

Konstrukce přípravků pro mechanické zkoušky materiálů

Miroslav Panáček

Bakalářská práce
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Miroslav Panáček
Osobní číslo:	T190094
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Konstrukce přípravků pro mechanické zkoušky materiálů

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární řešení v dané oblasti
2. Proveďte konstrukční návrhy a nadimenzování přípravků
3. Zhotovte výkresovou dokumentaci ve 3D a 2D

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

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Volek F., Základy konstruování a části strojů I, UTB ve Zlíně, 2009, ISBN 978-80-7318-654-8

Leinveber J., Strojnické tabulky, Scientia s.r.o., Praha, 1999, ISBN 80-7183-164-6

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

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

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na mechanické zkoušky kompozitního materiálu. V teoretické části se nachází seznámení s kompozitními materiály, tj. jejich popis, rozdělení a vlastnosti. Dále se věnuje obecnému popisu a rozdělení mechanických zkoušek a výběrem jejich norem. Praktická část se zabývá návrhem sestav pro mechanické zkoušky daného kompozitního produktu.

Klíčová slova: kompozitní materiál, mechanické zkoušky, pružina, ohyb, namáhání

ABSTRACT

This Bachelor's thesis is focused on mechanical trials of composite material. Theoretical part is about introduction to composite materials. Including their description, division and properties. Furthermore, it contains common description and division of mechanical trials and selection of appropriate norms. Practical part is about testing equipment configuration for mechanical trials of selected composite product.

Key words: composite material, mechanical trials, spring, flex, stress

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., za jeho ochotně poskytnuté rady, pozornost, odborné vedení a velkou trpělivost, po celou dobu vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za obrovskou podporu při studiu na vysoké škole.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KOMPOZIT	11
1.1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	11
1.2 VLASTNOSTI KOMPOZITŮ	12
1.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ	12
1.4 MATRICE.....	13
1.4.1 Kovová matrice	13
1.4.2 Keramické matrice	14
1.4.3 Polymerní matrice	15
1.5 VÝZTUŽ.....	18
1.5.1 Kovová vlákna	19
1.5.2 Skelná vlákna	19
1.5.3 Keramická vlákna.....	20
1.5.4 Polymerní vlákna	21
1.5.5 Whiskery	21
1.6 GEOMETRIE VÝZTUŽE.....	22
1.6.1 Částečné kompozity	22
1.6.2 Vláknové kompozity	23
1.6.3 Vrstvené kompozity	23
1.6.4 Sendvičové kompozity	24
2 NORMY ZKOUŠEK PRO KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	25
2.1 ZNAČENÍ NORMY	25
2.2 VYBRANÉ AMERICKÉ NORMY	25
2.3 MEZINÁRODNÍ NORMY PŘEVZATÉ CEN A ČNI (ČSN EN ISO).....	25
3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	27
3.1.1 Tahová zkouška.....	28
3.1.2 Tlak	29
3.1.3 Ohyb.....	32
3.1.4 Smyk	34
3.2 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY	37
3.2.1 Rázové zkoušky	37
3.2.2 Zkoušky opakovaným namáháním	38
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
4 CÍL PRÁCE	41
4.1 CHARAKTERISTIKA ZKUŠEBNÍCH STROJŮ	41
4.1.1 ZWICK/ROELL 1456.....	41
4.1.2 ZWICK/ROELL HC 25	43

4.2	ZKUŠEBNÍ TĚLESO	44
5	KONSTRUKČNÍ NÁVRHY PRO ZKOUŠKY PRUŽINY.....	46
5.1	UNIVERZÁLNÍ DÍL UPNUTÍ KE ZKUŠEBNÍM STROJŮM.....	46
5.2	SESTAVA 1 – OHYB.....	48
5.2.1	Nosník	50
5.2.2	Podpěra na nosník	51
5.2.3	Podpěry u čepu.....	52
5.2.4	Normalizované součásti	53
5.2.5	Kritický bod sestavy 1	54
5.2.6	Výsledky měření	54
5.3	SESTAVA 2 – CYKLOVÁNÍ.....	55
5.3.1	Podstava horní.....	57
5.3.2	Podstava dolní	59
5.3.3	Hřídel.....	60
5.3.4	Fixační díl.....	61
5.3.5	Normalizované součásti	62
5.3.6	Kritický bod sestavy 2.....	62
	ZÁVĚR	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ	68
	SEZNAM TABULEK.....	70
	SEZNAM PŘÍLOH.....	71

ÚVOD

Člověk během čtvrtiny svého života, což je přibližně 20 let, vyprodukuje jednu teratunu, to znamená bilion tun materiálu. Podle tohoto čísla lze odvodit, že každý týden vyrobí jedna osoba tolik věcí, kolik je tělesná váha všech lidí na světě. V dnešní době je nejvíce dynamicky rozvíjejícím odvětvím výroba plastů. Plastické hmoty nebo také „umělé hmoty“ vynikají svou širokou variabilitou vlastností. A právě kompozit tvoří jednu z modifikací plastů. Samotnou podstatou kompozitu je skládání dvou, nebo více rozdílných složek vlastností, obsažených v různých materiálech. Tímto spojením se vytvoří zcela nový materiál o neznámých vlastnostech, které je třeba definovat. K tomu slouží mechanické zkoušky, které jsou důležité pro stanovení bezpečných limitů použitelnosti.

Tématem této mé bakalářské práce je právě návrh konstrukce pro ověření vlastností sklolaminátového kompozitního materiálu, sloužícího jako pružina, která je součástí mechanismu výrobku, určeného k vyšším výkonům při skákání. Zkoušky a jejich metody mohou být různé, avšak obvykle se provádí na standardizovaných zkušebních strojích. Abychom mohli vůbec provést měření vzorku u některých speciálních výrobců, je třeba navrhnout a vyrobit zkušební sestavu přípravků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZIT

Všechny stroje a zařízení je tvořeno konstrukčním materiálem, jehož znalost potřebují všichni odborníci. Bez znalosti vlastností materiálu nemůže konstruktér správně volit vhodný materiál pro jednotlivé díly stroje, technolog nemůže dobře řídit technologický proces, technický pracovník údržby strojů se těžko rozhodne o správné volbě materiálu pro poničenou nebo opotřebovanou součást technologického zařízení vyřazeného z provozu. Materiál využívaný v konstrukcích (konstrukční materiály) lze dělit do čtyř základních skupin, které se hlavně liší svými fyzikálně-chemickými vlastnostmi: [1]

Kovové materiály

Polymerní materiály (polymery)

Keramické materiály

Složené materiály - kompozity

Kompozitní materiály se v současné době staly průmyslovými materiály po celém světě. Letecký, automobilový, elektronický, spotřební průmysl je nyní zcela závislý na plastech s vyztuženými vlákny. Nejvíce vzrůstá spotřeba po plastech plněnými částicemi nebo minerály a tento trend bude pokračovat dále, dokud budou minerální látky dostupnější než suroviny, které jsou potřebné pro tvorbu polymerů. [2]

1.1 Definice kompozitních materiálů

Kompozit je každý materiálový systém, který se skládá alespoň ze dvou fází, z nichž jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které jednotlivé složky (fáze) nemohou dosáhnout samostatně ani prostou sumací.

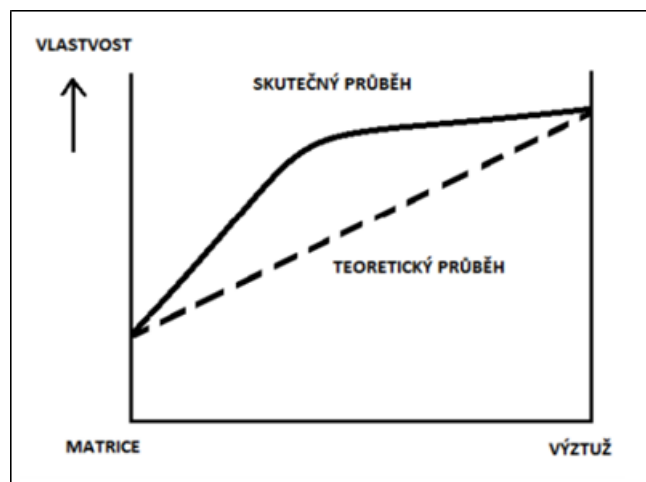
Pevná fáze (výztuž) má o jednu až dva řády vyšší pevnost než druhá spojitá fáze (matrice), která bývá poddajnější a plní funkci pojiva. Podle nynějšího chápání pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny tyto podmínky:

- podíl výztuže bude větší jak 5 %
- vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) jsou rozdílné, výztuž je mnohem pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- kompozit musí být vyroben smícháním složek [3, 4]

1.2 Vlastnosti kompozitů

Výsledné vlastnosti vychází z vlastností jednotlivých komponentů materiálu, dále vzájemná interakce mezi pojivem a výztuží, tvar a velikost výztuže a její orientace a také objemové zastoupení jednotlivých složek. Důležitá je, co nejlepší adheze, to je schopnost různých materiálů k sobě dokonale přilnout. Čím je výztuž méně nasycena pojivem, tím lepší jsou mechanické vlastnosti. A zároveň, ale nesmí být výztuž v žádném místě nasycena málo nebo vůbec. [7]

Synergismus je jev, který vytvoří spojení výztuže a pojiva, nezískáme prostý součet vlastností samostatných složek (čárkovaná čára v obrázku 3), ale můžeme (a hlavně chceme) dosáhnout vlastností lepších.



Obrázek 1 Synergické chování složek kompozitu

Synergický jev platí například pro ohybovou tuhost, nebo při kombinaci vysoké pevnosti výztuže s vysokou houževnatostí pružné polymerní matrice. Nelze ho ale považovat za pravidlo, které by platilo pro každou vlastnost výsledného kompozitu. Dobře si lze představit synergické chování také u materiálu brusných kotoučů, kde matici tvoří oxid hlinitý (korund) Al_2O_3 , který je vyztužen karbidem křemíku SiC . Samostatně jsou oba materiály dosti křehké, ale kombinací však získává výsledný kompozit určitou houževnatost. [5] [6]

1.3 Rozdělení kompozitů

Základním rozdělením je podle materiálu matrice, podle materiálu výztuže a podle geometrie výztuže.

1.4 Matrice

Matrice je materiál, který obklopuje vyztužující fázi tvořenou vlákny či částicemi tak, že po spojení vznikne tvarově stálý výrobek, kterému říkáme kompozit. [3]

Hlavním úkolem matrice je:

- přenos vnějšího zatížení na vyztužující fázi
- převedení namáhání z vlákna na vlákno
- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku
- ochrana před vnějšími vlivy z okolí

Ve většině případů se požaduje navíc po matici nízká hmotnost. V porovnání s výztuží má matrice nižší pevnostní vlastnosti, ale dosahuje větší plasticity. Pro dosažení kvalitnějšího kompozitu, je nutné použití pevnější výztuže a zajistit dokonalou adhezi mezi jednotlivými vlákny a maticí. Pro zlepšení adheze se nanáší na vlákna impregnace, tím dochází k posílení fyzikální, příp. chemické vazby na rozhraní vlákno – matrice. Také musí mít matrice vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno zcela a bez bublin prosytila. [8, 9]

1.4.1 Kovová matrice

Kovové matrice se vyznačují dobrou pevností ve smyku, odolností vůči opotřebení, tuhostí, houževnatostí, vyšší tepelnou odolností (žáru pevností), dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí. Výhodou je možnost spojování či povlakování. Díky charakteru tvárnosti lépe odolávají tvorbě trhlin v materiálu.

Nejvýznamnějšími zástupci jsou lehké slitiny hliníku, hořčíku, titanu a jejich slitiny na bázi niklu. Kompozity s kovovou maticí se využívají v situacích, kde už není dostatečná pevnost slitiny kovu. Proto je chemické složení materiálu kovové matrice závislé na oblasti použití. Pro nízké teploty se využívá matrice z niklových slitin a pro elektrotechnické účely se využívají matrice tvořené mědí nebo stříbrem.

Rozšířené jsou částicové kompozity s kovovou maticí, které se používají hojně v materiálových kombinacích a technických aplikacích. Matrice je většinou tvořena Ag, Al, Cu, Fe, Ni, které se vyztužují částicemi stejně jako keramické matrice za pomoci technologie práškové metalurgie, tj. proces vyztužování za pomoci synteticky připravených prášků na bázi oxidů, nitridů, karbidů či boridů. Tento výrobní postup produkuje kompozity o vysoké tvrdosti.

Při výběru kovové matrice klademe důraz hlavně na zajištění chemické a fyzikální kompatibility s vlákny. Při výrobě kompozitu nesmí dojít k nežádoucím reakcím mezi vlákny a kovovou maticí, např. vzájemným difuzím nebo rozpuštění vláken v matici, což by znamenalo ztrátu kvality kompozitu.

Nejvýhodnějšími vlákny v kovové matici jsou vlákna kovová (wolframová) nebo keramická (borová, uhlíková), protože mají malou smáčivost v roztaveném kovu. Ta je vyřešena povrchovou úpravou s povlakem z karbidu křemíku, který přispívá ke zvýšení tepelné stability kompozitu. Používá se u kompozitů, na které působí vysoké teploty, např. v brzdovém obložení nebo spalovacích motorech. [9]



Obrázek 2 Karbon-keramické brzdy

1.4.2 Keramické matrice

Keramika je anorganický nekovový materiál, který je tvořený heterogenní strukturou krystalických látek o různém uspořádání a složení. Keramické materiály se řadí mezi vysokoteplotní materiály, které mají vynikající vysokoteplotní a chemickou odolnost, vysokou tvrdost a pevnost v tlaku, odolnost vůči creepu za vysokých teplot, malou tepelnou vodivost, vysokou teplotu tání, nesnadnou obrobitelnost, nedostatečnou lomovou houževnatost, křehkost a velkou citlivost na vnitřní poruchy. Na základě těchto vlastností je keramika často používána jako pojivo v kompozitních materiálech.

Základ keramických matic tvoří oxidy, nitridy, karbidy nebo také grafit. Dělí se na keramické matrice oxidické povahy (Al_2O_3 , ZrO_2 , oxidická skla) nebo neoxidické povahy (SiC , Si_3N_4 , C atd.).

Částicové kompozity s keramickou maticí by mohli být tvořeny systémy typu keramika-keramika, keramika–kov či kompozity na bázi grafitu. Praktické využití nachází hlavně díky skvělé odolnosti proti vysokým teplotám, přitom dosahují dobré pevnosti a odolnosti proti creepu a oxidaci. Vyztužení kompozitů s keramickou maticí vzniká za pomoci technologie práškové metalurgie na bázi oxidů, nitridu, karbidu a případně boridů.

Malé částice dispergované v matici navyšují tvrdost, mez kluzu a pevnost materiálu matrice. Tohoto zpevnění můžeme dosáhnout pouze za podmínky přítomnosti acikulárních částic v částicové výztuži, například destičkovitého či jehlancovitého tvaru.

Zvýšení lomové houževnatosti kompozitu s keramickou maticí můžeme dosáhnout aplikací kovových (wolframových, molybdenových) či keramických (karbidu křemíku SiC, uhlíkových) vláken do matrice při vlastnostech vyššího modulu pružnosti vláken než má keramická matrice.

Kompozity vyztužené keramickými vlákny dosahují vysokou pevnost, tepelnou a chemickou odolnost. Příkladem tohoto typu je kompozit s keramickou maticí Si_3N_4 vyztužený vlákny karbidu křemíku SiC, který se využívá na lopatky spalovacích turbín. [9]

1.4.3 Polymerní matrice

Polymerní matrice se nejčastěji využívá při výrobě kompozitů. Oproti kovům má nízkou měrnou hmotnost, vysokou měrnou pevnost, korozní odolnost, dobré tlumení kmitů, nízkou tepelnou a elektrickou vodivost a nevyžaduje povrchové úpravy. Největší výhodou se uvádí nízká hustota, díky které se často používá v letadlových konstrukcích. Nevýhodou je však nízká tepelná odolnost polymerů, a proto je při výběru třeba zvážit faktory, jako je účel použití kompozitu, tepelná a chemická odolnost, dostupnost zpracovatelských technologií a hlavně cena kompozitu.

Mechanické vlastnosti polymerních matic se od sebe vzájemně moc neodlišují, ale i přesto jsou závislé na použití druhu polymeru (termoplast, reaktoplast, elastomer) a na typu struktury daného polymeru (amorfni, semikrystalická zesíťovaná).

Částicové kompozity s polymerní maticí mají široké uplatnění v různých oborech. Příkladem částicových kompozitů lze jmenovat i polymery s pevnými plnivy (saze, CaCO_3 , slída, skleněné kuličky, SiO_2 , atd.), které mají kladný vliv na mechanické vlastnosti kompozitu jako je zvýšení modulu pružnosti, ořezuvzdornosti a jiné. Příměsové částice dávají kompozitu větší tvarovou stálost za tepla, menší smrštění, zvýšení tepelné vodivosti, snížení tepelné roztažnosti či zvýšení pružnosti v tahu. Pro zvýšení tuhosti polymerů je nutné

použít částice o velikosti větší než 1 mm. Samotné zpevňování polymerních matic vzniká za použití prášků mikro mletých minerálů z hlinitokřemičitanů (kaolin, mastek), vrstvených hlinitokřemičitanů (slída) nebo uhličitanů (vápenec, těživec). Druh a množství plniva závisí na požadovaných vlastnostech kompozitu. Pro zvyšování elektrické vodivosti se přidávají kovové prášky (Al, Cu, Ag) o vysoké koncentraci. Pro získání kompozitů s magnetickými vlastnostmi se využívá výztuž tvořena feromagnetickými oxidy železa nebo je použito práškové železo. [8, 9]

Vláknové kompozity s polymerní maticí se využívají v oborech, kde je vyžadována vysoká měrná pevnost, vysoký měrný modul pružnosti v tahu, dobrá korozivzdornost, dobrá chemická odolnost a dobré dielektrické vlastnosti.

Polymerní matrice se nezpevňují kovovými a keramickými vlákny, protože tato vlákna mají negativní vliv na mechanické vlastnosti kompozitu, díky své hustotě. [9]

Termosetická matrice

Reaktivní pryskyřice jsou skupinou termosetů. Jsou známé jako licí, impregnační, prosycovací nebo zalévací pryskyřice. [8]

Mezi nejčastěji používané reaktoplastové matrice se řadí:

- epoxidové pryskyřice (EP)
- nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)
- vinylsterové pryskyřice (VE)
- formaldehydové pryskyřice (PF)
- polyuretanové pryskyřice (PUR)

Nejběžněji používaná vlákna s termosetickou maticí jsou uhlíková, aramidová a skleněná. Uhlíková a aramidová vlákna mají největší použití v kombinaci s epoxidovými pryskyřicemi při výrobě laminátů, které se vytvrzují z prepregů v autoklávech. Výroba laminátů tvořená skleněnými vlákny je většinou za pomoci tzv. kontaktní beztlakové laminace, nazývaná také laminací s tekutou pryskyřicí za mokra.[9]

Aby kompozit měl konečné vlastnosti, musí dojít k vytvrzení. Reaktivní pryskyřice jsou kapalné či tavitelné a jejich proces vytvrzování běží buď samostatně nebo smícháním s tvrdidly, kterými mohou být iniciátory, urychlovače, katalyzátory či aldehydy (fenoly) – vytvrzení polyadící nebo polymerací bez odštěpení reaktivních těkavých složek. [8]

Výhodou kompozitů s termosetickou maticí je její nízkomolekulární výchozí stav, který je za normální teploty tekutý. Pokud je ve formě taveniny, její viskozita je nižší než

viskozita taveniny termoplastů. Proto se termosety lépe zpracovávají a prosycují vlákna. Také vyžadují menší energetické nároky na prosycení vláken z důvodu průběhu zpracování za nižších teplot. [8]

Pryskyřice VE, PF a PUR mají naproti ostatním pryskyřic obecně lepší vlastnosti. Proces vytvrzování pryskyřice PF musí být za vysokého tlaku z důvodu vody, která se z ní v průběhu uvolňuje, a bez dostatečného tlaku může zanechávat ve struktuře matrice nežádoucí póry. [9]

Termoplastická matrice

Kompozity s termoplastickou matricí se čím dál více uplatňují v různých odvětvích. Mezi ekonomicky nejvýhodnější matrice řadíme polypropylenové (PP). Naopak mezi dražší a zároveň pevnější, chemicky a tepelně odolnější, patří aromatické termoplasty, např. polyamidy (PA), polyimidy (PI), polyamidoimidy (PAI) a jiné. [8,9]

Na výrobu vysokopevnostních termoplastických matric se využívají polyethylen (PE), styrén-polyethylen (PE), styrén-akrylonitril acetáty (SAN), polybutylentereftalát (PBTP), polyvinylidenfluorid (PVDF), tavitelné kopolymery tetrafluorethylenu (PTFE) a jiné. [9]

Termoplasty a termosety se odlišují jiným zpracováním i různými uživatelskými vlastnostmi. Hlavní výhodou termoplastů je jejich vyšší houževnatost, avšak pouze minimum termoplastů dosahuje takové hodnoty modulu pružnosti a chemické a tepelné odolnosti jako termosety. Výhodou termoplastů je možnost zpracování a tvarování, které probíhá pouhým ohřevem na tavicí teplotu 200°C, a ztuhnutím matrice bez vstupujících chemických vytvrzovacích procesů, které mají negativní vliv na kvalitu výrobků a také i na životní prostředí. Nevýhodou je náročné prosycování vláken v roztavené fázi v průběhu zpracování, díky řádově vyšší viskozitě. [8]

Termoplastické matrice patří z výrobního hlediska k obecně výhodnější díky krátkému času lisování a absence vytvrzovacího procesu. Oba materiály lze zpracovat lisostříkem za vysokých teplot a proces je zakončený zchlazením. [8, 9]

Nejčastějšími typy výztuže jsou vlákna skleněná, uhlíková, aramidová (PPTA) a vlákna z vysoce dlouženého polyetylenu UHMW-PE (Ultra High Molecular Weight). [8]

- Termoplasty vyztužené krátkými vlákny - tyto termoplasty vynikají zejména vyšší cenou, a proto je jejich vyztužení účelné pouze, když nelze dosáhnout požadovaných mechanických vlastností jinými způsoby a nebo dojde-li ke značnému zlepšení

mechanických vlastností, kterých bychom nemohli dosáhnout u nevyztužených termoplastů. [8]

- Termoplasty s dlouhými vlákny - nabízí nižší surovinové náklady, houževnatější materiál, vyšší odolnost proti poškození a zpracování bez chemické reakce. Mezi negativní vlastnosti lze jmenovat špatnou přilnavost nátěrů, nízkou odolnost proti povrchovým látkám způsobujícím korozi při napětí vzniklou špatnou kvalitou povrchu, nízkou tvrdostí a větší náchylností proti creepu než termosetické matrice. [8]
- Termoplasty s nekonečnými vlákny - využívají se jako polotovary pro další zpracování, jsou vyztužené například skleněnou rohoží (GMT), jednosměrnými pásy nebo tkaninou. [8]
- Vysokopevnostní termoplastové kompozity – jsou poslední skupiny kompozitů, které obsahují až 80 % vyztužujících vláken. Mezi nejdůležitější výrobky této skupiny patří termoplasty vyztužené skleněnými rohožemi z PP matrice (GMT) a termoplasty vyztužené dlouhými vlákny (LFT) – prošité rohožemi, přičemž v důsledku lámání vláken tak materiál snadněji vyplní formu. [8]

1.5 Výztuž

Vlákna vyztužující kompozity lze rozdělit na kovová, polymerní, keramická, skleněná a whiskery. [9]



Obrázek 3 Dělení výztuže podle použitého materiálu

1.5.1 Kovová vlákna

Nejčastěji se používají k vyztužování kovových matic. Protože jsou docela těžká, je jejich použití méně výhodné. Ocelová vlákna z uhlíkových ocelí se využívají na zpevnění kovových matic o nízkém bodu tavení, např. pro zpevnění hliníkových slitin. Při vyšších teplotách se využívají vlákna z oceli typu maraging, tj. martenzitická stárnucí ocel. Pro zpevnění žáruvzdorných slitin se využívají velmi těžká wolframová nebo molybdenová vlákna z žárupevných kovů. Dále se začala aplikovat vlákna z kovových skel, která mají vysokou mez pevnosti 5000 až 8000MPa. Nyní se vyvíjejí hybridní organo-kovová vlákna (Si-Ti-C-O) a kovo-keramická vlákna, jejichž základ tvoří oxidy (Al-B-Si, Al-Cr-Si). [9]

1.5.2 Skelná vlákna

Skleněná vlákna nacházejí použití v kompozitech s polymerní maticí. Vynikají hlavně vysokou pevností, avšak výraznou nevýhodou je jejich křehkost a nízký modul pružnosti.

Nejčastěji se používají v podobě tkanin, např. v maticí z polyesterové pryskyřice tvoří sklolamináty vyztužené vlákny z bezalkalických skel, tzv. E sklo. Tyto vlákna jsou vyrobena z SiO_2 , Al_2O_3 , CaO a MgO . Skleněná vlákna se vyrábí rychlým tažením z taveniny. V porovnání s jinými vlákny je výroba skleněných vláken jednodušší a levnější. Uplatnění v praxi nacházejí hlavně v konstrukcích letadel, automobilů, sportovním vybavení atd. [7, 9]

Pro křehkost skleněných vláken se vyrábějí kompozity s vysokou náročností na tuhost, tzv. hybridní kompozity. Kompozity, s obchodním názvem GLARE, které jsou vyztuženy ze skleněných a uhlíkových vláken. Vynikají dostatečnou tuhostí a příznivou výrobní cenou. [7]



Obrázek 4 Skelné vlákno

1.5.3 Keramická vlákna

Keramická vlákna jsou typická odolností vůči vysokým teplotám, tepelné stabilitě, vysokou tuhostí, malou tepelnou roztažností, malou závislostí vlastností na teplotě, vysokým modulem pružnosti, nízkou měrnou hmotností, nižší hustotou a schopností odolat vyšším tlakům, v porovnání s ostatními vlákny. Keramická vlákna se běžně využívají s kovovou či keramickou maticí při požadavcích na kompozit se zvýšenou odolností proti vysokým teplotám. [7]

Základní rozdělení keramických vláken:

- Borová
- Uhlíková
- Z karbidů, nitridů a oxidů

Mezi ostatní zástupce keramických vláken patří např. Nextel neboli Saffil, který je tvořen vlákny oxidu hlinitého s častou aplikací v kovových (Al, Mg) či keramických maticích. [7]

Borová vlákna - byla jako jedna z prvních výztuží obsažena v matici s hliníkovou slitinou při výrobě raketoplánů v 60. letech 20. století. Poté se začaly používat hlavně v maticích tvořených epoxidovými pryskyřicemi, například pro výrobu sportovního náčiní. Nevýhodou je náročná výroba borových vláken. Pevnost borových vláken se pohybuje kolem 4GPa, modul pružnosti dosahuje 400GPa a typický průměr vláken je asi 100 μ m. Borová vlákna jsou obtížně tvarovatelná, proto se dlouhá vlákna vyrábí pomocí metody chemické depozice boru za přítomnosti plynné fáze na wolframové vlákno průměru 12 μ m. S přihlednutím ke skutečnosti, že bor je velmi reaktivní prvek, tak s ostatními kovovými

matricemi (Al, Ti), nanáší se na vlákna povlak z karbidu křemíku. Takto potažené vlákno o stejných mechanických vlastnostech jako mají borová vlákna, nazýváme Borsics. [9]

Uhlíková vlákna - jsou nejpoužívanější z keramických vláken. Jsou považovány jako jedny z nejvíce perspektivních výztuží pro polymerní, keramické i kovové matrice. Největší zastoupení mají v leteckém i kosmickém průmyslu. Uhlíková vlákna se vyznačují vysokou mechanickou pevností, nízkou hmotností, vysokou stabilitou za vysokých teplot, korozivzdorností do 200° C, velkou odolností proti únavě, malou odolností proti ostrým ohybům, dobrou elektrickou vodivostí a minimální tepelnou roztažností nebo smrštitelností. Dále jsou chemicky inertní a mají nižší pevnost za normální teploty v porovnání se sklem nebo aramidem, avšak pevnost zůstává nezměněná až do 1000°C. Vlákna se upravovují kvůli špatné přilnavosti k matrici. Největší nevýhodou je jejich vysoká cena. Kompozity tvořené uhlíkovou matricí s vyztužujícími uhlíkovými vlákny se používají pro extrémní teplotní zatěžování. Využívají se například v brzdovém obložení dopravních letadel či v tepelných štítech raketoplánů. [7, 9]

1.5.4 Polymerní vlákna

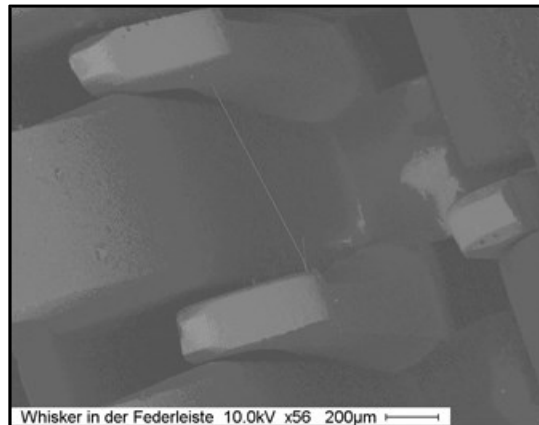
Polymerní vlákna se hlavně používají pouze pro polymerní matrice. Mají malou hustotu, středně vysokou pevnost, velkou měrnou pevnost, malou tuhost, vynikající měrnou tuhost a velké prodloužení při přetížení. Mezi nevýhody patří citlivost polymerních vláken k vysokým teplotám a špatná smáčítevost ve vztahu k pryskyřicím. [9]

Moderním zástupcem polymerních vláken je Kevlar. Vyniká hlavně poměrnou pevností (pětinásobek oceli), dobrou chemickou odolností, dosahuje záporného koeficientu teplotní roztažnosti a ztrácí kvalitu při kontaktu s UV zářením a za přítomnosti kyslíku. Kevlarová vlákna degradují při dlouhodobém zahřívání nad 175° C a při deformaci mají menší lom než skl a větší než grafit. Měrná hmotnost kevlarových vláken je 1,44g/cm³ a pevnost dosahuje přibližně 2,8GPa. [9]

1.5.5 Whiskery

Jsou to speciální krystaly mají ve středu jednu šroubovou dislokaci, která je upevněná a neschopná skluzu za normálního zatížení. Také obsahují rakovinotvorné látky, které se při vdechnutí v těle nerozpouští. Nejznámějším přírodním zástupcem whiskerů je azbest. Whiskery tvoří monokrystaly o poloměru 1μm, délce 3-4 mm a chovají se jako dlouhá nespojitá vlákna. Vyrábí se z látek Al₂O₃, SiC, C, NaCl, Si a Sn při reakčních podmínkách

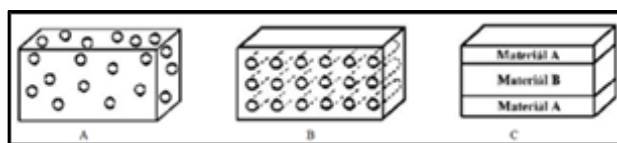
za vysoké teploty a řízené rychlosti růstu za vzniku monokrystalů. Vlastnosti whiskerů souvisí s podmínkami růstu, dokonalosti povrchu a průměru monokrystalů. Vykazují vysoký modul pružnosti. Whiskery z krátkých vláken karbidu křemíku mají vysokou pevnost a odolnost proti defektům. Využívají se na vyztužení matric z hliníkových slitin v částech spalovacích motorů. Keramické matrice vyztužené whiskery z Al_2O_3 vynikají vysokou odolností vůči vysokým teplotám. [9]



Obrázek 5 Whisker (cca 1 mm dlouhý) mezi bezolovnatými pozinkovanými kolíky

1.6 Geometrie výztuže

Podle geometrického tvaru dělíme kompozity na částicové, vláknové a vrstvené. [9]



Obrázek 6 Obrázek 6 A - Částice, B – Vlákna, C – Vrstvy [10]

1.6.1 Částicové kompozity

Částicové kompozity tvoří částice rozptýlené v matrici, které mají nejrůznější tvary, např. kulovitého, destičkovitého nebo nepravidelného tvaru. Prvky, které je tvoří, jsou nejčastěji oxidy nebo nitridy, karbidy a boridy. Částice se v kompozitech podílejí na přenosu zatížení, avšak v menší míře než vlákna. Využívají se především pro zlepšení vlastností

materiálu matrice, např. pro úpravu tepelné a elektrické vodivosti kompozitu, zvýšení odolnosti za vysokých teplot, zvýšení otěruvzdornosti a zlepšení obrobitelnosti. [7, 9]

1.6.2 Vláknové kompozity

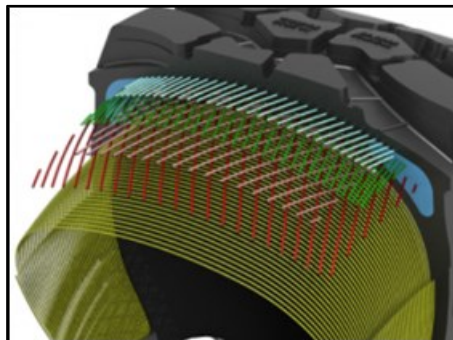
Vlákná zpevňující kompozit mohou být kovová, polymerní, keramická, skleněná nebo whiskery (vláknové monokrystaly). Kombinací pevných a tuhých vláken s poddajnou a křehkou matricí za přítomnosti synergického efektu vznikne kompozit s vysokou pevností, houževnatostí a tuhostí. Z těchto důvodů nacházejí vláknové kompozity hlavní uplatnění v praxi v porovnání s částicovými kompozity, a proto se těmto kompozitům věnuje větší pozornost.[9]

1.6.3 Vrstvené kompozity

Vláknové kompozity lze dělit podle způsobu prostorového uspořádání na jednovrstvé (lamina) a mnohovrstvé (lamináty). Lamináty též tvoří sendvičové materiály, které jsou zpravidla užívané v konstrukci letadel.[4]

Lamináty – Lamino je jednovrstvý anizotropní kompozit o tloušťce 0,1 mm, který nejde použít samostatně. Stejná nebo různá jednotlivá lamina se vrství na sebe a vytváří vícevrstvý kompozit, tzv. laminát. Na výrobu laminátů se využívají prepregy, které reprezentují jednovrstvé lamino. Když je kompozit tvořený kombinací různých vrstev z různých materiálů, mluvíme o hybridním laminátu. Takový typ laminátu nahrazuje a kombinuje vlastnosti všech použitých materiálů, a tím dosahuje zvýšené odolnosti ve směru kolmém na roviny vrstev. [8, 9]

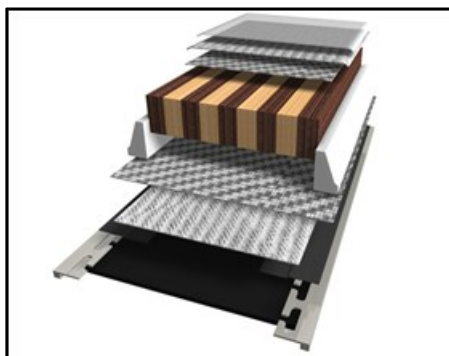
Při výrobě vláknových kompozitů můžeme ovlivňovat výsledné vlastnosti kompozitu, které jsou nezávislé na směru působení zatížení. Jedná se o tzv. izotropní vlastnosti. Tato nezávislost se dosahuje změnou úhlové orientace vrstev laminátů nebo jejich úpravou skladby. Izotropními materiály jsou obecně považovány lamináty, které vytváří lamina vyztužená rohožemi, nahodile uspořádanými vlákny nebo výtzuže typu netkaných textilií. [8,9]



Obrázek 7 Využití úhlové orientace vrstev v pneumatice

1.6.4 Sendvičové kompozity

Składají se z lehkého jádra, které se vloženo mezi dvě vnější laminátové desky. Tyto desky bývají nejčastěji vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny v termosetické matrici, díky nimž získá materiál velkou tuhost v ohybu. Jádro tvoří lehké materiály, které většinou tvoří kompozitní hliníkové voštiny nebo pěny. Materiály použité pro jádro zajišťují nízkou hmotnost sendvičového materiálu a dohromady s deskami mají za následek dobrou tuhost materiálu, tím nedochází ke ztrátě stability při zatížení. Výhodou sendvičových materiálů je jejich lepší pevnost, ohnivzdornost, korozivzdornost, odolnost vůči abrazi a odolnost vůči šíření únavových trhlin. Vlastnosti sendvičových materiálů bývají ovlivněny na základě použitých materiálů jádra, materiálů použitých ve vnějších laminátech nebo výběru lepidla, které je spojuje k sobě. [13]



Obrázek 8 Sendvičová konstrukce lyže

2 NORMY ZKOUŠEK PRO KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

2.1 Značení normy

ISO – norma vydaná Mezinárodní organizací pro normalizaci (International Standards Organization), zal. 1946, sídlo: Ženeva

EN – norma vydaná Evropskou komisí pro standardizaci (CEN – European Committee for Standardisation), zal. 1961, sídlo: Brusel

ČSN – norma vydaná Českým normalizačním institutem (ČNI), zal. 1922, sídlo: Praha

DIN – norma vydaná Německým ústavem pro normalizaci (Deutsches Institut für Normung e.V.), zal. 1917, sídlo: Berlín

GOST – norma vydaná Státním výborem Ruské federace pro normalizaci a metrologii (Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии), zal. 2004, sídlo: Moskva

ASTM – norma vydaná Americkou společností pro testování a materiály (American Society for Testing and Materials), zal. 1898, sídlo: West Conshohocken, Pennsylvania

2.2 Vybrané americké normy

ASTM D 2344 Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates

ASTM D 3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

ASTM D 3846 Standard Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics

2.3 Mezinárodní normy převzaté CEN a ČNI (ČSN EN ISO)

ČSN EN ISO 14125 Vlákny vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností

ČSN EN ISO 14126 Vlákny vyztužené plastové kompozity - Stanovení vlastností v tlaku v rovině výztuže

ČSN EN ISO 15310 Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky

ČSN EN ISO 14130 Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku

ČSN EN ISO 527-1 Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Základní principy

ČSN EN ISO 527-2 Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty

ČSN EN ISO 527-3 Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 3: Zkušební podmínky pro fólie a desky

ČSN EN ISO 527-4 Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 4: Zkušební podmínky pro izotropní a orthotropní plastové kompozity vyztužené vlákny

ČSN EN ISO 527-5 Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 5: Zkušební podmínky pro plastové kompozity vyztužené jednosměrnými vlákny

3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Podle výztuže rozdělíme zkoušky do skupin zabývajících se na kompozit s jednosměrně orientovanými vlákny (např. lamináty, tyčovina) nebo kompozity s tkanými nebo netkanými výztužemi. Národní společnost USA American society for testing materials (ASTM) se zabývá hlavně zkouškám pro jednosměrně orientované a tkané výztuže. Jde o jeden z největších světových zdrojů. Mezi jiné zdroje patří ISO nebo BS (British standart institution). Kromě rozdělení podle původu jde dělit tyto zkoušky na dynamické a statické.

U zkoušek pevnosti kompozitu vzniká lokální poškození (deformacím) různých typů, ty poté způsobí narušení nosných vláken materiálu. Hlavně ve vrstvách, kde by mohlo dojít k porušení mezi vlákny. Hlavním faktorem, který má vliv na výsledek měření jsou okrajové podmínky dané techniky pro provedení zkoušky. Výsledky mohou hlavně ovlivnit i zvýšení trojrozměrné napjatosti v oblasti upnutí zkušebních těles a vzniklým počátečním deformacím, ke kterým může dojít v důsledku bránění materiálu v příčné kontrakci v oblasti působení síly. Podle typu zatížení dochází ke vzniku různých trhlin a prasklin. Napětí a koncentrace protáhnutím materiálu způsobuje nestejnoseměrností v uspořádání vláken, slabou adhezí složek, anebo vzduchovými bublinami. Závislost vlastností kompozitů na čase zatížení, teplotě a podmínkách okolního prostředí (vlhkost vzduchu, UV záření) oproti nevyztuženým plastům není o tolik výraznější. Vliv na chování kompozitů při mechanickém namáhání má hlavně vytvrzení matrice, obsah výztuže, avšak také rozložení plniva, orientace vláken a jejich uspořádání. Při porovnávání vzájemných vlastností je nutné neopomenout obsah vláken. Výsledky vyplývající ze zkoušek jednotlivých vzorků jsou podobné pouze za stejných výrobních podmínek (stupeň vytvrzení, promíchání složek, tlak, teplota, čas, stupeň vytvrzení a další). Niže jsou popsány vybrané metody testování kompozitních materiálů. Je nutné pokaždé zvážit, která zkouška bude zvolena a také za jakých podmínek nebo specifikací. Při samostatných zkouškách může dojít k odlišnosti při testování různých kompozitních materiálů. Hlavně v závislosti na vyztužení kompozitních materiálů. [14,15]

3.1 Statické zkoušky

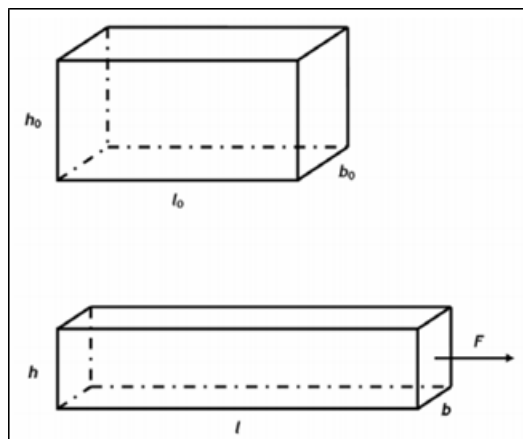
Pevnost kompozitu se odvíjí nejen od vlastností složek, ale hlavně záleží na vzájemné adhezi. Proto pevnostní charakteristiky dosahují větší anizotropii než charakteristiky elastické. Výsledky ze zkušebních metod se mohou v naměřených hodnotách lišit. Elastické charakteristiky bývají většinou měřeny při zatíženích nízkých, kde vlivy struktury (bubliny,

zbytkové napětí, nedostatečná adheze) jsou bezvýznamné. Při vysokých zatíženích u pevnostních zkoušek se ale tyto vlivy projeví.

3.1.1 Tahová zkouška

Přímý prut je namáhaný prostým tahem a tlakem, pokud nositelkou výslednice vnitřních sil je normála průřezu procházející jeho těžištěm. Pak ve všech příčných řezech, které jsou kolmé k výslednici, nacházejí jen normálová napětí $\sigma =$ jednoosá napjatost. Při namáhání uvažujeme, že tlaková napětí jsou velmi malá (hlavně u štíhlých prutů), proto nenastane vlivem ztráty stability k vybočení. [11]

Zkouška tahem pro kompozity se provádí pro ortotropní a izotropní kompozity a lamináty podle normy ČSN EN ISO 527-4, nebo normy ČSN EN ISO 527-5 pro jednosměrně orientované systémy. Zkouška tahem se také řídí podle normy ASTM D 3039. Jako zkušební tělesa jsou využity prizmatická tělesa, ty se na plochách, které budou uchyceny v trhacím stroji, většinou zesilují. Aby byly výsledky zkoušky podložené, je potřeba, aby k narušení vzorku vzniklo mimo upínací čelisti. Geometrie a rozměry zkušebních těles a také podmínky zkoušky předepisuje vždy norma. [5,17]



Obrázek 9 Zkušební těleso před (nahore) a po (dole) tahové zkoušce

Podle normy ASTM D 3039 se vyhodnocuje pevnost v tahu σ [MPa], modul pružnosti v tahu E [MPa], a Poissonovo číslo ν [-] dle uvedených vzorců [18]:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

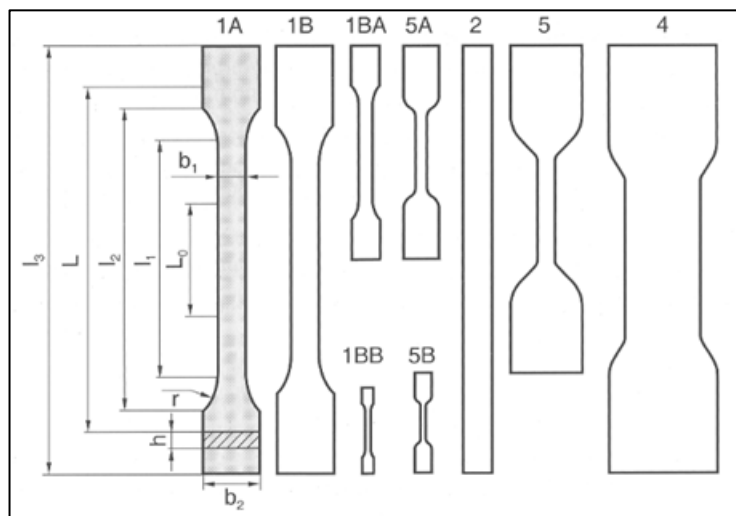
Kde: F_{max} – maximální síla [N], S_0 – původní plocha průřezu [mm^2].

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

Kde: σ_a – napětí v tahu při 0,1 % z celkové deformace [MPa], σ_b – napětí v tahu při 0,3 % z celkové deformace [MPa], ε_a – poměrné prodloužení při 0,1 % z celkové deformace [-], ε_b – poměrné prodloužení při 0,3 % z celkové deformace [-].

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta\varepsilon_2} \quad [-] \quad (3)$$

Kde: $\Delta\varepsilon_1$ – poměrné prodloužení ve směru osy 1 [-], $\Delta\varepsilon_2$ – poměrné prodloužení ve směru osy 2 [-].



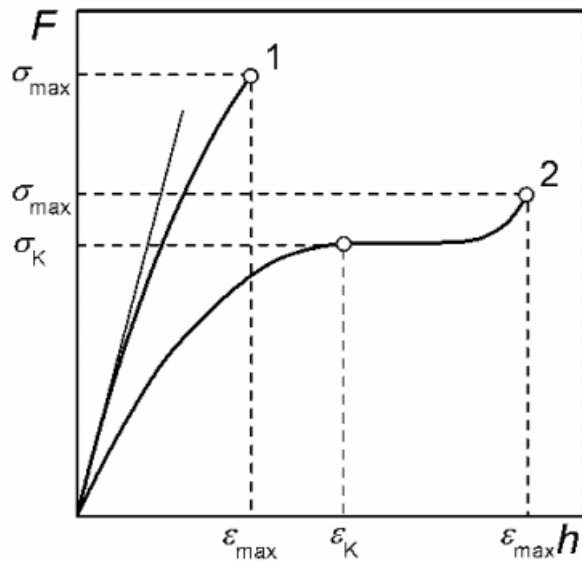
Obrázek 10 Různorodost tvarů zkušebních těles pro tahovou zkoušku

3.1.2 Tlak

Jedná se o namáhání tlakem styčné plochy dvou přitlačovaných těles. Působením síly F [N] na plochu S [mm^2], je měrný tlak p [MPa] rovnoměrně rozložený v celé ploše. [11]

$$p = \frac{F}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Odolnost polymerních materiálů proti tlakovému namáhání se zpravidla odhaduje z pevnosti vycházející z tahové zkoušky. Z pohledu deformace jde o inverzní průběh tahové zkoušky. Předpokládaný zrcadlový průběh ale nastává jen u vysoce elastických kaučuků. Stlačovaná zkušební tělesa vykreslují dva obecné průběhy tlakových křivek. [5,16]



Obrázek 11 Tvarové křivky v obecném tvaru:
1-tvrký materiál, 2-měkký materiál

U tvrdých, tuhých a křehkých materiálů se zvětšuje napětí rovnoměrně až do meze pevnosti. Neexistuje ale lineární hookovská oblast. Způsob lomu ovlivňuje struktura materiálu.

Průběh tlakové křivky houževnatých a měkkých polymerních materiálů se prezentuje pozvolnějším nárůstem napětí s mezí toku, nad kterou dochází k plastické deformaci bez viditelného porušení. Zkušební těleso obsahuje mikrotrhliny, které jsou způsobené přemísťováním materiálu. [5,16]

Při deformaci tlakem vzniká stlačením výšky vzorku h z počáteční h_0 . Mezní hodnota deformace odpovídající porušení tělesa se nazývá stlačitelnost, kde h_{max} je výška vzorku při porušení (nebo také maximální hodnota). [5,16]

$$\epsilon_h = \frac{(h_0 - h_{max})}{h_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

Další vyhodnocované parametry (meze úměrnosti, pružnosti, kluzu, maximální s destrukcí) mají návaznost s tahovými zkouškami. Pro napětí při smluvní hodnotě stlačení se definuje modul stlačení. [5,16]

$$S_h = \frac{\sigma}{\epsilon_h} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

Modul pružnosti v tlaku vychází z lineární oblasti tlakové křivky nebo jako tangenta směrnice k počáteční části křivky.

$$E_h = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

Pevnost v tlaku (mez pevnosti v tlaku) se vyjádří z maximální tlakové síly $F_{h \max}$ původního průřezu tělesa.

$$\sigma_h = \frac{F_{h \max}}{A_0} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

U materiálů s vysokým koeficientem tření (pryž, PVC) nebo křehkých, dochází k porušení již při malých stlačeních, tudíž se průřez tělesa mění jen minimálně. U houževnatých je změna průřezu větší, proto je ovlivněno i napětí, ale tato změna se zanedbává a uvažuje původní průřez zkušebního tělesa. [5,16]

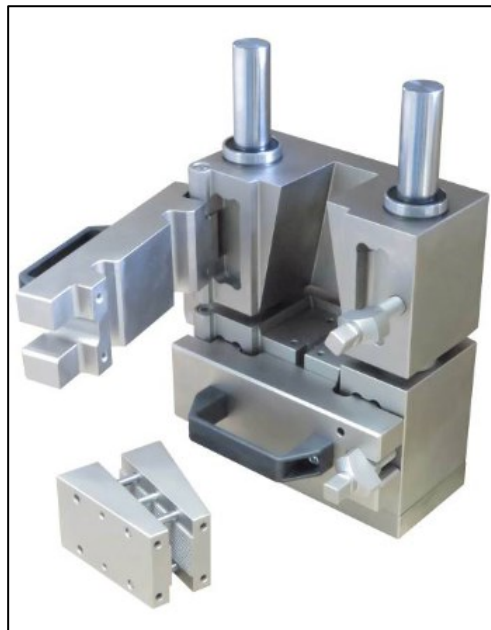
U tvrdých, lehčených materiálů se definuje takzvaná tlaková tuhost jako napětí potřebné ke stlačení o 10 % (modul stlačení $M_c - 10$). Samotné měření tlakových vlastností se určuje na trhacím stroji s upravenou geometrií čelistí pro tlakové zkoušky (tak zvané reverzory). [5,16]

Pro možnost srovnání výsledků je nutné dodržovat tvar a rozměry zkušebních těles daných normou. [5,16]

U kompozitů je klasickým příkladem tlaková zkouška ASTM D 3410 a ASTM D 695. U této zkoušky zjistíme pevnost v tlaku a modul pružnosti v tlaku. ASTM D 3410 test vyhodnocuje vlastnosti kompozitních materiálů v rovině tlaku polymerní matrice vyztužené vlákny s vysokým modulem pevnosti. [5,16]



Obrázek 12 Zkušební
přípravek pro ASTM D 695



Obrázek 13 Přípravek pro zkoušku
ASTM D 3410

3.1.3 Ohyb

Zkouška vyprodukuje důležité konstrukční informace o chování polymerních materiálů v ohybu, které je velmi časté namáhání (nosníky, střešní konstrukce, obkladové

materiály a další). Ohybová zkouška umožňuje stanovit modul pružnosti u materiálů, u kterých to nelze s dostatečnou přesností určit z tahových či tlakových zkoušek. Při namáhání v ohybu je napětí rozprostřeno ve zkušební vzorku tak, že je maximální v krajních vrstvách (tahové a tlakové v závislosti na působení síly) a nulové uprostřed (neutrální vrstva). Maximální napětí se stanovuje:

$$\sigma_+ = \frac{M_0 \cdot h_+}{I}, \sigma_- = \frac{M_0 \cdot h_-}{I} \quad (9)$$

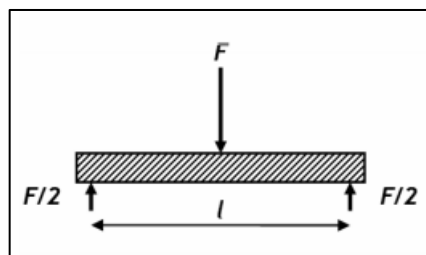
Kde: M_0 - je ohybový modul, I - je moment setrvačnosti plochy průřezu zkušební tělesa vzhledem k neutrální ose, h_+ - je tloušťka materiálu v tahové oblasti od neutrální osy, h_- - je tloušťka materiálu v tlakové oblasti. [5,16]

Dosazením poměru $I / h = W$ dostáváme rovnici napětí v ohybu.

$$\sigma_y = \frac{F_0}{W} \quad [\text{MPa}] \quad (10)$$

Kde: W - je modul průřezu.

K ohybovým zkouškám se využívají zkušební tělesa tvaru trámce, která se položí na dvě podpěry v předepsané vzdálenosti. Síla působící na těleso poté tlačí uprostřed mezi podpěrami (tříbodový ohyb) nebo je rozdělena na dvě stejné velké síly působící v určité vzdálenosti od podpěr (čtyřbodový ohyb). Rovnoměrnější rozložení ohybového momentu při čtyřbodovém ohybu po délce zkušební vzorku dosahuje přesnějšího stanovení modulu pružnosti. [5,16]



Obrázek 14 Tříbodový systém ohybové zkoušky

Pokud nastane porušení při maximálním ohybovém momentu, tak pevnost ohybu se spočítá

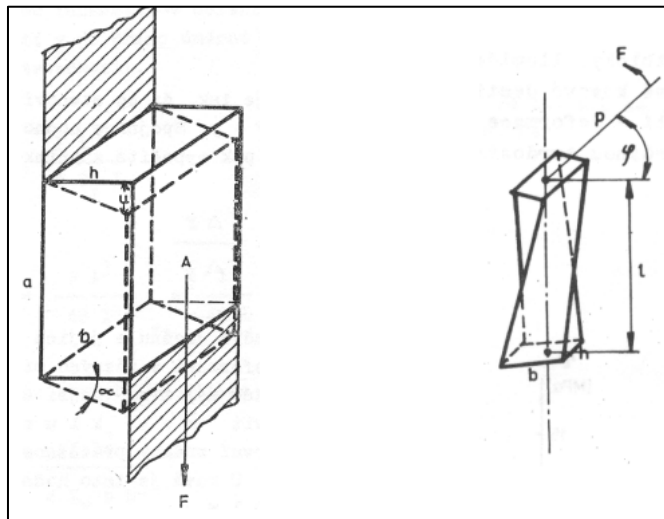
$$\sigma_y = \frac{M_{max}}{W} \quad [\text{MPa}] \quad (10)$$

Modul pružnosti se stanoví z průhybů při různých zatíženích a ze směrnice závislosti zatěžovací síly a odpovídajícího prohloubení se odečte hodnota modulu. [5,16]

3.1.4 Smyk

Zkouška se používá pro stanovení pevnosti kompozitních materiálů ve smyku závislých na směru namáhání. Jednosměrný vyztužený laminát má vyšší pevnost ve směru vláken, proti směru kolmém na vlákna. Pevnost ve smyku se odvíjí od směru namáhání. Pokud namáhání působí v kladném směru, pak se jedná o příčné namáhání tlakové. Pokud napětí působí v záporném směru, pak se jedná o napětí tahové. Výsledkem je, že pevnost ve smyku je u kladného směru vyšší než u záporného směru namáhání. [8]

Jednoduché smykové namáhání si můžeme názorně popsat na hranolu, na který se působí silou a deformuje ho do zkoseného tvaru. [5,16]



Obrázek 15 Smyková deformace (vlevo), Torzní deformace (vpravo)

Hookův zákon platí tak v tomto druhu deformace. Tuhost zkoušeného materiálu představuje smykový modul a napětí.

$$\tau = G \cdot \gamma = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (11)$$

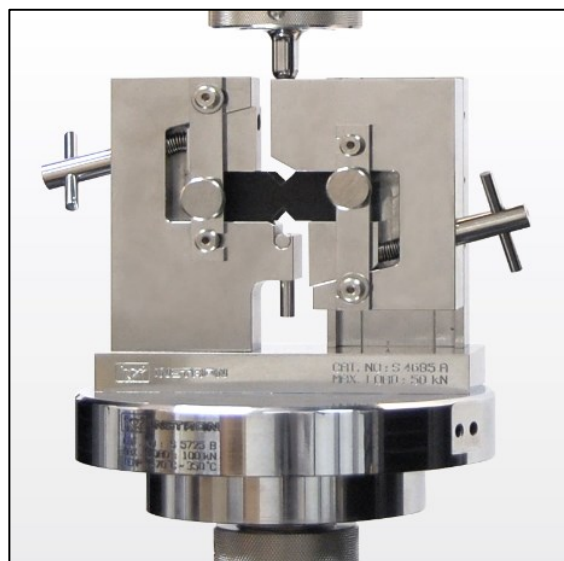
Deformace je dána posunutím namáhané plochy o délku u ve vzdálenosti h od stacionární plochy, tedy tangentou.

$$\gamma = \frac{u}{h} = \text{tg} \alpha \quad (12)$$

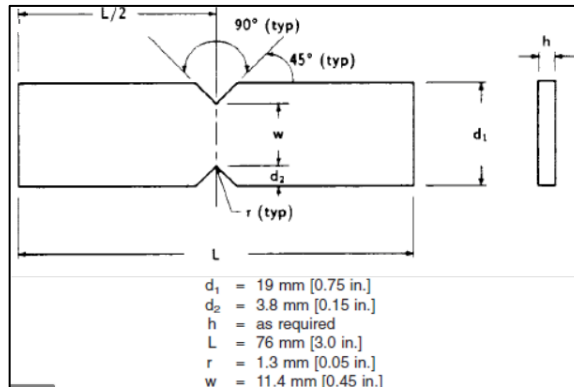
Protože smykové napětí má za následek zkosení dané tangentou úhlu, tak se napětí nazývá jako tangenciální. Tento druh napětí můžeme nejčastěji vidět u pryžových výrobků (pružiny, silentbloky a jiné). Pryž, která je pevně navulkanizovaná na kovové destičky, je namáhána smykem a měří se závislost napětí na deformaci, která vychází lineárně až do vysokých deformací. U desek ale dochází také k ohybu a protahování v celém objemu zkušebního tělesa. [5,16]

Smykové a torzní zkoušky se hlavně využívají k stanovení tepelné závislosti smykového modulu a také ve vulkometrech, kde se mění smykový modul s rostoucí vulkanizací a při únavových zkouškách. [5,16]

ASTM D 5379 zkouška vychází ze základů normy ASTM D 5379/D 5379M-98. Jako zkušební těleso je použit hranol konstantního obdélníkového průřezu s dvěma drážkami. Vzorek se před zkouškou popíše identifikačním číslem a po změření jeho průměrné šířky a tloušťky je vložen do zkušební sady. Podle průměru a šířky se určí rychlost zatěžování nosníkem. (obvykle je rychlost 2 mm/min). Zkouška je přerušena po destrukci zkušebního vzorku, nebo po překročení povolené deformace. Deformaci zjistíme pomocí tensometrů, které jsou uchyceny na zkušebním tělese. Tato zkouška v podstatě určuje smykové vlastnosti kompozitních materiálů, které jsou zpevněny vlákny s vysokým modulem pevnosti. Tyto materiály jsou vyztužené kompozity, které mívají souvislé nebo nesouvislá vlákna. ASTM D 5379 se také běžně pojmenovává jako Losipescův test. [19]



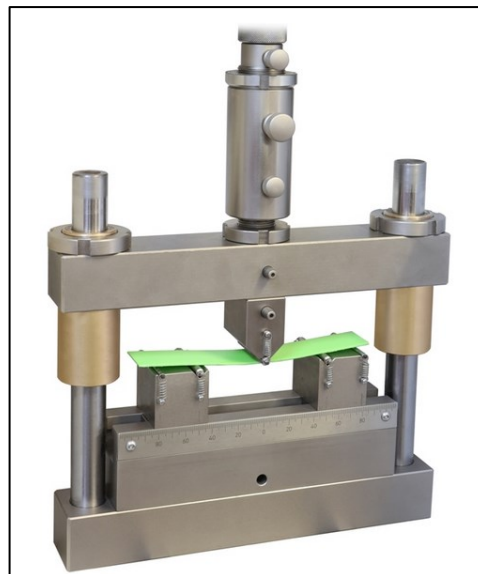
Obrázek 16 Přípravek pro zkoušku ASTM D 5379



Obrázek 17 Rozměr zkušebního vzorku pro zkoušku ASTM D 5379

ASTM D 2344 zkouška stanovuje pevnost ve smyku mezi paralelními vlákny vyztužených kompozitů. Princip zkoušky vychází z toho, že testovaný kompozit je položený na nosníku o dvou podporách. Uprostřed nosníku narůstá tlaková síla, která je přenášena pomocí válečku o průměru 6,3 mm. Tato síla tlačí na kompozit rychlostí klesání 1,3 mm/s. Vzorky bývají malé segmenty vyříznuté z kroužku nebo krátkých paprsků řezaných z plochého laminátu. Při standardním testu, mohou být tlustší než 6,4 mm. Jejich rozměry jsou stanoveny před každou zkouškou, to má důvod, protože výsledky poté budou co nejpřesnější. Vzorky jsou uskladněny při běžné pokojové teplotě, nebo při zvýšené. To závisí na aplikaci.

[19]



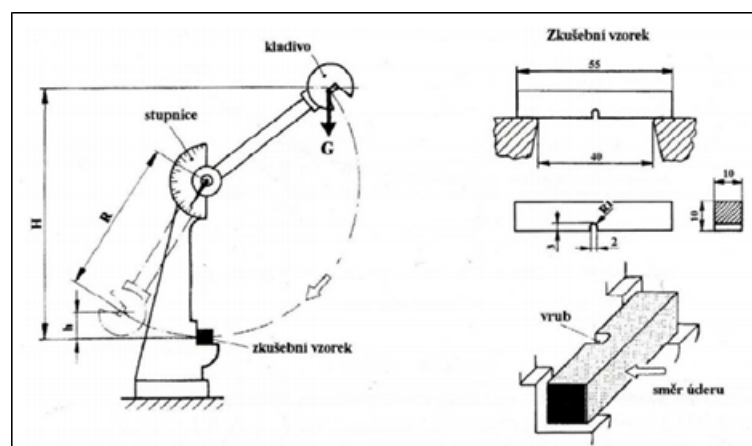
Obrázek 18 Přípravek pro zkoušku ASTM D 2344

3.2 Dynamické zkoušky

Při dynamickém namáhání vlákny vyztužených kompozitů je poškozování při namáhání doprovázeno tvorbou a šířením mnoha typů poruch, které samostatně nemají velký význam jako trhliny například v kovovém materiálu. Takové poruchy lze dělit na porušení soudržnosti vlákna s matricí, lom vlákna, trhliny v matrici, porušení soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami (hlavně u vrstvených materiálů při postupujícím procesu únavy). Nárůst trhliny u kompozitního materiálu může přerušit sousedící pevnější složka. Přesto, že kompozitní materiály mají optimalizovat struktury s ohledem na předpokládaný způsob namáhání, naproti tomu existuje značná rozmanitost ve způsobu a průběhu porušování. To ve výsledku jejich mikroskopicky i makroskopicky heterogenní struktury. Mnoho těchto mechanismů poškozování se nevyskytuje u homogenních materiálu (např. kovů, nevyztužených plastů), které činí při práci s izotropními materiály problémy správně pochopit a interpretovat chování kompozitu během tohoto únavového namáhání. [8]

3.2.1 Rázové zkoušky

Nejznámější a nejvyužívanější je rázová zkouška v ohybu, která se používá hlavně u oceli. Zkušební vzorky mají vrub, aby nastalo porušení materiálu, které by jinak nevzniklo důsledkem vysoké houževnatosti. Rázové zkoušky se provádějí k určení houževnatosti materiálu, jehož měřítkem je energie nutná pro porušení zkušebního tělesa. Vrubovou houževnatost určujeme na Charpyho kladivu. [15]



Obrázek 19 Charpyho kladivo

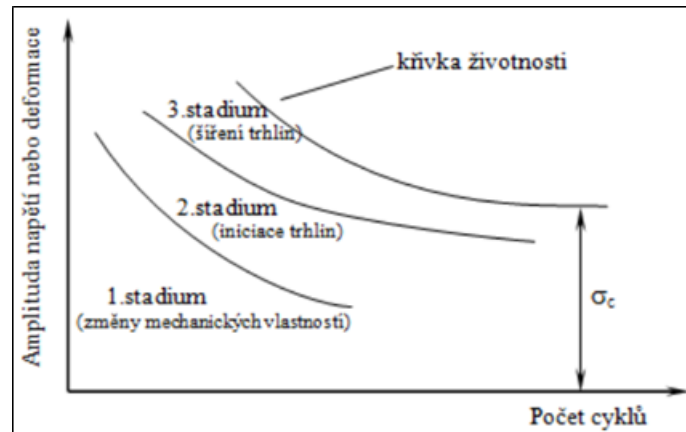
U této zkoušky se kladivo o dané hmotnosti G_k zafixuje v počáteční poloze h_0 a v nejnižším bodě dráhy se upevní zkušební vzorek. Po uvolnění se kladivo zhoupne po

kruhové dráze, přelomí zkušební těleso a vychýlí ho do konečné polohy H. Pro plasty a vlákny vyztužené materiály se jako zkušební těleso používá vzorek o různé délce, šířce 10mm a tloušťce 4mm. [15]

3.2.2 Zkoušky opakovaným namáháním

Během namáhání materiálů vznikají většinou poruchy dříve, než by tomu vypovídala jejich statická pevnost. Tento jev se označujeme jako únava materiálu, proto zkoušky únavy. Při překročení dané hranice, která se nazývá mez únavy, hrozí nebezpečí porušení materiálu. Při namáhání tahem nebo tlakem platí, že intenzivnější tahové napětí snižuje mez únavy a intenzivnější tlakové napětí naopak mez únavy zvyšuje. Také ji snižují zářezy, ostré změny průřezů, otvory a špatný nebo zkorodovaný povrch. [15,16]

Únavu materiálu lze určit na Schenckově přístroji. Během této zkoušky je první tyč zatížena na danou hodnotu a opakovaně uvolněna. Pak se počítá počet cyklů zatížení do lomu materiálu. U ostatních tyčí snižujeme postupně napětí, až do bodu, kdy se tyč nenaruší. K popisu jejich únavového chování slouží Wöhlerova křivka, do které zapisujeme získané hodnoty v závislosti na počtu cyklů a napětí. Vyhodnocení výsledků u zkoušek statistickými postupy můžeme celkem dobře určit vhodnost materiálů pro jejich použití v podmínkách únavového namáhání. Kritériem únavy je lom (úplné porušení zkušebního tělesa). Většina vlákných vyztužených plastů s delší dobou zatížení a navyšující únavou více nebo méně vykazují pokles tuhosti, tudíž pro dynamické zatížení je lom jako jediné kritérium únavy nedostatečný. Pokles tuhosti je možný např. při použití vlákných vyztužených plastů, kde by se mohla změna vlastností s počtem cyklů v určitých mezích měnit. Abychom získali více informací vneseme údaje o poklesu tuhosti (obvykle 10-20%) do Wöhlerovy křivky. Tím dostaneme další informace o časovém průběhu únavy. Pro určení zbytkové pevnosti je pak zkušební těleso po daném počtu cyklů zatížení vystaveno ještě statické zkoušce. [15,16]



Obrázek 20 Schéma rozdělení únavového procesu

Tato křivka se asymptoticky blíží k mezi únavy. To je napětí, při kterém materiál zvládne nekonečný počet cyklů. V praxi určujeme smluvní mez únavy (napětí), při které materiál vydrží daný počet cyklů určených jako základ zkoušky. [8]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Cílem praktické části této práce je provést konstrukční návrhy a na dimenzování přípravků pro mechanické zkoušky zadaného vzorku. Vytvořit výkresovou dokumentaci ve 3D a 2D. Při návrhu je třeba brát v úvahu parametry zkoušeného tělesa a variabilitu pro použití přípravků zkušebního zařízení, kterým disponuje UTB ve Zlíně.

4.1 Charakteristika zkušebních strojů

Na UTB ve Zlíně je možné mechanické zkoušky provádět na strojích:

- ZWICK/ROELL 1456
- ZWICK/ROELL HC 25

Oba stroje jsou určeny pro různé druhy mechanických zkoušek, pro které byli již dříve vyrobeny nebo upraveny různé přípravky. Ty byli na dimenzovány na uchycení pro služebně starší ZWICK/ROELL 1456. Jelikož ZWICK/ROELL HC 25 nemá totožné parametry pro uchycení, je třeba navrhnout přípravek pro redukci.

4.1.1 ZWICK/ROELL 1456

ZWICK/ROLL 1456 je určen pro tahové, tlakové a ohybové zkoušky. Stroj je vybaven teplotní komorou, díky které lze při měření dosahovat teplot v rozmezí - 80⁰ C až + 250⁰ C.

Technické parametry:

- Maximální zkušební síla 20kN
- Pracovní šířka: 420 mm
- Strojová výška: 1284 mm
- Celková výška stroje: 2012 mm
- Celková šířka stroje: 630 mm
- Hmotnost stroje: 150 kg

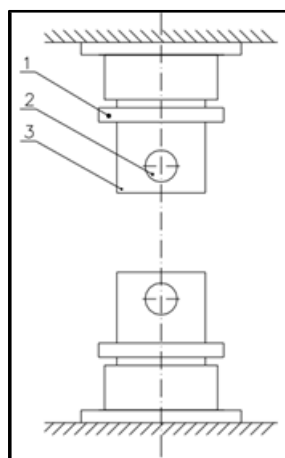
Zwick 1456 disponuje stolem, základovou deskou, rámem s pojezdovými tyčemi, na které je přichycen příčník a extenzometr pro přesnější měření hodnot protažení vzorku. Uchycení přípravků ke stroji je možné s pootočením o 45° kolem svislé osy stroje, které lze využít pro testování větších zkušebních těles při různých druzích zkoušek. Stroj je propojen s počítačem, který umožňuje práci s naměřenými daty v prostředí programu TestExpert II

verze 7.2. Součástí stroje jsou také různé druhy čelistí. Spodní čelist je pevně uchycena ke stolu stroje, kdežto horní čelist je upevněna na posuvném příčnicku.



Obrázek 21 Zkušební stroj
ZWICK/ROLL 1456

Upnutí ke stroji se provádí přes horní a dolní čep (obrázek 22, díl 3), které jsou zrcadlově proti sobě se zajišťovací maticí (obrázek 22, díl 1). Vnější průměr je 36 mm a díra pro zajišťovací kolík (obrázek 22, díl 2) o průměru 18 mm.



Obrázek 22 Upínací
zařízení stroje

4.1.2 ZWICK/ROELL HC 25

Jedná se o klasický zkušební dynamický servohydraulický stroj používaný pro určení materiálových vlastností při únavových zatíženích, např. S-N test (únavový test), mechanika lomů, LCF (nízko-cyklická únava). Výsledky generuje testovací software Test Expert na základě naměřených hodnot.

Technické parametry:

- Maximální zkušební síla 25kN
- Pracovní šířka: 460 mm
- Strojová výška: 785 mm



Obrázek 23 Zkušební stroj ZWICK/ROELL H25

Upnutí ke stroji, které je stejné jako u předchozího stroje. Tedy přes horní a dolní čep (obrázek 22, díl 3), které jsou zrcadlově proti sobě se zajišťovací maticí (obrázek 22, díl 1). Vnější průměr je 36 mm a díra pro zajišťovací kolík (obrázek 22, díl 2) o průměru 18 mm.

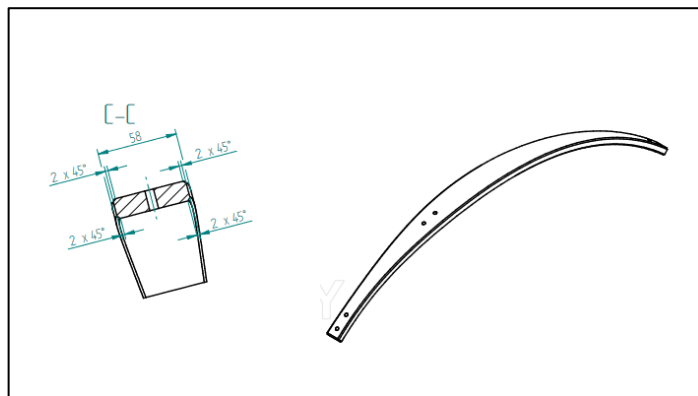
4.2 Zkušební těleso

Zkušebním tělesem jsou skákací boty, respektive jejich pružná kompozitová součást, která se při dopadu (stlačení) s prohne a při odrazu se využije její nahromaděná energie k většímu kroku nebo skoku. Jedná se tedy o sklolaminátovou pružinu, která přirozeně zaoblena jako luk a tomto oblouku je upnuta do kovové konstrukce. Tato konstrukce umožňuje stlačení pružiny, přenos energie mezi pružinou a skokanem, a upnutím nohy skokana.

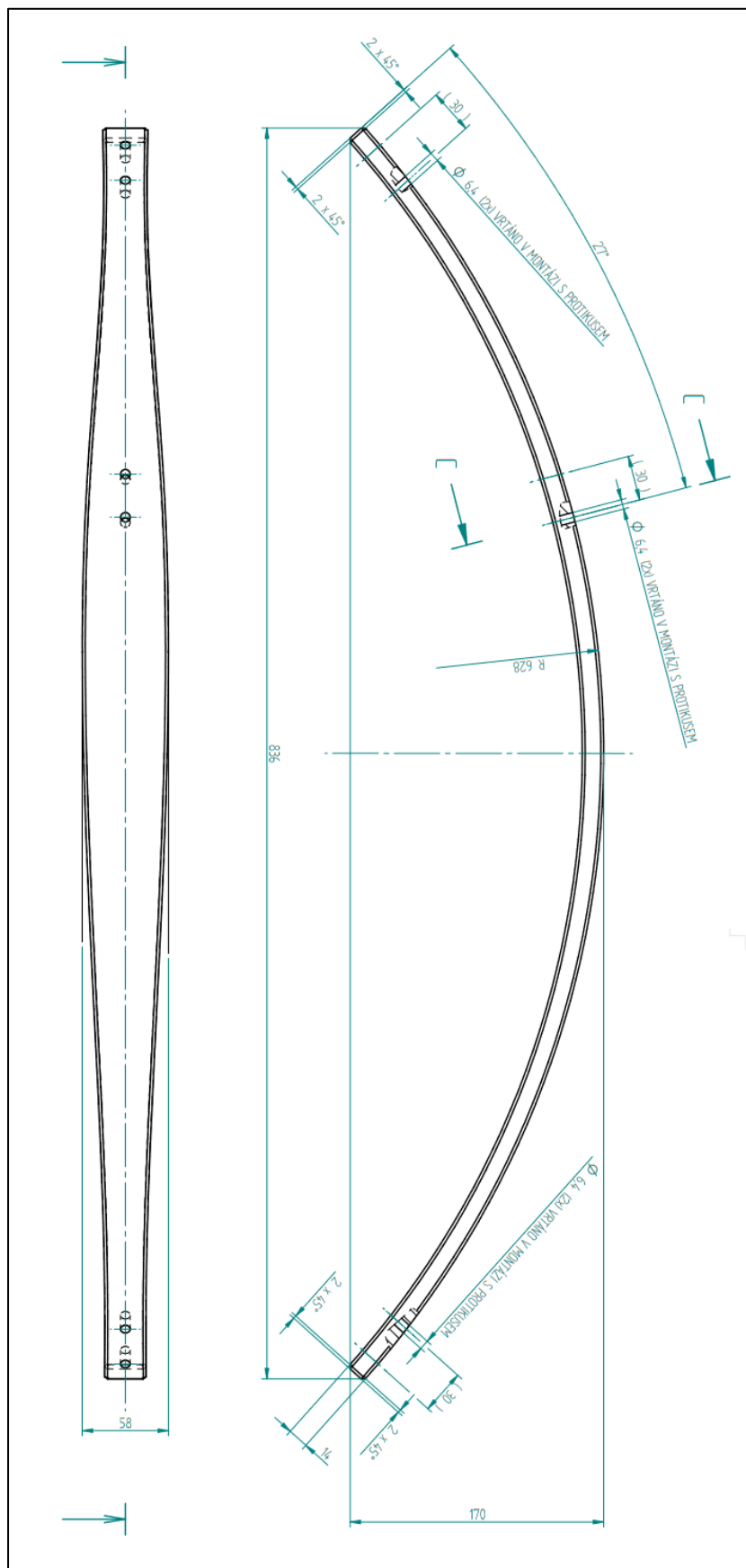


Obrázek 24 Skákací bota

Hlavním parametrem při zadaném tvarovém rozměru (viz. Příloha P I) pružiny pro skákání je její tuhost a nosnost. Tu ovlivňuje složení použitého kompozitu a technologie výroby.



Obrázek 25 Řez a tvar pružiny



Obrázek 26 Rozměry pružiny

5 KONSTRUKČNÍ NÁVRHY PRO ZKOUŠKY PRUŽINY

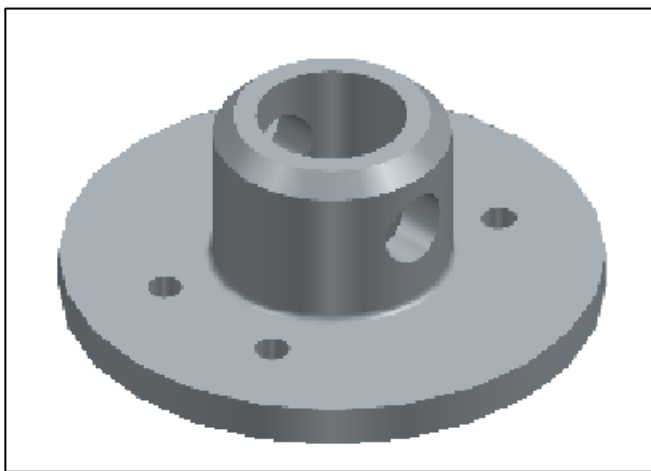
Jak již bylo výše zmíněno, tak nás na zkušební pružině v první řadě zajímá, jak velkou silou můžeme působit ve směru průhybu a o jakou hodnotu se při daném zatížení pružina prohne. Pro tuto zkoušku použijeme sestavu 1 – ohyb.

Poté, co si ve zkoušce na ohyb stanovíme, jak velkou silou můžeme na pružinu působit při předdefinovaném maximálním prohnutí, tak budeme moci přejít ke druhé zkoušce. Zde využijeme sestavu 2, díky které budeme vyhodnocovat kolikrát můžeme pružinu namáhat při daném zatížení.

K vytvoření 3D a 2D dílů, které jsou součástí příloh, jsem použil program Solid Edge 2021, ve verzi pro studijní účely.

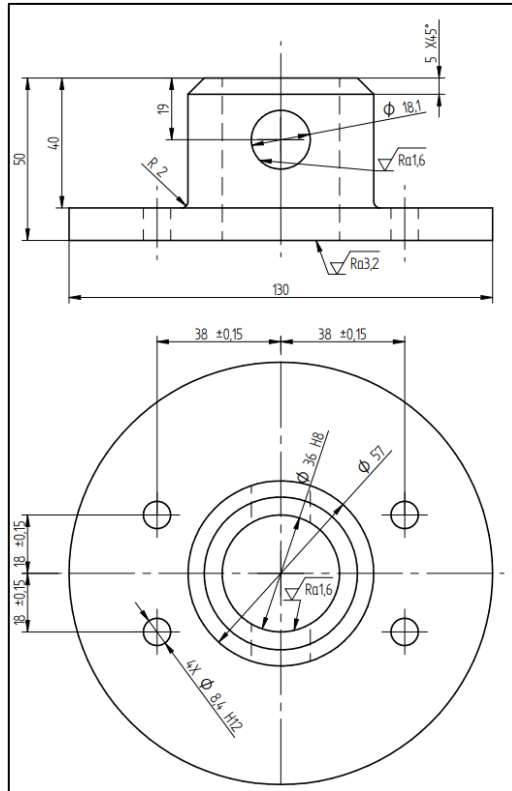
5.1 Univerzální díl upnutí ke zkušebním strojům

Z ekonomických důvodů jsem zvolil pro obě sestavy univerzální přechod v podobě příruby na stejné čepy zkušebních strojů.



Obrázek 27 Příruba 3D

Postup při výrobě dílu:



Obrázek 28 Parametry příruby

Volím materiál 1.0060 (11 600), polotovar 130x130x50 ČSN 42 5522.

Tabulka 1 Postup výroby příruby

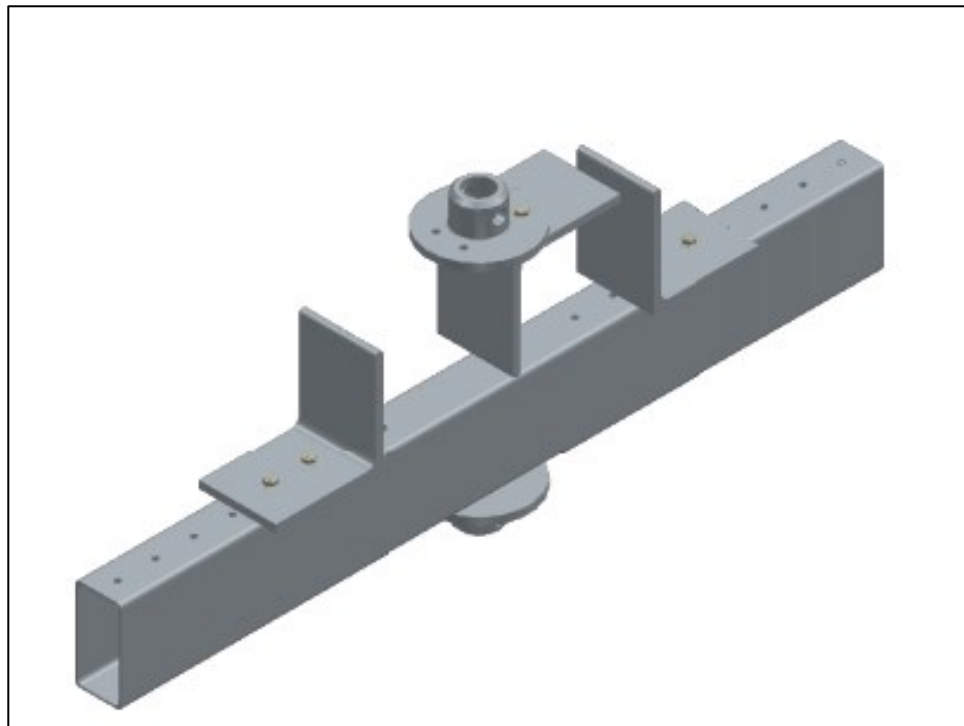
Krok	kdo	Popis operací	Stroj
1	Soustružník	Upnutí a zarovnání čela Soustružení $\varnothing 57$ mm – L = 40 mm Sražení hrany 5x45° Soustružení R2 Přepnutí a zarovnání čela na L=50 mm Soustružení $\varnothing 130$ mm Soustružení a vystružení $\varnothing 36H8$	CNC
2	Rýsovač	Rýsování a značení důlčikem 4x8,4H12 + 1x \varnothing 18,1mm	Důlčik
3	Vrtař	Upnutí	Sloupová

		Vrtání 4x Ø 8,4h12 Přepnutí Vrtání 4x Ø 18,1 Odjehlení	vrtačka
--	--	-----------------------------------------------------------------	---------

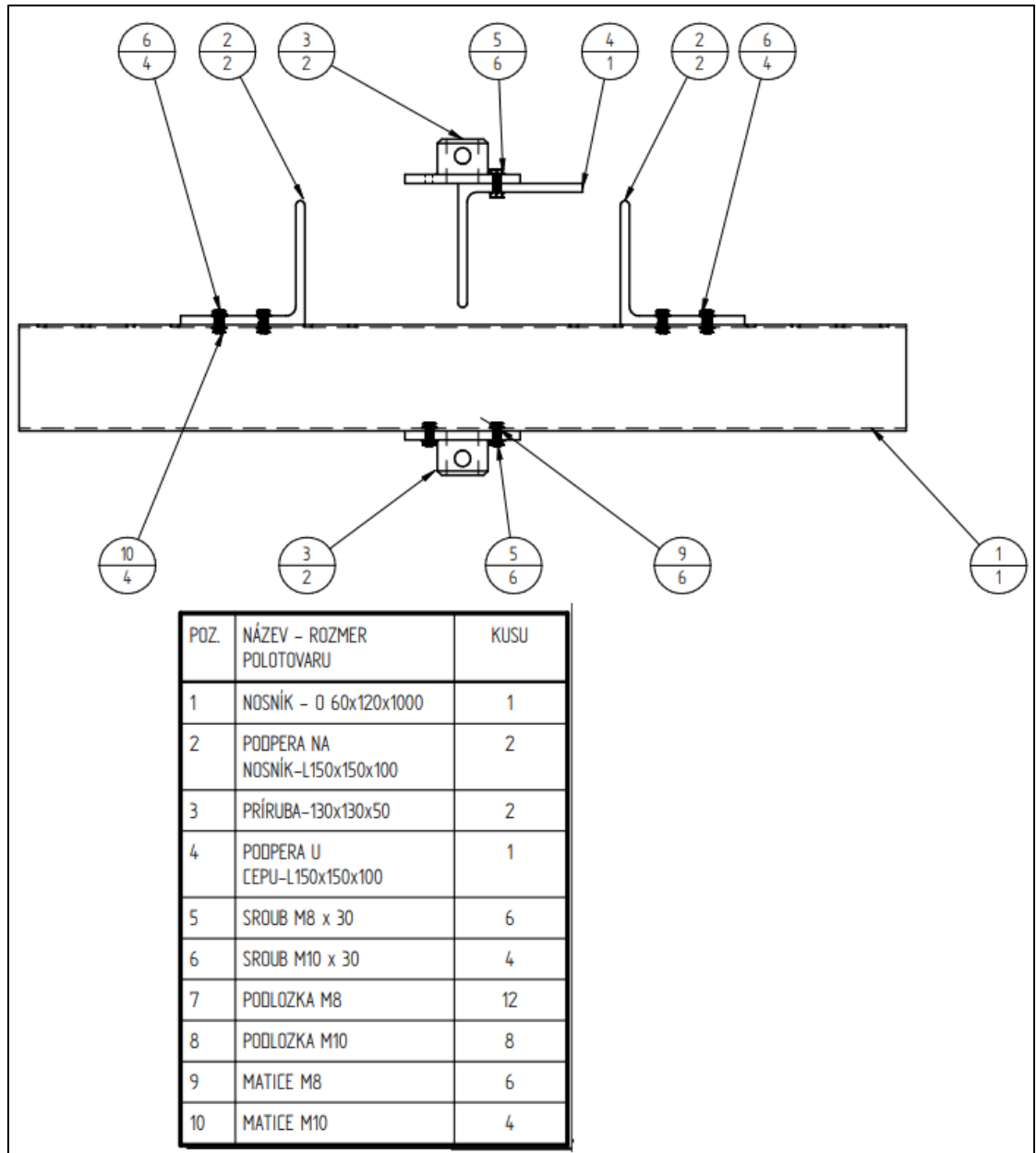
5.2 Sestava 1 – ohyb

Skládá se ze dvou částí, které jsou přes výše znázorněnou přírubu připojeny ke zkušebnímu stroji Zwick/Roell 1456. Dolní část tvoří nízko profilový ocelový nosník, s dvěma zrcadlově umístěnými podpěrami, které je možné dle potřeby osově přemísťovat do vytvořených závitových děr. Pevné zafixování podpěry zajistí šroub s maticí M10, z důvodu tenké stěny nosníku. Horní část se skládá pouze z příruby a na ní umístěné podpory. Podpěry jsou na styčné ploše tvořeny rádiusem 5 mm a jsou totožné, jen s jiným umístěním děr.

Zkušební vzorek je položený na spodních dvou podpěrách, jejichž vrcholy tvoří pomyslnou tětivu pružině.

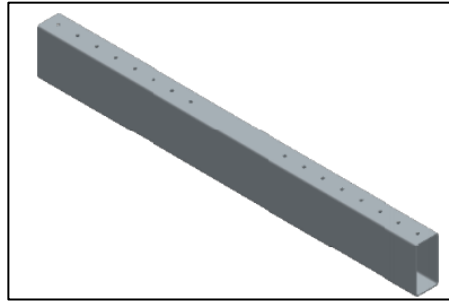


Obrázek 29 Sestava 1 – Ohyb 3D



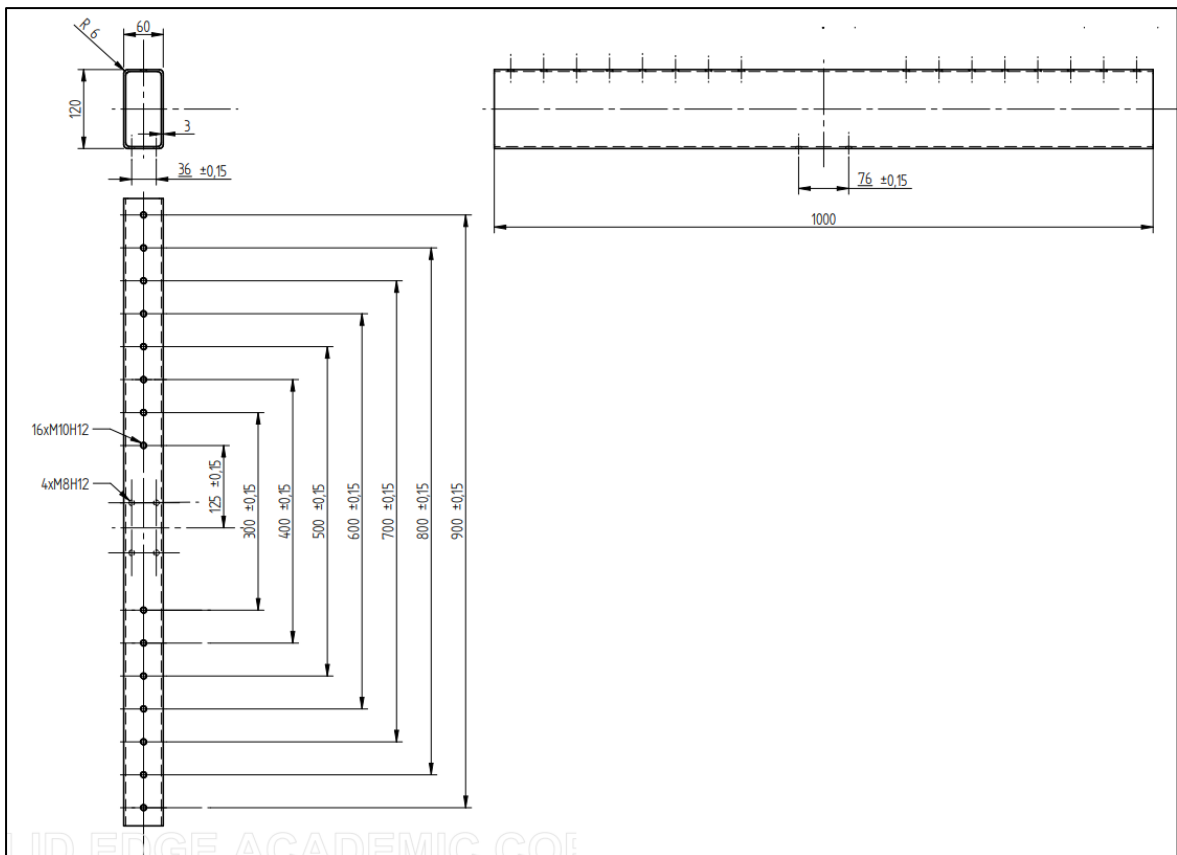
Obrázek 30 Sestava 1- Kusovník

5.2.1 Nosník



Obrázek 31 Nosník 3D

Postup při výrobě dílu:



Obrázek 32 Parametry nosníku

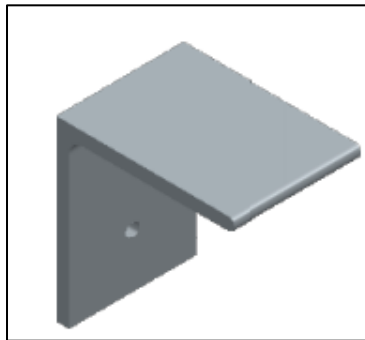
Volím materiál 1.0036 (11 373), S235JRG1, polotovár O 60x120x1000

Tabulka 2 Postup výroby nosníku

Krok	kdo	Popis operací	Stroj
1	Frézař	Upnutí Frézování čela na L=1000 mm	CNC

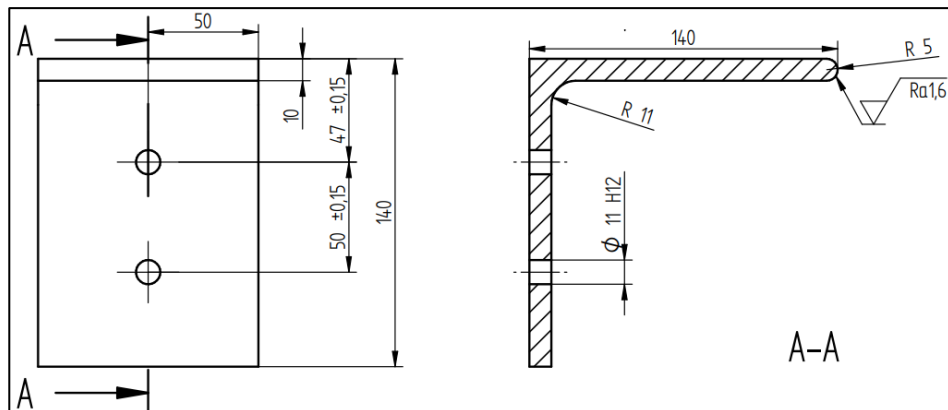
		ojehlení	
2	Rýsovač	Rýsování a značení důlčíkem 16xM10H12 + 4x M8H12	Důlčík
3	Vrtař	Upnutí Vrtání 16x Ø 8,5 Přepnutí Vrtání 4x Ø 6,8	Sloupová vrtačka
4	Mechanik	Řezání závitu 16x M10H12 Řezání závitu 4x M8h12	Sloupová vrtačka

5.2.2 Podpěra na nosník



Obrázek 33 Podpěra na nosník 3D

Postup při výrobě dílu:



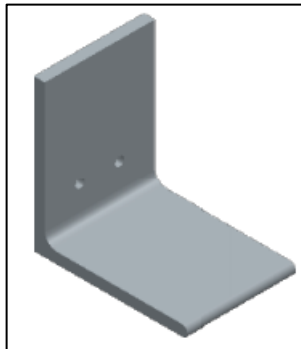
Obrázek 34 Parametry podpěry na nosníku

Volím materiál 1.0060 (11 600), polotovár L 150x150x100

Tabulka 3 Postup výroby podpěry na nosník

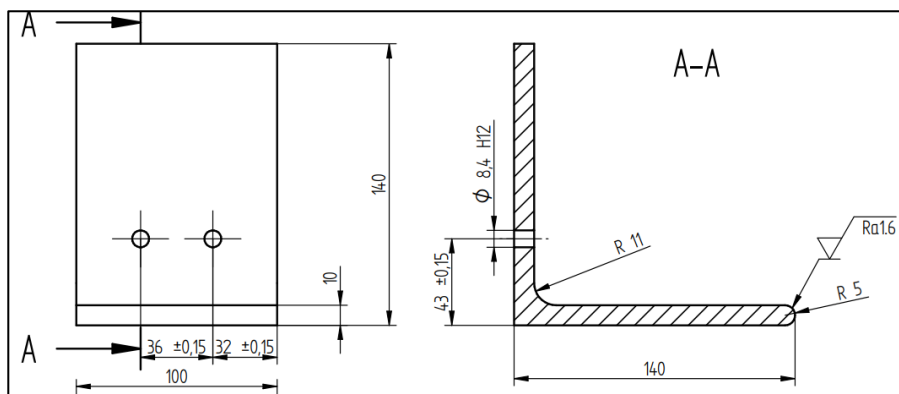
Krok	kdo	Popis operací	Stroj
1	Frézař	Upnutí Frézování na 140x140x100mm Upnutí Zarovnání čela na L=100 mm Frézování R5 Odjehlení	CNC
2	Rýsovač	Rýsování a značení důlčíkem 2x Ø 11H12	Důlčík
3	Vrtař	Upnutí Vrtání 2x Ø 11H12 Odjehlení	Sloupová vrtačka

5.2.3 Podpěry u čepu



Obrázek 35 Podpěra u čepu 3D

Postup při výrobě dílu:



Obrázek 36 Parametry podpěry u čepu

Volím materiál 1.0060 (11 600), polotovár L 150x150x100

Tabulka 4 Postup výroby podpěry u čepu

Krok	Kdo	Popis operací	Stroj
1	Frézař	Upnutí Frézování na 140x140x100mm Upnutí Zarovnání čela na L=100 mm Frézování R5 Odjehlení	CNC
2	Rýsovač	Rýsování a značení důlčikem 2x Ø 8,4H12	Důlčik
3	Vrtař	Upnutí Vrtání 2x Ø 8,4H12 Odjehlení	Sloupová vrtačka

5.2.4 Normalizované součásti

V tabulce níže je seznam normalizovaných součástí pro sestavu 1 určenou pro cyklickou zkoušku.

Tabulka 5 Normalizované součásti sestavy 1

Součást	Norma	Počet kusů
Šroub M8x30mm	DIN 933	8

Šroub M10x30mm	DIN 933	4
Podložka M8	DIN 433	12
Podložka M10	DIN 433	4
Matice M8	DIN 934	4
Matice M10	DIN 934	4

5.2.5 Kritický bod sestavy 1

Jako kritický bod sestavy jsem vyhodnotil maximální zatížení tenkostěnného nosníku.

Parametry: 1.0036 (11 373), S235JRG1, polotovar O 60x120x1000, tl. 3mm.

Výpočet momentu setrvačnosti:

$$I_Y = I_{y1} - I_{y2} \quad (13)$$

$$I_y = \frac{1 \cdot 60 \cdot 120^3}{12} - \frac{1 \cdot 54 \cdot 120^3}{12} = 1,973 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Výpočet průřezového modulu:

$$W_y = \frac{I_y}{z_T} \quad (14)$$

$$W_y = \frac{1,973 \cdot 10^6}{60} = 32\,884,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

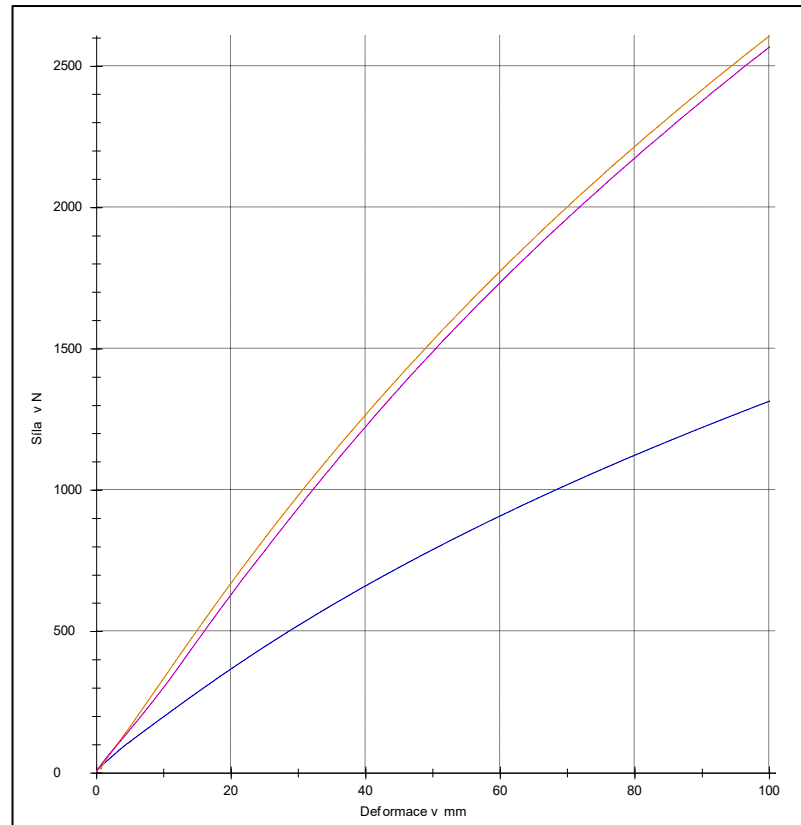
Výpočet dovoleného momentu únosnosti:

$$M_{Rd} = W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (15)$$

$$M_{Rd} = 32\,884,2 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{235}{1,1} = 7,025 \text{ kNm}$$

5.2.6 Výsledky měření

Dle výsledků měření na ohyb si můžeme stanovit nominální hodnotu zatížení pro cyklickou zkoušku. Ohybovou zkouškou prošly celkem tři různé pružiny totožných rozměrů (viz. Příloha 1).

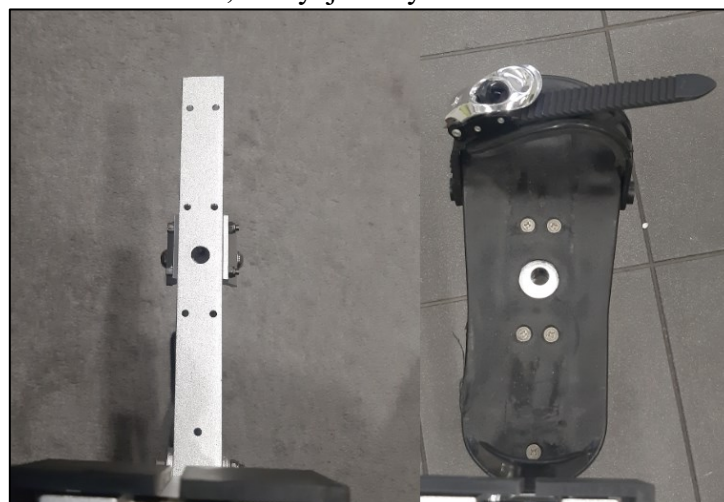


Obrázek 37 Graf ohybu pružin: Modrá - originál, Fialová - deltapreg č2, Červená- deltapreg čl

Z grafu ohybu pružin vyplývají silová zatížení, která jsou výchozí hodnoty pro cyklické zkoušky.

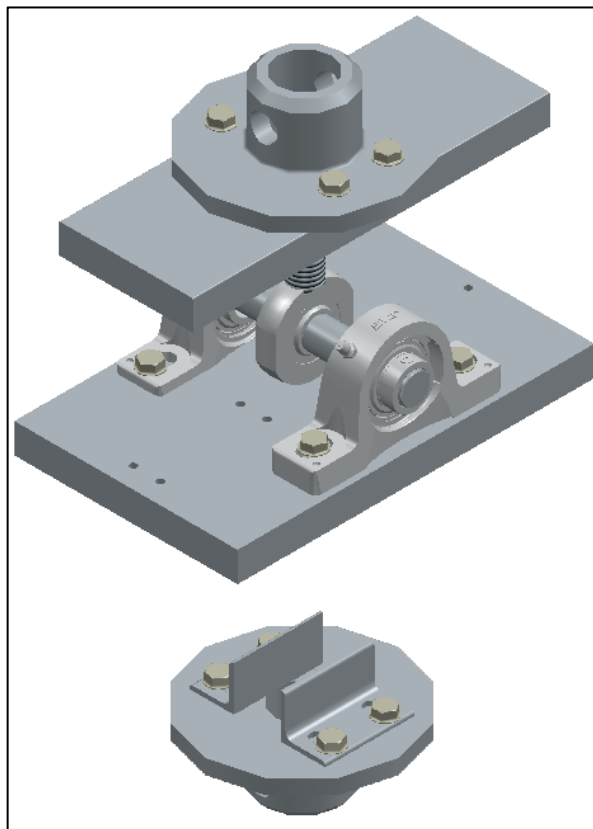
5.3 Sestava 2 – cyklování

Skládá se ze dvou částí, které jsou přes již výše zmiňovanou přírubu připojeny ke zkušebnímu stroji Zwick/Roell H25, který je díky své konstrukci vhodnější pro danou

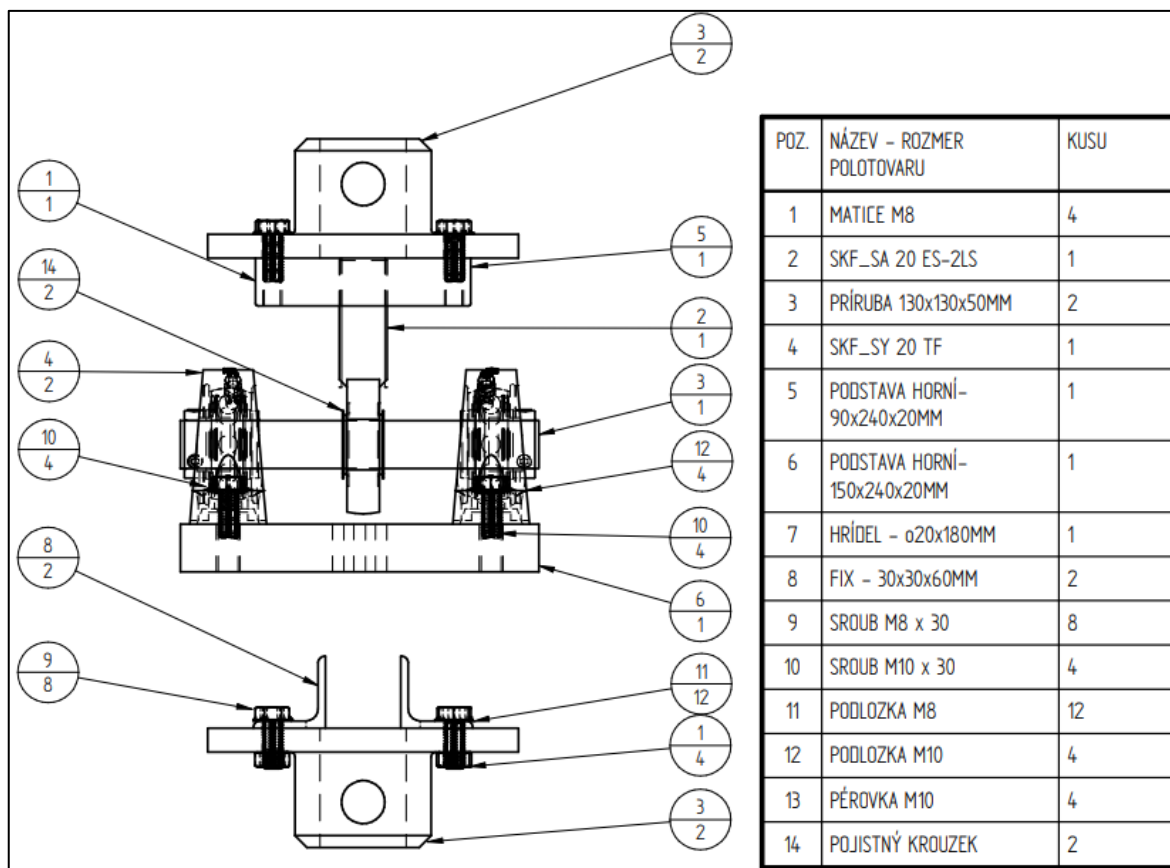


Obrázek 38 Pozice pro upevnění Sestavy 2 - cyklování

zkoušku. Hlavní horní část sestavy má nahrazovat nohu upnutou ke skákací botě. Je tvořena deskou uchycenou v totožných bodech, které nahrazuje originální podložku pro připevnění skutečné nohy (viz. Obrázek 38). V krajích desky se nachází dvě normalizovaná ložisková tělesa propojena hřídelí. Uprostřed hřídele leží další normalizovaná hlava ve tvaru oka s integrální stopkou, která tvoří pouzdro pro kloubové kluzné ložisko. Tato hlava je prodloužena šroubovicí, která se osově upíná do druhé horní desky, na kterou navazuje do příruby a dále přes čep ke stroji. Dolní část tvoří příruba s dvěma stahovatelnými bočnicemi pro zafixování dolní styčné plochy skákací boty.

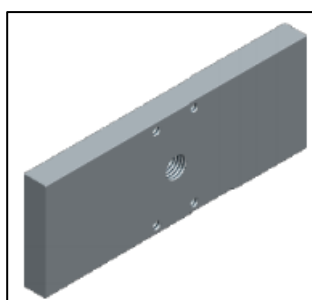


Obrázek 39 Sestava 2 –
cyklování 3D



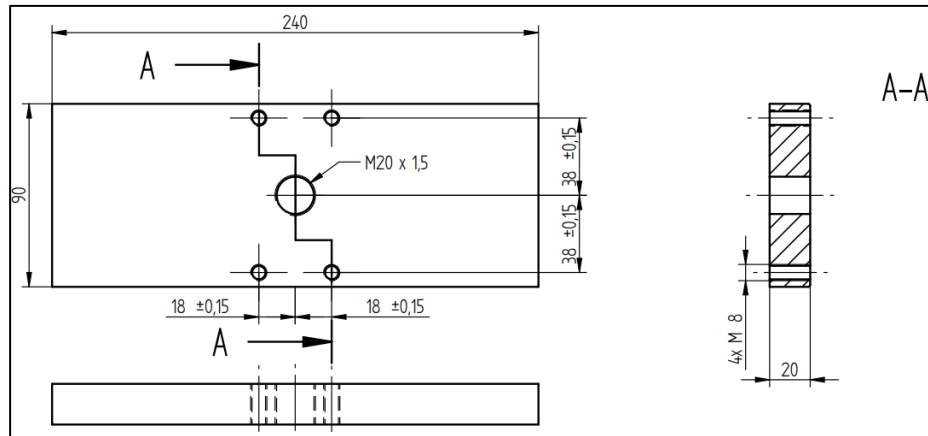
Obrázek 40 Sestava 2 - kusovník

5.3.1 Podstava horní



Obrázek 41 Podstava horní 3D

Postup při výrobě dílu:



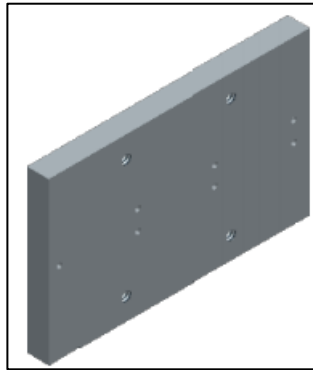
Obrázek 42 Parametry horní podstavy

Volím materiál 1.0060 (11 600), polotovar L 90x240x20mm

Tabulka 6 Postup výroby horní podstavy

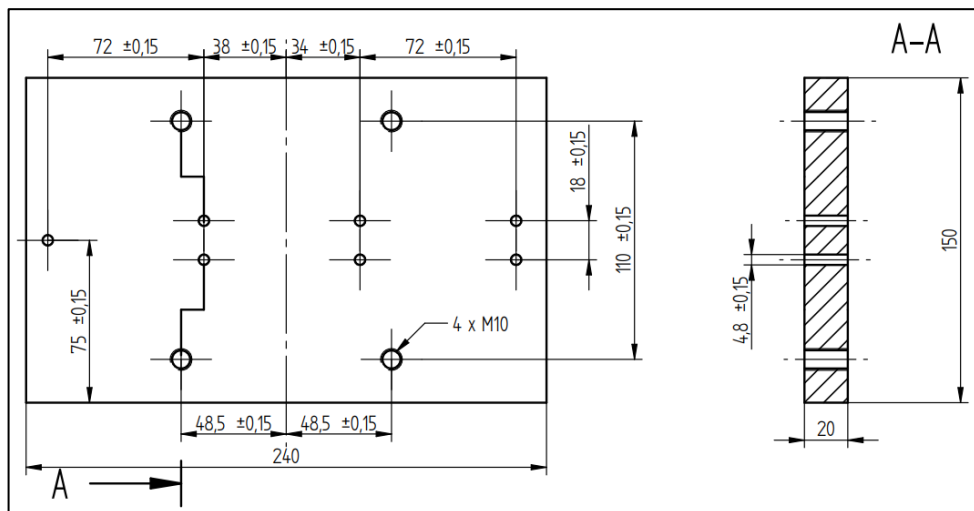
Krok	Kdo	Popis operací	Stroj
1	Frézař	Upnutí Frézování na 90x240mm Odjehlení	CNC
2	Rýsovač	Rýsování a značení důlčíkem 1x závit M20x1,5 + 4x závit M8	Důlčik
3	Vrtař	Upnutí Vrtání 1x Ø 18,5 Vrtání 4x Ø 6,8 Odjehlení otvorů z obou stran	Sloupová vrtačka
4	Mechanik	Řezání závitu 1x M20x1,5 Řezání závitu 4x M28	Sloupová vrtačka

5.3.2 Podstava dolní



Obrázek 43 Podstava dolní 3D

Postup při výrobě dílu:



Obrázek 44 Parametry dolní podstavy

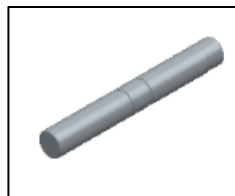
Volím materiál 1.0060 (11 600), polotovar L 90x240x20mm

Tabulka 7 Postup výroby dolní podstavy

Krok	Kdo	Popis operací	Stroj
1	Frézař	Upnutí Frézování na 150x240mm Odjehlení	CNC
2	Rýsovač	Rýsování a značení důlčíkem 7x otvor Ø 4,8 + 4x závit M10	Důlčík

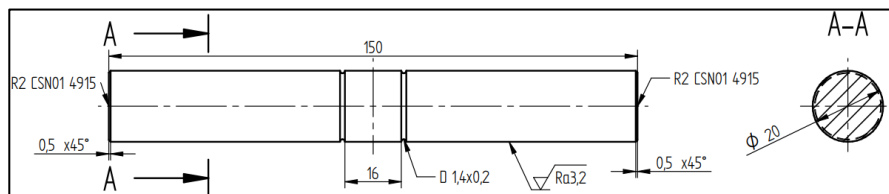
3	Vrtař	<p>Upnutí</p> <p>Vrtání 7x Ø 4,8</p> <p>Vrtání 4x Ø 8,5 pro M10</p> <p>Odjehlení otvorů z obou stran</p>	Sloupová vrtačka
4	Mechanik	Řezání závitu 4x M10	Sloupová vrtačka

5.3.3 Hřídel



Obrázek 45
Hřídel 3D

Postup při výrobě dílu:



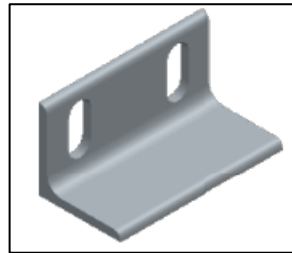
Obrázek 46 Parametry hřídele

Volím materiál 1.0060 (11 600), polotovár Ø 20x150mm

Tabulka 8 Postup výroby hřídele

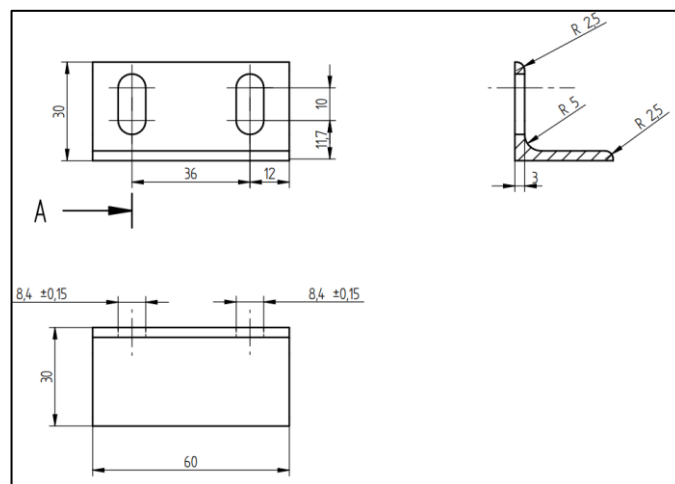
Krok	Kdo	Popis operací	Stroj
1	Soustružník	<p>Upnutí a zarovnání na čelo</p> <p>Soustružení drážky 2x 1,4x0,2 mm na 150x240mm</p> <p>Odjehlení</p>	CNC

5.3.4 Fixační díl



Obrázek 47 Fixační díl 3D

Postup při výrobě dílu:



Obrázek 48 Parametry fixačního dílu

Volím materiál 1.0060 (11 600), polotovár L 30x30x60mm.

Tabulka 9 Postup výroby fixačního dílu

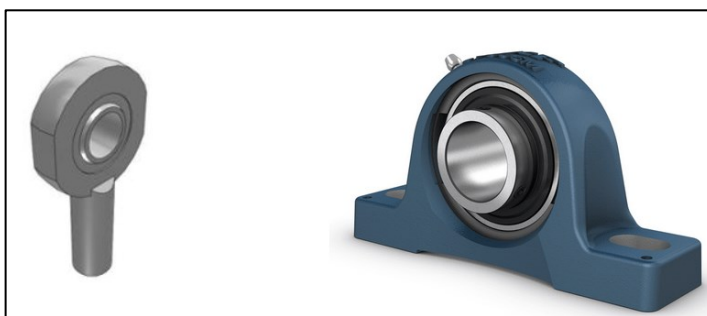
Krok	Kdo	Popis operací	Stroj
1	Frézař	Upnutí Zarovnání čel L = 60 mm Odjehlení	CNC
2	Rýsovač	Rýsování a značení drážky 2x 8,4 mm	Důlčík
3	Vrtař	Upnutí Vrtání 2x Ø 8,4	Sloupová vrtačka
4	Frézař	Frézování drážky 2x 8,4mm po L=10 mm	CNC
5	Mechanik	Odjehlení dílů	

5.3.5 Normalizované součásti

V tabulce níže je seznam normalizovaných součástí pro sestavu 2 určenou pro cyklickou zkoušku.

Tabulka 10 Normalizované součásti sestavy 2

Součást	Norma	Počet kusů
SKF_SA 20 ES-2LS	ISO 9001	1
SKF_SY 20 TF	DIN 626-2:1999	2
Matice M8	DIN 934	4
Šroub M8x30mm	DIN 933	8
Šroub M10x30mm	DIN 933	4
Podložka M8	DIN 433	12
Podložka M10	DIN 433	4
Pérovka M10	DIN 127 B	4
Pojistný kroužek 20	DIN 471	2



Obrázek 49 3D normalizované součásti sestavy 2 - SA 20 ES-2LS (vlevo), SY 20 TF (vpravo)

5.3.6 Kritický bod sestavy 2

Jako kritický bod sestavy jsem vyhodnotil maximální zatížení hřídele. Provedeme posouzení na mezní stav únosnosti.

Na hřídel se působí trojbodovým zatížením. Osová vzdálenost podpor je 0,110m (viz. Obrázek 44). Síla působící uprostřed proti podporám je 2500 N, tudíž reakce R na podporách je 1250 N. Parametry hřídele jsou 1.0060 (11 600), E335, tyč Ø 20 mm.

Výpočet ohybového momentu:

$$M_y = R * \frac{L}{2} \quad (17)$$

$$M_y = 1250 * \frac{0,11}{2} = 68,75 Nm$$

Výpočet průřezového modulu:

$$W_y = \frac{\pi d^3}{32} \quad (18)$$

$$W_y = \frac{\pi \cdot 20^3}{32} = 785,4 \text{ mm}^3 = 785,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$$

Výpočet dovoleného momentu únosnosti:

$$M_{Rd} = W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (19)$$

$$M_{Rd} = 785,4 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{335}{1,1} = 0,23097 \cdot 10^{-3} MNm = 230,97 Nm$$

Posouzení podle momentu únosnosti:

$$M_{Rd} > M_y \quad (20)$$

230,97Nm > 68,75 Nm...Vyhovuje.

ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce je vypracována literární rešerše. Nachází se zde definice kompozitu, rozdělení podle materiálového složení jednotlivých komponentů, geometrické uspořádání ve struktuře, vlastnosti a příklady jejich použití. Dále navazují na normy mechanických zkoušek, které předepisují podmínky měření pro stanovení materiálových vlastností kompozitu.

Praktické část vytyčuje cíl bakalářské práce, kterým je provést konstrukční návrh, na dimenzování přípravků pro mechanické zkoušky zadaného vzorku a vytvořit výkresovou dokumentaci ve 3D a 2D. Představuje stroje určené pro vyhodnocení výsledků měřeného vzorku u statické a dynamické (cyklické) zkoušky v ohybu. Charakterizuje geometrické vlastnosti vzorku. Hlavní součástí je návrh sestav pro testování. První soustava, určená pro ohybovou zkoušku je tvořena nízko profilový ocelovým nosníkem, s dvěma zrcadlově umístěnými podpěrami, na kterých leží zkušební vzorek. Podpěry je možné dle potřeby osově přemísťovat do vytvořených závitových děr. Pevné zafixování zajišťují šrouby s maticí M10, z důvodu tenké stěny nosníku. Horní část se skládá pouze z příruby a na ní umístěné podpory. Druhá sestava se skládá z desky. Ta zabezpečuje uchycení k výrobku v totožných bodech, jako originální podložka. V krajích desky se nachází dvě normalizovaná ložisková tělesa propojena hřídelí. Uprostřed hřídele leží normalizovaná hlava ve tvaru oka s integrální stopkou, která tvoří pouzdro pro kloubové kluzné ložisko. Tato hlava je prodloužena šroubovicí, která se osově upíná do druhé horní desky, na kterou navazuje do příruby a dále přes čep ke stroji. Dolní část tvoří příruba s dvěma stahovatelnými bočnicemi pro zafixování dolní styčné plochy testovaného výrobku. Obě tyto sestavy byly navrhovány s ohledem na jednoduchost výroby a na minimální náklady. Ke všem součástem byl vypracován postup výroby. Na dimenzování bylo v kritickém bodě soustav. Výkresová dokumentace všech součástí, včetně výkresů sestav, je součástí přílohy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LUKOVICS, Imrich. Konstrukční materiály a technologie. VUT Brno: 1991.
- [2] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [3] BAREŠ, Richard. Kompozitní materiály. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [4] Volny.cz [online]. [cit. 2016-05-20]. Definice a historie kompozitů. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>
- [5] ŽALUDEK, Milan. Přednášky - Zpracovatelské inženýrství kompozitů. UTB - Zlín, 2018.
- [6] VOJTĚCH, D. Kompozitní materiály [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005 [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-568-4/pdf/170.pdf
- [7] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. Úvod do studia materiálů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080- 568-4.
- [8] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [9] MÍŠEK, Bohumil. Kompozity. 1. vyd. Brno: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003, 81 s. ISBN 80-903386-0-7.
- [10] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [11] VOLEK, František. Základy konstruování a části strojů I, UTB ve Zlíně, 2009, ISBN 978-80-7318-654-8 .
- [12] LEINVEBER, Jiří. Strojnické tabulky, Scientia s.r.o., Praha, 1999, ISBN 80-7183-164-6.
- [13] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. Perspektivní materiály. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [14] ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, VUT v Čs. Redakci VN MON, 1988.

- [15] Pružnost. Wikipedie: otevřená encyklopedie. [online]. 2001- [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Pružnost>
- [16] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů. Brno, 2008. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/wwwbase/priloha.php_dpid_52474. Inovace VŠ oborů strojního zaměření. VUT Brno.
- [17] Mechanical Testing of Composites [online]., 47 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: https://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIScBANG/Composite%20Materials/pdf/Lecture_Notes/LNm10.pdf
- [18] DOUBRAVA, Karel. Methods and standards for testing of composite materials. Praha: Faculty of Mechanical Engineering, CTU in Prague, 2016.
- [19] ČSN EN ISO 15 310. Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky. Praha: Český normalizační ústav, 2006
- [20] Standard Test Method For In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method. 2. vyd. West Conshohocken, PA, United States: ASTM International, 2015.
- [21] Composite Sandwich [online]. In.: [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vo%C5%A1tina_\(konstrukce\)#/media/File:CompositeSandwich.png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vo%C5%A1tina_(konstrukce)#/media/File:CompositeSandwich.png)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

F	[N]	Síla
τ	[MPa]	Smykové napětí
σ	[MPa]	Normálové napětí
S	[mm ²]	Obsah plochy
P	[N]	Vyvozená síla stroje
b	[mm]	Šířka lepené plochy
B	[mm]	Délka lepené plochy
L _X	[mm]	Délka v ose X měřená tenzometrem
L _Y	[mm]	Délka v ose Y měřená tenzometrem
q _{XY}	[N]	Smykové síly
N _X	[N]	Normálová síla v ose X
N _Y	[N]	Normálová síla v ose Y
t _s	[mm]	Tloušťka vzorku
τ_{DS}	[MPa]	Dovolené smykové napětí
p _{dov}	[MPa]	Dovolené tlakové napětí
d	[mm]	Průměr čepu
a	[mm]	Určená délka redukce
b	[mm]	Určená délka redukce

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Synergické chování složek kompozitu	12
Obrázek 2 Karbon-keramické brzdy	14
Obrázek 3 Dělení výztuže podle použitého materiálu	18
Obrázek 4 Skelné vlákno	20
Obrázek 5 Whisker (cca 1 mm dlouhý) mezi bezolovnatými pozinkovanými kolíky	22
Obrázek 6 Obrázek 6 A - Částice, B – Vlákna, C – Vrstvy [10]	22
Obrázek 7 Využití úhlové orientace vrstev v pneumatice	24
Obrázek 8 Sendvičová konstrukce lyže	24
Obrázek 9 Zkušební těleso před (nahore) a po (dole) tahové zkoušce	28
Obrázek 10 Různorodost tvarů zkušebních těles pro tahovou zkoušku	29
Obrázek 11 Tvarové křivky v obecném tvaru: 1-tvrký materiál, 2-měkký materiál	30
Obrázek 12 Zkušební přípravek pro ASTM D 695	32
Obrázek 13 Přípravek pro zkoušku ASTM D 3410	32
Obrázek 14 Tříbodový systém ohybové zkoušky	33
Obrázek 15 Smyková deformace (vlevo), Torzní deformace (vpravo)	34
Obrázek 16 Přípravek pro zkoušku ASTM D 5379	35
Obrázek 17 Rozměr zkušební vzorku pro zkoušku ASTM D 5379	36
Obrázek 18 Přípravek pro zkoušku ASTM D 2344	36
Obrázek 19 Charpyho kladivo	37
Obrázek 20 Schéma rozdělení únavového procesu	39
Obrázek 21 Zkušební stroj ZWICK/ROLL 1456	42
Obrázek 22 Upínací zařízení stroje	42
Obrázek 23 Zkušební stroj ZWICK/ROELL H25	43
Obrázek 24 Skákací bota	44
Obrázek 25 Řez a tvar pružiny	44
Obrázek 26 Rozměry pružiny	45
Obrázek 27 Příruba 3D	46
Obrázek 28 Parametry příruby	47
Obrázek 29 Sestava 1 – Ohyb 3D	48
Obrázek 30 Sestava 1- Kusovník	49
Obrázek 31 Nosník 3D	50
Obrázek 32 Parametry nosníku	50
Obrázek 33 Podpěra na nosník 3D	51
Obrázek 34 Parametry podpěry na nosníku	51

Obrázek 35 Podpěra u čepu 3D	52
Obrázek 36 Parametry podpěry u čepu	53
Obrázek 37 Graf ohybu pružin: Modrá - originál, Fialová - deltapreg č2, Červená- deltapreg č1	55
Obrázek 38 Pozice pro upevnění Sestavy 2 - cyklování.....	55
Obrázek 39 Sestava 2 – cyklování 3D	56
Obrázek 40 Sestava 2 - kusovník.....	57
Obrázek 41 Podstava horní 3D	57
Obrázek 42 Parametry horní podstavy.....	58
Obrázek 43 Podstava dolní 3D	59
Obrázek 44 Parametry dolní podstavy.....	59
Obrázek 45 Hřídel 3D.....	60
Obrázek 46 Parametry hřídele	60
Obrázek 47 Fixační díl 3D.....	61
Obrázek 48 Parametry fixačního dílu	61
Obrázek 49 3D normalizované součásti sestavy 2 - SA 20 ES-2LS (vlevo), SY 20 TF (vpravo).....	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Postup výroby příruby	47
Tabulka 2 Postup výroby nosníku	50
Tabulka 3 Postup výroby podpěry na nosník.....	52
Tabulka 4 Postup výroby podpěry u čepu	53
Tabulka 5 Normalizované součásti sestavy 1	53
Tabulka 6 Postup výroby horní podstavy	58
Tabulka 7 Postup výroby dolní podstavy	59
Tabulka 8 Postup výroby hřídele	60
Tabulka 9 Postup výroby fixačního dílu.....	61
Tabulka 10 Normalizované součásti sestavy 2	62

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výkres pružiny

Příloha P II: Výrobní výkres BC-00-001-PAN – příruba

Příloha P III: Výrobní výkres BC-01-000-PAN – sestava 1 - ohyb

Příloha P IV: Výrobní výkres BC-01-001-PAN – nosník

Příloha P V: Výrobní výkres BC-01-002-PAN – podpěra na čepu

Příloha P VI: Výrobní výkres BC-01-003-PAN – podpěra na nosník

Příloha P VII: Výrobní výkres BC-02-000-PAN – sestava 2 - cykly

Příloha P VIII: Výrobní výkres BC-02-001-PAN – podstava horní

Příloha P IX: Výrobní výkres BC-02-002-PAN – podstava dolní

Příloha P X: Výrobní výkres BC-02-003-PAN – hřídel

Příloha P XI: Výrobní výkres BC-02-004-PAN – Fixy

Příloha P XII: Technická data zkušebního stroje ZWICK/ROELL 1456

Příloha P XIII: Technická data zkušebního stroje ZWICK/ROELL HC25

