybové tuhosti a smykového momentu hystereze při smyku 5° s tloušťkou textilie, vyjádřen rovnicí $y = b_0 + b_1 (B/h)^{1/2} + b_2 (2HG5/h)^{1/2}$. Z porovnání hodnot RMSC, R_p , R^2 , AIC a MEP je zřejmé, že modely představují poměrně kvalitní predikci chování mačkavosti textilie ($R^2 = 0,88$), ale také stabilitu, která se projevuje dobrým predikovaným koeficientem korelace ($R_p = 0,68$). Funkčnost modelu (jeho predikční schopnost) byla potvrzena další zkušební sadou režných tkanin označených jako M25–M32. Maximální chyba predikce optimálních regresních modelů C a L7 se pohybovala kolem 8 % a průměrná chyba byla kolem 5 %. Vytvoření univerzálního predikčního modelu vyžaduje další výzkum. Je třeba proměřit další sady materiálů rozdělených např. dle suroviny: na bavlnářské, hedvábnické, lnářské a vlnářské a pro každou skupinu hodnoty regresních koeficientů zpřesnit.

4.3 Reologická studie procesu zotavení textilií

Třetím cílem bylo modelovat průběh deformace vzniklé v textiliích pomocí vybraných reologických modelů. Využití těchto modelů vedlo ke snaze popsat viskoelastické chování textilií během zotavení po deformaci. Experimentálně získaný průběh deformace vycházející z křivky zotavení textilií byl aproximován pomocí pěti reologických modelů. Popisu chování reálných textilií se lépe přibližovaly složené reologické modely, které vznikly kombinací základních modelů a dalších elementů (viskózní tlumič a pružina). Nejlépe průběh reálného chování textilie modelovaly dva složené reologické modely a to M-K model (Maxwell–Kelvin) a T-K-V model (Thompson–Kelvin–viskózní píst). Potvrdili jsme, že model doporučený Dong, popisuje vhodně zotavení pouze na jeho začátku, ke konci se však chyba tohoto modelu zvyšovala a popis neodpovídal realitě. Potvrdili jsme, že tento model s přesností na 87 % (dle Dong na 90 %) popisuje skutečné relaxační chování textilií. Návrhem reologického modelu T-K-V se nám podařilo snížit chybu modelu v celém průběhu zotavení a predikční schopnost se zvýšila na 97 %. Na základě průběhu deformace (vycházející z křivky zotavení) byly odvozeny vztahy pro výpočet reologických parametrů zmíněných modelů, tj. modul pružnosti E , koeficient viskozity η , které mohou sloužit jako další faktory charakterizující textilií. Platí, čím větší je hodnota modulu E , tím menší je úhel zotavení a tím větší je mačkavost textilie i samotného oděvu.

Znalost vztahů mezi parametry (materiál, struktura, úprava) textilií a jejich reologickými vlastnostmi vede k hlubšímu poznání deformačního chování textilií. Mechanické vlastnosti textilií jsou důležité, avšak k interpretaci viskoelastického chování pomáhají reologické modely. Z hlediska praktické aplikace se tedy jedná o vhodnou aproximaci experimentálních dat konstitutivním vztahem. Získané poznatky mohou přispět k počítačové simulaci procesu zmačkání textilie.

5. Zhodnocení výsledků a nových poznatků

Cílem práce byla analýza anizotropie mačkavosti a modelování průběhu zotavení textilií pomocí reologických modelů. V rešeršní části disertační práce jsou shrnuty dosavadní výsledky výzkumných prací z různých univerzit a výzkumných center zaměřených na hodnocení mačkavosti plošných textilií. Rešerše poukazuje na fakt, že téma disertační práce je aktuální. Autoři se stále snaží o kvalitnější modifikaci jak metody měření mačkavosti, tak metodiky hodnocení mačkavosti plošných textilií. Publikace ukazují, že i navzdory dlouhodobému bádání není tato problematika dostatečně řešena, autoři poukazují na nedostatky klasických metod. Vzhledem k rozvoji výpočetní techniky jsou tyto metody a postupy zdokonalovány a komplexněji řešeny. Závěry vyplývající z této disertační práce jsou následující:

- Navržená inovovaná metoda hodnocení mačkavosti pomocí úhlu zotavení vhodně simuluje reálné zmačkání textilií během nošení, což se potvrdilo experimentem nošení.
- Experiment nošení potvrdil předpoklady o anizotropním chování textilií během zmačkání. Tím se ukázala důležitost hodnotit mačkavost ve více směrech pootočení. Výsledkem je obrazec polárního diagramu, který může sloužit pro kvalitativní analýzu velikosti úhlu zotavení a také k identifikaci symetričnosti zotavení u problémových a z hlediska mačkavosti k sobě blízkých textilií.
- Byl potvrzen vliv vazby a dostavy na anizotropii mačkavého chování textilií, resp. na změnu úhlu zotavení v závislosti na směru měření. Bylo prokázáno, že délka flotáže pozitivně ovlivňuje úhel zotavení, resp. pro delší flotáže zaznamenáváme nižší mačkavosti textilií.

- Výsledkem disertační práce je nová metodika, která umožnila zjistit, na základě záznamu průběhu zotavení, okamžitý úhel zotavení po odlehčení vzorku textilie tzv. skokové zotavení v první sekundě. Výsledkem je přesnější stanovení podílu elastické, viskoelastické a trvalé deformace vznikající během pomačkání. Toto zjištění umožní např. pro oděvy, na které jsou kladeny vysoké estetické požadavky, vybrat nejvhodnější textilii, která vykazuje velkou rychlost zotavení. Tím bude zaručeno, že tato textilie zaujme co nejdříve po odlehčení původní tvar.
- Podařilo se navrhnout predikční regresní vztahy pro odhad charakteristiky mačkavosti tkanin. Ukazuje se, že pro odhad velikosti úhlu zotavení je optimální využít lineární regresní model s parametry tloušťka (h) a smykový moment hystereze při smyku 5° (2HG5). Také se osvědčil vlastní lineární regresní model vytvořený vzájemnou relací ohybových a smykových charakteristik s tloušťkou textilie a to: $(B/h)^{1/2}$, $(2HG5/h)^{1/2}$. Jeho nezávislé proměnné ohybová tuhost (B) a smykový moment hystereze při smyku 5° (2HG5) byly změřené na přístroji KES. Dobrých predikčních výsledků pomocí uvedených regresních vztahů bude dosaženo za předpokladu, že se predikce bude týkat tkanin kvalitativně srovnatelných s těmi, které byly pro sestavení modelu použity.
- V disertační práci jsme předložili metodiku stanovení reologických parametrů z experimentální křivky zotavení. Doporučujeme pro popis zotavení textilií ze zmačkání reologický model tvořený sériovým zapojením pružiny, dvou Kelvinových modelů a viskózního tlumiče (T-K-V model). Tento model vykazoval s experimentálním měřením vysokou shodu v celém průběhu zotavení, která činila 97 %, čímž jsme zkvalitnili reologický model doporučený Dong (M-K model).

Návrhem nové laboratorní metodiky přispějeme k efektivnímu hodnocení mačkavosti textilií, na něž jsou kladeny vysoké reprezentační nároky. Na základě výsledků disertační práce je možné efektivně hodnotit vliv konstrukčních parametrů textilií, finálních úprav plošných textilií na jejich mačkavost s cílem snížit tuto nežádoucí vlastnost a zvýšit tím kvalitu oděvních výrobků. Předložená disertační práce řešila problém mačkavosti po stránce experimentální i teoretické o čem svědčí i návrh různých modelů. Vytvořené predikční a reologické modely umožňují sledovat a poznat chování plošných textilií během reálného nošení. Modely mohou být zpřesněny dle příslušné kategorie oděvního materiálu a dle použití oděvního výrobku. Bylo by také vhodné informovat kupujícího, např. formou piktogramu o stupni mačkavosti textilie.

Stanovené cíle disertační práce byly v plné míře splněny, získané poznatky byly publikovány v časopisech s impakt faktorem [KZ1] a v recenzovaných časopisech [KZ2], [KZ3], [KZ4]. Dílčí výsledky řešení byly také představeny na mezinárodních vědeckých konferencích v České republice [KZ5], [KZ6], [KZ7], [KZ8], v Thajsku [KZ9] a v Číně [KZ10].

Možnosti dalšího výzkumu

Při řešení disertační práce se objevily nové náměty, které mohou být předmětem dalšího výzkumu:

- Použití navrhnuté metodiky měření mačkavosti pro experimenty na textiliích (košiloviny) s aplikovanou nemačkovou úpravou, spolupráce s firmou Mileta.
- Zpřesnění regresních modelů pro predikci mačkavosti textilií s ohledem na příslušnou kategorii oděvního materiálu.
- Vytvoření databáze textilií s příslušnými mechanickými vlastnostmi doplněnými o reologické parametry s možností pro 3D simulaci oděvu.
- Automatizace způsobu měření úhlu zotavení, respektive návrh prototypu jednoúčelového přístroje.
- Dokončení studie o vlivu teploty a vlhkosti na mačkavost textilií.

6. Práce autora se vztahem ke studované problematice

Články v mezinárodních impaktovaných časopisech.

- [KZ 1] **Fridrichová, L., Zelová, K.** Objective evaluation of multidirectional fabric creasing. *The Journal of the Textile Institute*. 2011, Sv. 102, 8, stránky 719-725.

Články v mezinárodních recenzovaných časopisech.

- [KZ 2] **Přívratcká, J., Zelová, K.** Compression behaviour and elastic recovery of highloft materials (Kelvin-Maxwell model). *ACC Journal*. 2011, Sv. 17(A), stránky 89-92. ISSN 1803-9782.
- [KZ 3] **Fridrichová, L., Zelová, K., Knížek, R.** Influence of Structure of Material on Properties of Bending Rigidity and Creasing in Different Directions. *Advanced Science Letters*. 2013, Sv. 19, 2, stránky 384-387(4).
- [KZ 4] **Fridrichová, L., Zelová, K.** Influence of material structure on speed of recovery of textiles. *Advanced Materials Research*. 2013, Sv. 746, stránky 266-270. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.746.266.

Příspěvky či abstrakty v recenzovaných sbornících z konferencí ve světovém jazyce.

- [KZ 5] *A study on the relaxation behavior of fabric's crease recovery angle in the forming process.* **Zelová, K., Havelka, A. Liberec:** Technická univerzita v Liberci, 2007. 14th International Conference Strutex. ISBN 978-80-7372-271-5.
- [KZ 6] *Methods of measuring urease recovery angles of textiles.* **Zelová, K., Havelka, A., Nováková, S.** Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. 15th International Conference Strutex. ISBN 978-80-7372-418-4.
- [KZ 7] *Innovated metod of measuring the urease recovery angles of textiles.* **Zelová, K., Fridrichová, L.** Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. 16th International Conference Strutex. ISBN 978-80-7372-542-6.
- [KZ 8] *Modeling recovery curves of the material using a rheological model.* **Zelová, K., Fridrichová, L., Přívratcká, J.** Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011. 18th International Conference Strutex. ISBN 978-80-7372-786-4.
- [KZ 9] *Influence of Structure of Material on Properties of Bending Rigidity and Creasing in Different Directions.* **Fridrichová, L., Zelová, K., Knížek, R.** International conference on advances in materials science and engineering, Bangkok, Thailand, September 27-28, 2012.
- [KZ 10] *Influence of material structure on speed of recovery of textiles.* **Zelová, K., Fridrichová, L.** Asian Pacific Conference on Chemical, Material and Metallurgical Engineering (APCCMME 2013), May 22-23, 2013, Beijing, China.

Příspěvky či abstrakty v recenzovaných sbornících z konferencí v českém jazyce.

- [KZ 11] *K problematice mačkavosti plošných textilií.* **Zelová, K.** Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. SVOČ TUL. ISBN 978-80-7372-482-5.
- [KZ 12] *Mačkavost textilií.* **Zelová, K.** Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. Seminář doktorandů.
- [KZ 13] *Predikce křivky zotavení pomocí reologického modelu.* **Zelová, K.** Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. Seminář doktorandů.
- [KZ 14] *Studie ohybové tuhosti a mačkavosti plošných textilií.* **Zelová, K., Fridrichová, L.** Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011. Workshop pro doktorandy FS a FT TUL. ISBN 978-80-7372-765-9.

7. Literatura

- [1] **Sima, A. a další.** Strain dependency in wrinkling performance of butanetetracarboxylic acid and lubricant-treated cotton fabric. *Textile Research Journal*. 2012, Sv. 82, 9, stránky 899–910.
- [2] **Sochor, B.** Mačkovost tkanin a její měření. [autor knihy] J., Danielic. *Nová technika měření a zkoušení v textilním průmyslu*. Praha : SNTL, 1957, stránky 179-203.
- [3] **Salter, C.J. a Rocznio, A.F.** Lightweight wool garment wrinkle performance a wear experiment. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 1998, Sv. 10, stránky 50-63.
- [4] **ČSN EN 22313 - Stanovení mačkovosti pomocí dutého válce**. Praha : Český normalizační institut, 1994.
- [5] **ČSN 80 0871 - Zjišťování mačkovosti - schopnosti zotavení horizontálně složeného vzorku měřením úhlu zotavení**. Praha : Český normalizační institut, 1994. str. 7.
- [6] **ČSN 80 0819 - Zkoušení mačkovosti plošných textilií**. Praha : Český normalizační institut, 1994. str. 5.
- [7] **Fan, J.** The interrelationship between fabric crease recovery and pressing performance. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2001, Sv. 13, 5, stránky 368-375.
- [8] **Mihailovic, T.V., Nikolic, M.D. a Simovic, L.J.M.** Resistance to creasing of clothing wool fabric. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 1995, Sv. 7, 4, stránky 9- 16.
- [9] **Mihailovic, T. V.** Complex estimation of bending elasticity of hemp woven fabric after washing treatment. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2006, Sv. 18, 2, stránky 70-82.
- [10] **Nikolić, M.D, Sukovic, L.J.M a Mihailovic, T. V.** Multiaxial determination of the resistance to creasing of clothing wool fabric. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 1999, Sv. 11, 5, stránky 77-286.
- [11] **Shinohara, A. a Go, Y.** Anisotropy of crease recovery of textile fabrics. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*. 1962.
- [12] **Perpelkin, K.E., Neklyudova, S. A. a Smirnova, N. A.** Anisotropy of wrinkling of polyester, polyester-linen, and linen fabric. *Fibre Chemistry*. 2000, Sv. 32, 6, stránky 444 - 446.
- [13] **Geršak, J.** Study relationship between fabric elastic potential and garment appearance quality. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2004, Sv. 16, 1/2, stránky 238-251.
- [14] **Aliakbar, M. a Hadi, P.** Anisotropy in wrinkle properties of woven fabric. *Journal of the Textile Institute*. 2011. First published on: 15 February 2011 (iFirst).
- [15] **Sommer, H. a Winkler, F.** *Volume V: The Testing of Textiles*. Berlin: Springer-Verlag. *Die Prüfung der Textilien*. Handbook of Materials. 1960.
- [16] **Gonzales, E. J. a Rowland, P.** Recovery from Creasing and Musing of Cotton Finished with Experimental and Conventional Durable-Press Reagents. *Textile Research Journal*. 1981, Sv. 51, str. 631.
- [17] **Dong, X., a další.** A study on the relaxation behavior of fabric's crease recovery angle. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2003, Sv. 15, stránky 47-55.
- [18] *Creasing behavior of some woven materials made from combed yard type pool – an experimental investigation*. **Hristian, L., Lupu, I. G. a Cram, O.** Gabrovo : 2010. International Scientific conference 19-20 November .

8. Summary

The dissertation thesis is dealing with the design of an innovative methodics of creasing for the study of the anisotropy of angle recovery. It also deals with the analysis of viscoelastic behaviour of textiles after creasing. The work is also discussing about the influence of structural parameters of textiles, finishes and material composition on the anisotropy and on the value of the immediate viscoelastic recovery, and even on the total creasing. The innovative method of evaluation is compared with classic methods of evaluation of creasing and with the method of wearing. For stating the predictive model, the statistic analysis of multidimensional data, is used. The designed linear regression model for the prediction of creasing of textiles came out of the analysis of mechanical properties of textiles measured by the system of KES. The obtained experimental process of recovery of the textile is modeled by means of composite rheological models. Of the basic rheological elements and models, such combinations are recommended as suitable, which are able to model elastic, viscoelastic and even plastic deformations. It has been proved that creasing is an anisotropic property and the proposed steps were justified and they contributed to a higher quality description of the real creasing of textiles.

Vydala Textilní fakulta, Technické univerzity v Liberci
jako interní publikaci pod pořadovým číslem
DFT/3/2013 v počtu 20 výtisků