

Mechanická odolnost vybraných materiálů proti průrazu

Lukáš Smutek

Bakalářská práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav bezpečnostního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lukáš Smutek**
Osobní číslo: **A19275**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Mechanická odolnost vybraných materiálů proti průrazu**
Téma práce anglicky: **Mechanical Resistance of Selected Materials Against Penetration**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši v oblasti odolných materiálů vůči průrazu a mechanických zkoušek.
2. Navrhněte vhodné materiály a připravte zkušební vzorky.
3. Otestujte jednotlivé materiály vůči průrazu.
4. Statisticky vyhodnoťte naměřená data.
5. Diskutujte získané výsledky.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. DUCHÁČEK, V. Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha: VŠCHT v Praze, 2006.
2. ZEMAN, L. 2009. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. Praha: BEN.
3. SHAH, Vishu. Handbook of Plastics Testing Technology. New York: John Wiley & Sons, 1998. ISBN 0-471-18202-8.
4. KUBANOVÁ, Jana. Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi. Bratislava: STATIS, 2004. ISBN 80-85659-37-9.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Aleš Mizera, Ph.D.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2022**

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.
děkan



Ing. Jan Valouch, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 17. ledna 2022

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 16.05.2022

Lukáš Smutek, v. r.
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na materiály využívané k mechanické ochraně proti silovému působení nárazem s důsledkem průrazu, které se používají k výrobě ochranných pomůcek a ochranných oděvů osob. Ze široké škály mnoha materiálů vyznačujících se určitou mírou odolnosti proti průrazu se tato práce zaměřuje na polymerní materiály, z nichž byl výběr zúžen především na plasty a syntetické tkaniny, které se za běžných podmínek vyznačují vysokou houževnatostí. Praktické zkoušky průrazu materiálů byly provedeny padostrojem Zwick HIT230F. Kdy při různých kombinacích jednotlivých vrstev materiálů byly zjištěny rozdílné výsledky houževnatosti a odolnosti vzorků. Na základě získaných dat bylo možno vzorky porovnat a vyhodnotit z hlediska odolnosti proti průrazu. Tyto výsledky mohou vést k nalezení vhodné aplikace v různých průmyslových odvětvích, např. při vývoji ochranných prvků.

Klíčová slova: polymery, mechanické zkoušky, polykarbonát, aramid, uhlíkové vlákno, skelné vlákno, polyetylen

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on materials used for mechanical protection against force due to impact, which is used for the production of protecting equipment and protecting clothing. From a wide range of materials characterized by a certain degree of puncture resistance, this work focuses on polymeric materials, from which the selection has been narrowed down to plastics and synthetic fabrics, which under normal conditions are characterized by high toughness. Practical tests of material penetration were performed with a Zwick HIT230F drop weight impact test machine. When using different combinations of individual layers of materials, different results of toughness and puncture resistance of the samples were found. Based on the obtained data, the samples could be compared and evaluated in puncture resistance. These results can lead to finding suitable applications in various industries, e.g. in the development of security features.

Keywords: polymers, mechanical tests, polycarbonate, aramid, carbon fiber, glass fiber, polyethylene

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Aleši Mizerovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, rady a velice rychlé reakce na mé dotazy, které mi pomohly s vypracováním bakalářské práce. Také bych rád poděkoval mojí rodině a kolegům v práci, kteří mě podporovali po celou dobu mého vysokoškolského studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ	11
1.1 KOVOVÉ MATERIÁLY	11
1.1.1 Železné kovy	11
1.1.2 Neželezné kovy	13
1.2 NEKOVOVÉ MATERIÁLY	13
1.2.1 Polymerní materiály (plasty).....	13
1.2.2 Ostatní nekovové materiály.....	14
1.3 SHRNUTÍ.....	16
2 POLYMERNÍ MATERIÁLY	17
2.1 TERMOPLASTY	20
2.1.1 Polykarbonát	20
2.1.2 Polyetylen.....	20
2.1.3 Polypropylen	21
2.1.4 Polyamid	22
2.1.5 Polyvinylchlorid.....	22
2.1.6 Polymethylmethakrylát	23
2.2 REAKTOPLASTY.....	23
2.2.1 Fenoplasty	23
2.2.2 Aminoplasty	24
2.2.3 Epoxidy	24
2.2.4 Polyestery	24
2.2.5 Polyuretany	24
2.2.6 Silikonová pryskyřice.....	25
2.3 VLÁKNA A TKANINY.....	25
2.3.1 Polypropylenová a polyetylenová vlákna a tkaniny.....	25
2.3.1.1 INNEGRA S	25
2.3.1.2 UHMW PE.....	26
2.3.2 Aramidová vlákna a tkaniny	26
2.3.2.1 Nomex™.....	26
2.3.2.2 Kevlar™.....	26
2.3.2.3 Twaron™	27
2.3.2.4 Alkex™.....	27
2.3.2.5 Heracron™.....	27
2.3.3 Uhlíková vlákna a tkaniny	27
2.4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	27
2.4.1 Lamináty	28
2.4.1.1 Skelný laminát	28
2.4.1.2 Uhlíkový laminát	29
2.4.1.3 Aramidový laminát	29
2.4.2 Sendvičová struktura	29
2.4.2.1 Voštiny.....	30
3 ZÁKLADNÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY	31

3.1	STATICKÉ ZKOUŠKY	31
3.1.1	Zkouška pevnosti v tahu.....	32
3.1.2	Zkouška ohybu	32
3.2	DYNAMICKÉ ZKOUŠKY	32
3.2.1	Cyklické zkoušky	32
3.2.2	Rázové zkoušky	33
3.2.2.1	Izod a Charpyho metoda	34
3.2.2.2	Chip zkouška.....	35
3.2.2.3	Tahová rázová zkouška.....	35
3.2.2.4	Pádové zkoušky	36
3.2.2.5	Instrumentované rázové zkoušky.....	37
3.2.2.6	Vysokorychlostní rázové zkoušky	37
4	VYUŽITÍ ODOLNÝCH POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ V OBLASTI BEZPEČNOSTI.....	39
4.1	PROTIÚDEROVÝ ŠTÍT	39
4.2	PROTIÚDEROVÁ PŘILBA.....	39
4.3	CHRÁNIČ HOLENÍ A PAŽÍ.....	40
4.4	PROTIÚDEROVÝ OBLEK	41
4.5	TAKTICKÉ RUKAVICE ODOLNÉ PROTI PROŘEZÁNÍ A VPICHU	41
II	PRAKTICKÁ ČÁST	43
5	CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	44
6	TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ ZWICK ROELL HIT230F.....	45
7	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	46
8	PROVEDENÍ PÁDOVÝCH ZKOUŠEK	50
9	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ PÁDOVÝCH ZKOUŠEK.....	52
9.1	VYHODNOCENÍ DAT TEXTILNÍCH TKANIN	53
9.2	VYHODNOCENÍ DAT DESKOVÝCH VZORKŮ	55
9.3	VYHODNOCENÍ DAT VZORKŮ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	56
10	DISKUZE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ.....	58
10.1	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH TKANIN	58
10.2	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH DESEK	61
10.3	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR.....	66
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
	SEZNAM TABULEK.....	85
	SEZNAM PŘÍLOH.....	86

ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá materiály, které jsou s ohledem na svou mechanickou odolnost proti průrazu využívány k výrobě ochranných osobních pomůcek. Je zaměřena na mechanické zkoušky, kterými je odolnost ověřována s následným srovnáním výsledků.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části byly v první části specifikovány základní materiály s potenciálem ochrany proti průrazu. V rámci jejich systematicky rozděleného výčtu se popis jednotlivých materiálů zaměřil na mechanické vlastnosti, především na houževnatost a odolnost proti průrazu, s uvedením jejich obvyklého využití v praxi.

Práce se zaměřuje na výběr polymerních materiálů s ohledem na technické možnosti provedení praktických měření a zkoušek. Proto byly ve druhé části teoretické části práce specifikovány konkrétněji typy, vlastnosti a využití polymerních materiálů, z nichž byly vybrány konkrétní vzorky určené k praktickým zkouškám.

V rámci teoretické části byly rovněž popsány základní mechanické zkoušky, kterými jsou v praxi zjišťovány a ověřovány mechanické vlastnosti materiálů, které určují doporučení jejich praktického využití. V návaznosti na to se další sekvence práce zabývá popisem příkladů využití zkoumaných materiálů v oblasti bezpečnosti a ochrany před rizikem mechanického nárazu, průrazu apod.

Praktická část je zaměřena na zjištění odolnosti již konkrétních vybraných materiálů proti průrazu za běžných klimatických podmínek. Bylo vybráno 8 tkanin a 4 desky z polymerních materiálů z nichž byly vytvořeny vzorky, tyto byly testovány v různé tloušťce a složení. Mechanické zkoušky byly provedeny jednak na jednodruhových vzorcích, jednak na sendvičových vzorcích složených z různých materiálů a vzájemných kombinací.

V rámci práce byl podrobně popsán způsob přípravy vzorků a specifikovány mechanické vlastnosti vztahujících se k tématu práce, které jsou uváděny výrobcem.

Navazující část je zaměřena na vlastní provedení pádových zkoušek na připravených vzorcích. Výsledky měření byly zpracovány, tabulkově uspořádány a graficky znázorněny.

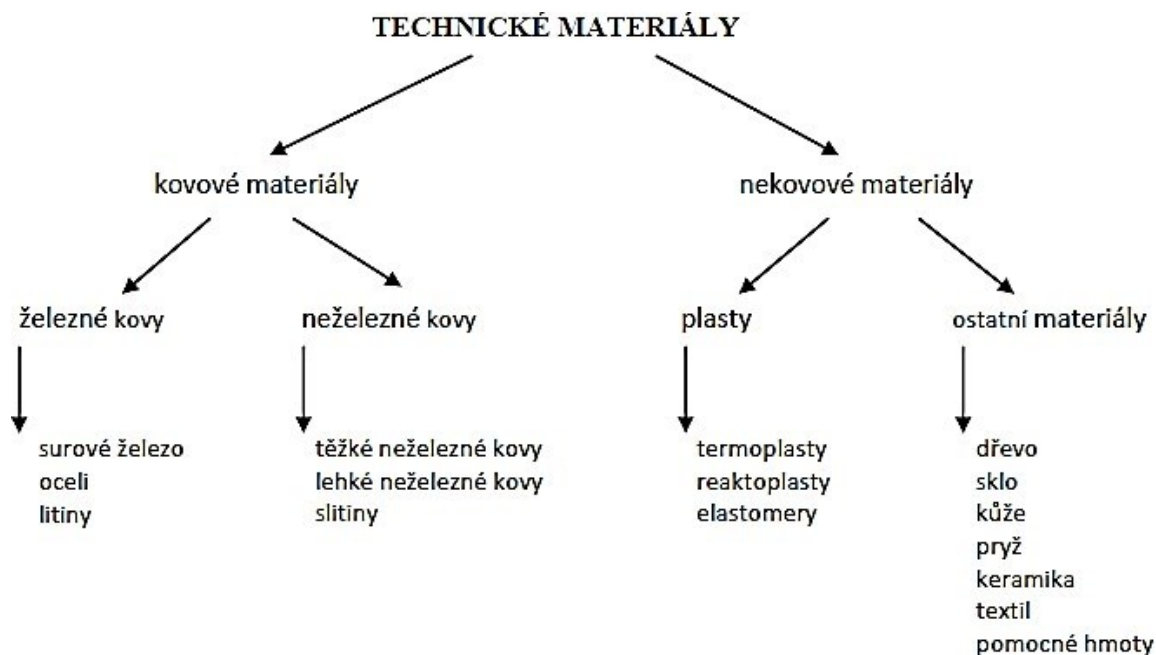
V závěru bakalářské práce byly výsledky měření vyhodnoceny statisticky, z čehož byla vyvozena závěrečná hodnocení a porovnání měřených vzorků z hlediska jejich odolnosti proti průrazu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ

Materiály odolné proti průrazu mají velký potenciál pro výrobu ochranných prvků.

Materiály lze všeobecně rozdělit na kovy a nekovy. Při výběru vhodného materiálu pak rozhodují jeho vlastnosti, cena a dostupnost. Za technické materiály pak lze považovat materiály, které plní určitou funkci danou užitnými hodnotami výrobku. S vývojem technologií jsou neustále vyvíjeny i nové materiály [1] [2] [3].



Obrázek 1. Rozdělení materiálů [2]

1.1 Kovové materiály

Kovy se používají již velmi dlouho. Kovy dále dělíme na železné a neželezné.

1.1.1 Železné kovy

Jsou kovy obsahující surové železo. Kromě čistého surového železa k těmto materiálům patří také ocel a litina.

Surové železo

Surové železo je tvrdé a křehké díky vysokému obsahu uhlíku. Při zahřátí na teploty 1100 °C až 2000 °C se taví, ale neprochází tvárným stavem, tedy je netvárné jak za tepla, tak i za studena. Je to základní výrobní surovina pro výrobu oceli a litiny [4].

Ocel

Ocel je slitina železa, uhlíku a příměsí dalších přidaných (legujících) prvků, např. chrom, kobalt. Ocel obsahuje méně než 2,14 % uhlíku [5].

Oceli se dělí podle chemického složení, obsahu příměsí, na [5]:

- Nelegované oceli, které nemají žádné prvky přidané během tavení, obsah příměsí dalších prvků je maximálně 2 % celkové hmotnosti (ideálně nulový). Obsah uhlíku se opakovaným tavením snižuje na asi 1 %. Mechanické vlastnosti jsou modifikovatelné pomocí tepelného, tepelně-mechanického a tepelně-chemického zpracování, obecně mají nelegované oceli vysokou pevnost, ale malou trvanlivost a flexibilitu. Příkladem může být kované železo.
- Nízkolegované oceli, u kterých je obsah příměsí dalších prvků nižší než 5 % celkové hmotnosti. Jsou tepelně zpracovatelné. Čím je obsah uhlíku v oceli větší, tím ocel dosahuje vyšší tvrdosti, avšak na úkor houževnatosti, tedy je křehčí.
- Vysoce legované oceli, které jsou význačné obsahem legujících prvků vyšším než 5 %. Potřebných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností se dosahuje kombinací přidaných prvků. Příkladem je nerezová ocel.

Podle oblastí použití se ocel dělí na konstrukční (nelegované), automatové (zvýšený obsah síry, manganu, olova), betonářské oceli (výztuhy s nízkým obsahem uhlíku pro stavebnictví), oceli na pružiny (obsah manganu, chromu a křemíku), ocel k cementování (dobré mechanické vlastnosti), ocel pro elektrotechnické plechy (obsah křemíku), hlubokotažné oceli (na hlubokotažné plechy), ocel k zušlechťování (vysoká houževnatost, pevnost), korozi-vzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli (vysoce legované oceli) a nástrojové oceli (vysoký obsah uhlíku) [3] [5].

Litina

Litina je směs železa s uhlíkem, obsahující více než 2,14 % uhlíku. Je vysoce odolná proti tlaku a teplotě a má nízkou pružnost [6].

Litiny se dělí podle způsobu vyloučení uhlíkových krystalů (grafitu) ze surového železa. Tvar a velikost uhlíkových krystalů určují vlastnosti litin, křehkost a tvrdost. Litiny také lze dělit podle vlastností na tvárnou, šedou, bílou, temperovanou a vermikulární [3] [6].

1.1.2 Neželezné kovy

Neželezné neboli barevné kovy jsou všechny kovy kromě železa, dělí se na těžké, lehké a slitiny. Mezi těžké neželezné kovy patří například měď, zinek, olovo, nikl, stříbro, zlato, cín, chrom a wolfram. Lehké neželezné kovy jsou například hořčík, křemík, hliník a titan. Neželezné kovy se využívají samostatně, nebo se z nich vyrábí slitiny, jako je dural, mosaz, bronz a jiné [7] [8] [9].

1.2 Nekovové materiály

Nekovové materiály jsou materiály, které neobsahují kovy. Patří sem například polymerní materiály (plasty), dřevo pryž, sklo, keramika, porcelán, brusivo, kůže a textilie [2].

1.2.1 Polymerní materiály (plasty)

Polymerní materiály jsou materiály složené ze syntetických nebo přírodních polymerů, patří k nim hlavně plasty a kaučuky [10].

Polymery jsou přírodní nebo syntetické látky obsahující ve svých velkých molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, ale často i dusíku, chloru a jiných prvků [10].

Molekula polymeru je tvořena řetězcem mnohonásobně opakovaného monomeru.

Ve formě výrobku jsou v pevném stavu, ale v určitém stádiu zpracování jsou v podstatě „zkapalněny“, což umožňuje, za zvýšené teploty a tlaku, jejich nejrůznější tvarování [10].

Tato práce se z polymerních materiálů dále zaměří především na plasty, které se za běžných podmínek vyznačují vysokou houževnatostí [10].

Název plasty je odvozen od vlastnosti těchto materiálů, kdy při zahřátí se polymer stává tvarovatelným a plastickým [10].

Plasty se dělí na termoplasty, které lze opakovaně zahřívat a nechávat tuhnout a reaktoplasty, u kterých opakované zahřívání a tuhnutí není možné z důvodu probíhajících chemických reakcí za zvýšené teploty [10].

Díky svým vlastnostem, jako je například nevodivost, tlumení rázů a nízká hmotnost, v dnešní době často nahrazují kovové i nekovové materiály [2].

1.2.2 Ostatní nekovové materiály

Nekovové materiály, jsou veškeré materiály, které neobsahují kov. Patří sem dřevo, sklo, kůže, pryž a textilie [2].

Dřevo

Dřevo je přírodní materiál. Používá se přímo, nebo se z něj mohou vyrábět další technické materiály [2].

Jelikož je dřevo náchylné na stárnutí a klimatické podmínky, hlavně díky své schopnosti absorbovat vodu, bývá v praxi chráněno nátěry, nebo impregnací, což představuje napouštění chemickými látkami [2].

Dřevo se dělí podle svých vlastností na měkké a tvrdé, nebo podle druhu stromů na jehličnaté a listnaté. Mezi jehličnatá dřeva patří například smrk, borovice, jedle a modřín, listnatá dřeva jsou například buk, dub, bříza, olše, jilm, jasan, javor a ovocné dřeviny (třešeň, jabloň, švestka, hruška atd.) [2].

Sklo

Sklo je průhledný, tvrdý, ale křehký materiál, který velmi dobře snáší tlak. Vyrábí se tavením křemičitého sklářského písku, s přísadou uhličitanu draselného (potaš). Pro další úpravu vlastností se přidávají při výrobě další přísady, jako např. soda, pálené vápno apod [2].

V přírodě může sklo vznikat také vulkanickou činností, například obsidián [2].

Dle použití se sklo dělí na konstrukční a bezpečnostní [2].

- Konstrukční sklo je chemicky odolné a hladké, proto se používá například v lékařství, potravinářství a v optice [2].
- Bezpečnostní sklo je sklo vrstvené nebo tvrzené. Vrstvené sklo při rozbití díky fólii v mezivrstvě popraská, ale nerozpadne se. Sklo tvrzené se při rozbití rozpadne na velké množství malých kousků. Tvrzené sklo často bývá doplněno drátěnou vložkou, která kousky prasklého skla drží na místě [2].

V dnešní době je sklo často nahrazováno plasty, které se přibližují sklu svými mechanickými i optickými vlastnostmi. Současné mohou být lehčí, méně křehké, netříštivé a pružnější [2].

Kůže

Kůže je přírodní materiál získaný ze zvířat. Po stažení je potřeba kůže upravit, aby se předešlo jejich hnilobě, lámavosti, malé pevnosti a velké tvrdosti. Takto upravené kůže se nazývají usně [2].

Usně jsou význačné především svou houževnatostí, pevností, pružností a jsou dobře tvárné. Dříve se používaly například k výrobě pancířů pro vojáky a ochranných zástěr pro kováře [2].

Pryž

Pryž (guma) se vyrábí vulkanizací kaučuku, tedy zahřátím na vyšší teplotu, se sírou a dalšími přísadami a plnivý. Kaučuk se získává v přírodě ze stromu kaučukovník, nebo je vyráběn synteticky z polymerů zvaných elastomery [2] [10].

Uplatnění nalézá pryž například v automobilovém průmyslu, potravinářství a lékařství. Z pryže se vyrábí pneumatiky, obuv, rukavice, hadice atd. [2].

Keramika

Keramika vzniká rozemletím, formováním a pálením minerálních hmot, podle kterých ji dělíme na porcelán, kameninu a tavený čedič [2].

- Porcelán je tvrdý výrobek s výbornou tepelnou odolností a elektrickými izolačními vlastnostmi, ale špatně snáší nárazy, je křehký. Vyrábí se z kaolinu a po nanesení glazury vypálením v peci [2].
- Kamenina je výrobek chemicky odolný, ale křehký. Vyrábí se z kameninových jílu. V dnešní době ji často nahrazují méně křehké a lehké plasty [2].
- Tavený čedič je výrobek vysoce tvrdý a odolný proti otěru a opotřebení. Vyrábí se tavením čediče, jeho vlastnosti jsou upravovány rychlostí chladnutí taveniny [2].

Největší slabinou keramiky je její nepružnost, křehkost a tříštivost [2].

Textilie

Přírodní textilie jsou vyráběny:

- Z přírodních rostlinných vláken, jako je například len, konopí, juta bavlna atd.,
- Z živočišných vláken, jako je např. ztuhlý bílkovinný výměšek housenek, nebo srst savců.

Vlákna se spřádají do příze o určitém průřezu a z příze se následně vyrábí textilie, například tkaním nebo pletením.

Syntetické tkaniny jsou vyráběny z umělých vláken chemického původu, což mohou být vlákna polyamidu, polyesteru, polypropylenu a dalších. V případě použití plastů se vyrábí netkané textilie lepením, foukáním a lisováním [2] [10].

1.3 Shrnutí

Z výše uvedeného přehledu materiálů se jako materiály odolné proti průrazu pro své vlastnosti jeví z ocelových materiálů nejlepšími rychlořezné a konstrukční oceli, z nekovových materiálů potom kůže, pryž, textilie a plasty.

Se zřetelem na téma bakalářské práce se v praktické části budeme zabývat zkouškami průrazu materiálů padostrojem Zwick HIT230F. Proto byly dále zkoumanými materiály vybrány polymerní materiály, konkrétně plasty a syntetické tkaniny.

2 POLYMERNÍ MATERIÁLY

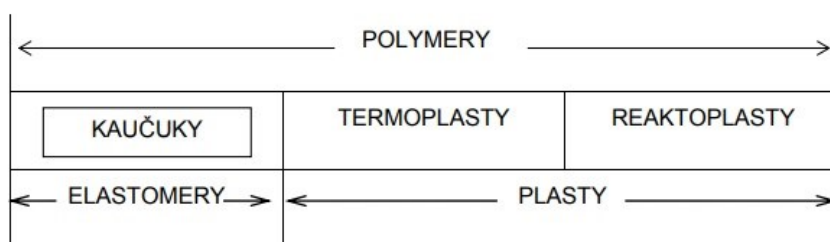
Polymerní materiály („polymery“) jsou přírodní nebo syntetické látky obsahující ve svých velkých molekulách většinovým podílem atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, ale menším podílem často i atomy dusíku, chloru a jiných prvků, které mají vliv na vlastnosti konečného výrobku [10].

Molekula polymeru je tvořena řetězcem mnohonásobně opakovaného monomeru.

Ve formě výrobku jsou polymery v pevném stavu, ale v určitém stádiu zpracování jsou v podstatě „zkapalněny“, což umožňuje, za zvýšené teploty a tlaku, jejich nejrůznější tvarování [10].

Polymery se vyrábí chemicky pomocí procesů polymerace, polykondenzace a polyadice.

- Polymerace je řetězová chemická reakce velkého počtu molekul monomeru, díky které dochází ke spojení těchto monomerů v dlouhou makromolekulu polymeru. Složení polymeru je u této reakce stejné jako složení monomeru. Je-li polymer tvořen monomery jednoho druhu, nazývá se homopolymer, pokud je tvořen více druhy monomeru, jedná se o kopolymer. V průběhu polymerace, jelikož probíhá ve velmi krátké době, vedle sebe existují jak hotové makromolekuly polymeru, tak i nezreagované molekuly monomeru. Při této reakci nevznikají žádné vedlejší produkty [2] [10].
- Polykondenzace je chemická reakce dvou monomerů, obsahujících dvě a více funkční skupiny. Při reakci vzniká polymer, správně nazývaný polykondenzát, a jiná nízkomolekulární látka. Vzniklý polykondenzát má tedy jiné chemické složení než původní látka [10].
- Polyadice je, podobně jako polykondenzace, stupňovitá reakce s tím rozdílem, že se při ní neuvolňuje nízkomolekulární sloučenina, ale reakcí funkční skupiny vzniká nová vazba. Tedy při polyadici se nemění složení látky, ale její struktura [10] [11].



Obrázek 2. Základní rozdělení polymerů [10]

Polymery dělíme na elastomery a plasty.

Elastomery

Jedná se o vysoce elastické polymery, které lze za běžných podmínek značně deformovat bez jejich mechanického porušení. Tato deformace je převážně vratná. Nejrozšířenějším zástupcem elastomerů je kaučuk. Kaučuky jsou používány na výrobu gumy [10].

Plasty

Plasty jsou druh polymerů, které jsou za běžných podmínek tvrdé, často i křehké.

Název plasty je odvozen od základní vlastnosti, kdy při zahřátí se polymer stává tvarovatelným a plastickým [10].

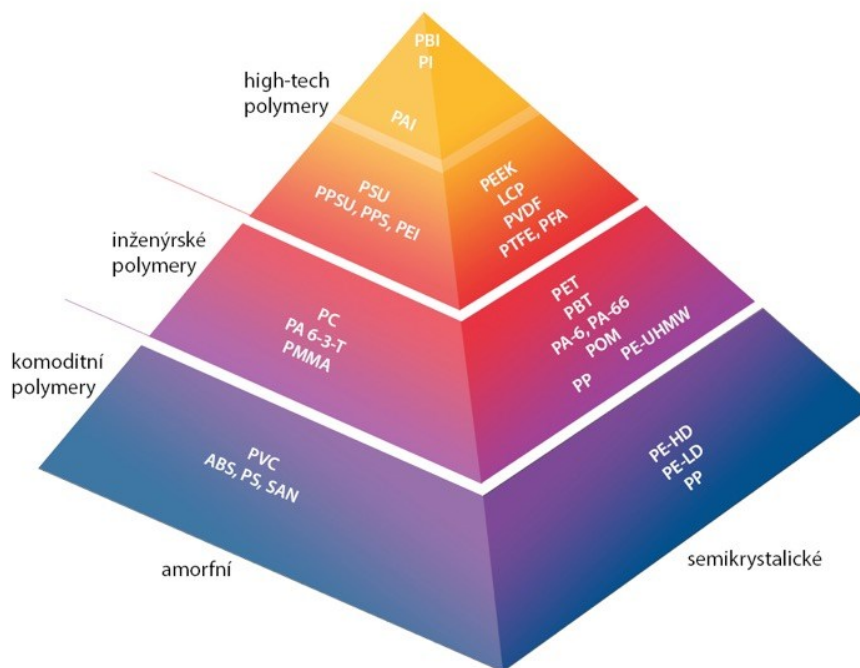
Plasty se dělí podle chování při zahřátí na **termoplasty**, které lze opakovaně zahřívat, kdy jsou tvárné a nechávat tuhnout zpět do pevného stavu, a **reaktoplasty**, u kterých opakované zahřívání a tuhnutí není možné z důvodu probíhajících chemických reakcí za zvýšené teploty a jejich přechodu z lineárního do zesíťovaného stavu, vlivem těchto reakcí [10].

Podle uspořádanosti nadmolekulární struktury se plasty dělí na amorfni a krystalické [2] [10] [12].

Amorfni plasty mají prostorově neuspořádanou makromolekulární pozici. Jejich charakteristickými vlastnostmi jsou vysoká pevnost a modul pružnosti, jsou průhledné, tvrdé a křehké [2] [10] [12].

Krystalické, případně semikrystalické, plasty mají mezi amorfni oblastmi podíl uspořádaných oblastí. Míra uspořádanosti se označuje stupněm krystalinity, který nikdy nedosahuje 100 %. Krystalické plasty jsou houževnaté, mléčně zbarvené a dle stupně krystalinity u nich roste pevnost a modul pružnosti [2] [10] [12].

Podle postavení na trhu se polymery dělí na komoditní, inženýrské a high-tech polymery [13].



Obrázek 3. Rozdělení polymerů dle postavení na trhu [13]

Komoditní polymery

Komoditní polymery tvoří skupinu nejlevnějších a nejpoužívanějších materiálů. Patří sem například Polyetylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyren (PS) a měkčený Polyvinylchlorid (PVC). Používají se především v obalovém průmyslu (PE, PP), ve stavebnictví (PVC) nebo v automobilovém průmyslu (PP) [13] [14] [15].

Inženýrské polymery

Inženýrské polymery jsou tepelně odolnější, ale i tužší, houževnatější, pevnější a rozměrově stálější než komoditní. Jejich využití se nachází v automobilovém a elektrotechnickém průmyslu a k výrobě výrobků spotřebního zboží. Mezi inženýrské polymery patří Polykarbonát (PC), Polymethylmethakrylát (PMMA), Polyamid (PA), Polyetylentereftalát (PET), Polyoxymetylen (POM) a neměkčený Polyvinylchlorid (PVC) [14] [15].

High-tech polymery

High-tech polymery jsou polymery vyvinuté pro konkrétní speciální využití ve špičkových technických aplikacích. Vyznačují se především tepelnou odolností. Patří sem například Polyftalamid (PFA), Polysulfony (PSU), Polyfenylsulfid (PFS), Polyetheretherketon (PEEK) a Polytetrafluoretylen (PTFE) [14] [15].

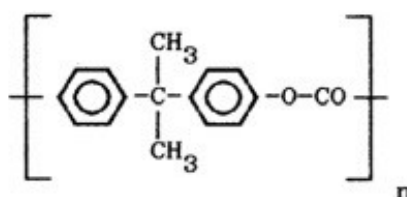
2.1 Termoplasty

Mezi zástupce termoplastů patří polykarbonát, polyetylen, polypropylen, polyamid, polyvinylchlorid, polymethylmethakrylát a další.

2.1.1 Polykarbonát

Polykarbonát, zkráceně PC, je tuhý, rozměrově stálý, amorfní, průhledný termoplast [3] [10] [16].

Obecně je to polyester kyseliny uhličitě a dihydroxysloučenin [10].



Obrázek 4. Chemický vzorec

PC [10]

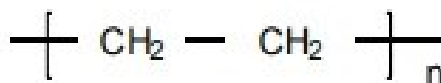
Polykarbonát se vyrábí hlavně polykondezačními reakcemi. Mezi jeho vlastnosti patří výborné mechanické a dielektrické vlastnosti, které jsou stálé v širokém rozpětí teplot od -70 °C do 140 °C. Je odolný povětrnostním podmínkám a málo nasákavý. Díky odolnosti proti nárazům, je to potenciálně vhodný materiál například pro výrobu protiúderných štítů a dalších bezpečnostních prvků, čoček ochranných brýlí a štítů pro ochranu obličeje. Jelikož není příliš odolný vůči poškrábání, je nutno na něj pro tyto aplikace nanést tvrdý ochranný povlak. Dále je polykarbonát elektricky izolační a dielektrický. Z pohledu chemických vlastností je odolný například proti dlouhodobému působení vody, amoniaku, alkoholům a zředěným roztokům kyselin a solí. [10] [16].

Polykarbonáty v praxi bývají upravovány například pomocí aditivace, aby získaly stabilitu proti ultrafialovému záření, povětrnostním podmínkám, dosahovaly lepších optických vlastností, odolávaly vyšším teplotám, pomaleji a méně hořely a byly zdravotně nezávadné [12].

2.1.2 Polyetylen

Polyetylen, zkráceně PE, vzniká polymerací etenu. PE se dle hustoty dělí na polyetylen s vysokou hustotou zkráceně PE-HD nebo HDPE a polyetylen s nízkou hustotou zkráceně PE-LD nebo LDPE. Jelikož je dělení PE plynulé, neskokové, existují i další PE jako je PE o

střední hustotě (PE-MD), lineární PE o nízké hustotě (PE-LLD) a PE s velmi vysokou molekulovou hmotností (PE-UHMW) [10].



Obrázek 5. Chemický vzorec PE

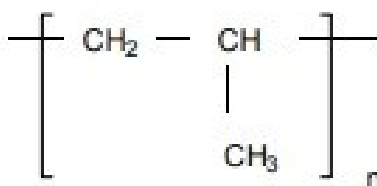
[10]

Polyetylen je díky svým vlastnostem v současnosti nejvíce používaným polymerem na světě. Je levný, odolný a zdravotně nezávadný. Mezi jeho hlavní oceňované vlastnosti patří dlouhá životnost, odolnost vůči nízkým teplotám, dielektrické vlastnosti, chemická odolnost, nenasákavost a odolnost proti napěťovým trhlinám. Za normálních podmínek je bílý a průhledný v tenké vrstvě. Tvarově je stálý do teploty kolem 90 °C. Chemicky je PE, v souvislosti s mírou krystalinity, odolný působení většiny chemikálií a rozpouštědel [10] [17].

PE se používá například k výrobě izolací kabelů, fólií, trubek, kanystrů, hraček a obalových materiálů. PE-UHMW se používá k výrobě kloubních protéz, filtrů, ložisek atd [10].

2.1.3 Polypropylen

Polypropylen se označuje PP a je vyráběn polymerací propenu. PP je neprůhledný, díky vysokému stupni krystalinity. Teplotně je odolný do teplot 160 °C, kdy začíná tát. Ve srovnání s PE je PP méně odolný proti mrazu a povětrnostním podmínkám, avšak je odolnější vůči oděru, je pevnější a tvrdší. Chemicky je PP také odolnější než PE [10] [18].



Obrázek 6. Chemický vzorec

PP [10]

PP je využíván například v potravinářském, chemickém a farmaceutickém průmyslu, v textilním, stavebním a nábytkářském průmyslu a v automobilovém průmyslu na výrobu nárazníků, prvků zrcátek a přístrojových desek [10] [19].

2.1.4 Polyamid

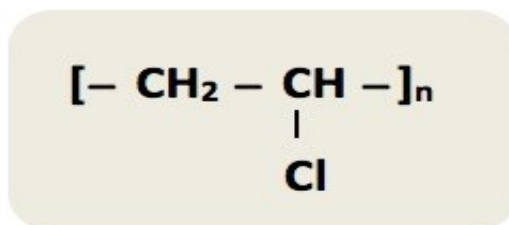
Polyamidy (PA) jsou semikrystalické termoplasty, vyráběné polykondenzací. Jedná se o lineární polymery, u kterých se střídají amidové skupiny –CO–NH– s větším počtem methylenových skupin –CH₂–. Mezi nejznámější polyamidy, někdy označované nylon, patří polyamid 6 (PA-6), polyamid 66 (PA-66), polyamid 11 (PA-11) a polyamid 12 (PA-12). Čísla v označení říkají, jaký je počet atomů uhlíku v molekulách daného polyamidu [10] [13].

Fyzikálními vlastnostmi polyamidů, které jsou využívány v praxi, je vysoká pevnost, odolnost proti oděru, chemická odolnost a dobrá absorpce vibrací [20].

Polyamidy jsou používány pro výrobu například kladek, filtrů řemenic, krytů nástrojů, motorů a ozubených kol [13].

2.1.5 Polyvinylchlorid

Polyvinylchlorid (PVC) patří do skupiny vinylových polymerů. Díky své nízké ceně, dobrým vlastnostem a snadnému zpracování je to jeden z nejrozšířenějších syntetických plastů. PVC je termoplast vyráběný polymerací z vinylchloridu, který se skládá z chlóru a ethenu [10] [13] [21].



Obrázek 7. Chemický vzorec PVC

[13]

PVC je všeobecně materiál lehký, pevný, tuhý, chemicky a biologicky inertní, trvanlivý a snadno udržovatelný, málo hořlavý. Tyto vlastnosti jsou ovlivňovány jeho úpravami, především měkčením [10] [13] [22].

PVC se dělí na neměkčené (PVC-U), a měkčené (PVC-P)

- PVC-U je označován obchodně jako novodur a slouží k výrobě tvarově stálých výrobků: trubek, desek, profilů apod [10] [21].

- PVC-P se obchodně nazývá novoplast, Díky změkčení je vhodný pro vyrábění polotuhých a elastických výrobků: fólie, ochranné rukavice, hračky, nádoby apod. [10] [21].

2.1.6 Polymethylmethakrylát

Polymethylmethakrylát obecně známý spíš jako plexisklo, akrylátové sklo anebo organické sklo, zkráceně PMMA patří mezi amorfní polymery. Je odolný proti zředěným roztokům solí, kyselin a zásad. Je čirý a bezbarvý, a to i v silných vrstvách. Dále je opakovaně tvarovatelný zahřátím na určitou teplotu, bez ztráty svých vlastností, velmi tuhý a pružný v tahu. Je tepelně odolný proti teplotám do 105 °C a odolný proti ultrafialovému záření. Ve srovnání se sklem je levnější, lehčí, ale je méně chemicky odolný a méně odolný proti poškrábání [10] [23].

Používá se jako náhražka skla, v automobilovém průmyslu např. k výrobě krytů světel, tachometrů, na výrobu brýlí a kontaktních čoček [10] [23].

2.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou materiály, které lze tvarovat pouze jedenkrát, po určitou dobu po zahřátí. Opakovaným zahříváním se mění jejich chemická struktura. Původní molekuly se při prvním zahřátí sesítují, čímž se stávají netavitelné a nerozpustné. Tato reakce je proces nevratný a vytvrzený materiál nelze znovu tvarovat, svařovat a ani převést do taveniny. Tento proces se nazývá vytvrzování. Nevytvrzený reaktoplast se běžně nazývá pryskyřice, např. fenolformaldehydová pryskyřice (PF), polyesterová pryskyřice (UP), epoxidová pryskyřice (EP) [10] [13].

Mezi reaktoplasty patří fenoplasty, aminoplasty, epoxidy, polyestery a polyuretany, silikonové pryskyřice [10].

2.2.1 Fenoplasty

Fenoplasty vznikají polykondenzací fenolu a aldehydů. Fenolické pryskyřice slouží k výrobě nejen lisovacích hmot, ale používají se také jako tmely, lepidla, licí pryskyřice, lamináty, lakašské pryskyřice apod. Výrobky obsahují zbytky fenolu, který nezreagoval. Fenol je škodlivý zdraví, a tedy tyto výrobky nelze používat v potravinářství. Například reakcí formaldehydu s fenolem vzniká Fenolformaldehydová pryskyřice, obchodně označená jako Bakelit™. Je to syntetická pryskyřice. Bakelit je sám o sobě měkký a tvárný, proto se do

hmoty při lisování přidávají příměsi, díky kterým získává odolnost vůči mechanickému poškození, kyselinám a teplu. Mezi výrobky z Bakelitu patří bižuterie, kancelářské potřeby a elektroinstalační materiál [10] [11] [13] [24].

2.2.2 Aminoplasty

Aminoplasty vznikají polykondenzací aminů nebo amidů a formaldehydu. Například reakcí formaldehydu s močovinou nebo melaminem vzniká močovinoformaldehydová (UF) nebo melaminoformaldehydová (MF) pryskyřice. Aminoplasty jsou zdravotně nezávadné a tužší než fenoplasty. Jsou bezbarvé. Tyto pryskyřice se používají při výrobě dřevovláknitých a dřevotřískových desek, překližky, tmelů, jako impregnace papíru a lepenky a izolační pěna [11] [25] [26].

2.2.3 Epoxidy

Epoxydové pryskyřice (EP) jsou látky obsahující dvě a více epoxidových skupin. Vyrábí se kondenzační polymerací, jsou nízkosrážlivé. Pro jejich využití je význačná velká adheze k ostatním materiálům a velká reaktivita se sloučeninami. Používají se jako lakařské pryskyřice, lepidla, zalévací a nátěrové a lisovací hmoty, ochrana proti korozi, chemickým látkám a povětrnostním vlivům a jako pojiva skelných laminátů. [10] [27] [28].

2.2.4 Polyestery

Na rozdíl od epoxidové pryskyřice se polyesterová pryskyřice (UP) vyrábí radikálovou polymerací, což je reakce iniciovaná působením vnější energie, tepla, či zářením na monomer schopný reakce. Používá se např. na lamináty, tmely, lepidla, bižuterii, knoflíky, pojivo, plastových profilů vyztužených skelným vláknem nebo zalévací hmoty [10] [11] [27].

2.2.5 Polyuretany

Dle slov pana Ing. Luboše Běhálka, Ph.D. v knize *Polymery: Polyuretan je materiál, který může být semikrystalickým termoplastem (tzv. lineární polyuretan), reaktoplastem nebo elastomerem se sesítovanou strukturou (určeným pro odlévání). Jedná se o polymery, které vznikají reakcí vícefunkčních isokyanátů s polyalkoholy (polyoly) za vzniku uretanu. Kombinací těchto složek a dalších aditiv lze připravit produkty nejrůznějších vlastností, termoplast, reaktoplast i elastomer* [13].

V praxi se polyuretany dají nalézt v podobě pěnových (lehčených) materiálů různé hustoty. Pěny se vyrábí polotvrdé, měkké, tvrdé a integrální, tedy pěny s pórovitým jádrem a

kompaktním povrchem. Z pěny se vyrábí např. zdravotnické pomůcky, stropní panely, výplně sedadel, matrace, těsnící a izolační pásy a materiály chránící předměty proti nárazu. Tvrdé integrální pěny slouží např. jako bezpečnostní a ochranné prvky v automobilech, madla řadících pák a židle [10] [13].

2.2.6 Silikonová pryskyřice

Silikonové pryskyřice vznikají hydrolyzou směsi polyfunkčních monomerů jako jsou dichlorsilany a trichlorsilany, které jsou odolné proti ultrafialovému záření a mají vynikající tepelné, izolační a vazebné vlastnosti. Silikonová pryskyřice je dostupná v suchém stavu (vločky) a kapalném stavu, jako roztok s toluenem [10].

Silikonová pryskyřice je odolná proti vysokým teplotám a povětrnostním podmínkám, je to elektrický izolant. Používá se jako pojivo, ochrana proti povětrnostním podmínkám, izolační činidlo, tmel, vypalovací lak [10].

2.3 Vlákna a tkaniny

V dnešní době se můžeme setkat například s vysokopevnostními vlákny, jako jsou polypropylenová, polyetylenová, aramidová, uhlíková vlákna, která se používají samostatně, ve formě tkanin nebo jako příměsi ke zlepšení vlastností jiných materiálů.

2.3.1 Polypropylenová a polyetylenová vlákna a tkaniny

Polypropylenová (PP) vlákna se vyrábí zvlákněním a dlužením taveniny. Vlákna jsou odolná proti oděru, chemikáliím, vlhkosti, jsou trvanlivá a málo se žmolkuje, mají nízké pořizovací náklady. Nevýhodou je tvarová nestabilita, malá zotavovací schopnost, těžká barvitelnost a nízká tepelná odolnost, kdy vlákno měkne při teplotě 140 °C, a malá odolnost proti působení světla. PP vlákna se používají například v textilním průmyslu, na výrobu lan, lepicích pásek, ponožek, k výrobě netkaných textilií jako jsou geotextilie a filtrů, ve stavebnictví se PP vlákno přidává do betonu [10] [19] [29] [30].

2.3.1.1 *INNEGRA S*

INNEGRA S je zástupcem vysokomodulového PP vlákna, je to odolná, tvrdá, tvárná, lehká, levná více vláknová příze, je recyklovatelná, vysoce krystalická a málo natáhnutelná. Používá se samostatně, nebo v kombinaci např. s čedičem, uhlíkem a sklem. [31].

2.3.1.2 UHMW PE

UHMW PE (Ultra high molecular weight PE) je PE vlákno vhodné pro výrobu neprůstřelných vest a helem. Podle stránek dodavatelů scienceapha.com a cz.uhmwpeyarn.com je odolnější než ocel a o 40% pevnější než aramidové vlákno, přičemž je lehčí. Je odolné proti oděru, nárazům, ultrafialovému záření, korozi, vodě, mrazu a chemickým látkám. Má oproti jiným polymerním materiálům vyšší pevnost v tahu, vyšší modul pružnosti a vysokou rázovou odolnost [32] [33].

2.3.2 Aramidová vlákna a tkaniny

Aramidová vlákna neboli aromatické polyamidy vznikají spojením polyamidového řetězce s aromatickými (benzenovými) jádry [34] [35].

Aramidová vlákna jsou velmi pevná a teplotně odolná. Dělí se na **meta-aramidy**, které jsou odolnější chemicky, vůči vysokým teplotám a oděru a **para-aramidy** vynikající svou pevností a tvrdostí. Aramidové kompozity velmi dobře absorbují vibrace a odolávají tříštění při nárazu. Používají se jako ochranné obleky, potahy a štíty před teplem a izolace elektrických vodičů. Para-aramidy slouží například ke zpevnění hadic, jako základ pro motorkářské oblečení, převodové řemeny, části letadel a k výrobě prvků balistické ochrany, ochranné obuvi. [35] [36].

2.3.2.1 Nomex™

Nomex™ je zástupcem meta-aramidového vlákna. Je to materiál, který vyvinula společnost DuPont. Své uplatnění díky odolnosti proti vysokým teplotám, agresivním chemikáliím, trvanlivosti a antistatickým vlastnostem nalézá především ve výrobě ochranných oděvů pro hasiče, astronauty, piloty formule 1, pracovníky v energetickém a petrochemickém průmyslu [37] [38].

2.3.2.2 Kevlar™

Kevlar™ je dalším produktem společnosti DuPont, původně měl sloužit jako výztuž závodních pneumatik místo oceli. Je to para-aramidové vlákno využívané ve formě textilií. Hojně je využíván pro výrobu ochranných pomůcek a oděvů v továřenském průmyslu, výrobu neprůstřelných vest a helem například pro policii. Díky odolnosti proti prořezání se používá i na taktické rukavice a díky odolnosti proti oděru se přidává do ochranného oblečení. Vyrábí

se z něj součástky automobilů a letadel. Sice jde o velmi odolný, pevný a lehký materiál, ale je náchylný na ultrafialové záření, vlhkost a špatně se barví [39] [40].

2.3.2.3 Twaron™

Twaron™ je konkurenční materiál kevlaru vyráběný společností Teijin (původně vyráběný spol. Akzo). Je to tedy para-aramid [41] [42].

2.3.2.4 Alkex™

Alkex™ je další para-aramidový materiál, srovnatelný s kevlarom a twaronem. Vyrábí jej Korejská společnost Hyosung Advanced Materials. Je používán na ochranné neprůstřelné vesty, helmy, při výrobě kol automobilů a ochranných rukavic proti pořezání a propíchnutí [43].

2.3.2.5 Heracron™

Heracron™ stejně jako předcházející kevlar twaron a alkex, i heracron je srovnatelný konkurenční materiál vyráběný společností Kolon Industries [44].

2.3.3 Uhlíková vlákna a tkaniny

Uhlíkové vlákno, z anglického Carbon fibre někdy označované jako karbonové, je na svůj průměr, okolo 5 μm , velmi pevné a odolné. Vlákno je převážně složeno z uhlíkových atomů, které tvoří krystalickou strukturu. Většina využití uhlíkových vláken připadá na kompozity. Vlákno se používá na výrobu ochranných částí motocyklistických rukavic, bot a kalhot, jízdních kol, součástí automobilů, letadel, lodí, dřívků šípů atd. Mezi oceňované vlastnosti patří vysoká pevnost, tuhost, nízká váha a tepelná roztažnost, vysoká tepelná a chemická odolnost a životnost. Největší nevýhodou je vysoká cena [45] [46] [47] [48].

2.4 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou materiály vytvořené dvěma a více různými kombinacemi materiálů a jejich vlastností, za účelem získání žádané kombinace vlastností pro materiál touto kombinací vytvořený. Podle pana Lubomíra Zemana v knize Vstříkování plastů: *Kompozitní materiály jsou definovány jako materiálové struktury, které vzniknou ze dvou nebo více materiálů zcela odlišných vlastností s výsledným synergickým účinkem*. Kompozitní materiály se skládají z výztuže, která je tvořena vlákny nebo částicemi a matricí, jež tvoří pojivo materiálu. Základem úspěšných kompozitních materiálů je jejich synergie, což znamená, že

výsledný kompozit dosahuje lepších vlastností, než součet vlastností jednotlivých jeho složek. Mezi hojně využívané polymerní kompozity patří např. lamináty a sendviče [2] [10] [36] [49] [50].

Kompozity se dělí podle tvaru výztuže na částicové a vláknové. Částicové kompozity jsou vyztuženy částicemi kulovitého, destičkového, tyčinkového nebo nepravidelného tvaru. U vláknových kompozitů je výztuž v jednom směru tvořena ve srovnání s velikostí výrobku krátkými nebo dlouhými vlákny různého uspořádání. Vlákna výztuže mohou být uspořádána jednosměrně, dvousměrně např. křížová tkanina a rohož (laminát), vícesměrně anebo náhodně [2] [50] [51].



Obrázek 8. Tvary výztuže kompozitu [2]

2.4.1 Lamináty

Lamináty jsou všeobecně materiály vytvořené z reaktoplastu, tedy pryskyřic, které jsou zpevněny např. skleněnými, uhlíkovými nebo aramidovými vlákny [52].

2.4.1.1 Skelný laminát

Jedná se o vrstvené, kompozitní, materiály tvořené tkaninou ze skelných vláken, která je dále vytvrzena polymerní (umělou) pryskyřicí. Mezi vlastnosti sklolaminátu patří monolitčnost, jde tedy o výrobky vyrobené z jednoho kusu, čímž odpadají slabiny spojů, zdravotní a hygienická nezávadnost, možnosti použití v potravinářství, pevnost a pružnost a nízká hmotnost, které se dosahuje snížením množství použitého materiálu díky jeho vysoké pevnosti. Za použití speciální pryskyřice dosahuje sklolaminát vysoké odolnosti proti ultrafialovému záření. Skelné lamináty se používají například k výrobě sportovních trupů lodí, karoseriových prvků motocyklů a automobilů, ale i například nábytku, potravinářských kádí a klouzaček na dětských hřištích [10] [53].

2.4.1.2 Uhlíkový laminát

Podobně jako u skelného laminátu, jedná se o kompozitní materiál tvořený uhlíkovými vlákny a pryskyřicí.

Karbonová vlákna mají dobrou odolnost v tahu, jsou odolná proti vysokým teplotám a nehořlavá, například při obalení niklem jsou vhodná pro výrobu ochranných oděvů pro hasiče. Karbonové vlákno je pětikrát pevnější, než ocel a přitom je dvakrát tužší. Přesto, že je pevnější, je mnohem lehčí. Dále jsou chemicky velmi odolná, rozměrově stálá při změnách teploty, zdravotně a biologicky nezávadná a jsou prostupné rentgenovým zářením, proto jsou vhodná k použití v lékařství. Nevýhodou, i přes jejich vysokou sílu, tuhost a nízkou hmotnost, je jejich cena, která je tak vysoká, že ve spoustě případů se volí levnější materiály [54] [55].

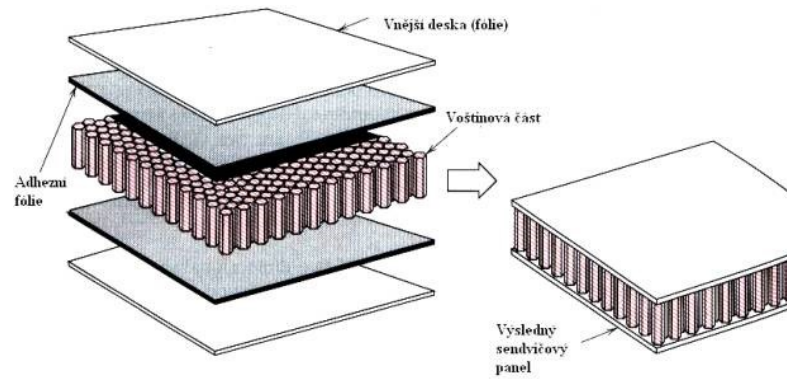
Uhlíkové lamináty dosahují vysoké odolnosti vůči extrémně vysokým i nízkým teplotám, díky čemuž se používají jako ochranné pláty raketoplánů [56].

2.4.1.3 Aramidový laminát

K výrobě aramidového laminátu se využívá převážně para-aramidové vlákno, v kombinaci s pryskyřicí. V průmyslu je možné se setkat s kombinací uhlíkových vláken a aramidových vláken, která uhlíkovým vláknům zlepšují odolnost proti oděru [36] [57].

2.4.2 Sendvičová struktura

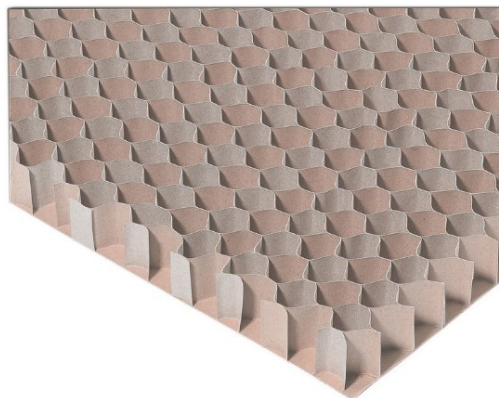
Sendvičová struktura vychází ze složení materiálu ze dvou laminovaných desek spojených relativně tlustým, lehkým jádrem, někdy je mezi vnějšími deskami a jádrem použita adhezni vrstva pro lepší přenos zatížení mezi jednotlivými vrstvami. Struktura poskytuje vysokou tuhost v ohybu a nízkou hmotnost, oproti laminátové konstrukci. Je však výrobně složitější a nákladnější. Jádra mohou být z kovové i nekovové voštiny, nebo z nekovových pěnových výplní [36].



Obrázek 9. Sendvičová struktura [58]

2.4.2.1 Voštiny

Voština je struktura, díky které sendvičový kompozitní materiál dosahuje své odolnosti a nízké váhy. Kompozit je tvořen kombinací dvou desek, mezi kterými je prostor vyplněn plynem (vzduchem) a materiálem poskládaným do struktury např. šestiúhelníků, trojúhelníků nebo jiných n -úhelníků [59].



Obrázek 10. Voština Fermacell [60]

3 ZÁKLADNÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Mechanické zkoušky polymerních materiálů se odvíjejí od jejich jednotlivých mechanických vlastností. Jsou to vlastnosti spojené s pružnou a nepružnou reakcí na působení vnější síly, nebo vlastnosti související se vztahem mezi pnutím a zátěží. Tyto jednotlivé vlastnosti materiálu určují, zda je pro požadovanou aplikaci vhodný, či nikoliv. Mezi mechanické vlastnosti patří pevnost, houževnatost, křehkost, pružnost a tvárnost [36] [61] [62].

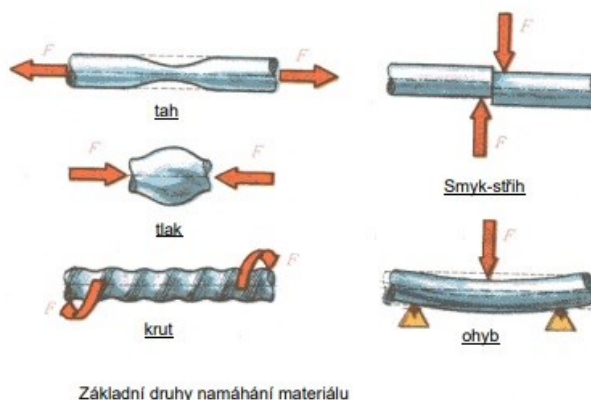
Mechanické zkoušky podle působení síly na testovaný vzorek se dělí na statické a dynamické. Tyto zkoušky jsou deformační. Statické zkoušky jsou zkoušky, při kterých na těleso působí stálá síla, nebo síla, která se mění lehce a pozvolna. Statické zkoušky trvají obvykle v řádu minut, hodin, dní až let. Dynamické zkoušky jsou zkoušky využívající měnící se sílu, oproti statickým zkouškám agresivně, rychle. Mezi dynamické zkoušky patří zkoušky cyklické, označované jako únavové, působící síla se zesiluje a zeslabuje v daném cyklu a zkoušky rázové, kdy síla působí nárazově, v řádu zlomků sekund [61] [62] [63].

Na výsledek mechanických zkoušek má značný vliv teplota, proto se zkoušky provádí nejen za normálních teplot, ale i za teplot zvýšených a snížených. Krom teploty vlastnosti ovlivňuje i struktura plastu samotného a struktura kompozitu z něj vytvořeného [61] [62] [63].

Mechanické zkoušky polymerních materiálů se provádí na vzorcích, resp. zkušebních tělesech, které stanovuje norma ČSN EN ISO 20753 Plasty – Zkušební tělesa.

3.1 Statické zkoušky

Statické zkoušky vychází z pevnostních zkoušek. Podle způsobu působení síly na vzorek je dělíme na zkoušky pevnosti v tahu, ohybu, krutu, tlaku a stříhu [61] [62] [63].



Obrázek 11. Mechanické namáhání [62]

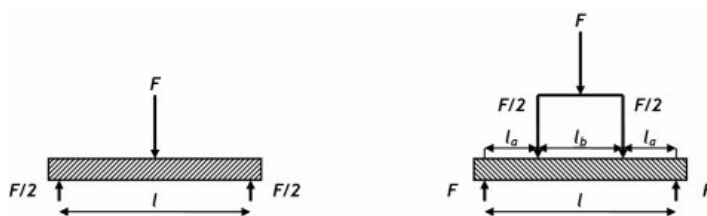
3.1.1 Zkouška pevnosti v tahu

Tato zkouška je prováděna u většiny technických materiálů. Výsledkem jsou hodnoty potřebné pro výpočty konstrukčních prvků. Je definována normou ČSN EN ISO 527-1 – Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy [61] [62] [63].

Zkoušený vzorek je napínán zkoušecím strojem v délce, čímž vzniká napětí ve vzorku, dokud nedojde k jeho poškození, nebo dokud nedosáhne předem stanoveného mezního poměrného prodloužení. Ověřuje se pevnost v tahu a její mez, poměrné prodloužení a celkové prodloužení vzorku [61] [62] [64].

3.1.2 Zkouška ohybu

Zkouška ohybem poskytuje informace o schopnosti materiálu odolat silám působícím kolmo na délkovou osu vzorku. U některých polymerních materiálů nelze dosáhnout prasknutí, pouze se extrémně ohnou, proto se zkouška provádí do dosažení maximálního napětí na vnější straně vzorku do hodnoty 5 %. Zkouška v ohybu se provádí umístěním vzorku na dvě pevné podpěry a z vrchu se na něj působí v jednom nebo dvou místech. Tato místa působení a podpěr jsou na vzorky rozmístěna rovnoměrně. Zkouška je řízena normou ČSN EN ISO 178 – Plasty – Stanovení ohybových vlastností [61] [64].



Obrázek 12. Tříbodový (vlevo) a čtyřbodový systém ohybové zkoušky [65]

3.2 Dynamické zkoušky

Dynamické zkoušky jsou zkoušky cyklickým, opakovaným namáháním a rázové zkoušky.

3.2.1 Cyklické zkoušky

Opakované, cyklické, zkoušky mají za cíl najít mez únavy materiálu. Vychází se z předpokladu, že opakovaným namáháním materiál ztrácí svou původní odolnost a následně vydrží nižší napětí než při statickém zatížení. K těmto zkouškám patří např. střídání tahu s tlakem, ohyb a krut. Je-li řeč o mezi únavy, znamená to limitní zatížení, při kterém materiál vydrží

neomezený počet testovacích cyklů. Mezi cyklické zkoušky patří například cyklická zkouška ohybu, tahu, a tlaku [61] [62].

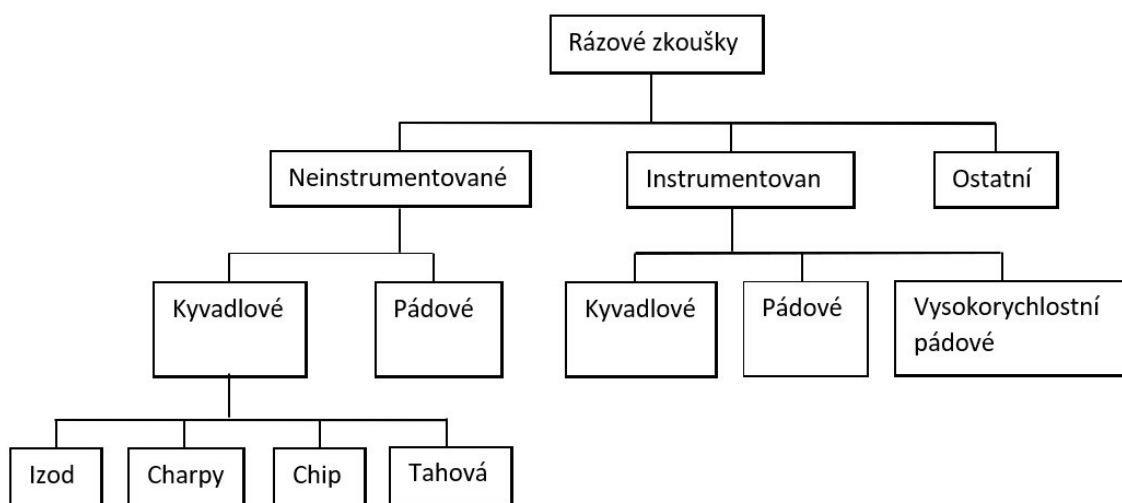
3.2.2 Rázové zkoušky

Rázová zkouška hledá potřebnou energii na porušení zkoušeného vzorku, nejčastěji, jedním rázem. Rázové zkoušky se provádí např. tahové, tlakové, ohybové a krutové. Základním zkoumaným parametrem materiálu je jeho pevnost. Ta odpovídá nárazové energii. Čím je pevnost vyšší, tím větší energie je potřeba k překonání jeho odolnosti vůči rázovému zatížení nebo jeho zlomení [61] [62].

U polymerních materiálů dochází ke čtyřem druhům selhání vlivem rázových zkoušek:

- Křehké zlomení – vzorek praskne přímo, bez ohybu.
- Lehké popraskání – vzorek lehce popraská a ohne se, aniž by ztratil svou celistvost a tvar.
- Ohnutí – vzorek se ohne, je vidět značná deformace a zblednutí napnuté části ohybu, ale nepopraská.
- Selhání tvaru (Ductile Failure) – Vzorek se ohne definitivně a popraská.

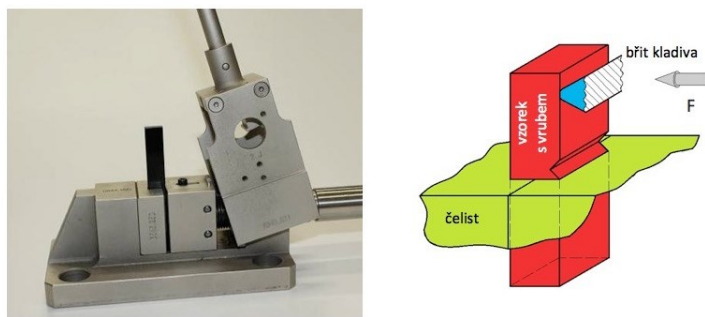
Rázové zkoušky se dělí, viz. obrázek 13. níže, na neinstrumentované, instrumentované a ostatní. Neinstrumentované jsou zkoušky pádové a kyvadlové. Kyvadlové zkoušky jsou Izod, Charpy, Chip a Tahová. Instrumentované zkoušky se dělí na kyvadlové, pádové a vysokorychlostní pádové [61].



Obrázek 13. Rázové zkoušky [61]

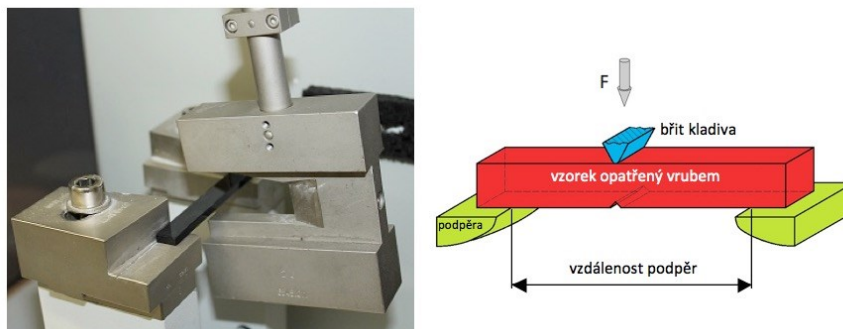
3.2.2.1 Izod a Charpyho metoda

Izod a Charpyho metody jsou metody využívající kyvadla. Výsledky měření jsou vyjádřeny jako kinetická energie potřebná k prolomení vzorku. Aby došlo k čistému zlomení vzorku, místo jeho ohnutí a popraskání, musí být opatřen vrubem. Při Izod metodě se vzorek upevňuje vertikálně a musí být pevně umístěn v základně, nejčastěji vrubem namířeným proti kyvadlu. Kyvadlo se uvolňuje z pevně nastavené výšky a při testu s dostatečnou energií doslova urazí volnou část vzorku nad základnou. Metoda Izod je definována normou ČSN EN ISO 180 – Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Izod [13] [61] [66] [67].



Obrázek 14. Izod [13]

Metoda Charpy využívá stejného principu jako metoda Izod s tím rozdílem, že testovaný vzorek není pevně uchycen vertikálně v základně, ale je na základně umístěn horizontálně. Těleso je umístěno mezi podpěry základny s vrubem na druhé straně, než je strana úderu kladiva stroje. Úder je mířen na střed tělesa. Charpy metoda je definována normou ČSN EN ISO 179-1 – Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška [13] [61] [68].



Obrázek 15. Charpy [13]

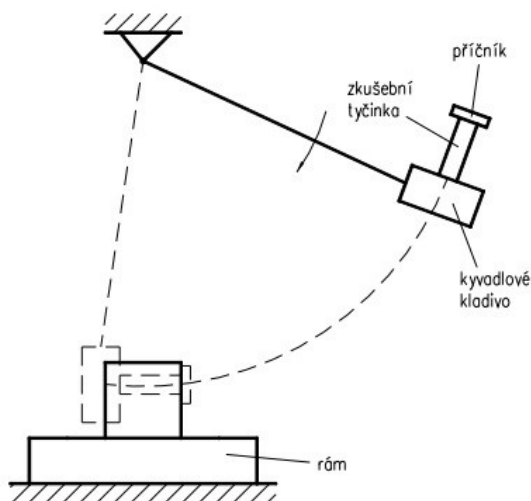
3.2.2.2 Chip zkouška

Chip zkouška byla vyvinuta pro testování vlivu povrchových mikrotrhlin, vzniklých vlivem povětrnostních podmínek na zachování rázové pevnosti. Místo vrubové citlivosti se tímto testem měří houževnatost materiálu. Jedná se o upravenou metodu Izod, kdy se testuje, i na stejném stroji pro metodu Izod, relativně tenký malý vzorek získaný z hotového produktu, často vystavený působení povětrnostním podmínkám [61] [67] [69].

3.2.2.3 Tahová rázová zkouška

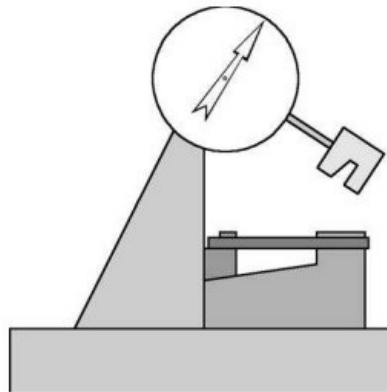
Tahová rázová zkouška byla vyvinuta pro testování tenkých, pružných materiálů, které nejsou vhodné pro testování metodami Izod a Charpy. Zkouška je definována normou ČSN EN ISO 8256 – Plasty – Stanovení rázové houževnatosti v tahu [70].

Testovaný vzorek je zároveň přichycen k příčnicku a kladivu a zhoupnutím kladiva se příčník zarazí o základnu, tzv. kovadlinu, čímž dojde k přetržení vzorku [61] [71].



Obrázek 16. Tahová zkouška, první metoda [71]

Při druhé metodě je vzorek napnut mezi základnou a volným příčnickem. Hlava kladiva při zhoupnutí vyrazí příčník ze základny [67].



Obrázek 17. Tahová zkouška,
druhá metoda [67]

3.2.2.4 Pádové zkoušky

Pádové zkoušky vychází z působení dopadu tělesa o různé hmotnosti, padajícího volným pádem z různé výšky na testovaný vzorek. Na rozdíl od kyvadlových zkoušek, pádové zkoušky působí na těleso ve více osách najednou. Pádové zkoušky jsou především vhodné pro ploché vzorky, jako jsou plastové fólie, desky a laminátové materiály. Pro testování trubek a jiných tvarů byly vyvinuty i jiné prorážecí hroty, držáky, pro uchycení těchto vzorků, nebo celé padostroje [61].



Obrázek 18. Padostroj
Zwick HIT230F [72]

Pádové zkoušky jsou definovány normou ČSN EN ISO 6603-1 – Plasty – Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška [73].

Norma popisuje dvě statistické metody zkoušení [73].

- Metoda A: stupňovitá metoda, spočívající v konstantním zvyšování přírůstku energie po každém výsledku, kdy nedošlo k porušení tělesa, nebo konstantním snižování energie, pokud dochází k porušení tělesa [73].
- Metoda B: skupinová metoda, využívá skupin těles, kdy potřebná energie k porušení je počítána statisticky [73].

Zkouška stanovuje rázovou houževnatost, tedy odolnost zkušebního tělesa, proti porušení nárazem tlouku o zvolené hmotnosti, který má namazanou nárazovou plochu. Tlouk dopadá ze zvolené výšky kolmo na střed testovaného vzorku volným pádem. Energii je možno upravit změnou hmotnosti tlouku, nebo změnou výšky pádu [73].

Pro výpočet energie tlouku E_p platí, že je rovna součinu výšky pádu H , gravitačního zrychlení g a hmotnosti tlouku m a je uváděna v Joulech [73].

$$E_p = H \times g \times m, (J) \quad (1)$$

3.2.2.5 *Instrumentované rázové zkoušky*

Neinstrumentované rázové zkoušky poskytují pouze informaci o celkové rázové energii, což omezuje jejich použití v hodnocení materiálů a jejich kvality [61].

Instrumentované rázové zkoušky oproti tomu nabízí možnost kontinuálního sledování průběhu celého testu vzorku od akcelerace až po penetraci vzorku, včetně průběhu deformace a selhání, nebo ukončení testu. Instrumentované zkoušky často využívají křivek síla-průhyb a síla-čas. Tato schopnost je výhodná pro výzkum, vývoj a pokročilou kontrolu kvality materiálů. Všeobecně lze říci, že instrumentované zkoušky využívají stejných základních principů jako zkoušky neinstrumentované. Instrumentované rázové zkoušky definuje norma ČSN EN ISO 6603-2 Plasty – Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání – Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška [61] [67] [69] [74].

3.2.2.6 *Vysokorychlostní rázové zkoušky*

Vysokorychlostní rázové zkoušky se vyvinuly díky rostoucím nárokům na plastové výrobky, jelikož dokáží simulovat rázy ve vysokých rychlostech. Tyto zkoušky jsou velmi užitečné

v hodnocení materiálů, jelikož některé materiály se při nízkých rychlostech jeví jako pružné, ale při vysokých rychlostech jako křehké. Své využití nalézají například v oblastech automobilového průmyslu. Zařízení využívá pro zajištění vysokých rychlostí napnutých pružin nebo pneumatických pístů. Testují se vzorky vystavené různým teplotám a vlhkostem [61].

4 VYUŽITÍ ODOLNÝCH POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ V OBLASTI BEZPEČNOSTI

Polymerní materiály jsou tvárnější, lehčí, pružnější a levnější než například kovy a sklo, díky čemuž tyto materiály nahrazují a v dnešní době se hojně využívají k výrobě nejrůznějších ochranných prvků.

Ochranné prostředky tvoří pasivní ochranu nositele proti fyzickému poškození těla. Tyto prvky musí odpovídat patřičným normám, být bezpečné a dostatečně ergonomické, aby mohly efektivně plnit svou funkci [75].

Mezi ochranné prostředky z polymerních materiálů patří protiúderový štít, přilba, chrániče končetin, oblek, brýle, ochranné rukavice proti pořezání, ale i protichemická maska. Dále sem lze zařadit například ochranná skla mobilních telefonů, ochranná pouzdra a kryty mobilních telefonů, nebo bezpečnostní skla obráběcích strojů a oken [75].

4.1 Protiúderový štít

Protiúderový štít bývá vyroben z polykarbonátu často tloušťky 3 mm. Štít odolává například házení kamení, střelbě z praku, úderům kovovými předměty, sekům meče a jiným chladným zbraním [76].

Na následujícím obrázku je ukázán štít ASU-60-100 firmy ESP. Tento štít váží 3,65 kg [77].



Obrázek 19. Štít ASU-60-100 [77]

4.2 Protiúderová přilba

Protiúderová přilba je vyráběna jako polykarbonátová skořepina. Může být opatřena průzorem chránícím obličej a chráničem krku, upevněným ke skořepině. Například přilba firmy Argun je vhodná pro složky městské policie. Přilba je nehořlavá a odolá proti úderu a

chemikáliím. Průzor je tlustý 3 mm a zakrývá celý obličej. Dále je přilba vybavena chráničem krku a upínacím popruhem s rychlosponou a chráničem brady [78].



Obrázek 20. Protiúderová přilba [78]

4.3 Chráníč holení a paží

Chránič slouží pro ochranu holeně, kolene, kotníku a nártu. Je vyráběn z vodoodpudivé tkaniny, antišokové pěny a oděruodolného úpletu. Nejpevnější část je tvořena plastovými pláty. Chráníč paže chrání především předloktí a loket. Jeho konstrukce je materiálově podobná jako u chrániče holení. Liší se pouze systémem upínání, který je složitější, kvůli zachování pohyblivosti paže [78].

Chrániče jsou konstruovány tak, aby co nejméně omezovaly pohyb a byly lehce nasaditelné svépomocí [78].



Obrázek 21. Chráníč holeně a paže [78]

4.4 Protiúderový oblek

Protiúderový oblek je spojením chráničů holení a paží spolu s přidáním chráničem horní části trupu. Ve vyšších odolnostech tento komplet poskytuje mimo ochrany proti úderu i ochranu proti probodnutí a ochranu balistickou. Požadované odolnosti je dosaženo kombinací vysoce tvarově stálého polykarbonátu, 3D tkaniny pro rozklad kinetické energie a balistické vložky [78].



Obrázek 22. Ochranný oblek [78]

4.5 Taktické rukavice odolné proti prořezání a vpichu

Rukavice jsou vyráběny z hovězí kůže, která je proti oděru a prořezu chráněna aramidovým vláknem. Klouby, hřbet ruky a vnější části prstů jsou chráněny plastovou skořepinou a pěnou pro tlumení nárazu. Rukavice díky silikonovému povlaku do jisté míry odolávají i teplu a ohni [79].



Obrázek 23. Taktické rukavice [79]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je zjištění odolnosti vybraných materiálů proti průrazu za běžných klimatických podmínek. Materiály byly otestovány instrumentovanou rázovou zkouškou na průraz.

Testovanými materiály byly skelné, aramidové a uhlíkové tkaniny a desky z uhlíkového vlákna, UHMHDPE, PC a LDPE.

Cíl byl následně doplněn o testování některých sendvičových struktur vytvořených z vybraných materiálů, kdy byl mezi dva deskové vzorky vložen vzorek tkaniny.

Naměřené výsledky byly nakonec statisticky a graficky vyhodnoceny.

6 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ ZWICK ROELL HIT230F

Měření bylo realizováno pomocí padostroje Zwick Roell HIT230F. Tento stroj je navržen pro instrumentované pádové zkoušky dle normy ISO 6603-2. Je schopen vyvinout energii 230 J a dosáhnout rychlosti pádu $4,4 \frac{m}{s}$. Používané závaží má hmotnost 23,3 kg [80].

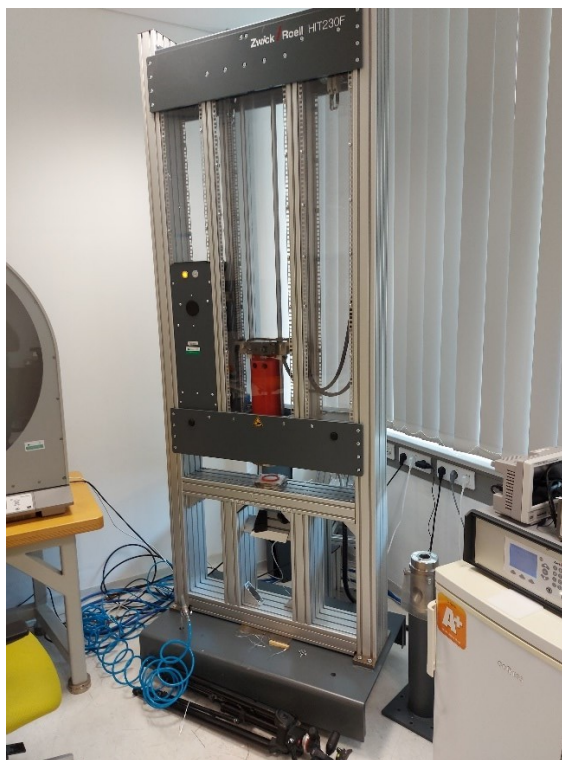
Stroj je tvořen rámem, který pomocí vodící lišty vede systém pro přidržení a uvolnění tlouku s půlkulovou hlavou a se závažím, pneumatickým lisem, měřicí elektronikou a dvěma tlačítky pro bezpečné uvolnění závaží [80].

Testovaný vzorek je do stroje upevněn pomocí pneumatického lisu.

Samotný test je realizován kombinací manuálního a počítačového ovládání. Testovaný vzorek je manuálně vložen do stroje. Na počítači pomocí programu testXpert II, ve kterém se nastavuje tloušťka testovaného vzorku a počáteční energie pádu, kterou má tlouk stroje působit na testovaný vzorek.

Na základě těchto nastavení stroj sám vypočítá potřebnou výšku pádu tlouku a přichystá závaží do požadované pozice.

Následně je test realizován současným stlačením dvou tlačítek pro zajištění vzorku a následné uvolnění tlouku se závažím [80].



Obrázek 24. HIT230F [vlastní tvorba]

7 PŘÍPRAVA VZORKŮ

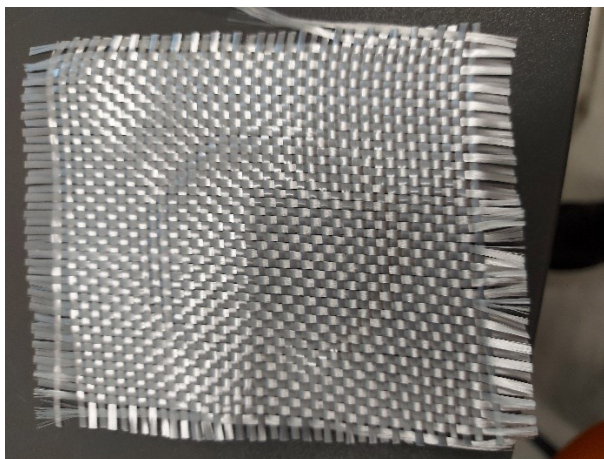
Pro testování byly zvoleny vybrané tkaniny a desky:

- Skelné tkaniny – RT 490 o váze vlákna $486 \frac{g}{m^2}$, biaxiální o váze $450 \frac{g}{m^2}$, biaxiální o váze $600 \frac{g}{m^2}$, AEORGLASS o váze $163 \frac{g}{m^2}$.
- Aramidové tkaniny – $173 \frac{g}{m^2}$ plátno 281 a kepr 282, aramid-diolenová tkanina $170 \frac{g}{m^2}$ plátno.
- Uhlíková tkanina – KC industry o váze $245 \frac{g}{m^2}$ kepr.
- Desky – z uhlíkového vlákna různé tloušťky, LDPE, UHMHDPE a PC.

Tkaniny byly zakoupeny v rolích, ze kterých byly následně nastříhány čtverce o straně 10 cm. Testované desky byly již pořízeny v požadovaném rozměru.

Skelné tkaniny

Jako nejméně odolný vzorek byla předpokládána skelná tkanina RT 490 o váze vlákna $486 \frac{g}{m^2}$. Tato tkanina je cenově nejlevnější a prodejce, firma Havel composites tuto tkaninu doporučuje pro výrobu forem a větších dílů. Tato tkanina byla velmi snadno upravitelná stříhem [81].



Obrázek 25. RT 490 [vlastní tvorba]

Další tkaninou byla zvolena tkanina biaxiální o váze $450 \frac{g}{m^2}$, tkaná v úhlu 45° . Jedná se o tkaninu, která nabízí vysokou pevnost při zachování pružnosti, díky uspořádání vláken, která se o sebe nemohou přerušit [81].



Obrázek 26. Biaxiální tkanina [vlastní tvorba]

Biaxiální tkanina o váze $600 \frac{g}{m^2}$, tkaná v úhlu 45° je tkaninou stejného druhu jako tkanina předchozí. Při namáhání se její vrstvy pohybují zvlášť což brání přerušování vláken. Dle výrobce je vhodná k použití pro lopatky větrných elektráren a stavbu lodí. Od této tkaniny byl očekáván nejlepší výsledek z řady skelných tkanin [81]

Poslední zvolenou skelnou tkaninou je tkanina AEROGLASS s váhou $163 \frac{g}{m^2}$. Tato tkanina byla zvolena jako nejlehčí a zároveň nejpružnější. Její slibovanou předností dle výrobce je vysoká pevnost v tahu [81].

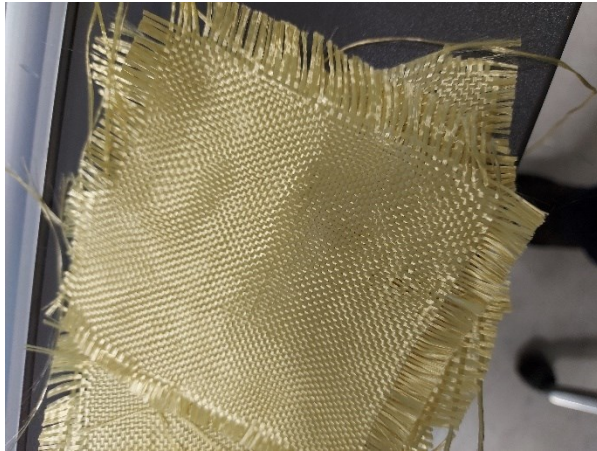


Obrázek 27. AEROGLASS [vlastní tvorba]

Aramidové tkaniny

Aramidové tkaniny obecně vynikají rázovou a tahovou pevností. Ze všech použitých tkanin byly aramidové tkaniny nejodolnější vůči oděru a prořezání, díky tomu se nejhůř stříhaly [81].

Aramidová tkanina $173 \frac{g}{m^2}$ plátno 281 a kepr 282 využívají stejného vlákna, avšak liší se jeho uspořádáním. Měření hodnotilo hlavně vliv tohoto rozdílu na průraznost [81].



Obrázek 28. Aramid [vlastní tvorba]

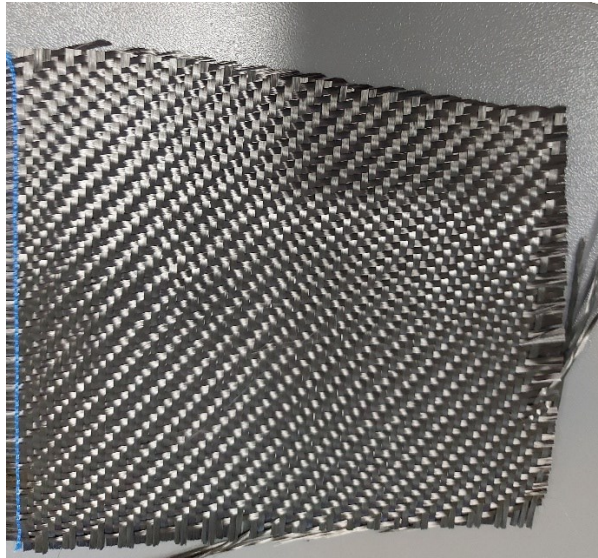
Aramid-diolenová tkanina $170 \frac{g}{m^2}$ plátno je tvořeno kombinací aramidového a diolenového vlákna, které se mechanickými vlastnostmi přibližuje vláknu aramidovému [81].



Obrázek 29. Aramid-diolen [vlastní tvorba]

Uhlíková tkanina

Uhlíková tkanina KC industry $245 \frac{g}{m^2}$ kepr slibuje vysokou pevnost a vysoký modul pružnosti při nízké hmotnosti [81].



Obrázek 30. Uhlíková tkanina [vlastní tvorba]

Desky

Pro testování byly vybrány desky z uhlíkového vlákna o tloušťce 1, 2 a 3 mm, ultravysokomolekulární polyetylén s vysokou hustotou (UHMHDPE) o tloušťce 3 mm, polykarbonátové desky tloušťky 3 mm a desky z polyetylenu s nízkou hustotou (LDPE) o tloušťce 3 mm.

Sendvičové vzorky

Sendvičové vzorky byly vytvořeny vložením vzorku tkaniny mezi dvě desky z LDPE. Cílem tohoto kroku bylo zjistit jaký vliv mají jednotlivé tkaniny na odolnost desek z LDPE, tedy z nejlevnějšího, ale nejpružnějšího materiálu, který je ze zvolených materiálů nejméně odolný proti průrazu.

8 PROVEDENÍ PÁDOVÝCH ZKOUŠEK

Pádové zkoušky byly provedeny na padostroji Zwick Roell HIT230F. Požadované parametry byly nastaveny pomocí testovacího programu testXpert II. Nejprve byly otestovány jednotlivé samostatné tkaniny ze skelného, aramidového a uhlíkového vlákna, následně samotné uhlíkové desky o tloušťce 1, 2 a 3 mm a desky z PC, LDPE a UHMHDPE o tloušťce 3 mm. Tyto výsledky měření byly statisticky zpracovány.

Dále došlo k otestování vzorků sendvičových struktur, tvořených kombinací dvou LDPE desek samotných, dvou LDPE desek s jednou tkaninou vloženou mezi tyto desky, pro dokázání vlivu tkaniny mezi pevnými deskami. Postupně byly použity různé vzorky tkanin.

Poslední měření byla realizována na třech typech vícevrstevných sendvičových struktur, složených ze dvanácti vrstev. První vícevrstevný sendvičový vzorek byl vytvořen kombinací dvou vrstev aramid-diolenové tkaniny, PC, dvou vrstev skelné biaxiální tkaniny o váze $600 \frac{g}{m^2}$ vzájemně otočených o 90° , dvou vrstev uhlíkové tkaniny, dvou vrstev tkaniny AEROGLOSS, jedné vrstvy aramidové tkaniny kepr, aramidové tkaniny plátno a desky LDPE. Druhý vícevrstevný sendvičový vzorek vznikl nahrazením PC desky za desku z LDPE a poslední sendvičový vzorek nahrazením obou desek za desky z UHMHDPE. Tyto sendvičové vzorky jsou očíslovány 1, 2 a 3.

Složení vrstev sendvičového vzorku 1 směrem od vrstvy dopadu tlouku:

1. Aramid-diolenová tkanina
2. LDPE deska
3. Uhlíková tkanina
4. Aramidová tkanina – plátno 281
5. Skelná tkanina AEROGLOSS
6. Aramidová tkanina – kepr 282
7. Skelná tkanina AEROGLOSS
8. Uhlíková tkanina
9. Skelná tkanina biaxiální 600 g/m^2
10. Skelná tkanina biaxiální 600 g/m^2 otočená o 90° oproti předchozí vrstvě
11. PC deska
12. Aramid-diolenová tkanina

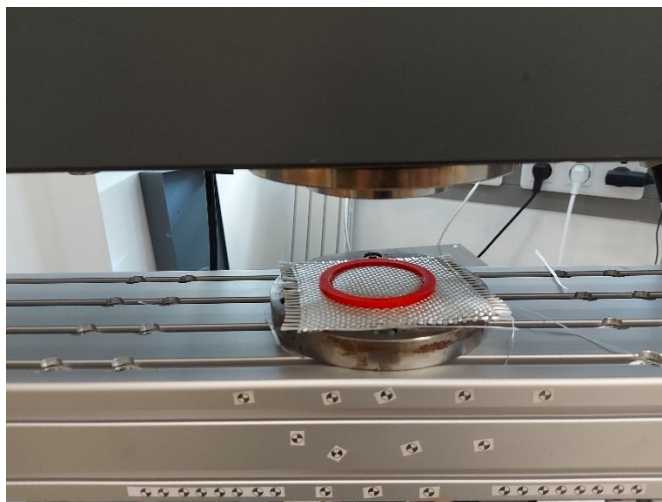
Sendvičový vzorek 2 byl vytvořen nahrazením PC desky na 11. pozici LDPE deskou a sendvičový vzorek 3 nahrazuje obě desky (pozice 2. a 11.) deskami z UHMHDPE.

Všechny vzorky byly otestovány za teploty 23 °C v toleranci 2 °C.

Měření probíhala následujícím postupem:

1. Umístění testovaného vzorku do stroje tak, aby tlouk zasáhl střed vzorku.
2. Zajištění vzorku pneumatickým pístem.
3. Uvolnění tlouku.
4. Zaznamenání piezoelektrickým snímačem sílu, působící při průniku vzorkem.
5. Po uskutečnění zkoušky návrat tlouku do výchozí polohy, čímž stroj zajistil připravenost na další zkoušku a přenos získaných dat do počítače, kde je vyhodnotil testovací program testXpert II.
6. Zkoušky byly zakončeny exportem dat z programu testXpert II do programu MS Excel, pro další statistické a grafické zpracování výsledků.

Vzorky tkanin byly navíc ve stroji zajištěny pomocí kroužku, který zvyšoval odolnost tkaniny proti vytažení vlákna z její struktury.



Obrázek 31. Jistící kroužek pro tkaniny [vlastní tvorba]

9 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ PÁDOVÝCH ZKOUŠEK

Statistické vyhodnocení bylo provedeno na základě získaných dat pomocí programu MS Excel a použitím výpočtů stanovených normou ČSN EN ISO 2602, pro určení odhadu průměru neseskupených výsledků, pomocí aritmetického průměru a směrodatné odchylky získaného souboru hodnot.

Použitý vzorec pro výpočet aritmetického průměru \bar{X} , kde n je počet měření a x_i je hodnota i -tého měření [82] [83]:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

Výběrový medián rozděluje získaný soubor hodnot na dvě stejně velké poloviny. Je-li počet hodnot lichý, medián je roven střední hodnotě souboru a je-li sudý, je určen jako aritmetický průměr prostředních dvou hodnot souboru, viz. následující vztah [83]:

$$\tilde{X} = \begin{cases} X_{(n+\frac{1}{2})} & \text{liché } n \\ \frac{X_{(\frac{n}{2})} + X_{(\frac{n}{2}+1)}}{2} & \text{sudé } n \end{cases} \quad (3)$$

Výběrová směrodatná odchylka s je odmocnina výběrového rozptylu, který je definován v knize Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi od pí. Jany Kubanové jako: *Součet čtverců odchylek všech hodnot náhodného výběru od aritmetického průměru* [83], naměřených hodnot kolem aritmetického průměru \bar{X} . Tedy platí vztah [82] [83]:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

\bar{X} je aritmetický průměr vypočtený ze vzorce (2)

n je celkový počet měření

x_i je hodnota i -tého měření

9.1 Vyhodnocení dat textilních tkanin

Maximální síla F_{\max}

Tabulka 1. Statistické vyhodnocení síly F_{\max} pro textilní tkaniny [vlastní tvorba]

Maximální síla F_{\max} [N]	\bar{X}	\tilde{X}	s	min	max
Skelná tkanina RT490	576,0	557,4	66,0	514,1	671,0
Skelná tkanina AEROGLASS	388,8	360,2	74,1	306,4	487,6
Skelná tkanina Biaxiální 450 g/m ²	456,7	473,6	97,3	344,4	553,7
Skelná tkanina Biaxiální 600 g/m ²	576,1	523,8	127,4	493,4	798,8
Aramidové plátno styl 281 173 g/m ²	477,3	468,3	34,3	448,4	515,1
Aramidový kepr styl 282 173 g/m ²	162,4	161,3	35,4	127,5	198,4
Aramid-diolen 170 g/m ²	247,8	262,0	51,6	190,5	290,8
Uhlíková tkanina KC Industry 245 g/m ²	419,7	412,8	38,7	384,9	461,4

Z tabulky je patrné, že největší průměrné maximální síly F_{\max} dosáhla Biaxiální skelná tkanina o hustotě 600 $\frac{g}{m^2}$. Tkanina dosáhla průměrné maximální síly $F_{\max} = (576,1 \pm 127,4)$ N.

Nejnižší hodnoty naopak dosáhla Aramidová tkanina kepr 282 o váze 173 $\frac{g}{m^2}$ s hodnotou $F_{\max} = (162,4 \pm 35,4)$ N.

Rázová energie průrazu E_p Tabulka 2. Statistické vyhodnocení energie E_p pro textilní tkaniny [vlastní tvorba]

Rázová energie průrazu E_p [J]	\bar{X}	\tilde{X}	s	min	max
Skelná tkanina RT490	4,7	4,0	1,2	3,6	6,1
Skelná tkanina AEROGLOSS	3,6	3,5	1,0	2,6	5,2
Skelná tkanina Biaxiální 450g/m ²	13,5	15,2	4,6	6,6	18,6
Skelná tkanina Biaxiální 600g/m ²	12,6	12,7	2,3	9,0	15,0
Aramidové plátno styl 281 173 g/m ²	4,5	4,6	0,6	3,9	5,1
Aramidový kepr styl 282 173 g/m ²	2,2	1,6	1,5	1,2	3,9
Aramid-diolen 170 g/m ²	2,0	2,3	0,4	1,5	2,3
Uhlíková tkanina KC Industry 245 g/m ²	4,9	4,7	0,5	4,6	5,5

Nejvyšší naměřené hodnoty průměrné energie dosáhla Biaxiální skelná tkanina o hustotě $450 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$. Tkanina dosáhla průměrné rázové energie $E_p = (13,5 \pm 4,6)$ J.

Nejnižší hodnoty naopak dosáhla Aramid-diolenová tkanina plátno o váze $170 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ s hodnotou $E_p = (2,0 \pm 0,4)$ J.

9.2 Vyhodnocení dat deskových vzorků

Maximální síla F_{\max}

Tabulka 3. Statistické vyhodnocení síly F_{\max} pro desky [vlastní tvorba]

Maximální síla F_{\max} [N]	\bar{X}	\tilde{X}	s	min	max
Uhlíková deska tl. 1 mm	3998,6	4014,1	153,2	3838,3	4143,5
Uhlíková deska tl. 2 mm	9755,3	10025,5	637,1	9027,6	10212,7
Uhlíková deska tl. 3 mm	20167,1	20166,2	2,2	20165,5	20169,6
UHMHDPE tl. 3 mm	5239,7	5156,9	205,2	5088,9	5473,4
PC tl. 3 mm	10496,3	10653,4	429,9	9822,8	10885,7
LDPE tl. 3 mm	2339,8	2307,8	68,7	2276,7	2450,6

Z tabulky je patrné, že největší průměrné maximální síly F_{\max} dosáhla deska z uhlíkového vlákna o tloušťce 3 mm. Deska dosáhla průměrné maximální síly $F_{\max} = (20167,1 \pm 2,2)$ N.

Nejnižší hodnoty naopak dosáhla LDPE deska tl. 3 mm s hodnotou $F_{\max} = (2339,8 \pm 68,7)$ N.

Rázová energie průrazu E_p

Tabulka 4. Statistické vyhodnocení energie E_p pro desky [vlastní tvorba]

Rázová energie průrazu E_p [J]	\bar{X}	\tilde{X}	s	min	max
Uhlíková deska tl. 1 mm	27,5	26,2	4,4	23,9	32,4
Uhlíková deska tl. 2 mm	26,7	28,9	4,6	21,8	29,4
Uhlíková deska tl. 3 mm	124,8	98,7	128,7	97,8	177,9
UHMHDPE tl. 3 mm	54,2	53,3	69,6	48,6	60,8
PC tl. 3 mm	124,9	127,0	58,7	96,7	145,5
LDPE tl. 3 mm	27,0	26,8	87,1	26,4	28,0

Nejvyšší naměřené hodnoty průměrné energie dosáhla polykarbonátová deska tloušťky 3 mm. Deska dosáhla průměrné rázové energie $E_p = (124,9 \pm 58,7)$ J.

Nejnižší hodnoty naopak dosáhla uhlíková deska o tl. 2 mm s hodnotou $E_p = (26,7 \pm 4,6)$ J.

9.3 Vyhodnocení dat vzorků sendvičových struktur

Tabulka 5. Ukázka vlivu různých tkanin na pevnost dvou desek z LDPE

	F_{\max} [N]	E_p [J]	Změna F_{\max} [%]	Změna E_p [%]
LDPE	4416,9	63,8	0,0	0,0
LDPE + RT490	6248,6	80,1	41,5	25,5
LDPE + AEROGLOSS	4934,9	56,1	11,7	-12,0
LDPE + Skelná Biaxiální 450 g/m ²	5897,6	76,5	33,5	20,0
LDPE + Skelná Biaxiální 600 g/m ²	6015,6	79,5	36,2	24,6
LDPE + Aramid plátno 281	5946,6	78,1	34,6	22,4
LDPE + Aramid kepr 282	5799,9	74,4	31,3	16,6
LDPE + Aramid-Diolen	5463,9	71,4	23,7	11,9
LDPE + Uhlíková KC industry	4960,0	58,6	12,3	-8,2

Z tabulky vyplývá, že nejlepší vliv na pevnost dvou LDPE desek má skelná tkanina RT490. Bylo u ní zaznamenáno zlepšení F_{\max} z původních 4416,9 N na 6248,6 N, což odpovídá zlepšení o 41,5 %. U tohoto vzorku byl zaznamenán i nejvyšší nárůst energie potřebné k průrazu E_p z původních 63,8 J na 80,1 J, to je zvýšení E_p o 25,5 %.

V případě dvanáctivrstevných sendvičových vzorků nedošlo k průrazu. Naměřené hodnoty jsou zachyceny v následující tabulce, která obsahuje i srovnání naměřených hodnot kontrolního sendvičového vzorku, tedy sendviče složeného ze dvou 3 mm tlustých desek z LDPE.

Tabulka 6. Testování dvanáctivrstvých sendvičových vzorků [vlastní tvorba]

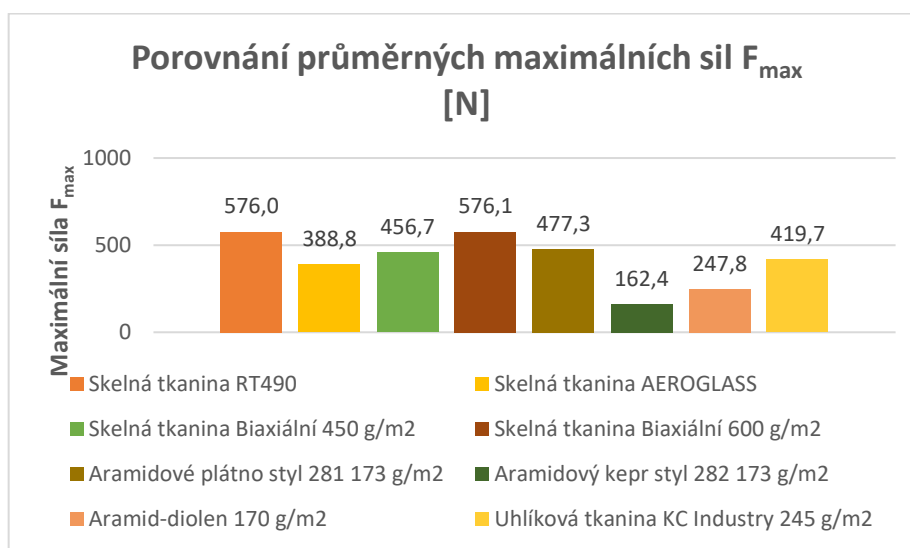
	F_{\max} [N]	E_p [J]	Změna F_{\max} [%]	Změna E_p [%]
LDPE	4416,9	63,8	0,0	0,0
Sendvičový vzorek 1	20167,8	232,5	356,6	264,4
Sendvičový vzorek 2	12333,3	234,5	179,2	267,5
Sendvičový vzorek 3	15575,1	232,6	252,6	264,6

10 DISKUZE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

Tato kapitola především porovnává výsledky měření jednotlivých připravených vzorků testovaných pádovými zkouškami na průraz a komentuje průběh těchto zkoušek.

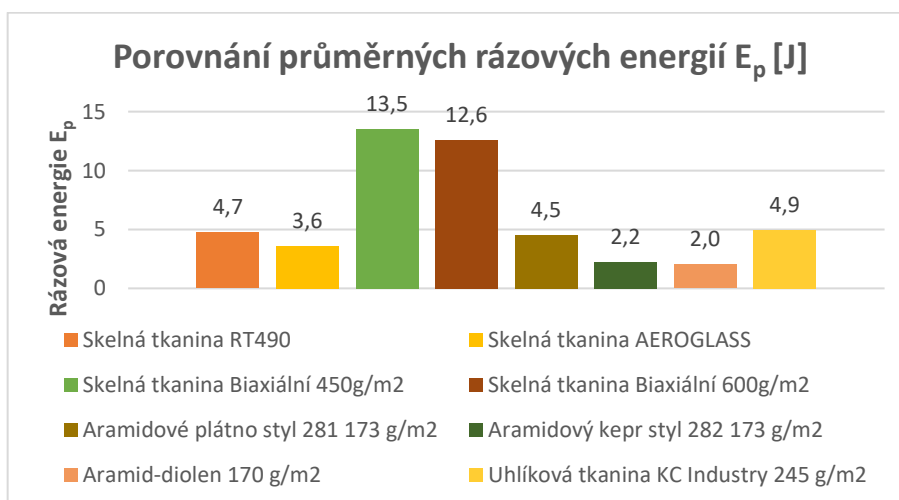
10.1 Porovnání výsledků měření jednotlivých tkanin

Následující graf porovnává sílu F_{\max} jednotlivých vzorků tkanin na základě přesného číselného vyhodnocení ze statistické části práce.



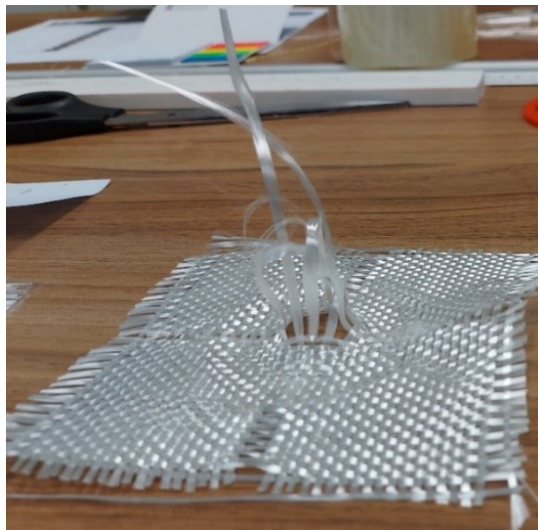
Obrázek 32. Graf porovnání F_{\max} jednotlivých tkanin [vlastní tvorba]

Graf porovnání průměrných rázových energií při průrazu na základě přesného číselného vyhodnocení ze statistické části práce.



Obrázek 33. Graf porovnání E_p jednotlivých tkanin [vlastní tvorba]

Z grafu vyplývá, že největší průměrná síla F_{\max} potřebná k proražení vzorku byla naměřena u vzorku biaxiální skelné tkaniny o váze 600 g/m^2 a největší rázová energie, potřebná k průrazu vzorku byla naměřena u skelné biaxiální tkaniny o váze 450 g/m^2 . Tyto výsledky potvrzují, že z vybraných materiálů mají právě biaxiální tkaniny nejvyšší odolnost proti průrazu. Je potřeba si uvědomit, že naměřené hodnoty jsou velice ovlivněny strukturou tkaniny. U žádného z testovaných vzorků nebylo při měření dosaženo jejich plného potenciálu odolnosti proti průrazu, protože vzorky při testu podléhaly strukturálnímu selhání, ve formě vytažení vláken, které se nepodařilo odstranit, místo jejich očekávaného přetržení viz. následující obrázky vzorků po zkouškách. Nicméně ztráta ochranné funkce je zřejmá a zásadní.



Obrázek 34. RT490 po zkoušce
[vlastní tvorba]



Obrázek 35. AEROGLOSS po zkoušce
[vlastní tvorba]



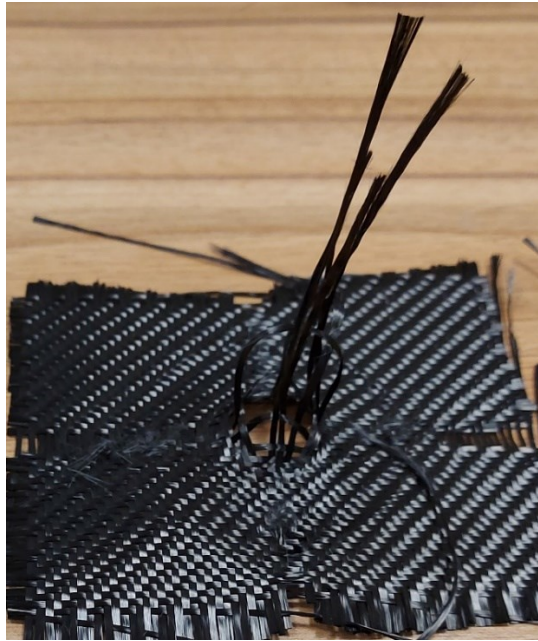
Obrázek 36. Biaxiální tkanina po zkoušce [vlastní tvorba]



Obrázek 37. Aramidová tkanina po zkoušce [vlastní tvorba]



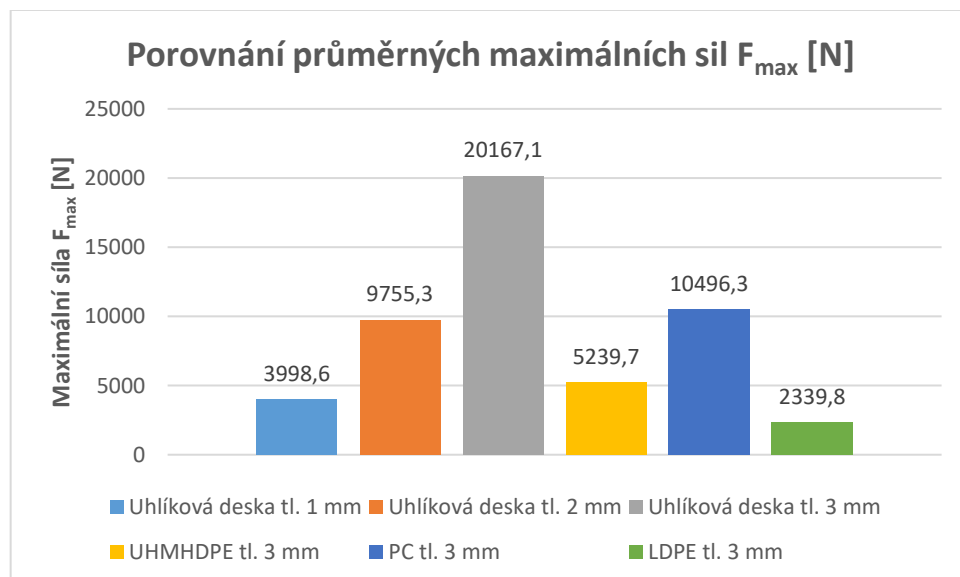
Obrázek 38. Aramid-diolenová tkanina po zkoušce [vlastní tvorba]



Obrázek 39. Uhlíková tkanina po zkoušce [vlastní tvorba]

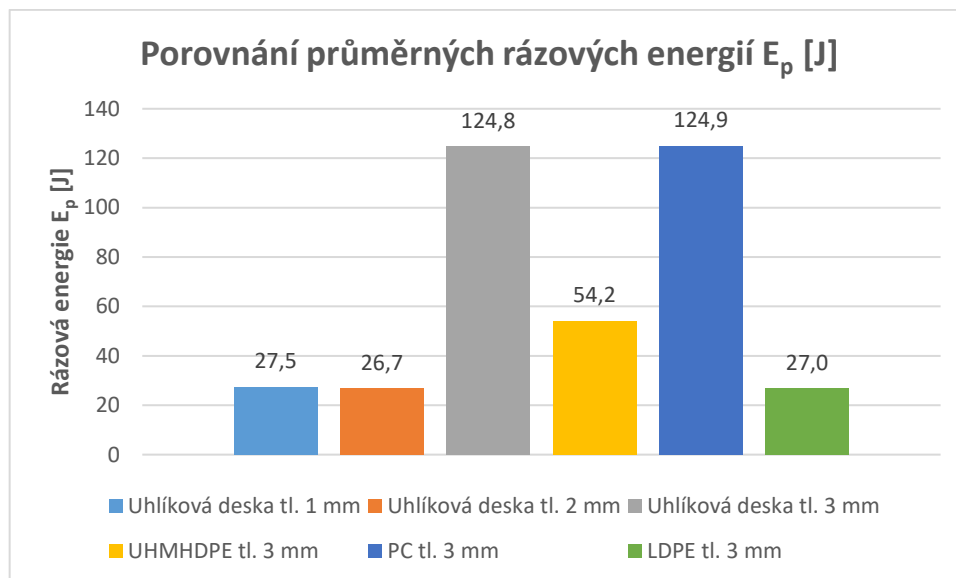
10.2 Porovnání výsledků měření jednotlivých desek

Na následujícím grafu je zobrazeno porovnání průměrných sil F_{max} deskových vzorků, na základě statistického vyhodnocení z předešlé kapitoly.



Obrázek 40. Graf porovnání průměrné síly F_{max} desek [vlastní tvorba]

Graf porovnání průměrných rázových energií E_p při průrazu na základě přesného číselného vyhodnocení ze statistické části práce.



Obrázek 41. Graf porovnání E_p jednotlivých desek [vlastní tvorba]

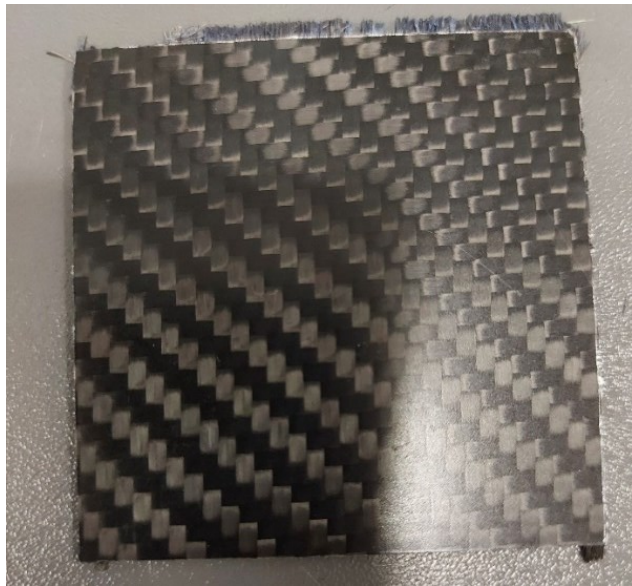
Z výsledků zkoušek obecně vyplývá, že s narůstající tloušťkou desek se zvyšuje i jejich odolnost proti průrazu. Měření potvrdilo výrazně vyšší odolnost proti průrazu u uhlíkových desek o tloušťce 3 mm oproti uhlíkovým deskám tenčím.

Při srovnání různých materiálů měření prokázala, že 3 mm tlustá uhlíková deska a deska z PC o stejné tloušťce jsou výrazně odolnější proti průrazu než desky z PE. Ze srovnání LDPE a UHMHDPE desek vyplývá, že rozhodujícím faktorem je hustota materiálu. S jejím zvyšováním roste i odolnost proti průrazu, avšak materiál ztrácí svou pružnost.

PC desky a uhlíkové desky se stejnou tloušťkou dosáhly podobných výsledků měření rázové energie potřebné k jejich proražení. Vzhledem k tomu, že jejich výsledky výrazně převyšují výsledky ostatních materiálů potvrzuje jejich vysokou odolnost proti průrazu. Díky tomu, že PC desky se netříští, jsou průhledné a levnější než desky uhlíkové, je potvrzeno jejich využití ve formě např. ochranných štítů, hledí helem a ochranných brýlí.

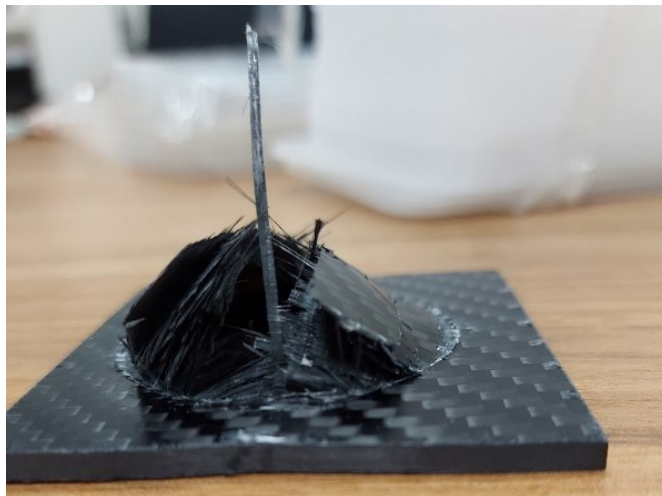
Níže jsou ukázány obrázky jednotlivých testovaných desek:

Uhlíková deska tloušťky 3 mm před zkouškou:



Obrázek 42. Uhlíková deska [vlastní tvorba]

Uhlíková deska tloušťky 3 mm po zkoušce:



Obrázek 43. Uhlíková deska tl. 3 mm po zkoušce
[vlastní tvorba]

PC deska tloušťky 3 mm před zkouškou:



Obrázek 44. PC deska před zkouškou [vlastní tvorba]

PC deska tloušťky 3 mm po zkoušce:



Obrázek 45. PC deska po zkoušce [vlastní tvorba]

LDPE deska tloušťky 3 mm před zkouškou:



Obrázek 46. LDPE deska před zkouškou [vlastní tvorba]

LDPE deska tloušťky 3 mm po zkoušce:

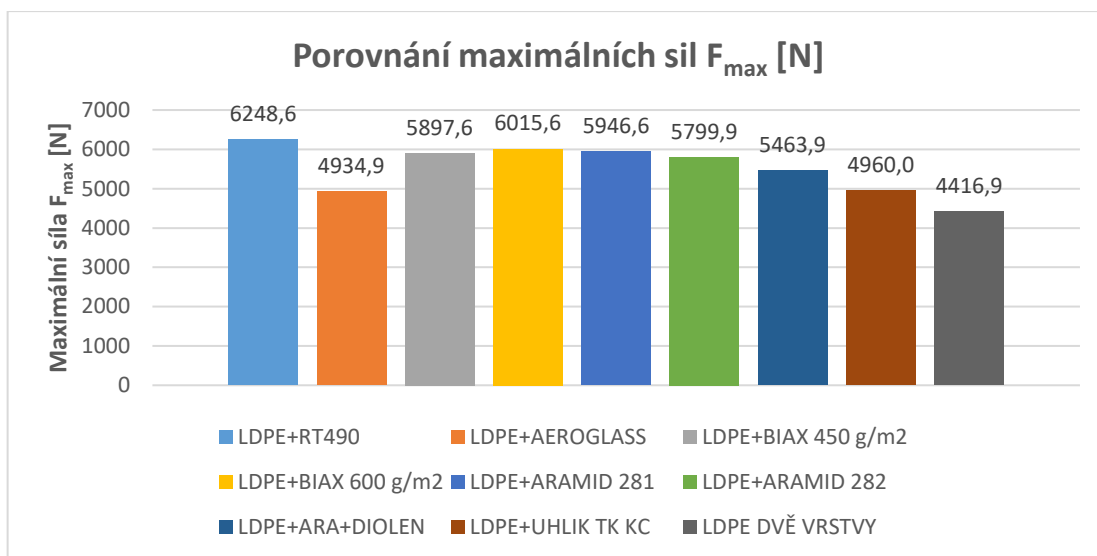


Obrázek 47. LDPE deska po zkoušce [vlastní tvorba]

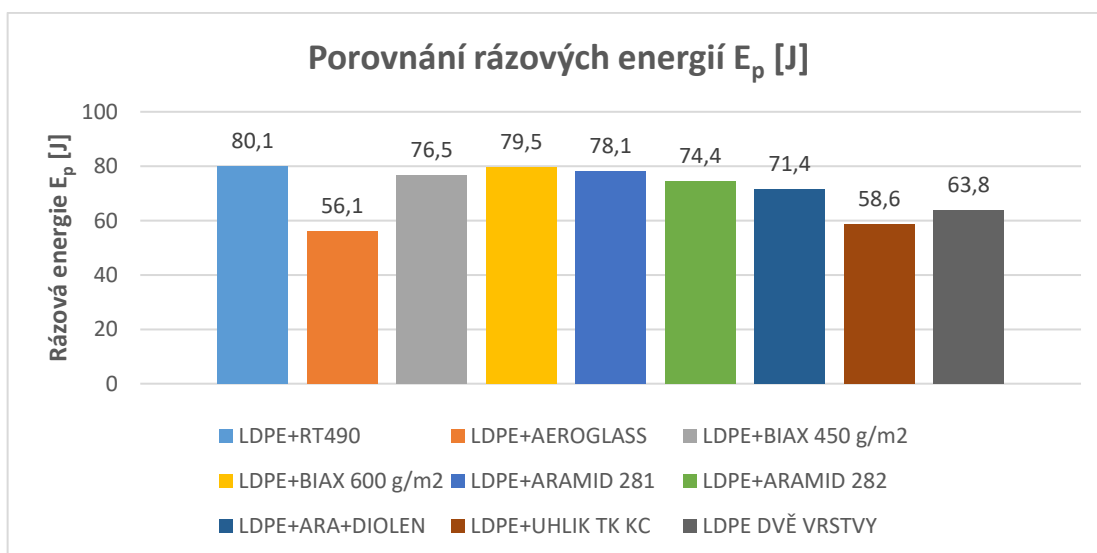
10.3 Porovnání výsledků měření sendvičových struktur

Pro sendvičovou strukturu byla zvolena na základě předchozích měření nejméně odolná deska, tedy deska z LDPE, pro svou nízkou cenu.

Porovnání na následujících dvou grafech ukazuje vliv různých druhů tkanin vložených mezi dvě LDPE desky na průměrnou maximální sílu F_{max} a průměrnou rázovou energii E_p .



Obrázek 48. Graf porovnání síly F_{max} sendvičových struktur [vlastní tvorba]



Obrázek 49. Graf porovnání energie E_p jednotlivých sendvičových struktur [vlastní tvorba]

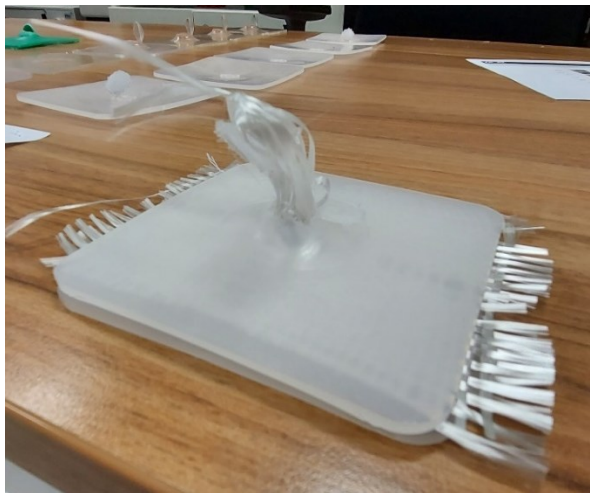
Z grafů vyplývá, že všechny tkaniny vložené mezi dvě vrstvy LDPE ovlivnily odolnost samotných desek. Vložení tkaniny mezi dvě desky zajistilo lepší fixaci tkaniny, díky čemuž byla schopná lépe projevit svou potenciální odolnost proti průrazu.

Nejlepší výsledek byl naměřen u skelné tkaniny RT490, u které došlo ke zlepšení síly F_{\max} o 41,47 %, tedy naměřená maximální síla byla o 1831,68 N větší. Tkanina RT490 dosáhla také největšího nárůstu rázové energie E_p o 25,49 %, tedy o 16,26 J.

Poklesy potřebné rázové energie na průraz, oproti srovnávacímu vzoru, vykazaly skelná tkanina AEROGLOSS a uhlíková tkanina. Obě tyto tkaniny byly proraženy, aniž by se porušila jejich struktura vytažením vlákna, jako tomu bylo u jejich samostatných zkoušek, ale jejich vlákno bylo přetrženo.

Ostatní tkaniny měly výsledek zkoušky pozitivní z pohledu síly i energie. U těchto vzorků vlákna tkaniny nebyla přerušena, ale došlo k jejich vytažení, jak je vidět na následujících obrázcích.

Sendvič se skelnou tkaninou RT490:



Obrázek 50. RT490 [vlastní tvorba]



Obrázek 51. RT490 otevřený [vlastní tvorba]

Sendvič se skelnou tkaninou AEROGLOSS:



Obrázek 52. Sendvič s AEROGLOSS [vlastní tvorba]

Sendvič s biaxiální skelnou tkaninou:



Obrázek 53. Sendvič s biaxiální tkaninou [vlastní tvorba]

Sendvič s aramidovou tkaninou:



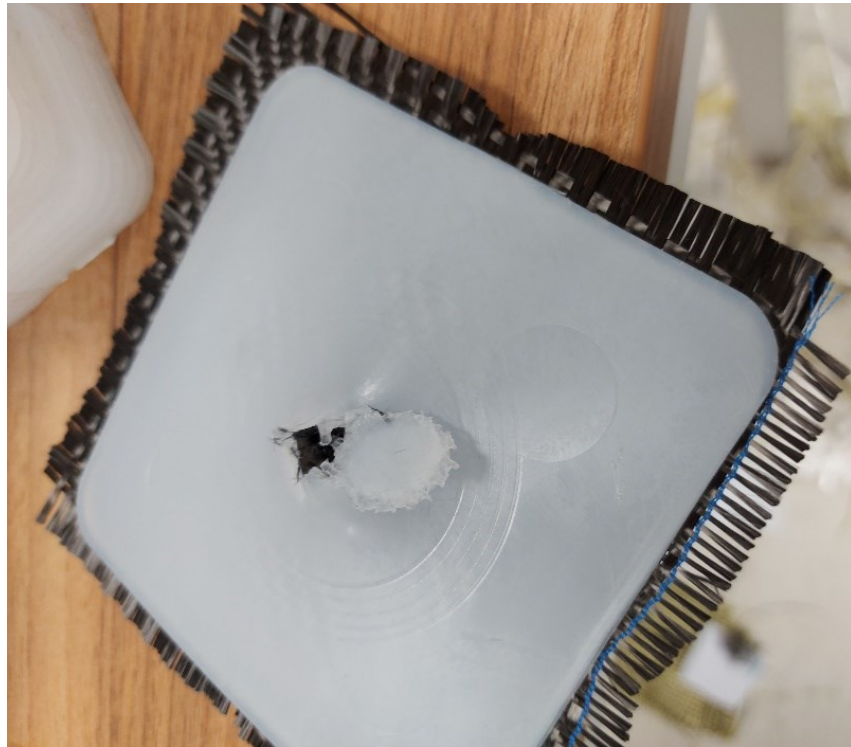
Obrázek 54. Sendvič s aramidovou tkaninou [vlastní tvorba]

Sendvič s aramid-diolenovou tkaninou:



Obrázek 55. Sendvič s aramid-diolenovou tkaninou [vlastní tvorba]

Sendvič s uhlíkovou tkaninou:



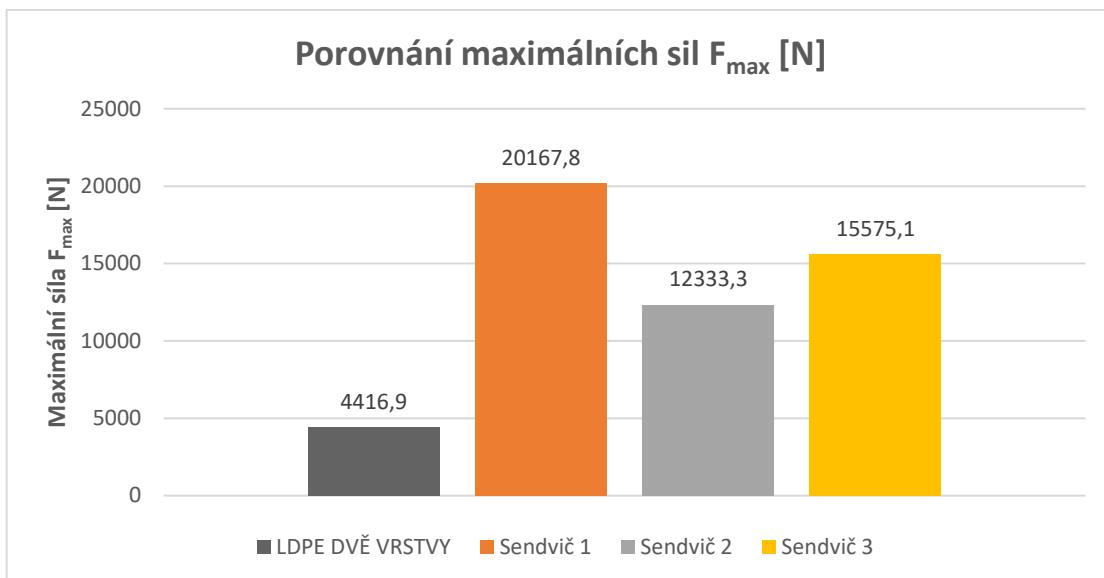
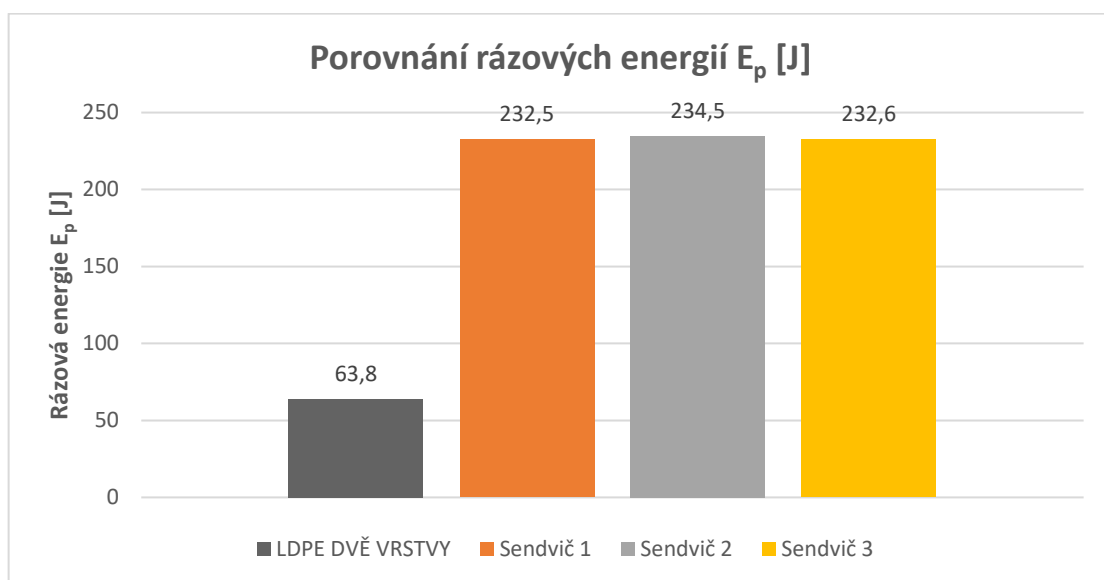
Obrázek 56. Sendvič s uhlíkovou tkaninou [vlastní tvorba]

Proražené sendvičové vzorky:



Obrázek 57. Proražené sendvičové vzorky [vlastní tvorba]

Následující grafy zobrazují maximální sílu F_{\max} a rázovou energii E_p dvanáctivrstevných sendvičových vzorků, ve srovnání s dvouvrstevným sendvičem složeným ze dvou desek LDPE.

Obrázek 58. Graf porovnání sil F_{max} dvanáctivrstvých sendvičů [vlastní tvorba]Obrázek 59. Graf porovnání rázových energií E_p dvanáctivrstvých sendvičů [vlastní tvorba]

Padstroj Zwick Roell HIT230F je schopen vyvinout maximální rázovou energii E_p 230 J. Z grafu porovnání rázových energií je patrné, že u dvanáctivrstvých sendvičových vzorků nebylo dosaženo průrazu. Na sendvičovém vzorku 1 (kombinace LDPE a PC desky) byla naměřena nejvyšší maximální síla 20167,8 N, dokazující, že tento vzorek byl nejtvrďší. Na sendvičovém vzorku 2 (tvořeném dvěma LDPE deskami) byla naměřena nejnižší maximální síla 12333,3 N což dokazuje, že tento vzorek byl nejlépe schopen pohltnout náraz.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo otestování odolnosti vybraných materiálů proti průrazu.

Teoretická část shrnuje vstupní informace o materiálech, jejich vlastnostech a využití, metodách zkoušek, které tvořily podklad praktické části bakalářské práce. V této části bylo všeobecně popsáno základní rozdělení materiálů na kovové a nekovové materiály a jejich využití v praxi. Práce se dále zaměřila na polymerní materiály, které jsou rozděleny na termoplasty a reaktoplasty, a následně na vlákna, tkaniny a kompozitní materiály. V rámci této části jsou uvedeny i základní mechanické zkoušky, statické a dynamické. Teoretická část je zakončena příklady praktického využití odolných polymerních materiálů, zejména polykarbonátu a tkanin, zaměřených na oblast bezpečnosti a výroby obranných a ochranných prvků.

Praktická část se skládá z přípravy vzorků, kdy byly z vybraných skelných, aramidových, aramid-diolenových a uhlíkových tkanin připraveny testovací vzorky. Už při přípravě vzorků bylo zjištěno, že vzorky s aramidovým vláknem jsou mimořádně odolné na přerážení, byl problém je nastříhat. Následně byly vzorky tkanin otestovány padostrojem Zwick HIT230F.

Již v průběhu měření bylo zjištěno, že samotný potenciál odolnosti jednotlivých tkanin se nepodaří změřit, neboť tlouk padostroje rozhrne vlákna tkaniny, místo očekávaného přetržení. Zkoušky tkanin tedy více ukázaly odolnost struktury tkaniny vůči průniku než samotnou odolnost vůči průrazu.

Dále byly otestovány vzorky desek z uhlíkového laminátu, PC, LDPE, UHMHDPE, kde nejvyšší odolnost prokázala PC deska s tloušťkou 3 mm a jako druhá nejodolnější se projevila deska z uhlíkového laminátu o tloušťce 3 mm.

Na závěr byly vyrobeny a otestovány vzorky sendvičových struktur, složených ze dvou LDPE desek a jedné vrstvy tkaniny a tři vícevrstvé struktury složené ze dvanácti vrstev. Vzorky sendvičových struktur při zkouškách ukázaly, že většina tkanin zvyšuje odolnost samotných desek proti průrazu. Aramidové plátno, skelné biaxiální tkaniny a skelná tkanina RT490 vykázaly nárůst rázové energie o více než 20 %. Dvanáctivrstvé sendvičové struktury se použitým strojem, který je schopen vyvinout maximální rázovou energii E_p 230 J, nepodařilo prorazit. Měření prokázalo, že nejlépe absorbovala náraz dvanáctivrstvá struktura složená ze dvou LDPE desek. Tento vzorek nebyl proražen při využití maximální rázové energie stroje a prokázal, že je nejlépe schopen pohltnout náraz.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LUPTÁK, Ladislav a Lubomír ŠMARDA. *Učební text pro obor Instalatér I. ročník* [online]. Brno: Střední škola polytechnická, Brno, Jílová 36g, 2016 [cit. 2022-01-03]. ISBN 978-80-88058-26-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/170/02.html>
- [2] ŠTŮR, PH.D., Ing. Milan. *Nauka o materiálu II* [online]. České Budějovice: Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, 2013 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://adoc.pub/nauka-o-materialu-ii.html>
- [3] MAZAL, Pavel. Technické materiály. In: *Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací*. [online]. Česká Republika: DocPlayer.cz, 2005 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/24138924-Zakladni-rozdeleni-technickyh-materialu-tech-kovy-nekovy-kompozitni-technicke-kovy-slitiny-zeleza-nezelezne-kovy.html>
- [4] Výroba surového železa. *Strojařská Bible* [online]. Česká Republika: Strojařská Bible, ©2022 [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.strojarskabible.cz/vyroba-suroveho-zeleza>
- [5] Chemické složení materiálu. *Spojovací materiál* [online]. Liberec: Killich, ©2022 [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.killich.cz/stranky/technicke-info/ocelovy-spojovaci-material/chemicke-slozeni-materialu>
- [6] Litina: Materiály a normy. *Jaroslav Calta – Barevné kovy a litina* [online]. Kamenný Most: Jaroslav Calta, ©2022 [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.bronz-calta.cz/cs/produkty/materialy-a-normy/litina>
- [7] BARTOŠ, Bc. Libor. Strojírenská technologie. In: *Střední škola řemesel a Odborné učiliště Lipová - lázně* [online]. Lipová: Střední škola řemesel a odborné učiliště, Lipová - lázně, 2007 [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: <https://oulipova.cz/storage/user-70/module-349/strojirenska-technologie-2roc-15851556450phpmz29c0.pdf>
- [8] BOTHE, Otakar. *Strojírenská technologie I pro strojírenské učební obory*. Praha: Sobotáles, 2012. ISBN 978-80-85920-42-0.
- [9] Neželezné kovy. *UCB Technometal* [online]. Loděnice u Berouna: UCB Technometal, ©2022 [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.unibar.cz/nezelezne-kovy>
- [10] DUCHÁČEK, Vratislav. *POLYMERY: VÝROBA, VLASTNOSTI, ZPRACOVÁNÍ, POUŽITÍ*. Vyd. 2. Praha: VŠCHT Praha, 2006. ISBN 80-7080-617-6.

- [11] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [12] Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. *Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec: Katedra strojírenské technologie, ©2018 [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [13] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: Střední odborné učiliště Svitavy, 2016 [cit. 2022-01-15]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [14] Rozdělení a charakteristika plastů. *Multiplast* [online]. Smržovka: TITAN - MULTIPLAST, 2021 [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://www.multiplast.cz/poradna/rozdeleni-a-charakteristika-plastu-26>
- [15] MISRA, Ashok a Anup K. Ghosh. *Engineering polymers as functional materials. Popular Plastics* [online]. 2008, roč. 53, č. 1, s. 13-21 [cit. 2022-01-15].
- [16] Polycarbonate. *City Plastics* [online]. Brompton SA: City Plastics, ©2022 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20181016161442/http://www.cityplastics.com.au/materials-polycarbonate>
- [17] Polyetylen. *Technické plasty Brno* [online]. Brno: TRIBON, ©2021 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: <https://www.technicke-plasty-tribon.cz/prodej-plastu/materialy-polotovaru/bezne-plasty/polyetylen>
- [18] Polypropylen. *Chemické produkty a průmyslové přípravky* [online]. Polsko: PCC Capital Group, 2021 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: <https://www.products.pcc.eu/cs/blog/polypropylen-vlastnosti-pouziti-a-vse-co-o-nem-potrebuje-vedet>
- [19] Polypropylen. *Technické plasty Brno* [online]. Brno: TRIBON, ©2021 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: <https://www.technicke-plasty-tribon.cz/prodej-plastu/materialy-polotovaru/bezne-plasty/polypropylen>
- [20] Polyamid. *VINK-Plasty s.r.o.* [online]. Česká Republika: VINK-Plasty, ©2022 [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: <https://www.vink.cz/polyamid>
- [21] Plexisklo výroba charakteristika vlastnosti cena. *Veneti.cz* [online]. Brno: Veneti™, ©2022 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.veneti.cz/polyvinylchlorid-pvc>

- [22] LEDERER, Jaromír. Polyvinylchlorid. *UJEP* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, ©2022 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/PVC07022013.pdf>
- [23] Jaké vlastnosti má polyvinylchlorid, čili PVC?. *Veneti.cz* [online]. Brno: Veneti™, ©2022 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.veneti.cz/plexisklo>
- [24] RYPÁR, V. Historické konstrukční materiály. *Masarykova univerzita* [online]. Brno: Masarykova univerzita., ©2022 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/podzim2016/C3804/Historicke_konstrukcni_materialy_GALATIT_ATD..pdf
- [25] LEDERER, Jaromír. Aminoplasty. *UJEP* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, ©2022 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/AMINOPLASTY.pdf>
- [26] Močovinoformaldehydové Pryskyřice. *CZ.DELACHIEVE.COM* [online]. EU: cs.delachieve.com, ©2018 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: <https://cs.delachieve.com/mocovinoformaldehydove-pryskyrice-vyroba-vlastnosti-a-pouziti>
- [27] Rozdíl mezi polyesterovou pryskyřicí a epoxidovou pryskyřicí. *Strephonsays* [online]. Německo: Strephonsays, ©2022 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: <https://cs.strephonsays.com/polyester-resin-and-vs-epoxy-resin-5300#menu-2>
- [28] Epoxydová-pryskyřice. *Resin Studio*, ©2022 [online]. Česká republika: Resin Studio [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: <https://www.resinstudio.cz/epoxidova-pryskyrice>
- [29] Chemická vlákna. *Technická univerzita v Liberci* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, ©2022 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: <https://turbo.cdv.tul.cz/mod/book/view.php?id=2363&chapterid=3448>
- [30] Polyetylenová vlákna. *E-LTex* [online]. Brno: e-LTex, ©2022 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/468/textilni-terminologie-zboziznalstvi/vlakna-prize-a-nite/Polyetylenova-vlakna.html>
- [31] Fibers. *InnegraTechnologies* [online]. USA: InnegraTech, ©2022 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://www.innegratesch.com/fibers>
- [32] Nejsilnější vlákno. *Sciencealpha* [online]. EU: Sciencealpha, ©2022 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://sciencealpha.com/cs/the-strongest-fiber-ultra-strong-fiber-from-vsm-po-stronger-than-steel-6-letters-crossword-puzzle-synthetic>

- [33] UHMWPE vlákno pro neprůstřelné oděvy Výrobci. *UHMWPE vlákno* [online]. Čína: Zhejiang Qianxilong Special Fiber Co, ©2022 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <http://cz.uhmwpeyarn.com/uhmwpe-fiber/bulletproof-uhmwpe-fiber/uhmwpe-fiber-for-bulletproof-clothes.html>
- [34] Materiály. *Veba* [online]. Broumov: VEBA, textilní závody a. s, ©2022 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.veba.cz/cs/materialy>
- [35] Meta and Para Aramid Physical Property Comparison, 2018. *A worldwide supplier of industrial yarn and thread* [online]. Laurinburg, NC: Service thread, ©2022 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.servicethread.com/blog/meta-and-para-aramid-yarn-comparison>
- [36] Composite Materials Handbook. Volume 3, Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis. *UC Davis* [online]. USA: U S Department of Defense, 2002 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.library.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2017/03/HDBK17-3F.pdf>
- [37] Nomex. *Army shop, outdoor shop a survival vybavení* [online]. Semily: Top-ArmyShop.cz, ©2022 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.top-armyshop.cz/slovník-pojmu/nomex>
- [38] Nomex® for PPE. *DuPont* [online]. USA: DuPont, ©2022 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.dupont.com/personal-protection/nomex-for-ppe.html>
- [39] Co je to kevlar a jak nás může ochránit?. *Army shop, outdoor shop a survival vybavení* [online]. Semily: Top-ArmyShop.cz, 2021 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.top-armyshop.cz/magazin-co-je-kevlar-jak-nas-ochrani>
- [40] Kevlar – materiál nejen pro pracovní oděvy. *PEVI, s.r.o.* [online]. Lanškroun: PEVI, 2016 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.pevi.cz/cz/zajimavosti-z-oboru/kevlar-material-nejen-pro-pracovni-odevy>
- [41] Rozdíly mezi Kevlarem a Twaronem. *Věda* [online]. EU: Sawakinome, ©2022 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://cs.sawakinome.com/articles/objects/differences-between-kevlar-and-twaron-3.html>
- [42] Twaron®. *Teijin Limited* [online]. Japonsko: TEIJIN LIMITED, ©2022 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.teijinaramid.com/en/products/twaron/>

- [43] Aramid yarn. *Hyosung Advanced Materials* [online]. Korea: HYOSUNG ADVANCED MATERIALS, ©2018 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: http://www.hyosungadvancedmaterials.com/en/business/yarn_aramid.do
- [44] HERACRON. *Kolon Industries, Inc.* [online]. Korea: Kolon Industries, ©2010 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://www.kolonindustries.com/Eng/Product/product02_06.asp
- [45] WHAT IS CARBON FIBER. *DragonPlate* [online]. USA: DragonPlate, ©2022 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://dragonplate.com/what-is-carbon-fiber>
- [46] UHLÍKOVÉ VLÁKNO. *Výroba a prodej uhlíkových a hybridních tkanin* [online]. Strážnice: Kordcarbon, ©2022 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno
- [47] Uhlíková vlákna. *Army shop, outdoor shop a survival vybavení* [online]. Semily: Top-ArmyShop.cz, ©2022 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.top-armyshop.cz/slovník-pojmu/uhlikova-vlakna>
- [48] Uhlíková vlákna: Karbonové kompozity. *Duratec* [online]. Touškov: Duratec, ©2011 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.duratec.cz/cs/techinfo/pouzivane-materialy/uhlikova-vlakna-karbonove-kompozity>
- [49] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [50] VRBKA, Jan. MECHANIKA KOMPOZITŮ. In: *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [51] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály: definice a rozdělení. *Technická univerzita v Liberci* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf
- [52] ROUŠ, Jiří. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY. *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, ©1991-2022 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/16_Chemie-a-ekologie_43-44/44_MMP/072_Kompozitni-materialy---Rous--P1.pdf
- [53] *Skelné lamináty* [online]. Česká republika: Poski.com, ©2014 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <http://skelnylaminat.cz>

- [54] CARBON PERFORMANCE. *Carbon fiber manufacturer* [online]. Itálie: CARBONVENETA TECNOLOGIA NEI COMPOSTI S.R.L., ©2015-2016 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://www.carbonveneta.com/en/carbon-performance>
- [55] WHAT IS CARBON FIBER?. *Innovative Composite Engineering* [online]. USA: Innovative Composite Engineering, ©2022 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://www.innovativecomposite.com/what-is-carbon-fiber>
- [56] Reinforced Carbon-Carbon (RCC) Panels. *NASA* [online]. USA: National Aeronautics and Space Administration, ©2022 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/sites/default/files/167435main_RCCpanels08.pdf
- [57] Uhlík, kevlar či kompozit. *MTBIKER* [online]. Slovenská Republika: MTBIKER.shop, 2019 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://www.mtbiker.sk/clanky/11127/uhlik-kevlar-ci-kompozit-alebo-karbon.html>
- [58] Výroba sendvičových kompozitů. In: *Masarykova univerzita* [online]. Brno: Masarykova univerzita, ©2022 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: https://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/kkp_soubory/image052.jpg
- [59] VNOUČEK, Milan. Kompozitní materiály. *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, ©2022 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
- [60] Voština podlahová Fermacell 1500×1000×30 mm. *Stavebniny DEK* [online]. Praha: DEK, ©2022 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.dek.cz/produkty/detail/3630453180-fermacell-podlahova-vostina-1500x1000x30mm>
- [61] SHAH, Vishu. *Handbook of Plastics Testing Technology*. Vyd. 2. New York: John Wiley, 1998. ISBN 0-471-18202-8.
- [62] DRIML, Bohuslav. Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení. *Univerzita Palackého v Olomouci* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, ©2022 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf
- [63] Zkoušení základních vlastností materiálů. *ISŠTE Sokolov* [online]. Sokolov: ISŠTE Sokolov, ©2022 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://digit.isste.cz/op-hs/assets/171191812135.%20%20Zkouseni%20zalkadnich%20vlastnosti%20materialu.pdf>

- [64] Mechanické vlastnosti materiálů. *Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací* [online]. Česká republika: DocPlayer.cz, ©2022 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/84625-Sttn1-mechanicke-vlastnosti-materialu-projekt-podpora-vyuky-v-cizich-jazycich-na-spst.html>
- [65] Statické zkoušky krátkodobé. *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ©2022 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [66] ČSN EN ISO 180. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Izod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [67] *Handbook of Polymer Testing*. United Kingdom: Rapra Technology, 2002. ISBN 1-85957-324.
- [68] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [69] IMPACT TEST. *Instron: Materials Testing Machines for Tensile, Fatigue, Impact, Rheology and Structural Testing* [online]. USA: Illinois Tool Works, ©2022 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.instron.com/-/media/literature-library/products/2021/03/impact-handbook.pdf?la=en>
- [70] ČSN EN ISO 8256. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti v tahu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [71] Zkoušky rázem. *SŠPU Opava* [online]. Opava: SŠPU Opava, 2012 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-26.pdf
- [72] Products. *ZwickRoell Testing Systems Co., Ltd* [online]. Čína: ZwickRoell Testing Systems, ©2017 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <http://www.zwick-ztt.com.cn/en/product.asp>
- [73] ČSN EN ISO 6603-1, 2000. *Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [74] ČSN EN ISO 6603-2, 2001. *Instrumentovaná Plasty – Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání – Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

- [75] LUKÁŠ, Luděk. *Bezpečnostní technologie, systémy a management*. Zlín: Radim Bačuvčík: VeRBuM, 2012. ISBN 978-808-7500-194.
- [76] Co to je protiúderový štít a jak funguje. *ESP – Obranné prostředky pro skutečné profesionály* [online]. Praha: ESP Products, ©1992 - 2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.euro-security.info/cs/co-to-je-protiuderovy-stit-a-jak-funguje.html>
- [77] Protiúderový štít ASU-60-100. *Zbraně Armyshop* [online]. Plzeň: Alfatactical, ©2011 - 2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.alfatactical.cz/detail/13477/protiuderovy-stit-asu-60-100.html>
- [78] *Argun Shop* [online]. Hradec Králové: ARGUN, 2021 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <http://www.argun.cz>
- [79] COP® FG10TS. *TOJA Professional* [online]. Plzeň: TOJA, ©2018 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.taktickavystroj.cz/produkty/rukavice/rukavice-proti-prurezu-vpichu/cop-fg10ts>
- [80] Product Information. *ZwickRoell Materials Testing* [online]. Brno: ZwickRoell Testing Systems, ©2022 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/14_682_Amsler_HIT230F_for_multiaxial_puncture_test_PI_EN.pdf
- [81] *HAVEL COMPOSITES ESHOP* [online]. Přáslavice: Havel Composites, ©2018-2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com>
- [82] KLADIVO, Petr. *Základy statistiky* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013 [cit. 2022-04-30]. ISBN 978-80-244-3842-9. Dostupné z: <https://geography.upol.cz/soubory/studium/e-ucebnice/978-80-244-3842-9.pdf>
- [83] KUBANOVÁ, Jana. *Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi*. Bratislava: STATIS, 2004. ISBN 80-85659-37-9.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EP	Epoxidová pryskyřice.
E_p	Rázová energie.
F_{\max}	Maximální síla.
g	Gravitační zrychlení.
g/m^2	Gram na metr čtvereční.
H	Výška.
HDPE	Polyetylen s vysokou hustotou.
J	Joule.
kg	Kilogram.
LDPE	Polyetylen s nízkou hustotou.
m	Hmotnost.
max	Maximální hodnota.
MF	Melaminoformaldehydová pryskyřice.
min	Minimální hodnota.
N	Newton.
n	Počet měření.
PA	Polyamid.
PC	Polykarbonát.
PE	Polyester.
PEEK	Polyetheretherketon.
PE-HD	Polyetylen s vysokou hustotou.
PE-LD	Polyetylen s nízkou hustotou.
PE-LLD	Polyetylen o nízké hustotě.
PE-MD	Polyetylen o střední hustotě.

PET	Polyetylenftalát.
PE-UHMW	Polyetylen s velmi vysokou molekulovou hmotností.
PF	Fenolformaldehydová pryskyřice.
PFA	Polyftalamid.
PFS	Polyfenylsulfid.
PMMA	Polymethylmethakrylát.
POM	Polyoxymetylen.
PP	Polypropylen.
PS	Polystyren.
PSU	Polysulfony.
PTFE	Polytetrafluoretylen.
PVC	Polyvinylchlorid.
PVC-P	Měkčený polyvinylchlorid.
PVC-U	Neměkčený polyvinylchlorid.
s	Směrodatná odchylka.
UF	Močovinoformaldehydová pryskyřice.
UHMHDPE	Ultravysokomolekulární polyetylén s vysokou hustotou.
UHMW PE	Polyetylen s velmi vysokou molekulovou hmotností.
UP	Polyesterová pryskyřice.
\bar{X}	Aritmetický průměr.
x_i	Hodnota i-tého měření.
\tilde{X}	Medián.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Rozdělení materiálů [2]	11
Obrázek 2. Základní rozdělení polymerů [10]	17
Obrázek 3. Rozdělení polymerů dle postavení na trhu [13]	19
Obrázek 4. Chemický vzorec PC [10]	20
Obrázek 5. Chemický vzorec PE [10]	21
Obrázek 6. Chemický vzorec PP [10]	21
Obrázek 7. Chemický vzorec PVC [13]	22
Obrázek 8. Tvary výztuže kompozitu [2]	28
Obrázek 9. Sendvičová struktura [58]	30
Obrázek 10. Voština Fermacell [60]	30
Obrázek 11. Mechanické namáhání [62]	31
Obrázek 12. Tříbodový (vlevo) a čtyřbodový systém ohybové zkoušky [65]	32
Obrázek 13. Rázové zkoušky [61]	33
Obrázek 14. Izod [13]	34
Obrázek 15. Charpy [13]	34
Obrázek 16. Tahová zkouška, první metoda [71]	35
Obrázek 17. Tahová zkouška, druhá metoda [67]	36
Obrázek 18. Padostroj Zwick HIT230F [72]	36
Obrázek 19. Štít ASU-60-100 [77]	39
Obrázek 20. Protiúderová přilba [78]	40
Obrázek 21. Chráníč holeně a paže [78]	40
Obrázek 22. Ochranný oblek [78]	41
Obrázek 23. Taktické rukavice [79]	42
Obrázek 24. HIT230F [vlastní tvorba]	45
Obrázek 25. RT 490 [vlastní tvorba]	46
Obrázek 26. Biaxiální tkanina [vlastní tvorba]	47
Obrázek 27. AEROGLOSS [vlastní tvorba]	47
Obrázek 28. Aramid [vlastní tvorba]	48
Obrázek 29. Aramid-diolen [vlastní tvorba]	48
Obrázek 30. Uhlíková tkanina [vlastní tvorba]	49
Obrázek 31. Jisticí kroužek pro tkaniny [vlastní tvorba]	51
Obrázek 32. Graf porovnání F_{max} jednotlivých tkanin [vlastní tvorba]	58

Obrázek 33. Graf porovnání E_p jednotlivých tkanin [vlastní tvorba]	58
Obrázek 34. RT490 po zkoušce [vlastní tvorba]	59
Obrázek 35. AEROGLASS po zkoušce [vlastní tvorba]	59
Obrázek 36. Biaxiální tkanina po zkoušce [vlastní tvorba]	60
Obrázek 37. Aramidová tkanina po zkoušce [vlastní tvorba]	60
Obrázek 38. Aramid-diolenová tkanina po zkoušce [vlastní tvorba]	60
Obrázek 39. Uhlíková tkanina po zkoušce [vlastní tvorba]	61
Obrázek 40. Graf porovnání průměrné síly F_{max} desek [vlastní tvorba]	61
Obrázek 41. Graf porovnání E_p jednotlivých desek [vlastní tvorba]	62
Obrázek 42. Uhlíková deska [vlastní tvorba]	63
Obrázek 43. Uhlíková deska tl. 3 mm po zkoušce [vlastní tvorba]	63
Obrázek 44. PC deska před zkouškou [vlastní tvorba]	64
Obrázek 45. PC deska po zkoušce [vlastní tvorba]	64
Obrázek 46. LDPE deska před zkouškou [vlastní tvorba]	65
Obrázek 47. LDPE deska po zkoušce [vlastní tvorba]	65
Obrázek 48. Graf porovnání síly F_{max} sendvičových struktur [vlastní tvorba]	66
Obrázek 49. Graf porovnání energie E_p jednotlivých sendvičových struktur [vlastní tvorba]	66
Obrázek 50. RT490 [vlastní tvorba]	67
Obrázek 51. RT490 otevřený [vlastní tvorba]	67
Obrázek 52. Sendvič s AEROGLASS [vlastní tvorba]	68
Obrázek 53. Sendvič s biaxiální tkaninou [vlastní tvorba]	68
Obrázek 54. Sendvič s aramidovou tkaninou [vlastní tvorba]	69
Obrázek 55. Sendvič s aramid-diolenovou tkaninou [vlastní tvorba]	69
Obrázek 56. Sendvič s uhlíkovou tkaninou [vlastní tvorba]	70
Obrázek 57. Proražené sendvičové vzorky [vlastní tvorba]	70
Obrázek 58. Graf porovnání sil F_{max} dvanáctivrstvých sendvičů [vlastní tvorba]	71
Obrázek 59. Graf porovnání rázových energií E_p dvanáctivrstvých sendvičů [vlastní tvorba]	71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Statistické vyhodnocení síly F_{\max} pro textilní tkaniny [vlastní tvorba]	53
Tabulka 2. Statistické vyhodnocení energie E_p pro textilní tkaniny [vlastní tvorba] .	54
Tabulka 3. Statistické vyhodnocení síly F_{\max} pro desky [vlastní tvorba]	55
Tabulka 4. Statistické vyhodnocení energie E_p pro desky [vlastní tvorba]	55
Tabulka 5. Ukázka vlivu různých tkanin na pevnost dvou desek z LDPE.....	56
Tabulka 6. Testování dvanáctivrstevných sendvičových vzorků [vlastní tvorba].....	57

SEZNAM PŘÍLOH

P I Obsah CD

PŘÍLOHA P I: OBSAH CD

Soubor fulltext.pdf – text diplomové práce ve formátu PDF/A