

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA PŘÍRODOVĚDNĚ HUMANITNÍ A PEDAGOGICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2011

RADIM DEJL

Technická univerzita v Liberci

FAKULTA PŘÍRODOVĚDNĚ-HUMANITNÍ A PEDAGOGICKÁ

Katedra: Chemie

Studijní program: Učitelství chemie pro 2. stupeň ZŠ, učitelství fyziky pro SŠ

Studijní obor: Fyzika – chemie
(kombinace)

VLASTNOSTI VYBRANÝCH SPECIÁLNÍCH VLÁKEN

PROPERTIES OF THE SELECTED SPECIAL FIBRES

Autor:

Radim DEJL

Podpis:

.....

Adresa:

Žitná 685

460 06, Liberec 6

Vedoucí práce: Ing. Jan Grégr

Konzultant: Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D., KTM FT TUL

Počet

stran	grafů	obrázků	tabulek	pramenů	příloh
58	6	64	11	38	4

V Liberci dne 10. prosince 2010

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA PŘÍRODOVĚDNĚ-HUMANITNÍ A PEDAGOGICKÁ

461 17 LIBEREC 1, Studentská 2 Tel.: 48535 2515 Fax: 48535 2332

Katedra: Chemie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(pro magisterský studijní program)

pro (diplomant) Radim Dejl

adresa: Žitná 685, 46006 Liberec

studijní obor (kombinace): Učitelství chemie pro 2. stupeň ZŠ, Učitelství fyziky pro SŠ

Název DP: **Vlastnosti vybraných speciálních vláken**

Název DP v angličtině: **Properties of the Selected Special Fibers**

Vedoucí práce: Ing. Jan Grégr

Konzultant: Ing. Miroslava Maršálková, KTM FT TUL

Termín odevzdání: 14.5.2010

Pozn: Podmínky pro zadání práce jsou k nahlédnutí na katedrách. Katedry rovněž formulují podrobnosti zadání. Zásady pro zpracování DP jsou k dispozici ve dvou verzích (stručné, resp. metodické pokyny) na katedrách a na Děkanátě Fakulty přírodovědně-humanitní a pedagogické TU v Liberci.

V Liberci dne

.....

děkan

.....

vedoucí katedry

Převzal (diplomant):

Datum:

Podpis:

Název DP: Vlastnosti vybraných speciálních vláken

Vedoucí práce: Ing. Jan Grégr

Cíl:
Studium vlastností a použitelnosti speciálních textilních vláken pro ochranu člověka.

Požadavky:
Prostudujte vlastnosti a přípravu speciálních textilních vláken pro použití k ochraně člověka před balistickým poškozením, ohněm a dalšími mechanickými nebo tepelnými nebezpečími ohrožujícími životní funkce. Odzkoušejte měření mechanických vlastností vybraných speciálních vláken. Pokuste se získat vzorky textilií vhodných pro daný účel. Prostudujte a ověřte praktické aplikace textilií ze speciálních vláken. Prodiskutujte chemismus molekulárních interakcí ve struktuře speciálních vláken v souvislosti s vlastnostmi, které zaručují možnost jejich využití pro ochranu člověka. Prostudujte možnosti predikcí vlastností vláken na základě jejich vnitřní chemické struktury.

Metody:
Studium literatury. Měření mechanických vlastností vláken. Praktické zkoušky získaných textilií ze speciálních vláken. Statistické zpracování získaných dat. Tvorba chemických modelů pro odhad mezimolekulárních interakcí a predikci vlastností vláken.

Literatura:

MILITKÝ, J.: Textilní vlákna. Učební text. TUL, Liberec, 1995
TOMKOVÁ, B.: Vláknové kompozity, Vlastnosti vyztužujících vláken II; Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní, 2006 : skripta.ft.tul.cz/data/2006-03-16/12-55-07.pdf
YANG, H.H.; Aramid Fibers, chapter 6, pages 249-283. Textile Fibers Department, E.I. DuPont de Nemours & Co. Inc, Richmond, VA (U.S.A.).
VAN KREVELEN, D.W.: Properties of Polymers, 3rd rev. ed., Elsevier, Amsterdam 1990, ISBN: 0-444-88160-3
BICERANO, J.: Prediction of Polymer Properties, 3rd ed., Marcel Dekker, 2002, 784 stran, ISBN: 0-824-70821-0

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 10. prosince 2010

.....
Radim Dejl

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád vyjádřil své poděkování všem, kteří mi s touto prací pomáhali a bez kterých by tato práce nevznikla, jelikož zasahuje do tolika oborů lidské činnosti, jejichž náročnost a odbornost vyžaduje týmovou spolupráci všech jednotlivců. Jmenovitě se stručným popisem a místem pracoviště si mé poděkování a uznání zasluhuje:

Ing. Jan Grégr, jako vedoucí této diplomové práce, který pohotově reagoval na můj prvotní zájem, a který mě od samého začátku povzbuzoval a podporoval k dlouhodobé práci. Nesmírně si vážím jeho osoby i jako odborníka přes materiálovou chemii. (Katedra chemie, TUL)

Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D., kterou obdivuji za její trpělivost se mnou a oceňuji její odborný, chápavý a vstřícný přístup ohledně textilních záležitostí. Vážím si všeho, co mě v daném oboru naučila. (Katedra textilních materiálů, FT TUL)

Radek Kysela, za poskytnutí mnoha vzorků vest a materiálů pro testování (E-ARMY.cz)

Ing. Gabriela Krupincová, za pomoc při získání materiálů pro balistické zkoušky a odborné literatury, a také za podporu ze strany Fakulty textilní, Katedry textilních technologií a Centra Textil II

Ing. Vladimír Kovačič (KTM, FT TUL) a **Ing. Jan Vencel** (VÚB a.s.), za podnětné rady a nápady pro testování textilií

Mgr. Martin Slavík, Ph.D., za dočasné zpřístupnění pokročilých chemických software a maximální podpory ze strany Katedry chemie TUL

Mgr. Jiří Šmída, Ph.D., za komplexní podporu ze strany Fakulty přírodovědně-humanitní a pedagogické TUL

Ing. Milan Heršálek, za poskytnutí standardizačních dohod NATO (Odbor obranné standardizace, Armáda České republiky)

Ing. Bohuslav Planka, CSc., za odbornou konzultaci v oboru kriminalistické balistiky (Kriminalistický ústav Praha, Policie ČR)

Ing. Pavel Solfronk, Ph.D., za pomoc při tváření duralového plechu pro balistické zkoušky (Katedra strojírenské technologie, oddělení tváření kovů a plastů, FS TUL)

Ing. Petra Jirásková, za propůjčení bavlněných cívek jako materiálu do pozadí balistických zkoušek (KTT, FT TUL)

nprap. Julie Karpíšková, za pomoc při kontaktování expertů v oblasti balistiky (Okresní ředitelství Police ČR v Liberci)

Václav Blaschke, za pomoc při testování vzorků střelbou, zapůjčení chronometru, zbraní a poskytnutí prostoru místní venkovní střelnice

Ing. Jana Grabmüllerová, za zpracování snímků vláken na rastrovacím mikroskopu (KTM, FT TUL)

Ing. Jana Müllerová, Ph.D., za infračervenou spektrální analýzu vzorků tkanin (KCH, TUL)

Ing. Jana Salačová Ph.D., za průpravu k optickému mikroskopu pro obrazovou analýzu (KTM, FT TUL)

Ing. Eva Radiměřská, za poskytnutí vzorků materiálů nosných systémů balistické ochrany jednotlivce a odborné konzultace v dané oblasti (S.P.M. Liberec s.r.o., přední dodavatel výstroje pro Armádu ČR)

Také děkuji všem nejmenovaným, kteří mi s touto prací jakkoli i nepřímo pomohli nebo mi alespoň nekladli překážky v jejím uskutečnění.

Radim Dejl

Tato diplomová práce se zabývá speciálními vysoce výkonnými materiály používané pro ochranu člověka. Je především zaměřena na bariérové textilie, vlákna a polymery umožňující aplikace jako jsou neprůstřelné vesty, ochranné rukavice, helmy apod., které chrání uživatele před mechanickým a chemickým poškozením. Jsou zde navrženy a vyzkoušeny metody, které dokážou rozlišit vhodnost materiálu pro balistické použití. Diskutována je hlavně chemická podstata materiálu, která ho předurčuje k jeho použití. V diplomové práci jsou uvedeny výhody i nevýhody jednotlivých zkoumaných materiálů a praktické zkušenosti s dlouhodobým užíváním. Byly provedeny podrobné laboratorní analýzy získaných vzorků jednotlivých prostředků osobní ochrany, otestovány mechanicko-fyzikální vlastnosti podle českých státních norem a vlastní učiněné teoretické závěry ověřeny praktickými zkouškami balistických textilií reálnými ostrými zbraněmi podle standardizační dohody Severoatlantické aliance, která je normou pro všechny armády organizace NATO a veškeré ozbrojené složky členských států.

Klíčová slova: *speciální vlákna, polymery, Kevlar, predikce, balistické textilie, testování*

Annotation

This thesis deals with the special high-performance materials used to protect humans. It is primarily focused on the barrier fabrics, fibers and polymers to enable applications such as bulletproof vests (personal body armors), gloves, helmets, etc., which protects users against mechanical and chemical damage. There are suggested and tested methods that can distinguish the suitability of materials for ballistic applications. The chemical nature of the material is discussed which determinates its application. The advantages and disadvantages of all studied materials are mentioned in this thesis also with practical experience with long-term use. There were conducted detailed laboratory analysis of collected samples of personal protective equipment, tested the mechanical and physical properties according to Czech national standards, and the conclusions verified the theoretical results with practical testing of ballistic fabrics by sharp weapons in accordance with NATO Standardization Agreement, which is the norm for all the armies of NATO and all armed forces of the Member States.

Key words: *special fibers, polymers, Kevlar, prediction, ballistic fabrics, testing*

Annotation

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit den speziellen High-Performance-Materialien verwendet, um Menschen zu schützen. Es ist vor allem auf die Barriere Gewebe, Fasern und Polymere konzentriert, um Anwendungen wie kugelsichere Westen, Handschuhe, Helme, usw., die Benutzer schützt vor mechanischen und chemischen Schäden ermöglichen. Sie sind entworfen und getestet Methoden, die die Eignung von Materialien für ballistische Anwendungen unterscheiden können. Ferner ist die besondere chemische Beschaffenheit des Materials, die seine Verwendung abgestiegen ist. In dieser Arbeit werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Materialien studiert und praktische Erfahrung mit langfristigen Einsatz. Durchgeführt wurden detaillierte Laboranalysen der gesammelten Proben von persönlichen Schutzausrüstungen, testeten die mechanischen und physikalischen Eigenschaften nach tschechischen nationalen Normen und Schlussfolgerungen bestätigt die theoretischen Ergebnisse mit praktischen realen Tests von ballistischen Gewebe mit scharfen Waffen im Einklang mit der NATO Standardisation Abkommen, das die Norm für alle Armeen der NATO und alle bewaffneten ist Folder Mitgliedstaaten.

Schlüsselwörter: *Spezialfasern, Polymere, Kevlar, Vorhersage, ballistische Gewebe, Prüfung*

Anotación

Esta tesis trata de los materiales especiales de alto rendimiento para proteger a los humanos. Se centra principalmente en la barrera de tejido, las fibras y polímeros para permitir aplicaciones tales como chalecos antibalas, guantes, cascos, etc, que protegen a los usuarios contra los daños mecánicos y químicos. El trabajo ofrece métodos ya comprobados que permiten distinguir la idoneidad de los materiales para aplicaciones balísticas. Además de la naturaleza química particular del material, que es relegado a su uso. Esta tesis presenta las ventajas y desventajas de cada uno de los materiales estudiados y la experiencia práctica con el uso a largo plazo. Se realizaron análisis de las muestras recogidas de los equipos de protección personal, prueba de las propiedades mecánicas y físicas de acuerdo con las normas nacionales checas. Llegando a las conclusiones teóricas. Éstas fueron verificadas por las pruebas prácticas de tela balística con armas blancas, de acuerdo con las normas de la OTAN, considerada la norma para todos los ejércitos de la OTAN y todos los ejércitos de sus miembros.

Palabras clave: *fibras especiales, polímeros, Kevlar, la predicción, la tela balística, pruebas*

Аннотация

В данной дипломной работе изучены специальные высокоэффективные материалы для защиты человека. В первую очередь работа сосредоточена на изучении охранных текстилей, волокна и полимеры используются для изготовления пуленепробиваемых жилетов, перчаток и шлемов т.д., которые исполняют функцию защиты от механических и физических повреждений. Были разработаны и испытаны методы, на основе которых, можно сделать вывод о пригодности материалов для использования в баллистике. В основе использования материала лежит определенный химический состав. Так же описаны преимущества и недостатки всех исследованных материалов, а так же практические возможности при длительном применении. В соответствии с стандартами НАТО проведения эксперимента с острым оружием, были применены полученные теоретические результаты на основании практических опытов. Данные результаты соответствуют нормам для всех армий НАТО и вооружений союзных государств.

Ключевые слова: *специальные волокна, полимеры, кевлар, прогнозирование, баллистической ткани, тестирование*

OBSAH

OBSAH.....	7
1 ÚVOD.....	8
2 TEORETICKÁ ČÁST.....	9
2.1 Historie, charakteristika a aplikace vybraných speciálních vláken a polymerů	9
2.2 Typické parametry materiálů ze speciálních vláken	11
2.3 Polyamidy a aromatické polyamidy	12
2.4 Polyethylenová vlákna	14
2.5 Ostatní speciální vlákna.....	15
2.6 Kevlar	17
2.6.1 Typické vlastnosti polymeru.....	17
2.6.2 Příprava polymeru, anizotropní chování, strukturní prostorové modely	18
2.6.3 Spřádání vlákna, typy kevlarových vláken.....	21
2.6.4 Typické vlastnosti vlákna	23
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
3.1 Teoretický základ experimentů.....	24
3.1.1 Simulační metody predikovaných vlastností polymeru	24
3.1.2 Analýza testovaných vzorků.....	25
3.1.3 Laboratorní mechanicko-fyzikální testování vzorků	26
3.1.4 Balistické zkoušky vybraných textilií	27
3.2 Prostředky experimentů.....	28
3.2.1 Modelovací a vizualizační programy	28
3.2.2 Zkušební textilní přístroje mechanicko-fyzikálních vlastností.....	32
3.2.3 Přístroje a zbraně pro balistické zkoušky	33
3.3 Metody a experimentů.....	34
3.3.1 Základní parametry a vlastnosti polymeru	34
3.3.2 Základní parametry a vlastnosti vlákna.....	36
3.3.3 Základní parametry a vlastnosti tkaniny	37
3.3.4 Balistická odolnost tkaniny	40
3.4 Diskuze zjištěných a naměřených výsledků	42
3.4.1 Výsledky studovaných polymerů.....	42
3.4.2 Výsledky studovaných vláken	47
3.4.3 Výsledky analyzovaných textilií.....	50
3.4.4 Výsledky balistických zkoušek.....	52
4 ZÁVĚR.....	54
5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	56
6 SEZNAM PŘÍLOH.....	59

ÚVOD

Již od pradávna měl člověk touhu věci poznávat, vyrábět, zkoumat a zkoušet, co vše vydrží. Vše co nás ve světě obklopuje je vyrobeno nebo se skládá z nějakého určitého typu materiálu, který je buď charakteru přírodního, nebo syntetického. Jelikož nám v posledních staletích docházejí nápady, jak efektivněji využívat přírodní materiály nebo potřebujeme materiály s mnohonásobně vyššími parametry, než jsou v přírodě nutné, snažíme se je připravit a následně vyrobit uměle. Je pravdou, že často využíváme přírodních zdrojů, jako jsou minerály nebo fosilní zdroje. Ať tak či onak, pokaždé když máme v úmyslu vyrobit jakoukoliv věc, přijdou v dnešní době vhod na řadu znalosti z oboru chemie.

Budeme-li k sobě upřímní, musíme uznat, že bez chemické podstaty ve skutečnosti nic kolem nás neexistuje a že klasická fyzika popisuje pouze jevy z makroskopického hlediska. Půjdeme-li však více do hloubky problémů materiálové chemie, poznáme, že na „nekonečném“ konci poznání se ve fyzikálním světě částic setkávají teorie s chemickým pohledem molekul a atomů a dávají vzniku tzv. kvantové fyzice a molekulární mechanice, které oba směry spojují v jeden celek. Přesto si můžeme dovolit hledět na materiál přímo z chemického pohledu, jelikož nepracujeme zatím s exotickými částicemi, ale stále na úrovni molekul, atomů a elementárních částic jakou jsou např. elektrony.

Existují dva přístupy, jak pozorovat a zkoumat nějaký materiál. Buď se na něj budeme dívat ze strany makrosvěta na základě mechanicko-fyzikálních vlastností a vyvozovat teorie opřené o jeho vnitřní elementární strukturu, anebo ho budeme zkoumat ze strany mikrosvěta, kdy budeme odhadovat na základě nám známé vnitřní struktury jeho mechanicko-fyzikální chování v makrosvětě. Již teď je zřejmé, že oba dva přístupy jsou zcela správné, jen ne každý je vhodný pro specifický účel výzkumu. Budeme-li chtít navrhnout zcela nové materiály, patrně nejlepší cesta bude, když začneme nám dosud známé materiály zkoumat a analyzovat po všech stránkách. Tehdy je vhodné použít první výše popsany přístup. Máme-li dostatek informací opřených o základy vnitřní struktury, můžeme si dovolit navrhnout nový materiál a nejlepší postup patrně bude, když začneme složením a vnitřní strukturou materiálu. Na základě těchto poznatků a tohoto postupu můžeme odhadnout, jak se nový materiál bude ve výsledku chovat a jaké bude mít vlastnosti. Toto popisuje druhý výše popsany přístup a jedná se de facto o predikování vlastností materiálu tzv. predikci.

Materiálová chemie jako obor má jistě budoucnost a je zcela nepochybné, že nikdy nezanikne, dokud se lidstvo bude věnovat průmyslové výrobě. Jelikož je člověk extrémně zvědavý tvor se smyslem prozkoumávat neznámo, je zapotřebí mu zajistit maximální možnou ochranu jeho tělesné schránky, která je ve své podstatě velmi křehká. V tu chvíli přicházejí ke slovu high-end a high-tech výkonné, moderní a chytré materiály ve formě tkanin a kompozitů, které jsou často vyrobeny ze speciálních (syntetických) vláken. Jejich výjimečné vlastnosti využije právě člověk, který oproti jiným tvorům, rád překonává přírodní pravidla a získává schopnosti, se kterými se nenarodil. To je možná důvod, proč se takové materiály těžko v přírodě najdou a proč je zapotřebí je vyrobit uměle na základě znalostí chemie.

TEORETICKÁ ČÁST

2.1 HISTORIE, CHARAKTERISTIKA A APLIKACE VYBRANÝCH SPECIÁLNÍCH VLÁKEN A POLYMERŮ

Pomineme-li dobu, kdy člověk začal využívat materiály pouze k ochraně před nepříznivými vlivy počasí a posuneme-li se jen o trochu vpřed do doby, kdy začal bránit své teritorium a případně získávat nová území, mezi první vhodné materiály pro ochranu člověka patří zvířecí kůže. Dle použitých materiálů můžeme starověké ochranné oděvy (brnění) rozdělit takto: [1]

- 1) vrstvy kůže, tkanin, prošívané nebo vyztuženy plstí
- 2) brnění řetízového typu tzv. kroužkové košile
- 3) brnění z kovu, rohoviny, dřeva a jiných pevných a odolných materiálů

Na svoji dobu to byla brnění moderní, pokročilá, odolná a poměrně houževnatá (viz Příloha č.1). S ohledem na ergonomii dosáhli v tomto oboru nejvyššího stupně starověcí Římané, a co se týče nejvyšší odolnosti na úkor ergonomie (těžká, nepohodlná brnění) dosáhly určitého pokroku v metalurgii středověké státy rozprostírající se od území dnešního Německa až po Anglii.



Obr. 1: Kožené brnění



Obr. 2: Římské nerezové brnění



Obr. 3: Gotické brnění

Jako první, kdo využili přírodní vlákno, hedvábí, což je vlastně biopolymer z chemického pohledu, pro ochranné účely, byli středověcí Japonci [1]. Jejich nejelitnější a nejváženější bojovníci, samurajové, nosili více-vrstvené hustě tkané hedvábné ochranné obleky. Otázkou je, na kolik byl tento ochranný oděv účinný, uvědomíme-li si, že nejodolnější, nejpevnější a nejostřejší meče již od pradávna vyráběli právě japonští zbrojníci. Vzhledem k povaze stylu boje v daném regionu však tento ochranný oděv smysl měl. Stejně jako v Asii tak i v Evropě ztratilo brnění na významu s nástupem zbraní využívajícího střelného prachu a pojem „brnění“ se opět začal objevovat až po několika staletích začátkem 20. století. Zde je bohužel patrné, že vývoj zbraní je mnohem dále vpředu, než vývoj ochranných prostředků a nových materiálů chránících před jejich účinky.

Kromě experimentů s plátovou zbrojí během 1. sv. války (viz Příloha č.1, obr. 2) a pokusů několika jednotlivců se pojem neprůstřelné vesty začal objevovat až ve 30. letech 20. století. Souviselo to především s počátkem výroby syntetických vláken, zejména Nylonu® (polyamid 66) společnosti DuPont. V boji proti organizovanému zločinu pomáhaly agentům FBI těžké vesty vyrobené v kombinaci kovových plátu a nylonové textilie. Byly schopné odolat pistolovým projektilům, avšak na úkor mobility jedince [1]. Mimo to během 2. sv. války vyvinula americká armáda pro posádky bombardérů létajících

nad Evropou první protistřepinovou vestu „flak-jacket“. Nebyla sice schopná odolat střelám z pistolí a pušek, ale zajišťovala slušnou ochranu před šrapnely [1]. Byla poměrně těžká a jako materiál byl opět použit kov a nylon (viz Příloha č.1, Obr. 3).

Obr. 4: Protistřepinová vesta (USA, 60. léta)

Obr. 5: „Hard Body Armor“ (USA, 21. století)



Moderní neprůstřelná nebo proti-střepinová vesta se tedy zrodila během 2. sv. války. Od 50. let, od války v Koreji, do 60. let 20. století, do války ve Vietnamu se používal pro ochranné vesty různě upravený a vylepšený nylon. Zkoušely se i zajímavé kombinace s pláty na keramické bázi. Pojem „neprůstřelná vesta“ není příliš přesný, protože každá vesta jde nakonec prostřelit, čili anglická odborná literatura používá lépe vystihující termín „*body armor*“, který se dále dělí na „*hard body armor*“ a „*soft body armor*“, tedy něco jako tvrdá brnění a měkká brnění, eventuálně tělesný pancíř. Od 60. let 20. století mluvíme o moderních balistických vestách (s měkkou nebo tvrdou balistickou vložkou) případně o protistřepinových vestách. Díky inovaci polyamidu 66 vznikla již ke konci války ve Vietnamu protistřepinová vesta vyrobená kompletně z textilu a jako balistická vložka posloužilo několik vrstev hustě tkaného balistického nylonu (Fragmentation Protective Suit). Naprostou revoluci ve výrobě a používání balistických vest přinesl objev paraaramidového vlákna, s obchodním názvem Kevlar®, který je po chemické stránce tvořen z poly-para-fenylen-tereftalamidu. Mezi další speciální vlákna patří Nomex® (poly-meta-fenylen-tereftalamidu), Dyneema® (polyethylen o ultra vysoké molární hmotnosti), Zylon® (poly-para-fenylen-benzobisoxazol) aj., které se používají pro výrobu ochranných prostředků. Podrobněji se těmito materiály zabývají následující paragrafy.



Obr. 6: „Soft Body Armors“: Second Chance Ultima (Zylon) a Highmark Police (Kevlar)

2.2 TYPICKÉ PARAMETRY MATERIÁLŮ ZE SPECIÁLNÍCH VLÁKEN

Speciální vlákna mají obecně vysoký modul pružnosti a vysokou pevnost v tahu [2]. Společně s prodloužením vlákna při zatížení a jeho hustotou, patří tyto 4 veličiny mezi základní parametry vlákna.

- 1) *modul pružnosti* v tahu **E** udávaný v GPa (Youngův modul)
- 2) *pevnost v tahu* **σ** udávaná v GPa (případně v MPa)
- 3) *prodloužení* (deformace do přetržení) **ε** udávaná v %
- 4) *hustota materiálu* **ρ** udávaná v g.cm⁻³

Ačkoliv, jak je vidět, jednotky neodpovídají základním jednotkám soustavy SI, jejich odvozené tvary jsou již zažity a lze z nich vypočítat další užitečné vlastnosti (veličiny) charakterizující daný materiál bez nutnosti převodu jednotek.

Mezi takové veličiny patří např. relativní síla **P** nutná k přetržení vlákna nebo rychlost šíření zvuku **v** podél osy vlákna. Výpočtem podle vztahu (1),

$$P = \frac{\sigma}{\rho} \quad (1)$$

získáme relativní sílu přímo v jednotkách N.tex⁻¹, pokud zadáváme **ρ** (g.cm⁻³) a **σ** (GPa), které se běžně používají v textilní nebo materiálové chemii. Naopak pro výpočet rychlosti šíření zvuku **v** podél osy vlákna je nutné pevnost v tahu **σ** udávanou v GPa přepočítat na MPa. Takto upravené jednotky lze použít pro vztah

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

a výsledek nám vyjde přímo v jednotkách SI m.s⁻¹.

Všechny 4 základní parametry (**E**, **σ**, **ε**, **ρ**) lze laboratorně změřit nebo dle vzájemných vztahů vypočítat z naměřených hodnot. Tyto vlastnosti vypovídají o mechanických vlastnostech materiálu, ne však o vlastnostech založených na chemické podstatě látky.

Zaměříme-li se na bariérové materiály, v našem případě na textilie vyrobené ze speciálních vláken, je zapotřebí uvést další dva neméně důležité parametry. Podle Cunniffa [4] a Army Research Laboratory mají rozhodující vliv na balistickou odolnost dva hlavní parametry.

Tím prvním je **V₅₀**, což je experimentálně zjistitelná hodnota rychlosti letícího projektilu, u kterého je během penetrace materiálu zachyceno 50 % dopadající deformační energie. Jinými slovy, materiál zachytí polovinu projektilů zasahující dopadovou plochu, čili pravděpodobnost penetrace materiálu je 50 % [5]. Tuto rychlost lze dohledat v rozsáhlých materiálových databázích, z nichž speciální vlákna tvoří jen část, jelikož jsou v databázích uvedeny i jiné materiály jako např. různé druhy ocele a betonu.

Druhým parametrem je **U^{*1/3}** což je součin specifické pevnosti vlákna a rychlosti zvukové vlny, která se šíří vláknem [4]. V této hodnotě jsou zahrnuty všechny čtyři mechanicko-fyzikální veličiny (parametry) vztahující se k vlastnostem vlákna.

Rychlost $U^{*1/3}$ se vypočítá v m/s podle vztahu:

$$U^{*1/3} = \frac{\sigma \varepsilon}{2\rho} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

kde E je modul pružnosti v tahu v Pa, ε je relativní prodloužení v procentech, ρ je hustota vlákna v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a σ je pevnost v tahu v Pa.

Tato rychlost nám umožňuje porovnávat materiály resp. speciální vlákna mnohem lépe, než kdybychom je porovnávali jen podle pevnosti, modulu pružnosti a relativního prodloužení, jelikož tam, kde má jedno vlákno nižší pevnost, může být tento deficit dorovnán jiným parametrem např. modulem pružnosti. Tato skutečnost nám dovoluje porovnávat vlákna různých chemických podstat.

Doplňkové parametry materiálu mohou být jakékoliv teplotní a žáruvzdorné vlastnosti, které lze rovněž zjistit laboratorními metodami. Srovnání těchto parametrů vláken v tabulce v Příloze č. 4.

Mechanicko-fyzikální vlastnosti lze velmi dobře srovnávat, a tak je možné mezi sebou porovnávat i zdánlivě odlišné materiály jako ocel, sklo, azbest aj., které svoji chemickou podstatou a strukturou vůbec nesouvisí se syntetickými polymery. Lze tedy srovnávat vlastnosti vláken anorganických i organických, vytvořit tabulky a grafy, které pomohou porozumět dané problematice a vytvořit si základní materiálový přehled. Tyto tabulky a grafy jsou uvedeny v Příloze č. 4.

Chemické vlastnosti vyplývají z chemické podstaty daného materiálu a jeho struktury. Tyto vlastnosti lze velmi dobře vysvětlit na základě optimalizovaných prostorových a počítačových modelů zkoumaného materiálu. [3]

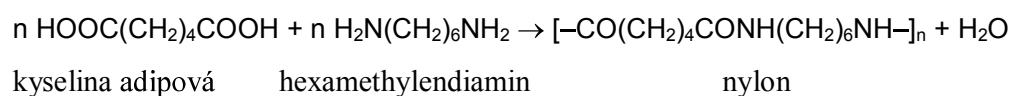
2.3 POLYAMIDY A AROMATICKÉ POLYAMIDY

POLYAMIDY

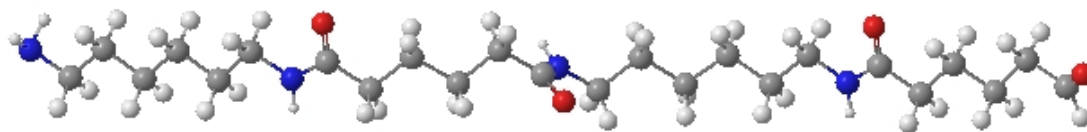
Jak již bylo uvedeno v předcházejícím článku, nylonové vlákno bylo jako první syntetický materiál použito k výrobě balistické ochrany. Nemělo však vhodné fyzikálně-mechanické vlastnosti, které by samy o sobě rozhodovaly o jeho použití k výrobě balistické vesty. Tvořilo nejčastěji ochranný obal, nosný systém, balistických plátů – pancířů (Flak Jacket nebo Fragmentation Protective Suit). O balistické odolnosti tak rozhodovaly především vlastnosti použitého kovu nebo keramiky.

Nylon se dnes vyrábí polykondenzací diaminů a polykarboxylových kyselin. Jedná se o polyamid typu PAD 66. Chemická reakce probíhá mezi kyselinou adipovou a hexamethyldiaminu, jak je vidět na rovnici níže.

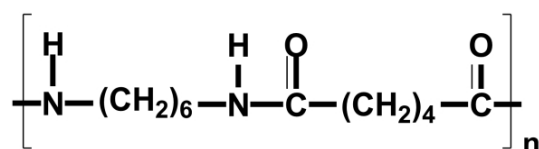
Syntéza polyamidu 66 (1)



Obr. 6: Prostorový model (tyčinky a kuličky) polyamidu 66 (ChemBio3D)



Obr. 7: Strukturní vzorec polyamidu 66 (ChemBioDraw)



Použití nylonu je velmi široké od užitkových předmětů (oblečení, batohy, pouzdra) až po lana. Je pevný, odolný, dobře tvarovatelný, s nízkou hustotou kolem $1,1 \text{ g.cm}^{-3}$. Není však příliš teplotně odolný a lze ho nevratně deformovat („spálit“) již při 80°C . V pevnosti v tahu dosahuje hodnoty až 82 MPa , což plně postačuje pro výrobu lan, speciálních popruhů, pevných šňůr apod., ale je naprosto nedostačující pro dnešní balistickou ochranu. Nejpevnější typ nylonu je balistický nylon. Na přelomu 60. a 70. let minulého století se tento typ používal pro výrobu balistických vložek protistřepinových amerických vest. Záhy byl však nahrazen aromatickým polyamidem. Balistický nylon, spolu s nylonovými tkaninami typu Cordura®, nachází uplatnění všude tam, kde je vyžadována ještě vyšší odolnost a pevnost než u klasického nylonu.

AROMATICKÉ POLYAMIDY

V 50. letech 20. století bylo zapotřebí nového a pevného materiálu, který by nahradil sice osvědčený ale svými vlastnostmi již nedostačující Nylon®. Výzkum započal po celém světě. Nejúspěšnější byli vědci v USA a v Japonsku. V roce 1965 mladá Američanka Stephanie L. Kwolek představila dva nové polymery. [5]

Stephanie Kwolek připravila několik typů aromatických polyamidů (aromatický polyamid = aramid), ale nejznámějšími a komerčně využívanými se staly PPTA (poly-p-phenylen terephthalamide) také známý jako Kevlar® a mírně odlišný v uspořádání molekul Nomex®. Oba dva polymery byly patentovány společností Du Pont. [5]

Tyto nové polymery mají mnoho unikátních vlastností. Z tekuté formy polymeru je možno několika sty mikrotrysek vytvářet vlákna, z vláken příze nebo rovingy (dlouhé rovné kabílky bez zákrutů) a z těch je možno utkat velmi pevné a odolné tkaniny.

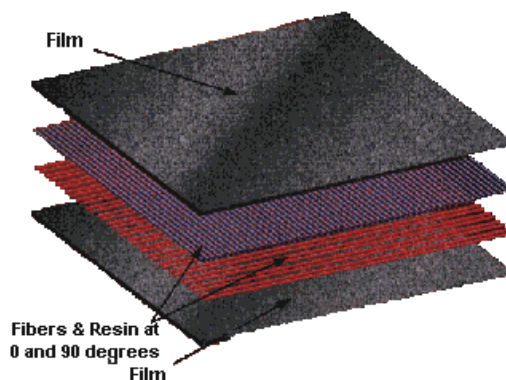
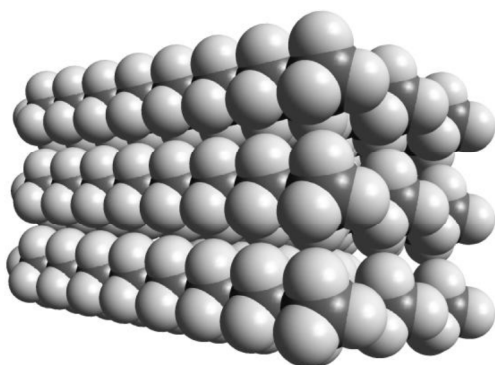
Nejdůležitější vlastností těchto tkanin je jejich pevnost. Ta je způsobena tím, že aromatické jednotky polymeru jsou vůči sobě paralelně orientovány a úhel, které mezi sebou svírají, dosahuje 173° (ideální by bylo 180°). Navíc chemická vazba mezi uhlíkem a dusíkem je tak pevná, že je zapotřebí $92,1 \text{ kJ.mol}^{-1}$ (22 kcal.mol^{-1}) k její rotaci a $184,2 \text{ kJ.mol}^{-1}$ (44 kcal.mol^{-1}) k jejímu přerušení. To jsou poměrně dosti velké hodnoty energií. [5] Zde je vidět souvislost mezi chemickou strukturou a výslednou pevností.

2.4 POLYETHYLENOVÁ VLÁKNA

Dyneema neboli Spectra je poměrně nový a moderní materiál, který v mnoha ohledech dokáže předčit starší aramidové vlákno vyráběné pod obchodními názvy Kevlar (Du Pont) nebo Twaron (Teijin).

Dyneema je obchodní název vlákna vyráběného holandskou společností DSM. Spectra je obchodní název americké společnosti Honeywell a jedná se o identické vlákno. Společnost DSM neměla zpočátku dostatek financí pro marketingové využití vlákna, takže souhlasila s prodejem licence a patentu americké společnosti, která zajistila odbyt a široké komerční využití. Obě společnosti se snaží vzájemně spolupracovat, avšak Honeywell se ohledně Dyneema zaměřil na produkt Spectra Shield. Vlákno má bílou barvu.

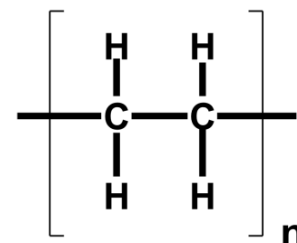
Jedná se o textilií z ultra-vysoko-molekulárního polyethylenového vlákna, kde se jednotlivé vrstvy vláken na sebe skládají a mezi sebou svírají úhel 90°. Vrstvy tkaniny jsou nakonec zataveny do několika vrstev polyethylenových fólií – termoplastických matric. Výsledný produkt, který se používá pro balistickou ochranu, se nazývá *Spectra Shield* (spectra štít). Vlákna Spectra je možno zpracovávat do tkaných i netkaných textilií.



Obr. 8: Srovnaná a optimalizovaná struktura UHMW-PE

Obr. 9: Složení tkaniny Spectra Shield

Po chemické stránce se jedná o dobře známý polyethylen (PE) se vzorcem $[-CH_2CH_2-]_n$. Společnosti Honeywell a DSM díky svým unikátním technologiím dokáží vyrobit velmi dlouhé řetězce PE (více než 100 000 jednotek) o vysoké molekulární hmotnosti, které se následně označují jako UHMW-PE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene). Navíc jsou molekuly polymeru perfektně orientované a srovnané, jak je vidět na obrázcích, což vede k unikátním mechanicko-fyzikálním vlastnostem vytvořeného vlákna. Opět je tu jasná souvislost s vnitřní chemickou strukturou.



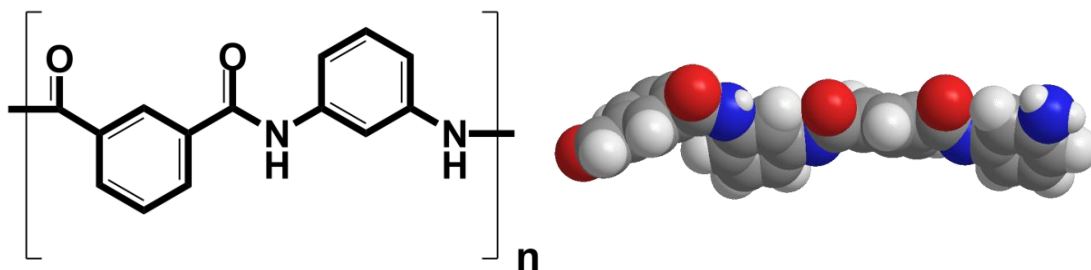
Mechanicko-fyzikální vlastnosti jsou následující: hustota ρ je $0,97 \text{ g.cm}^{-3}$, modul pružnosti v tahu E je 172 GPa, pevnost v tahu σ je asi 3 GPa, deformace do přetržení ε je 1,70 %. Možno srovnat s ostatními materiály v tabulce v Příloze č. 3.

Samotné vlákno plave na vodě – nenavlhá. Je až 15x pevnější než ocelové vlákno stejné délky a tloušťky. Balistické vesty vyrobené z tohoto materiálu jsou až 2,5x lehčí než vesty z aramidových vláken stejné třídy odolnosti, nenasakují vodu, jsou odolné vůči chemikáliím, otěru, UV záření, opakovaným a šikmým střelám. Pokud je příze kroucená je materiál ještě mnohem odolnější proti říznutí a proseknutí než aramidová příze. V extrémních mrazech do -100°C se pevnost dále zvyšuje. Neexistuje teplota do -150 °C, při které by byl nalezen bod křehnutí. Při hoření se neuvolňují nebezpečné, toxické sloučeniny dusíku jako u vest z aramidových vláken.

Jedinými nevýhodami je nižší tepelná odolnost nutnost povrchové úpravy. Již při teplotě nad 80 °C se snižují užité vlastnosti materiálu a při teplotě nad 145 °C dochází k nevratným deformacím (bod tání). Povrchová úprava je nutná pro dobrou soudržnost vláken a zvýšení smykové pevnosti.

2.5 OSTATNÍ SPECIÁLNÍ VLÁKNA

Vlákno Nomex® bylo představeno společností DuPont v témže roce jako Kevlar® a za jeho objevem opět stojí Stephanie Kwolek. Po chemické stránce se od kevlaru liší pouze v orientaci napojení řetězců na aromatické jednotky. Místo para orientace je peptidická vazba v meta orientaci mezi aromatickými jednotkami. Díky této nepatrné odlišnosti, má polymer zcela jiné vlastnosti než kevlar. Z vlákna Nomex se vyrábějí nehořlavé, pevné oděvy, kukly a rukavice, které nejčastěji používají protipožární jednotky a piloti. Vlákno není vhodné pro výrobu textilií chránících před mechanickým poškozením. Chemický název polymeru je poly-m-phenylen-tereftalamid.



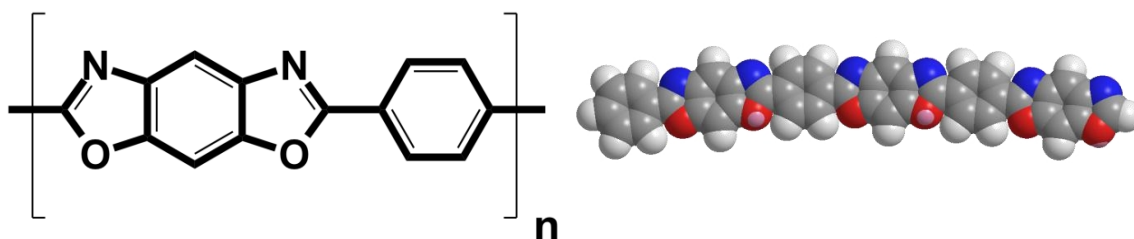
Obr. 10: Strukturní vzorec Nomexu (ChemBioDraw3D) Obr. 11: Kalotový model polymeru (Chem3D)

Twaron je po chemické stránce totožný s kevlarovým para-aramidovým vláknem. Byl vyvinut o něco později holandskou společností AKZO. Výrobní proces je odlišný od procesu společnosti Du Pont, což firmě AKZO umožnilo vyhrát dlouholetou patentovou válku. Navíc její postup při výrobě polymeru není karcinogenní na rozdíl od Du Pontu. Twaron má stejné využití jako kevlar – mechanická a balistická ochrana. Tento materiál je levnější a výrobci balistických vest jej tedy v Evropě upřednostňují.

Nejen Stephanie Kwolek a USA byly úspěšné v přípravě nových polymerů, ale rovněž i Japonští vědci Ozawa a Nakagawa. Nezávisle na S. Kwolek představili ve stejné době nově vynalezený polymer jiný typ PPTA (copoly-p-fenylen/3,4-difenylen ether tereftalamid) známý pod názvem Technora® HM-50 (patentováno společností Teijin). [5] Technora je velice pevný a odolný materiál, vydrží vysoké teploty až do 500 °C, kdy se rozkládá, a také je chemicky odolná vůči všem agresivním látkám. Vlákná se využívají pro výrobu lan,

opletů kabelů a kompozitů, které díky své odolnosti najdou uplatnění v armádě a v dopravním průmyslu. Model a vzorec Technora viz Příloha č.2, obr. 1 a obr. 2)

Zylon je obchodní název textilního vlákna s chemickým složením poly-fenylen-2,6-benzobisoxazol. Toto naoranžovělé polyoxazolové vlákno vyvinula společnost SRI International v 80. letech 20. století a od roku 1998 ho vyrábí japonská firma Toyobo Corporation. I když společnost uvádí, že je toto vlákno vhodné pro nesčetné konstrukční aplikace včetně balistické ochrany, mnoho výrobců balistických vest upouští od jeho výroby z důvodu mnoha reklamací v důsledku působení UV záření a snížení jeho odolnosti. Od roku 2005 je v USA zakázáno vyrábět balistické prostředky ochrany díky prokázanému snížení odolnosti vůči UV záření, což zapříčinilo smrt policejního důstojníka během přestřelky v Kalifornii. Deklarovaná životnost „neprůstelných vest“ nebyla ve skutečnosti 30 měsíců, jak uváděl výrobce.



Obr. 12: Strukturní vzorec Zylonu (ChemBioDraw3D) Obr. 13: Kalotový model polymeru (ChemBio3D)

Vlákno s obchodním názvem M5 je nejnovějším výtvozem na poli speciálních vláken. Jedná se o experimentální organické vlákno, kde je kladen důraz na vysokou pevnost a za jeho vynalezením stojí holandská společnost AKZO. Po chemické stránce se jedná o poly{2,6-diimidazo[4,5-b:4',5'-E]pyridinylen-1,4-(2,5-dihydroxy)fenylen}, což se z praktického hlediska velmi špatně pamatuje a používá se zkrácený název PIPD. Průmyslově se vlákno zatím oficiálně nevyrábí, ale jeho výroba měla začít již v roce 2009. Opět je toto vlákno navrženo pro výrobu balistických pancířů a součástí kompozitů vojenských a dopravních prostředků. Model a vzorec polymeru PIPD M5 viz Příloha č.2, obr. 3 a obr. 4)

Mezi speciální vlákna rovněž patří vlákna uhlíková, skleněná, siliciumkarbidová nebo kopolymer s obchodním názvem Vectran (viz Příloha č.2, obr. 5 a 6). Vlákna z těchto polymerů jsou velice pevná, dosahují i vyšších pevností v tahu, ale díky vyšší hodnotě prodloužení a křehkosti nejsou vhodná pro výrobu ochranných textilií. Avšak své uplatnění nacházejí ve výrobě kompozitů vhodných pro dopravní a stavební průmysl.

2.6 KEVLAR

2.6.1 TYPICKÉ VLASTNOSTI POLYMERU

Aromatické polyamidy jsou charakterizovány vysokou teplotou tání, vynikající tepelnou stabilitou a odolností vůči plameni, také nízkou rozpustností v anorganických a organických rozpouštědlech. Následující odstavce se věnují základnímu shrnutí typických znaků těchto polymerů.

HUSTOTA

Hustota nesubstituovaných polymerů jako PPTA, PPD-I atd. je asi kolem $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$. Substituované polymery jako skupina poskytují výrazně nižší hustotu pohybující se mezi $1,2$ a $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$. To znamená, že složitější polymery jsou hmotnostně lehčí. To je důvod proč se PPTA upravuje do formy kompozitního materiálu pro stavbu lodí a letadel.

TEPLOTA PŘECHODU DO PODOBY SKLA

Teplota přechodu do podoby skla je teplota, při které se sklo nebo polymer stávají křehkými. PPTA poskytuje $T_g > 375 \text{ }^\circ\text{C}$, zatímco jiné polymery (zvláště substituované a meta-orientované) poskytují pouze T_g mezi 255 až $260 \text{ }^\circ\text{C}$. To znamená, že Kevlar a Nomex jsou jedněmi z velmi teplotně odolných syntetických vláken.

TEPLOTA TÁNÍ

Existuje určitý rozpor mezi vědci o teplotě tání T_t . [5] Podle Takatsuka, PPTA, PPD-I aj. nevykazují žádný bod tání, ale Chaudhuri oznámil, že teplotu tání objevil okolo $530 \text{ }^\circ\text{C}$ pro PPTA. Tento rozpor může být zapříčiněn rozdílnou molekulární hmotností a molekulárním rozmístěním. To znamená, že vědci sice připravili stejný polymer, ale mírně odlišný (výsledný produkt nebo způsob jakým ho připravili).

TEPELNÝ ROZKLAD

Aromatické polyamidy jsou obecně velmi stabilní při vysokých teplotách. Často jsou charakterizovány termogravimetrickou analýzou (TGA), při které je poměr ztráty hmotnosti při dané teplotě přesně určený. PPTA je teplotně stabilní kolem $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotní stabilita většiny nesubstituovaných polyamidů je v literatuře udávána v rozmezí 400 až $500 \text{ }^\circ\text{C}$. To znamená, že Kevlar a Nomex jsou jedněmi z teplotně nejstabilnějších textilních materiálů, ze kterých je možné, především z Nomexu, ušít žáruvzdorné ochranné oděvy pro hasiče.

ROZPUSTNOST

Je velmi obtížné rozpustit aromatický polyamid díky jeho pevným řetězcům. Většina z nich může být rozpuštěna v silných kyselinách jako v kyselině sírové (H_2SO_4), fluorovodíkové (HF), v kyselině methansulfonové ($\text{CH}_3\text{-S(O)}_2\text{OH}$). Ostatní polymery (alifatické, nearomatické) na rozdíl od aromatických polyamidů jsou velmi dobře rozpustné v kyselině mravenčí a v m-krezolu. To znamená, že aromatické polyamidy jsou vhodné i pro výrobu ochranných chemických oděvů.

CHOVÁNÍ V ŘEDĚNÝCH ROZTOCÍCH

Chování v ředěných roztocích souvisí s molekulární viskozitou, což umožňuje měřit prodloužení a tuhost polymerního řetězce. Vědci porovnali PPTA s Nylonem (PAD 66) a zjistili, že PPTA je $37\times$ pevnější než Nylon [5].

CHOVÁNÍ V KONCENTROVANÝCH ROZTOCÍCH

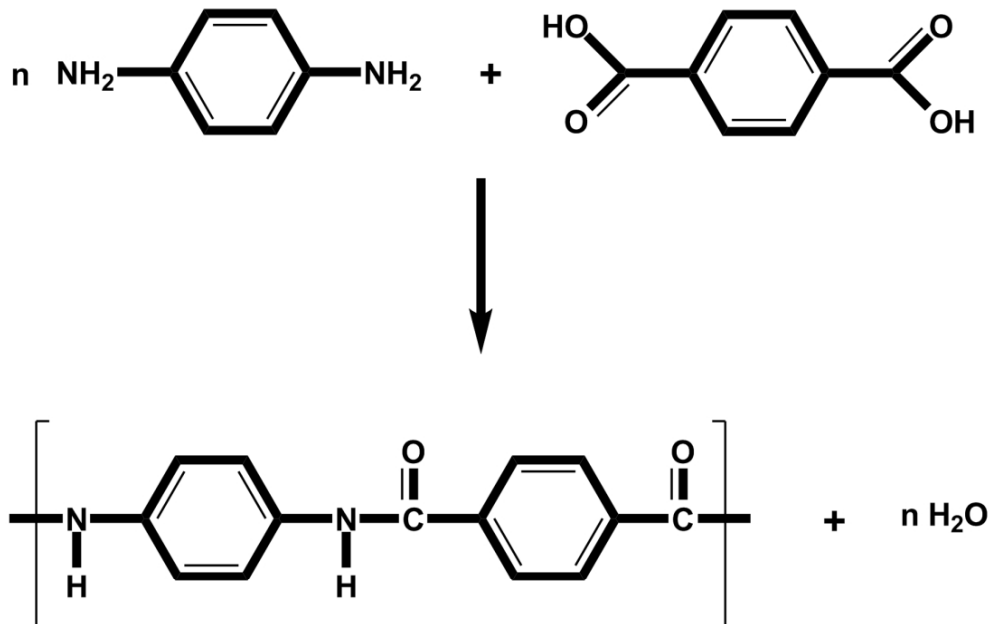
Chování v koncentrovaných roztocích se vztahuje k unikátním vlastnostem tohoto vlákna během jeho spřádání. Samotné spřádání probíhá ve 2 fázích – tekuté krystalické fázi a v izotropní fázi. Izotropní fáze je změněna teplotou a koncentrací ve fázi krystalickou, ve které je krystalická struktura vysoce orientovaná, což je nejlepší struktura pro spřádání.

2.6.2 PŘÍPRAVA POLYMERU, ANIZOTROPNÍ CHOVÁNÍ, STRUKTURNÍ PROSTOROVÉ MODELY

PŘÍPRAVA POLYMERU

Kevlarové vlákno komerčně vyrábí společnost DuPont již od roku 1972. Kevlar je PPTA, p-fenylen-tereftalamid (ang. p-phenylene terephthalamide) a Stephanie Kwolek jej připravila za nízké teploty polykondenzací p-fenylendiamidu (PPD) a tereftal chloridu (TCI) v dvojalkylovém amidovém roztoku. Syntézu lze provést i jinak, třeba podle této rovnice uvedené níže.

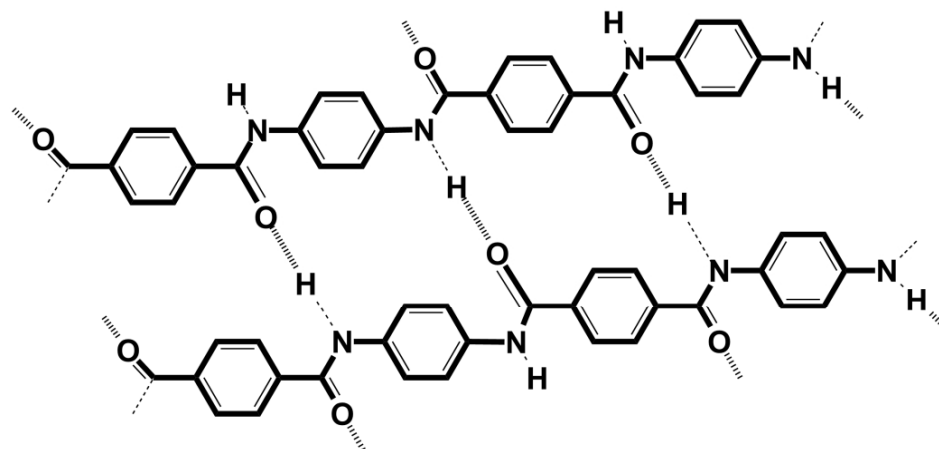
Syntéza PPTA z para-fenylen diaminu a kyseliny tereftalové (2)



Polymer je z této reakce izolován srážením s vodou, shromažďuje se a následně pere a suší. Stupeň polymerizace dosahuje čísla 84 a průměrná molekulová hmotnost je 20 000, řetězec dosahuje délky 108 nm.

Struktura Kevlaru odpovídá zasíťovaným dlouhým řetězcům poly-fenylen-tereftalamidu, které jsou nad a pod sebou propojeny vodíkovými můstky. Samotné

aromatické kruhy pak spojuje peptidická vazba. Zesíťovanost a vzájemná zaklesnutost řetězců je dobře patrná na prostorových modelech viz Příloha č. 2.



Obr. 14: Vodíkové vazby mezi řetězci zvyšují pevnost polymeru PPTA

ANIZOTROPNÍ CHOVÁNÍ

Stephanie Kwolek zjistila, že 10% roztok PPTA v 98% kyselině sírové vykazuje anizotropii [5]. Tento objev sloužil k porozumění tekutému krystalickému chování pevných polymerních řetězců, a také jako důležitý faktor v přípravě kevlarových vláken.

Anizotropní chování roztoku PPTA/H₂SO₄ je závislé na koncentraci polymeru. Tyčkové molekuly PPTA jsou v ředěném roztoku uspořádány nahodile. Když koncentrace roztoku vzroste, molekuly PPTA se k sobě začnou víc a víc „namačkávat“. Tím vznikne vysoce uspořádaná krystalická struktura.

Je výhodné celý proces chladit, protože tu existují 2 kritické faktory. Ten první souvisí s koncentrací – koncentrace roztoku PPTA/H₂SO₄ může být maximálně 12 %. Druhým faktorem je teplota – nesmí přesáhnout 120 °C.

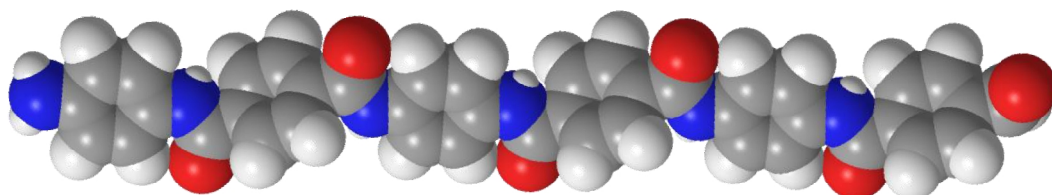
STRUKTURNÍ PROSTOROVÉ MODELY

K pochopení vlastností vyplývajících z vnitřního uspořádání polymeru je vhodné použít strukturní prostorové modely (viz výše obr. 6, 8, 11, 13). Tyto počítačové struktury lze vytvořit v různých programech a následně studovat jejich vlastnosti na základě simulačních výpočtů a optimalizací. Optimalizace se děje na základě několika set až tisíc opakování různých konfigurací modelu, u kterého se vypočítává, na základě např. minimální energie modelu dle Molekulární Mechaniky 2 (MM2), nejstabilnější a nejpravděpodobnější uspořádání všech atomů molekuly, které se s největší pravděpodobností (přes 90%) blíží reálné struktuře.

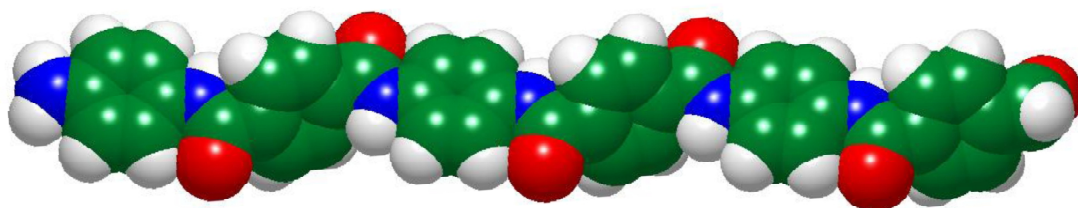
Je-li model dostatečně optimalizovaný, je následně možné použít výpočty pro zjištění základních chemicko-fyzikálních vlastností (sumární vzorec, molární hmotnost, hustota, molární objem, povrchové napětí, index lomu, počet rotace schopných vazeb aj.) nebo termodynamické vlastnosti (teplota varu, teplota tání a tuhnutí, kritický tlak a teplota, Gibbsova volná energie aj.). Základem všeho je vytvořit strukturní vzorec alespoň monomeru v kreslicím programu např. ACD Chemskech [10] a zoptimalizovat ho. Lepší

strukturní vzorce umožňuje vytvářet program ChemBioDraw (viz výše obr. 7, 10, 12, 14). Pro pokročilejší práci s prostorovými modely je pro zobrazení vhodnější použít např. ViewerLite nebo DS Visualizer od společnosti Accelrys. Nejlepší možnosti anejvíce funkcí však nabízejí placené programy z balíku ChemBio Office od společnosti CambridgeSoft [7,8] a program Molecular Modeling Pro od společnosti ChemSW [9]. Více o těchto programech a práci s nimi je k nalezení v kapitole 3, Experimentální část.

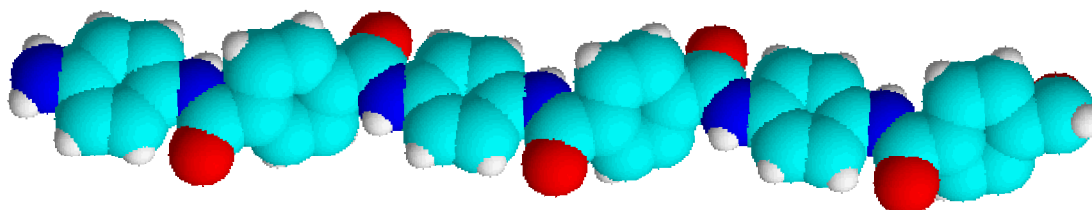
Prostorové modely polymeru PPTA po optimalizaci programem. Rozdíly v zobrazení a optimalizaci jsou patrné (stejný výchozí bod polohy modelu, základní nastavení zobrazení). Kevlar je zde zobrazen se 3 základními jednotkami – monomeru.



Obr. 15: Polymer PPTA (kalotový model) – ChemBio3D Ultra 11.0



Obr. 16: Polymer PPTA (kalotový model) – Molecular Modeling Pro 6.3.3



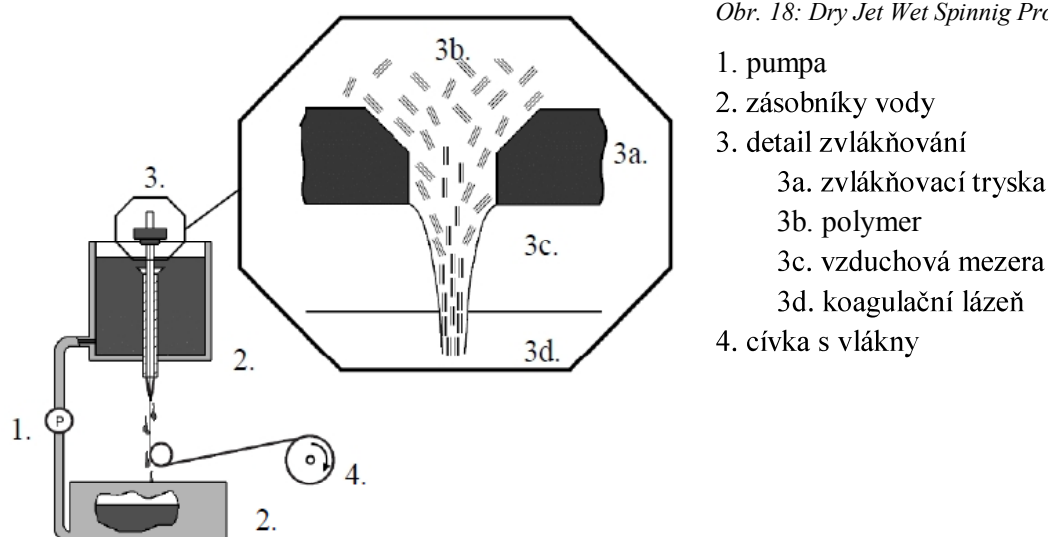
Obr. 17: Polymer PPTA (kalotový model) – ACD ChemsSketch 12.0

2.6.3 SPŘÁDÁNÍ VLÁKNA, TYPY KEVLAROVÝCH VLÁKEN

SPŘÁDÁNÍ VLÁKNA

Herbert Blades, jak uvádí Yang [5], vynalezl zvláštní proces spřádání vlákna označovaný jako „dry jet wet spinning process“, který dokázal z anizotropního aramidového roztoku vytvořit vlákno. Vlákno lze spřádat za mokra i za sucha. Přístroj pracuje následovně. Roztok je vytlačen otvorem zvlákňovací trysky přes vzduchovou mezeru přímo do srážecí lázně. Vysrážené nitky se dále perou, neutralizují a suší do formy vysoce pevných vláken s vysokým modulem.

Tento proces má však několik problémů vyplývajících ze své podstaty. Za prvé se musí zabránit tomu, aby zvlákňující tryska zevnitř nezamrzla. Za druhé musí být roztok pro zvlákňování ihned vystaven sraženině, jakmile je vytlačen ze zvlákňující trysky. To zabrání tomu, aby se proces zvlákňování ukončil. Stále tu jsou další řídicí problémy s mokrým spřádáním. Metoda „dry jet wet spinning process“ umožňuje s vyšší teplotou roztoku použít vyšší koncentraci roztoku. Navíc vzduchová mezera umožňuje při vytlačení roztoku plně vytážení vlákna a vytvořit tak vysoký stupeň molekulární orientace.



TYPY KEVLARŮ

Zvyšování teploty umožňuje během spřádání PPTA zvýšit stupeň krystalové orientace. Díky různým možnostem tohoto spřádání, s ohledem na maximální výrobní teplotu procesu 120 °C, lze vytvořit několik typů kevlarových vláken a následně přízí.

Existují 3 základní typy kevlarových přízí: Kevlar, Kevlar 29, Kevlar 49 (další jsou Kevlar 129, Kevlar 149 a Kevlar KM2). Tyto produkty se od sebe liší svojí lineární hustotou, tahovými vlastnostmi a konečným použitím.

KEVLAR 29

Používán je především v aplikacích, kde je kladen požadavek na vysokou pevnost. Je vhodný pro balistické účely jako ochrana před letícími projektily. Také nalézá

uplatnění v kompozitních pancířích, kde plní funkci tepelného štítu. Velkou část produkce zaujímá výroba lan a rybářských sítí, kde slouží jako výztuha pryžových materiálů. [1]

KEVLAR 49

Vyznačuje se vyšším modulem pružnosti a nižším prodloužení při přetrhu než Kevlar 29. Vysoký modul, nízká hmotnost, vynikající odolnost vůči poškození, tlumení vibrací předurčuje vlákno pro použití při výrobě moderních kompozitních materiálů v leteckém, kosmickém, loďařském a automobilovém průmyslu. [1]

KEVLAR 129

Vyniká vysokou houževnatostí a pevností v tahu. Využití nachází především při výrobě balistických materiálů [1]. V současné době se uvažuje, že jej nahradí Kevlar KM2 s vyššími odolnostními parametry.

Mimo to existuje i Kevlar 119, který poskytuje nejvyšší elasticitu ze skupiny kevlarových vláken, což se projevuje lepší odolností proti únavě materiálu a vyšší rozměrové stabilitě. Materiál je vhodný pro produkci hnacích řemenů a pneumatik vystavovaných extrémní zátěži. Materiál se nepoužívá pro výrobu ochranných prostředků. Avšak zvláštní typ vlákna, které se používá pro výrobu ochranných, střeleckých, taktických rukavic, je Kevlar 100, které je možno obarvit, nejčastěji černým barvivem [1]. Ostatní kevlarová vlákna nelze obarvit.

Lineární hustota se měří v jednotkách denierech, jako u jiných textilních vláken, což je hmotnost v gramech 9000 m dlouhých vláken nebo v jednotkách tex, což je hmotnost v gramech 1000 m dlouhých vláken. Kevlarové příže jsou dostupné v hodnotách 1500, 2250 a 3000 denier (1670, 2500 a 3333 dtex). Používají se jako materiál pro výrobu ochranných oděvů (neprůstřelné vesty a jiné ochranné oblečení), ochranné vinutí kabelů, kompozitů a různých vyztužených konstrukcí. Příže Kevlar a Kevlar 29 mají podobné tažné vlastnosti, zatímco příže Kevlar 49 má tyto vlastnosti daleko vyšší, zejména pak vyšší modul pružnosti v tahu a vyšší stupeň krystalové orientace.

Kevlarová drť je modifikovaný produkt s vysokým obsahem malých kousků vláken. Používá se jako kompozit v aplikacích jako jsou konstrukce letadel, lodí a pancéřování vozidel.

Všechny druhy kevlarů, a potažmo p-aramidů, jsou žluté, což je způsobeno vazbou mezi uhlíkem a dusíkem ve struktuře polymeru. Tento charakteristický rys se vyskytuje pouze u para orientovaných aramidů. U metha-aramidů se toto nažloutlé zabarvení nevyskytuje. Vlákna Nomexu a Technory jsou bílé.



Obr. 19: Žárovzdorné vysoce pevné lano z Technory (bílé)

Obr. 20: Extrémně pevné a odolné lano z Kevlaru (žluté)



2.6.4 TYPICKÉ VLASTNOSTI VLÁKNA

DENIER VLÁKNA, JEHO VELIKOST A MĚRNÁ HMOTNOST

U většiny kevlarových vláken se udává hodnota 1,5 denier na vlákno (1,7 dtex). Tyto vlákna mají na příčném řezu nominální průměr 12 μm . U vláken typu 2250 denier Kevlar a 2130 Kevlar 49 se udává hodnota 2,25 denier (2,50 dtex). Měrná hmotnost kevlarových vláken se v průměru udává 1,44 g/cm^3 , což je vlastně hustota vlákna.

MÍRA OBSAHU VLHKOSTI

Kevlarová vlákna mají problém s absorpcí vody. Slaná voda (mořská voda) je ještě problematictější, protože ji kevlarová vlákna nasakují mnohem více než vodu dešťovou. Mokrá kevlarová vlákna ztrácejí své užité vlastnosti.

Míra obsahu vlhkosti je běžně u kevlarových vláken 7 %. Kevlar 49 ji má dokonce nižší, jen 4 %. Mechanismus absorpce vody kevlarovými vlákny souvisí s nečistotami (např. obsah prachu) a kvalitou jejich struktury.

TAHOVÉ A TEPLTNÍ VLASTNOSTI

Tahové vlastnosti jsou: pevnost v tahu σ , modul pružnosti v tahu E a deformace do přetržení ε . Tyto vlastnosti je možno měřit v různých podmínkách prostředí jako např. vysoká/nízká vlhkost, suchý vzduch, vysoké teploty, dlouhodobé slunění. Existují 2 měřicí metody – Instron Tensile Tester (ITT) a ASTM Test. Vlákna přize jsou kroucena a tahána na speciálních přístrojích.

Kevlar lze použít v rozmezí teplot od $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teprve při $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ztrácí polovinu své pevnosti a úplně ji ztratí při teplotě $455\text{ }^{\circ}\text{C}$.

PLASTICKÉ TEČENÍ ZPŮSOBENÉ TLAKEM, STLAČITELNÉ A VEDLEJŠÍ VLASTNOSTI

Plastické tečení způsobené tlakem znamená, kdy materiál (v tomto případě vlákna) praskne, když v důsledku tlaku začal téci. Výsledné tečení za 10 000 h je menší než 0,5 %.

Vědci zjistili, že po působení asi 3% tlaku podél osy vláken, vlákna ztrácejí jen 10 % své pevnosti v tahu. To znamená, že vlákna Kevlaru 49 po deformaci stříhem dokáží být stále dostatečně odolná. Díky této vlastnosti je možno vyrábět ochranné kalhoty a rukavice pro dřevaře, protože motor řetězové pily se při průchodu kalhotami raději zastaví než, aby odolával pevnosti materiálu k jeho proříznutí.

CHEMICKÁ ODOLNOST, ODOLNOST VŮČI UV ZÁŘENÍ

Kevlar 49 odolává organickým i anorganickým kyselinám, zásadám a jiným chemikáliím. Jen horké a silné kyseliny (např. kys. chlorovodíková HCl) nebo silné zásady (např. hydroxid sodný NaOH) mohou poškodit vlákno a snížit tak jeho užité vlastnosti.

Snížení pevnosti z důvodu vystavení kevlarových vláken ultrafialovému světlu záleží na tloušťce a době expozice. Kevlar dokáže sám sebe stínit. Velmi slabá vlákna Kevlaru 49 byla vystavena floridskému slunečnímu záření po velmi dlouhou dobu, a za tuto dobu ztratila vlákna jen polovinu své pevnosti v tahu. Silnější výrobky jako např. lano o průměru 12,5 mm jsou vrchními vrstvami vláken uchráněny, a tak vykazují jen minimální ztráty své pevnosti.

TEPELNÁ OBJEMOVÁ STABILITA, HOŘLAVOST, DVOJLOM

Kevlarová vlákna disponují skvělou objemovou stabilitou. Ukazují se jako málo náchylná ke srážení, a to i při vysokých teplotách, takže odpadá problém s praním kevlarových produktů.

Kevlar ani jeho vlákna nepodporují hoření, ale zuhelnatí při teplotě 427 °C.

Dvojloz kevlarových vláken je příliš vysoký na to, aby se dal měřit běžnými metodami přesně. H. H. Yang vynalezl spektrometrickou metodu k jeho měření. [5]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 TEORETICKÝ ZÁKLAD EXPERIMENTŮ

Následující paragrafy tohoto článku se zabývají teorií k pochopení provedených experimentů. Pro zachování kompaktnosti a souvislosti textu byly zařazeny přímo do experimentální části. Jelikož se experimentální část skládá ze tří typově odlišných částí:

- 1) Teoretické vlastnosti vybraných polymerů a práce s počítačovými modely
- 2) Analýza a zkoušení textilních vzorků ze speciálních vláken
- 3) Balistické zkoušky vybraných textilií

jsou rozděleny jednotlivé části článku do tematických paragrafů podle povahy popisovaného experimentu.

3.1.1 SIMULAČNÍ METODY PREDIKOVANÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERU

Jak rychle postupoval vývoj počítačů (hardware), rychle se vyvíjely i programy (software), které se snažily ihned reagovat na nejnovější poznatky a teorie počítačového modelování a predikování vlastností. Přesto byly teorie a nové přístupy k řešení problémů o něco rychlejší než dané vyvíjené programy. Podle [11] existují v teoretické fyzice a chemii 2 rozdílné přístupy k počítačovému modelování:

- 1) MM – molekulově mechanický
- 2) QM – kvantově mechanický

Třetím přístupem je simulace, která využívá obou jmenovaných přístupů.

Molekulově mechanický popis (model) využívá k popisu silová pole (Force Field) a užívá rovnice klasické mechaniky. Molekula je chápána jako soubor bodových nábojů, kde rozlišujeme různé vazebné stavy a vazby mezi nimi. Na rozdíl od modelu kvantově mechanického, kde uvažujeme elektron explicitně. Je tedy nutné brát v úvahu charakteristické empirické silové působení (valenční vibrace, deformace dihedrálního úhlu atd.) současně s vazebným i nevazebným působením (van der Waalsovy interakce). Pro popis je možno použít model harmonického oscilátoru a jednotlivé parciální energie (vzájemného silového působení atomů a vazeb vazebného i nevazebného charakteru) sloučit

do celkové energie systému. Výhodou tohoto přístupu je jeho rychlost a účinnost. [11] Je tedy ideální pro biomakromolekuly nebo polymery.

Kvantově (vlnově) mechanický model popisuje chování elektronu v poli ostatních jader atomů. Zde využíváme vlnové rovnice, což je diferenciální rovnice se členy jako vlnová funkce Ψ_{el} , operátor elektrické energie Hamiltonián $\hat{H}$ a elektrická energie E_{el} . Popis vlnové funkce lze zjednodušit na jednoelektronové molekulové orbitály (MO) nebo na lineární kombinaci atomových orbitalů (MO LCAO). Výhodou přístupu QM je, že vyhovuje fyzikální představě, ale je nutné počítat s tzv. korelační energií, protože je nezbytné uvažovat interakce 2 elektronů s opačnými spiny.

Z těchto dvou základních přístupů je vytvořeno několik metod, které se dělí do třech skupin, z nichž nejvhodnější pro práci s prostorovými modely se zdá skupina semiempirická, kterou disponují počítačové programy ChemBioOffice (výrobce Cambridge Soft) a Molecular Modeling Pro (výrobce ChemSW). Oba disponují grafickým rozhraním GUI, možnostmi tvorby chemických struktur, ale především optimalizačními a výpočetními funkcemi MOPAC, GAMESS apod. O metodice a práce s modely polymerů viz paragraf 3.3.1 Základní parametry a vlastnosti polymeru.

3.1.2 ANALÝZA TESTOVANÝCH VZORKŮ

Byly získány textilní vzorky ze speciálních vláken, konkrétně rovingy (dlouhé kabílky bez zákrutu), pevnostní popruhy, tkaniny a měkké balistické vložky. Každý druh textilního vzorku byl podroben vizuální analýze, a pokud to bylo možné, byly z něj připraveny vláknenné preparáty určené pro mechanicko-fyzikální zkoušení podle normy ČSN 80 0200* [13].

Vybrané vzorky vláken byly pozorovány pod rastrovacím elektronovým mikroskopem, což umožnilo ověřit subjektivní rekonstrukci materiálu podle zabarvení vlákna a vzhledu tkaniny. Taktéž bylo provedeno měření příčných průměrů vláken za pomoci světelného mikroskopu. Získané hodnoty příčných průměrů vláken spolehlivě potvrdí, o jaký druh speciálního vlákna, přicházející v úvahu, se jedná. Tímto způsobem byla stanovena materiálová skladba.

Tkanina byla hodnocena vizuálně a její parametry změřeny podle normy ČSN EN ISO 5084 [14], aby byla stanovena tzv. základní charakteristika plošné textilie, která obsahuje následující:

- Plošnou měrnou hmotnost tkaniny ρ_s [kg/m²]
- Objemovou měrnou hmotnost tkaniny ρ_v [kg/m³]
- Dostavu osnovy a útku D_o , D_u [nití/10 cm]
- Pórovitost tkaniny p [%]
- Průměrnou tloušťku tkaniny h [mm]
- Vazbu tkaniny

POČETNÍ VZTAHY NUTNÉ PRO STANOVENÍ ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY PLOŠNÉ TEXTILIE

Plošná měrná hmotnost tkaniny je dána vztahem,

$$\rho_s = \frac{m}{l_0^2} \quad (4)$$

kde ρ_s plošná měrná hmotnost v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, m je hmotnost tkaniny v kg a l_0 je její délka v m.

Dostava se vypočte dle vztahu,

$$D = \frac{x}{s} \quad (5)$$

kde D je dostava o jednotce: počet nití na 10 cm.

Objemová měrná hmotnost tkaniny je dána vztahem,

$$\rho_v = \frac{m}{l_0^2 h} \quad (6)$$

kde ρ_v objemová měrná hmotnost v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, m je hmotnost tkaniny v kg, l_0 je její délka v m a h její tloušťka v m.

Pórovitost tkaniny se vypočte dle vztahu,

$$p = \frac{\rho_k - \rho_v}{\rho_k} \cdot 10^2 \quad (7)$$

kde p je pórovitost tkaniny v %, ρ_k je hustota vláken v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a ρ_v objemová měrná hmotnost v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

3.1.3 LABORATORNÍ MECHANICKO-FYZIKÁLNÍ TESTOVÁNÍ VZORKŮ ZJIŠŤOVÁNÍ PEVNOSTI A TAŽNOSTI VLÁKEN

Pro zpracování naměřených výsledků laboratorního měření pevnosti vláken se použijí matematické vztahy podle ČSN 80 0200*.

Průměrná pevnost $F_{\max}$ v mN se vypočítá podle vztahu:

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{\max,i} \quad (8)$$

kde n je počet jednotlivých hodnot, získaných při stanovení pevnosti, $F_{\max}$ pevnost v tahu i -tého vlákna v mN.

Poměrná pevnost vlákna F_{rel} v mN/tex se vypočítá podle vztahu:

$$F_{\text{rel}} = \frac{F_{\max}}{T_{\text{tl}}} \quad (9)$$

kde $F_{\max}$ je průměrná pevnost zkoušených vláken v mN, T_{tl} skutečná délková hmotnost vlákna v tex.

Tažnost $\varepsilon F_{\max}$ v procentech se vypočítá podle vztahu:

$$\varepsilon F_{\max} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad (10)$$

kde ΔL je změna délky při přetrhu v mm, L_0 upínací délka v mm.

Průměrná tažnost $\varepsilon F_{\max}$ v procentech se vypočítá podle vztahu:

$$\varepsilon F_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon F_{\max,i} \quad (11)$$

kde n je počet jednotlivých hodnot, získaných při stanovení pevnosti, $F_{\max,i}$ tažnost i -tého vlákna ε .

Výpočty (1) a (2) se vypočítají na dvě platná desetinná místa. Průměrná tažnost se vypočítá v procentech na jedno platné desetinné místo.

Všechny tyto vztahy jsou platné pro výpočet hledaných hodnot, avšak trhací stroj s příloženým software provádí tyto výpočty v reálném čase, které vygeneruje do tabulky včetně směrodatné odchylky všech zkoušek.

ZJIŠŤOVÁNÍ PEVNOSTI A TAŽNOSTI TKANIN

Pevnost v tahu se měří obdobně jako pevnost v tahu vláken, avšak je zapotřebí většího trhacího stroje, který disponuje dostatečně velkými čelistmi pro uchycení vzorků, který vytvoří při stisku potřebnou sílu pro natažení a přetržení textilie. Zkoušené vzorky textilií se připraví do podoby podlouhlých popruhů s šířkou 50 mm podle kalibrace přístroje a délkou 200 mm. Do čelistí je potřeba vzorky uchytit tak, aby se zabránilo prokluzu během měření. Trhací stroj spolu s připojeným PC provádí výpočty měření v reálném čase, které vygeneruje do tabulky včetně směrodatné odchylky všech zkoušek a pracovního grafu.

3.1.4 BALISTICKÉ ZKOUŠKY VYBRANÝCH TEXTILIÍ

Balistické zkoušky odolnosti textilních materiálů a prostředků osobní ochrany před průnikem rychle se pohybujících těles jako jsou střely a střepiny se provádějí podle příslušných norem státu nebo dané ozbrojené složky. Západní země, které jsou zároveň členem Severoatlantické aliance NATO, včetně ČR, vycházejí z obecně platné a uznávané normy STANAG 2920 (Standardization Agreement): *Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing* [15], která stanovuje příslušné limity a metody testování materiálů, a která je zároveň vzorem pro státní obranné standardy (normy) členských států NATO (v ČR Český obranný standard ČOS).

Všechny zmíněné normy popisují postup a metodu měření rychlosti V_{50} , což je rychlost, při které testovaný materiál zachytí právě 50 % vystřelených projektilů, čili pravděpodobnost penetrace testovaného vzorku je přesně 50 %. Dodržuje se vždy sudý počet výstřelů a norma umožňuje testovat vzorku jednak s materiálem v pozadí, a také bez materiálu v pozadí, který simuluje chování lidského těla. Jako svědečný systém, na kterém je vidět, zda střela poškodila testovaný materiál, se používá duralový plech odpovídající normě ČSN 10 204, která stanovuje jeho pevnost v tahu minimálně 440 MPa, která odpovídá normě STANAG 2920 [15].

Spolu s metodikou měření rychlosti V_{50} jsou zapotřebí i třídy odolnosti, podle kterých se stanovuje míra ochranného účinku. Využít lze např. českou státní normu ČSN 39 5360 [18] nebo mírnější americkou variantu NIJ Standard 0101.06. *Ballistic Resistance of Body Armor* [17]. V českých podmínkách je legitimní používat české, anglické, americké a německé třídy odolnosti pro prostředky balistické ochrany.

Na základě těchto norem a postupů, v nich popisovaných, lze sestavit měřicí a zkušební aparaturu, kterou lze otestovat vzorky balistických textilií „ostrými“ zbraněmi (zbraně kategorie A a B [19]), avšak za předpokladu, že testující osoby jsou k těmto zkouškám způsobilé a oprávněné podle zákona č. 119/2002 Sb. o střelných zbraních a střelivu [19]. Zkoušející osoby musejí být ze zákona držiteli platného zbrojního průkazu odpovídající skupiny (nebo skupin) nebo tyto balistické zkoušky musejí provádět alespoň ve spolupráci s osobou takto oprávněnou.

3.2 PROSTŘEDKY EXPERIMENTŮ

3.2.1 MODELOVACÍ A VIZUALIZAČNÍ PROGRAMY

Podle Humla [11] se pro tvorbu a hodnocení jednotlivých modelů s atomovým rozlišením nejčastěji užívají metody založené na molekulární mechanice, která charakterizuje molekuly pomocí potenciální energie.

V molekulární mechanice bývá potenciální energie zavedena jako rozvoj funkcí vyjadřujících intramolekulární a intermolekulární síly Coulombovy, van der Waalsovy, dipólové, případně další síly, které nezávisí na intramolekulárních vazbách. Jsou proto nazývány nevazebnými potenciály.

Druhou skupinu tvoří tzv. vazebné potenciály vyjadřující síly vzniklé v důsledku odchylek vazebných parametrů (délky vazeb, valenční úhly, torzní úhly apod.) navržené struktury od tabulkových hodnot stanovených experimentálně (nebo teoreticky) pro podobné látky jako je náš model. Tato skupina dílčích potenciálů, a tím i celkový potenciál užívaný v molekulární mechanice, je veličina relativní, vztahovaná k hypotetické střední struktuře jistých reprezentativních látek. Zde leží jedna ze zásadních potíží molekulární mechaniky: správná volba potenciálů.

Autoři jednotlivých programů užívaných v molekulární mechanice se proto snaží, aby jejich potenciály a konstanty v nich uložené, byly co nejobecnější. Tak postupně vznikly známé systémy potenciálů CVFF (Consistent Valence Forcefield), CFF91 (Second Generation, or Class II, Forcefield), ESFF (Extensible Systematic Forcefield), AMBER a další, které jsou sestavovány na základě experimentálních výsledků, případně i kvantové mechaniky.

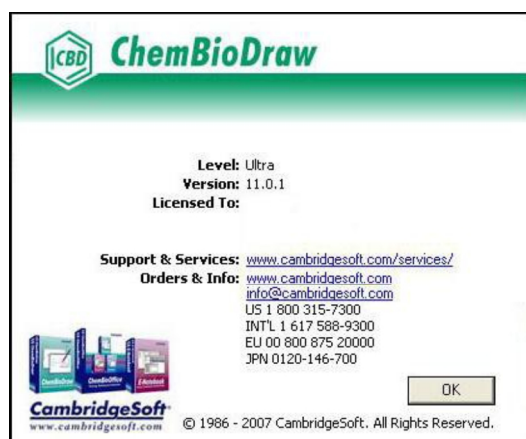
Molekulární mechanika dovoluje takto navržený model optimalizovat metodami minimalizace potenciální energie. Obvykle jsou to algoritmy největšího spádu (steepest descent) nebo konjugovaných gradientů. První postup má větší poloměr konvergence (tj. dovede optimalizovat i počáteční model značně vzdálený od optimálního), avšak pomalu konverguje v blízkosti hledaného minima potenciální energie. U metody konjugovaných gradientů je tomu právě naopak, a proto se oba přístupy obvykle kombinují. Pomocí

molekulární mechaniky lze tedy sestavený model dané molekuly (resp. dvojice interagujících molekul) charakterizovat potenciální energií a následně ho optimalizovat. Výsledkem je právě jediný model. Vše se děje se zanedbáním kinetické energie, tj. výpočty probíhají pro teplotu absolutní nuly.

Všechny chemické programy, které se používají pro tvorbu chemických struktur a modelů pracují s obecným formátem souboru MOL a MOL verze 3000, které v sobě zahrnují veškeré parametry o uspořádání atomů v kartézském souřadném systému. Je to univerzální typ souboru, který je možný načíst prakticky v jakémkoliv známém a dostupném chemickém programu. Všechny programy umožňují vygenerovat bitmapový obrázek zobrazené struktury. Některé nabízejí pokročilé funkce jako je animace modelu (ACD ChemSketch) nebo možnost stereografického zobrazení s použitím 3D brýlí s příslušnými filtry (CS ChemBio3D).

CHEMBIO OFFICE 2008 ULTRA

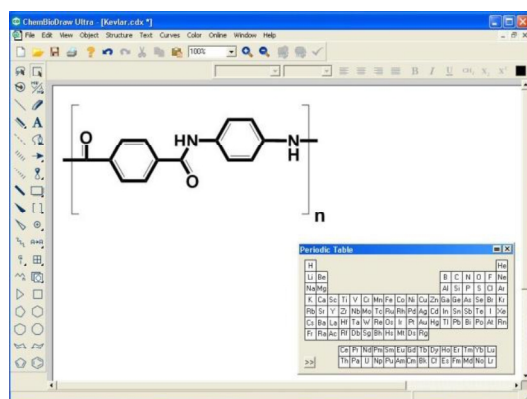
ChemBioOffice je software společnosti Cambridge Soft, který v sobě zahrnuje několik chemických programů podobně jako MS Office. Pro diplomovou práci byly využity především ChemBio 3D 11.0 Ultra [6] a ChemBio Draw 11.0 Ultra [7].



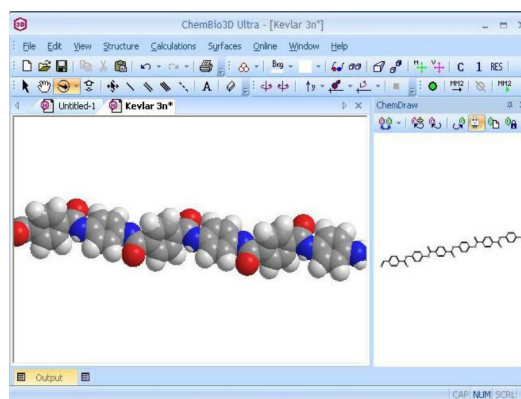
Obr. 21: Úvodní obrazovka ChemBioDraw 11.0 Ultra

Obr. 22: Úvodní obrazovka ChemBio3D 11.0 Ultra

ChemBioDraw je počítačový program umožňující tvořit chemické struktury pomocí editoru, upravovat grafiku a text a počítat, základní molekulové vlastnosti. Nabízí o trochu více možností než konkurenční software od ACD. Poslední verze ACD ChemsSketch 12.0 by se mu však už měla svými možnostmi vyrovnat.



Obr. 22: Prostředí programu ChemBioDraw 11.0



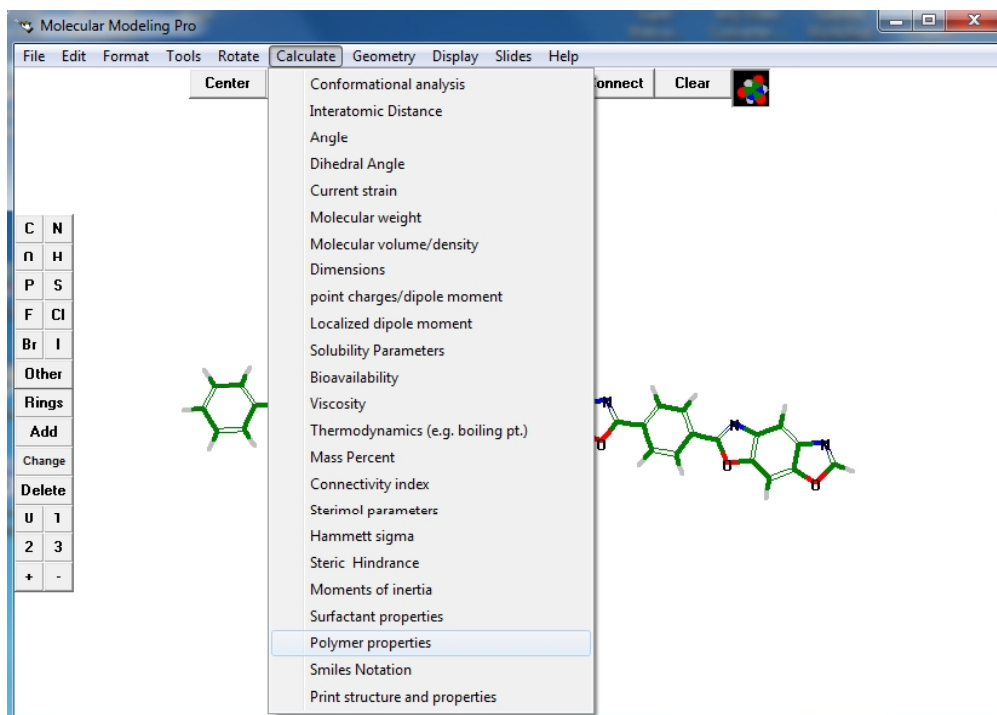
Obr. 24: Prostředí programu ChemBio3D 11.0

ChemBio3D je počítačový program, který zobrazuje chemické struktury jako prostorové modely podobně jako software ACD ChemSketch. Nabízí však širší možnosti optimalizace struktur podle nejnovější Molekulární mechaniky 2 (MM2), dokáže vypočítat o mnoho více vlastností než ACD včetně termodynamických vlastností látek. Mimo to jsou vytvořené 3D modely mnohem věrnější reálným strukturám, jelikož program dokáže pracovat s modely o několika tisících atomech, kombinuje mezimolekulární interakce sloučenin s ohledem na jejich reálnou strukturu, konformaci, uspořádání a dynamiku jednotlivých molekul. Program navíc disponuje pokročilou Molekulární dynamikou, s jejíž pomocí dokáže nasimulovat chování látek jak během zahřívání tak i během chlazení. Pro rychlé výpočty, které minimalizují energii molekul, využívá semi-empirických vztahů zajišťující optimalizaci molekul.

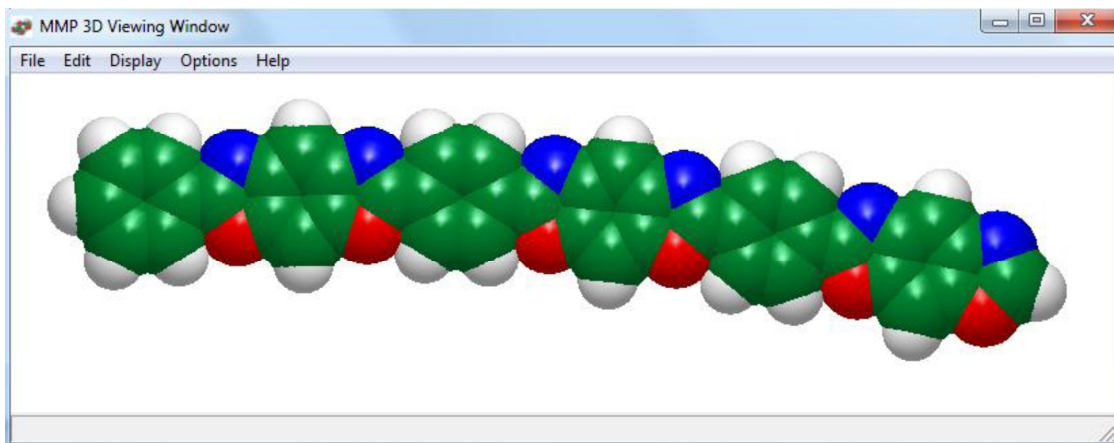
MOLECULAR MODELING PRO 6.3.3

Molecular Modeling Pro [8] od společnosti Chem SW nabízí zřejmě nejpokročilejší možnosti optimalizování, jaké jsou zatím dostupné v oblasti molekulární mechaniky. Doplněk Mopac je v programu nativně implementován a není tak nutné ho dodatečně pořizovat a k programu doinstalovávat jako v případě ChemBio3D. Molecular Modeling Pro je schopen automaticky podle vytvořeného molekulárního modelu polymeru vypočítat vlastnosti polymeru přesně podle van Krevelenových vztahů. Pro dlouhodobé a hluboké studium polymerů je tento program nejvhodnější, zároveň disponuje nejdetailejším grafickým zobrazením ze všech zde jmenovaných programů a poskytuje obrázky struktur v nejvyšší možné kvalitě.

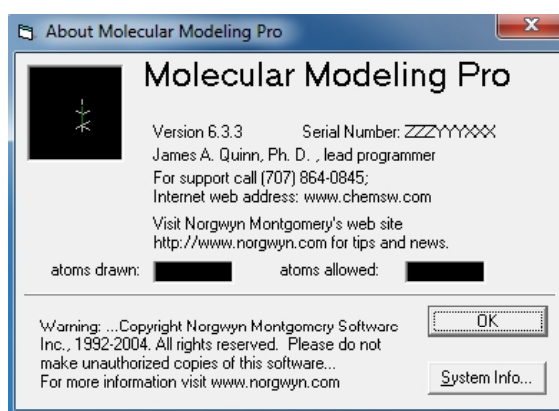
Program je sice staršího data, dlouhá léta od roku 2004 nebyl aktualizován a grafické rozhraní je na první pohled o dost chudší než u ChemBio3D, za to však nabízí spousty možností výpočtů a high-end grafické zobrazení molekul přes Molecular Modeling Pro 3D.



Obr. 25: Prostředí programu Molecular Modeling Pro s možnostmi výpočtů zobrazeného polymeru PBO



Obr. 26: High End grafické zobrazení polymeru PBO Zylon přes Molecular Modeling Pro 3D

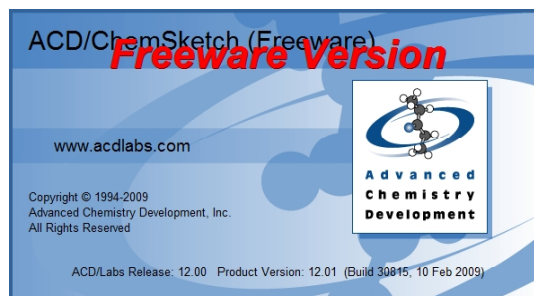


Obr. 27: O programu Molecular Modeling Pro 6.3.3

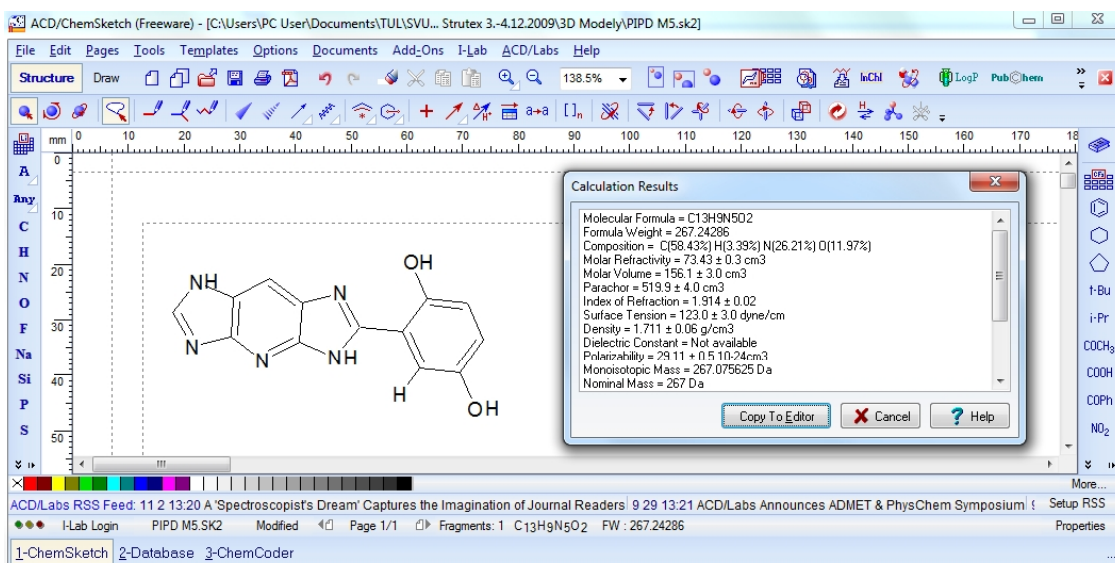
ACD CHEMSKETCH 12.0

ACD ChemSketch 12.0 [9] vyniká především svou jednoduchostí, názorností a tím, že je volně šiřitelný zdarma jako freeware. Je tedy ideálně vhodný pro školní a vzdělávací účely s minimálními náklady. Vzhledem ke svým možnostem se jedná o komplexní program, který kromě velmi zajímavých šablon, umožňuje kreslit a tvořit chemické strukturní vzorce, optimalizovat je a zobrazit v trojrozměrném prostředí. Umí vypočítat veškeré základní chemické parametry, pojmenovat molekulu a přiřadit značky IUPAC a Smiles. V rámci ACD je propojen s chemickými databázemi sloučenin pomocí funkce ChemSpider. Rozhodně se jedná o vstupní program pro tvorbu chemických sloučenin, se kterým by měl uživatel začít jako první. Oproti dvěma výše jmenovaným programům není zdaleka tak náročný na hardware počítače a lze s ním pracovat i na slabších strojích. Nelze však očekávat jako u komerčních programů schopnost pracovat s tolika atomy a nelze očekávat exportované obrázky ve vysokém rozlišení.

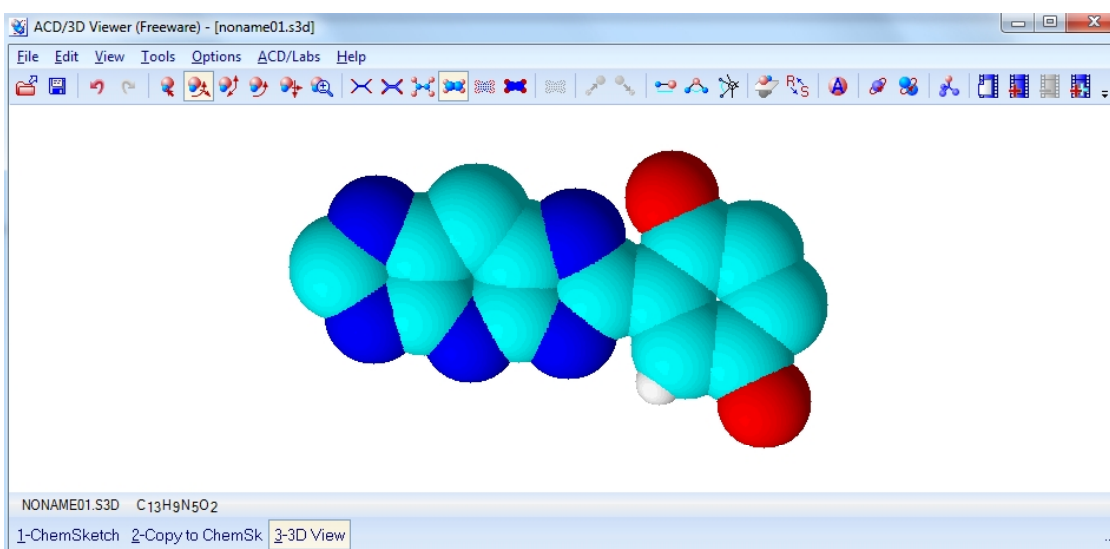
Obr. 28: O programu ACD ChemSketch 12.0



Obr. 29: Prostředí programu ACD/ChemSketch s možnostmi výpočtů zobrazeného polymeru PIPD M5



Obr. 30: Prostorové zobrazení polymeru PIPD M5 přes 3D rozhraní ChemSketch



3.2.2 ZKUŠEBNÍ TEXTILNÍ PŘÍSTROJE MECHANICKO-FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ

Světelný mikroskop NIKON Eclipse ME 600. Mikroskop je spojen se systémem obrazové analýzy Lucia. Systém pro obrazovou analýzu Lucia je specializované pracoviště pro obrazovou analýzu sestávající z částí: PC pracovní stanice se softwarem LUCIA, 3 barevné digitální kamery: NIKON DXM 1200, BASLER 113-, JVC-TK-C1380 objektivy: Cosmocar/Pentax 12,5-75 mm (1:1,8), Cosmocar/Pentax 25 mm.

Univerzální trhací stroj INSTRON 1122 pro měření pevnosti v tahu plošných textilií: 5 kN a délkových textilií: 100 N s příslušnou PC stanicí.

Tloušťkoměr COMPUTEX Uni-Thickness-Meter. Jedná se o přístroj pro stanovení tloušťky plošných textilií bez digitálního výstupu.

Přístroj pro měření jemnosti vláken VIBROSKOP 400 propojený s přístrojem pro měření pevnosti vláken VIBRODYN 400. Sestava od výrobce LENZING je připojena k příslušné PC stanici, kde dodaný software vyhodnocuje naměřená data.

Univerzální trhací stroj, dynamometr TIRATEST 2300. Jedná se o klasický přístroj pro zkoumání mechanických vlastností materiálů. Umožňuje zkoušky jednoosého namáhání v tahu a tlaku. Přístroj je řízen počítačem. Rozsah přístroje se mění výměnou měřicích hlav.

Rastrovací elektronový mikroskop Tescan VEGA. Mikroskop umožňuje pozorování vzorků v klasickém režimu s nutností naprašování vodivou vrstvou kovu (Au, Ag, atd.). Pracuje s vysokým vakuem v preparátové komoře.

Environmentální rastrovací elektronový mikroskop Tescan AQUASEM. Mikroskop umožňuje pozorování vlhkých a nabíjejících se vzorků bez nutnosti naprašování vodivou vrstvou kovu (Au, Ag, atd.). Pracuje s vysokým tlakem v preparátové komoře.

3.2.3 PŘÍSTROJE A ZBRANĚ PRO BALISTICKÉ ZKOUŠKY

Chronometr Shooting CHRONY M1 je přístroj pro měření rychlosti projektilů palných zbraní v rozmezí 9 až 2100 m.s⁻¹. Přístroj je vybaven dvěma fotodiodami a LCD displejem. V odborné balistické terminologii se užívá název hradla pro tento typ chronometru.

Pro experimentální střelbu bylo použito samonabíjecí pistole Glock 17 v ráži 9 mm Luger a celoplášťové střely TFMJ o hmotnosti 7,5 g, což je v anglosaských jednotkách 115 grainů (gr) užívaných pro hmotnosti projektilů. Jeden grain je roven přesně 64,79891 mg.

Taktéž byla zvolena pro testování vyšší třídy odolnosti samonabíjecí kulovnice CZ 858 Tactical a celoplášťové střely FMJ 7,62x39 mm o hmotnosti 124 gr. Jedná se o civilní verzi automatické útočné pušky vzor 58, která je ještě dnes ve výzbroji Armády ČR. Doplnkové zkoušky odolnosti vzorků, ale bez měření rychlosti střel, byly provedeny rážemi zbraní: .357 Magnum (revolver Taurus 4"), .22 LR (malorážková pistole Sig Sauer), 9mm Luger (samonabíjecí pistole CZ 75 D Compact) a .38 Special (revolver Taurus 2")

Pro měření hloubky trauma efektu v duralovém plechu bylo použito digitálního výškoměru (typ a výrobce neurčen). Pro simulaci tkáně lidského těla byly použity cívky s česanou bavlnou.



Obr. 31: Puška CZ 858 Tactical a pistole Glock 17 Obr. 32: Digitální výškoměr s plechem svědečného systému

3.3 METODY A EXPERIMENTŮ

Odstavce nepopisují přesné kroky experimentů, jelikož není možné v rámci zachování maximálního možného rozsahu práce poskytnout podrobné návody experimentů, avšak veškeré důležité momenty experimentu jsou zde uvedeny s odkazem na podrobné a detailní postupy dle uvedených norem ČSN, STANAG, MIL a ISO (viz Seznam použité literatury a zdrojů)

3.3.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY A VLASTNOSTI POLYMERU

Vytvořený 3D model polymeru byl zoptimalizován pomocí pokročilé molekulární mechaniky MM2, která srovná strukturu do podoby nejbližší možné reálné struktury s ohledem na výše jmenované prvky přístupu MM.

Zoptimalizovaná chemická struktura dle pravidel MM2, byla použita k výpočtům MOPAC s využitím semiempirické metody AM1 (odpovídá kvantově mechanickému přístupu QM), případně bylo využito metody PM3 pro geometrickou optimalizaci. Získaná vysoce přesná data byla např. jednotlivé délky vazeb konkrétních atomů, úhly vazeb mezi atomy, meziatomové vzdálenosti atomů. MOPAC se jeví jako nejlepší volba v oblasti semiempirických výpočtů, jelikož je rychlý, výkonný a nabízí množství teoretických modelů (metod např. MO, HMO).

Ačkoliv bylo hojně využíváno programu CS ChemBio3D, který je spíše vhodný pro pokročilou výuku chemického modelování, pro predikci vlastností polymeru byl zvolen vhodnější program Molecular Modeling Pro (MM Pro), který nabízí až 70 molekulových indexů včetně molární hmotnosti, elementárního složení, rozměry/povrchy/objemy molekul, rozpustnostní parametry, log p, bod varu, tenze par a další. Navíc dokáže pracovat s více než 40 molekulami a 4000 atomy najednou (v závislosti na výkonu počítače) a současně minimalizovat 10 molekul molekulární mechanikou MOLY. Jelikož nebylo možné získat pro svou verzi doplněk (plug-in) Molecular Analysis Pro, nebylo možné provést analýzy QSAR a QSPR, které by vlastnosti polymerů doplnily.

Pro predikce vlastností polymeru bylo využito metody výpočtu MM Pro, přesněji Polymer Properties (PPP) podle výpočtů van Krevelena. Před tímto výpočtem bylo nutné model polymeru zoptimalizovat podle pravidel MM2 a AM1 popsanych výše, aby nedošlo ke zkreslení predikovaných dat. Tímto bylo dosaženo kritéria simulace s využitím obou přístupů MM a QM počítačového modelování. Z výsledků PPP byl získán např. V_w (van der Waalsův objem) a M (molární hmotnost), ze kterých je možné podle van Krevelenových vztahu [12 str. 375] vypočítat hustotu materiálu.

Jelikož nebylo možné tuto rychlost s dostupným programovým vybavením získat, bylo rozhodnuto, že cílem predikovaných vlastností budou hlavně výpočty hustot polymerů, které jsou rovněž klíčovými veličinami pro výpočet rychlosti $U^{*1/3}$, která je materiálovou konstantou rozhodující o vhodnosti daného materiálu pro balistické účely [4]. Také byla hledána souvislost mezi rychlostí $U^{*1/3}$ a rychlostí V_{50} testovaného vzorku, která by umožnila do jisté míry odhadnout, jakou teoretickou balistickou odolnost by zkoumaný materiál mohl nabízet a snížit tak náklady pro měření rychlosti V_{50} .

Pro vypočtení teoretické hustoty polymeru byly vytvořené modely polymerů o monomerních jednotkách větších než 3, tj. $n > 3$. Pokud to softwarové a hardwarové vybavení počítače dovolilo, byly rovněž vytvořeny prostorové modely o 5 a více monomerních jednotkách, které byly v prostoru uspořádány do matrice 3×3 (9 polymerních řetězců). Počet atomů řetězců přesahoval číslo 1000, což vedlo k nutnosti použití pokročilejšího programu než ACD ChemSketch. ChemBio3D a Molecular Modeling Pro dokázaly optimalizovat tyto struktury v desítkách minut a provedly v některých případech přes 1000 geometrických změn, aby bylo dosaženo reálnější struktury polymeru. Model odpovídá realitě nejméně s pravděpodobností 90 % a obvykle se tato pravděpodobnost pohybuje mezi 94 až 99 %.

Každý software počítá hustotu polymeru trochu jiným způsobem. Byl proveden výpočet hustoty polymeru pomocí programu Molecular Modeling Pro, výpočtem podle van Krevelenova vztahu (12),

$$\rho_K = \frac{M}{1,435 \cdot V_w} \quad (12)$$

kde ρ_K je van Krevelenova hustota polymeru, M je molární hmotnost, V_w je van der Waalsův objem a hodnota 1,435 je Krevelenův faktor.

Rovněž byl proveden výpočet hustoty pomocí ACD ChemSketch funkcí Calculate Density a nakonec výpočet hustoty vlákna podle vztahu (13),

$$\rho = \frac{T}{10^6 \frac{\pi}{4} d^2} \quad (13)$$

kde ρ je hustota vlákna v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, která musí odpovídat hustotě polymeru, T je jemnost vlákna v tex a d je příčný průměr vlákna v μm . Jemnosti vláken byly změřeny na přístroji Vibroskop 400.

Pro výpočet van Krevelenovy hustoty polymeru se nejprve vytvořil a zoptimalizoval model v programu ChemBio3D a následně se spočítaly jeho parametry (molární hmotnost a van der Waalsův objem) pomocí funkce Polymer Properties (PPP) programu Molecular Modeling Pro. Van Krevelenova hustota je predikovaná hustota počítající s chybami ve struktuře, která se velmi blíží tabelovaným, naměřeným hodnotám jednotlivých polymerů, které udává literatura. MM Pro počítá standardní hustotu z ideálních, dokonale krystalických polymerů bez jakékoliv chyby ve struktuře vykazující amorfnost vlákna. Tyto chyby v sobě zahrnuje zmíněný Krevelenův faktor.

Experimentálními hodnoty hustot byly porovnány s tabelovanými hodnotami z literatury [25] [26] [27] [28] a zpracovány do tabulek a grafů.

3.3.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY A VLASTNOSTI VLÁKNA

Celkem bylo použito pro zkoušení vlastností vláken 4 druhů materiálů: Kevlar 49, neoznačený typ Twaronu, balistický Nylon a Kevlar 129.

Laboratorní měření vzorků Kevlaru 49 a Twaronu bylo provedeno podle normy ČSN 80 0200*. Byla změněna jen délka vlákna z 10 mm na 25 mm, což odpovídá jednotce amerického „palce“, jelikož většina dat ohledně speciálních vláken je čerpána z anglosaských zemí.

Měření bylo provedeno ve dvou laboratořích Katedry textilních materiálů FT TUL. Obě místnosti byly klimatizované, aby se zabránilo navlhnutí vláken. Před samotným měřením byly vzorky ponechány minimálně 2 h při laboratorní teplotě, aby se omezila délková roztažnost materiálu.

Norma doporučuje pro zkoušky chemických vláken použít minimálně 50 kusů vzorků. Pro oba materiály Kevlar 49 i Twaron bylo použito po 100 kusů vzorků, aby se eliminovala chyba poškozených vzorků prachem, UV zářením, špatným měřením apod.

Nejprve bylo nutné změřit příčné průměry vláken a vzorky očíslovat. Měření bylo provedeno světelným mikroskopem NIKON Eclipse ME 600. Mikroskop je spojen se systémem obrazové analýzy Lucia. Systém pro obrazovou analýzu Lucia je specializované pracoviště pro obrazovou analýzu sestávající z částí: PC pracovní stanice se softwarem LUCIA, 3 barevné digitální kamery: NIKON DXM 1200, BASLER 113-, JVC-TK-C1380 objektivy: Cosmocar/Pentax 12,5-75 mm (1:1,8), Cosmocar/Pentax 25 mm.

Hodnoty příčných průměrů se automaticky zaznamenávaly do tabulky MS Excel. Průměrné, nejvyšší a nejnižší naměřené hodnoty jsou uvedeny v článku 3.4. Diskuze zjištěných a naměřených výsledků.

Poté byly provedeny zkoušky na univerzálním trhačím stroji INSTRON 1122. Přístroj dokáže trhat plošné textilie silou až 5 kN a délkové textilie až silou 100 N. Přístroj je rovněž napojen na PC a je nutné jej před měřením zkalibrovat, tzn. nastavit program přesně pro daný typ vzorků a zadat průměrnou hodnotu průměru vláken, který byl zjištěn pomocí mikroskopu v předcházejícím měření.

Vzorky vláken se před trháním upevňují do čelistí, papírový rámeček se nastříhne a pomocí počítače se spustí zkouška. Vláknem se rovnoměrně zatěžuje maximálně po dobu 20 sekund, dokud nedojde k deformaci. Naměřená data se opět automaticky zaznamenávají do tabulky a v reálném čase se zobrazuje modul pružnosti v tahu pomocí grafu.

Získané hodnoty jsou po vygenerování tabulky MS Excel automaticky zpracovány statistickými metodami softwaru trhačímho přístroje Instron včetně směrodatné odchylky. Přístroj změří maximální napínací sílu $F_{\max}$ (N) a modul pružnosti v tahu E (MPa). Hodnotu pevnosti v tahu σ je nutno vypočítat z naměřených hodnot podle vztahu:

$$\sigma = \frac{\rho \cdot F_{\max} \cdot l}{m} \quad (14)$$

kde σ je pevnost v tahu v GPa, ρ je hustota vlákna v $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $F_{\max}$ je maximální napínací síla v N, které bylo dosaženo do deformace vlákna, l je délka vlákna v metrech m

je hmotnost vlákna v kg. Získané výsledky lze porovnat s materiálovými tabulkami (viz Příloha č. 4).

Vzorky balistického Nylonu a Kevlaru 129 byly vypreparovány z vložek balistických vest. Z jednoho kabílku, rovingu, bylo vypreparováno 50 vláken od každého druhu materiálu za pomoci sametové destičky a pinzety. Tato vlákna se přímo vkládala do čelistí přístroje Vibroskopu 400, který nedestruktivní metodu na principu nucených kmitů ve vlákne změřil jemnost vlákna s patřičným přepětím (závažíčko podle normy). Ihned po tomto měření bylo vlákno pinzetou přemístěno mezi čelisti Vibrodynu 400, který vlákno přetrhl a výsledná data odeslal do počítačové stanice, která data statisticky zpracovala a vyhodnotila. Výsledkem bylo 50 měření od každého druhu materiálu, tabulky hodnot a grafy.

Příčné průměry vláken se opět měřily pomocí obrazové analýzy Lucia. Připravil se glycerínový preparát na podložním sklíčku, do kterého se odstříhlo 1 cm rovingu analyzovaného materiálu. Vše se zakrylo krycím sklíčkem a vložilo do světelného mikroskopu.

3.3.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY A VLASTNOSTI TKANINY

Textilní analýza byla provedena na třech typech balistických vest. Jednalo se o dvě protistřepinové vesty schopné odolat fragmentům z granátu a jedné „neprůstřelné“ vesty s odolností proti pistolovému střelivu s balistickou odolností II podle NIJ [17]. První protistřepinová vesta disponovala nylonovou balistickou vložkou a její konstrukce pocházela z období války ve Vietnamu (léta 1965-1972). Druhá vesta byla německá protistřepinová kevlarová vesta, jejíž konstrukce spadá do roku 1995. Třetím typem vesty, která prošla důkladným rozbořem, byla typická neprůstřelná vesta britského policejního sboru. Kevlarová balistická vložka této vesty byla sešita z několika vrstev tkanin, ze které nebylo možné díky prošívání vypreparovat nitě (rovingy) ani vlákna, které by byly vhodné pro mechanicko-fyzikální testování, aniž by nedošlo k jejich mechanickému poškození a navlhnutí.



Obr. 33: Protistřepinová vesta US Nylon

Obr. 34: Protistřepinová vesta BW Kevlar

Obr. 35: Neprůstřelná policejní vesta Kevlar

Balistická vložka americké protistřepinové vesty je vyrobena v přední i v zadní části ze 12 vrstev balistického nylonu se zvýšenou pevností v tahu. Vložka je vyztužena mezi 9. a 10. vrstvou tkaniny PVC lamelami ve tvaru kříže jak v přední tak i v zadní části vesty. Celá vložka (přední i zadní část) je sešita do jednotného kusu a zatavena ve voděodolné PVC fólii. Jako nosič vložky slouží olivově zelený nylonový potah s kapsami.



Obr. 36: Balistická nylonová vložka US vesty (přední)



Obr. 37: Vrstvy tkaniny nylonové balistické vložky

Německá armádní (Bundeswehr – BW) kevlarová protistřepinová vesta je vybavena několika balistickými vložkami (panely) umístěných v přední a zadní části vesty, v límci a nárukávnících. Jednotlivé díly lze z vesty vyjmout bez nutnosti páření z velkých vnitřních kapes. Balistická vložka je v hrudní části tvořena 13 vrstvami kevlarové tkaniny a 14 vrstvami v zádech. Panely nejsou nijak dodatečně vyztuženy. V kapsách jsou přichyceny suchými zipy a celý systém je kryt kamuflážním obalem s nasazenými kapsami pro drobné předměty.



Obr. 38: Balistická kevlarová vložka BW vesty (zadní)

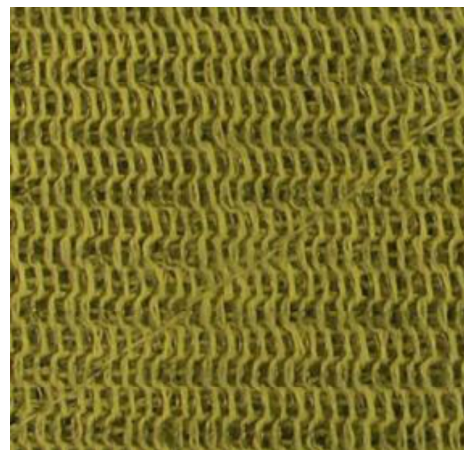


Obr. 39: Vrstvy tkaniny kevlarové balistické vložky

Balistická ochrana Britské taktické „neprůstřelné“ vesty Highmark je tvořena balistickou vložkou ze 26 vrstev kevlarové tkaniny typu 129, třívrstvou pleteninou Kevlaru a ocelového drátu, která slouží jako ochrana před noži a šípy a jednou anti-šokovou vrstvou měkkého kompozitu s tloušťkou 0,4 mm, který snižuje trauma efekt dopadající střely. Tyto tři části nejsou sešity dohromady a jako balistické panely jsou umístěny do velkých vnitřních kapes nosného systému vesty.



Obr. 40: Prošívaná balistická kevlarová vložka policejní vesty Obr. 41: Pletenina drátu a Kevlaru Highmark



Obr. 42: Anti-šoková vrstva z měkkého kompozitu

Obr. 43: Detail pleteniny drátu a Kevlaru

Byla provedena měření podle příslušných norem, která poskytují základní charakteristiku plošné textilie a tyto výsledky jsou uvedeny v paragrafu 3.4.3 Výsledky analyzovaných textilií.

Z vložek protistřepinových vest bylo připraveno 5 vzorků popruhů textilie od každého druhu materiálu, a to v obou směrech dostavy. Dohromady tedy 20 vzorků. Aby neprokluzovaly v pneumatických čelistech trhacího stroje TIRATEST 2300, byly tyto popruhy zpevněny kyanoakrylátovým vteřinovým lepidlem v místě upnutí tj. asi 2,5-3 cm od hranice upínací délky. Zároveň se mezi čelisti vkládal smirkový papír, aby se snížila tendence vzorku prokluzovat. Popruhy byly nejméně 25 cm dlouhé a 7 cm široké. Pro měření bylo nutné z popruhů vypárat přebytečné nitě na normovanou šíři 5 cm. Upínací délka popruhu byla 20 cm.

Ostatní části ochranných vesty byly hodnoceny vizuálně a subjektivně na základě dosavadních zkušeností v oboru materiálové chemie, specializovaného návrhářství a takticko-operačního použití prostředku balistické ochrany.

3.3.4 BALISTICKÁ ODOLNOST TKANINY

Pro měření balistické odolnosti bylo použito dvou typických „neprůstřelných“ vest typu Soft Body Armors. Vesty se od sebe lišily výrobcem, použitým balistickým materiálem, ale obě byly vyrobeny pro stejnou třídu odolnosti NIJ II. Neprůstřelná vesta není přesně charakterizující termín, jelikož stejně jako dávka určuje, zda je chemická látka jedem, tak i zde rychlost, hmotnost a tvar projektilu určuje, zda je vesta průstřelná či nikoliv.

NIJ II (National Institute of Justice Ballistic Standards) – znamená třídu odolnosti II, schopná odolat pistolovému střelivu jako je 9 mm Luger (Parabellum) a revolverovému střelivu .357 Magnum [17]. Ekvivalentní norma k NIJ II v Německu je SK1, v Británii HG1 a v České Republice Thread Level 2 podle ČSN 39 5360 [18].

První testovanou byla americká vesta pro skryté nošení od výrobce Second Chance. Model Ultima má vnitřní balistickou vložku tvořenou ze Zylonové tkaniny známou pod obchodním názvem Xtreme ZX. Balistická odolnost třídy NIJ II. Od roku 2005 je v USA zakázáno používat pro výrobu balistických vest Zylon, díky tomu, že v roce 2003 nedokázala spolehlivě ochránit své uživatele. Jeden kalifornský policista zemřel a druhý byl vážně raněn, když jejich zylonové policejní vesty nedokázaly zastavit standardní pistolovou střelu během jedné přestřelky s místním gangem. Vyšetřování tragédie potvrdilo, že výrobce podcenil vliv UV záření na výrobek, které u vesty způsobilo ztrátu její odolnosti, a tím se snížila doba záruky použitelnosti užitečných vlastností z 30 na 12 měsíců. Přesně tento typ vesty byl určen k balistickému otestování podle normy STANAG. Second Chance Ultima je lehká příjemně se nosící balistická vesta, u které se dnes dá předpokládat, že bude vykazovat jisté nedostatky v balistické odolnosti. Vesta obsahuje ochranu před noži a šípy zajištěnou ocelo-kevlarovou pleteninou, a také 0,4 mm silnou anti-šokovou vrstvu. Ultima má 2 vnitřní kapsy pro balistické vložky s minimálním počtem 20 vrstev tkaniny a jeden svrchní panel se suchým zipem, na který je možno přidat dodatečný měkký balistický plát.

Druhou testovanou vestou byla britská policejní taktická vesta do výrobce Highmark. Její balistická vložka obsahuje 26 vrstev tkaniny kevlar, 3 vrstvou pleteninu ocelového drátu a kevlaru sloužící jako ochrana před šípy a noži a jednu 0,4 mm silnou anti-šokovou ochrannou vrstvu z měkkého kompozitu. Všechny tyto 3 části jsou uvnitř velkých vnitřních kapes. Tyto tři hlavní části jsou volně od sebe oddělitelné.

Ze žádné z těchto vest nebylo možné odebrat vzorek pro zkoušení vlákna, díky silnému prošíání balistických vložek.



Obr. 44: Second Chance Ultima (Zylon)



Obr. 45: Highmark Police (Kevlar)

Pro zkoušení balistické textilie bylo rozhodnuto použít jako vzor mezinárodní standardizační dohodu NATO STANAG 2920 (Ed.2) – *Ballistic Test Method for Personal Armor Materials and Combat Clothing*. [15] Podle normy je zřejmé, že nejlepší volbou pro testování balistických vest bude v našem případě venkovní střelba na otevřené střelnici s využitím denního světla pro fotodiody hradel Chrony M1. Norma byla přizpůsobena místním podmínkám a za prováděcí normu byla použita americká norma MIL-STD-662F. *V₅₀ Ballistic Test for Armor*. [16] a norma s třídami odolnosti NIJ Standard 0101.06 [17], která nemá tak přísná kritéria, co se týká výběru zbraně a je tedy reálnější s dostupným zbraňovým arzenálem balistické zkoušky provést. Obdobná norma NIJ, ČSN [18] stanovuje větší počet tříd odolností, a tedy i nutných testovacích zbraní. Navíc jako jediná na světě přesně definuje, s jakým objemem trauma efektu ml je daná zkouška přípustná.

Výsledky měření rychlostí V_{50} by měly ujasnit souvislost s rychlostí $U^{*1/3}$. Obě tyto rychlosti definují balistickou odolnost materiálu, avšak jen $U^{*1/3}$ před destruktivním nevratným měřením V_{50} . Měření rychlosti V_{50} by mělo být provedeno při teplotě 20 °C a testované materiály by měly být na tuto teplotu vytemperovány. Rovněž by měly být zahřáty zbraně na provozní teplotu krátkou sérií výstřelů.

Pro materiál v pozadí bylo použito cívky s česanou bavlnou o velikosti přibližně lidského hrudníku. Jako svědečný systém posloužil duralový plech podle příslušné normy STANAG a ČSN o plošné velikosti přibližně jako má přední díl testované vesty. Spolu s vestou toto vše tvořilo vzorek pro testování vesty blížící se reálným polním podmínkám použití. Jako držáků aparatury bylo využito ocelových konstrukcí ze školního nábytku.



Obr. 46: Chrony M1 a vesty na cívce bavlny s duralovým plechem



Obr. 47: Vesta Highmark Police



Typ ráže a parametry střeliva, která se má použít pro určitý typ odolnosti jsou dány normou NIJ. Je však obtížné bez předem známé nebo výrobce deklarované balistické odolnosti odhadnout, jakou ráží se má začít testovat. Vesta není schopná pojmout nekonečně mnoho střel, a je tak tedy nezbytné tento údaj znát nebo se měření při nesprávném odhadu balistické odolnosti promarní.

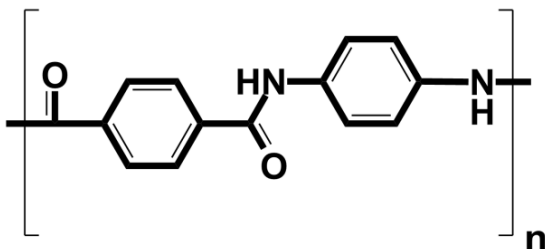
3.4 DISKUZE ZJIŠTĚNÝCH A NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ

3.4.1 VÝSLEDKY STUDOVANÝCH POLYMERŮ

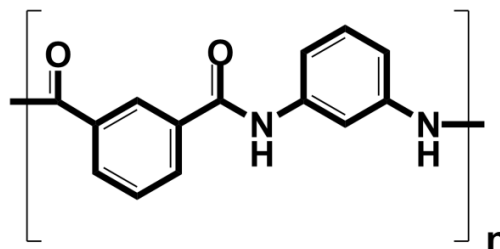
PROSTOROVÉ MODELY POLYMERŮ A JEJICH OBECNÉ VLASTNOSTI

Modely polymerů speciálních vláken vytvořené v programu ChemBio3D a optimalizované podle pravidel molekulární mechaniky 2.

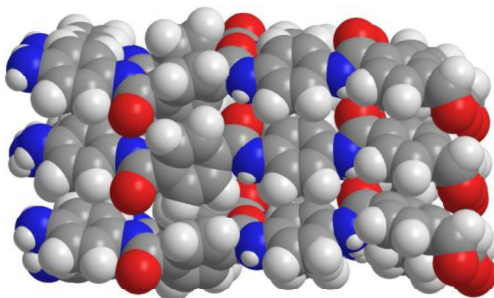
Obr. 46: Kevlar – monomerní jednotka



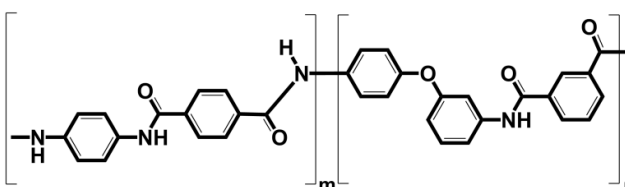
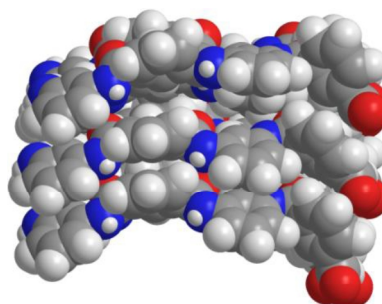
Obr. 47: Nomex – monomerní jednotka



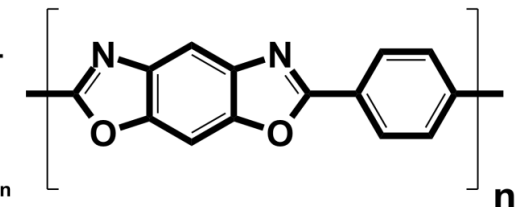
Obr. 48: Kevlarová matrice s uspořádáním 3×3 řetězec



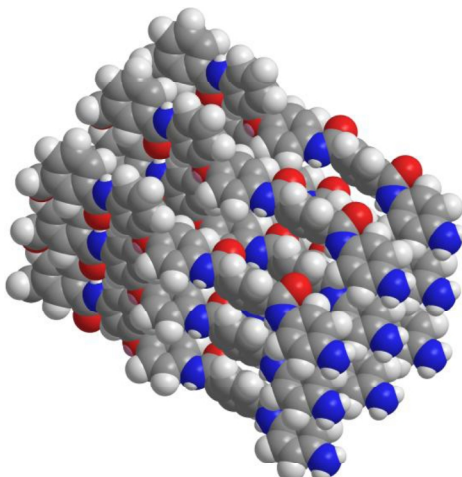
Obr. 49: Nomexová matrice s řetězci 3×3



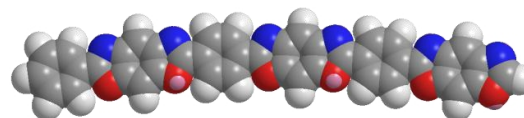
Obr. 50: Technora – monomerní jednotka kopolymeru



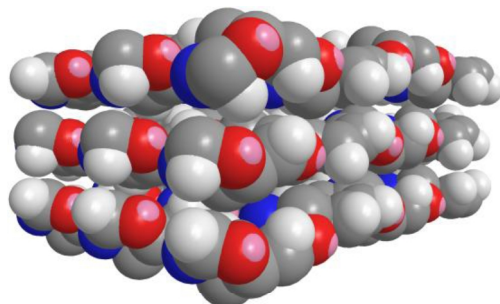
Obr. 51: Zylon – monomerní jednotka



Obr. 52: Technora - matrice s uspořádáním 3×3 řetězec

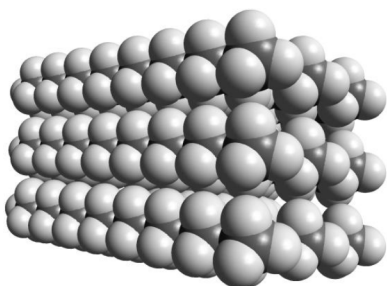
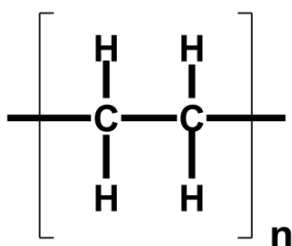


Obr. 53: Zylon se 3 monomerními jednotkami



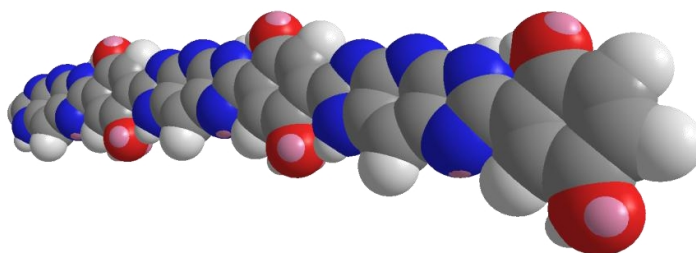
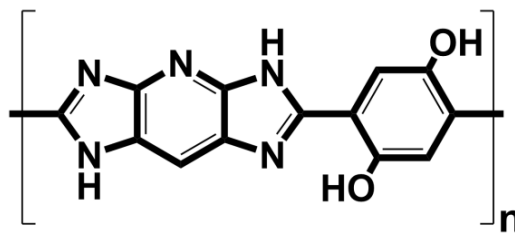
Obr. 54: Zylon – matrice 3×3 uspořádání

Obr. 55: PE Dyneema – monomerní jednotka

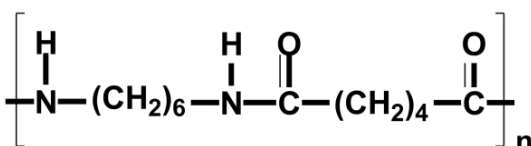


Obr. 57: Perfektně srovnaná struktura PE Dyneema

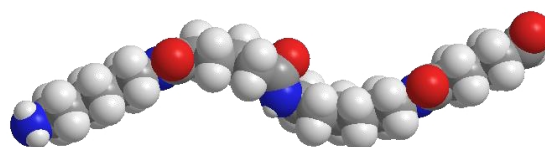
Obr. 56: PIPD M5 – monomerní jednotka



Obr. 58: Model experimentálního vlákna PIPD M5



Obr. 59: Nylon – monomerní jednotka



Obr. 60: Model polymerního řetězce Nylovu

Některé vlastnosti polymerů lze odhadnout z prostorového uspořádání atomů v makromolekule. Pokud je k dispozici velmi přesný a optimalizovaný model s vícero řetězci o vyšší monomerní jednotce než 3, je možné z řetězců vytvořit matici polymeru např. v uspořádání 3×3 (minimální hodnota). Vhodné je vytvořit si řetězec v nějakém jednodušším programu jako ACD ChemSketch, v něm vytvořit neoptimalizovanou matici molekul vůči sobě, uložit ji jako MOL soubor a následně načíst v ChemBio3D. Samozřejmě, že celý proces by šlo provést i v ChemBioDraw, ale uvážíme-li, že pracujeme s průměrně 1000 atomy na matici, je vhodnější šetřit výkon počítače pro modelování, než načítání pokročilých funkcí profesionálního programu. Disponujeme-li však silným strojem, nic nám v tom nebrání.

Z optimalizované matrice Kevlaru PPTA je vidět, jakým způsobem jsou k sobě aromatické kruhy natočeny, a že úhel, o který jsou vůči sobě pootočené je opravdu téměř 180°. Není problém tento úhel změřit přímo a pro určitou dvojici aromatických kruhů dostaneme úhel např. 173°. Ostatní aromatické kruhy jsou vůči těmto kruhům téměř kolmé. Matrice není dokonale symetrická, jelikož konce polymeru jsou ukončené, ale pokud bychom měli větší matici, četnost stejných úhlů natočení by se zvýšila. Para-orientace 1,4 v molekule PPTA umožňuje vznik vodíkových vazeb mezi řetězci. Tato ač malá a pravidelná, nevazební interakce mezi kyslíkem OH skupiny a vodíkem NH skupiny má za následek vyšší lepší možnosti krystalizace a srovnání polymerních jednotek Kevlaru. Tím se podstatně zvýší modul pružnosti ve všech směrech namáhání vlákna než mají pokroucené

struktury meta-orientovaného aramidu – Nomexu. To má za následek v makroskopickém měřítku, že vlákno Kevlar dosahuje vyšší pevnosti v tahu než vlákno Nomex.

Vyšší tepelná odolnost Nomexu je patrně způsobena tím, že při zvýšení teploty se postupně odbourávají vodíkové vazby v Kevlaru. To má za následek rozhození struktury polymeru a postupný pokles mechanických vlastností. Díky tomu, že se mezi řetězci polymeru Nomex nevytvářejí vodíkové můstky a natočení aromatických kruhů není ani zdaleka vůči sobě 180° , a ani 90° u zbývajících, v prostoru vytváří lehce zvlněnou strukturu s tendencí se při větším množství monomerních jednotek kroutit a vytvářet spirálku. To způsobuje, že má Nomex nižší modul pružnosti a nižší pevnost než p-aramid.

Technora stejně jako Nomex je m-aramid a meta orientace napojení řetězců ho opět předurčuje k tomu, že bude mít vyšší tažnost a vyšší tepelnou odolnost. Úhel natočení téměř všech aromatických kruhů se blíží k 90° .

Ačkoliv je PBO Zylon tabulkově poměrně výkonnější materiál než aramidy a mnozí kdysi proklamovali, že se jedná o materiál budoucnosti, je ve výsledku náchylnější na účinky UV záření, které snižuje jeho pevnost. Mohou za to patrně volné nevazebné elektrony kyslíků (na modelu růžové kopečky na červených kyslících), které jsou tímto zářením aktivovány k chemické reakci a rozrušují polymerní strukturu vlákna při dlouhodobé a silné expozici. To ostatně vysvětluje, proč je PBO v USA k balistickým účelům zakázaný. Čerstvě vyrobený polymer jistě své užité vlastnosti má, ale z dlouhodobějšího hlediska je vhodnější spíše pro konstrukčně stavební účely.

PIPD polymer je na první pohled trochu podobný PBO polymeru. Je však vidět, že problematické kyslíky byly z heterocyklů odstraněny a OH skupiny přibýly na benzenovém zbytku, což ve spojení s NH skupinou opět umožňuje vznik vodíkových můstků, které vlákno podstatně vylepší. Však se již experimentuje s jeho použitím pro balistické účely. [5]

Ač se to nezdá, ale polyethylen o vysoké molekulární hmotnosti až 100 000 monomerních jednotek je pevný materiál s nízkou hustotou. Samozřejmě za předpokladu, že celá struktura polymeru pro výrobu vlákna Dyneema je perfektně srovnaná. Ve spojení s výrobou „nepravého“ kompozitu, jelikož se stále jedná o PE, ale v jiné formě, se z něj stává materiál s ultimativními vlastnostmi. Bohužel, díky tomu, že nedisponuje žádným znakem aromaticky, nedělá to z něj tepelně a žáru odolné vlákno. Přesto je zajímavé, že místo aby polymer při nižších teplotách křehl, stává se ještě pevnějším. Tímto znakem disponuje většina speciálních organických vláken.

Nylon nepatří mezi speciální organická vlákna, ale byl jedním z prvně nasyntetizovaných vláken vůbec a jeho použití je tak široké a jeho vlastnosti známé širší veřejnosti, že bylo vhodné jej zařadit pro porovnání s ostatními studovanými vlákny. Zároveň tu zde byly snahy od nepaměti ho použít jako balistický materiál. Přesto jeho mechanicko-fyzikální vlastnosti nedokáží konkurovat vysoce modulovaným špičkovým high-tech vláknům.

Modely polymerů se dále hodily pro výpočet predikovaných vlastností. V tomto případě hustotě, ze které se odvíjí spousta mechanicko-fyzikálních vlastností, které dokážou evaluovat např. balistickou odolnost materiálu.

TABULKY EXPERIMENTÁLNÍCH HODNOT POLYMERŮ

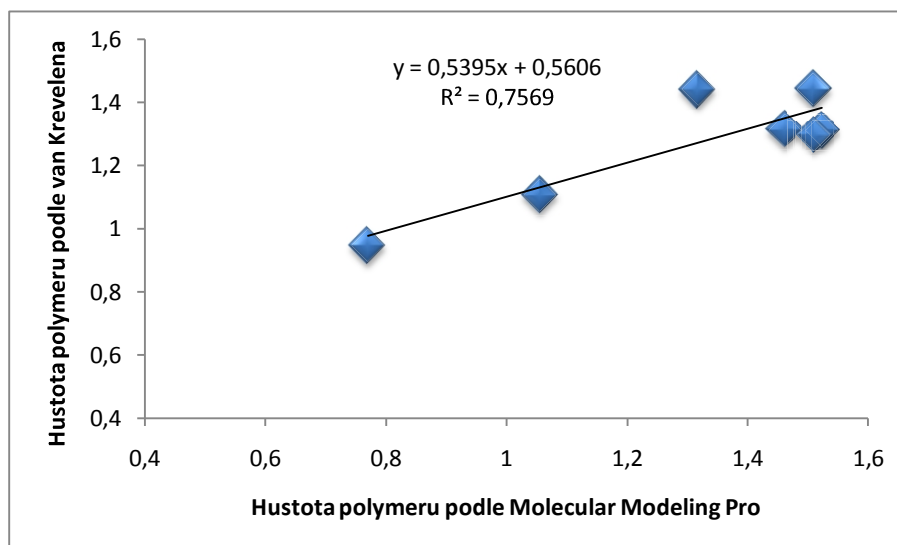
Nejprve bylo nutné najít správné a ověřené tabelované hodnoty hustot jednotlivých polymerů, aby se vypočtené mohli s nimi porovnávat. K tomu dopomohla prostudovaná literatura [5] [25] [26] [27] [28].

Tabulka 1: Experimentální hodnoty polymerů

polymer	MM Pro molární hmotnost M	MM Pro van der Waalsův objem V_w	Hustota van der Waalsova	Hustota MM Pro	van Krevelenova hustota	Tabelovaná hustota
	g/mol	cm ³ /mol	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
PE UHMW	226,45	166,52	1,36	0,77	0,95	0,97
Nomex	478,51	254,15	1,88	1,52	1,31	1,38
Technora	570,61	303,03	1,88	1,46	1,31	1,39
PPTA Kevlar	478,51	256,99	1,86	1,51	1,30	1,45
PBO Zylon	938,87	453,84	2,07	1,32	1,44	1,56
PIPD M5	267,25	129,12	2,07	1,51	1,44	1,70
Nylon 66	706,06	444,79	1,59	1,06	1,11	1,15

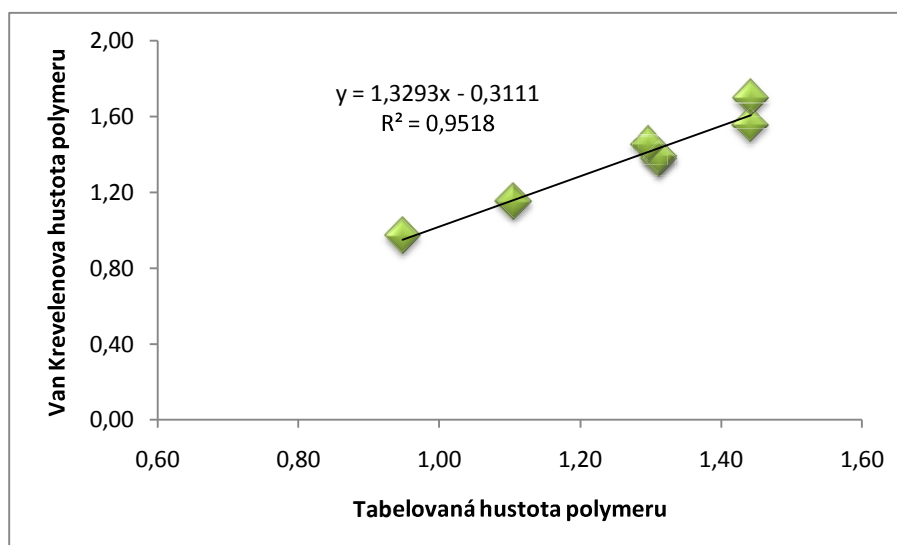
Byly porovnány hustoty 7 polymerů získané z Molecular Modeling Pro a van Krevelenovy hustoty vypočtené podle jeho semi-empirického vztahu (12).

Graf 1: Porovnání van Krevelenovy hustoty a hustoty podle MM Pro



Jak je patrné i z grafu, hustoty vypočtené z MM Pro se kromě Nylonu 66 a Dyneemy výrazně liší od hodnot van Krevelenových hustot. V tomto grafu jsou rozdíly hodnot názornější než v tabulce. Nízká hodnota spolehlivosti R, potvrzuje, že vypočtená hustota MM Pro není vhodná pro práci a další výpočty s polymerem, jelikož bychom získali nepřesné údaje o vlastnostech polymeru např. rychlost $U^{*1/3}$.

Graf 2: Porovnání van Krevelenovy hustoty a tabelované hustoty polymeru



Van Krevelenova hustota je o poznání blíže tabelovaným hodnotám, ale i zde jsou vidět nedostatky a rozdíly především u PPTA (Kevlar), PBO (Zylon) a PIPD (M5). Ačkoliv se zdá hodnota spolehlivosti uspokojivá, rovnice regrese nevyjadřuje přesnou a spolehlivou závislost mezi experimentálními a tabelovanými hodnotami. Zdá se tedy, že Krevelenův empirický faktor 1,435 není vhodné použít.

Byla navržena metoda, aby se Krevelenův faktor K opravil na reálný faktor R pro každé vlákno a to podle vztahu,

$$R = \frac{M}{V_w \cdot \rho} \quad (15)$$

kde M je molární hmotnost polymeru, V_w je van der Waalsův objem a skutečná tabelovaná hustota polymeru. Tímto faktorem, který se pro každý polymer liší byla opravena van Krevelenova hustota na reálnou van Krevelenovu hustotu ρ_{KR} a R faktory nahradily konstantní K faktor 1,435.

Tabulka 2: van Krevelenův faktor K a korekční reálné R faktory

polymer	K faktor	R faktor
PE UHMW	1,435	1,402
Nomex	1,435	1,364
Technora	1,435	1,355
PPTA Kevlar	1,435	1,284
PBO Zylon	1,435	1,326
PIPD M5	1,435	1,217
Nylon 66	1,435	1,380

Hodnota spolehlivosti lineární regrese se po korekci rovná jedné a experimentální hodnoty jsou pak shodné s tabelovanými. Vypočtené R faktory je vhodné uchovat pro výpočet hustot pro programy, které nedisponují výpočtem Molární hmotnosti a van der Waalsova objemu podle van Krevelena. Avšak hustoty získané výpočtem programu např. z ACD ChemSketch jsou až podezřele přesné a dochází tak k podezření, že je program

přímo nepočítá, ale stahuje z on-line databáze, kterou je vybaven. Zajímavé je, že dokáže vypočítat hustoty aromatických a heterocyklických polymerů, které se liší průměrně $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ a u alifatických o $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ od tabelovaných hodnot.

Vypočtené hodnoty reálné van Krevelenovy hustoty je nyní možné vložit do materiálové tabulky vlastností speciálních vláken.

3.4.2 VÝSLEDKY STUDOVANÝCH VLÁKEN

Naměřené hodnoty velikosti příčných průměrů vláken jsou následující:

Kevlar: $d = 12,15 \text{ } \mu\text{m}$ $d \text{ max} = 12,78 \text{ } \mu\text{m}$ $d \text{ min} = 11,48 \text{ } \mu\text{m}$
 Twaron: $d = 13,05 \text{ } \mu\text{m}$ $d \text{ max} = 13,50 \text{ } \mu\text{m}$ $d \text{ min} = 12,53 \text{ } \mu\text{m}$

Vypočtené průměrné hodnoty pevností vlákna podle vztahu (14) jsou:

Kevlar: $\sigma = 1,42 \text{ GPa}$
 Twaron: $\sigma = 0,87 \text{ GPa}$

Nutno podotknout, že se jednalo o starší vlákna, která byla neznámou dobu vystavena slunečnímu záření a prachu. Rovněž délka 25 mm přispěla k vyšší pravděpodobnosti materiálového defektu vlákna. Ze 100 vzorků pro každý druh vlákna bylo naměřeno 78 vzorků vláken Kevlaru 49 a 73 vzorků vláken Twaronu. Rozdíl je tvořen poškozenými a neměřitelnými vzorky.

Tabulka 3: Tabulka základních parametrů vybraných speciálních vláken

Vlákno	Výrobce	Chemický typ	ρ g/cm ³	E GPa	σ GPa	ε %
Kevlar 29	DuPont	p-aramid	1,45	60	2,70	5,0
Kevlar 49	DuPont	p-aramid	1,45	130	2,90	2,5
Kevlar 129	DuPont	p-aramid	1,44	120	3,00	3,0
Kevlar 149	DuPont	p-aramid	1,45	190	2,60	2,5
Kevlar KM2	DuPont	p-aramid	1,44	62	3,41	3,3
PE Dyneema	DSM	UHMW-PE	0,97	172	3,00	1,7
PBO Zylon HM	Toyobo	p-fenylbenzo bisoxazol	1,56	270	5,80	3,1
PIPD M5	Akzo Nobel	diimidazopyridinylen fenylen	1,70	450	9,50	2,0
Twaron	Teijin	p-aramid	1,44	64	2,92	2,5
Technora T200	Teijin	m-aramid	1,39	86	3,70	4,4
Nomex	DuPont	m-aramid	1,38	92	2,50	8,5
Vectran HS	Celanese	aromatický polyester	1,41	65	2,84	3,3

Vysvětlivky:

- 1) hustota materiálu ρ udávaná v g.cm⁻³
- 1) modul pružnosti v tahu E udávaný v GPa (Youngův modul)
- 2) pevnost v tahu σ udávaná v GPa (případně v MPa)
- 3) prodloužení ε (deformace do přetržení, tažnost) udávaná v %

Modrá barva označuje vlákna používaná pro balistické aplikace, **červená** barva označuje žáruvzdorná vlákna. **Černá** označuje vlákno typické pro stavebně konstrukční aplikace.

Tabulka 4: Speciální vlákna s vysokou teplotní odolností [32]

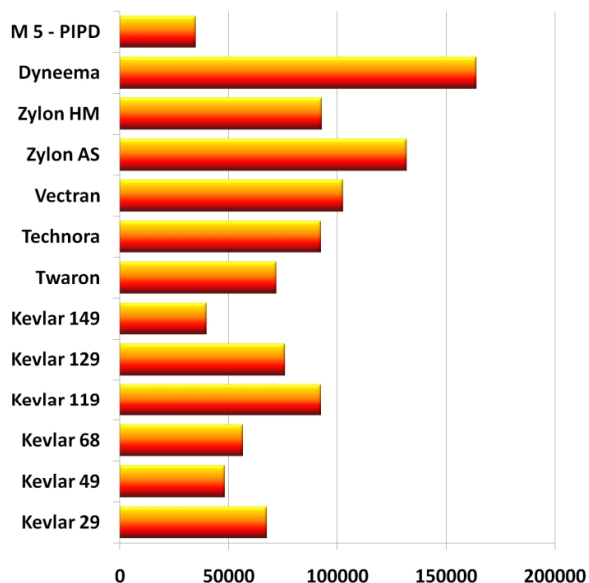
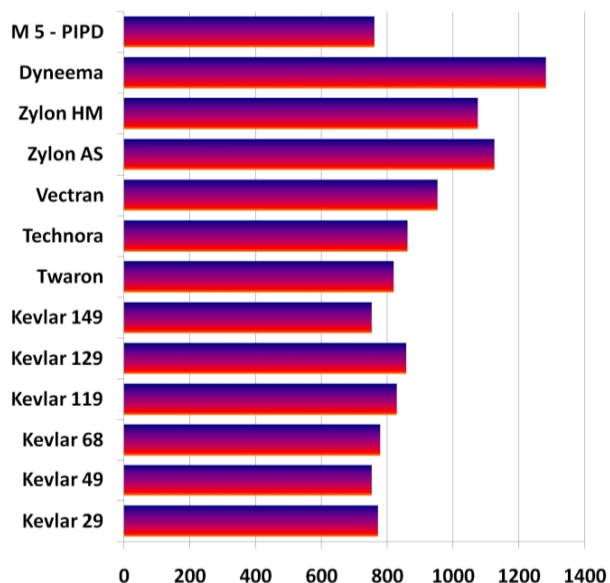
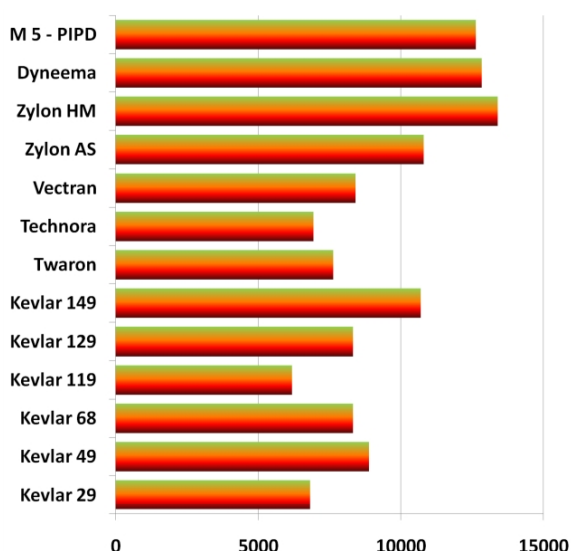
vlákno		σ MPa	E GPa	ε %	ρ kg.m ⁻³
polyphenylsulphone	PPS	3699	37	30	1370
polytetrafluoroethylene	PTFE	4320	27	20	2160
polyetheretherketone	PEEK	5715	57	20	1270
polyetherimide	PEI	3200	64	30	1280
polyamidoimide	PAI	4690	74	20	1340
polybenzimidazole	PBI	3432	72	28	1430
novoloid	Kynol	2032	44	30	1270
basofil	Basofil	2100	42	18	1400
stabilized PAN	Panox	3450	20	22	1380
polymetaaramide	Nomex	3650	20	20	1460

Proces hoření vláken je vlastně jejich oxidace za vyšších teplot. Snadnost zapálení vlákna a udržení plamene charakterizuje tzv. limitní kyslíkové číslo LOI. Určuje přibližně hmotnostní koncentraci kyslíku v okolním prostředí k tomu, aby materiál dokázal plynule hořet. Žáruvzdorná vlákna mají na vzduchu LOI vyšší než 23. V závislosti na chemickém složení polymerů můžeme zobecnit že: polyaromatické uhlovodíky mají LOI v rozmezí 28 – 34, heterocyklické p-aramidy a polyimidy LOI v rozmezí 38 – 45, polymery z heterocyklických uhlovodíků se strukturou žebříku LOI v rozmezí 55 – 70, cyklické uhlovodíky s vrstevnatou strukturou LOI v rozmezí 50 – 80, čistý grafit, je extrémně nehořlavý. Obsahuje-li klasický jednoduchý uhlíkový řetězec a zaměněné vodíky za halogeny (chlor, fluor), zvyšuje odolnost uhlíkových polymerů vůči ohni přes LOI 40, plně fluorovaná vlákna tetrafluoroethylenová mají LOI blížící se 100. [32]

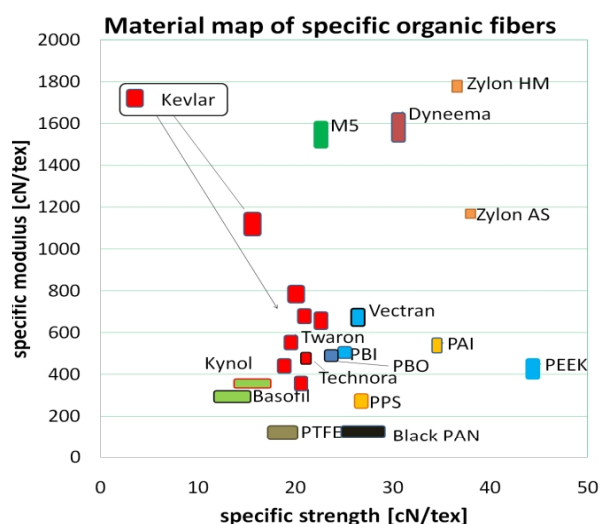
Tabulka 5: Speciální vlákna s vysokým modulem pružnosti E a pevností v tahu

vlákno	σ MPa	E GPa	ε %	ρ kg.m ⁻³
Kevlar 29	2700	67	3,6	1440
Kevlar 49	2900	114	2,4	1445
Kevlar 68	3024	100	2,7	1440
Kevlar 119	3024	55	4,4	1440
Kevlar 129	3324	100	3,3	1445
Kevlar 149	2320	166	2,5	1450
Twaron	2880	84	3,6	1440
Technora	2919	67	4,4	1390
Vectran	3807	100	3,8	1410
Zylon AS	5800	180	3,5	1540
Zylon HM	5800	280	2,5	1560
Dyneema	3000	160	5,3	970
M 5 - PIPD	3960	271	1,5	1700

Tabulka 4 obsahuje všechna speciální vlákna, která jsou svými parametry teoreticky vhodná pro balistické aplikace, kde by vynikaly svými užitnými vlastnostmi. Avšak Kevlar 49, Kevlar 68, Technora, Vectran a Zylon AS se nepoužívají pro balistické účely díky své nižší pevnosti nebo tažnosti.

Graf 3: Specifická houževnatost [m^2/s^2] (více je lépe)

Graf 4: Rychlost zvuku [m/s] (více je lépe)

Graf 5: Rychlost $U^{*1/3}$ [m/s] (více je lépe)


Graf 6: Materiálová mapa organických vláken [32]



Z grafu č. 6 je vidět, v jaké míře je určité vlákno vhodné pro balistickou ochranu. Zdánlivě vypadá Zylon jako jedno z nejlepších vláken, ale díky 2× vyšší degradaci vlákna vlivem okolních podmínek se např. v USA zakázalo používat pro výrobu neprůstřelných materiálů. Stalo se tak po incidentu v Los Angeles, kdy byli dva policisté vážně zraněni střelnou zbraní, z nichž jeden na následky zranění zemřel. Životnost zylonové vesty nebyla ve skutečnosti 30 měsíců, jak uváděl výrobce, ale pouhých 12 měsíců.

Svislá osa grafu č. 7 vyjadřuje specifický modul vlákna, což je modul pružnosti vlákna vztahený k jeho hustotě. Vodorovná osa vyjadřuje specifická pevnost vlákna. Pevnost vlákna je opět vztahena k jeho hustotě vlákna. Tímto způsobem se vlastnosti vláken lépe a objektivně posuzují, jelikož se bere v úvahu vnitřní struktura polymeru charakterizovaná jeho hustotou. Čím výše v grafu se nalézá organické vlákno, tím více je vhodné pro výrobu balistické ochranné textilie.

3.4.3 VÝSLEDKY ANALYZOVANÝCH TEXTILIÍ

MATERIÁLOVÁ CHARAKTERISTIKA

Z plošných textilií bylo připraveno vždy 5 vzorků tkaniny pro každý směr vazby, tedy 5 pro směr osnovy a 5 pro směr útku. U každého vzorku byla změřena jeho pevnost v tahu, modul pružnosti, prodloužení (tažnost) a základní parametry pro výpočet materiálové charakteristiky plošné textilie. Nebylo možné připravit zkušební vzorky z britské policejní vesty, jelikož vzorky byly preparací (páráním) poškozeny natolik, že by to mělo za následek zkreslené výstupy z měření.

Pro každou nit o délce 70 cm, lépe řečeno roving, jednoho druhu materiálu byly připraveny vzorky pro testování akustické rychlosti v počtu 50 ks pro každou vrstvu. Přístroj Dynamic Modulus Tester DMT PPM-5R je však navržen pro měření rychlostí u nití se zákrutem, takže výsledná data nebyla zahrnuta do výsledků, protože naměřená data byla tímto faktem zcela zkreslena.

Vrstvy tkaniny jsou číslovány následovně: čím blíže k tělu, tím nižší číslo vrstvy.

Tabulka 6: Dostava balistických tkanin (osnova:útek = 1:1 = plátnová vazba, jiný poměr = keprová vazba)

	Americká (Nylon)	Německá (Kevlar)	Britská (Kevlar)
osnova/útek [nití/10 cm]	50/45	45/50	45/45 a 35/35
vrstvy přední části vesty	všech 12	všech 13	1-4 a 26: 45/45
vrstvy zadní části vesty	všech 12	všech 14	5-25: 35/35

Obr. 61: Keprová vazba tkaniny balistický Nylon



Obr. 62: Keprová vazba tkaniny Kevlar 129



Hustota materiálu je klíčová k výpočtu rychlosti $U^{*1/3}$. Byla vypočtena z materiálové charakteristiky plošné tkaniny.

Tabulka 7: Základní parametry tkaniny a vlákna

Veličina	Jednotka	Nylon	Kevlar
Plošná hustota	kg.m^{-2}	0,49	0,19
Objemová hustota	kg.m^{-3}	664,93	696,02
Tloušťka	mm	0,75	0,28
Jemnost vlákna	dtex	7,06	1,67
Příčný průměr vlákna	μm	28,59	12,19
Hustota materiálu	kg.m^{-3}	1099	1430
Pórovitost	%	39,50	51,33

Pro výpočet rychlosti $U^{*1/3}$, která je spolu s rychlostí V_{50} hlavním kritériem určujícím, zda je materiál vhodný pro balistické účely, bylo zapotřebí změřit pevnost v tahu a modul pružnosti zkoušeného materiálu. To umožnilo snížit náklady na přípravu vzorků a použitého střeliva před vlastním testováním balistické odolnosti střelnými zbraněmi.

Tabulka 8: Naměřené mechanické vlastnosti (americká nylonová a německá kevlarová vesta)

	Pevnost v tahu		Modul pružnosti		Prodloužení	Hustota
	cN.tex^{-1}	MPa	cN.tex^{-1}	GPa	%	kg.m^{-3}
Nylon	0,7	81	30	3,3	36	1099
útek				3,0	34	
osnova				3,6	38	
Kevlar	23,8	3432	131,6	18,9	3,3	1430
útek				18,4	3,1	
osnova				19,4	3,4	

POROVNÁNÍ RYCHLOSTÍ

Pro výpočet rychlosti $U^{*1/3}$ podle vztahu (3) byly použity naměřené hodnoty uvedené v tabulce č. 7, konkrétně pevnost v tahu, modul pružnosti, prodloužení a hustota materiálu. Porovnáme-li vypočtenou hustotu s predikovanou hustotou podle van Krevelena a tabelovanou hustotou, zjistíme, že se odpovídají s nepatrnou odchylkou a dokonce se potvrdila domněnka, že Kevlar použitý v německé vestě je skutečně typ 129. Z výsledků výpočtu se nabízí jistá možnost odhadnutí rychlosti V_{50} , která byla označena V_E (estimated = odhadovaná). Zdá se, že tato rychlost souvisí zřejmě s polovinou rychlosti $U^{*1/3}$.

Ačkoliv byly otestovány mechanické vlastnosti především protistřepinových vest, je možné vyvodit závěr, že německá protistřepinová vesta by měla být schopna zastavit střelu ráže 9 mm, což by odpovídalo třídě odolnosti II podle NIJ [17]. Nepotvrzené internetové zdroje toto proklamují.

Balistická vložka britské policejní vesty byla rovněž vyrobena z Kevlaru 129 a podle výrobního štítku disponovala třídou odolnosti NIJ II.

Tabulka 9: Porovnání rychlostí

	Specifická houževnatost m^2/s^2	Akustická rychlost podél osy vlákna m/s	$U^{*1/3}$ m/s	V_{50} m/s	V_E m/s
Nylon	25357	1615	345	175	173
Kevlar	78554	8150	858	434	429

Vypočítat rychlost V_{50} bez skutečného testování střelbou je prakticky nemožné, ale jak je vidět z tabulky, určitá souvislost s $U^{*1/3}$ zde je. Odhadovaná rychlost V_E je pouze o 2 % nižší než skutečná tabelovaná rychlost V_{50} , tzn. že 50 % všech vystřelených projektilů rychlejších než V_E projde balistickou vestou. Všechna data byla vztažena k ráži 9 mm Luger.

3.4.4 VÝSLEDKY BALISTICKÝCH ZKOUŠEK

3.2 STANAG 2920, NIJ 0101.06, ČSN 39 5360

Obě balistické vesty, Second Chance Ultima (Zylon) a Higmark Police (Kevlar) odolaly a zadržely hned při prvním výstřelu projektil 9 mm o hmotnosti 115 gr vypálený z pistole Glock 17. Podle standardu NIJ vyhověly obě vesty testům při své třídě odolnosti NIJ II a žádná střela neprošla do prostoru materiálu v pozadí nebo do zadní části balistické vesty, avšak trauma efekt, který byl zcela zřejmý na první pohled u zylonové vesty od Second Chance, byl enormní. Dopadová plocha svědečného systému po následujících 5 střelách byla zcela roztrhána vtiskem projektilů, takže by případný nositel patrně utrpěl vážná vnitřní zranění včetně zlomených žeber a poškození vnitřních orgánů. Tato zranění by mohla být i smrtelná. Podle standardu ČSN 39 5360 vesta Ultima zcela nevyhovuje ve své odolnosti, jelikož maximální přípustná hloubka vtisku střely je 2 mm mimo svědečný systém. Nakonec byla vesta otestována střelou ráže 7,62x39 mm o hmotnosti 124 gr vypálenou ze samonabíjecí kulovnice CZ 858 Tactical, která měla ověřit odolnost třídy NIJ III. Střela prošla skrz přední i zadní díl bez viditelného zpomalení nebo změny směru dráhy letu. Vesta Second Chance Ultima (Zylon) není odolná podle třídy odolnosti NIJ III a vyšší.

Balistická vesta Higmark Police zadržela všech 6 vypálených střel z pistole Glock 17 a vyhověla standardu NIJ při své balistické odolnosti NIJ II. Byl proveden i diagonální test šikmého výstřelu a střela ráže 9 mm Luger prostřela vestu a zastavila se před svědečným systémem, kde se vzpříčila. Do materiálu v pozadí neprošla, pouze vytvořila mělkou prohlubeň v plechu. Vesta Highmark je o poznání těžší a bytelnější oproti vestě Ultima a disponuje o 4 vrstvy balistické tkaniny více, takže poškození svědečného systému nebylo tak značné. Žádná penetrace plechu se neobjevila, jen důlkové prohlubně různých hloubek. Podle ČSN normy však vesta vyhověla jen z 50 %, protože polovina důlků byla hlubších než 2 mm. I tato vesta byla na závěr otestována střelou ráže 7,62x39 mm o hmotnosti 124 gr vypálenou ze samonabíjecí kulovnice CZ 858 Tactical, která měla ověřit odolnost třídy

NIJ III. Střela také prošla skrz přední i zadní díl bez viditelného zpomalení nebo změny směru dráhy letu. Vesta Highmark Police (Zylon) není rovněž odolná podle třídy odolnosti NIJ III a vyšší.

Tabulka 10: Vstupní rychlost 6 střel, 9 mm Luger, 115 gr, 7,5 g projektil, TFMJ

m/s	1	2	3	4	5	6	Průměrná rychlost
Zylon	356	355	372	371	370	370	366
Kevlar	363	374	374	378	371	357	370

Podle provedeného výpočtu by hodnota rychlosti V_{50} pro ráži 9 mm Luger měla být vyšší než 429 m/s. Průměrná rychlost střely ráže TFMJ 9 mm, která zasahovala testované vzorky, byla 368 m/s. Rychlost nebylo možné v tamějších podmínkách střelnice zvýšit, jelikož střelba probíhala v bezprostřední blízkosti 2 m od testovaného vzorku. Jediná možnost zvýšení rychlosti střely oproti továrnímu střelivu je vlastní laborace nábojů na definovanou ústňovou rychlost. Střela FMJ (celoplášťová) ráže 7,62x39 mm pronikla hrudní i zádočnou částí vesty bez jakéhokoliv znatelného zpomalení. Jednalo se o starší typy vest, obě z roku 2005, pokud by byly zcela nové patrně by zadržely pistolové projektily na obdobné úrovni vůči sobě navzájem. Tyto vesty zcela bezpochyby nezadrží střelu vypálenou z dlouhé kulové zbraně – pušky, kromě malorážky ráže .22 LR.

Z výsledků měření je patrné, že dvě vesty stejné balistické odolnosti a stejného stáří se chovají ve stejných podmínkách odlišně, liší-li se užitou vnitřní balistickou vložkou. Testování dokázalo, že Zylon z dlouhodobého hlediska není absolutně vhodný jako materiál pro balistické účely a že existuje souvislost mezi V_{50} a $U^{*1/3}$.

Tabulka 11: Míra trauma efektu ve svědečném systému

mm	1	2	3	4	5	6	Vyhověla
Zylon	1,4	3,8	3,9	4,0	5,4	5,5	Ne
Kevlar	1,8	2,2	2,2	3,8	2,0	1,8	Ano



Obr. 63: Trauma efekt v zylonové tkanině 35 mm (uvnitř střela ráže .357 Magnum)



Obr. 64: Zdeformovaná střela TFMJ 9 mm Luger 115 gr a svědečný systém duralového plechu

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo komplexní studium vlastností a použitelnosti speciálních textilních vláken pro ochranu člověka. Prostudoval jsem vlastnosti těchto vláken a určil, které jsou vhodné pro ochranu člověka před balistickým poškozením, které před ohněm a které jsou spíše vhodné pro stavebně konstrukční aplikace.

Podařilo se mi získat několik vzorků materiálů (Kevlar 49 a 129, Twaron, balistický Nylon) vyrobených ze speciálních vláken nebo vláken s příbuznou aplikací, které bylo možné analyzovat a vypreparovat z nich vzorky vhodné pro měření a zkoušení mechanicko-fyzikálních vlastností. Získal jsem také několik výrobků, balistických vest, helem a rukavic, které jsem zkoumal z různých hledisek (design, aplikace, použití, vlastnosti, odolnost, možnosti inovace). Provedl jsem hloubkovou rešerši vlastností speciálních vláken, které jsem zpracoval do přehledných tabulek.

Snažil jsem se nalézt možnosti predikce materiálových vlastností a ohledně výpočtů odhadování hustoty materiálu jsem byl úspěšný. Experimentální data spolehlivě korespondovala s údaji uvedených v odborné literatuře. Naučil jsem se pracovat s profesionálními počítačovými programy pro práci s chemickými modely vybraných polymerů a struktur. Učinil jsem několik teoretických závěrů, proč se daný materiál chová určitým svým způsobem a proč má jisté vlastnosti, kterého odlišují od ostatních. Pronikl jsem do oblasti způsobů počítačové optimalizace modelů. Naučil jsem se vytvářet stereogramy molekul, které s příslušným vybavením vytvářejí dokonalejší iluzi prostorovosti, a tento způsob jsem navrhl na několika konferencích ke zlepšení výuky chemie.

Souběžně se studiem chemické podstaty speciálních vláken, jsem se učil pracovat s textilními zkušebními stroji, mikroskopy a učil se metodám a technikám, které se používají pro hodnocení kvality textilií. Taktéž jsem se musel naučit základům textilní terminologie, abych mohl studovat odborné publikace

Pro balistické zkoušky jsem si zajistil dodavatele neprůstřelných vest a získal oprávnění držet a nosit střelnou zbraň, což mi dovolilo legálně provádět zkoušky balistické odolnosti materiálů.

Prostudoval jsem velké množství odborných článků, především ze Science Direct, zabývajících se testováním balistických materiálů. Získal jsem zkušební normy ozbrojených složek, podle kterých jsem provedl balistické zkoušky. Z experimentálních dat jsem učinil teoretické závěry, jak souvisí rychlost V_{50} s rychlostí $U^{*1/3}$, což jsem následně ověřil praktickými střeleckými zkouškami. Až zpětně jsem zjistil, že mnou učiněný závěr byl zcela správný, jelikož tato myšlenka napadla Cheesmana v roce 2008 [24].

V rámci studia historie používání ochranných oděvů jsem si uvědomil několik faktů. Za prvé, že výrobci zbraní jsou vždy o několik kroků vpřed před vývojáři ochranných prostředků. Za druhé, že se historie se stále opakuje a že se můžeme vždy do jisté míry inspirovat vynálezy svých předků a hledat mezi nimi zajímavé spojitosti. Co má společného Kevlar a drátěná kroužková košile kromě své společné aplikace? Kevlarová zesíťovaná struktura aromatických řetězců je nápadně podobná struktuře tohoto středověkého brnění.

Nebo že spousta syntetických velmi odolných materiálů v sobě obsahuje peptidickou vazbu, která se nachází v každém živém organismu.

Taktéž jsem měl možnost vést konzultace s odborníky na materiálovou chemii, speciální vlákna, polymery a kompozity. Dostalo se mi cenných rad a zkušeností od odborníků z oblasti balistiky, zbraní, police, armády a výrobců, kteří jsou dodavatelé ozbrojených složek

Jaká je budoucnost balistických ochranných prostředků? V současnosti jsou trendy takové, že se upřednostňují kompozitové materiály typu Strike Face, které jsou součástí lehkých, taktických nosných systémů. Kompozit má vyšší stupeň plošné hustoty, a tak může poskytnout ochranu před širším spektrem letících střel a střepin snažících se pancíř prorazit.

Za pomoci mnoha osob, které jsem jmenoval v této diplomové práci, se mi podařilo otestovat balistické vesty v kombinaci několika norem (STANAG, NIJ, ČSN a MIL). Výsledky zkoušek jsou velmi uspokojivé a potvrdily odhadované výsledky. Připouštím, že testování proběhlo za nižší teploty než navrhuje norma, avšak na výsledek testování to nemělo vliv, jelikož speciální vlákna chladem nekřehnou. Nebylo však možné provést balistické zkoušky ve vnitřních prostorách, jelikož fotodiody hradel potřebují denní světlo. Jako posledním menším nedostatkem se může jevit použitý duralový plech (svědečný systém), který byl o 0,3 mm silnější než stanovuje norma. V rámci zachování pevnosti v tahu tohoto plechu muselo být využito právě tohoto plechu, jinak by byla nutná drahá zakázková výroba. Přednější byla však hodnota pevnosti než jeho tloušťka. Materiál v pozadí simulující chování lidské tkáně (cívka česané bavlny) fungoval nad očekávání dobře a tento způsob snížil náklady na nákup velmi drahého balistického želé nebo jílů.

Zjistil jsem, že k balistické ochraně a výrobě balistické vložky postačí vždy alespoň 20 vrstev speciální tkaniny a že takto silný materiál je schopný zastavit i střelu pistolové ráže. Někdy však postačí i pouze 12 vrstev tkaniny, avšak je nutné počítat s vyšším účinkem trauma efektu. Taktéž jsem z vlatního pozorování zjistil, jak pracuje pokročilá balistická vesta jako je Highmark Police. Vložka se skládá z 24 vrstev, avšak jsou sešity po 12 vrstvách do jednoho kusu. Při průniku střely prvními 12 vrstvami se střela zpomalí, zbrzdí a díky deformaci předá svou energii do okolí. Následujících 12 vrstev funguje jako lapač střely a anti-šoková vrstva. Tento princip jsem doposud nikde nenalezl. Taktéž je zajímavé, jak pracuje ocel-kevlarová pletenina, která nejen, že chrání před bodnými a sečnými zbraněmi, ale svou houževnatostí výrazně pomáhá deformovat střelu. Také byla potvrzena domněnka, že rotující střela během penetrace vložky namotává na sebe vlákna, čímž se efektivněji zpomalí. Deformované střely měly ve svých pláštích doslova vlákna zařízlá, což jen tuto domněnku potvrdilo.

Z mého pohledu si myslím, že jsem naplnil obsah této práce, jak nejlépe jsem mohl a věřím, že jsem stanovené požadavky splnil úspěšně, jelikož tato práce je shrnutím poznatků, které jsem nabyl v uplynulých letech. Upozorňuji, že takový rozsah experimentů, zejména balistických zkoušek, je velmi nákladný a logisticky náročný proces, který si žádá nemalých finančních prostředků. Přesto se mi podařilo závěrečné balistické zkoušky s úspěchem uskutečnit a vyhodnotit.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

1. SCOTT, Richard. *Textiles for Protection*, 1st ed., Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2005, 733 p. ISBN-13: 978-1-84569-097-7
2. MILITKÝ, Jiří. *Textilní vlákna*. Učební text. TUL, Liberec, 1995
3. GRÉGR, Jan. *Molekulární modelování a predikce vlastností vláken*. In *Pokroky v textilních vědách a technologiích TUL v Liberci 2004*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. Fakulta textilní. Výzkumné centrum Textil, 2004. Sekce 12, část 3.2.41.
4. CUNNIFF, Philip – AUERBACH, Margaret. *High Performance “M5” Fiber for Ballistics / Structural Composites* [online] Massachusetts: MIT, U.S. Army Report, USA, 2009 [cit. 2009-11-12] Dostupné z [www: <http://web.mit.edu/course/3/3.91/www/slides/cunniff.pdf>](http://web.mit.edu/course/3/3.91/www/slides/cunniff.pdf)
5. YANG, H.H.; *Aramid Fibers*, chapter 6, pages 249-283. Textile Fibers Department, E.I. DuPont de Nemours & Co. Inc, Richmond, VA (USA)
6. Cambridge Soft. *ChemBioDraw Ultra* [počítačový program, DVD-ROM]. Ver. 11.0.1, USA, 2007. Počítačový program pro tvorbu chemických struktur, součást balíku ChemBio Office 2008. Vyžaduje Windows XP a vyšší. Placený software, trial. Pro výuku (multilicence 1.520 USD).
7. Cambridge Soft. *ChemBio3D Ultra* [počítačový program, DVD-ROM]. Ver. 11.0.1, USA, 2007. Počítačový program pro vizualizaci chemických struktur a simulace, součást balíku ChemBio Office 2008. Vyžaduje Windows XP a vyšší. Placený software, trial. Pro výuku (multilicence 1.520 USD).
8. QUINN, James. *Molecular Modeling Pro* [počítačový program, soubor 20 MB]. Ver. 6.3.3, USA, 2004. Počítačový program pro vizualizaci chemických struktur a simulace, produkt společnosti Chem SW. Vyžaduje Windows XP a vyšší. Placený software, trial. Pro výuku (licence 199 USD).
9. ACD. *ChemSketch* [počítačový program, soubor 36 MB]. Ver. 12.0.1, Canada, 2009. Počítačový program pro tvorbu a vizualizaci chemických struktur. Vyžaduje Windows XP a vyšší. Freeware, volně šiřitelný. Dostupné z [www: <http://www.acdlabs.com/resources/freeware/chemsketch/>](http://www.acdlabs.com/resources/freeware/chemsketch/)
10. JANDERKA, Pavel. *Molekulové modelování a teoretická chemie na PC*. Chemické listy, Vol. 94 (2000), Issue 1, strany 28-38. Praha, 2000. ISSN 1213-7103, 0009-2770
11. HUML K. – VONDRÁŠEK J. *Tři přístupy k počítačovému modelování struktury a interakcí velkých molekul* [online] Praha: Materials Structure, vol. 7, number 1, 2000 [cit. 2009-11-12] Dostupné z [www : <www.xray.cz/ms/bul2000-1/huml.pdf>](http://www.xray.cz/ms/bul2000-1/huml.pdf)

12. VAN KREVELEN, D.W. *Properties of Polymers*. 3rd rev. ed., Elsevier, Amsterdam 1990, ISBN: 0-444-88160-3
13. ČSN 80 0200*. *Zisťovanie pevnosti v ťahu a ťažnosti jednotlivých vlákien*. Vydavateľstvi ÚNM, Praha, 1985
14. ČSN EN ISO 5084 (80 0844). *Textilie - Zjišťování tloušťky textilií a textilních výrobků*. Český normalizační institut. 1997
15. STANAG 2920 PPDS. *Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing*. NATO Standardization Agency (NSA), Edition 2. 31 July 2003
16. MIL-STD-662F. *V₅₀ Ballistic Test for Armor*. Department of Defense, Test Method Standard, US Army Research Laboratory. Rev. F. 18 December 1997
17. NIJ Standard 0101.06. *Ballistic Resistance of Body Armor*. U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs, National Institute of Justice, July 2008
18. ČSN 39 5360. *Zkoušky odolnosti ochranných prostředků. Zkoušky odolnosti proti střelám, střepinám a bodným zbraním. Technické požadavky a zkoušky*. Český normalizační institut. 1996
19. Zákon č. 119/2002 Sb o střelných zbraních a střelivu. Sbírka zákonů, ročník 2002, částka 52, ze dne 9.4.2002. Ministerstvo vnitra 1. ledna 2003.
20. ČSN EN 10 204 (42009) *Kovové výrobky – Druhy dokumentů kontroly*. Česká technická norma. Evropský výbor pro normalizaci. Srpen 2005
21. MORIN Brian. *Ballistic Response of Soft Panels Including Innegra S Fibers* [online]. Innegrity LLC, Simpsonville, USA, 2007. [cit. 2010-7-17] Dostupné z [www: <www.innegrity.com/mydocuments/ ballisticinnegras.pdf>](http://www.innegrity.com/mydocuments/ballisticinnegras.pdf)
22. CHANG Julius. *Body Armor Information* [online]. [cit. 2010-7-17] Dostupné z [www: <http://www.recguns.com/Sources/XJ4.html>](http://www.recguns.com/Sources/XJ4.html)
23. KARAHAN M. – KUS A. – EREN R. *An Investigation into Ballistic Performance and Energy Absorption Capabilities of Woven Aramid Fabrics*, International Journal of Impact Engineering International Journal of Impact Engineering Vol. No.35, pages 499-510. 2008
24. CHEESMAN B. A. – BOGETTI T. A. *Ballistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates*, Composite Structures No.61, pages 161-173. 2003
25. BIRON Michel. *Thermoplastics and Thermoplastic Composites: Technical Information for Plastic Users* [online], Elsevier Ltd., Oxford, 2007, UK, 874 s. [cit. 2009-11-12]. Dostupné z WWW: < http://books.google.cz/books?id=g_11KTQ-RjYC&printsec=frontcover&source=gbs_v2_summary_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false >
26. SALAMONE Joseph C. *Polymeric Materials Encyclopedia*, Vol. 1 [online], CRC Press Inc., 1996, USA, 9218 s. [cit. 2009-11-12]. Dostupné z WWW:

- <http://books.google.cz/books?id=ZepTz1Bozu0C&printsec=frontcover&source=gbs_v2_summary_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false>
27. LEWIS, P.R. *High Performance Polymer Fibres* [online], Rapra Technology Limited., 1997, UK, 100 s. [cit. 2009-11-12]. Dostupné z WWW: <http://books.google.cz/books?id=4pXsuRaZay4C&printsec=frontcover&source=gbs_v2_summary_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false>
 28. LUBIN George – PETERS Stanley. *Handbook of Composites* [online], Chapman and Hall., 1998, UK, 1118 s. [cit. 2009-11-12]. Dostupné z WWW: <http://books.google.cz/books?id=5t5ePK1Lc1gC&printsec=frontcover&source=gbs_v2_summary_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false>
 29. *Databáze přístrojů* [online]; Web Fakulty textilní TUL, Liberec, 2008 [cit. 2009-11-12] Dostupné z www: <http://www.ft.vslib.cz/index.cgi?text=&strana=6&sort=pristroj_cz_p&search=&kSORT=ASC&fun=pristroje>
 30. *Mechanické vlastnosti* [online]; Studijní materiály Fakulty textilní TUL, Liberec, 2006 [cit. 2009-11-12] Dostupné z www: < <https://skripta.ft.tul.cz/akreditace/data/2006-03-22/11-19-58.pdf> >
 31. *Bibliografické citace elektronických dokumentů*, Příklady podle normy ČSN ISO 690-2 [on-line]. Praha : Knihovna ČVUT, 2008, [cit. 2009-11-12]. Dostupné z WWW: <http://knihovny.cvut.cz/vychova/vychova2/bibl_citace/iso690_2.html>
 32. GRÉGR J. – DEJL R.: Special Organics Fibers, 16th International Conference STRUTEX, Structure and Structural Mechanics of Textiles, poster, Dec. 2009, TU Liberec.
 33. BERNARDOVÁ, I. *Speciální organická vlákna*. Liberec, 2009. 87 s. Diplomová práce na Fakultě textilní Technické univerzity v Liberci na katedře textilních materiálů. Vedoucí diplomové práce Vladimír Kovačič.
 34. POKORNÁ, I. *Analýza vlastností kevlarových vláken*. Liberec, 2009. 51 s. Bakalářská práce na Fakultě textilní Technické univerzity v Liberci na katedře textilních materiálů. Vedoucí bakalářské práce Vladimír Kovačič.
 35. RISBY M.S. et. al. *Ballistic Performance of Coconut Shell Powder/Twaron Fabric against Non-armour Piercing Projectiles*, DESIDOC, 2008: Defence Science Journal, Vol. 58, No. 2, March 2008, pp. 248-263.
 36. *Ochranné vesty*, obrázky č. 1, 2, 3 [cit. 2007-4-25] Staženo z: <<http://strelnice-zlin.hyperlink.cz/zajimavosti/020103/index.htm>>
 37. *Armor Great War*, obr. 2, 3 a obrázky z Přílohy č. 1, obr. 1-6 [cit. 2007-4-25] Dostupné z www: <http://www.greatwardifferent.com/Great_War/Armor/Armor_01.htm>
 38. *Black Armor*, obrázek č. 9 [cit. 2010-12-6] Dostupné z www: <<http://blackarmor.com>>



SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 – **Ilustrace určené pro ochranné prostředky**

Příloha č.2 – **Chemické ilustrace, vzorce, schémata a modely**

Příloha č.3 – **Vlákna, tkaniny, přístroje a balistické zkoušky**

Příloha č.4 – **Tabulky a grafy zjištěných a naměřených hodnot**

Disk DVD+R – Digitální podoba diplomové práce ve formátu PDF

PŘÍLOHA Č. 1: ILUSTRACE URČENÉ PRO OCHRANNÉ PROSTŘEDKY



Obr. 1: Řecké celistvé brnění



Obr. 2: Německá plátová zbroj (UK, 1. sv. v.)



Obr. 3: Flak Jacket



Obr. 4: Kožené segmentované brnění



Obr. 5: Římské segmentované nerezové brnění



Obr. 6: Gotické brnění



Obr. 7: Protistřepinová vesta (USA, 60. léta)



Obr. 8: „Hard Body Armor“ (USA, 21. století)

PŘÍLOHA Č.1 – Ilustrace určené pro ochranné prostředky



Obr. 9: BW protistřepinová vesta Obr.10: Second Chance Ultima (Zylon) Obr.11: Highmark Police(Kevlar)

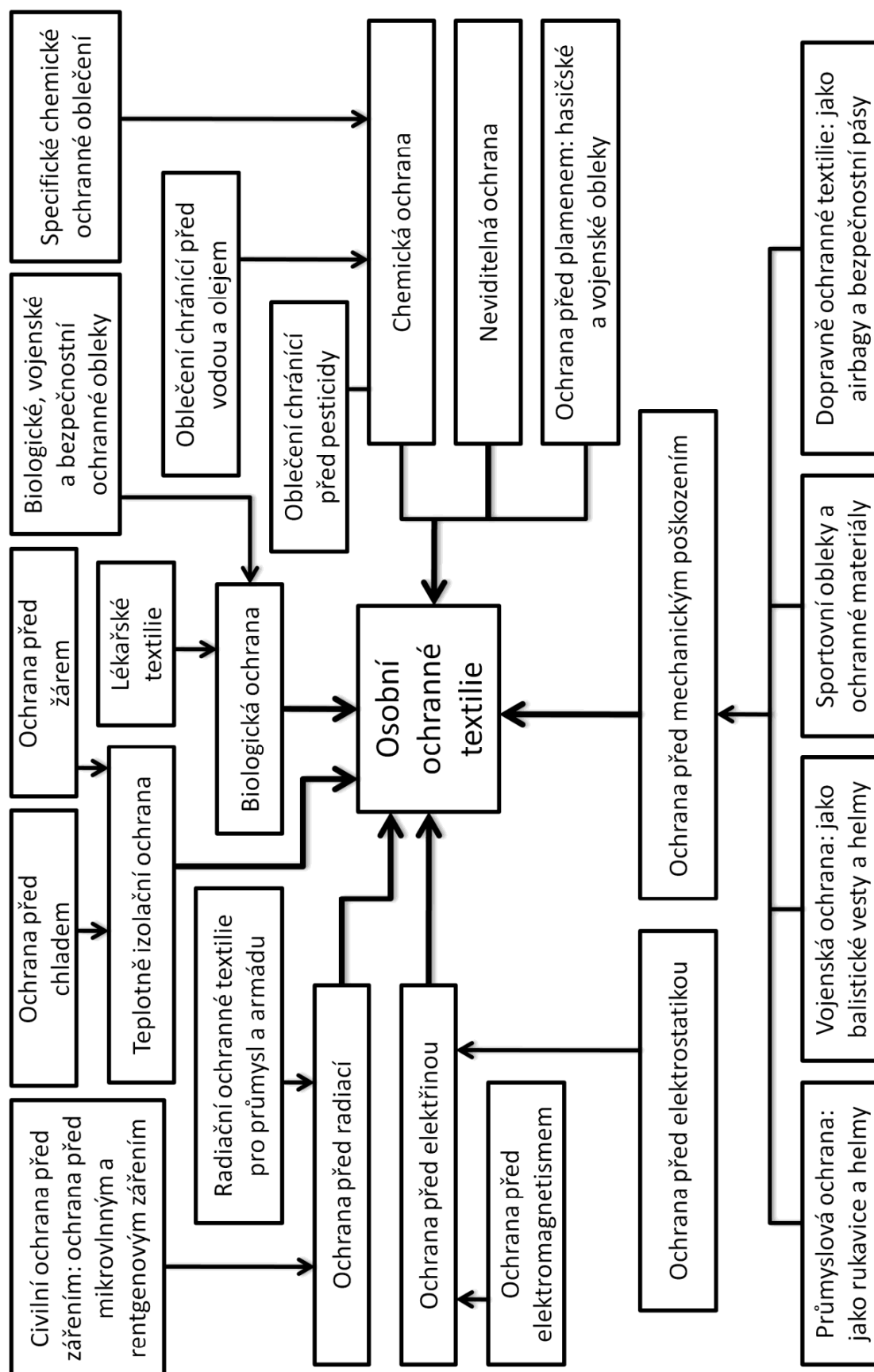


Obr. 11: Puška CZ 858 Tactical a pistole Glock 17 Obr. 12: Digitální výškoměr s plechem svědečného systému

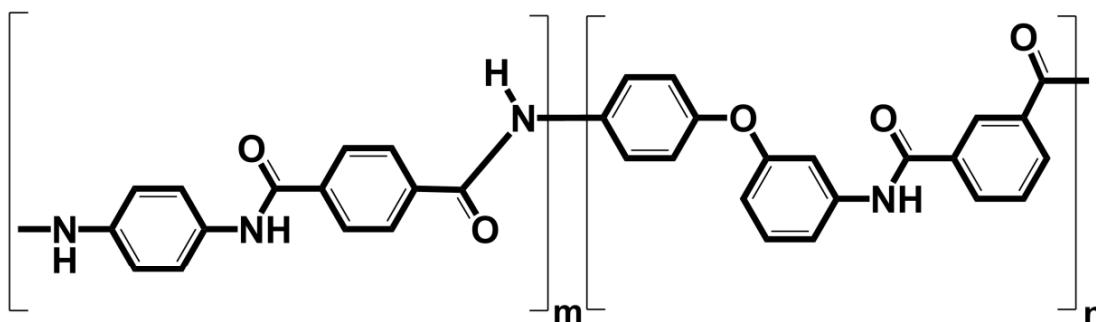


Obr. 13: Taktická vesta s balistickými pláty Strike Face – vesty vyplněné kompozity jsou dnešním trendem

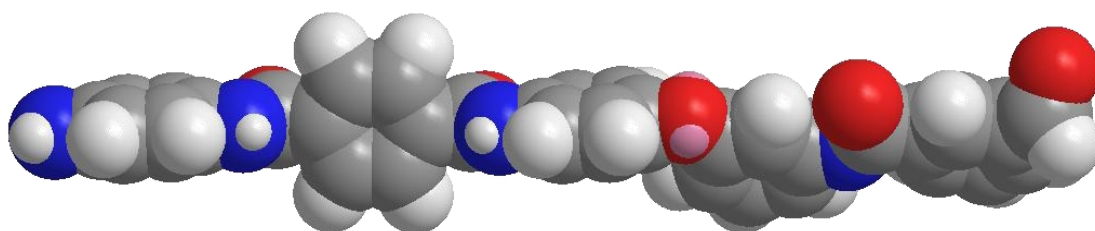
Obr. 14: Pojmová mapa ochranných textilií podle R. A. Scotta [1]



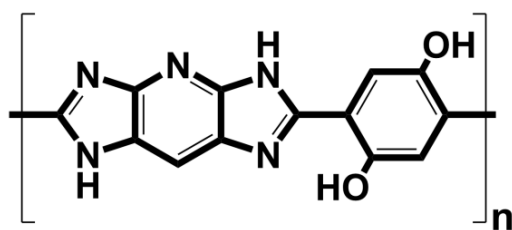
PŘÍLOHA Č. 2: CHEMICKÉ ILUSTRACE, SCHÉMATA A MODELÝ



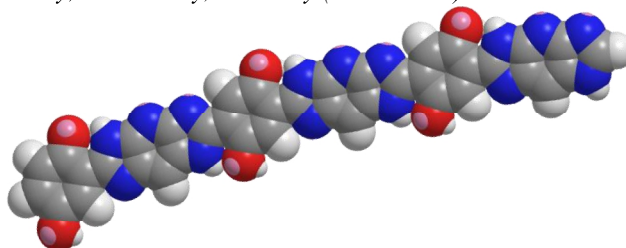
Obr. 1: Vzorec Technora - copoly-p-fenylen/3,4-difenylen ether tereftalamid (ChemBioDraw)



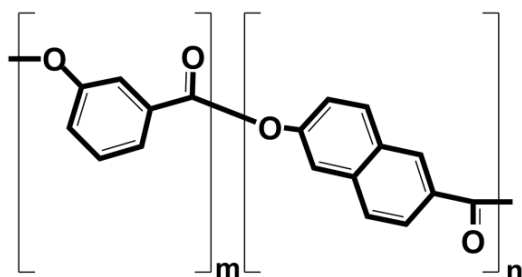
Obr. 2: Kalotový model polymeru Technora, kyslík červený, dusík modrý, vodík bílý (ChemBio3D)



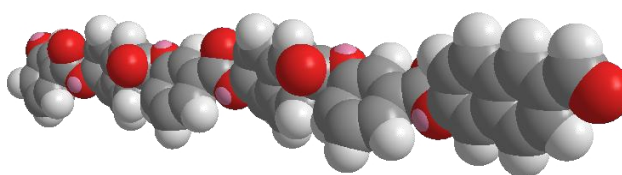
Obr. 3: Vzorec PIPD M5 (ChemBioDraw)



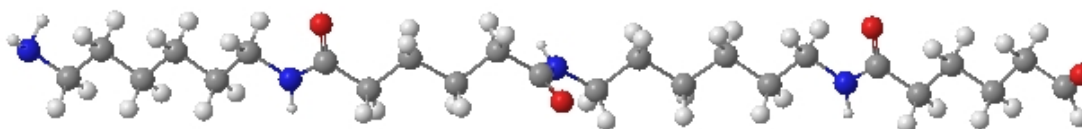
Obr. 4: Kalotový model polymeru PIPD M5(ChemBio3D)



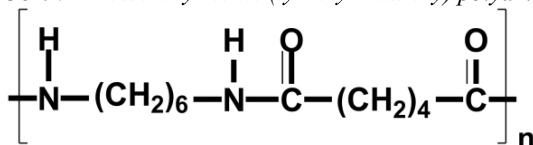
Obr. 5: Vzorec polymeru Vectran (ChemBioDraw)



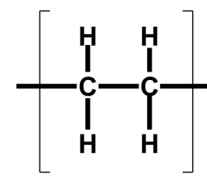
Obr. 6: Kalotový model polymeru Vectran (ChemBio3D)



Obr. 7: Prostorový model (tyčinky a kuličky) polyamidu 66 (ChemBio3D)

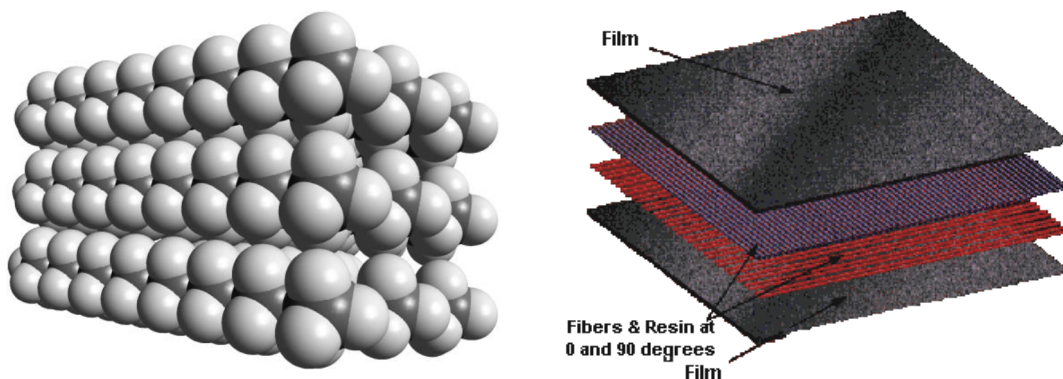


Obr. 8: Strukturní vzorec polyamidu 66 (ChemBioDraw)

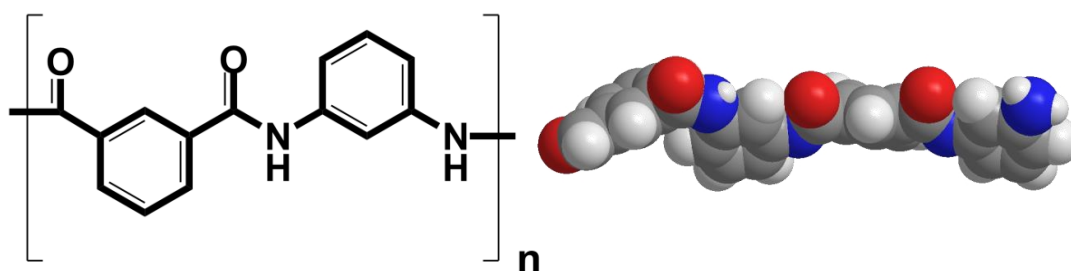


Obr. 9: Strukturní vzorec polyethylenu

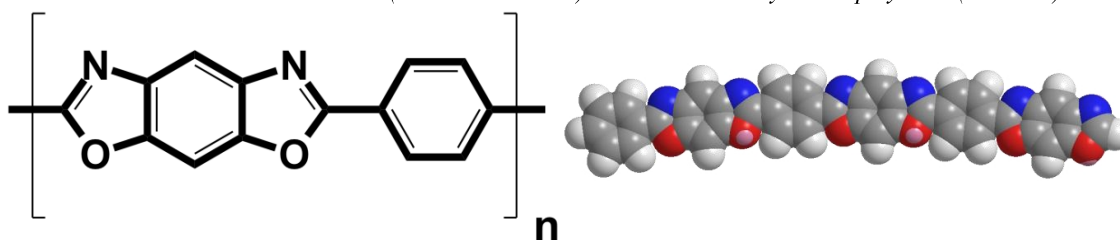
PŘÍLOHA Č.2 – Chemické ilustrace, vzorce, schémata a modely



Obr. 10: Srovnaná a optimalizovaná struktura UHMW-PE Obr. 11: Složení tkaniny Spectra Shield

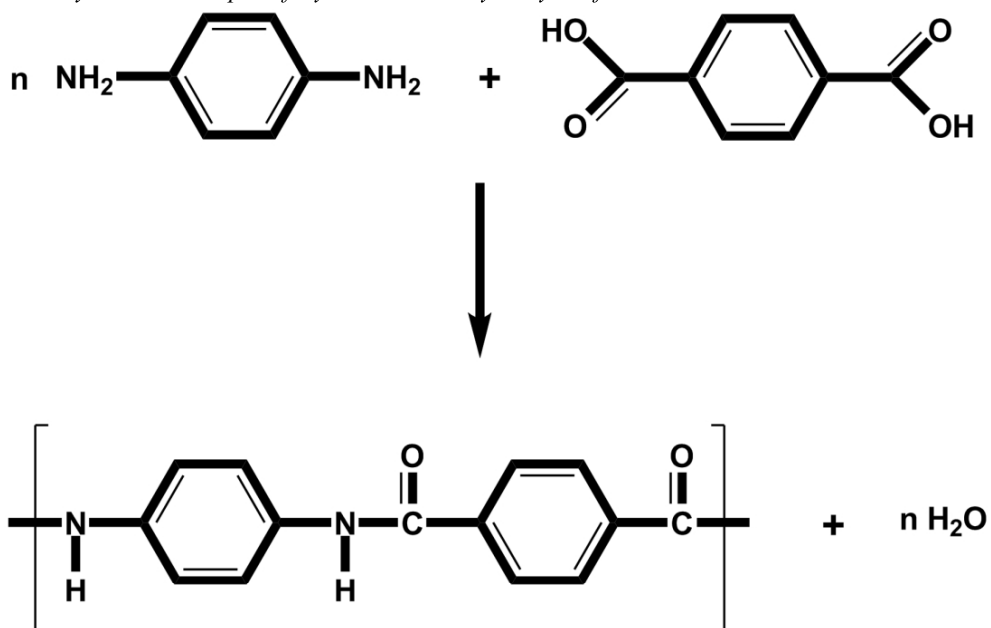


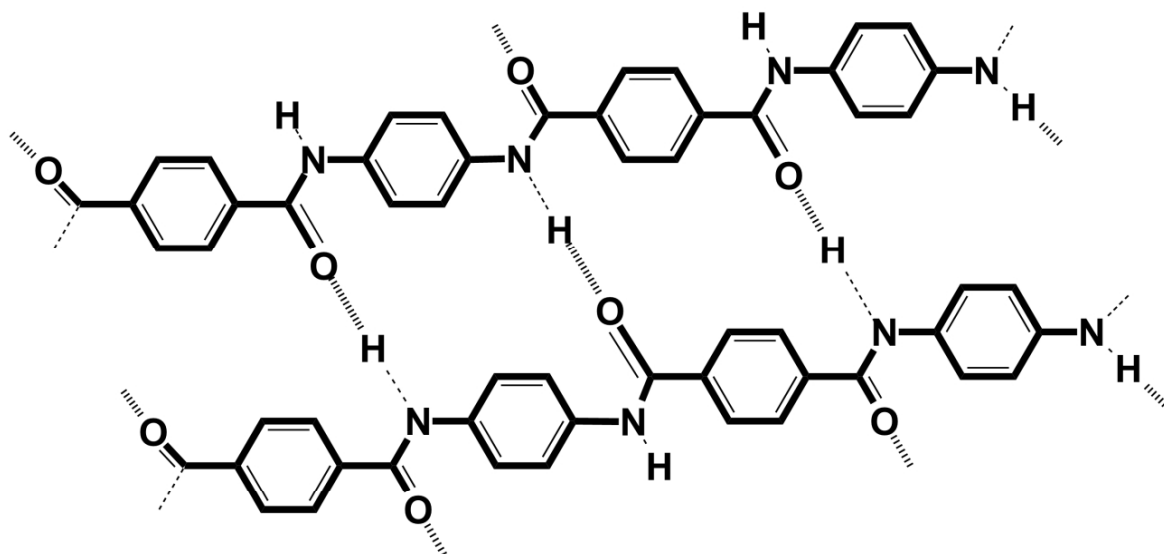
Obr. 12: Strukturní vzorec Nomexu (ChemBioDraw3D) Obr. 13: Kalotový model polymeru (Chem3D)



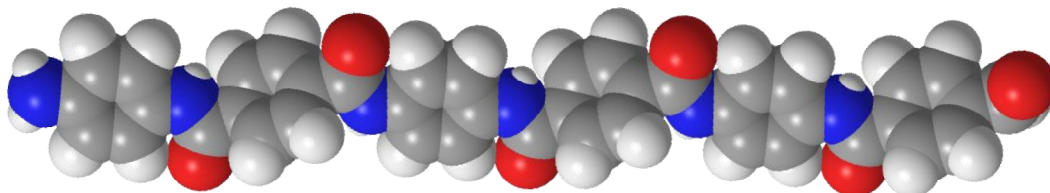
Obr. 14: Strukturní vzorec Zylonu (ChemBioDraw3D) Obr. 15: Kalotový model polymeru (ChemBio3D)

Obr. 16: Syntéza PPTA z para-fenylen diaminu a kyseliny tereftalové

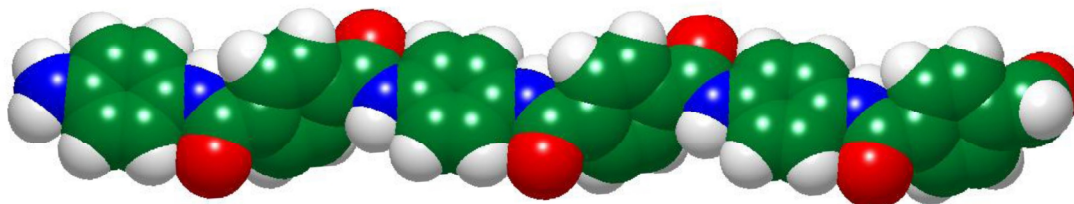




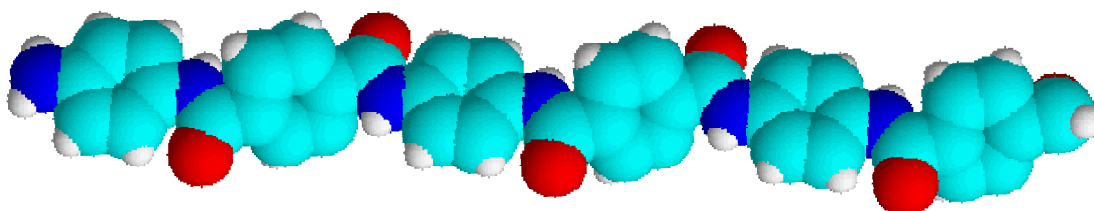
Obr. 17: Vodíkové vazby mezi řetězci zvyšují pevnost polymeru PPTA (ChemBioDraw)



Obr. 18: Polymer PPTA (kalotový model), 3 monomerní jednotky, Kevlar (ChemBio3D Ultra 11.0)

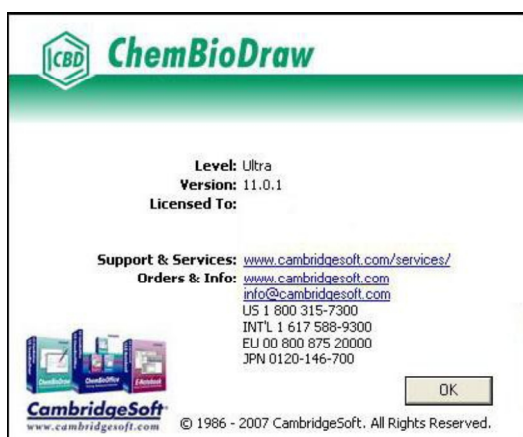


Obr. 19: Polymer PPTA (kalotový model), 3 monomerní jednotky, Kevlar (Molecular Modeling Pro) 6.3.3

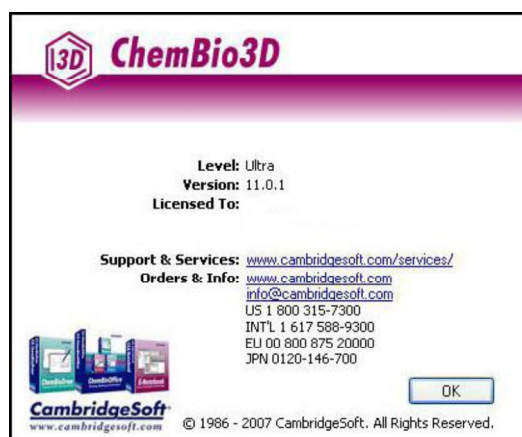


Obr. 20: Polymer PPTA (kalotový model), 3 monomerní jednotky, Kevlar (ACD ChemsSketch 12.0)

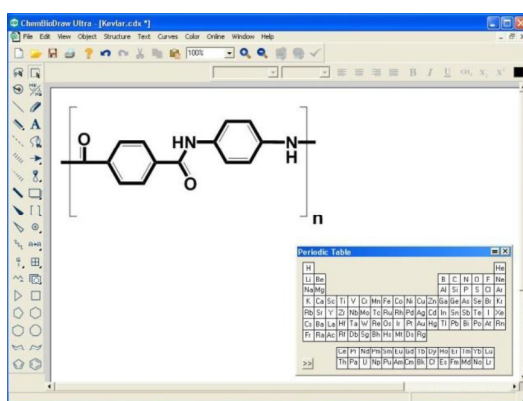
PŘÍLOHA Č.2 – Chemické ilustrace, vzorce, schémata a modely



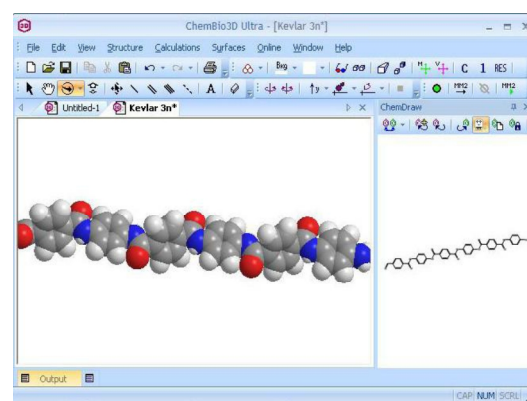
Obr. 21: Úvodní obrazovka ChemBioDraw 11.0 Ultra



Obr. 22: Úvodní obrazovka ChemBio3D 11.0 Ultra

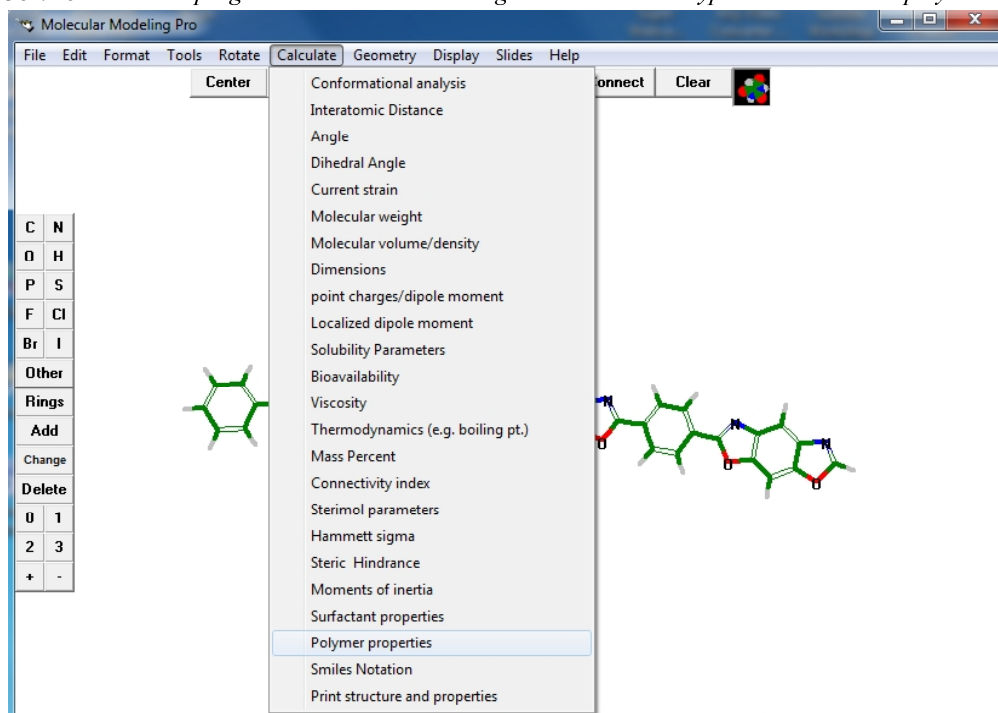


Obr. 22: Prostředí programu ChemBioDraw 11.0

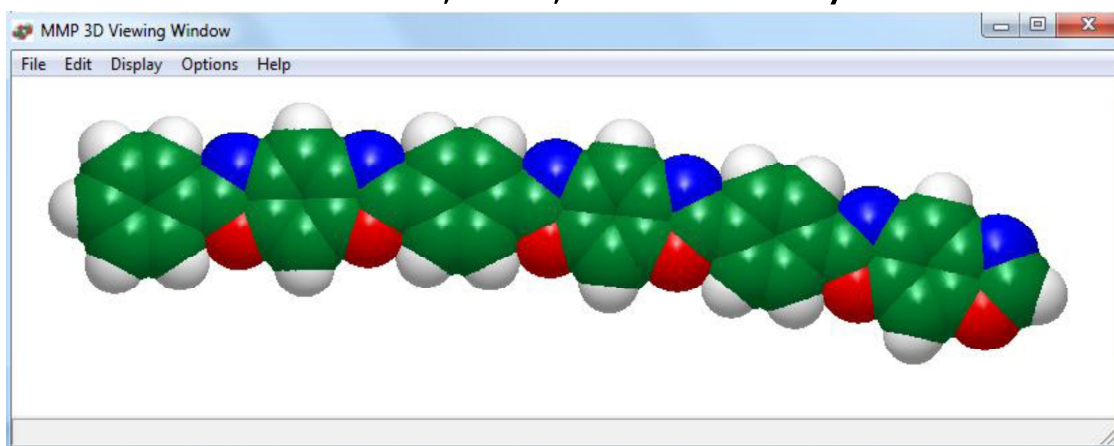


Obr. 24: Prostředí programu ChemBio3D 11.0

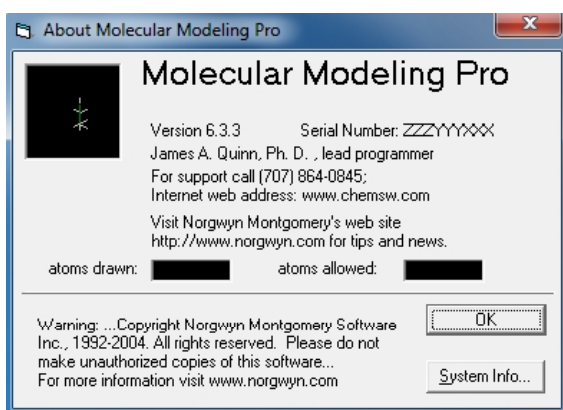
Obr. 25: Prostředí programu Molecular Modeling Pro s možnostmi výpočtů zobrazeného polymeru PBO



PŘÍLOHA Č.2 – Chemické ilustrace, vzorce, schémata a modely



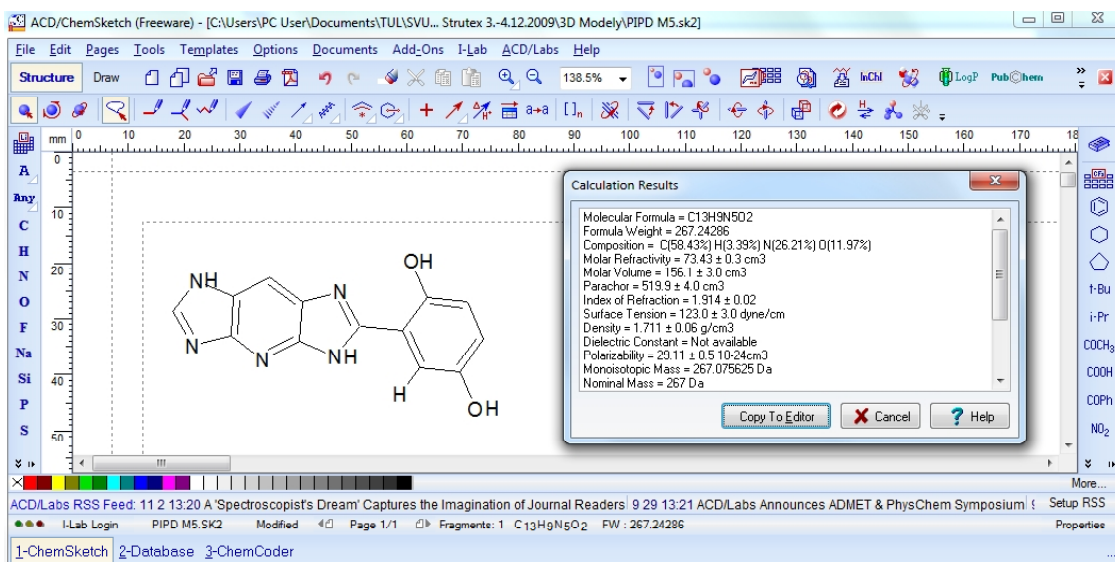
Obr. 26: High End grafické zobrazení polymeru PBO Zylon přes Molecular Modeling Pro 3D



Obr. 27: O programu Molecular Modeling Pro 6.3.3

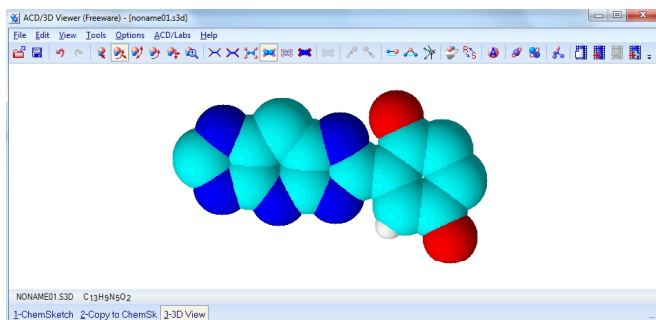


Obr. 28: O programu ACD ChemSketch 12.0



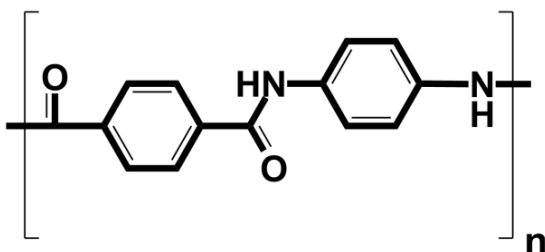
Obr. 29: Prostředí programu ACD ChemSketch s možnostmi výpočtů zobrazeného polymeru PIPD M5

PŘÍLOHA Č.2 – Chemické ilustrace, vzorce, schémata a modely

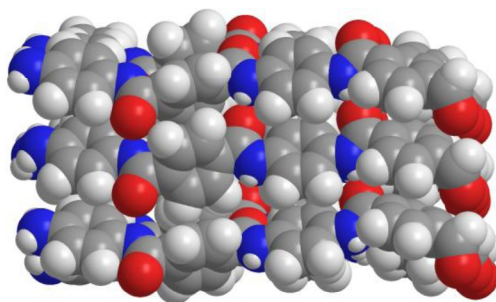


Obr. 30: Prostorové zobrazení polymeru PIPD M5 přes 3D rozhraní ChemSketch

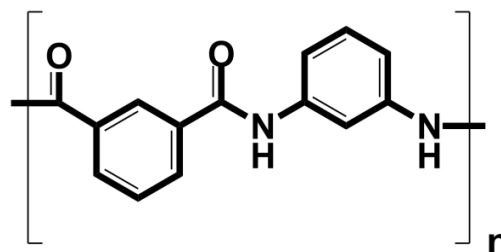
Obr. 31: Kevlar – monomerní jednotka



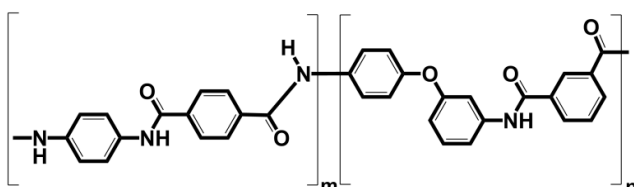
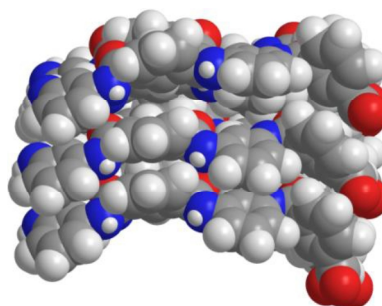
Obr. 33: Kevlarová matrice s uspořádáním 3×3 řetězec



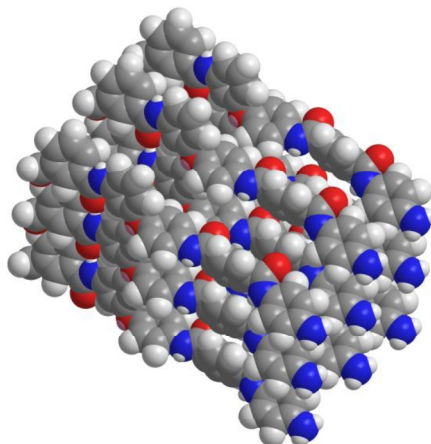
Obr. 32: Nomex – monomerní jednotka



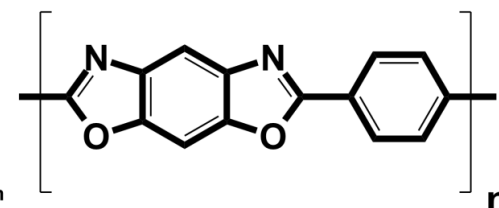
Obr. 34: Nomexová matrice s řetězcí 3×3



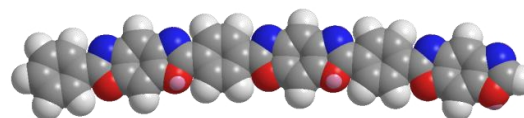
Obr. 35: Technora – monomerní jednotka kopolymeru



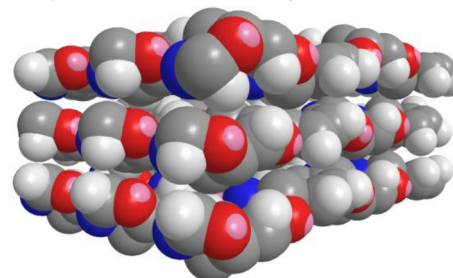
Obr. 38: Technora – matrice s uspořádáním 3×3 řetězec



Obr. 36: Zylon – monomerní jednotka



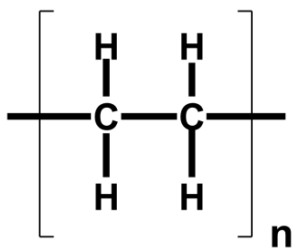
Obr. 37: Zylon se 3 monomerními jednotkami



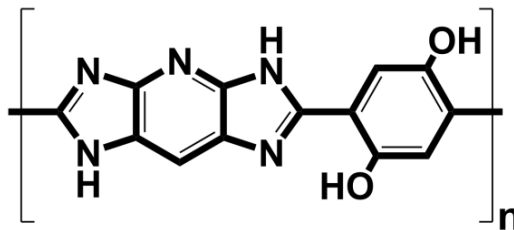
Obr. 39: Zylon – matrice 3×3 uspořádání

PŘÍLOHA Č.2 – **Chemické ilustrace, vzorce, schémata a modely**

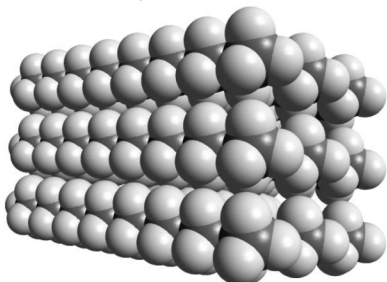
Obr. 40: PE Dyneema – monomerní jednotka



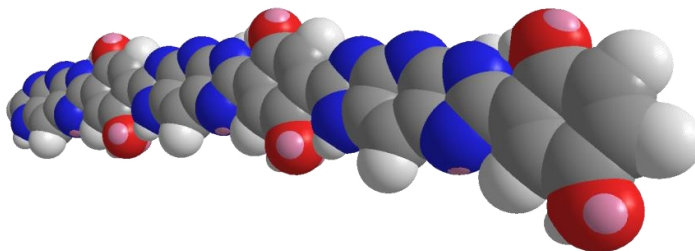
Obr. 41: PIPD M5 – monomerní jednotka



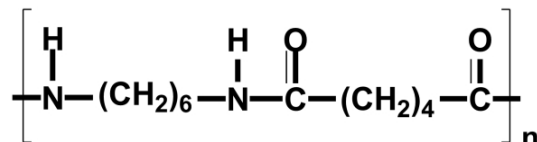
Obr. 42: Perfektně srovnaná struktura PE Dyneema



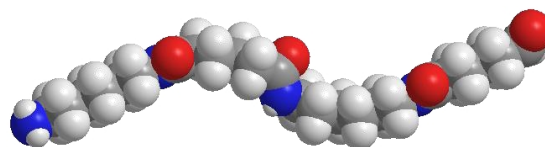
Obr. 43: Model experimentálního vlákna PIPD M5



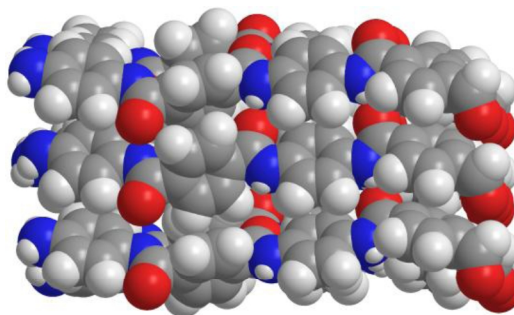
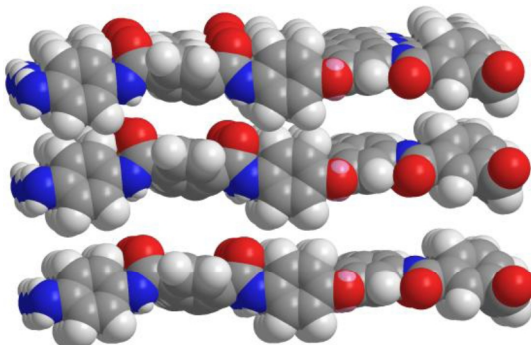
Obr. 44: Nylon – monomerní jednotka



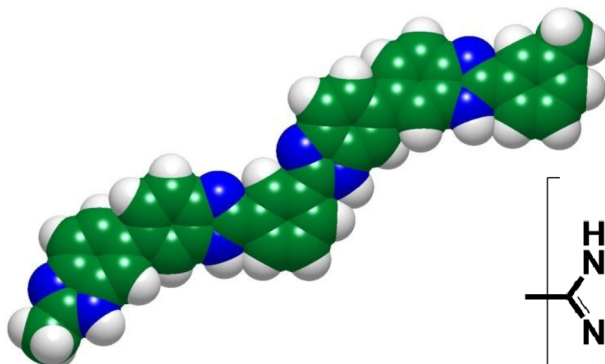
Obr. 45: Model polymerního řetězce Nylonu



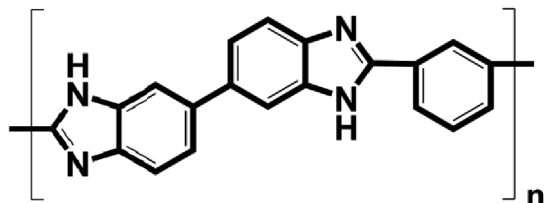
Obr. 46: Vzájemné natočení aromatických jednotek Technory a Kevlaru



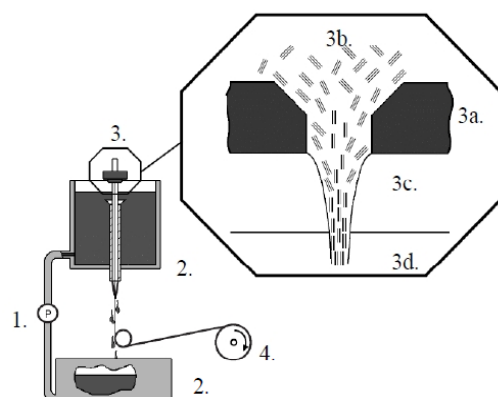
Obr. 47: Polymer PBI o 3 monomerních jednotkách (MM Pro)



Obr. 48: Polymer PBI – monomerní jednotka



PŘÍLOHA Č. 3: VLÁKNA, TKANINY A BALISTICKÉ ZKOUŠKY



Obr. 1: Schéma Dry Jet Wet Spinning

1. pumpa
2. zásobník vody
3. detail zvlákňování
 - 3a. zvlákňovací tryska
 - 3b. polymer
 - 3c. vzduchová mezera
 - 3d. koagulační lázeň
4. cívka s vlákny



Obr. 2: VIBRODYN 400 A VIBROSKOP 400



Obr. 3: Dynamometr TIRATEST 2300

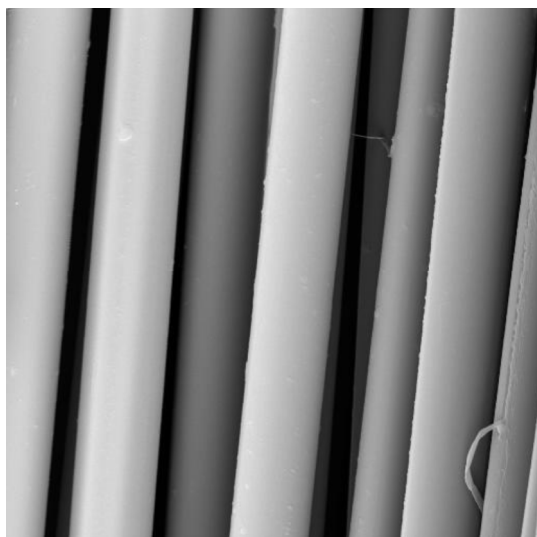


Obr. 4: Rastrovací Environmentální Mikroskop (REM) Vega Tescan



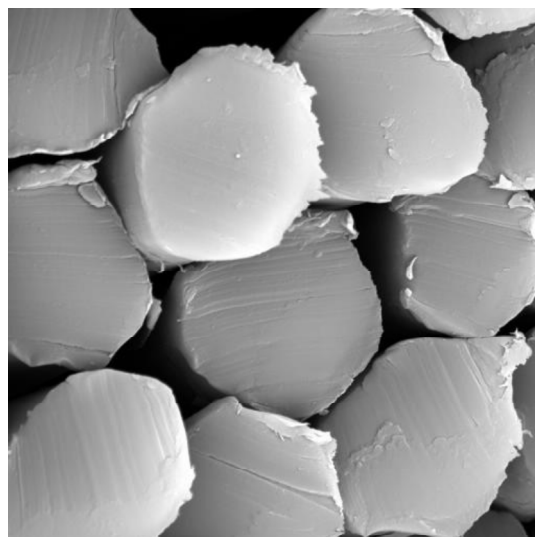
Obr. 5: Tloušťkoměr Uni-Thickness-Meter

PŘÍLOHA Č.3 – Vlákná, tkaniny, přístroje a balistické zkoušky



SEM MAG: 2.00 kx
HV: 30.0 kV
VAC: HiVac
DET: BE Detector
DATE: 03/12/09
Device: TS5130
20 μm
Vega ©Tescan
TU Liberec

Obr. 7: Podélný pohled na vlákna Kevla (REM)



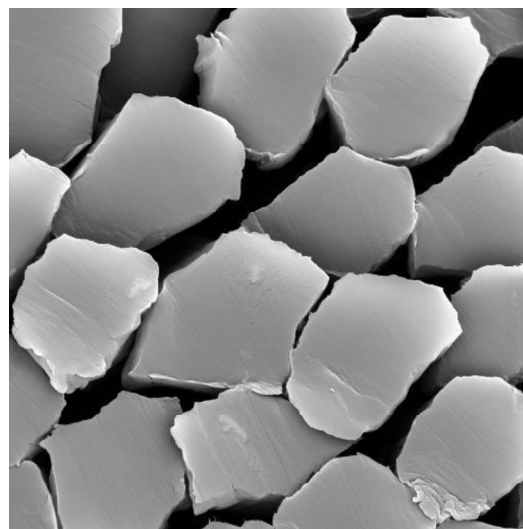
SEM MAG: 4.00 kx
HV: 30.0 kV
VAC: HiVac
DET: BE Detector
DATE: 03/03/09
Device: TS5130
10 μm
Vega ©Tescan
TU Liberec

Obr. 8: Příčný řez vláken Kevlar (REM)



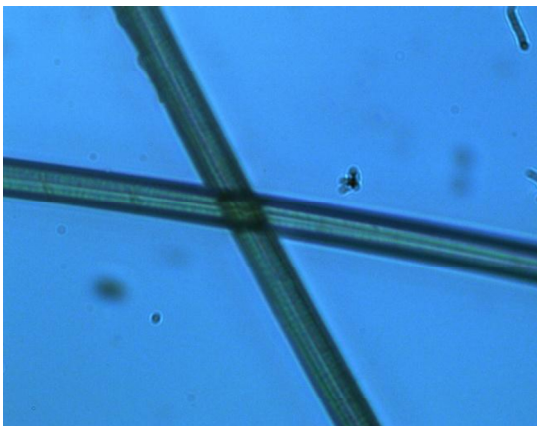
SEM MAG: 1.50 kx
HV: 30.0 kV
VAC: HiVac
DET: BE Detector
DATE: 11/12/07
Device: TS5130
50 μm
Vega ©Tescan
TU Liberec

Obr. 9: Přetrhnutí vlákna dynamometrem (REM)

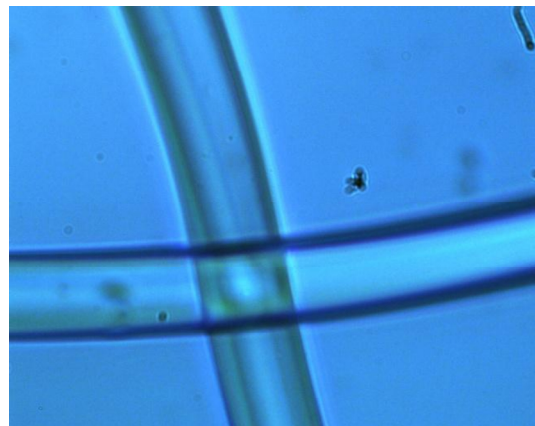


SEM MAG: 2.00 kx
HV: 30.0 kV
VAC: HiVac
DET: BE Detector
DATE: 03/03/09
Device: TS5130
20 μm
Vega ©Tescan
TU Liberec

Obr. 10: Příčný řez vláken Dyneema (REM)



Obr. 11: Obrazová analýza Kevlaru (Lucia)40x



Obr. 12: Obrazová analýza Nylonu (Lucia) 40x

PŘÍLOHA Č.3 – Vlákná, tkaniny, přístroje a balistické zkoušky



Obr. 12: Balistická nylonová vložka US vesty (přední)



Obr. 13: Vrstvy tkaniny nylonové balistické vložky



Obr. 14: Balistická kevlarová vložka BW vesty (zadní)



Obr. 15: Vrstvy tkaniny kevlarové balistické vložky



Obr. 16: Prošívaná balistická kevlarová vložka policejní vesty

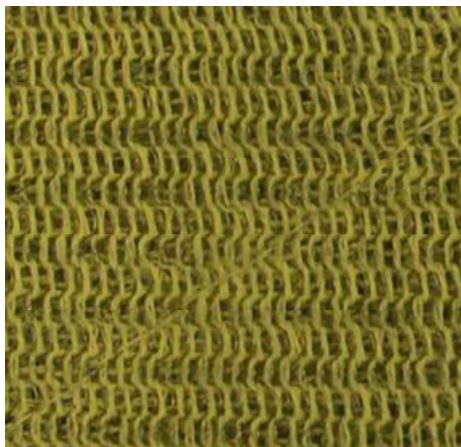


Obr. 17: Pletenina drátu a Kevlaru Highmark

PŘÍLOHA Č.3 – **Vlákna, tkaniny, přístroje a balistické zkoušky**



Obr. 18: Anti-šoková vrstva z měkkého kompozitu



Obr. 19: Detail pleteniny drátu a Kevlaru



Obr. 20: Chrony M1 a vesty na cíve bavlny s duralovým plechem



Obr. 21: Vesta Highmark Police



Obr. 22: Keprová vazba tkaniny balistický Nylon



Obr. 23: Keprová vazba tkaniny Kevlar 129

PŘÍLOHA Č.3 – **Vlákna, tkaniny, přístroje a balistické zkoušky**



Obr. 24: Vypreparovaný vzorek plošné tkaniny určený pro trhací stroj (Kevlar 129)



Obr. 25: Vypreparovaný vzorek plošné tkaniny určený pro trhací stroj (Nylon)



*Obr. 26: Upnutý a přetřhnutý vzorek na trhacím stroji
TIRATEST 2003*



Obr. 27: Přetřhnutý vzorek balistického Nylonu

PŘÍLOHA Č.3 – Vlákna, tkaniny, přístroje a balistické zkoušky



Obr. 28: Otisk 1. střely do svědečného systému Zylon vesty Obr. 29: Otisk 1. střely u vesty Kevlar vesty



Obr. 30: Projektil namotaný na vlákna Zylonu a visící z balistické vložky



Obr. 31: Vzpříčená střela šikmého výstřelu (Highmark)



Obr. 32: Deformované střely 9 mm a . 22 LR



Obr. 33: Trauma efekt v zylonové tkanině 35 mm (uvnitř střela ráže .357 Magnum)



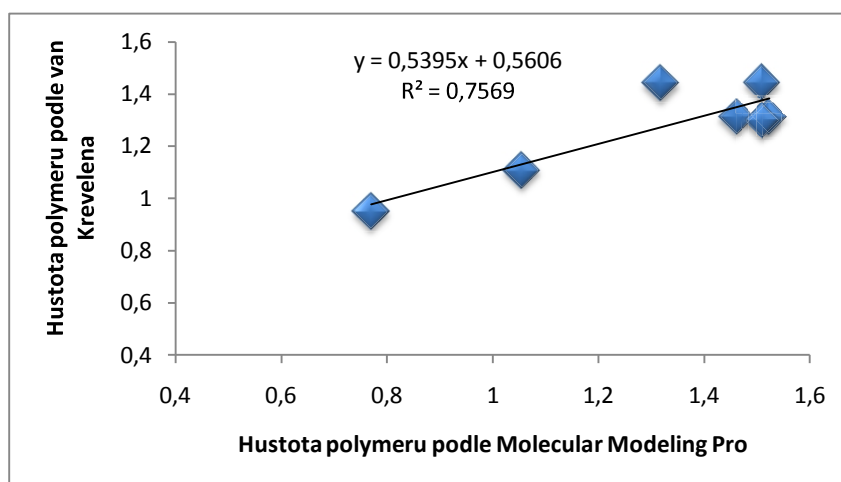
Obr. 34: Zdeformovaná střela TFMJ 9 mm Luger 115 gr a svědečný systém duralového plechu

PŘÍLOHA Č. 4: TABULKY A GRAFY NAMĚŘENÝCH HODNOT

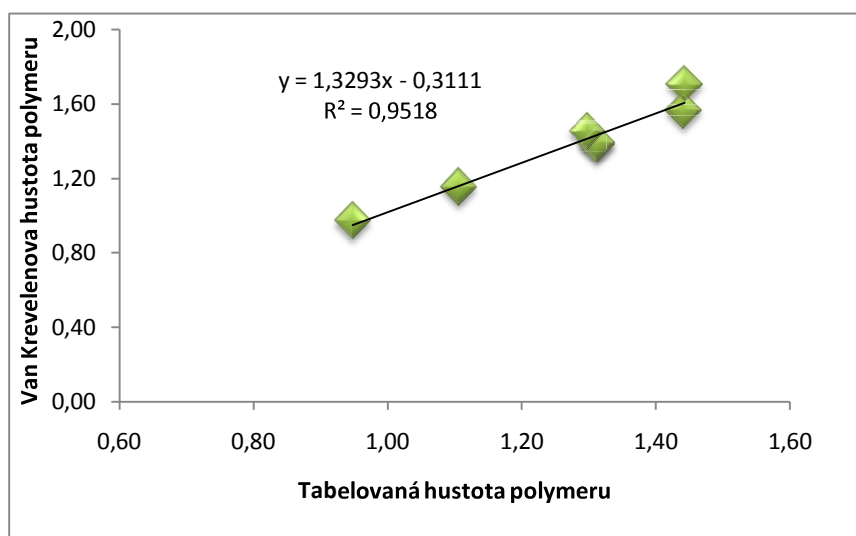
Tabulka 1: Experimentální hodnoty polymerů

polymer	MM Pro molární hmotnost M	MM Pro van der Waalsův objem V_w	Hustota van der Waalsova	Hustota MM Pro	van Krevelenova hustota	Tabelovaná hustota
	g/mol	cm ³ /mol	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
PE UHMW	226,45	166,52	1,36	0,77	0,95	0,97
Nomex	478,51	254,15	1,88	1,52	1,31	1,38
Technora	570,61	303,03	1,88	1,46	1,31	1,39
PPTA Kevlar	478,51	256,99	1,86	1,51	1,30	1,45
PBO Zylon	938,87	453,84	2,07	1,32	1,44	1,56
PIPD M5	267,25	129,12	2,07	1,51	1,44	1,70
Nylon 66	706,06	444,79	1,59	1,06	1,11	1,15

Graf 1: Porovnání van Krevelenovy hustoty a hustoty podle MM Pro

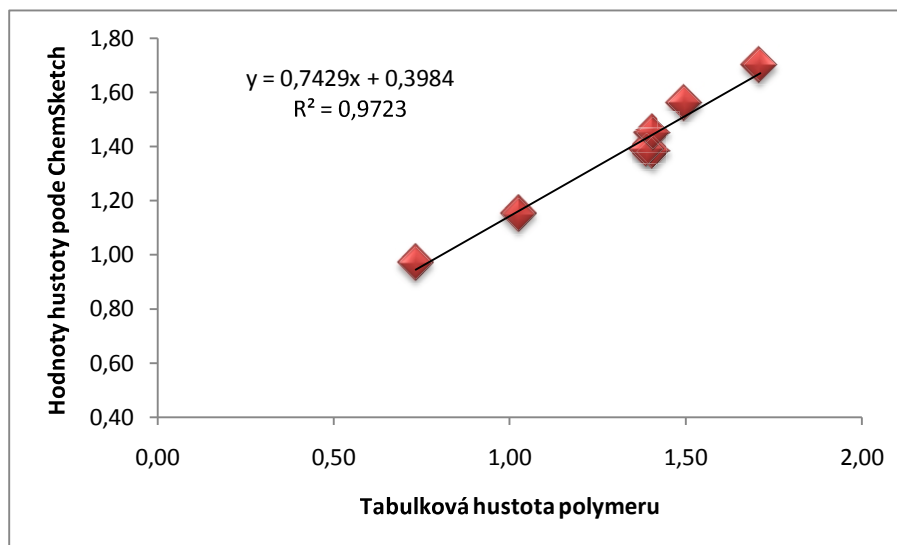


Graf 2: Porovnání van Krevelenovy hustoty a tabelované hustoty polymeru



PŘÍLOHA Č.4 – Tabulky a grafy zjištěných a naměřených hodnot

Graf 3: Porovnání hustot podle ACD ChemSketch s tabelovanými hustotami



Tabulka 2: van Krevelenův faktor K a korekční reálné R faktory

polymer	K faktor	R faktor
PE UHMW	1, 435	1,402
Nomex	1, 435	1,364
Technora	1, 435	1,355
PPTA Kevlar	1, 435	1,284
PBO Zylon	1, 435	1,326
PIPD M5	1, 435	1,217
Nylon 66	1, 435	1,380

Tabulka 3: Tabulka základních parametrů vybraných speciálních vláken

Vlákn	Výrobce	Chemický typ	ρ g/cm ³	E GPa	σ GPa	ϵ %
Kevlar 29	DuPont	p-aramid	1,45	60	2,70	5,0
Kevlar 49	DuPont	p-aramid	1,45	130	2,90	2,5
Kevlar 129	DuPont	p-aramid	1,44	120	3,00	3,0
Kevlar 149	DuPont	p-aramid	1,45	190	2,60	2,5
Kevlar KM2	DuPont	p-aramid	1,44	62	3,41	3,3
PE Dyneema	Honeywell	UHMW-PE	0,97	172	3,00	1,7
PBO Zylon HM	Toyobo	p-fenylenebenzo bisoxazol	1,56	270	5,80	3,1
PIPD M5	Akzo Nobel	diimidazopyridinylen fenylen	1,70	450	9,50	2,0
Twaron	Teijin	p-aramid	1,44	64	2,92	2,5
Technora T200	Teijin	m-aramid	1,39	86	3,70	4,4
Nomex	DuPont	m-aramid	1,38	92	2,50	8,5
Vectran HS	Celanese	aromatický polyester	1,41	65	2,84	3,3

PŘÍLOHA Č.4 – Tabulky a grafy zjištěných a naměřených hodnot

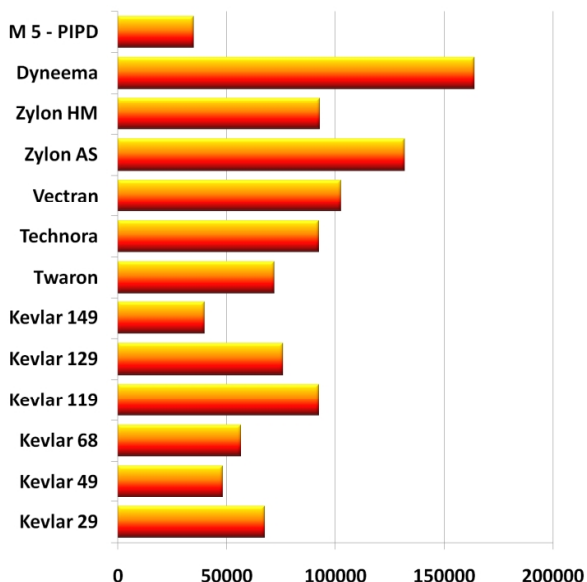
Tabulka 4: Speciální vlákna s vysokou teplotní odolností [32]

vlákno		σ MPa	E GPa	ε %	ρ kg.m ⁻³
polyphenylsulphone	PPS	3699	37	30	1370
polytetrafluoroethylene	PTFE	4320	27	20	2160
polyetheretherketone	PEEK	5715	57	20	1270
polyetherimide	PEI	3200	64	30	1280
polyamidoimide	PAI	4690	74	20	1340
polybenzimidazole	PBI	3432	72	28	1430
novoloid	Kynol	2032	44	30	1270
basofil	Basofil	2100	42	18	1400
stabilized PAN	Panox	3450	20	22	1380
polymetaaramide	Nomex	3650	20	20	1460

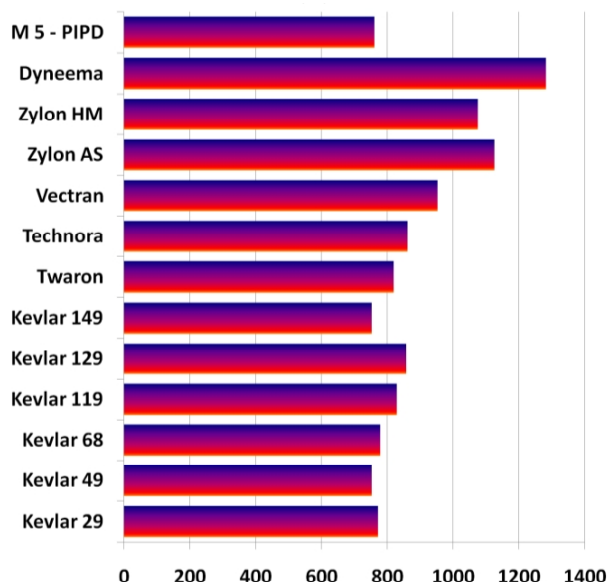
Tabulka 5: Speciální vlákna s vysokým modulem pružnosti E a pevnosti v tahu

vlákno	σ MPa	E GPa	ε %	ρ kg.m ⁻³
Kevlar 29	2700	67	3,6	1440
Kevlar 49	2900	114	2,4	1445
Kevlar 68	3024	100	2,7	1440
Kevlar 119	3024	55	4,4	1440
Kevlar 129	3324	100	3,3	1445
Kevlar 149	2320	166	2,5	1450
Twaron	2880	84	3,6	1440
Technora	2919	67	4,4	1390
Vectran	3807	100	3,8	1410
Zylon AS	5800	180	3,5	1540
Zylon HM	5800	280	2,5	1560
Dyneema	3000	160	5,3	970
M 5 - PIPD	3960	271	1,5	1700

Graf 4: Specifická houževnatost [m²/s²] (více je lépe)

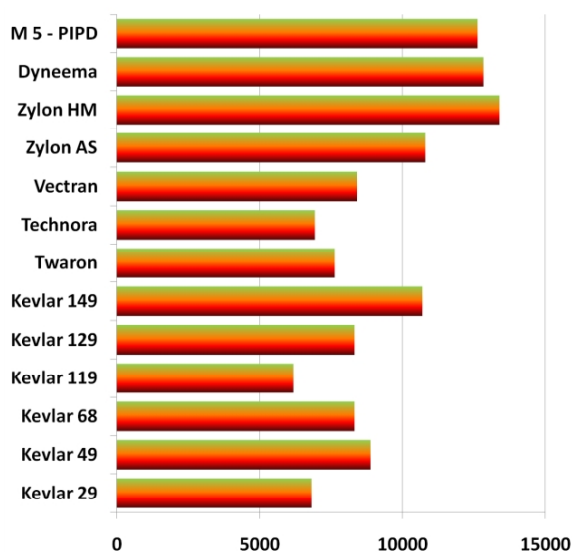


Graf 5: Rychlost zvuku [m/s] (více je lépe)

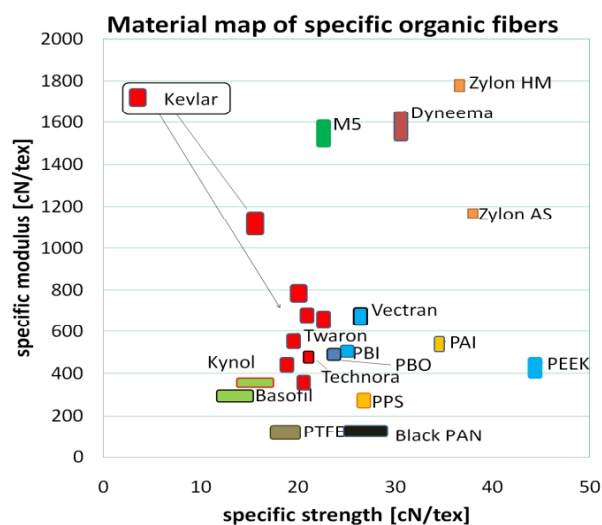


PŘÍLOHA Č.4 – Tabulky a grafy zjištěných a naměřených hodnot

Graf 6: Rychlost $U^{*1/3}$ [m/s] (více je lépe)



Graf 7: Materiálová mapa organických vláken [32]



Tabulka 6: Dostava balistických tkanin (osnova:útek = 1:1 = plátnová vazba, jiný poměr = keprová vazba)

	Americká (Nylon)	Německá (Kevlar)	Britská (Kevlar)
osnova/útek [nití/10 cm]	50/45	45/50	45/45 a 35/35
vrstvy přední části vesty	všech 12	všech 13	1-4 a 26: 45/45
vrstvy zadní části vesty	všech 12	všech 14	5-25: 35/35

Tabulka 7: Základní parametry tkaniny a vlákna

Veličina	Jednotka	Nylon	Kevlar
Plošná hustota	kg.m ⁻²	0,49	0,19
Objemová hustota	kg.m ⁻³	664,93	696,02
Tloušťka	mm	0,75	0,28
Jemnost vlákna	dtex	7,06	1,67
Příčný průměr vlákna	μm	28,59	12,19
Hustota materiálu	kg.m ⁻³	1099	1430
Pórovitost	%	39,50	51,33

Tabulka 8: Naměřené mechanické vlastnosti (americká nylonová a německá kevlarová vesta)

	Pevnost v tahu		Modul pružnosti		Prodloužení	Hustota
	cN.tex ⁻¹	MPa	cN.tex ⁻¹	GPa	%	kg.m ⁻³
Nylon	0,7	81	30	3,3	36	1099
útek				3,0	34	
osnova				3,6	38	
Kevlar	23,8	3432	131,6	18,9	3,3	1430
útek				18,4	3,1	
osnova				19,4	3,4	

PŘÍLOHA Č.4 – Tabulky a grafy zjištěných a naměřených hodnot

Tabulka 9: Porovnání rychlostí

	Specifická houževnatost m^2/s^2	Akustická rychlost podél osy vlákna m/s	$U^{*1/3}$ m/s	V_{50} m/s	V_E m/s
Nylon	25357	1615	345	175	173
Kevlar	78554	8150	858	434	429

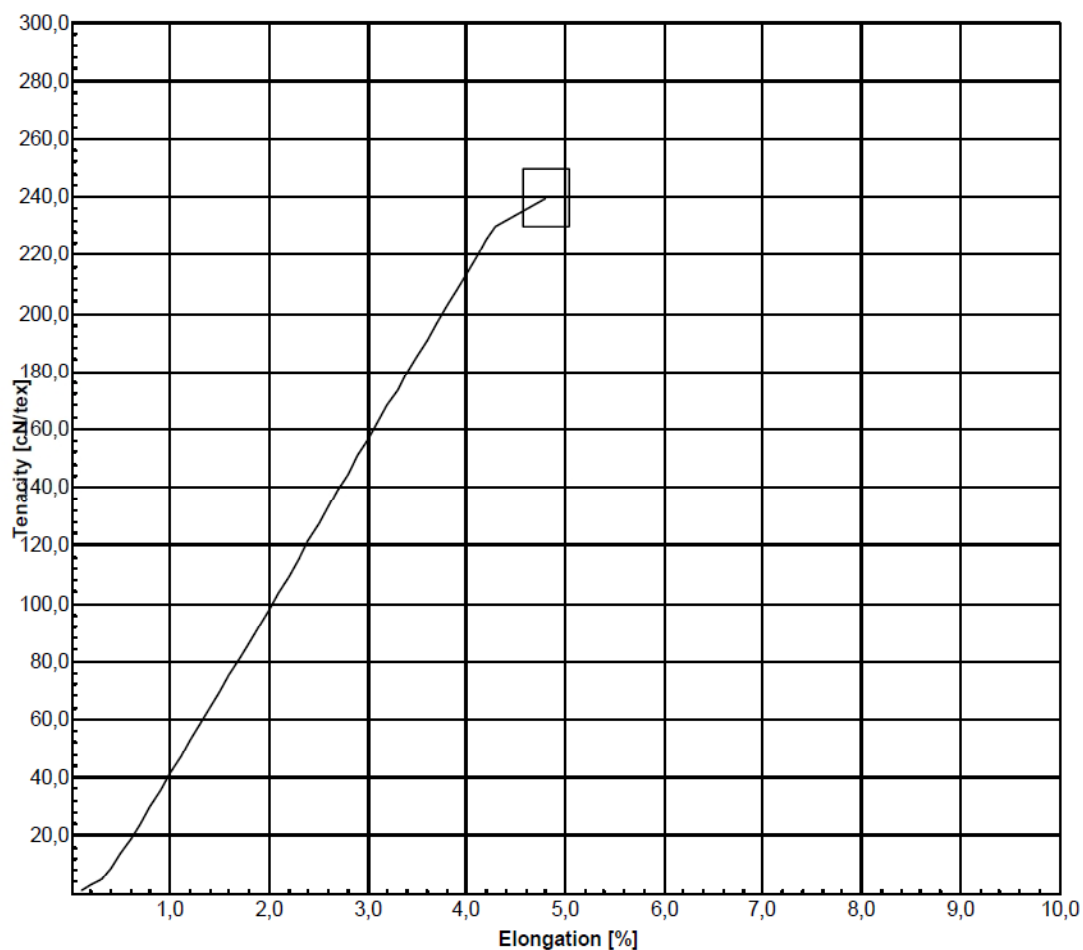
Tabulka 10: Vstupní rychlost 6 střel, 9 mm Luger, 115 gr, 7,5 g projektil, TFMJ

m/s	1	2	3	4	5	6	Průměrná rychlost
Zylon	356	355	372	371	370	370	366
Kevlar	363	374	374	378	371	357	370

Tabulka 11: Míra trauma efektu ve svědečném systému

mm	1	2	3	4	5	6	Vyhověla
Zylon	1,4	3,8	3,9	4,0	5,4	5,5	Ne
Kevlar	1,8	2,2	2,2	3,8	2,0	1,8	Ano

Graf 8: Tahová křivka Kevlaru 129



PŘÍLOHA Č.4 – Tabulky a grafy zjištěných a naměřených hodnot

Graf 9: Tahová křivka balistického Nylonu

