

Únavové poškození plastů a kompozitů

Jan Němeček

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jan Němeček

Osobní číslo: T11643

Studijní program: B3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Forma studia: prezenční

Téma práce: Únavové poškození plastů a kompozitů

Zásady pro vypracování:

- 1. Přehled polymerních a kompozitních materiálů aplikovaných při konstrukci technických zařízení**
- 2. Souhrn poznatků v oblasti únavového poškození polymerních a kompozitních materiálů**
- 3. Konstrukční návrh upínacího přípravku k realizaci zkoušek vysokocyklové únavy vybraných materiálů**
- 4. Zhodnocení literárních poznatků a závěr**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] GRELLMANN, Wolfgang a Sabine SEIDLER. Polymer testing. Cincinnati, Ohio: Hanser Gardner Publications, 2007, 674 s. ISBN 978-1-56990-410-7.

[2] KAUSCH, Hans-Henning. Polymer fracture. Berlin: Springer – Verlag, 1978, 332 s. ISBN 3-540-08786-9

[3] HAGEN, Vladislav. Únava a stárnutí materiálů. 2. vyd. Brno: VUT, 1981, 76 s.

[4] HRIVŇÁK, Ivan. Fraktografie. 1. vyd. Trnava: AlimniPress, 2009, 99 s. ISBN 978-80-096-089-6

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Ivan Letko, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

10. února 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/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 ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/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 diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/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.

Ve Zlíně 28. 4. 2014



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydávalečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užíje-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je teoretická studie cyklické únavy aplikovaná na termoplasty případně reaktoplasty, ale i na kompozitní materiály.

V úvodní části jsou popsány základní druhy polymerů užívané pro konstrukční účely v technické praxi. Dále pak kompozity obsahující, jak termoplastické, tak i reaktoplastické matrice s různými typy výztuží. Důležitou a nedílnou součástí práce je popis a teoretický rozbor cyklické únavy a průběhu jejího zkoušení. Obsahem této části jsou nastavující charakteristiky jako druh cyklu, frekvence kmitání či zatížení. V návaznosti na zkoušky únavy jsou rozebrány principy šíření trhliny a vznik lomu.

Praktická část je prezentací konstrukčního návrhu zkušebního stroje se zaměřením na konstrukci upínacích čelistí. Řešení vychází ze zadaných omezení a bylo podrobena FEM analýzám. Součástí je i odhad pořizovací ceny navrženého stroje.

Klíčová slova: polymer, kompozit, únavy, fraktografie, únavové poškození, zkušební stroj

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is theoretical study of cyclic fatigue applied to thermoplastics eventually thermosets, but also to composite materials.

In the introductory part the basic types of polymers used for design purposes in practice are described. Further, composites containing of thermoplastic or thermosetting matrix and with different types of reinforcement. An important part of this thesis is description and theoretical analysis of cyclic fatigue and fatigue testing. The contents of this part are setting characteristics as a kind of cycle, vibration frequency and loads. Following the fatigue tests principles of crack propagation and fracture are discussed.

The content of the practical part is the design of the testing machine, with a focus on the design of the clamping elements. The solution is based on the given constraints and subjected to FEM analysis. It also includes an estimate of the cost of the design.

Keywords: polymer, composite, fatigue, fractography, damage analysis, testing machine

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Ivanu Letkovi Csc. za praktické rady i připomínky, díky kterým je práce objektivnější. Dále pak za rozšíření informativního rozhledu v oblasti únavy materiálů.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 PŘEHLED KONSTRUKČNÍCH POLYMERŮ A KOMPOZITŮ.....	12
1.1 ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ PLASTY	12
1.1.1 Polypropylen – PP.....	13
1.1.2 Polyvinylchlorid – PVC	13
1.1.3 Polyamidy – PA	14
1.1.4 Styren-akrylonitril – SAN	14
1.1.5 Polyoxymethylen – POM.....	15
1.1.6 Polykarbonát – PC.....	15
1.1.7 Akrylonitril-butadien-styren – ABS.....	16
1.1.8 Polytetrafluorethylen – PTFE	16
1.1.9 Polybutylentereftalát – PBT	17
1.1.10 Polyethylentereftalát – PET	17
1.1.11 Polyetereterketon - PEEK	18
1.2 KOMPOZITY.....	18
1.2.1 Polymerní matrice	19
1.2.1.1 Termoplastické matrice.....	20
1.2.1.2 Reaktoplastické matrice	21
1.2.2 Kompozitní výztuže	23
2 ÚNAVA POLYMERŮ A KOMPOZITŮ	27
2.1 PRINCIP ÚNAVY	27
2.2 ZKOUŠKA CYKlickÉHO ZATĚŽOVÁNÍ.....	28
2.2.1 Druh cyklu a zatížení	28
2.2.2 Druhy vzorků a jejich příprava	29
2.2.3 Zkušební frekvence	30
2.2.4 Typ zkoušky	30
2.3 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY	32
2.4 MECHANIZMY PORUCH.....	34
2.4.1 Vliv teploty.....	35
2.4.2 Mechanika lomu plastů	36
2.4.3 Mechanika lomu kompozitů.....	40
3 FRAKTOGRAFIE PLASTŮ A KOMPOZITŮ	43
3.1 ŠÍŘENÍ TRHLINY.....	43
3.2 FRAKTOGRAFIE	44
3.2.1 Nástroje faktografické analýzy	44
3.2.2 Charakteristiky povrchu lomu	45
3.2.3 Fraktografie polymerů.....	47
3.2.4 Fraktografie kompozitů.....	49
4 VÝSLEDKY ZKOUŠEK EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI	51
4.1 VYSOKOCYKLOVÁ ÚNAVA KOMPOZITU S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	51
4.1.1 Výsledky a diskuze	51

4.2	CYKlickÁ ÚNAVA POLYMERNÍCH NANOKOMPOZITŮ	52
4.2.1	Výsledky a diskuze	53
II	PRAKTICKÁ ČÁST	56
5	ZADÁNÍ A FORMULACE OMEZUJÍCÍCH PODMÍNEK.....	57
6	KONSTRUKČNÍ NÁVRH ZKUŠEBNÍHO STROJE.....	58
6.1	VÝPOČET OMEZUJÍCÍCH PARAMETRŮ	58
6.1.1	Výpočet amplitudy	59
6.1.2	Výpočet krouticího momentu motoru	60
6.2	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	61
6.2.1	Rám	61
6.2.2	Motor.....	61
6.2.3	Excentrický mechanismus	62
6.2.4	Lineární vedení.....	63
6.2.5	Pohybová čelist	63
6.2.6	Statická čelist	64
6.2.7	Elektronické komponenty	65
6.3	FINANČNÍ ANALÝZA	65
6.4	FEM ANALÝZY.....	67
6.4.1	Statická čelist	67
6.4.2	Excentrický mechanismus	68
7	ZKUŠEBNÍ STROJ CYKlickÉ ÚNAVY – VYHODNOCENÍ	70
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	75
	VÝKLAD POJMŮ	76
	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
	SEZNAM TABULEK.....	80
	SEZNAM PŘÍLOH.....	81

ÚVOD

Impulz vývoji a rozvoji plastů dala 2. světová válka a nutnost zdokonalování různých aplikačních odvětví například konstrukčních. Přestože od té doby bylo provedeno nespočetné množství výzkumů, které bezpochyby posunuly toto odvětví kupředu, stále hledáme odpovědi na některé nezodpovězené otázky. V poslední době zažily velký boom kompozitní materiály díky svým výjimečným vlastnostem a především nízké hmotnosti. Letecký průmysl se tak stal ideálním uplatněním pro takové materiály Boeing 787 Dreamliner je toho přímým důkazem.

Nicméně takové materiály přináší s sebou nová úskalí v podobě inovativních postupů konstrukce, které jsou odlišné od zažitých stereotypů. Je třeba se věnovat nejen designu, ale také mechanickému chování a kontrole namáhaných částí, která je v případě poruch kompozitů v celku obtížná. Jedním z důvodů je například nehoda letu Southwest 812 1. dubna 2011. Už po 18 minutách došlo k poklesu tlaku v kabině vlivem poruchy pláště trupu. Tato trhлина vznikla důsledkem cyklické únavy materiálu a letadlo bylo nuceno přistát. Podobné případy jsou exaktním důvodem, proč se zabývat právě cyklickou únavou materiálů.

V přírodě je kmitání přirozeným faktorem. Na nás je, abychom zjistili, jak tělesa kmitají, jaký to bude mít vliv na jejich životnost a jak nejsnáze popsat tyto děje. Tato práce přináší stručné shrnutí vlastností polymerních materiálů a právě jejich chování při cyklickém zatěžování. Výstupem první části je teoretický podklad pro zkoušky cyklické únavy aplikované na polymery a kompozity.

Praktická část se zabývá konstrukcí zkušebního stroje cyklické únavy. Lze v ní nalézt popis jednotlivých součástí, důvody, proč byly zvoleny, a také mechanické analýzy skupin prvků podléhajícím nejintenzivnějšímu namáhání.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PŘEHLED KONSTRUKČNÍCH POLYMERŮ A KOMPOZITŮ

Vesmírný výzkum a 2. světová válka započala intenzivní vývoj v oblasti materiálů. Vývoj byl směřován přibližně třemi směry, a to: směrem lehkých, pevných materiálů a dalšími dvěma směry materiálů speciálních pro vysoké teploty a elektronických materiálů. Plasty se nejprve skládaly převážně z přírodních zdrojů (celulóza, pryskyřice), dnes se převážná většina z nich vyrábí synteticky z uhlovodíků a spadá do prvních dvou směrů. Přestože jsou přírodní polymery důležité a použitelné v mnoha aplikacích, bývají často zastihovány syntetickými polymery jako např. PE, PET, PP, PTFE, PVC. Všestrannost těchto materiálů lze přisoudit možnému přizpůsobení složení a distribucí molekulové hmotnosti ve prospěch fyzikálně-chemických vlastností. Polymery jsou v technické praxi hojně využívány již desítky let. Ať už se jedná o komoditní plasty produkované ve velkých objemech nebo o speciální polymery užívané v úzkém zaměření. V současné době se trend zaměřuje na využití polymerů s plnivý případně výztužemi pro dosažení co nejlepších mechanických i fyzikálních vlastností. Tyto kompozitní materiály můžeme najít v širokém spektru odvětví od sportovního přes stavební až po letecký průmysl a další.

V závislosti uplatnění cyklického poškozování je přehled omezen pouze na konstrukční polymery a kompozity, u kterých se očekává cyklické zatížení a tím i únavové poruchy. [16, 6]

1.1 Základní konstrukční plasty

Konstrukční polymery jsou plasty, které musí odolávat namáhání v konstrukčních aplikacích. V průběhu vývoje polymerů se postupně prosazují pro konstrukční účely jednodušší a především levnější plasty, jako například polypropylén. Zahrnujeme mezi ně termoplasty i termosety.

Mezi hlavní charakteristiku termoplastu patří teplota skelného přechodu (T_g). Tato teplota je významná z hlediska užitnosti plastu v různých teplotách díky závislosti na modulu pružnosti. Lze říci, že pod T_g přechází plast do stavu křehkého a chová se jako elastická tuhá fáze (lineární závislost mezi napětím a deformací). Analogicky se vzrůstající teplotou pevnost a modul pružnosti klesá a houževnatost se zvyšuje. Co se týče deformace, jsou plasty schopny překonat velkou vnitřní deformaci před samotným lomem. Plasty mají obecně nízkou tepelnou vodivost a vysoký koeficient teplotní roztažnosti. To může vést při deformaci k místnímu nárůstu teploty např. při cyklické zkoušce.

Reaktoplasty nemají ostře definovanou teplotu skelného přechodu, a tím ani pevnost vazeb není náchylná na teplotu či rychlost deformace jako předchozí termoplasty.

Na trhu se setkáváme s různými modifikacemi základních konstrukčních plastů. Následující výčet vlastností je uveden pro posouzení a srovnání. Má za úkol vytvořit pouze orientační výčet. [4, 12]

1.1.1 Polypropylen – PP

Jedná se o semikrystalický polymer, spadající mezi polyolefiny. Vyniká chemickou odolností, nízkou vahou, poměrně vysokou tuhostí při zachování dobré houževnatosti. Podléhá UV degradaci a povětrnosti. Za nízkých teplot je křehký. Zpracovává se vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním, tvarováním polotovarů a různými druhy obrábění. Polypropylen vyniká rozmanitou použitelností od výroby trubek, elektrosoučástí, ventilátorů po nádoby a různé konstrukce. Oblast použití PP je i ve výrobě lan (nízká hmotnost). [9]

Tab. 1 Vlastnosti PP [12]

Amorfní (A) Semikrystalický (K)	Modul pruž- nosti v tahu [MPa]	Mez pevnos- ti v tahu [MPa]	Teplota tání [°C] Teplota skel. přechodu [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Nasákavost (vo- da, 23 °C, 24 h) [%]
K	1 100 – 1 300	21 - 37	176 -24	900 - 907	0,01 – 0,03

1.1.2 Polyvinylchlorid – PVC

Tento amorfní polymer s obsahem chlóru se na trhu prodává ve dvou úpravách – tvrdé a měkké. Tvrdý PVC je též znám jako Novodur a měkčený jako Novoplast. Charakteristickými rysy jsou vysoká chemická i povětrnostní odolnost, houževnatost při nárazu, ale nízká pevnost. U změkčeného PVC se může vyskytnout oslabená schopnost chemické a povětrnostní odolnosti (řeší se stabilizátory a antidegradanty). Díky širokému uplatnění lze PVC zpracovávat téměř všemi způsoby (vstřik, vytlačování, válcování,...). Mezi hlavní spotřebitele PVC patří stavebnictví (trubky, nádrže, podlahoviny). Dále se uplatňuje v elektroinstalacích, armaturách, nádržích, a podobných aplikacích. [9]

Tab. 2 Vlastnosti PVC [12]

Amorfní (A) Semikrystalický (K)	Modul pruž- nosti v tahu [MPa]	Mez pevnos- ti v tahu [MPa]	Teplota skel. přechodu [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Nasákavost (vo- da, 23 °C, 24 h) [%]
A	2 400 – 4 200	40 - 60	75	1 390 – 1 959	0,04 – 0,4

1.1.3 Polyamidy – PA

Alifatické a aromatické polyamidy zahrnují velkou skupinu plastů. V části konstrukční se spíše uplatňují alifatické v podobě PA 6 , PA 66 - nylon, PA 11 a jiných. Naopak v části kompozitů najdeme aromatické polyamidy v podobě aramidových výztuží. Alifatické polyamidy se liší v navázání vodíkového můstku, což určuje jejich označení. Výhodou polyamidů je houževnatost a odolnost proti opotřebení. Záporné vlastnosti jsou navlhavost a vznik statické elektřiny. Pro zlepšení vlastností se často plní sklem. Vstřikování a vytlačování jsou primární technologická zpracování. Využívá se v ložiskách, ozubených kolech, drobných strojních součástech, armaturách, apod. Asi polovina vyrobeného polyamidu se zpracuje v oděvních odvětvích. [9, 10]

Tab. 3 Vlastnosti polyamidů [12]

Amorfní (A) Semikrystalický (K)	Modul pruž- nosti v tahu [MPa]	Mez pevnos- ti v tahu [MPa]	Teplota tání [°C] Teplota skel. přechodu [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Nasákavost (vo- da, 23 °C, 24 h) [%]
PA 6 - K	1 200 – 1 400	70 - 85	220 40	1 130	1,3 – 1,9
PA 66 - K	1 600 – 2 000	77 - 84	265 65	1 140	1,0 – 2,8

1.1.4 Styren-akrylonitril – SAN

Jedná se o amorfní transparentní kopolymer styrenu a akrylonitrilu. Vyniká rázovou houževnatostí, tvrdostí, pevností a odolností proti olejům. Má zvýšenou schopnost vázat vodu a na povětrnosti žloutne. Často se vyskytuje v kombinaci s vyztužením (skelné výztuže) a

zpracovává se především vstřikováním. Oblasti použití jsou shodná jako v případě klasického polystyrenu, kde je vyžadována zvýšená chemická odolnost (lehké kryty, přepážky polic, flakony). Dále je využíván v automobilovém průmyslu a elektrotechnice. [10]

Tab. 4 Vlastnosti SAN [17]

Amorfní (A) Semikrystalický (K)	Modul pruž- nosti v tahu [MPa]	Mez pevnos- ti v tahu [MPa]	Teplota skel. přechodu [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Nasákavost (vo- da, 23 °C, 24 h) [%]
A	3 600 – 3 900	61 - 79	111	1070 - 1090	0,25 – 0,35

1.1.5 Polyoxymethylen – POM

POM je charakterizován vysokou otěruvzdorností, tuhostí a tvrdostí, což je způsobeno acetalovou vazbou a vysokou krystalinitou. Rozměrově stálý a pružný plast použitelný v potravinářství má dobré kluzné vlastnosti. Typickými výrobky z POM jsou ozubená kola, ložiska, sedla ventilů, západky a různé elektrotechnické komponenty. V podobě prášku ho lze nanášet na kovové povrchy. [11]

Tab. 5 Vlastnosti POM [12]

Amorfní (A) Semikrystalický (K)	Modul pruž- nosti v tahu [MPa]	Mez pevnos- ti v tahu [MPa]	Teplota tání [°C] Teplota skel. přechodu [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Nasákavost (vo- da, 23 °C, 24 h) [%]
K	2 600 – 2 900	62 - 70	181 -40	1250 - 1506	0,12 – 0,25

1.1.6 Polykarbonát – PC

Amorfní termoplast PC se využívá především díky své transparentnosti a odolnosti vyšším teplotám. Dále je odolný povětrnosti i světlu a rozměrově stálý. Sklon ke korozi za napětí a značná vnitřní pnutí mohou působit ve výrobcích problémy. Velká míra uplatnění spočívá ve vstřikování světlometů. Mimo jiné se používá v elektrotechnice, přístrojové a kancelářské technice. Vytlačované desky jsou rozšířené ve stavebnictví (světelné systémy, zastřešení). [9]

Tab. 6 Vlastnosti PC [12]

Amorfní (A) Semikrystalický (K)	Modul pruž- nosti v tahu [MPa]	Mez pevnos- ti v tahu [MPa]	Teplota skel. přechodu [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Nasákavost (vo- da, 23 °C, 24 h) [%]
A	2 100 – 2 400	56 - 72	114	1200	0,15

1.1.7 Akrylonitril-butadien-styren – ABS

Vzniká kopolymerací akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Akrylonitril zvyšuje chemickou odolnost a butadienová složka zase houževnatost polystyrenu při zachování ideální tuhosti a pevnosti. Technologicky jej lze zpracovat snad všemi způsoby, mezi kterými vyniká vstřikování a vytlačování. Své místo v použitelnosti má ve strojírenství, automotive, v obalové technice, atd. Využívá se také se skelným plnivem. [10]

Tab. 7 Vlastnosti ABS [17]

Amorfní (A) Semikrystalický (K)	Modul pruž- nosti v tahu [MPa]	Mez pevnos- ti v tahu [MPa]	Teplota tání [°C] Teplota skel. přechodu [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Nasákavost (vo- da, 23 °C, 24 h) [%]
K	1 900 – 2 700	25 - 65	240	1030 -	0,7 – 1,03
			105	1090	

1.1.8 Polytetrafluorethylen – PTFE

Patří do skupiny fluoroplastů, které jsou svou strukturou analogické polyolefinum. Vyznačuje se vysokou krystalinitou, chemickou i tepelnou odolností, dobrými elektrickými vlastnostmi a odolností proti opotřebení. Podléhá creepu, ale má široký teplotní rozsah použitelnosti. Antiadhezivní účinky předurčují směr použití (kluzná ložiska). Řadí se spíše mezi speciální plasty. Obtížnost zpracování (většinou válcování, lisování, vytlačování) díky vysoké viskozitě taveniny se odráží na vyšší ceně PTFE. Celosvětově známý pod názvem Teflon. [10]

Tab. 8 Vlastnosti PTFE [12]

Amorfní (A) Semikrystalický (K)	Modul pruž- nosti v tahu [MPa]	Mez pevnos- ti v tahu [MPa]	Teplota tání [°C] Teplota skel. přechodu [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Nasákavost (vo- da, 23 °C, 24 h) [%]
K	410	14 - 36	327 -110	2150	< 0,01

1.1.9 Polybutylentereftalát – PBT

Tento termoplast je známý svou odolností vůči abrazi, chemikáliím a teple. Další výhodou je bezpochyby vysoká rázová houževnatost a nízká nasákavost. Je řazen mezi dražší plasty a v praxi se často využívá pro kompozitní účely. Velmi dobré elektrické, mechanické a zpracovatelské vlastnosti předurčují PBT pro užití v elektrotechnice (konektory) a automobilu (pedály, světla). Z PBT se dále vyrábí vlákna často aplikovaná v oděvním průmyslu. [13]

Tab. 9 Vlastnosti PBT [17]

Amorfní (A) Semikrystalický (K)	Modul pruž- nosti v tahu [MPa]	Mez pevnos- ti v tahu [MPa]	Teplota tání [°C] Teplota skel. přechodu [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Nasákavost (vo- da, 23 °C, 24 h) [%]
K	2 000 – 2 600	50 - 57	288 46	1240 - 1340	0,1 – 0,5

1.1.10 Polyethylentereftalát – PET

PET je z chemického hlediska polykondenzát kyseliny tereftalové a etylenglykolu. Zastupuje nejvýznamnější polyestery. Původní použití PET bylo ve formě vláken s širokým spektrem uplatnitelnosti od textilií po obalování vodičů. Dnešní záběr použitelnosti je ve výrobě lahví. Z toho plyne i zpracování vstřikováním a vyfukováním. V textilním průmyslu se pro PET vlákna zaužívala zkratka PES vlákna. Tyto vlákna dobře schnou, méně se mačkají a využívají se v kombinacích s různými přírodními materiály. Posledním význam-

ným odvětvím je výroba fólií vytlačováním, které jsou pružné a teplotně odolné při velké teplotní diferenci. Nevýhoda spočívá ve vyšší ceně. [10]

Tab. 10 Vlastnosti PET [12]

Amorfní (A) Semikrystalický (K)	Modul pruž- nosti v tahu [MPa]	Mez pevnos- ti v tahu [MPa]	Teplota tání [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Nasákavost (vo- da, 23 °C, 24 h) [%]
K	3 100	50 - 80	334	1 370	0,3

1.1.11 Polyetereterketon - PEEK

Přirozenou barvou tohoto krystalického polymeru je šedá. Zpracovává se z taveniny až při 400°C nebo lisováním z tablet. Řadí se mezi speciální konstrukční plasty užívané pro vysokou tepelnou a chemickou odolnost v odvětvích jako jsou letectví a vojenská technika.

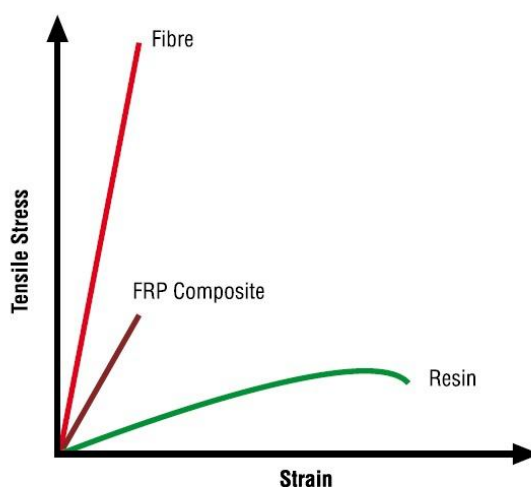
Tab. 11 Vlastnosti PEEK [12]

Amorfní (A) Semikrystalický (K)	Modul pruž- nosti v tahu [MPa]	Mez pevnos- ti v tahu [MPa]	Teplota tání [°C] Teplota skel. přechodu [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Nasákavost (vo- da, 23 °C, 24 h) [%]
K	2 250	70 - 103	288 185	1 320	0,1 – 0,07

1.2 Kompozity

Kompozitní materiály obsahují ve své struktuře dva i více materiálů s rozdílnými fyzikálními i mechanickými vlastnostmi. Jedná se tedy o heterogenní materiály, u kterých je základní složkou matrice (pojivo), do níž se přidává výztuž (obvykle vlákna či tkaniny) výrazně zvyšující mechanické vlastnosti jako tuhost a pevnost. Abychom mohli hovořit o kompozitním materiálu, musí obsahovat více než 5 % výztuže a musí být vyroben mísením. Výztuže v kompozitních materiálech můžeme rozdělit dle velikosti na 3 oblasti, a to mikrokompозitní, makrokompозitní a nanokompозitní (velikost částic v nm). Je patrné, že kompozitní materiály se vytváří z různých složek od betonu přes železo po různé typy polymerů. V této práci se omezíme pouze na kompozity s polymerní maticí.

Kompozity vynikají především následujícími vlastnostmi: nízká hustota, korozivzdornost, odolnost proti opotřebení, minimální tepelná vodivost, široký rozsah tuhostí a pevností, elektroizolační vlastnosti, vysoká mez únavy, a jiné. Přednost dostávají oproti jiným materiálům díky tzv. měrným vlastnostem (hodnoty jednotlivých vlastností vztažené na jednotku hmotnosti) tzn. zefektivnění využití hmoty. Jinak řečeno kvůli synergickým účinkům. Dalším významným bodem je možnost užití kompozitu na míru dané aplikaci, jak jeho strukturou a vlastnostmi, tak i technologií výroby. Nevýhodou může být v některých případech cena. [12, 16]



Obr. 1 Synergický účinek [14]

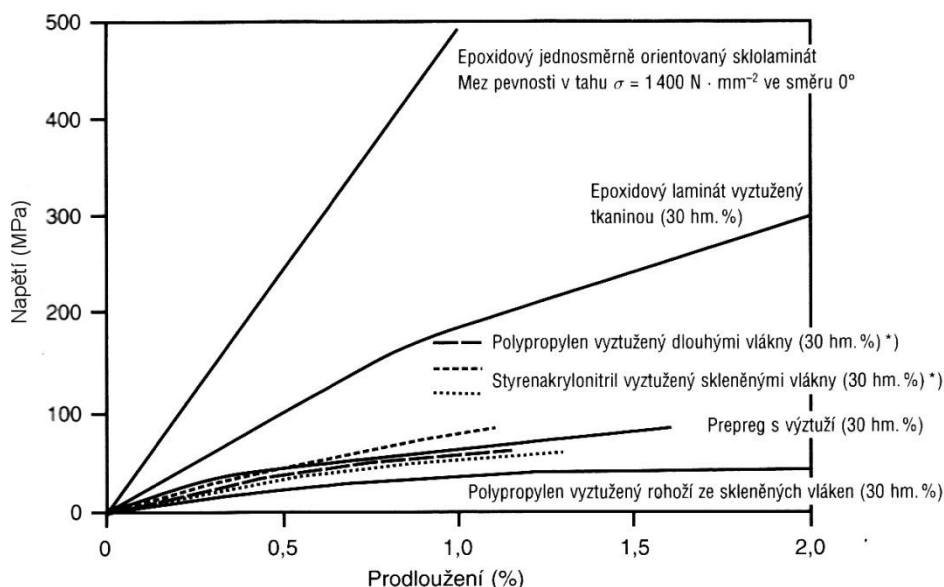
1.2.1 Polymerní matrice

Všeobecný účel matrice je propojení výztuže na geometricky stálý výrobek. Úkoly, které zajišťuje matrice v kompozitu, by se daly shrnout do těchto bodů:

- přenos namáhání na vlákna
- zajištění celkové geometrie
- ochrana před korozním prostředím
- fixace polohy vláken
- funkce pojiva i při počátečních frakcích ve výztuži
- elektrická nevodivost

Aby byly splněny všechny tyto body, musí být dodržen technologický způsob zpracování matrice. Ukazatelem kvality kompozitu je adhezní schopnost na mezíploše matrice/vlákno. Má-li být výztuž zcela prosycena, je důležité, aby byla vlákna smáčena matricí. Nejvýhod-

nější z hlediska zpracování jsou kapalné matrice. Z těchto dvou zjištění vyplývá, že důležitou zpracovatelskou charakteristikou matrice je viskozita a povrchová energie. [5, 7]



Obr. 2 Diagram napětí-prodloužení vybraných kompozitních materiálů [5]

*) Směr plnění je shodný s hlavním směrem orientace vláken

1.2.1.1 Termoplastické matrice

Původně se pro polymerní kompozity používaly výhradně termosetové pryskyřice, nyní se z prostého důvodu urychlení výroby využívají i termoplasty (není třeba vytvrzování). V závislosti ceny kompozitu a ceny zpracování se vyztužují především konstrukční plasty (Polyamidy, PBT, PC, PPO nebo POM), čímž se rozšiřuje oblast použití. I když se komoditní plasty (PS, PVC, PE) využívají pro konstrukční účely, je nevýhodné je plnit (vlastnosti neodpovídají ceně). Výjimkou je PP, který je nejlevnějším, lehce vyztužovaným termoplastem. Obvykle se termoplasty plní 15 % – 50 % výztuže. Nižší procento má zanedbatelný vyztužující efekt a naopak vyšší má za následek špatné smáčení. Výjimečné vyztužení až 80% náleží vysokopevnostním termoplastovým kompozitům. Stále větší objemy kompozitů jsou produkovány s krátkými skelnými vlákny okolo 0,2 mm (v této oblasti dosahují nejvyšší modul pružnosti), které se jednoduše dodávají v granulátu pro vstřikování. Dlouhá vlákna jsou označována jako LFT a skelné rohože jako GMT. Obojí si našlo své uplatnění v automobilu. Termoplastické matrice bývají houževnatější než termosety, mez pevnosti i kluzu je též menší. Při návrhu kompozitu s termoplastickou maticí musíme uvažovat nad rozsahem teplot, kterým budou vystaveny v závislosti fyzikálních změn. Na dru-

hou stranu je možné výrobek dodatečně tepelně tvarovat a svářet. Při vyšší teplotě mají termoplastické matrice sklon ke creepu. Následující tabulka uvádí některé termoplasty vhodné pro kompozitní materiály. [5, 12]

Tab. 12 Stručný výběr vhodných termoplastických matric [12]

termoplast		výhodné/nevýhodné vlastnosti	obchodní název	T _g [°C]	T _m [°C]
polyamid 6	PA 6	pevnost/navlhavý	Bergamid B, Gelon, Ultramid B	45	220
polyamid 66	PA 66	pevnost, tepelná odolnost/navlhavý	Bergamin A, Gelon A, Noryl GTX	45	260
polybutyltereftalát	PBT	tepelná odolnost	Bergadur, Celanex	60	225
polysulfon	PSU	tepelná odolnost	Udel, Ultrason S	190 *	
polyfenylensulfid	PPS	tepelná odolnost	Forton, Ryton	80	240
polyamidoimid	PAI	vysoká tepelná odolnost	Torlon	280 *	
polyetheretherketon	PEEK	chemická, tepelná odolnost	Victrex, Kadel	140	340

pozn. * amorfní termoplast

1.2.1.2 Reaktoplastické matrice

Reaktoplastické neboli termosetové matrice jsou kapalné nebo tavitelné a bývají označovány též jako pryskyřice. Kompozity, jejichž základem jsou uvedené matrice, patří k nejznámějším a nejrozšířenějším. Velká výhoda spočívá v nízké viskozitě, a tím i dobrém smáčení a prosycení výztuží. Zpracovatelské teploty jsou nižší než u termoplastů, na druhou stranu vytvrzují na základě přidaného katalyzátoru (obecně tvrdidel) za uvolňování těkavých složek nebo dodáním tepelné energie. Při vytvrzování pryskyřic dochází k chemické reakci, která je nevratná, a proto tyto matrice nejsou tak náchylné na zvýšenou teplotu. Optimální podíl výztuže je 60% – 75 %. Pro urychlení zpracovatelských procesů se využívají předsycené výztuže zvané prepregy, které se následně vytvrzují v lisech nebo v autoklávech. [5, 7]

○ Nenasycené polyesterové pryskyřice UP-R

UP-R jsou bezbarvé, někdy nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech. Exotermická chemická reakce zesíťování probíhá i za pokojových teplot. Patří mezi nejpoužívanější polymery k tvorbě kompozitů. Výhodou je nízká cena a poměrně rychlý proces vytvrzení. Smrštění činí 5 – 9 % v závislosti na reaktivitě a tím i hus-

totě zesíťování. To lze snížit přidáním aditiv smrštění až na 0,15 % (u SMC). Nízká viskozita (kterou lze ovlivnit množstvím styrenu) činí UP-R optimální pro celkové prosycení a smáčení vláken. Jelikož neexistuje univerzální chemicky odolná UP-R, rozdělujeme je na vhodné pro alkalické prostředí nebo odolné aromatickým uhlovodíkům. Velmi nepříznivě na životní prostředí i lidský organismus působí uvolněný styren při jejich zpracování. [5]

- *Epoxidové pryskyřice EP-R*

Patří mezi nejpoužívanější polymery pro kompozitní účely. Představují shrnutí nejlepších vlastností pryskyřic, které máme k dispozici. Vynikají adhezivními účinky, nízkou hodnotou smrštění, odolností proti chemikáliím a mechanickými vlastnostmi. Díky tomu se hojně využívají při konstrukci leteckých celků, při stavbě lodí (vysoká odolnost hydrolytickým procesům), apod... Důležitým faktorem je přijatelnost pro životní prostředí, protože při zpracování se neuvolňují těkavé složky, které by ničily zdraví. Název epoxid vyplývá z molekulové skupiny, kdy jsou na atom kyslíku navázány uhlíky. EP-R jsou jednoduše identifikovatelné podle specifického jantarového až hnědého zbarvení. Při aplikaci epoxidů je nutné dbát na přesný poměr mísení s tvrdidlem. Nesprávný postup může mít neblahý vliv na konečné vlastnosti. Oproti jiným uvedeným pryskyřicím jsou epoxidy dražší. [14]

- *Vinylesterové VE-R a fenakrylátové pryskyřice PHA-R*

Vinylesterové pryskyřice jsou ve své molekulární struktuře totožné s polyesterovými. Odlišují se postupem zesíťování, které probíhá na koncích řetězce. Důsledkem toho je odolnost řetězce proti rázům a ve výsledku je VE-R tvrdší než UP-R. Nižší počet esterových skupin (podléhající hydrolytické degradaci) kladně ovlivňuje chemickou odolnost. Vinylesterové pryskyřice se vyskytují také pod označením fenakrylátové pryskyřice. Zpracování je stejné jako u UP-R. [14]

- *Fenolické pryskyřice PF-R*

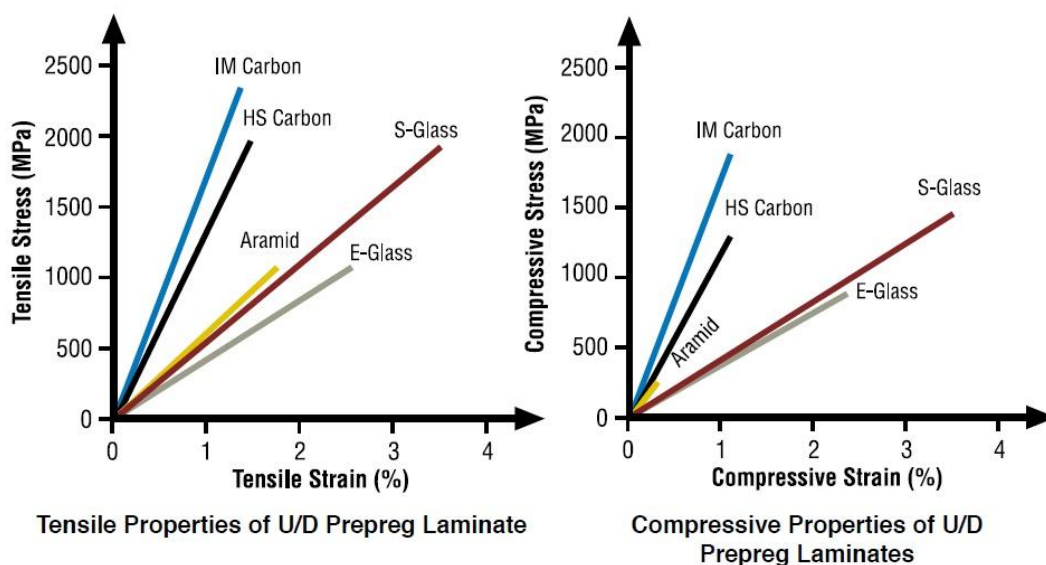
Fenolické pryskyřice se vyrábí v rozmanitých variantách, které závisí na molárním poměru fenolu a formaldehydu. Tyto 2 složky jsou základní podstatou PF-R, v případě formaldehydu mohou být použity různé vodné roztoky aldehydů. V závislosti poměrů fenolu a formaldehydu dostáváme buď rezoly nebo novolaky. Vytvrzovací reakce je v případě fenolických pryskyřic značně složitá, kdy dochází k endotermní i exotermní reakci. Pro výrobu vyztužovaných kompozitů jsou málo používané kvůli křehkosti a především z důvodu vzniku těkavých látek při zapracování.

vání. Vynikají však výbornou chemickou i tepelnou odolností, nízkou hořlavostí a nízkou toxicitou kouře. V naší zemi se PF-R z převážné části uplatňují jako pojivo pro dřevařské aplikace nebo pro formovací směsi (slévárny). Můžeme je najít i v částech karoserií nebo ve vybavení vagonů či letadel. Známý obchodní název PF-R je Bakelit. [5]

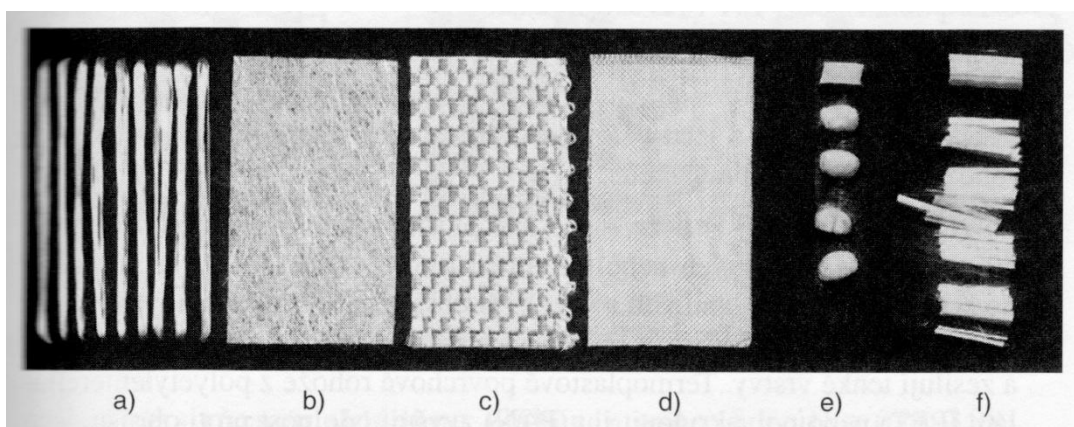
1.2.2 Kompozitní výztuže

Pod pojmem výztuž si můžeme představit částice nebo vlákna různé délky, která značně ovlivňují především mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. Samotné výztuže nemají žádné konstrukční uplatnění, protože jsou často křehké, ale zato pevné v tahu. Funkcí výztuže je snášet mechanické namáhání předávané výztuži skrze matici. Vyztužení znamená zvýšit pevnost a tuhost výsledného materiálu. Zvláštností je tzv. synergický efekt, který popisuje následující: „výsledné vlastnosti budou ještě lepší než pouhé sečtení vlastností matrice a výztuže“. Přitom zásadním ovlivňujícím faktorem kvality je adheze mezi maticí a výztuží, což bylo řečeno výše. [5, 7, 12]

V souvislosti s vlákny se přilnavost zvyšuje již při jejich výrobě. Na vlákna se nanáší vazebný prostředek – lubrikant. Pro skleněná vlákna a polární plasty jsou nejběžnější organosilany. Tyto lubrikanty vytváří pevnou vazbu na meziploše matrice/vlákno a výsledkem je mnohem vyšší adheze než u neupravených vláken. Výsledkem vyztužení vláken vzniká v kompozitu anizotropie, která se částečně eliminuje různou skladbou (obr. 4) a orientací vláken v případě laminátů. Nicméně lze anizotropii využít ke kompaktnímu provedení, protože se vlákna kladou ve směru zatížení. Tím se eliminuje množství materiálu, které by připadlo na místa s minimálním zatížením. Doporučený poměr je max. 70% vláken. Při navyšování sice dochází ke zvýšení tahové tuhosti, ale vlastnosti výsledného kompozitu se budou snižovat důsledkem nízkého procenta pryskyřice, která nebude schopna udržet vlákna pohromadě. Na obr. 3 můžeme porovnat napětí a deformaci jednotlivých vláken v tahu a tlaku. Vyčnívající jsou vlákna aramidů, která se chovají naprosto odlišně v tahu a tlaku. V následujícím obr. 4 jsou příklady rovinného uspořádání výztuží. Vidíme, že se vlákna mohou klást nahodile či se tkají v různých směrech (důvody popsány výše). Také záleží na systému tkaní, kde rozlišujeme nejjednodušší plátňovou, složitější krepovou nebo atlasovou vazbu. Zvláštním typem jsou hybridní tkaniny, což jsou v podstatě tkaniny ze 2 typů (i více) vláken například uhlík s aramidem. Tyto tkaniny se využívají pro aplikace, kde očekáváme rázové namáhání. Jsou podstatně dražší. [5, 14]



Obr. 3 Porovnání jednotlivých typů vláken při namáhání v tahu a tlaku [14]



Obr. 4 Typy výztuží. Pro termosety: a) rovingy, b) rohož, c) tkanina z prameců, d) tkanina z vláken; pro termoplasty: e) krátká vlákna 0,2 mm, f) dlouhá vlákna 5 mm [5]

Skleněná vlákna - GF

Produkují se v různých modifikacích za účelnou aplikací. Vlákná s průřezem 5 – 24 μm se ihned po ochlazení spojují do provazců nebo rovingů a nanášejí se na ně ochranné lubrikanty (vosk, mazivo). Tato úprava se musí před nanášením pryskyřice odstranit, protože snižuje smáčivost. E-sklo je nejpoužívanějším typem polymerních výztuží díky přijatelné ceně a dobrým vlastnostem. Dodává se ve všech formách (rovingy, rohože, tkaniny i sekaná vlákna) i vazbách. Skleněná vlákna jsou jediná izotropní a nejsou příliš odolná únavě. Následující tabulka je přehledem vyráběných typů skleněných vláken. U typu S-sklo se můžeme také setkat s ekvivalentním označením T nebo R-sklem používané v různých zemích. [14]

Tab. 13 Druhy skla [7]

Označení	Použití	Pevnost [GPa]	Prodloužení do lomu [%]	Cena [£ / kg]
E	elektrické izolace	3	3	1 – 2
S	vysokopevnostní pro letectví a armádu	5	5	12 - 20
A	tepelné izolanty			2 - 5
C	chemické odvětví	2	2	

○ *Aramidová vlákna - AF*

Jasně nažloutlá vlákna mohou mít řadu vlastností, ale všechna mají vysokou pevnost a nízkou hustotu. Všechny typy mají vysokou odolnost vůči nárazu a jsou hojně využívány jako ochrana proti balistickým střelám. Aramid je celosvětově známý pod obchodním názvem firmy Dupont – kevlar. Dodavatelé upravují vlákna tak, aby vyhovovala různým aplikacím. Zvyšují otěruvzdornost a odolnost vůči chemikáliím a teplu. Nicméně aramid podléhá UV degradaci. Většinou se vyrábí ve formě rovingů. [14]

○ *Uhlíková vlákna - CF*

Výroba uhlíkových vláken je energeticky náročná, a proto se produkují v menším množství, i když je zde rostoucí trend. Výroba většinou probíhá pyrolýzou polymerů (PAN) třemi kroky, stabilizací, karbonizací a grafitizací (za vysoké teploty). Dosáhneme blokové krystalické struktury, na jejíž orientaci vůči ose závisí tuhost. Typem grafitizace dostaneme buď vysoce pevnostní vlákna – HS nebo vysoce modulové vlákna – HM. CF jsou velmi křehká a silně anizotropní. Průměry vláken nabývají 5 – 10 µm. Zvláštností je mírně záporná teplotní roztažnost ve směru vlákna. Při výrobě se stejně jako skleněná vlákna lubrikují. Samotné CF nemá dobrou adhezi k matrici. Uhlíkové vlákno má nejvyšší specifickou tuhost oproti jiným dostupným vláknům (viz obr. 3), vysokou pevnost v tahu i tlaku a výbornou odolnost proti korozi, tečení i únavě. Nevýhodou je malá rázová pevnost. Všechny vlastnosti i náročnost výroby se odráží v ceně, která činí v průměru přibližně 15 – 40 £ / kg. [7, 14]

○ *Ostatní vlákna*

Předchozí odstavce uvedly nejpoužívanější a nejrozšířenější vlákna pro vyztužování kompozitních materiálů. Existují však další druhy vláken, z nichž některá jsou příliš drahá pro komerční použití a některá se naopak čím dál více prosazují.

Z polymerních vláken se kromě aromatických polyamidů zřídka užívají polyesterová a polyethylenová vlákna. Oba typy nedosahují vlastností skla a jejich výroba je nákladná. Dalším typem jsou kovová vlákna. Ocel je velmi levná, ale pro polymerní kompozity, kde očekáváme odlehčení díky hmotnosti, nevhodná. Zvláštním typem vyztuží jsou whiskery. Tvoří je tenké krystalky, které mohou být člověku nebezpečné. Chování whiskerů se přirovnává dlouhým nespojitým vláknům. V neposlední řadě je třeba zmínit přírodní vlákna, která si v poslední době upevňují postavení kvůli svému původu (nesyntetické). Základní stavební jednotkou přírodních vláken je celulóza a mnoho je jich biodegradabilních. Mezi zástupce patří bavlna, juta, len nebo kokosová vlákna. [7]

Částicové kompozity se vyrábí spíše za účelem zlepšení tepelných, elektrických vlastností, rozměrové stálosti, apod., než za účelem razantního zvýšení mechanických vlastností. Kompozity vyztužené částicemi mívají vyšší modul pružnosti v tahu, nižší objemové smrštění či geometrickou stálost (především u navlhavých polyamidů).

Částice můžeme dle tvaru rozdělit na:

- sférické – tvar kuliček s průměrem od 1 mm do 10 mm, zvyšují tuhost, ale nesmí být příliš velké, aby nesnížily pevnost (sklo, vápenec)
- jehlicové – konce jehliček můžou působit jako koncentrátoři napětí a při dynamickém zatěžování mohou být iniciačním místem trhliny
- destičkové – v usměrněném stavu se dosahuje až trojnásobného zvětšení meze pružnosti, mohou být z jílu, kaolinu, slídy, atd.

Důležité je rovnoměrné rozmístění částic v kompozitu v optimálním poměru k matici. Udává se rozmezí 25 % - 50 %. Při výrobě takových kompozitů je důležité předcházet vzniku pórů mícháním. [7, 12]

2 ÚNAVA POLYMERŮ A KOMPOZITŮ

Únava je typ poruchy materiálu a je způsobená změnou nebo druhem zatížení působící po určitý čas. Únava je majoritním problémem v mnoha moderních zařízeních a strojích, jako například v letadlech, či listech větrných elektráren. Příčina takových poruch je především v prostředí, kde je materiál využíván, a proto se únavovému chování věnovalo již mnoho výzkumů zaměřených na měnící se podmínky zátěže, aby se únavovým lomům předcházelo. Nicméně tato oblast je otevřená diskuzím, protože se vyvíjí stále nové materiály, jejichž popis z hlediska únavy není zcela stanoven.

2.1 Princip únavy

Mechanismy poškození vlivem únavy jsou pro plasty a kompozity odlišné. Pouze křehké plasty můžeme posuzovat na základě klasické lomové mechaniky, avšak i ty mají svá úskalí ve viskoelastickém chování.

Obecně lze únavu popsat následovně: „*Při opakovaném namáhání pravidelném nebo nepravidelném může dojít k porušení i houževnatého materiálu. Porušení nastává i při nižším napětí, než odpovídá pevnosti materiálu při statické krátkodobé zkoušce. Namáhání se může dít proměnlivým napětím v tahu, tlaku, ohybu nebo krutu.*“ [3, s. 9]

Studium únavy plastů zahrnuje další zatěžující faktory jako je creep, napětíová relaxace, průběžná deformace, zatěžující frekvence, rozsah amplitudy napětí či druh cyklu. Kompozitní materiály jsou od některých ovlivňujících faktorů (vlhkost vzduchu, UV záření) oproštěny, ale díky heterogenní struktuře stoupá rozmanitost typů poruch. Poškození kompozitů při dynamickém zatěžování probíhá ve větších objemech, tudíž nemá tak silný vliv jako iniciace trhliny v kovu či plastu.

Únavové chování plastů popisujeme těmito kritérii:

- 1) Mez časové únavy zahrnující Wöhlerovu křivku
- 2) Mechanické studie poklesu tuhosti a zbytkové pevnosti
- 3) Analýza růstu trhliny

Abychom dospěli k těmto bodům, musíme nejprve získat určitá data ze zkoušky dynamického cyklického zatěžování. Kritéria 1 a 2 lze jednoduše zahrnout do S-N diagramu pro komplexnější vyhodnocení vlivu únavy. [2, 8, 19]

2.2 Zkouška cyklického zatěžování

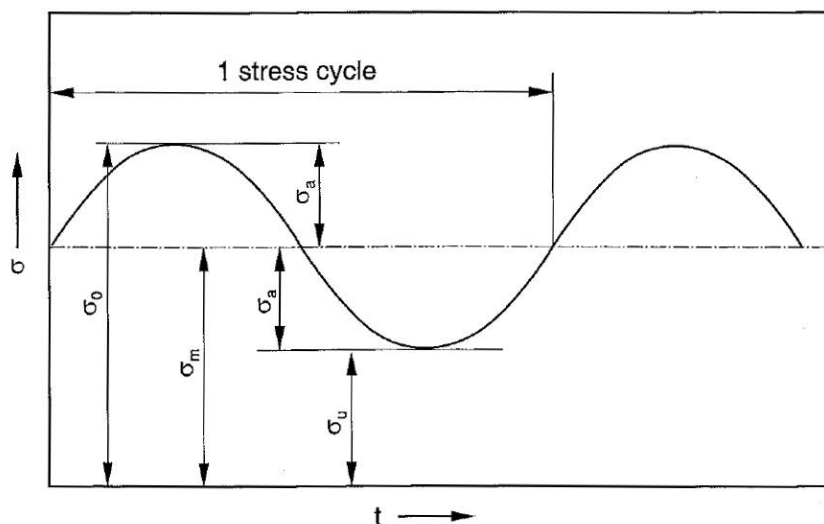
Mezi hlavní cíle této zkoušky patří sestavení Wöhlerovy křivky (S-N), která udává počet cyklů do poruchy při zvoleném zatížení. Zkoušky můžeme posuzovat podle metody vyšetřování:

- kontinuální – průběžné sledování změn a poškození
- diskontinuální – vzorek je zatížen do lomu a následně je analyzován

Postup zkoušky se řídí podle platných norem. [1]

2.2.1 Druh cyklu a zatížení

V mnoha případech se setkáme s cyklickým zatížením sinusového průběhu, kde se jeho hodnota mění od minima po maximum. Při kontinuální zkoušce odlišujeme amplitudu napětí σ_a a hodnotu středního napětí σ_m (viz obr 5).



Obr. 5 Diagram napětí a času pro cyklické zatížení [1]

Test může být proveden ve 3 rozsazích a celkem 7 typech zatížení. Odlišují se hodnotou středního napětí vůči nulové pozici. Pro snadnější posouzení určujeme součinitel asymetrie cyklu R .

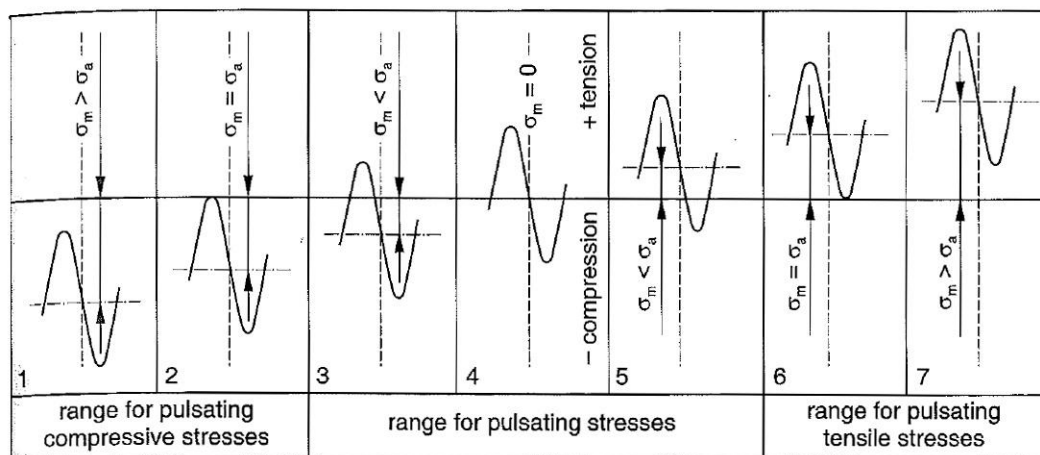
$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (1)$$

Podle tohoto poměru rozdělujeme cykly na oblasti:

- a) pulzující v tahu – kde $0 < R < 1$
- b) míjivé v tahu – kde $R=0$

c) symetrické střídavé – kde $R = -1$

Ty se ještě dále dělí podle obr. 6.



Obr. 6 Druhy zatížení [1]

Únavová pevnost je pak dána největší amplitudou napětí σ_b (únavová pevnost), kterou je vzorek schopen absorbovat po určitý počet cyklů. Jakmile je únavová pevnost překročena, vzorek se přelomí. Wöhlerovy křivky odrážejí závislost rozsahů napětí a počtu cyklů do lomu. Stanovení S-N křivky provádíme odstupňovaným zatížením (větší než mez únavy), kdy určujeme počet cyklů do lomu. Poslední vzorek by se neměl přelomit. Pak je závislost napětí a počtu cyklů vynesena do souřadného systému. Z S-N lze stanovit poruchové pásmo, ve kterém očekáváme rychlejší poškození. Pro plasty se většinou stanovuje mez únavy na 10^7 cyklů. [1, 3]

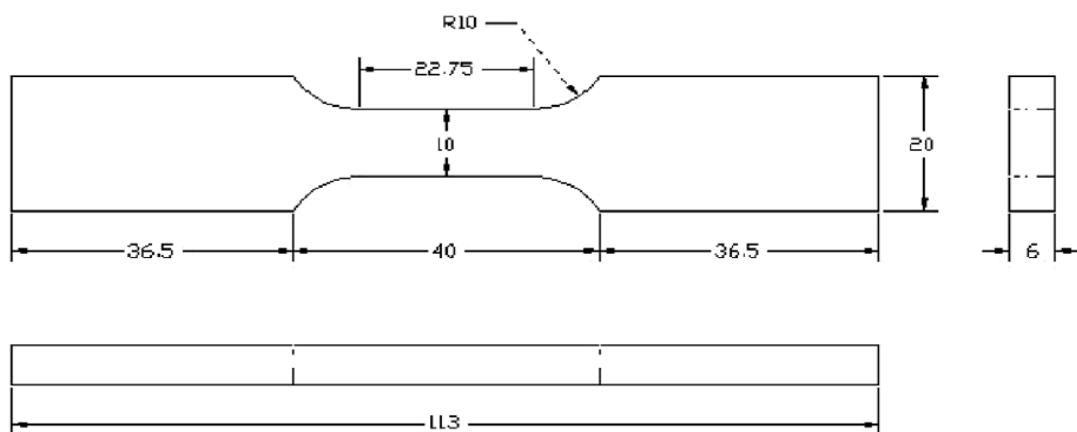
2.2.2 Druhy vzorků a jejich příprava

Prvními kroky zkoumání vlastností materiálu je získání vzorků. Odběr a příprava je důležitým krokem. Musíme dodržet určité zásady odběru, abychom pro analýzu dostali vzorek:

- reprezentativní
- homogenní
- isotopický
- ve formě vhodné pro testování
- aklimatizovaný (s ohledem na teplotu a vlhkost)
- bez nečistot
- v dostatečném množství pro všechny prováděné zkoušky

Polymerní vzorky se nejčastěji získávají vstřikováním, ale existují i jiné varianty označované za destruktivní, protože při nich dojde k poruše výrobku. Mezi tyto metody patří řezání nebo vrtání a musíme si dát pozor na teplotně ovlivněnou plochu, aby nedošlo k degradaci a ke znehodnocení vzorku. Je třeba dbát zvýšené pozornosti na anizotropii, obzvláště u kompozitů nebo plněných termoplastů. Hmotnost vzorků bývá okolo 5g a stejně jako podmínky, za kterých jsou připravovány, tak i velikost a rozměry jsou dány příslušnými normami. [18]

Pro zkoušku únavy je nejpoužívanější vzorek tvaru lopatek též označován jako „dog bone“. Tento tvar je s výhodou aplikován i u statických zkoušek tahových. Druhým výhodným tvarem je špalík, užívaný např. u rázových nebo ohybových zkoušek. [18]



Obr. 7 Testovací vzorek dle norem ASTM [22]

2.2.3 Zkušební frekvence

Velmi důležitým faktorem ovlivňující správný průběh zkoušky je zkušební frekvence. Na její velikosti totiž záleží hodnota disipovaného tepla. Čím pomaleji vzorek kmitá, tím je větší pravděpodobnost odvedení tepla. Díky nízké konduktivitě polymerů je důležité vybrat správnou frekvenci. Nízká frekvence je v rozporu s co nejkratší dobou zkoušky. Únavové zkoušky totiž probíhají i několik dnů. Pro polymery se používají frekvence od 0,1 Hz do 10 Hz. Kmity mohou být také tlumené, kdy se pomocí impulsu vzorek rozkmitá a měří se jeho tlumení. Dále budeme uvažovat pouze konstantní kmitání. [19]

2.2.4 Typ zkoušky

Únavové zkoušky se nejčastěji provádí zatěžováním tahem nebo ohybem. Výběr zatížení závisí především na stroji, jež máme k dispozici a na tom co vše stroj dokáže v průběhu

zkoušky zaznamenávat. Při zatěžování tahem dochází vlivem prodloužení k zúžení vzorku, čímž dostáváme nepřesnosti v měření. Amplituda napětí v tahu je rovna:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2)$$

kde σ ... napětí [MPa]

F ... zatěžující síla [N]

S ... průřez vzorku [mm²]

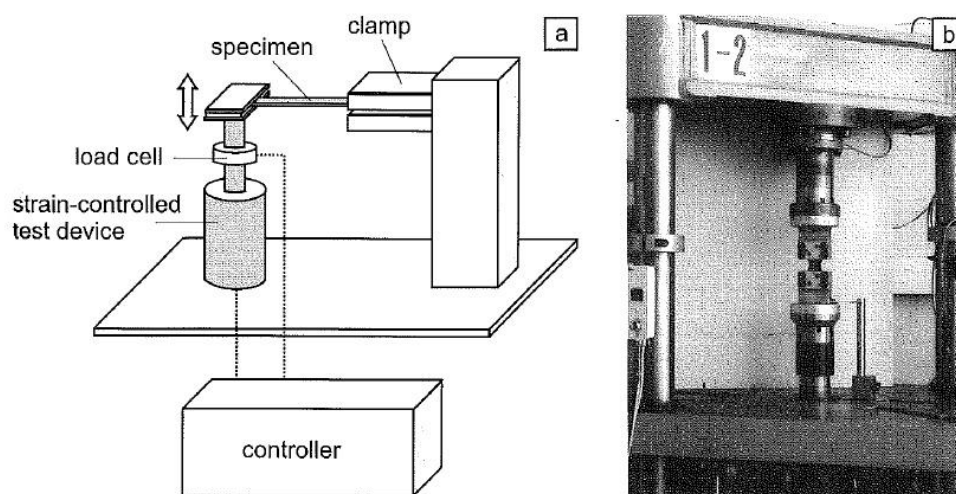
Dalším druhem zatěžování je ohyb, který může mít několik variant. Nejjednodušší je varianta vetknutého nosníku, kde síla působí na konci. Moment je pak závislý na délce nosníku, velikosti síly a průřezu vzorku. Druhou variantou je ohyb na 2 podpěrách, jedná se o třibodový nebo čtyřbodový ohyb. Rozdíl je v počtu tlačných břemen. Pro nejpřesnější stanovení napětí je ideální čtyřbodový ohyb, protože mezi břemeny nepůsobí smykové síly pouze čistý ohyb. Provedení je však nejsložitější a pro zkoušku cyklické únavy je nevhodný. Napětí se ve všech variantách spočítá:

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} \quad (3)$$

kde σ ... napětí [MPa]

M_o ... ohybový moment [N.mm]

W_o ... průřezový modul [mm]



Obr. 8 Stroje pro experimentální provedení zkoušky cyklické únavy [1]

2.3 Vyhodnocení zkoušky

Výsledkem zkoušky je křivka závislosti napětí na počtech cyklů tzv. Wöhlerova křivka. Kritérium únavy je kompletní porucha – lom. Známa okolnost neschopnosti vyjádřit pro polymery přesnou hodnotu pevnostní odolnosti σ_D vede k uvádění cyklické pevnosti σ_i . Stanovení únavové pevnosti je pak určeno pouze cyklickou pevností jako funkcí počtu cyklů. Tuto souvislost můžeme vyjádřit jako:

$$N_i = N_D \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

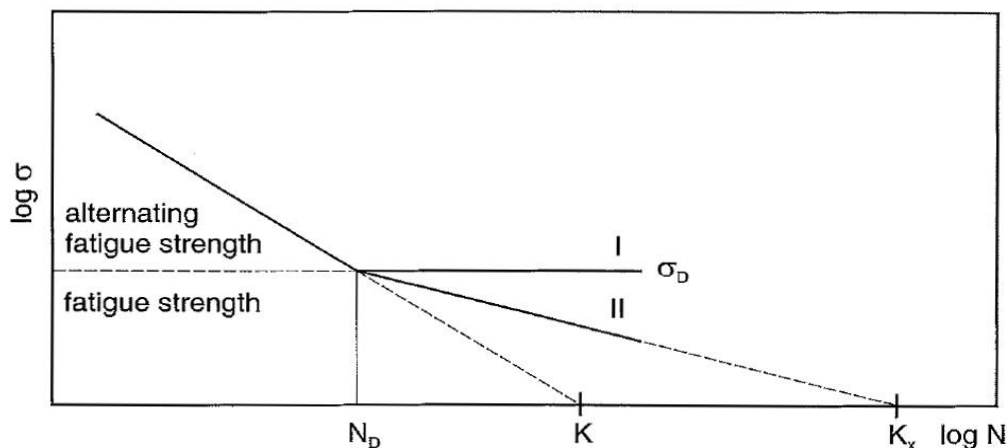
kde N_i ... počet cyklů [-]

N_D ... počet cyklů pro nízkocyklovou únavu [-]

σ_i ... nízkocyklová únavová pevnost [MPa]

k ... stupeň křivky zátěžového cyklu [-]

Počet cyklů N_D závisí především na vlastním posouzení očekávaných cyklů při praktickém využití výrobku.



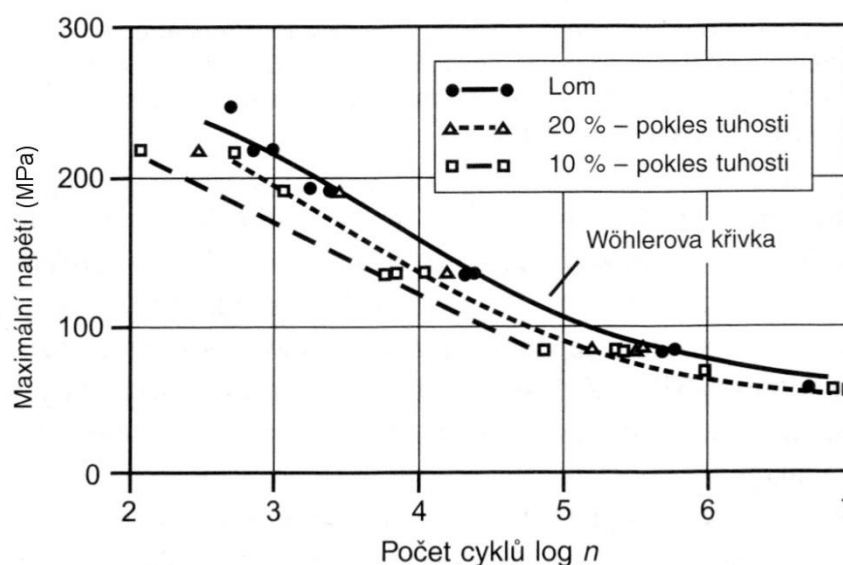
Obr. 9 Linearizovaná S-N křivka [1]

Přestože S-N křivka polymerů nemá žádný limitní stav pro stanovení cyklické pevnosti a je stále klesající, teoreticky ji můžeme rozdělit na 2 lineární části. První část označíme lineární regresí nízkocyklové únavy (část výrazně klesající). V této části dochází k nukleaci crazingu přeměnou v jeho růstu až po šíření trhliny vedoucí k lomu. Postupným zvyšováním cyklů klesá závislost na napětí, následkem čehož se zpomaluje vytváření crazingu. Ve druhé oblasti stanovíme únavovou pevnost vyjadřující hodnotu napětí, kterou jsou schopny překonat všechny vzorky (na obr. 9 je tento fakt vyjádřen oblastí I) nebo je závislost se-

stupná (obr. 9 oblast II). Pro nízkocyklovou únavu stačí posoudit dle oblasti I, ale pokud se budeme pohybovat nad 1000 cyklů je nutno uvažovat oblast II. [1, 2]

Na posouzení S-N křivky existují dle DIN dva pohledy. V prvním je S-N křivka stanovena s $P_c = 50\%$ tzn., že medián získaných hodnot bude právě 50 % a pravděpodobnost porušení bude stejná. Nebo podle druhého způsobu provedeme 6 – 10 testů stejného napětí na 3 – 4 úsecích, a pak lze pro každý úsek použít jinou pravděpodobnost porušení. [1]

Kompozitní materiály vyžadují k určení únavy nejen zřetelný lom, ale i průběžný pokles tuhosti s rostoucí únavou. Samozřejmě je nutné brát v potaz aplikaci, pro kterou je FRP určen, protože ne vždy je pokles tuhosti závadou. Pokud přidáme do Wöhlerova diagramu body poklesu tuhosti, dostaneme další kritérium pro hodnocení únavy. V některé literatuře se toto hodnocení označuje jako zlom v diagramu napětí-deformace, protože právě v této oblasti zaznamenáme největší nárůst poruch. Tuhost je vyjádřena směrnici přímky mezi počátkem a bodem lomu. Při cyklické zkoušce dochází k průběžné změně tuhosti a za lom považujeme stav, kdy tuhost poklesne pod bod určený z tahového diagramu. Takový postup bohužel nelze použít u FRP s uhlíkovými vlákny, protože nelze rozpoznat zlom v tahovém diagramu.



Obr. 10 Wöhlerova křivka a pokles tuhosti [1]

Tímto způsobem stanovujeme kvalitativní popis poruch v podobě oddělení matrice, delaminace nebo lomu vláken. Existuje i druhý způsob vyjádření poruch – kvantitativní. Zohledňuje například podélné i příčné trhliny a zkoumá se např. hysterezním měřením.

2.4 Mechanizmy poruch

Základní problém v únavovém chování polymerů spočívá ve viskoelastickém chování. Takový systém má dva extrémy s naprosto diferenciálními vlastnostmi. První je elastické chování dle Hooke vyžívané k popisu chování kovů. V případě polymerů platí pro malé deformace. Druhé kritérium je newtonský tok vyjadřující tečení kapalin a velké deformace polymerů. Přesto mají viskoelastické látky při malých deformacích lineární chování (vymezené ve viskoelastickém modelu zlomem), tzn. přímou úměru mezi napětím a deformací. K popisu viskoelastického chování v čase se používají různé reologické modely. Pomocí nich můžeme stanovit creep, relaxaci a podíly deformace a toku. Ze statistického hlediska pro rozmanité spektrum materiálů můžeme vysvětlit lomovou pevnost následujícími aspekty:

- Počátek lomu je statistická událost, jejíž výskyt je popsán zákony pravděpodobnosti.
- Přestože exempláře obsahují velké množství chyb na první pohled totožných, mohou být diametrálně odlišné. Pouze nejzávažnější porucha bude důsledkem lomu.
- Zatížení, kterému je vzorek podroben aktivuje velké množství molekulárních procesů.

Dalším pohledem je zjištění stavu za účelem inženýrským nebo fyzikálním. Oba dva účely cílevědomě směřují k dokonalejšímu vývoji technologií (zvýšení mechanických vlastností). Abychom toho dosáhli, je nutné znát pevnost materiálů, v našem případě polymerů. [12, 20]

Výpočet pevnosti vychází z Orowanova modelu, který předpokládá v okamžiku lomu rovnováhu mezi energií vynaloženou na oddálení částic a energií vytvářející nové plochy. Tímto způsobem lze vypočítat ideální pevnost, která se lehce stanoví pro krystalické materiály, ale vyjádření pro polymerní řetězce je obtížnější. Podrobněji je tento systém popsán molekulární pevností v literatuře [2]. Vychází z poznatku, že makromolekulární poruchy vytváří teplo a vnější namáhání. Lom je pak důsledkem kinetických degradačních procesů. Vznikly různé teorie, které vycházely z teorie Eyringovi. Ta považovala skluz makromolekul za příčinu lomu. Modernější teorie k lomu přistupují jako k poruše kovalentních vazeb například teorie Žurkova a Bueche nebo teorie dle Hsiao a Kausche. Většinou se jedná o vztahy získané experimentálním vyhodnocováním. [20]

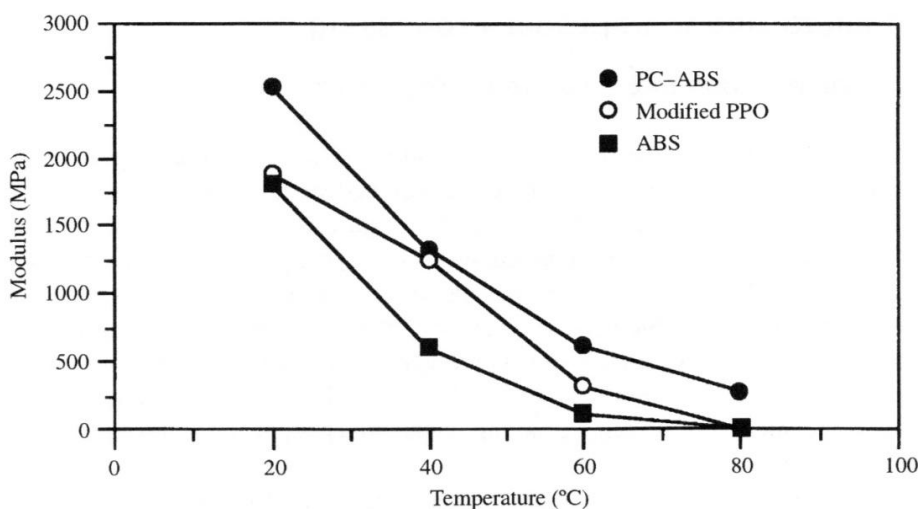
Poruchy mikroskopických oblastí obvykle probíhají jedním ze dvou způsobů:

- distorzním mechanismem – princip spočívá ve vzniku skluzových pásů zachováním konstantního objemu; umožňují celkem rozsáhlé plastické deformace a bývají důvodem dosažení meze kluzu. Smykové pásy se objevují pod úhlem přibližně 50° - 60° vzhledem ke směru namáhání a vytváří se přednostně pod T_g . Smykové pásy vytváří liniové útvary tloušťky $1\mu\text{m}$ a šířky $50\mu\text{m}$. Vznik lze popsat ve dvou stádiích. V prvním vznikají krátké linie a ve druhém stádiu podstatně delší, které protínají linie primární. Velikost a počet takových pásů úzce souvisí s pevností hranic a velikostí sférolitů. Iniciace trhliny proběhne v důsledku vzájemného pohybu primárního a sekundárního pásu.
- dilatačním mechanismem – vznikají oblasti s lokálním přetvořením, tzv. crazing popisující fibrilární otevřenou trhlinu; překročením mezního prodloužení se vytváří kavity a následně vzniká ostrá trhlina vedoucí k totálnímu lomu. Crazing najdeme v amorfních polymerech jako PS, PMMA či PVC, ale po dlouhodobé zátěži se objeví i v semikrystalických polymerech. Hlavní charakteristikou je kolmý směr tvorby na hlavní napětí a zvětšení objemu tělesa. Vlivem vzniku crazingu může docházet ke snížení T_g . To má za následek snadnější přeskupování molekulových segmentů při tvorbě puklin. Crazing vzniká postupně působením smykové mikrodeformace na povrchové vady. Z morfologického hlediska jej lze pozorovat ve formě plochých disků o tloušťce $10 - 100\text{ nm}$. Působením dlouhodobého statického i cyklického namáhání může crazing dosahovat délky i několika milimetrů. Zvětšení puklin pak vede ke zpevnění fibril a změnám chování při deformaci crazingu. Jakmile napětí překročí pevnost fibril, dochází k iniciaci otevřené trhliny. Může však nastat i případ, ve kterém crazing naopak brání rozvoji trhlin tím, že se vytvoří před čelem trhliny a spotřebuje energii potřebou pro další růst trhliny. [2, 12, 18, 19]

2.4.1 Vliv teploty

Vlivem teploty mohou polymery vykazovat smluvní pracovní tahové diagramy specifické křehkým materiálům nebo materiálům tvárným. Pro křehký polymer bude jeho charakteristikou mez pevnosti, kdežto u tvárných mez kluzu. Byla stanovena tzv. tranzitní teplota T_b , která je hranicí tvárného a křehkého lomu. Ovlivnit tranzitní teplotu lze například vrubem. V tomto případě buď T_b stoupá, protože rychlost deformace v kořeni vrubu stoupne. S opačným případem se setkáme zatěžováním tlakem (pokles T_b). Nejnižší T_b mají poly-

mery s pružnými a silně ohebnými řetězci – PC, PET, PE, PTFE. Na druhou stranu pryskyřice využívané v kompozitech mají vysokou přechodovou teplotu díky svému zesíťování.



Obr. 11 Vliv teploty na modul pružnosti [18]

Pro názornost vlivu teploty je vhodný obr. 11, na kterém je patrné razantní snížení modulu pružnosti s rostoucí teplotou. Samozřejmě důležitá je vzájemná poloha teploty skelného přechodu a teploty vzorku, protože se například termoplast může dostat do plastické-kaučukovité fáze.

Kritériem cyklické zkoušky je také posouzení teploty vzorku. Výše je popsáno viskoelastické chování, které je silně závislé na teplotě. Aplikací cyklu na vzorek se v něm akumuluje energie, což se projeví rozdílnou mechanickou hysterezí (křivka se nevrátí do původního bodu, ale kousek vedle). Tato mechanická práce se projeví zvýšením teploty. U kovů nepůsobí záporně, ale díky nízké konduktivitě polymerů se teplo nedostatečně odvádí do celého objemu, a pak dochází ke změně mechanických vlastností podstatně ovlivňující výsledky zkoušek. Další záporný bod je v možném creepu a toku materiálu. Na základě právě popsaných důvodů odvozujeme frekvenci kmitání a případnou temperaci. Uhlíkové kompozity díky vodivosti uhlíku částečně teplo odvádějí, ale jak známo sklo i aramid jsou také izolanty a jevy disipovaného tepla se projeví. [18, 19]

2.4.2 Mechanika lomu plastů

Molekulová teorie se zabývala iniciací neboli nukleací trhliny. V této části jsou popsány účinky vnějších sil na již vzniklou poruchu, tzn. předpokládáme trhlínu o velikosti 1 – 10 μm . Lomová mechanika se tedy nezabývá vznikem trhliny, ale věnuje se jejím důsledkům, v souvislosti se strukturou materiálu a odlišným šířením se trhlín pro dané materiály.

K popisu využijeme Griffithova energetického kritéria. Předpokládáme prasklinu délky $l = a$ mající jednotkovou délku v ose z . Trhlina vyvolá na svých okrajích tahové napětí σ , a pak můžeme vyjádřit polohovou energii w_p (pro porušené těleso) jako:

$$w_p = w_o - \Delta w_e + 2\gamma_o \quad (5)$$

kde w_o ... elastická energie tělesa bez trhliny [J]

Δw_e ... ztráta energie [J]

γ_o ... povrchová energie trhliny [J]

Vztah můžeme zjednodušit, pokud má trhlina zanedbatelnou délku proti rozměrům tělesa. w_p se pak bude měnit s velikostí trhliny až do kritické délky trhliny l_c , kdy w_p bude maximální ($l_c = 2E\gamma_o/(\pi\sigma^2)$). Rostoucí trhlina zmenšuje w_p , protože se energie spotřebovává na vznik nových ploch. Nejčastěji se Griffithovo kritérium vyskytuje ve tvaru:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_{ef}}{\pi l}} \quad (6)$$

kde σ_c ... kritické napětí pro šíření trhliny [MPa]

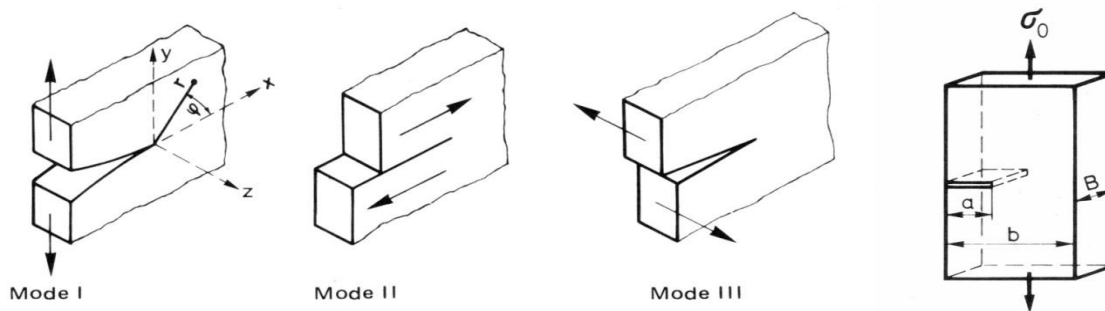
l ... délka trhliny [m]

E ... modul pružnosti [MPa]

γ_{ef} ... efektivní energie trhliny [Jm⁻²] (PC 2400 Jm⁻², reaktoplasty 200 – 250 Jm⁻²)

zahrnuje vytvoření a deformaci crazingu i disipovanou energii

Polymery se posuzují dle známé lineární lomové mechaniky se zahrnutím úprav respektující plastické deformace trhliny. Vycházíme tedy z předpokladu, že každé iniciační místo je bráno jako vrub. [2, 20]



Obr. 12 Zátěžové módy trhlin: I tah, II rovinný smyk, III smykové napětí v prostoru, vlevo rozměry tělesa použité v textu [18]

Popis jednotlivých napětí na čele trhliny je v celku složitý, a proto se zavedl součinitel intenzity napětí K . Ten charakterizuje intenzitu napětí v okolí čela. Můžeme ho vyjádřit jako:

$$K_I = \sigma_o \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{b}\right) \quad (6)$$

s tím, že a je délka trhliny a ostatní symboly jsou patrné z obr. 12, kromě $f(a/b)$, která vyjadřuje opravný faktor zahrnující způsob namáhání. Rovnice (6) je platná pro zatěžující mód I, tedy tahové namáhání. Pro posouzení mezních stavů je potřeba stanovit kritickou velikost intenzity napětí K_c . Určuje se pro každý materiál zvlášť a tvoří tak materiálovou charakteristiku. K_{IC} se označuje jako lomová houževnatost materiálu. Pod touto kritickou hodnotou se v materiálu nebudou šířit trhliny. [2, 20]

Druhým posudkovým aspektem lomu je hnací síla trhliny G , v mezním kritickém stavu označená G_c . Je to síla, která působí na čelo trhlinky. Energie potřebná k jejímu zvýšení se odebere buď elastické energii tělesa nebo se navýší působením vnějších sil. Existuje přímý vztah mezi lomovou houževnatostí a hnací silou v podobě:

$$G_c = \frac{(1 - \nu^2)K_c^2}{E} \quad (7)$$

Vztah (7) je platný pro rovinnou deformaci. Hodnota G jak vidno, závisí na poissonově konstantě ν a je nepřímo úměrná modulu pružnosti E . Z toho plyne, že je také závislá na teplotě a čase stejně jako je na teplotě a čase závislá hodnota E . G je v podstatě elastická energie potřebná k nárůstu trhliny o jednotku délky. Pro porovnání rozmanitosti hodnot je vhodná tab. 14.

Tab. 14 Hodnoty lomové houževnatosti a hnací síly trhliny plastů [20]

Materiál	K_{IC} [MPa m ^{1/2}]	G_{IC} [KJ m ⁻²]
EP	0,5 – 1,7	0,08 – 0,7
UP	1,2	0,04 – 0,44
PVC	1,9 – 5,6	0,8 – 10
PC	2,3 – 10	1,5 – 8
ABS	-	1 – 50
PE	1,7 – 4	1,3 – 14,2
PA	2,3 – 10	4,14 – 8,8

Posudky rychlosti šíření trhlin se zabýval Paris a formuloval vztah (8) pro rozvoj poruch při cyklickém namáhání. Je analogický kovům, ale hodnoty exponentů n jsou v případě polymerů vyšší než u kovů (n závisí na K_{IC}).

$$\frac{da}{dN} = A \Delta K_I^n \quad (8)$$

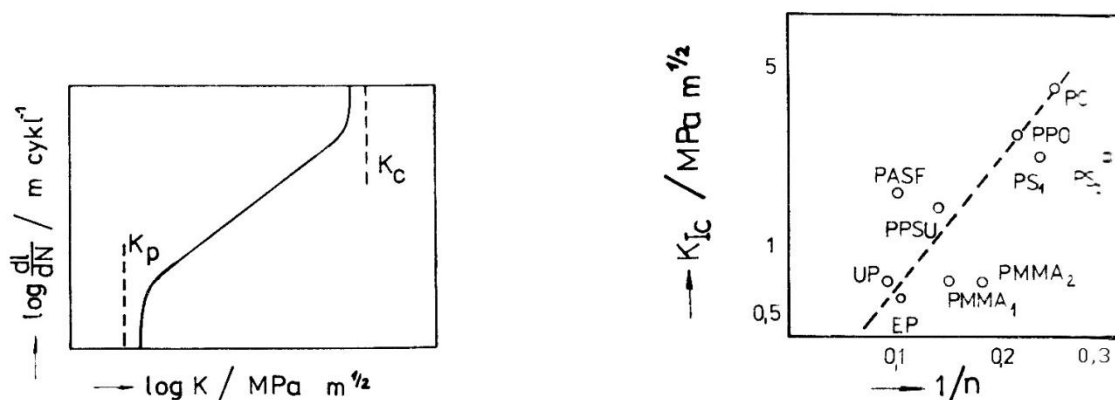
Kde: A, n ... materiálové konstanty [-]

N ... počet cyklů [-]

a ... délka trhliny [m]

K_I ... lomová houževnatost [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$]

Na obr. 13 vlevo je patrná rychlost šíření únavové trhliny. Pod K_p je rozvoj zastaven, ale postupným zvyšováním součinitele intenzity napětí rychlost roste, až při limitním přiblížení ke kritické hodnotě rychlost velmi razantně stoupne.



Obr. 13 Rychlost šíření trhliny vlevo a závislost Parisova exponentu na lomové houževnatosti vpravo [20]

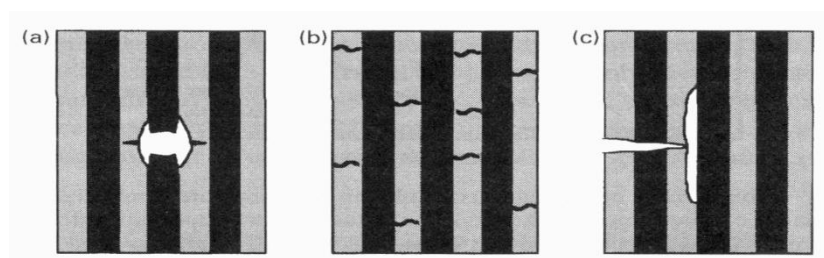
V technické praxi je výhodný popis počátku šíření trhlin. Tento stav vystihuje upravený Parisův vztah:

$$\frac{da}{dN} = A(K_I^\lambda - K_{Ip}^\lambda) \quad (9)$$

Použití symbolů je obdobné vztahu (8) s tím, že λ je materiálová konstanta a K_{Ip} je prahová hodnota, jejíž význam je patrný z obr. 13 a je menší než K_I . [2, 20]

2.4.3 Mechanika lomu kompozitů

Základním problémem v posuzování a šíření lomu je heterogenita kompozitu. Poruchy tedy nastávají zvláště ve vláknu a zvláště v matrici. Nicméně platí pravidla, že vlákna musí být pevnější než matrice a vlákno by se mělo porušit dříve než matrice. Systém poruch je tedy o něco složitější než u klasických polymerů. Existuje několik typů rozvoje trhlin, které jsou znázorněny na obr. 14. Podle výše zmíněných pravidel by se nejdříve mělo porušit vlákno. Pokud k tomu dojde, pak se zatížení přenáší skrze matrici na další podélná vlákna a kompozit se neporuší. Z toho plyne, že je velmi důležité, aby adheze byla na mezivrstvě matrice/vlákno optimální a byl zajištěn přenos napětí. Pokud tomu tak není, dojde po porušení vlákna k poklesu pevnosti. Na druhou stranu vysoká adheze může být příčinou snížené pevnosti v tom smyslu, že při překročení určité hodnoty smykového napětí na mezivrstvě se trhliny budou šířit skrze matrici a budou vyvolávat lomy dalších vláken. Ideální by byl kompromis mezi nízkou adhezí v okolí porušeného vlákna a středně vysokou adhezí ve zbylém objemu.



Obr. 14 Mechanizmy poruch FRP a) lom vlákna b) praskání matrice c) Postup trhliny v mezivrstvě matrice/vlákno [5]

Krátké vlákna mají ideální vyztužující účinek při kritické délce. Překročením této délky vlákna v matrici začnou praskat, kompozit se bude do určité hodnoty zpevňovat do doby, než vlákno nedosáhne své kritické délky. Na koncích vláken se koncentruje napětí, které může působit jako místo iniciace trhliny.

Stejně jako v předchozím případě polymerů budeme posuzovat odolnost materiálu proti vzniku trhliny intenzitou napětí K a rychlostí šíření trhliny G . Rozdíl spočívá v odlišném přístupu, protože u kompozitu nelze očekávat, že se trhlina bude šířit prostým zvětšením délky. To proto, že se G neuvolňuje stejně rychle v longitudinálním a transverzálním směru. Ideální pro popis je šíření trhlin např. ve směru vláken nebo mezi vrstvami. Na základě testu byl stanoven vztah pro jednosměrně vyztužený kompozit:

$$K_{Ic} = \frac{F_{max}}{h \cdot \sqrt{b}} \cdot Y \left(\frac{a}{b} \right) \quad (10)$$

kde Y ... korekční faktor [-]

a ... délka praskliny [m]

b, h ... šířka a tloušťka vzorku [m]

F_{max} ... maximální tahová síla experimentálně zjištěná [N]

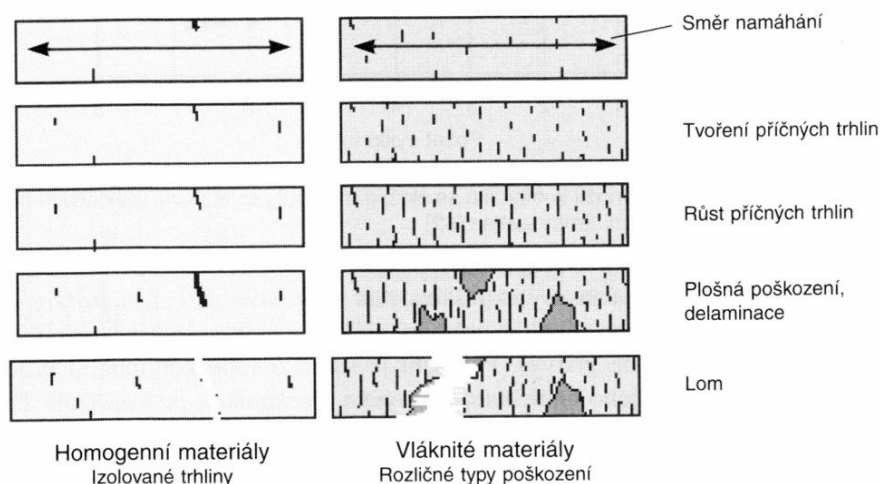
Analogicky bude vypadat rychlost šíření trhliny. Ta je v následující podobě:

$$G_{Ic} = \frac{A_i}{b \cdot \Delta a_i} \quad (11)$$

kde A_i představuje práci na rozvoj trhliny a Δa_i je délka rozvoje.

Dynamické zatížení v kompozitech vede k poruchám ve větším objemu a existuje možnost zastavení trhliny o sousední pevnější materiál (vystihuje obr.15). Typy poruch vláknových kompozitů se dají shrnout do následujících 4 bodů.

- porucha adheze na mezivrstvě vlákno/matrice
- trhlina matrice
- lom vlákn
- únavová delaminace



Obr. 15 Rozdíl mezi kompozitem a homogenním materiálem pod dynamickým zatížením [5]

Doba vzniku jednotlivých poruch závisí na vlastnostech kompozitu a díky anizotropii i směru zatěžování. Bohužel nejsme schopni obecně stanovit zákonitost porušování, protože únavové poruchy vznikají spolu s ostatními interakcemi. [5]

3 FRAKTOGRAFIE PLASTŮ A KOMPOZITŮ

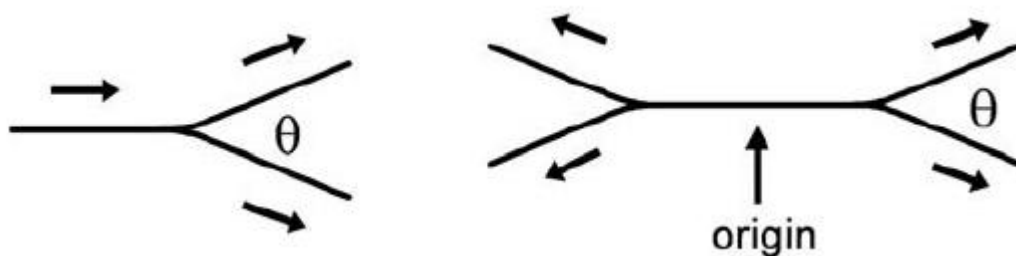
Fraktografie je technikou posudku lomové plochy za účelem získání informací o vzniku a způsobu lomu. Každý lom má své charakteristiky, ze kterých se vyvozují závěry.

Polymery se chovají viskoelasticky. S tím vyvstává otázka, jaký vliv má působení zatížení v čase, jedná-li se o jeho velikost nebo mód (dynamický, statický). Jednodušší popis skýtají zesíťované polymery. Jejich struktura bývá tužší, křehčí a jejich chování při krátkém zatížení můžeme přirovnat známým materiálům, tedy i lineární lomové mechanice. Pokud je zatížení dlouhodobější musíme uvažovat relaxaci a creep. Opakem budou termoplasty, u kterých hraje roli podíl krystalické fáze, jinak řečeno fázové stavy. Tyto stavy budou vysoce závislé na teplotě. To je další z důvodů složitosti popisu lomu v plastech.

Při cyklickém zatěžování polymer disipuje teplo, které má nezanedbatelný vliv právě kvůli špatné teplotní vodivosti. Potom se musíme rozhodnout, jestli byl lom způsoben účinkem namáhání nebo změknutím materiálu. Pokud disipované teplo zanedbáme, bude růst trhliny souviset pouze s amplitudou a frekvencí kmitání. [4, 18]

3.1 Šíření trhliny

Přestože se v materiálu nachází velká diskontinuita (např. vakance), nemusí to znamenat, že se z ní bude šířit trhlina tehdy, jestliže se nenachází v místech s největším namáháním. Obecně platí, že se trhlina šíří kolmo na směr hlavního napětí. Trhlina se v průběhu šíření může rozdvajovat i větvit do menších trhlinek. Konečná rychlost šíření trhliny v mnoha případech znamená jejich rozdělení pod určitým úhlem (např. mezi dvěma děleními lze očekávat iniciaci trhliny)



Obr. 16 Větvění trhliny s určením iniciace [4]

Necháme-li vzorek plastu cyklicky zatěžovat, můžeme pozorovat po určitý čas částečnou absorpci poškození. Dochází tak k místnímu zvýšení teploty, které může vést až k plas-

tizaci, případně transformaci vnitřní struktury. Ve finální fázi dojde ke skokovému růstu lomu v důsledku vyčerpání místní plasticity.

V případě kompozitů, tedy heterogenních materiálů, jejich mechanické vlastnosti závisí na více parametrech. Především jsou to vlastnosti matrice, její podíl v kompozitu a typ vyztužení (délka a uspořádání vláken). Lom v kompozitech můžeme rozdělit následovně:

- lom matrice
- lom vlákna
- vytažení vlákna
- separování vlákna
- vzpěr vlákna
- vybočení vlákna

Hodnotícím parametrem poruch je místní deformace do lomu ε' , nikoli napětí. Průměrná hodnota je 0,25 % (platí mezi matricí a vláknem – tzv. mezipovrch). Hodnota prodloužení do lomu ε' je například u uhlíkového vlákna asi 1 % a u skelného vlákna dokonce 4 – 5 %. Iniciale trhlin ve vláknových kompozitech je ve většině případů způsobena rozdílem Poissonových konstant matrice a vyztuže. U krátkých vláken (příp. částic) se uplatní navíc iniciace prasklinek na jejich koncích. [4]

3.2 Fraktografie

Fraktografie je obor zabývající se identifikací příčin lomu a jeho analýz. Dostáváme tak kvantitativní informace o podmínkách zatížení. Fraktografie zkoumá fragmenty s cílem určit materiálové vlastnosti a podmínky vedoucí k lomu. Lze ji také definovat jako metodu pro vytvoření charakteristik lomu.

Základním principem faktografické analýzy je zkoumání povrchu lomu a zlomených částí. V některých případech nemusíme zkoumat celý lom, ale pouze lomové čáry, které jsou pro analýzu dostačující. [4]

3.2.1 Nástroje faktografické analýzy

Lze odvodit, že analýza probíhá vizuálně lupou, či mikroskopicky. S výhodou se využívají různé typy mikroskopů, mezi nimiž vynikají elektronové mikroskopy. Při zaměření analýzy na plasty, případně kompozity s polymerní matricí, musíme uvažovat s nevodivostí

zkoumaných materiálů. Proto se povrchy nejprve ošetřují tenkou vrstvou vodivé látky (sprašování hliníkem, zlatem nebo uhlíkem). [4]

- *Optický profilometr*

Tyto přístroje měří členitost povrchu v trojrozměrné rovině od 0,1 mm výše. Měření probíhá bezkontaktně a jeho účinnost lze zvýšit použitím halogenové žárovky. Princip spočívá v kombinaci světla odraženého a světla z referenčního povrchu. Tímto se vytvoří proužky, které se dále zpracovávají digitálně s použitím softwaru. Dostaneme souhrnný záznam diferencí povrchu v podobě stínovaného reliéfu.

- *Konfokální rastrovací světelný mikroskop*

Jedná se o druh světelného mikroskopu. Osvětlení vzorku je soustředováno do malého bodu, často se využívá laseru. Odražené světlo je zesílené a následně upravené v počítači. Produktem je trojrozměrná mapa povrchu, ve které lze dodatečně dobarvovat změny výšky. Výhodou tohoto přístroje je schopnost identifikovat i větší výškové rozdíly. Dosahuje rozlišení asi 0,25 μm a díky rychlému snímání lze pozorovat i šíření lomu.

- *Ultrazvuková fraktografie*

Využívá kontinuálních elastických vln, které na povrchu vzorku vytváří vlnky. Ze vzdálenosti těchto vlnek mezi sebou a frekvence lze vypočítat rychlost šíření se lomu. [4]

3.2.2 Charakteristiky povrchu lomu

Počátek analýzy spočívá ve vizuální kontrole přelomeného vzorku. Znaky jako větvení a rozšíření lomu vypoví o místě vzniku trhliny a mohou poskytnout informaci o příčině lomu, jeho energii i rozložení napětí. Například víme, že křehký lom iniciuje v jednom místě, kdežto při rázovém zatížení se iniciace může projevit ve více místech najednou.

Hodnoty napětí ve zlomeném vzorku lze zpětně určit z tzv. fragmentačních znaků. To jsou v podstatě oblasti vymezené větvením trhliny. Platí zde jednoduchá analogie. Čím je napětí nižší, tím je i menší energie, větvení nebudou tak rozsáhlá a vznikne i méně fragmentů. Totéž platí i obráceně. U nízkoenergetických lomů se může vyskytnout problém minima fragmentačních znaků a tím i znemožnění analýzy.

Povrchy lomů různých materiálů mají svá specifika, avšak na nich můžeme najít i znaky kolektivní. Lesklá plocha v místě vzniku lomu je označována jako „zrcadlo“. Rozměry se odvíjí od houževnatosti materiálu. Na zrcadlo navazuje oblast matná bez významnějších

rysů zvaná „závoj“. Zrcadlo a závoj vyobrazují stopy po pomalém šíření trhliny, na něž pak navazují hřebeny (obr. 17) a další prvky.



Obr. 17 Pohledy na lom s určením charakteristických znaků [4]

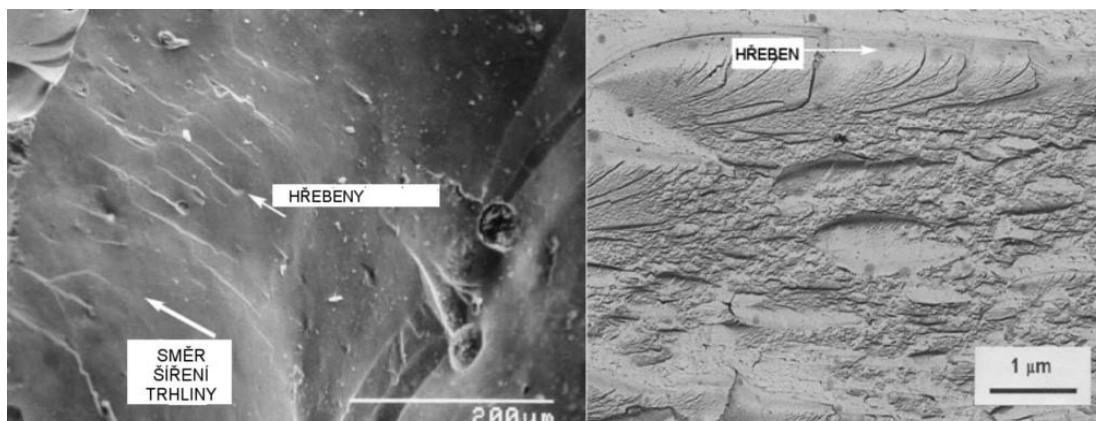
○ Zrcadla

V předchozím odstavci je popsána poloha zrcadla. Víme, že se trhlina šíří na okraj zrcadla z místa iniciace a zrychluje až na konečnou rychlost. Pro představu například ve skle byla změřena konečná rychlost na 1500 m/s.

○ Hřebeny

Jsou reliéfy povrchu, mimo rovinnou část, vyvíjející se ve směru trhliny. Jedním z případů hřebene, přesněji matného hřebene je závoj. Intenzita vykreslení reliéfu závisí na rychlosti šíření. Může dojít až k tzv. rychlostnímu hřebeni, kde rychlost šíření nabývá hraničních hodnot.

Jevem často pozorovaným i v plastech i v kompozitech jsou stočené hřebeny. V literatuře se můžeme dále setkat s názvy: delta stopy, říčky či striace, avšak všechny popisují tentýž jev. Jedná se o oddělené sekce lomu, pootočené v důsledku ohybu nebo zkroucení v hlavní ose napětí. Pomocí těchto charakteristik se lze zpětně dopátrat k původnímu vzniku lomu.

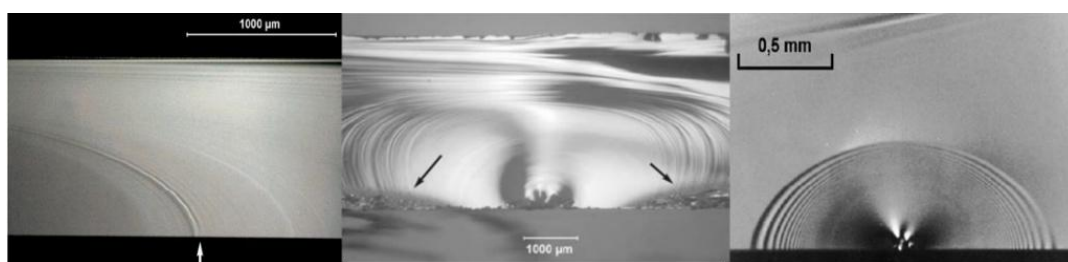


Obr. 18 Hřebeny nazývané též jako striace vlevo, hřeben v křemičitém skle vpravo [4]

○ *Wallnerovy čáry*

Znakem Wallnerových čar jsou žebra se zvlněným obrysem. Vznikají následkem pootočení osy hl. napětí, což vyvolá vybočení čela trhliny. Druhým způsobem vzniku je vybočení díky chybovým oblastem v materiálu. Takové oblasti jsou například póry, necelistvosti apod.. V terminologii bývají označovány jako záhyby a rozlišujeme několik typů.

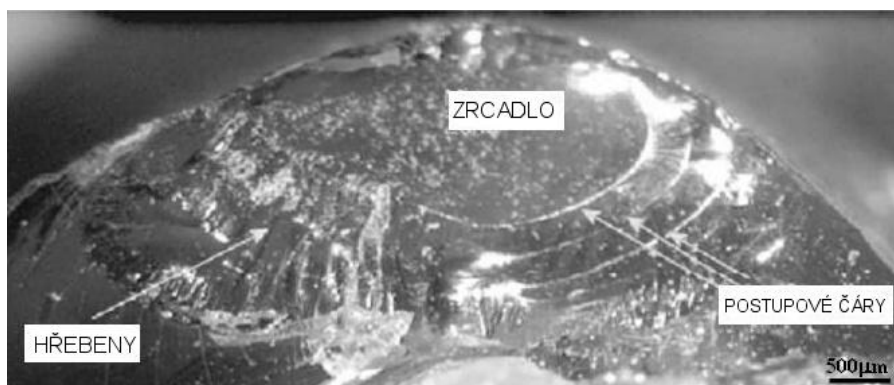
Wallnerovy čáry vypadají jako plytké výstupky vytvářející pásy zakřivené v závislosti na elastickém pulzu. Opticky lze rozlišit 3 typy W čar od primárních po terciární. Ve své podstatě se liší mírou zakřivení a původem vzniku. Primární a sekundární vznikají elastickým pulzem buď z čela trhliny nebo trhlinou samotnou. Pulzy mimo čelo trhliny dávají vzniku terciárním čarám. Díky známé vzdálenosti W čar jsme schopni vypočítat rychlost růstu trhliny. [4]



Obr. 19 Zleva primární, sekundární a terciární Wallnerovy čáry [4]

3.2.3 Fraktografie polymerů

Polymer je svou strukturou velmi odlišný od kovů. To však nebrání fraktografické analýze mechanického poškození, protože některé typy poškození jsou totožné (přetížení, rázy, únava). V lomech plastů pozorujeme obecné charakteristiky zrcadel, závoje i hřebeny.

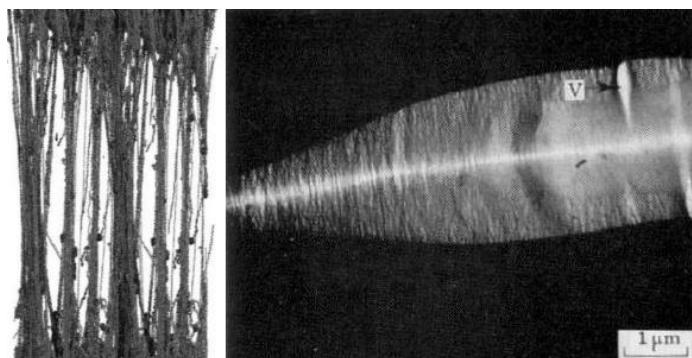


Obr. 20 Patrné charakteristické znaky v polymeru [4]

Z makroskopického hlediska můžeme lomy selektovat na křehký a tvárný stejně jako u kovů. Vznik těchto lomů je podmíněn mírou plastické deformace. U plastů je křehký lom podobný například sklu. Trhlina iniciuje v zrcadle, pomalu roste a zanechává pouze hladký povrch. Zrychlení růstu signalizuje přechod do matné části závoje (obr. 20). Z hlediska mikroskopického jsou už mechanismy složitější a při deformaci dochází k natahování řetězců. Následkem toho tvárný lom vykazuje pod mikroskopem deformaci vláken. U plněných polymerů dochází ještě k sofistikovanějšímu ději – crazingu. Je to rozpraskání polymeru mezi hranicemi sférolitů tzn., že se uplatňuje u semikrystalických polymerů.

Lomové vlastnosti polymerů zatím nedokážeme určit s takovou přesností jako je tomu u kovů. Vše je způsobeno rozmanitostí molekulárních struktur, které jsou přímo odpovědné za lomové chování a právě tyto vztahy nejsou doposud uspokojivě vysvětleny.

Výše bylo řečeno, že reaktoplasty lze v určitém případě popsat lineární lomovou mechanikou. U termoplastů se vznik lomu a jeho šíření spojuje s vytvořením crazingu, který je považován za počáteční fázi trhliny a teprve potom pokračuje další šíření. Tento poznatek byl získán ze zatížení polymerů pod teplotou skelného přechodu. V amorfních termoplastech dojde v malé tloušťce k rozpraskání (kolmo na směr zatížení), kde se vyskytují dutiny a vlákna ve směru napětí. U semikrystalických polymerů se děj aplikuje ve větším měřítku.

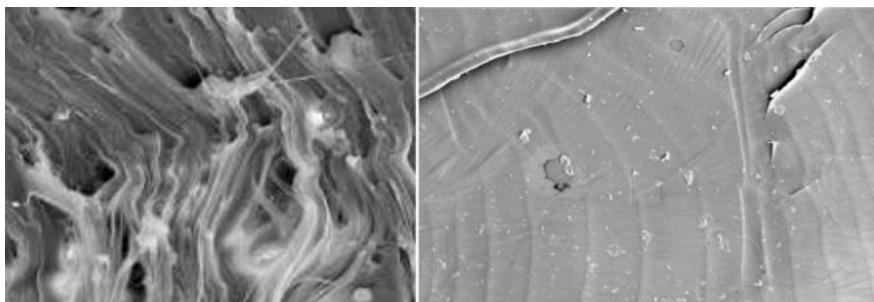


Obr. 21 Crazing [4]

Velikost crazingu závisí na teplotě iniciace vzhledem k teplotě skelného přechodu. Obecně platí, že se studium lomu v termoplastech posuzuje vůči crazingu a jeho růstu. Crazing můžeme pozorovat i v reaktoplastech v podobě puklin na površích nebo hranách vzorků.

Počet cyklů při únavové zkoušce znamenal u kovů zanechání určité vzdálenosti striací na vzorku. U polymerů je toto pravidlo modifikováno do podoby násobků cyklů. Vzdálenost striací se dá funkčně svázat s násobky cyklů. Opět je to způsobeno lokálním zvýšením teploty vůči poloze skelného přechodu.

Semikrystalické polymery přináší do fraktografie větší problematiku posouzení lomu, a to díky své složitější struktuře. Při zatěžování totiž růst nemusí probíhat sousledně kvůli fázovým transformacím. Na základě tohoto faktu se na povrchu lomu mohou objevit schodky. Ani určení křehkosti lomu není jednoduché. Křehký lom nevykazuje ani při růstu trhliny plastickou deformaci. Tu lze pozorovat jen částečně po obvodě crazingu u houževnatého lomu. [4]

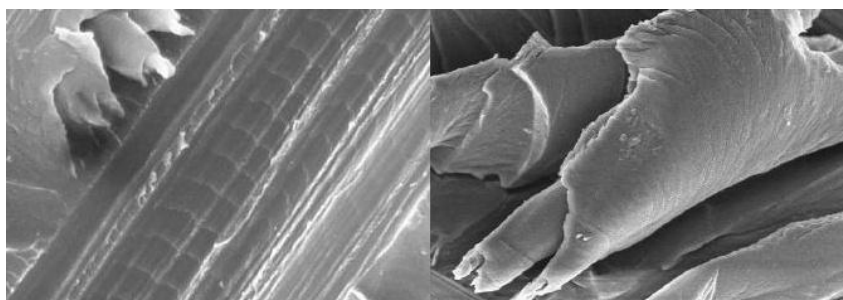


Obr. 22 Vlevo tvárný lom PE s deformací vláken a křehký lom LDPE s viditelnými Wallnerovými čarami vpravo [4]

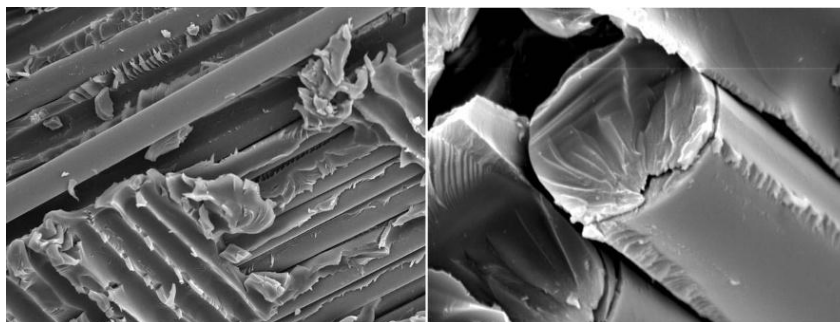
3.2.4 Fraktografie kompozitů

Kompozity se od slitin odlišují technologií výroby, protože kompozity se mísí mechanicky. Obojí jsou však heterogenní. Kompozity v sobě skrývají nejméně 2 Poissonovy konstanty (pro každý materiál různé deformační vlastnosti), které mají za následek vznik trhliny a následného lomu.

Při fraktografické analýze kompozitů se zaměřujeme nejen na velikost napětí způsobující lom, ale také na působení směru napětí. Nejčastějším případem poruchy bývá odštěpení výztuže od matrice. Delaminace zanechá v matrici charakteristiky, podle nichž lze posoudit pevnost vazby matrice/výztuž. U výztuží se zaměřujeme na povrch i příčný řez (uhlíková vlákna bývají vrstvená).



Obr. 23 Dekoheze mezi matricí a vláknem, vpravo rozlupování vlákna [4]



Obr. 24 Delaminace polymerního kompozitu a lom v uhlíkovém vláknu téhož kompozitu [4]

Lom kompozitů nemusí nevyhnutelně znamenat lom vláken. Přestože vlákna jsou ve většině případů pevnější a křehčí než matrice, nemusí vždy dojít k jejich porušení a trhlina se bude šířit skrze matrici. Na obr. 24 je lom matrice i uhlíkového vlákna způsoben cyklickou únavou. V prvním případě je vyobrazen lom vlákna s viditelným místem vzniku trhlinky i následným šířením (hřebeny ve směru šíření). V druhém případě se jedná o tzv. dekohezní lom mezi vláknem a matricí. Je specifikován striacemi a příčnými hřebeny. Významnou roli tedy hraje uspořádání vláken. Nezanedbatelný vliv má samozřejmě technologie výroby. Někdy se totiž na vlákna nanáší vrstvička pro lepší smáčivost, čímž se zlepší přilnavost pryskyřice. Tento aspekt se může projevit i v posuzování lomu, kdy se reaktoplast od vlákna oddělí, ale smáčivá vrstvička ne. Například kompozit v podobě polymeru plněného jílem je specifický v šíření trhliny, protože částice jílu její rozvoj zpomalují a brzdí. [4]

4 VÝSLEDKY ZKOUŠEK EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI

Úkolem této sekce je přiblížení postupů při přípravě, provádění a vyhodnocování zkoušek cyklického namáhání. Podkladem jsou protokoly zkoušek provedených na zahraničních univerzitách.

4.1 Vysokocyklová únava kompozitu s uhlíkovými vlákny

Projekt se uskutečnil v prostorách Kalifornské univerzity v USA a jeho cílem bylo posouzení vlivu uhlíkových nanovláken. Testovanými materiály byly dva typy kompozitů vyztužených skelnými vlákny (průměr 0,28 mm) a uhlíkovými nanovlákny (CNT). Jako matrice byla v prvním případě použita epoxidová pryskyřice EPON 826 a ve druhém epoxid Epikure 3234. Do matrice bylo vmícháno 1 hm. % CNT. Výroba kompozitu proběhla morkou formou s vytvrzováním při 80 °C a 580 kPa. Z takto připravené desky byly vyřezány vzorky ve tvaru lopatek dle ASTM. Oba materiály byly testovány na servo-hydraulickém stroji Instron.

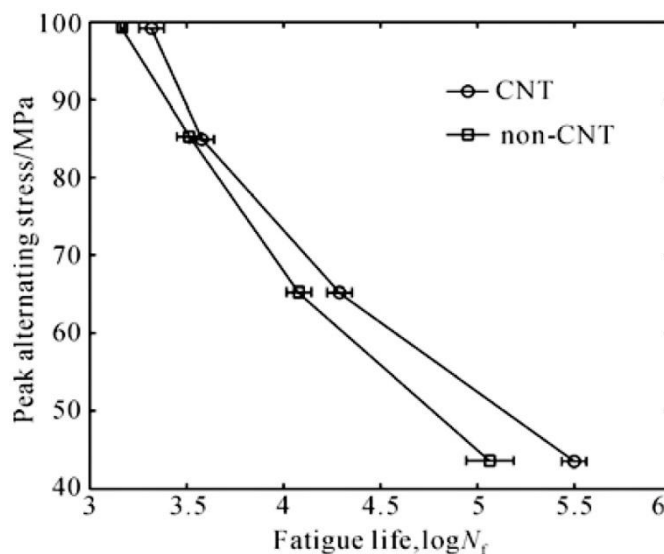
Nastavující parametry:

- namáhání tah – tah
- amplituda zatížení 70, 60, 45 a 30 % statické pevnosti
- druh cyklu pulzující $R = 0,15$
- frekvence 3 Hz

V první fázi byly provedeny na obou vzorcích tahové zkoušky, za účelem zjištění materiálových charakteristik, především mezi pevnosti. Z těchto dat byla vypočítána amplituda zatížení. Následoval samotný průběh cyklické zkoušky. [22]

4.1.1 Výsledky a diskuze

Únavovou životnost vzorků s přidáním CNT a bez CNT znázorňuje Obr. 25 v podobě Wöhlerovy křivky. Nárůst životnosti přidáním CNT byl pozorován na hranici 104 cyklů a výše. Tab. 15 porovnává životnosti čistého kompozitu a kompozitu s přídavkem CNT. Při cyklickém napětí 44 MPa a přídavku pouhého 1 hm% CNT došlo k trojnásobnému nárůstu únavové životnosti. Tento jev je vysvětlován tím, že pro kompozit s CNT je třeba velký počet nukleačních míst, aby mohl být zahájen růst trhlin. Dále se předpokládá, že velká hustota trhlinek v nano měřítku poroste pomaleji než malý počet mikrotrhlin většího měřítka.



Obr. 25 S-N křivka EPON 826 a EPIKURE 3234 [22]

Tab. 15 Výsledky životnosti vzorků [22]

Cyklické napětí [MPa]	Únavová životnost kompozitu s GF [cykly]	Únavová životnost kompozitu GF s CNT [cykly]	Faktor zvýšení životnosti
98	1473	2091	1,4
85	3238	3813	1,2
65	11488	18517	1,6
44	109055	316227	2,9

Tento experiment poukázal na bezvýznamný vliv CNT při statických zkouškách v tahu, kdy čistá pryskyřice s přídavkem CNT nevykazovala žádný posun mezi pevnosti. Naopak v oblasti vysokocyklové únavy má přidání CNT své významné opodstatnění v nárůstu životnosti. [22]

4.2 Cyklická únava polymerních nanokompozitů

Výzkum se zabýval studií únavového chování dvou polymerních nanokompozitů ve dvou poruchových módech: mechanické poruše epoxidového nanokompozitu a termálním změkčením polyamidového nanokompozitu. Dále se omezíme pouze na mechanické hledisko. Z předchozího výzkumného projektu by se mohlo zdát, že přidáním jakékoliv nanočástice dojde k rapidnímu nárůstu cyklické únavy. Bohužel tomu tak není ve všech případech, a proto se vlivem použité částice zabývali vědci z Austrálie.

Testovaný materiál byl kompozitem epoxidové pryskyřice Araldite F and Piperidine s výztuží v podobě nano-silikátu Nanopox F400 a nano částit pryže (nano-CSR) od firmy Kaneka Corporation. Tyto příměsi byly smíchávány v různém poměru dle Tab.16 .

Tab. 16 Poměry výztuží v kompozitu [21]

Značení kompozitu	Epoxid [hm%]	Nanosilica [hm%]	Nano-CSR [hm%]	Mez kluzu $\sigma_{0,2}$ [MPa]
S6	94	6	0	40,4
R6	94	0	6	41,2
R6S6	88	6	6	40
R10S10	80	10	10	37,8

Opět bylo použito mokrého postupu a vytvrzování za zvýšené teploty. Nejprve 0,5 h výdrže na 60 °C, následovalo vakuum -100 kPa po dobu 2 h a 80 °C a na závěr temperování pro odstranění pnutí na 120 °C 20 h. Poté se připravený vzorek nechal aklimatizovat 2 týdny v laboratorním prostředí. Po výrobním procesu byly z desek vyřezány ploché zkušební tělesa ve tvaru lopatek (rozměry dle ASTM). Tahové zkoušky byly provedeny na stroji Instron 5567 a zkoušky cyklické na elektromagnetickém stroji MTS 810. [21]

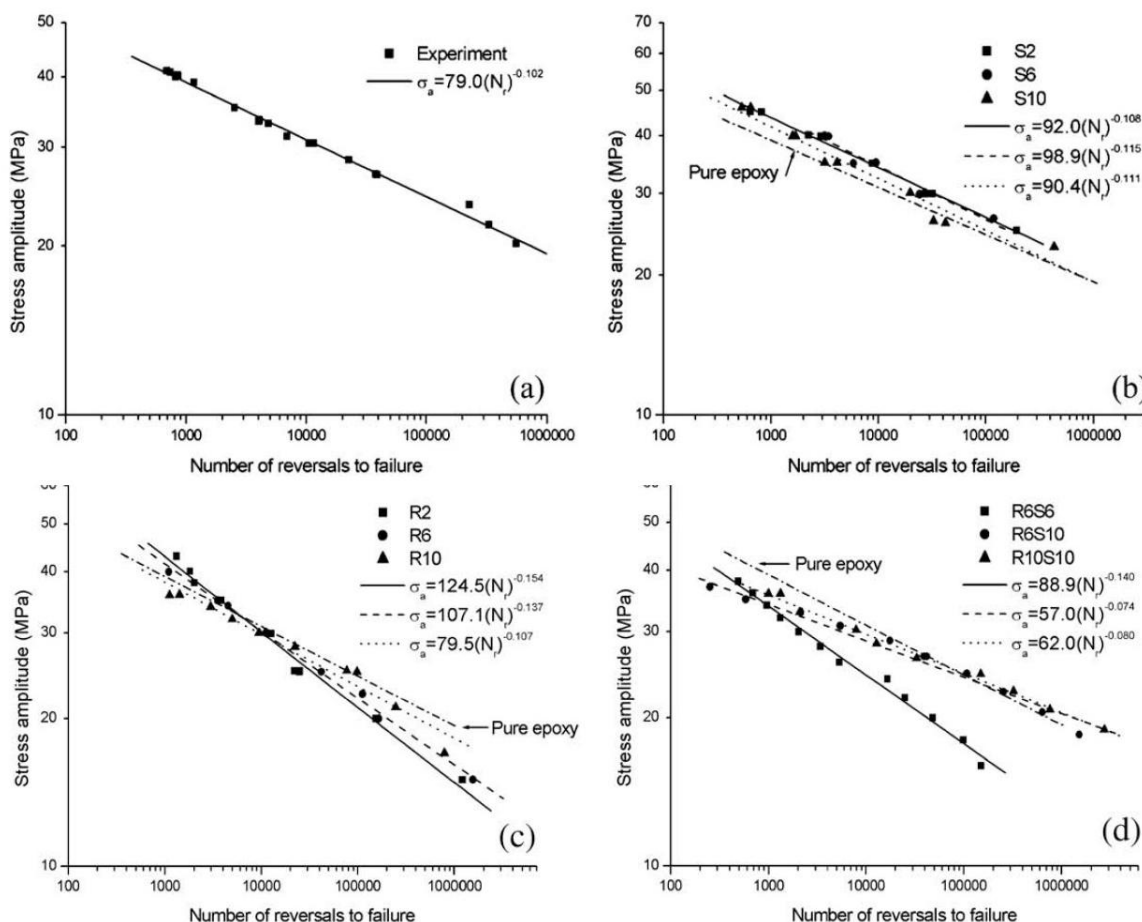
Nastavující parametry:

- namáhání tah – tlak
- frekvence 1 – 10 Hz
- druh cyklu střídavý sinusový $R = -1$
- amplituda zátěže 40 – 100 % smluvní meze kluzu

4.2.1 Výsledky a diskuze

Statické tahové zkoušky poukázaly u silikátového kompozitu na mírné zvýšení (asi o 2 MPa) modulu pružnosti, na druhou stranu pokleslo maximální protažení. Kompozit s příměsí pryže vykazoval naprosto opačné vlastnosti. Mírně poklesl (přibližně o 6 MPa) modul pružnosti a zvýšilo se protažení až o 5 %.

Vyhodnocování cyklických zkoušek probíhalo na základě Basquinova vztahu, tedy zjištěním středního napětí. Následující grafy znázorňují jednotlivé S-N křivky testovaných materiálů včetně výsledků Basquinova vztahu.



Obr. 26 Výsledky jednotlivých zkoušek [21]

Posouzením únavových křivek nanokompozitu siliky na obr. 26b dojdeme k závěru, že vzorek S2 vykazuje až o 145 % zlepšení únavové životnosti (při amplitudě zatížení 30 MPa). Mírnější zlepšení asi padesátiprocentní se projevilo u vzorku S10, ve kterém je 10 hm% nanočástic křemíku. Výsledky pryží plněných kompozitů jsou na obr. 26c. V oblasti zatížení 30 MPa jsou data limitována na úzký rozsah cyklů. Pod touto sekci dochází ke snižování únavové životnosti vzorků a vykazují až 70% zhoršení. Přídavek měkkých nanočástic pryže tedy nezpůsobí v oblasti nízkého zatížení zvýšení únavové životnosti kompozitu. Jako poslední vzorky byly testovány ternární kompozity s aditivou křemíku i pryže. Výsledky zkoušky byly vyneseny do grafu na obr. 26d. Komparací životností čisté pryže a zmíněného kompozitu, lze konstatovat, že je takový druh kompozitu nevhodný pro cyklicky namáhané aplikace. Pouze vzorek R10S10 (10 hm% siliky i pryže) měl okolo 20 MPa vyšší únavovou životnost oproti čisté epoxidové pryskyřici. Součástí projektu byla fraktografie povrchů zlomených vzorků. Například u vzorků S10, R2 či E byly patrné typické znaky lomu. Iniciace proběhla na povrchu a postupně vytvářela zrcadlo, Wallnerovy čáry a velmi výrazné hřebeny.

Závěrem lze vyzdvihnout zlepšení vlastností binárního kompozitu s nanočásticemi křemíku. Avšak nutno dbát na optimální plnění, které se ukázalo přibližně ve 2 - 3 hm% siliky. Při vyšším obsahu křemíku nebylo dosaženo tak výrazného zlepšení. Na druhou stranu projekt poukázal na fakt, že druh nanočástice je pro únavovou životnost rozhodující. Ani spojení v podobě ternárního kompozitu nepřineslo kýžený efekt zlepšení vlastností. [21]

Shrnutím poznatků teoretického rozboru lze konstatovat omezené množství zveřejněných informací o únavové životnosti kompozitních materiálů. Důvodem pro další výzkum je rozšíření informací se zaměřením na automobilový průmysl a všeobecně technickou praxi.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 ZADÁNÍ A FORMULACE OMEZUJÍCÍCH PODMÍNEK

Nedílnou součástí samotného testování vzorků je zkušební stroj. Bohužel Ústav výrobního inženýrství nedisponuje takovým zařízením, a proto jsme se s mým vedoucím práce prof. Letkem dohodli na vytvoření konstrukčního návrhu celého stroje s možností následné výroby. Stroj bude vytvořen ve 3D modeláři, včetně výrobních výkresů upínacích čelistí.

Hlavními cíly návrhu jsou:

- funkčnost
- účelovost
- jednoduchost
- přijatelná cena

Díky těmto omezením nebylo možné využít žádnou z platforem profesionálních zařízení od firem Instron či Zwick/Roell. Takové stroje se pohybují v cenové kategorii 1 mil. Kč a výše.

Další omezení tvoří zdroj hydraulického (případně pneumatického) tlaku, který by byl s výhodou použitelný pro servo-hydraulické zařízení. Použitím tlaku kapaliny bychom dosáhli větších sil a mohli tak testovat i velmi tuhé a rozměrné vzorky. I tato myšlenka byla zavrhnuta díky absenci hydraulického obvodu.

Směrem optimálního řešení je tedy elektromotor jako zdroj pohybu a mechanické převody, které mění rotační pohyb na posuvný. Tímto rozhodnutím byla splněna 1. fáze. Pointou další fáze byla formulace omezení stroje:

- měnitelná frekvence kmitu
- stavitelná amplituda výchylky
- možná změna asymetrie cyklu
- variabilita délky zkušebních vzorků

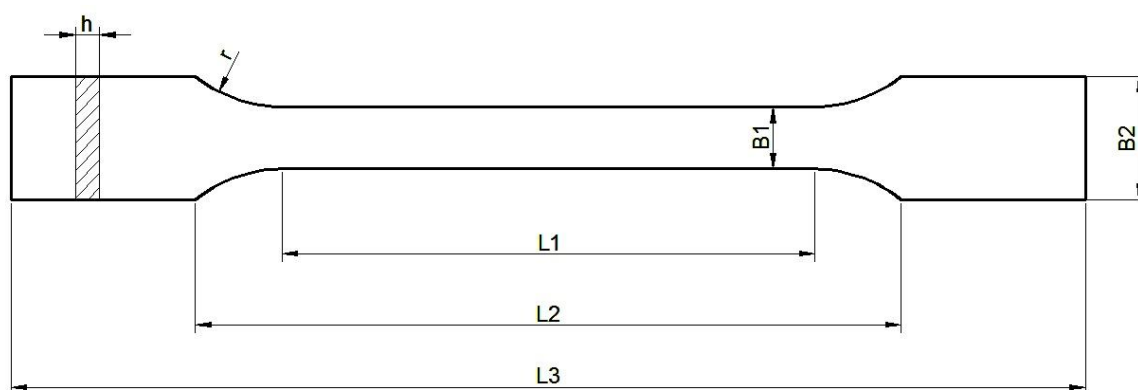
Zadání včetně omezujících parametrů bylo vytvořeno, tudíž jsem mohl přistoupit k samotnému modelovému návrhu.

6 KONSTRUKČNÍ NÁVRH ZKUŠEBNÍHO STROJE

Na základě omezení jsem se rozhodl pro 2 varianty řešení. První je sestava aktuátoru s pohybovým šroubem a řídicí jednotkou a druhou sestavu tvoří třífázový asynchronní elektromotor s excentrickým mechanismem a lineárním vedením. Přestože se aktuátor jeví jako elegantnější řešení jeho cenové rozpětí při požadovaném krouticím momentu je přibližně dvakrát větší než u druhé sestavy. Z tohoto důvodu jsem se vydal cestou standardního asynchronního motoru.

6.1 Výpočet omezujících parametrů

Důležitým krokem za vytvořením modelu byl výpočet potřebného výkonu motoru a dalších parametrů jako velikost kliky a namáhání ojnice v závislosti na druhu materiálu. Rozhodl jsem se optimalizovat stroj na doporučené vzorky tzv. lopatek dle ČSN EN ISO 10724 případně ČSN EN ISO 527-4 (rozměry viz následující tabulka) a jako etalonové materiály jsem zvolil kompozit vyztužený uhlíkovými vlákny představující horní mez zatížení (nejtužší materiál) a polyetylen jako materiál s nejnižší tuhostí (vlastnosti obou jsou uvedeny v tab. 17). Výpočet vychází ze statických vlastností materiálu, a pokud zohledníme, že cyklické zkoušky se provádí při zatíženích asi 70% (a níže) mezi pevnosti, jsou tyto výpočty asi o 30% naddimenzované.



Obr. 27 Primárně testovaný druh zkušebního tělesa

Tab. 17 Rozměry vzorku dle ČSN EN ISO 10724

TYP / ROZMĚR	A [mm]	B [mm]
L3	dop. 170	≥ 150
L2	104 - 113	106 – 110

L1	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
r	dop. 24 ± 1	dop. $60 \pm 0,5$
B2	$20,0 \pm 0,2$	
B1	$10,0 \pm 0,1$	
h	$4,0 \pm 0,2$	

Pro kompozitní materiály v podobě laminátů jsou doporučena zkušební tělesa v podobě obdélníku bez rozšířených konců s rozměry 150 x 25 x 4 mm. Upínací části dle doporučených rozměrů jsou 50 mm dlouhé.

Tab. 18 Mechanické vlastnosti vybraných materiálů [17]

Materiál	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Mez pevnosti v ohybu σ_{MO} [MPa]
PE	216	15
Uhlíkový laminát	230 000	2 500

6.1.1 Výpočet amplitudy

Na základě teorie ohybu vetknutého nosníku lze psát:

$$\delta = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (12)$$

Potřebnou sílu na porušení vzorku vypočítáme ze vztahu:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{F \cdot l}{\frac{1}{6}bh^2} \rightarrow F = \frac{\sigma_o \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot l} \quad (13)$$

Pro polyetylen (těleso 80 x 10 x 4 mm) bude výpočet následující.

$$F_{PE} = \frac{\sigma_o \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot l} = \frac{15 \cdot 10 \cdot 4^2}{6 \cdot 80} = 5 \text{ N}$$

$$\delta_{PE} = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot \frac{bh^3}{12}} = \frac{5 \cdot 80^3}{216 \cdot \frac{10 \cdot 4^3}{4}} = 74,07 \text{ mm}$$

Uhlíkový laminát (80 x 10 x 4):

$$F_{CF} = \frac{\sigma_o \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot l} = \frac{2500 \cdot 10 \cdot 4^2}{6 \cdot 80} = 834 \text{ N}$$

$$\delta_{CF} = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot \frac{bh^3}{12}} = \frac{834 \cdot 80^3}{230000 \cdot \frac{10 \cdot 4^3}{4}} = 11,6 \text{ mm}$$

Uhlíkový laminát (150 x 25 x 4):

$$F_{CF2} = \frac{\sigma_o \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot l} = \frac{2500 \cdot 25 \cdot 4^2}{6 \cdot 150} = 1111,1 \text{ N}$$

$$\delta_{CF2} = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot \frac{bh^3}{12}} = \frac{1111,1 \cdot 150^3}{230000 \cdot \frac{25 \cdot 4^3}{4}} = 40,76 \text{ mm}$$

Limitní parametry ze statického výpočtu jsou následující:

maximální zdvihová síla	1111,1 N
maximální výchylka	74,07 mm
minimální zdvihová síla	5 N
minimální výchylka	19,06 mm

6.1.2 Výpočet krouticího momentu motoru

Jak bylo řečeno výše, maximální parametry jsou platné pro statické podmínky. Při průběhu cyklických zkoušek se nastavují hodnoty nejméně o 30% menší, proto volím pro výpočet krouticího momentu motoru následující.

$$M_k = F \cdot r$$

$$F = 1000 \text{ N}$$

$$r = 11 \text{ mm}$$

$$M_k = 1000 \cdot 0,011 = 11 \text{ Nm}$$

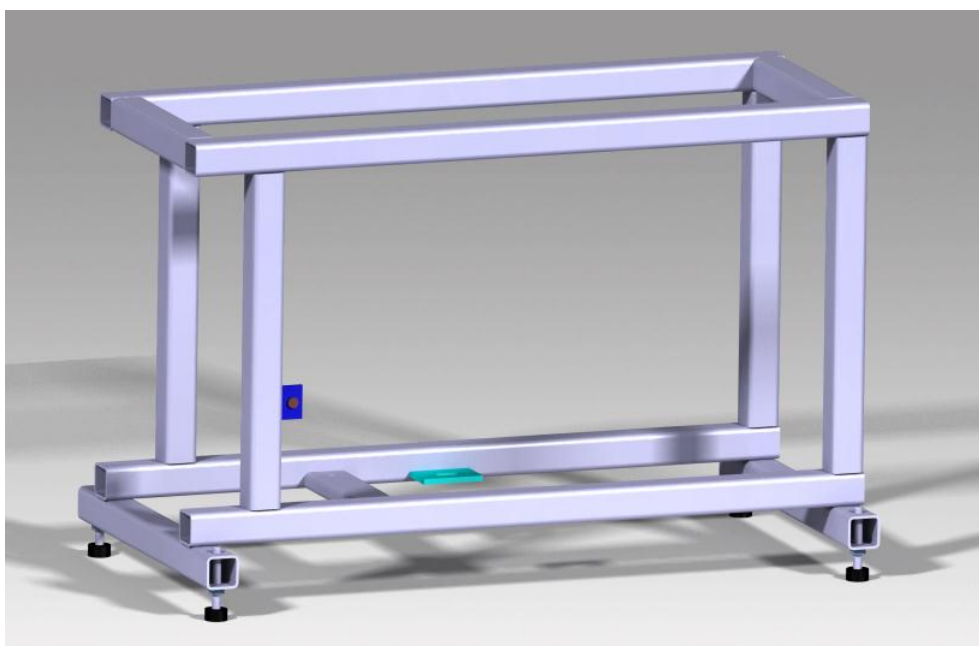
Je třeba zvolit elektromotor s krouticím momentem přibližně 11Nm. Předimenzování motoru by vedlo k navýšení ceny o několik tisíc korun.

6.2 Konstrukční řešení

Konstrukce vychází především z jednoduchosti a případné vyměnitelnosti součástí. Snahou bylo použití normalizovaných součástí, případně normálií nabízených v různých odvětvích.

6.2.1 Rám

Rám stroje tvoří ocelové uzavřené profily 30 x 30 x 2,5 mm, které jsou odolnější vůči únavě nežli plné tyče. Výjimkou jsou stojiny s rozměry 30 x 40 x 2,5 mm, pro zvýšení stability stroje. Jekly jsou spojeny nerozebíratelně – svary. Polohování a vyvážení stroje zabezpečují 4 šroubové stavěcí nohy s pryžovým zakončením, které je zvoleno za účelem tlumení vibrací. Na boční stěny rámu jsou přišroubovány plastové (příp. plechové) kryty. Čelní kryt s otvory má funkci větrání. Bezpečnostním prvkem proti úrazu způsobenému kmitající částí jsem navrhl transparentní kryt z PMMA nebo z PC. Ten je upevněn na horní stranu rámu pomocí magnetu, aby byla zajištěna rychlá a jednoduchá demontáž.



Obr. 28 Rám

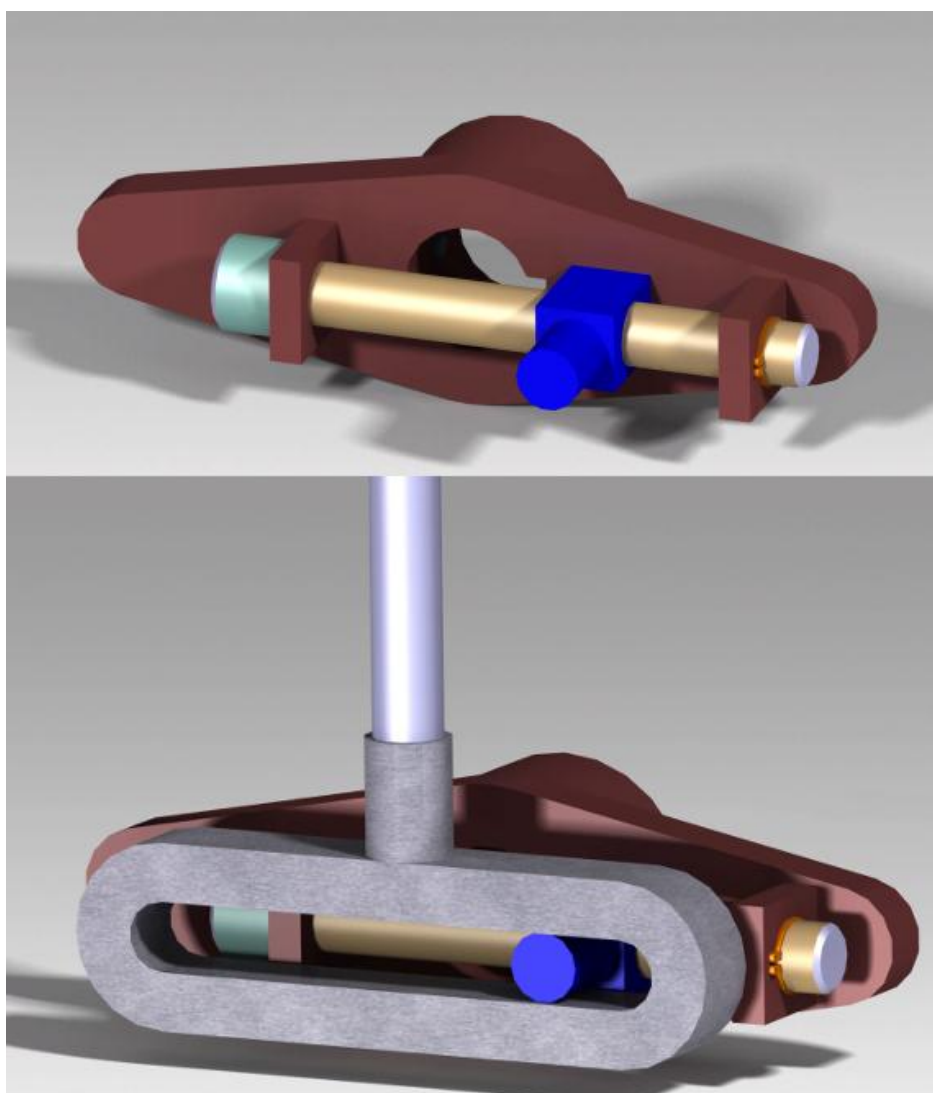
6.2.2 Motor

Dle výpočtu je zapotřebí motor s točivým momentem 11 Nm. Na základě toho jsem zvolil motor Siemens 1LA7096 – 4AA. Jedná se o třífázový čtyřpólový asynchronní motor s krouticím momentem 10,10 Nm, 1420 otáčkami za minutu a výkonem 1,5 kW. V patkovém provedení má motor osovou výšku 90 mm a je ustaven na rámu pomocí šrou-

bových válcových silentbloků tlumících vibrace. V závislosti na výkonu motoru je třeba volit frekvenční měnič, jehož cena roste s výkonem motoru a počtem fází.

6.2.3 Excentrický mechanismus

Převod rotačního pohybu motoru na lineární posuvný je zajištěn stavitelným excentrickým mechanismem. Na objímku jsou navařeny 2 kvádry s děrami uprostřed. Do těchto děr je vložen čep zafixovaný proti posunutí pojistným kroužkem. V pracovní části čepu je vysoustružen závit. Při otáčení čepu se pohybuje krychlová matice. Tvar této matice je patrný z obr. 29. Pootočení matice brání těsné uložení vůči objímce. Matice zasahuje do tvarovky, v níž je zašroubována ojnice. Otáčením čepu měníme polohu matice vůči ose otáčení motoru, a tím i amplitudu výchylky. Nevýhodou tohoto mechanismu je absence bezpečnostních prvků (prokluz). Eliminace případného přetížení motoru spočívá v dodržení maximálního krouticího momentu.



Obr. 29 Excentrický mechanismus

6.2.4 Lineární vedení

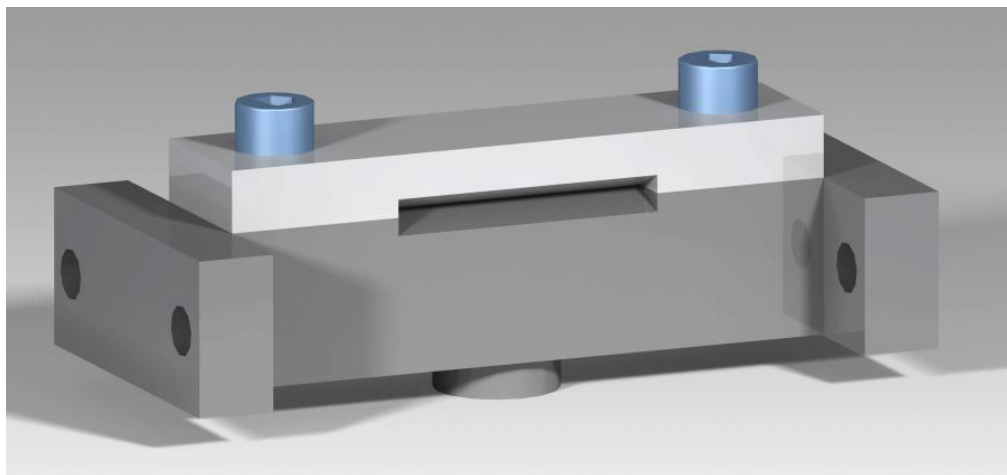
K přesnému vymezení pohybu slouží lineární vedení. Profilové tyče jsou přišroubovány k rámu stroje metrickými šrouby. Díry jsou překryty fólií proti vnikání nečistot. Tření mezi profilovou tyčí a vozíčkem je minimalizováno obíhajícími kuličkami uvnitř vozíčku. Důležité je dostatečné mazání. Vůle bočního pohybu je menší než 0,3 mm. Pojistkou proti nežádoucímu pohybu je kroužkové vedení, které také minimalizuje namáhání na vzpěr. Kompletní sestava lineárního vedení je normálí mnoha výrobců. V sestavě stroje je použito lineární vedení firmy CPC s rozměry vozíčku 60 x 110 mm a rozměry tyče 25 x 330 mm. Středící kroužek může být z oceli nebo se může použít kluzný středící kroužek jako normálie od CPC.



Obr. 30 Lineární vedení

6.2.5 Pohybová čelist

Slouží k upnutí testovaného vzorku. Spodní část je pevně spojena s vozíčky lineárního vedení čtyřmi šrouby. Ojnice je do čelisti vešroubována stejně jako do tvarovky. Horní přítlačná část je přišroubována do spodní. Svěrnou sílu určuje uživatel utažením šroubů. Šrouby by měly mít menší stoupání, aby bylo docíleno samosvornosti a šrouby se případnými vibracemi neuvolňovaly. Na obou čelistech je styčná plocha přibližně 350 mm², čímž je zajištěn plošný kontakt. Samozřejmostí jsou zaoblené hrany. Předcházím tak koncentraci napětí na nežádoucích místech. Komplexní sestava včetně výrobních výkresů je součástí přílohy.



Obr. 31 Pohybová čelist

6.2.6 Statická čelist

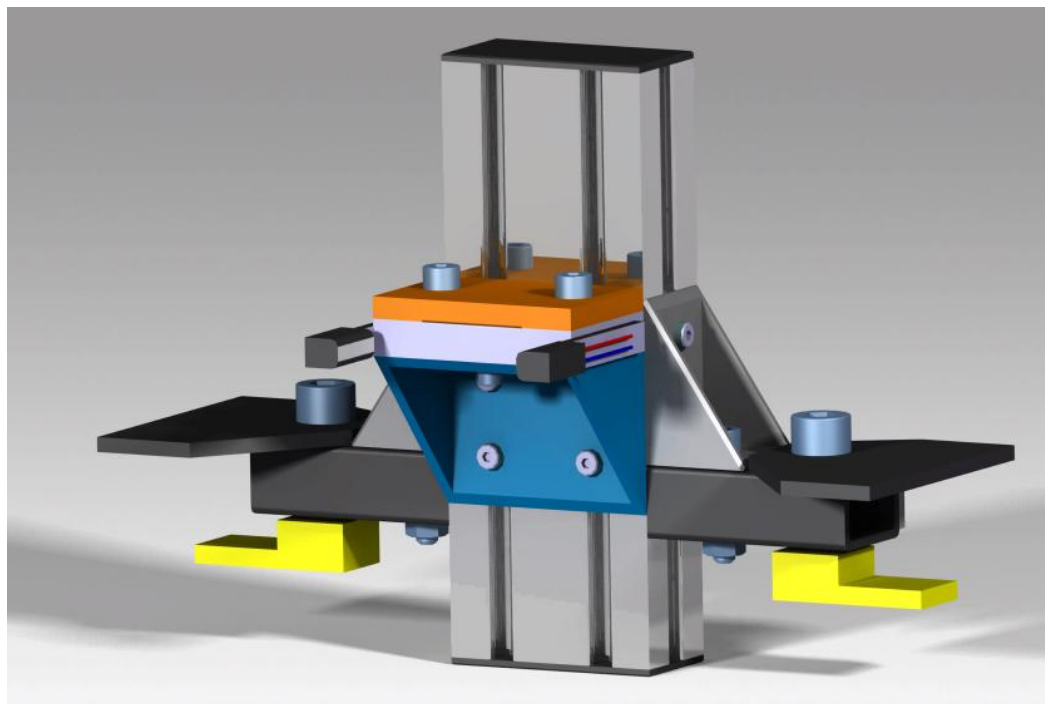
Na statickou čelist jsou kladeny následující požadavky:

- dostatečná tuhost
- upnutí zkušebního tělesa – vetknutí
- stavitelná asymetrie cyklu
- regulace délky vzorku

Všechny tyto argumenty jsem vložil do následující konstrukce. Základem je drážkovaný hliníkový profil 30 x 60 mm (normálie). K němu jsou z obou stran pomocí úhelníků a lišty přimontovány opěrné ocelové profily 30 x 20 x 2,5 mm. Na horní straně profilu je přivařena tvarově upravená pásovina silná 3 mm. Její funkce je opěrná (brání náklonu) a svěrná (fixace v určité poloze). Aby byl možný předozadní pohyb (nastavení délky zkušebního tělesa) je na spodní straně profilu umístěna svěrka, která utažením šroubu pevně obepne profil rámu.

Samotná čelist se skládá ze spodní podpěrné a vrchní přítlačné části. Pracovní část má strukturovaný (vroubkovaný) povrch bránící vyklouznutí vzorku. Kdyby struktura povrchu nevytvořila se vzorkem dostatečně velké tření bránící pohybu, může se ve vzorku vyvrtat díra, do které by se vsunul kolík pevně spojený buď s horní nebo spodní částí čelisti. Hrany jsou stejně jako u pohybové čelisti zaobleny. Čelist je sevřena šrouby stejných typů jako u pohybové čelisti, aby uživatel nemusel při upínání vzorku měnit klíč. Celá čelist je k hliníkovému profilu upevněna skrze úhelník a čtyři šrouby. Povoláním těchto šroubů a posunutím úhelníku nahoru/dolů lze měnit asymetrii cyklu. Na bočních plochách spodní čelisti jsou připevněny optické senzory – optická brána. Porušená část protne bránu, čímž přeruší

počítání cyklů. Poloha tohoto senzoru vychází z předpokladu, že největší napětí a tím i nejvyšší pravděpodobnost poruchy je právě u vetknutí.



Obr. 32 Čelist statická

6.2.7 Elektronické komponenty

Hlavním komponentem měnící frekvenci otáček motoru je frekvenční měnič. Výběr měniče závisí na počtu fází a výkonu motoru. Přibližný typ je uveden v části finančního vyhodnocení.

Přestože lze díky měniči zjistit počet kmitů vzorku, jako pojistku jsem na rám stroje umístil senzor otáček. Snímá otáčky objímky hřídele. Vyhodnocování by mělo probíhat za pomoci logického modulu.

Velmi důležitou součástí je optická brána, která v okamžiku poruchy vzorku vypne počítání kmitů. Druhou variantou kontroly poruchy by mohlo být snímání tlaku v čelistech tlakovými senzory. Snížení tlaku by vedlo k vypnutí počítadla. Tato varianta by vyžadovala přesné senzory s rychlou odezvou a konstrukční úpravu čelisti.

6.3 Finanční analýza

Tento souhrn neslouží k přesné cenové kalkulaci, protože se ceny mohou u různých prodejců lišit. Většina cenových výměr pochází z internetových obchodů a především zde nejsou zahrnuty optimální sestavy elektronických součástek.

Tab. 19 Finanční vyhodnocení

Druh zařízení	Cena [Kč]	Zdroj
Motor Siemens 1LA 7096 – 4AA	3 410	www.elektromotory.cz
Frekvenční měnič TECO E2 - 402 - H3F	6 900	www.konzult.cz
Optická jednocestná závora	550	eshop.technoline.cz
Indukční snímač M8	304	eshop.technoline.cz
Řídicí modul	1 900,-	eshop.technoline.cz
Ocelové profily – 7m	280	www.kovosteel.cz
Silentbloky	160	www.elotechnik.cz
Hliníkový profil 8 30x60 4N	90	www.askmt.com
Úhelník 30 vč. upínací sady	210	www.askmt.com
Stavitelné nohy	150	www.askmt.com
Matice do AL profilu	88	www.askmt.com
Lineární vedení	2700	www.cncshop.cz
Šrouby	140	www.fabory.cz
Matice	120	www.fabory.cz
Vyráběné součásti	2500	odhad
CELKEM	20 407	

Hrubý odhad ceny stroje je 20 500 Kč. V ceně není započítána práce, a také náklady na elektronickou základnu stroje se můžou navýšit použitím modulů.

Nabízí se myšlenka využít převodovku a otáčky měnit variátorem. Ze seznamu by tak vypadly nejdražší položky. Na druhou stranu lze frekvenčním měničem nastavit frekvenci v širokém spektru, což variátor nedokáže. Navíc cena takové převodovky by byla s měničem srovnatelná. Z těchto důvodů považuji výše uvedené za optimální řešení.

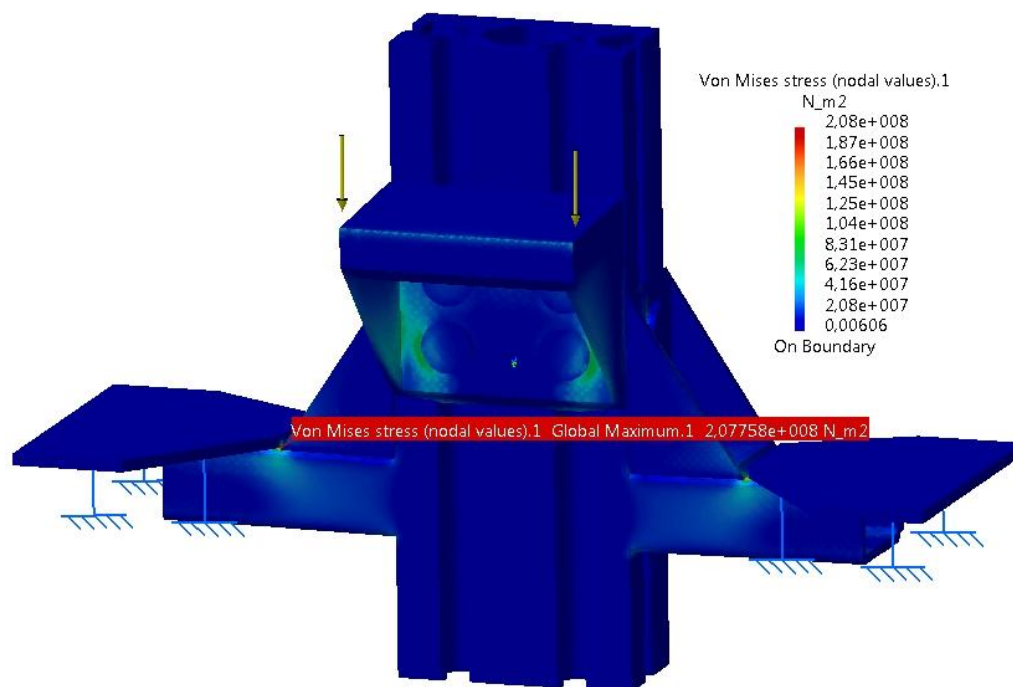
6.4 FEM analýzy

Pro usnadnění výpočtů jsem použil software CATIA. FEM analýzám jsem podrobil nejvíce namáhané části, a to celý excentrický mechanismus a statickou čelist. Přestože výpočty jsou uvedeny s jistou pravděpodobností, podávají dostatečné informace o kriticky namáhaných místech. Při konstrukci jsem se snažil místa s největší koncentrací napětí upravit a minimalizovat vlivy vrubů a ostrých hran.

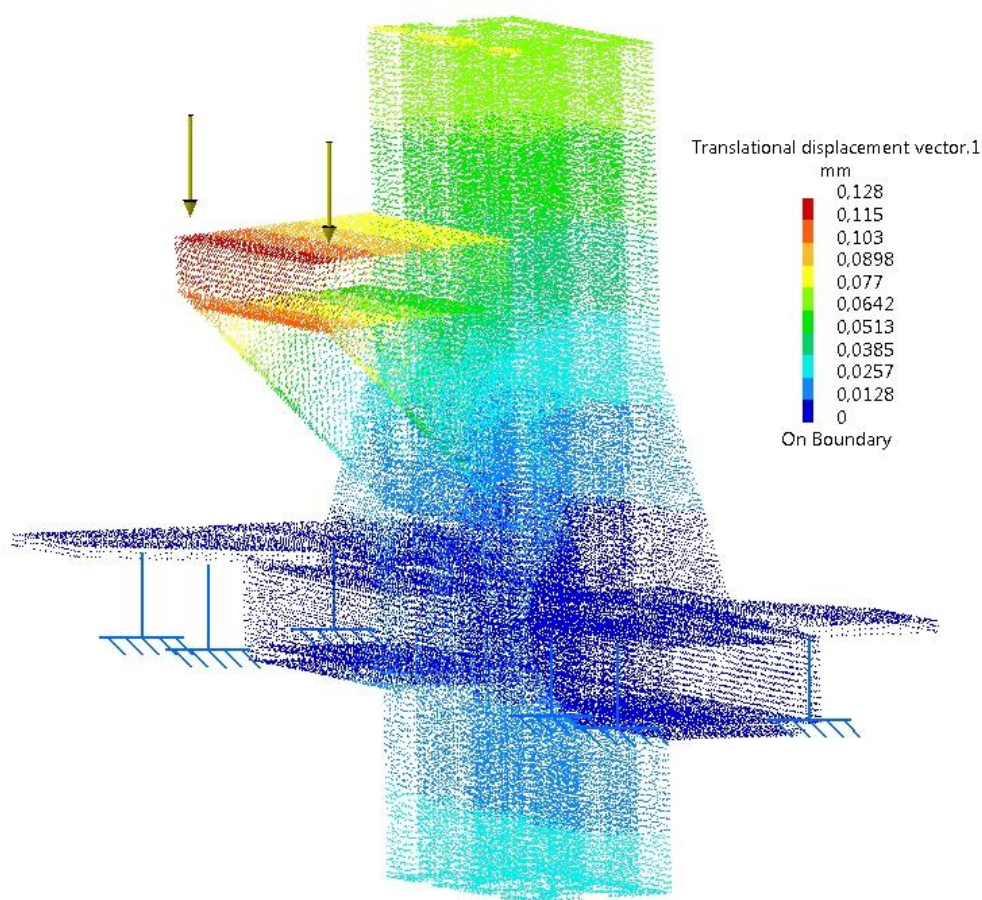
Užitečným nástrojem je zobrazení posunutí jednotlivých bodů. Na základě těchto poznatků mohu sumarizovat celkové úchytky a nepřesnosti stroje.

6.4.1 Statická čelist

Na základě aplikace husté sítě o velikosti elementu 1,5 mm se mi podařilo získat výsledky zatížené chybou menší jak 5%. Maximální napětí 208 MPa působí mezi úhelníkem a profilem. To si vysvětluji vlivem ostré hrany úhelníku. Jelikož jsou úhelníky dodány jako normálie, je třeba hranu dodatečně zaoblit. V oblasti samotné čelisti a podpěrného úhelníku při zatížení 1000 N působí napětí o velikosti 100 MPa. To představuje dostatečně velkou bezpečnost vůči mezi kluzu použitého materiálu ($\sigma_k = 250$ MPa). Maximální posunutí bodu činí 0,12 mm. Histogramové zobrazení napětí je zařazeno do přílohy I.



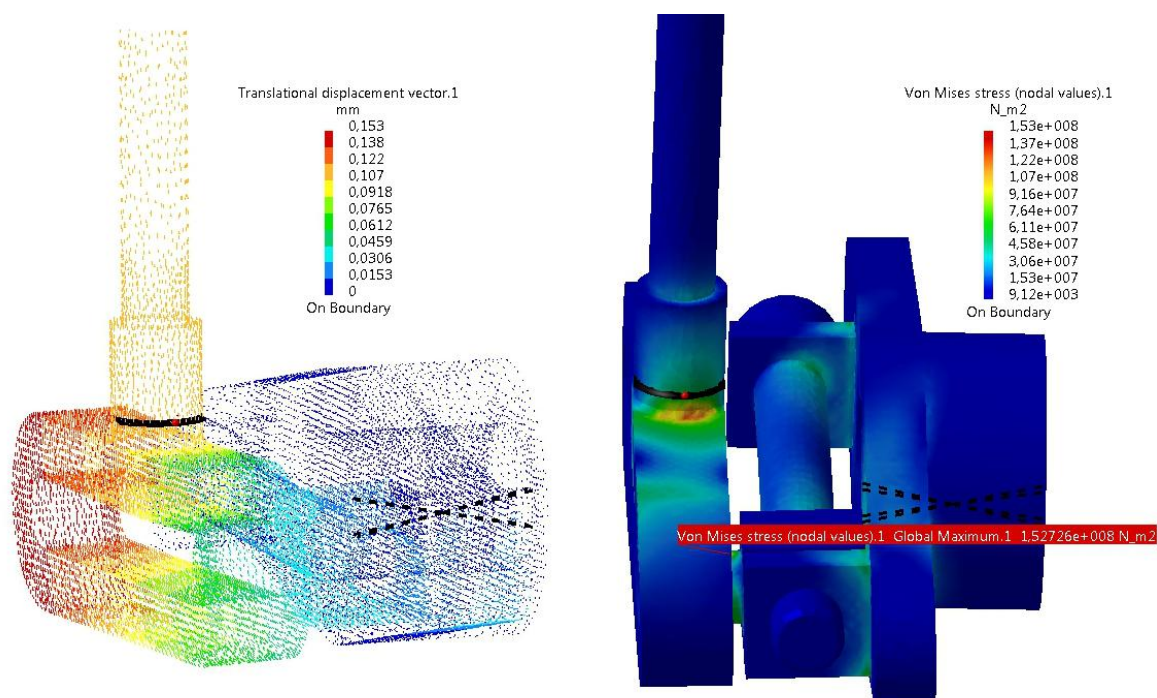
Obr. 33 Napětí ve statické čelisti



Obr. 34 Posunutí uzlů ve statické čelisti

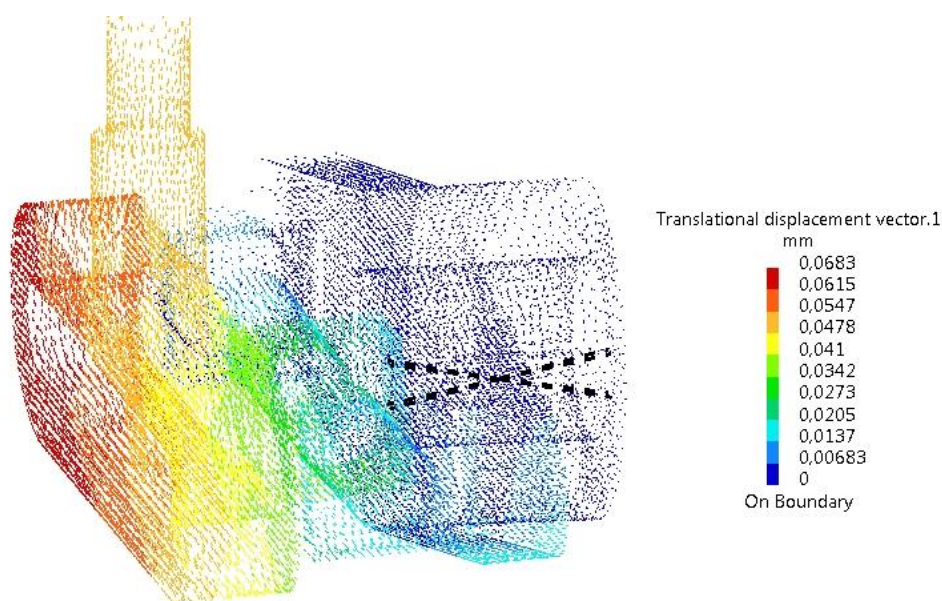
6.4.2 Excentrický mechanismus

Na excentr jsem aplikoval také sílu 1000 N působící na ojnici. Statický bod jsem zvolil virtual part skládající se z ploch objímky motorové hřídele a drážky pro pero. Bohužel se mi ani s využitím adaptivity nepodařilo dosáhnout menší chyby výsledků než 21 %. Chyba by šla snížit použitím výkonnější výpočetní techniky. Vypočítané maximální napětí 153 MPa působí v místě styku matice a tvarovky. Další kritická část je spojení tvarovky a ojnice kde působí 130 MPa. Největší deformační posunutí činí 0,15 mm na konci tvarovky. V oblasti ojnice je posunutí 0,1 mm. Tyto výsledky jsou platné při posunutí matice do vzdálenosti 80 mm. Takový případ je mezní a při používání by se neměl vyskytnout kvůli omezení dané výkonem motoru.



Obr. 36 Namáhání excentru

Blíže praktickému užívání je případ, kdy je matice vzdálena pouze 10 mm vůči ose rotace a ostatní síly, uchycení i pravděpodobnost chyby jsou totožné s předchozím případem. Zde se projeví namáhání čepu i matice. Poloha i velikost maximálního napětí zůstala stejná. Zvýšilo se však namáhání čepu na 75 MPa. Z analýzy posunutí jednotlivých uzlů je patrné, že se maximální hodnota snížila asi o polovinu. Posunutí uzlů ojnice je pouze 0,05 mm. Vykreslení napětí působících v excentrickém mechanismu je součástí přílohy I.



Obr. 35 Posunutí v excentrickém mechanismu

7 ZKUŠEBNÍ STROJ CYKLICKÉ ÚNAVY – VYHODNOCENÍ

Základním předpokladem provozu je funkčnost stroje. Ta by měla být zaručena elektromotorem a převodovým mechanismem. Nízký počet elektronických zařízení snižuje pravděpodobnost poruchy a nákladnou opravu.

Jednoduchost je splněna užitím ověřených mechanismů. Konstrukce svařence rámu ani šroubové spoje nepředstavují složitosti při montáži. Jediným složitým aspektem je správné zapojení a zprovoznění elektronických obvodů a následné propojení s počítačem.

Dalším z požadavků byla účelovost a přijatelná cena. Přestože je v dnešní době tendence vyrábět zařízení víceúčelová, je tento stroj ryze jednoúčelový. Lze testovat pouze cyklickou únavu ohybem. Výhodou však může být cena. Pořizovací cena profesionálních strojů vysoce převyšuje 20 000,-.

Ostatní požadavky zněly:

- *možná změna frekvence*

Tento bod je splněn užitím frekvenčního měniče, který dokáže plynule měnit otáčky elektromotoru. Stavitelnost frekvence dle použitého motoru je 0,1 – 23 Hz. Stroj dosahuje maximálního krouticího momentu 10 Nm.

- *nastavitelná amplituda výchylky*

Výchylku a tím i velikost napětí ve vzorku lze regulovat čepem se závitem a posouváním matice. Maximální možná výchylka je 80 mm.

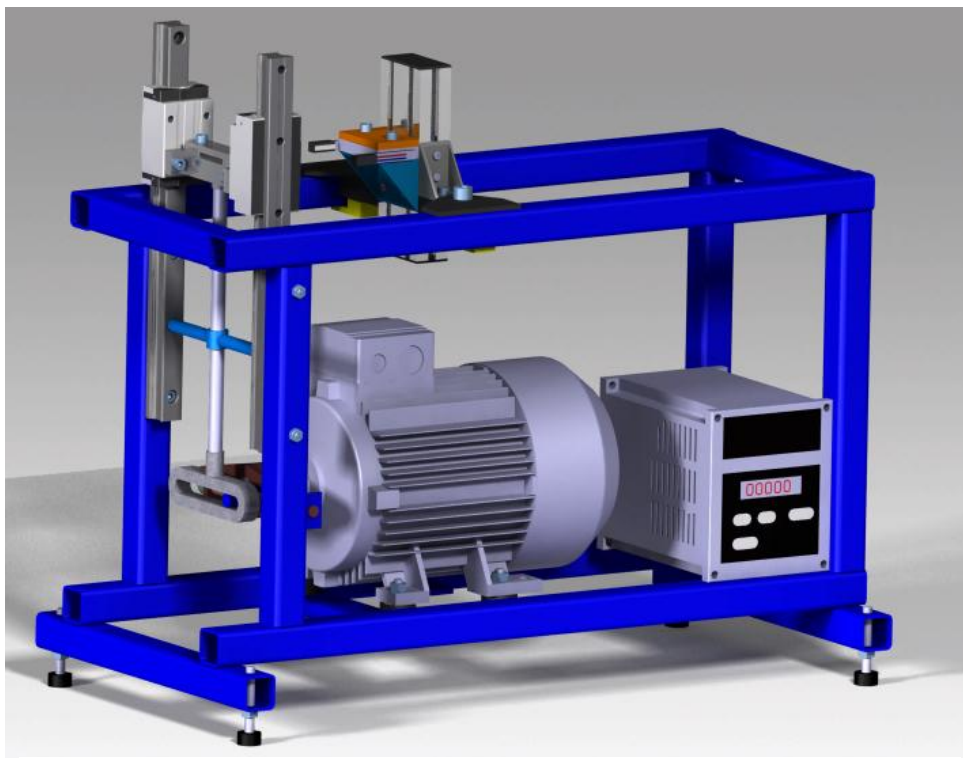
- *možná změna asymetrie cyklu*

Souměrnost cyklu lze narušit posunutím statické čelisti nahoru nebo dolů vůči nulové poloze pohybové čelisti. Tím můžeme získat různé druhy cyklu (symetrický, míjivý i pulzující).

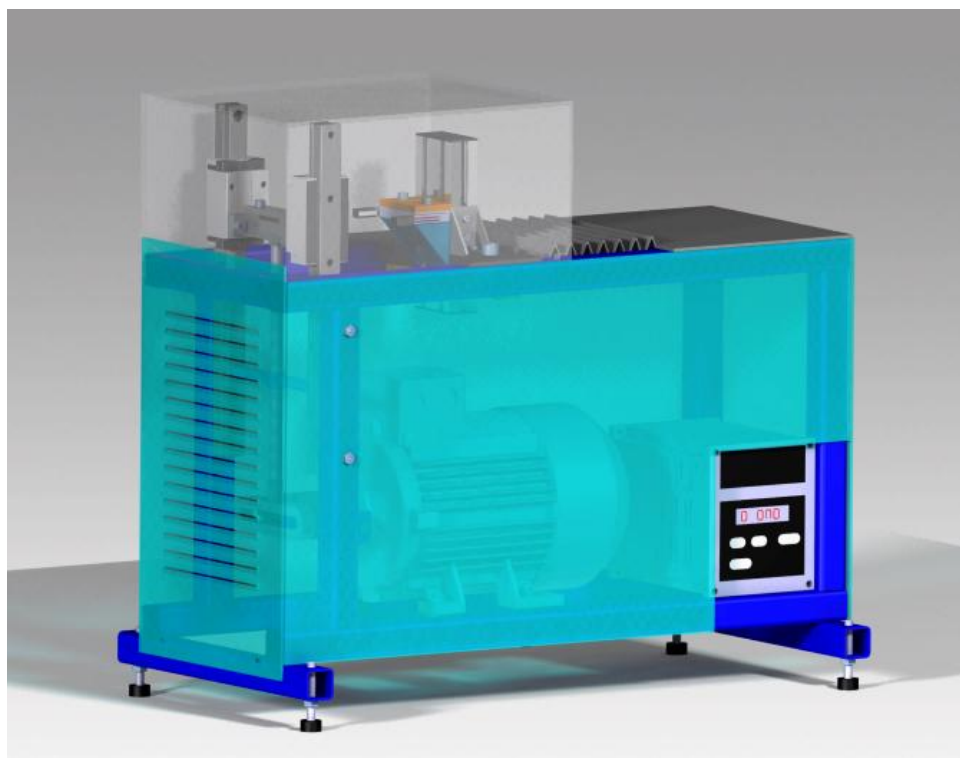
- *použitelnost variabilní délky zkušebních těles*

Délka vzorku může být v rozmezí 40 – 500 mm díky možnému posunu statické čelisti. Jednoduchým uvolněním svěrek lze regulovat potřebnou délku vzorku, případně rameno, na které je aplikováno zatížení.

Stroj je primárně určen k testování normalizovaných vzorků. Uživatel by měl dbát výše uvedených omezení, aby předešel případným poruchám.



Obr. 38 Zkušební stroj



Obr. 37 Zkušební stroj s krytem

ZÁVĚR

Testováním materiálů zmíněných v teoretické části můžeme dosáhnout pochopení vlivu cyklu na změnu mechanických vlastností. Bohužel při laboratorních zkouškách nejsme schopni zcela přesně modelovat složité vlivy, jako jsou potenciální interakce. Vzhledem k těmto faktům je nemožné se 100% jistotou předpovědět únavovou životnost plastů natož FRP. Můžeme však data získaná ze zkoušek využít jako referenční body pro výpočet cyklicky namáhaných konstrukcí. Na druhou stranu musíme zohlednit, že snížení pevnostního stupně o 30 % nebo 50 % nepředstavuje praktické řešení a vede ke značnému předimenzování a ztrátě inovačního přístupu. Nicméně kompozity zatím nejsou podrobeny takovým poznatkům jako kovy a to může být naší motivací pro výzkum únavového chování a rozšíření spektra informací v této oblasti.

První fází projektu výzkumu únavy je tato bakalářská práce, která přináší jak teoretický podklad, tak hmotnou část v podobě konstrukce zkušebního stroje. Následující fází je zabezpečení finančních prostředků a montáž zkušebního stroje. Závěrečnou částí by měla být výroba zkušebních těles a konečně samotný výzkum únavového chování.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GRELLMANN, Wolfgang a Sabine SEIDLER. *Polymer testing*. Cincinnati, Ohio: Hanser Gardner Publications, 2007, 674 s. ISBN 978-1-56990-410-7.
- [2] KAUSCH, Hans-Henning. *Polymer fracture*. Berlin: Springer - Verlag, 1978, 332 s. ISBN 3-540-08786-9
- [3] HAGEN, Vladislav. *Únava a stárnutí materiálu*. 2. vyd. Brno: VUT, 1981, 76 s.
- [4] HRIVŇÁK, Ivan. *Fraktografie*. 1. vyd. Trnava: AlimniPress, 2009, 99 s. ISBN 978-80-096-089-6
- [5] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [7] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [9] HUGO, Jiří. *Konstrukční plastické hmoty, jejich vlastnosti a využití ve strojírenství*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 525 s.
- [10] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [11] POM - polyoxymethylen [online]. [cit. 2014-01-08]. Dostupné z: <http://www.rempometal.sk/sk/plasty/35/strojarske-plasty/69/pom-polyoxymetylen/>
- [12] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 8072042483.
- [13] Polybutylene Terephthalate (PBT). *TIER Industry Report - Polybutylene Terephthalate (PBT) Resins*. 2009, s. 1-9.
- [14] *Guide to Composites* [online]. [cit. 2012-11-14]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-compositesv4pdf.pdf>
- [15] METELA Petr. Výzkum únavového chování kompozitních sendvičových struktur v dopravním průmyslu [online]. Zlín, 2013 [cit. 2014-01-09]. 116 s. Dostupné z:

http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24519/metela_2013_dp.pdf?sequence=1.

Diplomová práce. UTB ve Zlíně.

[16] BENÍČEK, Josef. *Mechanické chování laminátových struktur při nízkocklovém namáhání* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2014-01-09]. 116 s. Dostupné z:

http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/7300/ben%c3%ad%c4%8dek_2008_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.

[17] WYPYCH, George. *Handbook of polymers*. Toronto: ChemTec Publishing, 2012, vi, 684 s. ISBN 978-1-895198-47-8.

[18] SCHEIRS, John. *Compositional and failure analysis of polymers: a practical approach*. Chichester: John Wiley & Sons, c2000, xxxii, 766 s. ISBN 0471625728.s

[19] BROSTOW, Witold a Roger D CORNELIUSSEN. *Failure of plastics*. Munich: Hanser, c1986, xxii, 486 s. ISBN 0-02-947510-4.

[20] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s.

[21] WANG Gong-Tao, Hong-Yuan LIU, Nicolas SAINTIER, Yiu-Wing MAI. *Cyclic fatigue of polymer nanocomposites*. Engineering Failure Analysis [online]. 2009, roč. 16, č. 8, s. 2635–2645. ISSN 1350-6307. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.proxy.k.utb.cz/science/article/pii/S1350630709001381>

[22] GRIMMER S. Christopher, C. K. H. DHARAN, *High-cycle Fatigue Extension of Glass Fiber/Polymer Composites with Carbon Nanotubes*. Journal of Wuhan University of Technology-Material Science [online], 2009, roč. 24, č. 2, s.167-173. ISSN 1993-0437. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11595-009-2167-4>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FRP		fibre reinforced plastic – vlákny vyztužený plast
CNT		carbon nanotubes – uhlíkové nanočástice
G_c	KJ m^{-2}	hnací síla trhlin
GMT		glass mat thermoplastic – termoplast vyztužený sklenou rohoží
HM		high modulus – vysoko modulový
HS		high strength – vysoko pevnostní
K_c	$\text{MPa m}^{1/2}$	lomová houževnatost
LFT		long fibre reinforced thermoplastic – vyztužení termoplastu dlouhými vlákny
N, N_i		počet cyklů
N_D		počet cyklů pro nízkocyklovou únavu
SMC		sheet moulding compound – komp.lisovací materiál
T_b	K	tranzitní teplota
T_g	K	teplota skelného přechodu
T_m	K	teplota tání
W_o	J	elastická energie tělesa
W_p	J	polohová energie
γ_{ef}	Jm^{-2}	efektivní lomová energie
γ_o	Jm^{-2}	povrchová energie trhliny
ΔW_e	J	ztráta elastické energie
σ_a	MPa	amplituda napětí
σ_c	MPa	kritické napětí – šíření trhliny
σ_i	MPa	nízkocyklové únavová pevnost
σ_m	MPa	střední napětí

VÝKLAD POJMŮ

Alternating fatigue strength	Měnící se únavová pevnost
Carbon	Uhlík
Clamp	Upínací čelist
Compression	Tlak
Compressive strain	Deformace v tlaku
Compressive stress	Tlakové napětí
Controller	Regulátor
Fatigue	Únava
Fatigue life	Únavová životnost
Fatigue strength	Únavová pevnost
Fibre	Vlákno
Laminate	Laminát
Load cell	Zatěžující buňka
Number of reversals to failure	Počet cyklů do poruchy
Origin	Počátek
Peak alternating stress	Špičky střídavého napětí (amplituda napětí)
Properties	Vlastnosti
Range	Rozsah
Resin	Pryskyřice
Specimen	Vzorek
Strain	Deformace
Strain-controlled test device	Senzor deformace
Stress	Napětí
Stress cycle	Zátěžný cyklus

Temperature

Teplota

Tensile strain

Deformace v tahu

Tensile stress

Tahové napětí

Tension

Tah

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Synergický účinek [14].....	19
Obr. 2 Diagram napětí-prodloužení vybraných kompozitních materiálů [5]	20
Obr. 3 Porovnání jednotlivých typů vláken při namáhání v tahu a tlaku [14].....	24
Obr. 4 Typy výztuží. Pro termosety: a) rovingy, b) rohož, c) tkanina z prameců, d) tkanina z vláken; pro termoplasty: e) krátká vlákna 0,2 mm, f) dlouhá vlákna 5 mm [5]	24
Obr. 5 Diagram napětí a času pro cyklické zatížení [1].....	28
Obr. 6 Druhy zatížení [1].....	29
Obr. 7 Testovací vzorek dle norem ASTM [22]	30
Obr. 8 Stroje pro experimentální provedení zkoušky cyklické únavy [1]	31
Obr. 9 Linearizovaná S-N křivka [1]	32
Obr. 10 Wöhlerova křivka a pokles tuhosti [1]	33
Obr. 11 Vliv teploty na modul pružnosti [18]	36
Obr. 12 Zátěžové módy trhlin:I tah, II rovinný smyk, III smykové napětí v prostoru, vlevo rozměry tělesa použité v textu [18]	37
Obr. 13 Rychlost šíření trhliny vlevo a závislost Parisova exponentu na lomové houževnatosti vpravo [20]	39
Obr. 14 Mechanizmy poruch FRP a) lom vlákna b) praskání matrice c) Postup trhliny v mezivrstvě matrice/vlákno [5].....	40
Obr. 15 Rozdíl mezi kompozitem a homogenním materiálem pod dynamickým zatížením [5].....	41
Obr. 16 Větvení trhliny s určením iniciace [4]	43
Obr. 17 Pohledy na lom s určením charakteristických znaků [4]	46
Obr. 18 Hřebeny nazývané též jako striace vlevo, hřeben v křemičitém skle vpravo [4]	46
Obr. 19 Zleva primární, sekundární a terciární Wallnerovy čáry [4]	47
Obr. 20 Patrné charakteristické znaky v polymeru [4]	47
Obr. 21 Crazing [4]	48
Obr. 22 Vlevo tvárný lom PE s deformací vláken a křehký lom LD PE s viditelnými Wallnerovými čarami vpravo [4]	49
Obr. 23 Dekoheze mezi matricí a vláknem, vpravo rozlupování vlákna [4]	49

Obr. 24 Delaminace polymerního kompozitu a lom v uhlíkovém vláknu téhož kompozitu [4]	50
Obr. 25 S-N křivka EPON 826 a EPIKURE 3234 [22]	52
Obr. 26 Výsledky jednotlivých zkoušek [21]	54
Obr. 27 Primárně testovaný druh zkušebního tělesa	58
Obr. 28 Rám	61
Obr. 29 Excentrický mechanismus	62
Obr. 30 Lineární vedení	63
Obr. 31 Pohybová čelist	64
Obr. 32 Čelist statická	65
Obr. 33 Napětí ve statické čelisti	67
Obr. 34 Posunutí uzlů ve statické čelisti	68
Obr. 35 Posunutí v excentrickém mechanismu	69
Obr. 36 Namáhání excentru	69
Obr. 37 Zkušební stroj s krytem	71
Obr. 38 Zkušební stroj	71

SEZNAM TABULEK

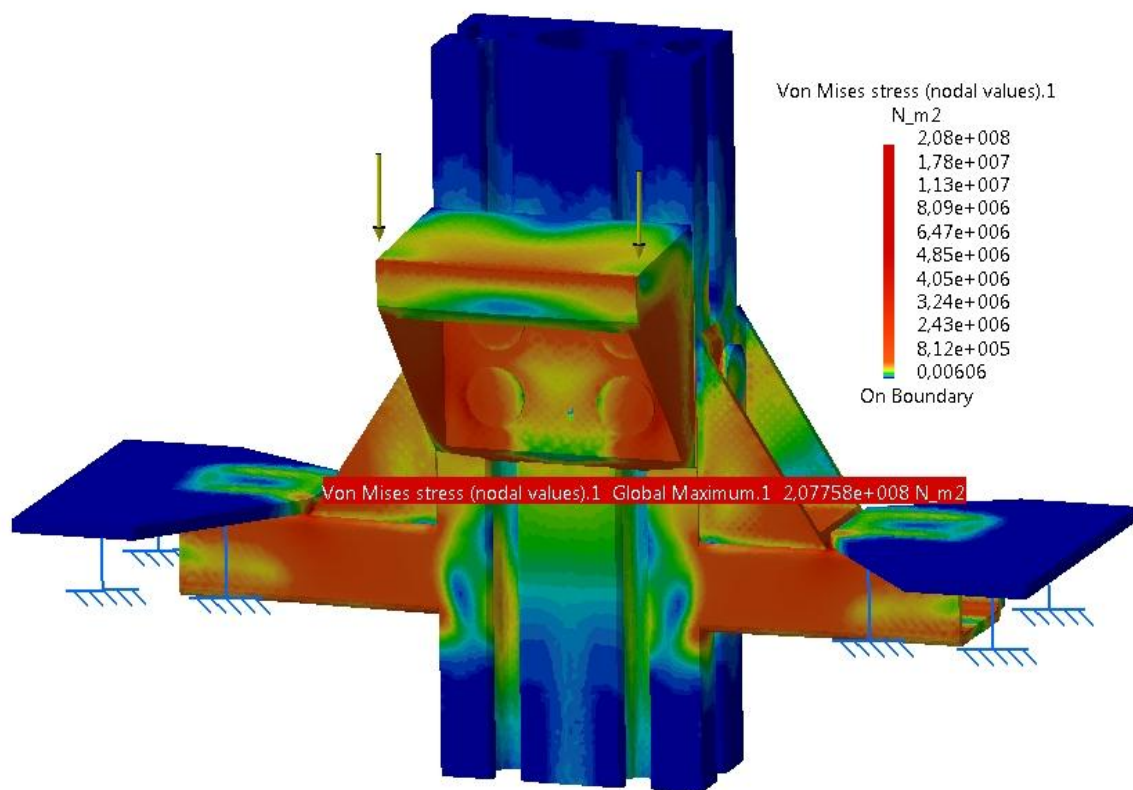
Tab. 1 Vlastnosti PP [12].....	13
Tab. 2 Vlastnosti PVC [12].....	14
Tab. 3 Vlastnosti polyamidů [12]	14
Tab. 4 Vlastnosti SAN [17]	15
Tab. 5 Vlastnosti POM [12].....	15
Tab. 6 Vlastnosti PC [12]	16
Tab. 7 Vlastnosti ABS [17].....	16
Tab. 8 Vlastnosti PTFE [12]	17
Tab. 9 Vlastnosti PBT [17]	17
Tab. 10 Vlastnosti PET [12]	18
Tab. 11 Vlastnosti PEEK [12]	18
Tab. 12 Stručný výběr vhodných termoplastických matric [12]	21
Tab. 13 Druhy skla [7]	25
Tab. 14 Hodnoty lomové houževnatosti a hnací síly trhliny plastů [20].....	38
Tab. 15 Výsledky životnosti vzorků [22]	52
Tab. 16 Poměry výztuží v kompozitu [21]	53
Tab. 17 Rozměry vzorku dle ČSN EN ISO 10724	58
Tab. 18 Mechanické vlastnosti vybraných materiálů [17].....	59
Tab. 19 Finanční vyhodnocení.....	66

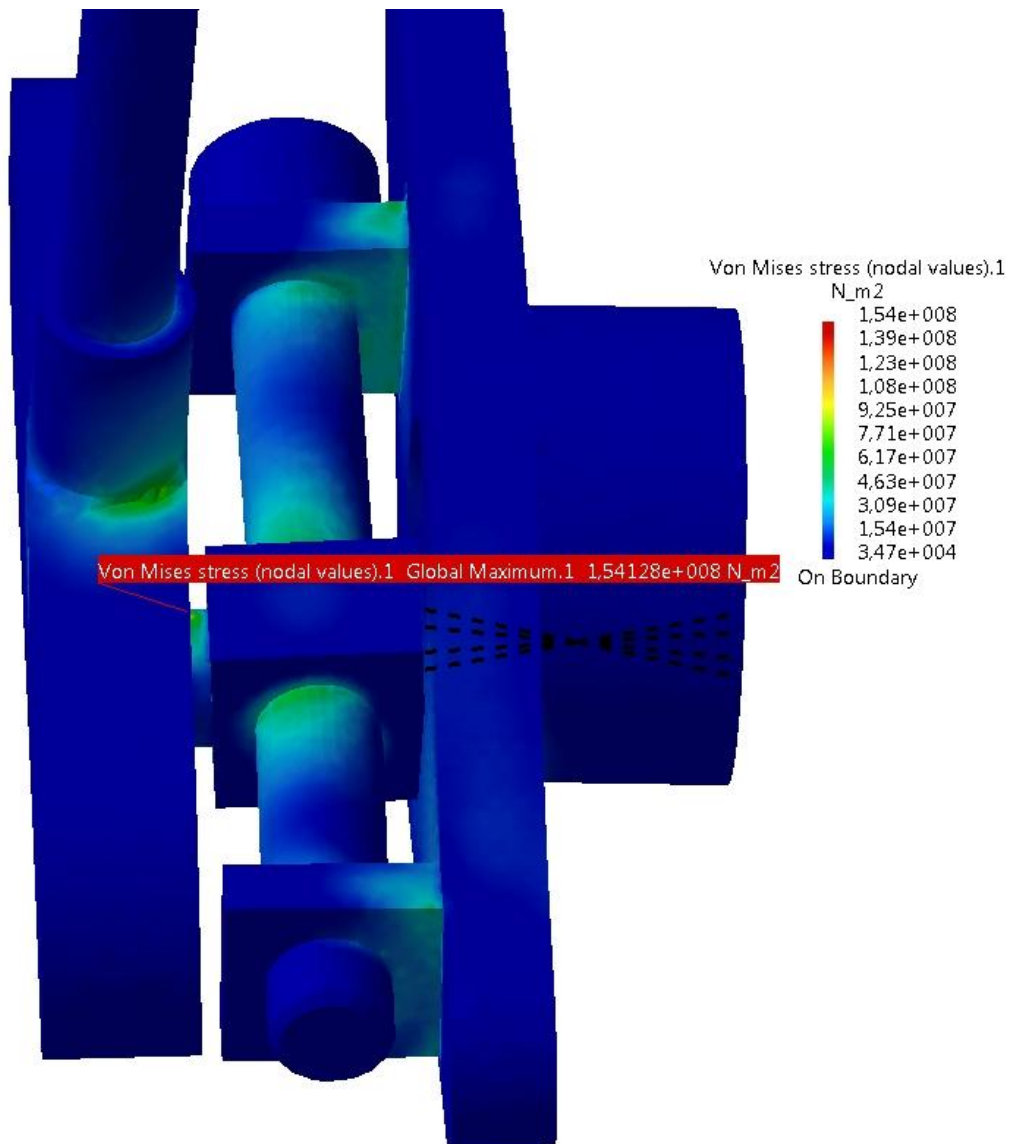
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: FEM analýzy

Příloha P II: Výkresová dokumentace čelistí

PŘÍLOHA P I: FEM ANALÝZY





PŘÍLOHA P 2: VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE ČELISTÍ