

# Konstrukce přípravku pro zkoušku stlačením po impaktu

Matěj Slováček

---

Bakalářská práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Matěj Slováček**  
Osobní číslo: **T13826**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Konstrukce přípravku pro zkoušku stlačením po impaktu**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše v dané oblasti
2. Návrh konstrukčního řešení
3. Technologický postup výroby
4. Zhotovení výkresové dokumentace



A handwritten signature in blue ink is located at the bottom right of the page, overlapping the red stamp.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího bakalářské práce.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**8. ledna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**20. května 2016**

Ve Zlíně dne 3. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



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

Příjmení a jméno: SLOVÁČEK HATEJ

Obor: TECHNOLOGICKÁ  
ZAŘÍZENÍ

## 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<sup>1)</sup>;
- 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<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> 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<sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užit 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 5.4.2016

Matej Švorčík

<sup>1)</sup> 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 nevydělečně 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.

<sup>2)</sup> 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, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> 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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Práce obsahuje stručný úvod do problematiky v oblasti kompozitních materiálů. Přibližuje základní rozdělení těchto materiálů, jejich vlastnosti, technologie výroby, oblasti využití a jejich mechanické zkoušky. Dále se podrobněji zabývá zkouškou stlačením po impaktu. Cílem práce je představit návrh konstrukčního řešení přípravku pro zkoušku stlačením po impaktu na trhacím stroji Zwick 1456 a technologický postup výroby jednotlivých dílů.

Klíčová slova: kompozit, mechanické zkoušky, zkouška stlačením po impaktu

## **ABSTRACT**

Thesis provides brief introduction to Composite materials issue and basic materials division with their properties, production technology, fields of usage and exact mechanical tests. In practical part the thesis focus on the Impact Test method. The main focus is to prepare medium for described method on the Zwick 1456 machine and to technological procedure for production of the parts.

Keywords: composites, mechanical testing, compression after impact test

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky, otevřený přístup a trpělivost, kterou mi při plnění práce věnoval. Dále bych také rád poděkoval rodině a přítelkyni za podporu a trpělivost.

*„Tím větší budou tvé zásluhy, čím více lásky a nadšení vkládáš do každé práce.“*

*(Otto František Babler)*

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 POPIS KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1    DEFINICE.....	12
1.2    MATRICE.....	12
1.2.1    Polymerní matrice .....	13
1.2.2    Kovová matrice .....	14
1.2.3    Keramická matrice .....	15
1.3    VÝZTUŽ.....	15
1.3.1    Kompozity s částicovými plnivý.....	15
1.3.2    Kompozity vyztužené vlákny.....	16
1.4    MATERIÁLY VLÁKEN.....	16
1.4.1    Skleněná vlákna .....	17
1.4.2    Aramidová vlákna .....	17
1.4.3    Uhlíková vlákna .....	18
1.4.4    Přírodní vlákna .....	18
1.5    FORMY VÝZTUŽÍ.....	18
1.5.1    Příze.....	19
1.5.2    Nitě (skané příze) .....	19
1.5.3    Krátká vlákna .....	19
1.5.4    Vyztužující rohože .....	19
1.5.5    Roving (pramenec).....	19
1.5.6    Pletené výztuže.....	20
1.5.7    Prepreg .....	20
1.5.8    Tkaniny .....	20
1.6    ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ .....	21
1.7    VYBRANÉ TECHNOLOGIE VÝROBY.....	22
1.7.1    Ruční kladení .....	22
1.7.2    Stříkání .....	22
1.7.3    Metoda vakuového prosycování .....	23
1.7.4    Lisování.....	24
1.7.5    Navíjení .....	25
1.7.6    Pultruze .....	26
<b>2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>27</b>
2.1    STATICKE ZKOUŠKY .....	28
2.1.1    Tah.....	28
2.1.2    Tlak .....	29
2.1.3    Ohyb .....	29
2.1.4    Smyk .....	30
2.2    DYNAMICKÉ ZKOUŠKY .....	31
2.2.1    Rázové zkoušky .....	31
2.2.2    Zkoušky opakovaným namáháním .....	34
<b>3 ZKOUŠKA STLAČENÍM PO IMPAKTU</b> .....	<b>37</b>



3.1	ZKUŠEBNÍ TĚLESA .....	37
3.2	PRŮBĚH ZKOUŠKY .....	38
3.3	STANDARDY .....	40
3.4	VYHODNOCOVÁNÍ ZKOUŠKY .....	41
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>STANOVENÍ CÍLŮ .....</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>UNIVERZÁLNÍ STROJ.....</b>	<b>45</b>
5.1	UPÍNACÍ ZAŘÍZENÍ STROJE .....	46
5.2	TECHNICKÉ PARAMETRY STROJE .....	46
<b>6</b>	<b>PADOSTROJ.....</b>	<b>47</b>
6.1	VYBRANÉ VLASTNOSTI STROJE.....	48
6.2	TECHNICKÉ PARAMETRY STROJE .....	48
<b>7</b>	<b>ZKUŠEBNÍ TĚLESA.....</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>MODEL PŘÍPRAVKU .....</b>	<b>50</b>
8.1	MODEL DLE NORMY .....	50
8.2	MODEL NAVRHOVANÉHO PŘÍPRAVKU .....	51
8.3	POPIS HLAVNÍCH ČÁSTÍ.....	53
8.4	VOLBA MATERIÁLU KONSTRUKCE.....	55
<b>9</b>	<b>TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY .....</b>	<b>56</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>75</b>

## ÚVOD

Dnes se stále častěji setkáváme s kompozitními materiály, aniž bychom tomu věnovali pozornost. Kompozitní materiály ovšem mohou nabídnou řadu běžných, ale také velmi specifických vlastností, které konvenční průmyslové materiály nenabízejí. Detailní popis jejich vlastností je stále významnější a důležitější. Díky jejich příznivým mechanickým, akustickým i termoizolačním vlastnostem společně s nízkou hmotností nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích, jako například letecký, automobilový či stavební průmysl. Protože se tyto struktury z pravidla skládají z více vrstev, je nezbytné aby tyto vrstvy byly vzájemně dobře spojeny. Kvalita spoje závisí na několika faktorech, zvláště pak na použitém materiálu a technologii výroby.

Kompozitní materiály a s tím i jejich vývoj jdou stále kupředu. To je úzce spjato s testováním jejich mechanických vlastností. Je předpokladatelné, že v různých odvětvích budou zatěžovány nejrůznějšími druhy namáhání, proto je zapotřebí tyto materiály podrobit řadě zkoušek k ověření jejich vlastností. Díky možnosti použít různé přípravky na univerzálním stroji můžeme tlakovou zkouškou zjistit i vlastnosti záměrně poškozených materiálů. Tím se tedy dostáváme ke zkoušce stlačením po impaktu a sledování vlastností materiálů poškozených nárazem.

Hlavním cílem bakalářské práce je návrh přípravku pro zkoušku stlačením po impaktu, která se bude provádět na univerzálním stroji Zwick v laboratořích UTB ve Zlíně. Tento přípravek tak rozšíří možnosti mechanického testování kompozitních materiálů na Ústavu výrobního inženýrství.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 POPIS KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Nároky na kvalitu, technologii výroby, využitelnost a členitost výrobků se v dnešní době neustále zvyšují, a tak je cílem vyhovět těmto požadavkům. Kompozitní materiály jsou pro tuto problematiku vhodnými alternativami a splňují je. Kombinací nejrůznějších materiálů, vlastností a rozměrů výsledných výrobků je možno vyhovět široké oblasti aplikací.

## 1.1 Definice

Pojmem kompozitní materiály (nebo také kompozity) se označují heterogenní materiály, které jsou složeny z několika (obvykle ze dvou nebo více) fází. Jednotlivé fáze disponují rozdílnými chemickými, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi.

Obvykle jsou složeny z fáze spojitě a nespojitě. Název matrice se používá pro spojitou fázi, která vyniká plasticitou a houževnatostí, ale v porovnání se zpevňující fází je jejím nedostatkem malá pevnost. Nespojitá fáze (vlákna, vrstvy a nebo disperzní částice) se označuje jako výztuž. Tato složka kompozitního materiálu má přednost v příznivých mechanických vlastnostech (tvrdost, pevnost, pružnost, houževnatost atd.). Výztuž se používá za účelem zlepšení vlastností výsledného materiálu. Ten má ve výsledku velmi širokou oblast použití. Nelze jej však označit jako materiál univerzální a to z toho důvodu, že je mnohdy přímo dimenzován na danou aplikaci či druh namáhání.

Materiál může být označován jako kompozit za splnění těchto předpokladů.

- více než 5% podíl výztuže v materiálu
- výsledný materiál je vyroben smícháním jednotlivých složek

Z těchto důvodů, nelze za kompozity považovat např. slitiny kovů nebo plasty, které mají ve složení malá množství tuhých barviv, oxidů. Avšak kov disperzně zpevněn pomocí částic příslušného oxidu kompozitním materiálem je, protože je splněn druhý předpoklad. [3,8]

## 1.2 Matrice

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen systém vláken (výztuže) tak, že jako výsledek vznikne tvarově stály výrobek. Hlavní úlohou této složky je spojovat vyztužující fázi a sloužit také jako ochrana před okolními vlivy působícími na ni. Odděluje jednotlivé částice výztuže od sebe a tím zabraňuje spojitému šíření trhlin a poškození kompozitu. Funkci pojiva by si měla udržet i po prvních poruchách (poškozeních) výztuže. Tyto požadavky splňují pouze kovové a polymerní matrice. Kromě zajištění geometrického tvaru

slouží také pro přenos a rozložení jednotlivých sil v materiálu. Napomáhá k přenosu namáhání na vlákna a jejího rozložení (převedení z vlákna na vlákno).

Základní podmínkou pro kvalitu materiálu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno. Pevnost v tahu u všech druhů je menší, než pevnost v tahu používaných vláken. Matrice musí disponovat vhodnou viskozitou a také povrchovým napětím, aby bylo zaručené úplné smočení vláken a to bez bublin. Příprava kompozitu je nejněsnější pokud lze potřebnou matici převést do kapalného stavu. Podmínkou dobrého smočení výztuže je, aby kapalná matrice měla povrchovou energii co nejmenší. [1,2,3]

### 1.2.1 Polymerní matrice

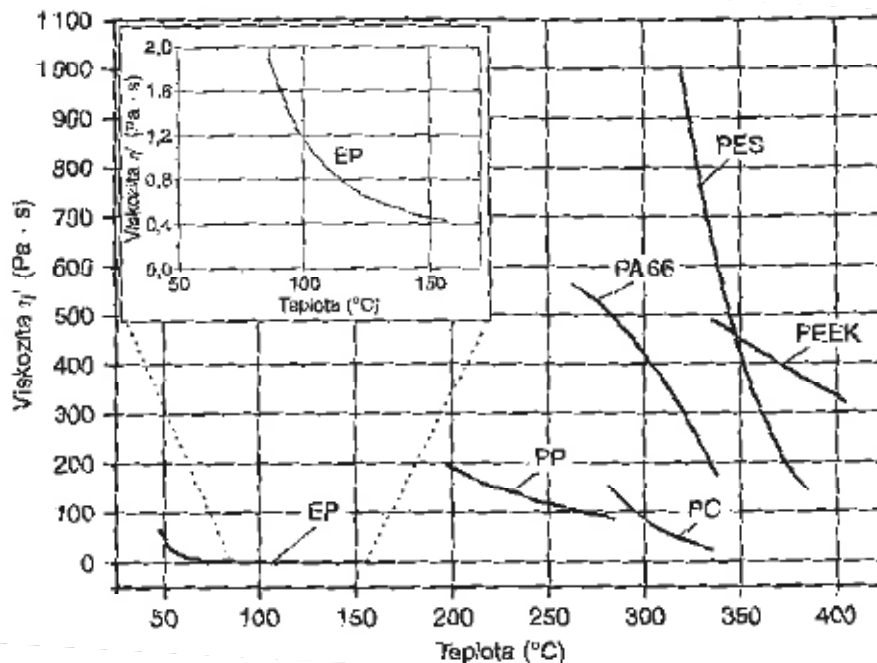
Kompozity obsahující matrice z polymerních materiálů jsou používány pro svou dobrou korozivzdornost, dobré elektrické vlastnosti a při použití se skleněnými, křemennými či polymerními vlákny i elektrickou nevodivost. Dále vynikají dobrou propustností pro rentgenové záření a to v případě použití v kombinaci s uhlíkovými vlákny. Využívají se jak termoplastické (termoplasty) tak reaktoplastické (termosety) matrice. V dnešní době je snahou zvýšit recyklovatelnost kompozitních dílů vyrobených ve velkých sériích a to vede k nahrazování reaktoplastických matic termoplasty. [1,8]

Tab. 1 Porovnání viskozit při typických zpracovatelských teplotách [1]

Matrice	Teplota zpracování	Viskozita při zpracování
Nevyztužená nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzovaná za studena	10 až 40 °C	stovky mPa.s
Nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzovaná za tepla	≈ 140 °C	≈ 1000 mPa.s
Nevyztužená epoxidová pryskyřice (EP-R) vytvrzovaná za tepla	např. 130 °C	stovky mPa.s
Polypropylen (PP)	200 až 270 °C	103 Pa.s
Polyéteréterketon (PEEK)	350 až 400 °C	103 až 104 Pa.s

Často se u kompozitních materiálů používá vyztužená nenasycená polyesterová (UP-R) nebo epoxidová (EP-R) pryskyřice. Tyto reaktivní pryskyřice mají tu přednost, že ve výchozím stavu patří mezi nízkomolekulární a při normální teplotě jsou ve většině případů v tekutém stavu. Jejich viskozita je nižší než viskozita taveniny termoplastů. Z tohoto důvodu se termosety snadněji zpracovávají, smáčejí a lépe prosycují vlákna výztuže. Zpracovatelské tep-

loty termoplastů jsou mnohem vyšší a omezuje je teplota rozkladu. Viskozita při zpracování je ve srovnání s termosety stonásobná až tisícinásobná.



Obr. 1 - Viskozita termosetů a termoplastů při jejich prosycování [1]

Výhodou termoplastů je oproti termosetům jejich houževnatost. Velmi malé množství termoplastových kompozitů dosáhne podobných hodnot E-modulu (tuhosti), teplotní odolnosti a chemické odolnosti jako termosety. V průběhu zpracování termoplastů dochází pouze k roztavení a ztuhnutí matrice. Nedochozí zde k chemickým procesům, které mohou ovlivnit jakost výrobku nebo případně narušit životní prostředí. [1,11,12]

### 1.2.2 Kovová matrice

Kompozity, které mají v zastoupení kovovou matici disponují elektrickou i tepelnou vodivostí, odolností proti povrchovému poškození, dále dobrou tvárností, houževnatost, možností povlakování, nehořlavostí nebo i smykovou pevností. Protikladem těchto vlastností jsou znatelně vyšší výrobní náklady. V dnešní době se uplatňují materiály jako hliník a jeho slitiny, titanové slitiny a také slitiny na bázi niklu, kobaltu a železa. Pro uplatnění v odvětví elektroniky slouží materiály jako jsou kompozity s měděnými případně stříbrnými maticemi.

### 1.2.3 Keramická matrice

Keramické matrice tvoří sklo, sklo-keramika nebo keramika. Vyniká dobrou pevností v tahu a to i při velmi vysokých teplotách, kterým některé kovové matrice již nedokážou odolat. Mezi další výhody se řadí dobrá tepelná a chemická odolnost. Také jsou velmi lehké a většinou i výrazně tvrdé. Mohou být povahy i neoxidické. Nicméně jsou tyto matrice velmi křehké, silně vrubově citlivé a mají malé poměrné prodloužení při přetržení. Také špatně rozkládají síly působící na materiál mezi vlákna.

Řadíme mezi ně i uhlíkové matrice. Používají se především v kombinaci s uhlíkovými výztužemi. Uplatňují se i ve významnějších aplikacích jako jsou součástky namáhané extrémními teplotami, například pro tepelné izolace raketoplánů, třecí elementy brzd a disky u letounů. Mezi nežádoucí vlastnosti patří křehkost podobně jako je tomu u keramických matric. Jako klady jsou dobré mechanické vlastnosti. Protikladem je ale velmi vysoká cena výroby těchto kompozitů. [1,8,11]

## 1.3 Výztuž

Za účelem zlepšení některých vlastností obsahuje kompozit složku zvanou výztuž. Díky tomu získáme vlastnosti, kterými materiál jako samostatný prvek nedisponuje nebo je nelze uplatnit. Pro rozdělení podle tvaru a velikosti se používá hodnota podílu největšího a nejmenšího rozměru výztuže nazývaná štíhlostní poměr. Podle geometrického tvaru výztuže lze kompozity rozdělit na částicové a vláknové. [1,3,8]



Obr. 2- Rozdělení podle geometrického tvaru výztuže [2]

### 1.3.1 Kompozity s částicovými plnivými

U kompozitů vyztužených touto formou výztuže jsou kromě tvaru částic (sférického, nepravidelného, jehlicového, destičkového) důležité i jejich termodynamické vlastnosti

(teplotní roztažnost, deformační vlastnosti a tuhost). Rozměr útvarů výztuže u částicových kompozitů nepřesahuje výrazně rozměry ostatní. Využívají se materiály jako jsou oxidy křemíku a také hliníku, uhličitan vápenatý, skleněné kuličky o průměru 5-500 $\mu$ m, mikroskopické částice kovů nebo jemně mletá slída. Tyto materiály vykazují velmi dobré vlastnosti jako je vyšší tuhost i pevnost oproti matricím polymerním. Zároveň jsou i málo plastické (mimo částice kovů). Proto i jimi vytvořené kompozity získávají speciální fyzikální a mechanické vlastnosti. Mezi ně se řadí kupříkladu vyšší elektrická a tepelná vodivost, menší teplotní roztažnost nebo i lepší kluzné vlastnosti. [1,3,13]

### 1.3.2 Kompozity vyztužené vlákny

Materiály ve formě vláken se cíleně používají jako konstrukční prvky velmi zřídka. Zajímavou formou materiálů se stávají teprve v kompaktní formě, jako je tomu u kompozitních materiálů. Vlákna jsou v jednom směru výrazně rozměrnější než ve směrech ostatních. Zde je možné dělit vyztužený materiál na kompozity s krátkými vlákny, u nichž je délka vláken výrazně menší v porovnání s velikostí daného výrobku, a na kompozity s dlouhými vlákny (kontinuálními) vlákny u nichž je délka srovnatelná s velikostí daného výrobku. Uspořádání těchto vláken má řadu variant, vybrané z nich jsou uvedeny výše (obr. 2).

V prvním případě jsou vlákna uspořádána v jednom směru, zatímco v případě druhém jsou vzájemně spletena do rohoží, jejich struktura je tedy vrstevnatá.

Za účelem dosažení požadovaných vlastností, především tuhosti a pevnosti kompozitu je nutné vhodně zvolit typ vlákna a také jeho objemový podíl v něm. Dosud vyráběná monokrystalická vlákna (neboli viskery) z pravidla z karbidů křemíku, hliníku a bóru, nitridů hliníku a křemíku, oxidu hliníku, křemíku a titaničitanu draselného jsou stále velmi drahá a přitom poměrně krátká ( $10^{-3}$  m při průměru 0,1 až 10 $\mu$ m). Díky jejich nízké náchylnosti k defektům je jejich pevnost v tahu větší než u dosud používaných vláken. [1,3]

## 1.4 Materiály vláken

Různorodost oblastí použití kompozitních materiálů je dána i možnostmi volby jak formy tak materiálu výztuže, které pro danou aplikaci nejvíce vyhovují. Ve velké míře se používají především vlákna skleněná. Ale kupříkladu kompozity vyztužené uhlíkovými nebo aramidovými vlákny jsou sice finančně náročnější ale vykazují výborné mechanické vlastnosti.



#### 1.4.1 Skleněná vlákna

Společný název pro takto označovaná vlákna je Textilní skleněná vlákna (GF-Glass Fiber). Patří sem tenká vlákna o průměru 3,5 - 24 $\mu$ m s pravidelným kruhovým průřezem, která se vyrábí pomocí tažení z roztavené skloviny.

Vyznačují se svou vysokou pevností a odolností proti abrazi (mechanickému obrušování). Tato vlákna mají však poměrně nízký modul pružnosti v porovnání s uhlíkovými nebo aramidovými vlákny, dosahují ale větší deformace při přetržení. Vlastnosti skleněných vláken jsou izotropní, tedy stejné jak v podélném tak i příčném směru vlákna. Využívají se například pro izolace či zpevnění jiných materiálů.

Skleněná vlákna vyrobená z bez-alkalické skloviny jsou výbornými elektrickými izolanty s vysokou hodnotou prostupnosti záření. Z toho důvodu jsou označována jako E-vlákna a sklovina jako E-sklovina. Tento druh skloviny je v dnešní době nejpoužívanějším typem pro výrobu vláken. Postupně jakožto standardní typ obsadil téměř 90% celosvětového trhu. Sklovina složená s většího obsahu SiO<sub>2</sub>, MgO a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vykazuje o 40 až 70% vyšší pevnost. Zde je označení složitější. V Evropských zemích se označuje za R-sklovinu (R-resistence), v Japonsku je to T-sklovina a v USA je nazývána jako S-sklovina (S-strength) Dalším vyráběným typem jsou vlákna z C-skloviny. Jsou vysoce odolné proti kyselinám a také proti chemicky agresivním látkám. Bez-alkalická skleněná AR-vlákna jsou další vyráběnou variantou. Mají poněkud odlišné složení oproti E-vláknům a díky tomu i vysokou odolnost proti alkáliím. Toho lze využít kupříkladu při vyztužení betonu. [1,11]

#### 1.4.2 Aramidová vlákna

Jedná se o vlákna vyráběna z polymerů. Vyznačují se nízkou hustotou a také i vysokou poměrnou pevností v tahu. Nejznámější a často používané jsou vlákna z aromatických polyamidů. Makromolekuly v řetězci obsahují amidové a aromatické skupiny. Jsou to materiály známe také pod obchodním názvem Kevlar nebo Nomex. Různé druhy Kevlaru jsou díky svým vlastnostem vyráběny především pro odvětví letectví, armádu, lodní průmysl, ale také pro sportovní účely nebo všude kde je požadována vysoká pevnost. Materiál Nomex slouží často k výrobě voštin, nehořlavých oděvů a bezpečnostních rukavic a to pro svou odolnost proti vysokým teplotám, hořlavosti a působení chemikálií (rozpouštědel, kapalných paliv, slané vody, a jiné). Pro silně polární vodíkové můstky ve struktuře aramidová vlákna sice absorbují vodu, ale následně to neovlivňuje negativně mechanické vlastnosti. Využívá se

často pro další textilní zpracování a to z důvodu, že tato vlákna se při výrobním procesu nepoškozují. [1,11]

#### 1.4.3 Uhlíková vlákna

Poskytují velmi široké spektrum mechanických vlastností polymerních kompozitu a to vše při poměrně malé hustotě. Výborné vlastnosti jsou důsledkem vysoce anizotropní hexagonální struktury, kterou disponuje právě grafit (modifikace uhlíku).

Za zmínku stojí vysoká pevnost, modul pružnosti ale i abrazivní odolnost. Kupříkladu nanovlákno o průměru 0,2 $\mu$ m disponuje pevností v tahu až 7 000MPa a modulem pružnosti 600GPa. Protikladem je vysoká křehkost těchto vláken. Při styku s kovem zde dochází elektrochemické korozi.

Uhlíková vlákna se dnes vyrábějí především z polyakrylonitrilových (PAN) vláken nebo nově i z vláken novoloidu (fenol-aldehyd). Druhým způsobem je výroba z materiálů bohatých na uhlík. [1,3]

#### 1.4.4 Přírodní vlákna

Pro použití v polymerních kompozitech jsou vhodné pouze vlákna rostlinná kvůli obsahu celulózy. Mezi ně se řadí například konopí, len, bavlna, rarnie, juta, sisal. Při měnících se klimatických podmínkách je velkou předností těchto vláken, že jsou odolné proti stárnutí a čichově neutrální. Vzhledem k jejich nízké měrné hmotnosti jsou dobrou surovinou pro výrobu lehkých konstrukcí. Pozoruhodná je i pevnost v tahu.

Mezi kladné vlastnosti řadíme především nízkou hustotu, velmi malou abrazi při opracovávání a také výhodnou likvidaci pomocí spalování. Nevýhodou je však citlivost na vlhkost, omezená délka vláken, nákladná předběžná úprava pro zlepšení vazby s matricí nebo nebezpečí změn vlastností vyvolaných biologickým napadením. [1,13]

### 1.5 Formy výztuží

Vyztužující vlákna jsou jako samostatný prvek používána pouze výjimečně. Ze zpracovatelských důvodů se proto většinou aplikují upravené produkty. Následující pojmy platí pro většinu druhů uvedených vláken.

### 1.5.1 Příze

Se vyrábí spřádáním z vláken a dále se zpracovává na pásy, pletené výrobky nebo tkaniny. Příze ze skleněných vláken se dopřádají na odstředivých nebo frikčních strojích.

### 1.5.2 Nitě (skané příze)

Jsou jedno nebo vícecestupňové (skládají se z jedné nebo více přízí). Zpracování je obdobné jako u příze.

### 1.5.3 Krátká vlákna

Se používají pro vyztužení termoplastů. Jsou to jednotlivá rozptýlená elementární vlákna s různou délkou 0,1 až 5mm.

### 1.5.4 Vyztužující rohože

Vyrábějí se z dlouhých či krátkých rovingů naimpregnovaných pojivem organického původu (termoplast, pryskyřice). Obsah pojiva je z pravidla od 5 do 30 % hmotnosti. Po impregnaci jsou za zvýšené teploty slisovány. Nevýhodou je zvýšený obsah pryskyřice zapříčiněný náhodnou orientací vláken v rohoži.

- **Rohože z kontinuálních vláken.** Skládají se z nekonečných vláken smotaných do smyček, které jsou uloženy v několika vrstvách a jsou vzájemně spojena pojivem.
- **Rohože ze sekaných pramenců** jsou netkané plošné výrobky z dlouhých sekaných vláken nepravidelně uložených o rozměrech 25 až 50mm. Vlákná jsou uložena do vrstev, postříkána pojivem a následně vysušena v pásové sušárně. Vzniká rohož podobná plsti, která se navíjí do rolí a je připravena k okamžitému použití. Tvarují se hůře než rohože z kontinuálních vláken.
- **Povrchová rohož** se vyrábí většinou z polyesterových vláken, které mají minimální vliv na mechanické vlastnosti. Charakteristikou je jemná struktura a malá plošná hmotnost. Účelem povrchových rohoží je ochránit křehký kompozit před mechanickým poškozením, povětrnostními vlivy a UV zářením. Časté uplatnění nachází při estetické úpravě materiálu.

### 1.5.5 Roving (pramenec)

Skládá se ze sdružených nestočených rovnoběžně uložených vláken nebo tažených vláken přímo z taveniny (6 až 12 000 elementárních vláken). Zpracovává se sekáním, tažením, na-

víjením na cívku nebo tažením nekonečného pramence, ale dají se použít přímo pro výrobu kompozitů. Spředený roving se vyrábí z vláken, která se stočí kolem podélné osy.

#### 1.5.6 Pletené výztuže

Jsou vhodné pro výrobu složitých dvou i třírozměrných výrobků. Je za potřebí používat pouze velice ohebná vlákna a to z důvodu jejich deformace při pletení ok. Nevýhodou je riziko křehkého lovu materiálu v oblastech s přebytkem pryskyřice. V těchto výztužích je navíc jen malá část vláken, které jsou orientovány ve směru předpokládaného namáhání. Proto se lehce deformují ve všech jejich směrech.

#### 1.5.7 Prepreg

Tento název je odvozen od anglického tvaru preimpregnated fibres (předimpregnovaná vlákna). Jedná se o polotovary k výrobě vláknových kompozitů. Skládají se z výztuže, která je předimpregnovaná potřebnou pryskyřicí. Dají se skládat na sebe do požadované tloušťky a následně jsou dotvarovány a vytvrzeny ve formách za pomoci tlaku a tepla. Prepregy se dělí na jednosměrné, vícevrstvé, kombinované prepregy s výztuží z tkanin a rohoží, s prostorově vázanou výztuží, nebo s výztuží ze sekaných vláken. Mezi hlavní výhody patří stejnosměrnost a vysoký podíl vláknové výztuže. Značnou nevýhodou je cena, nutnost materiál skladovat v chladnu a zvýšené množství odpadu.

#### 1.5.8 Tkaniny

Analogii běžných textilií za použití speciálních vláken je tkaná výztuž. Má v kompozitu vysoký podíl vláken, což zajišťuje vysokou tuhost a pevnost. Působí výztužně ve dvou směrech. Jedná se o vlákna a pramence, které jsou uloženy pravoúhle v útku a osnově. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají různé typy vazby (křížení). Ztráta mechanických vlastností je způsobena zvlněním uložení vláken při tkaní. [1,2,3,8,11]



Obr. 3- Typy vazeb vyztužujících tkanin [8]

## 1.6 Základní rozdělení kompozitů

Při rozšiřujících se možnostech vzájemného kombinování jednotlivých složek vytvářejících kompozit, může nastat problém v členění kompozitů. Vzhledem ke složení a struktuře lze kompozity rozdělovat následovně.

Výztuže v kompozitech jsou zastoupeny v různých rozměrech. Rozlišujeme:

- **Mikrokompozitní materiály**
- **Makrokompozity**
- **Nanokompozity**

Nejvýznamnější v oblasti průmyslu jsou mikrokompozity (dále jen kompozity) s největším příčným rozměrem výztuže (obsažené v materiálu)  $10^0$  až  $10^2 \mu\text{m}$ . Výhodou těchto materiálů v porovnání s kovy a jejich slitinami je menší hustota, z čehož plyne příznivější pevnost v tahu a modul pružnosti v závislosti na hustotě. Tyto materiály mají největší význam ve strojírenství.

Materiály s výztuží o velikosti příčného rozměru v rozmezí  $10^0$  až  $10^2$  mm nazýváme makrokompozity. Časté využití těchto materiálů je v oblasti stavebnictví. Jedná se o např. beton obsahující drcené kamenivo a pryskyřici (neboli polymer-beton), zpevněný beton ocelovými lany nebo pruty (železobeton). Lze mezi něj řadit i vícevrstvé materiály a konstrukce využívané i na chodnících či vozovkách a také plátované kovy.

Mezi nanokompozity se řadí materiály s rozměrem výztuže v jednotkách [nm]. Rozhodujícím faktorem je délka částice nebo průměr vlákna. [2,8]

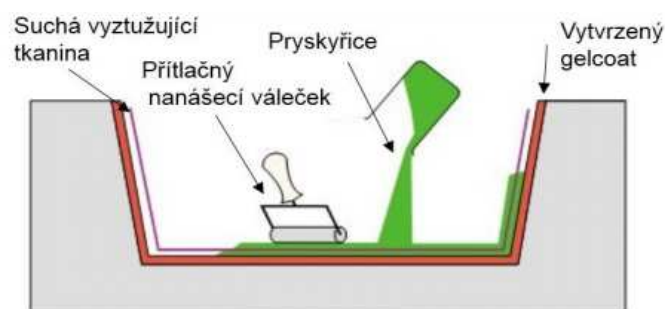
## 1.7 Vybrané technologie výroby

Kompozitní materiály se vyrábí za pomoci forem, otevřených nebo uzavřených, kde tekutá polymerní matrice tvrdne. Výztuž je nanášena ručně nebo mechanizovaně. Pro následné vyjmutí z této formy je nutné před samotným procesem výroby na ni nanést vrstvu separační látky nebo neporézní folii.

### 1.7.1 Ruční kladení

Jedná se o nejjednodušší, nejrozšířenější a zřejmě o nejstarší pracovní postup vhodný jak pro malé série tak i pro velkoplošné díly a prototypy. Pomůcky a nástroje jsou velmi levné a jednoduché. Při ručním kladení se nejdříve nanese na očištěnou formu vrstva separační látky, na ni gelcoat (vrstva pryskyřice). Tato vrstva zabraňuje prorážení struktury na povrchu výrobku a zároveň se jedná o jeho pohledovou stranu. Dobrá kvalita lze zajistit pouze na jedné straně, což je omezující při navrhování výrobku. Při procesu ručního kladení se na formu kladou nejčastěji vlákna ve formě pletené nebo tkané rohože. Poté následuje prosyčení pryskyřicí, která se nanáší pomocí štětce, stěrky nebo stříkací pistole a vytvrzení, které probíhá za pokojové nebo za zvýšené teploty, většinou okolo 80°C (u většiny pryskyřic). Časté uplatnění nachází při výrobě lodí.

Velkou výhodou jsou minimální náklady na výrobu, její jednoduchost a neomezená variabilita velikostí. Nevýhodou je dlouhý čas výroby, množství nerecyklovatelného odpadu a kvalita výrobku závisující na zkušenostech pracovníků. [18,19]



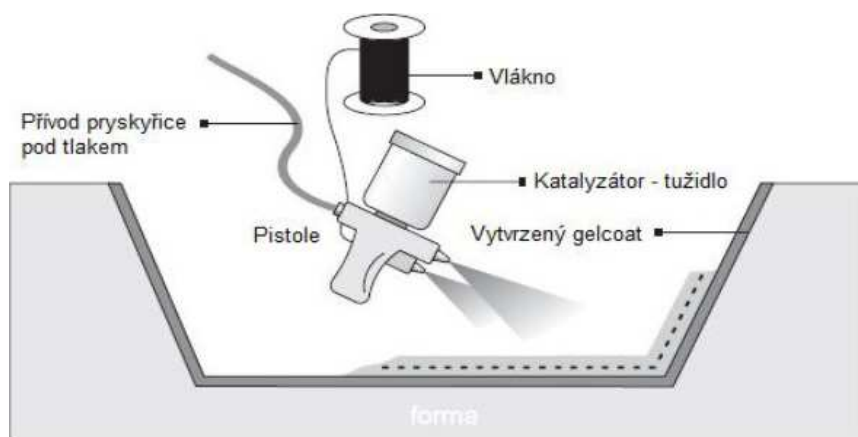
Obr. 4- Schéma ručního kladení [19]

### 1.7.2 Stříkání

Aplikace pryskyřice se provádí především ručně pomocí speciální pistole, které pneumaticky nanáší na formu současně sekaný roving a iniciovanou pryskyřicí. Je možné tuto strojní technologii mechanizovat a řídit pomocí počítače. Stříkání laminátu je zapotřebí provádět v

dobře odvětraném prostoru (stříkacím boxu) a to z toho důvodu, že se pro tuto technologii používá především polyesterová pryskyřice, která obsahuje styren. Formy jsou nenákladné a prakticky stejné jako pro ruční kladení. Tato metoda se používá pro výrobu středních až velkoplošných dílců, které nemají příliš složitý tvar.

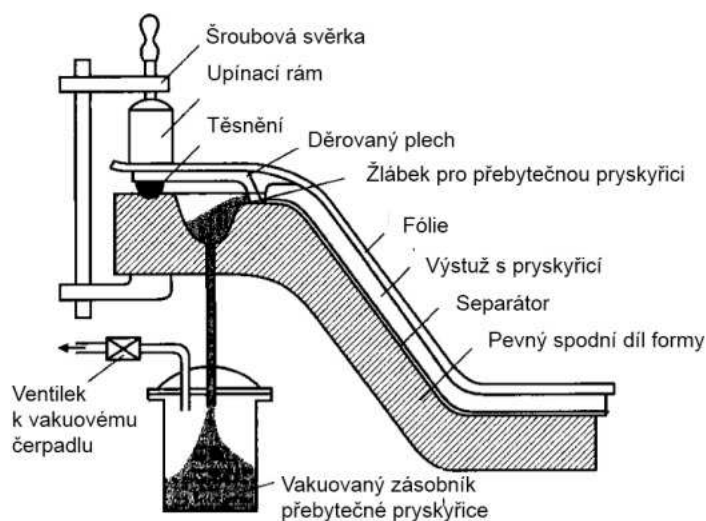
Výhodou je efektivní a velmi rychlé nanášení materiálu a to ve velkém množství. Mezi nevýhody patří velké pořizovací náklady na stříkací stroje a značně zvýšené množství odpadu. [14,19]



Obr. 5- Schéma technologie stříkání [14]

### 1.7.3 Metoda vakuového prosycování

Jedná se o vylepšenou metodu ručního kladení. Tenká folie nepropouštějící vzduch se položí na ručně kladené vrstvy. Takto opatřená forma je vakuovaná a pomocí tlaku folie vytlačí přebytečné bubliny vzduchu.



Obr. 6- Vakuové (nízkotlaké) prosycování [1]

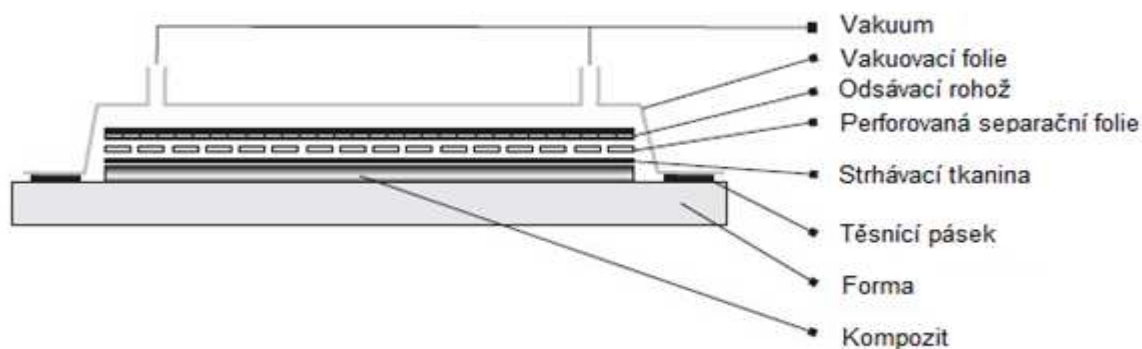
Kladem je schopnost připravit materiál s minimálními bublinami (lepší vlastnosti) a také je metoda vhodná pro sendvičové struktury. Zápor je vyšší cena výrobků a proto nachází uplatnění v oblastech, kde to nehraje hlavní roli například letectví či pro závodní speciály.

#### 1.7.4 Lisování

Lisování za studena se provádí ve dvoudílných nevyhřívaných formách za nízkého tlaku a normální teploty. Výsledkem je výlisek s oboustranně hladkým povrchem. Vhodná je pro investičně nenáročnou výrobu. Výhodou jsou nižší náklady na výrobu formy a povrchová kvalita výrobku.

Lisování za pomoci vakua se používá v případech kdy je zapotřebí zvýšit obsah výztuže a následně odsát přebytečnou pryskyřici nebo kdy je nutné zakomponovat sendvičové struktury (pěny nebo voštiny) do materiálu. V tomto případě se pokládá prosycená výztuž do formy jako u ručního kladení. Na poslední vrstvu se nanese odtrhová tkanina, která je tvořena syntetickými vlákny a usnadňuje její oddělení od výrobku a následně další úpravy (lepení, laminování a jiné povrchové úpravy) bez nutnosti odmastit, brousit, či zdrsňovat. Nedílnou součástí je perforovaná separační folie a odsávací rohož. Slouží k odsání přebytečných vzduchových bublin za pomoci vakua a vstřebává přebytečné pojivo.

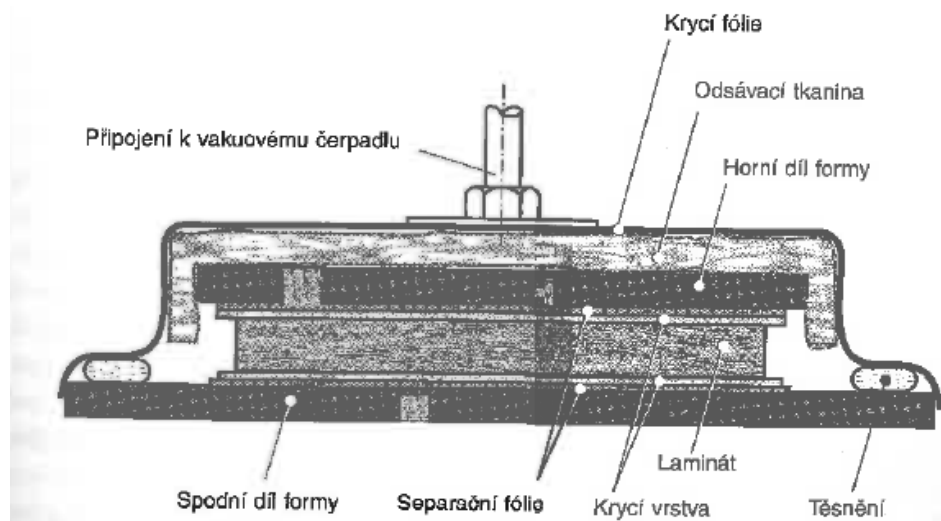
Důležité je zajistit dokonalou těsnost formy. Výsledkem jsou lepší mechanické vlastnosti a oboustranně hladké výrobky. Výhodou je vytvrzování při normální teplotě (výjimkou jsou prepregy) a nízké náklady na prostředky. Vyšší investici vyžaduje jen pořízení vakuové pumpy. Tato technologie se používá pro malé až střední série. [14,19]



Obr. 7- Schéma technologie lisování pomocí vakua [14]



Lisování v autoklávu je nejnákladnější a nejsložitější technologie pro výrobu velkorozměrných konstrukcí. Nejčastěji se používají prepregy na bázi aramidových, uhlíkových nebo skleněných vláken. Jednotlivé vrstvy jsou prakticky stejné jako u technologie lisování pomocí vakua. Forma se vkládá do vyhřívaného autoklávu kde se nejdříve vytvoří podtlak a následně se forma přetlakuje. Vytvrzování probíhá pod tlakem a teplem v uzavřené nádobě. Materiál obsahuje přes 60% výztuže. Nejčastější využití je například pro kosmický a letecký průmysl, závodní automobily a velkorozměrové obkladové panely dopravních prostředků.



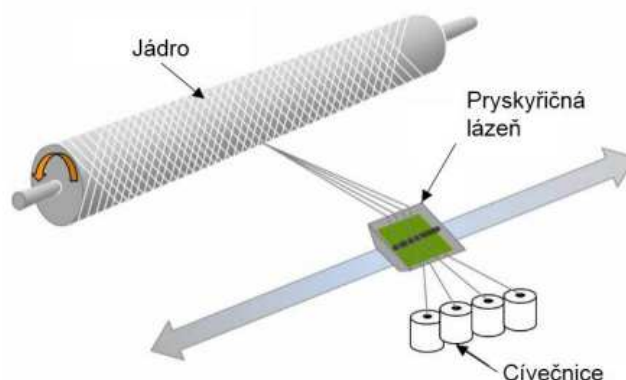
Obr. 8- Schéma autoklávu [1]

Lisování za tepla a tlaku se provádí ve dvou nebo vícedílných formách z kovu, které musí mít pracovní povrchy leštěné nebo tvrdě chromované. Pro vyhřívání forem se používá nejčastěji elektrické nebo topné médium, upevněné v hydraulických lisách schopných dosáhnout vysokých tlaků. Výhodou je vysoká produktivita této technologie pro velkosériovou výrobu. Lze uplatnit pro malé a středně velké výrobky. Další výhodou jsou krátké výrobní cykly a možnost automatizace procesu. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady na formy a lisy. [9,14,18,19]

### 1.7.5 Navíjení

Principem této technologie je navíjení nepřetržitého pramene uhlíkových, skleněných nebo aramidových vláken impregnovaných pojivem na jádro (trn), které má tvar výsledného výrobku. Tímto způsobem lze vyrábět kompozitní dutá tělesa jako např. nádrže, trubky a nádoby různého i proměnného tvaru a velikosti. Tato technologie umožňuje přesné kladení vláken v několika osách a vytváření i složitějších tvarů. Pohyb v osách zajišťuje ukládací rameno. Celý proces navíjení je plně řízen počítačem. Výhodou je možnost výroby nádob

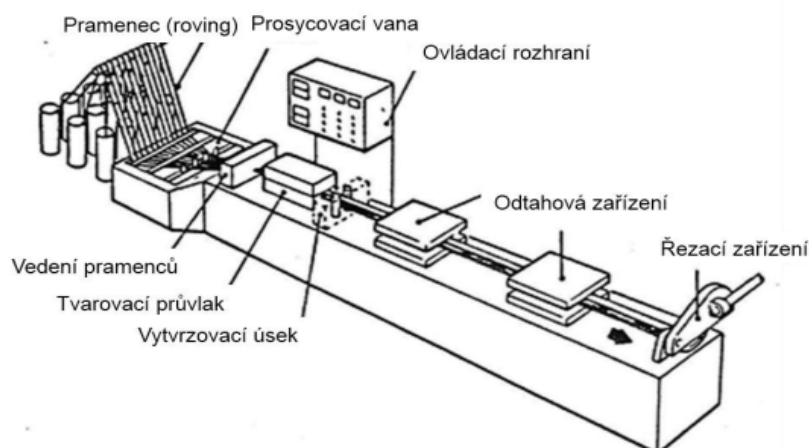
včetně dna a vrchlíků pouze s malými polárními otvory za pomocí rozebíratelných a vyjímatelných trnů tzv. integrální navíjení. [13,14]



Obr. 9- Schéma technologie navíjení [13]

### 1.7.6 Pultruze

Pultruze (tažení) je proces, při kterém výztuž (z pravidla skleněný roving, uhlíkové pramenec, povrchové rohože či tkané stuhy a pásy z vláken) prochází lázní s iniciovanou pryskyřicí. Po prosycení a odstranění přebytečné pryskyřice je vtahována do tvarovacích a vytvrzovacích průvlaků s dutinou odpovídající vnějšímu tvaru vyráběných profilů. Vytvrzení vznikne působením tepla vyhřívané formy nebo vývojem tepla pomocí vysokofrekvenčního pole. Výhodou je možnost velmi efektivně vyrábět kontinuální plné, duté i tvarové profily a to i výrobky jednoduché a tenkostěnné. Výsledný materiál obsahuje až 80% výztuže. U této technologie je možné použít výztuž s potiskem. [1,14,19]



Obr. 10- Schéma tažení [19]

## 2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Testovací metody dělíme z hlediska výztuže do skupin zabývajících se zkouškami kompozitu s jednosměrně orientovanými vlákny (např. lamináty, tyčovina) nebo kompozity s tkanými či netkanými výztužemi. Národní společnost USA American society for testing materials (ASTM) se zabývá metodami zkoušek pro jednosměrně orientované a tkané výztuže. Ve světovém měřítku se jedná o jeden z nejrozšířenějších zdrojů. Mezi další zdroje patří ISO nebo BS (British standart institution). Dále je možné dělit tyto zkoušky na dynamické a statické.

U těchto zkoušek pevnosti kompozitu dochází k lokálním poškozením (deformacím) několika typů, které následně způsobí narušením nosných vláken materiálu. Obzvláště ve vrstvách kde existuje možnost mezi vláknové poruchy. Jedná se o případy při zatížení smykem pod úhlem 45 ° nebo zatížení tahem kolmo ke směru vyztužujících vláken.

Důležitým faktorem ovlivňujícím výsledek měření jsou okrajové podmínky dané technikou pro provedení zkoušky. Výsledky může výrazně ovlivnit i zvýšení trojrozměrné napjatosti v oblasti upnutí zkušebních těles a vzniklým počátečním deformacím, ke kterým dochází v důsledku bránění materiálu v příčné kontrakci v oblasti působení síly. Podle typu zatížení může docházet ke vzniku nejrůznějších trhlin a prasklin. Napětí a koncentrace protažení materiálu je způsobena nestejnou směrností v uspořádání vláken, slabou adhezí složek a nebo vzduchovými bublinami.

Závislost vlastností kompozitů na době zatížení, teplotě a podmínkách okolního prostředí (vlhkost vzduchu, UV záření) v porovnání s nevyztuženými plasty není tolik výrazná. Vliv na chování kompozitů při mechanickém namáhání má v první řadě vytvrzení matrice, obsah výztuže, ale také rozložení plniva, orientace vláken a jejich uspořádání. Při srovnávání vzájemných vlastností je nezbytné nepominout obsah vláken.

Výsledky získané ze zkoušek jednotlivých vzorků jsou srovnatelné pouze za totožných výrobních podmínek (stupeň vytvrzení, promíchání složek, tlak, teplota, čas, stupeň vytvrzení a jiné).

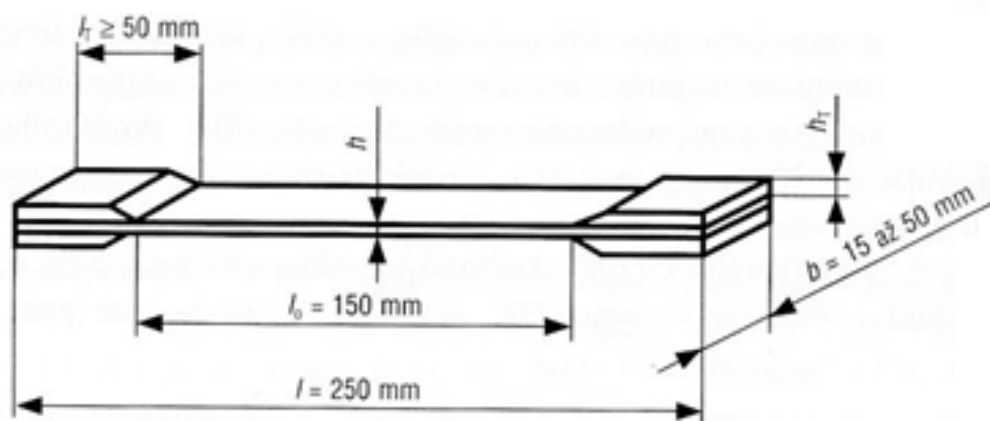
Zde jsou vypsány vybrané metody testování kompozitních materiálů. Je nezbytné vždy zvážit, která zkouška bude prováděna a také za jakých podmínek či specifikací. V provádění jednotlivých zkoušek mohou být odlišnosti při testování různých kompozitních materiálů. Především v závislosti na vyztužení kompozitních materiálů. [15,16]

## 2.1 Statické zkoušky

Pevnost kompozitu nezávisí nejen na vlastnostech složek, ale výrazně záleží i na vzájemné adhezi. Proto pevnostní charakteristiky vykazují větší anizotropii než charakteristiky elasticke. Výsledky ze zkušebních metod mohou být v naměřených hodnotách rozdílné. Elasticke charakteristiky jsou obvykle měřeny při zatíženích nízkých, kdy vlivy struktury (bubliny, zbytkové napětí, nedostatečná adheze) nemají význam. Při vysokých zatíženích u pevnostních zkoušek se však tyto vlivy projeví.

### 2.1.1 Tah

Nejběžnější a nepoužívanější mechanickou zkouškou je statická zkouška jednoosým tahem. Cílem je určit pevnost v tahu, modul pružnosti a poissonovo číslo materiálu. Tahová zkouška u kompozitních materiálu se provádí nejčastěji na plochých vzorcích s rovnými stranami a koncovým zesílením. V daných normách (ČSN EN ISO 527 - 1 až 5) je při zohlednění stavby kompozitu navrženo mnoho tvarů a geometrií zkušebních těles. Pro zkoušku v tahu se osvědčila prizmatická tělesa se zesílením v místě upnutí pro jednosměrně vyztužené lamináty a pro lamináty s výztuží ve formě tkaniny. Zkušební těleso je upevněno do stroje pomocí čelistí nebo čepu.

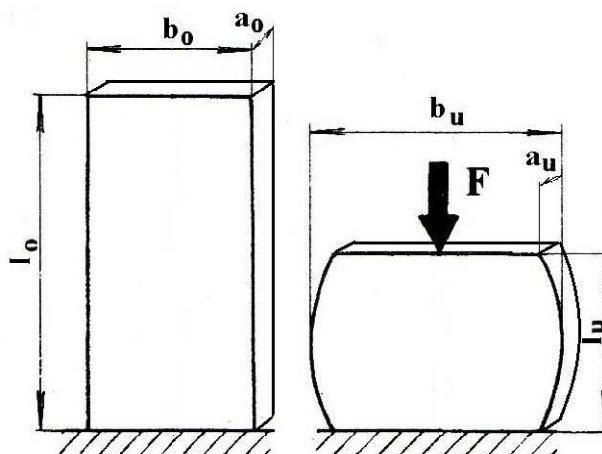


Obr. 11- Zkušební těleso pro zkoušku tahem [1]

Na vinutých plochých zkušebních těles je možné měřit pevnost v tahu ve směru kolmém na vlákna. Při měření elasticke charakteristik musí být tělesa vyříznuta přesně ve směru os ortotropie ze zkušební desky. Rychlost zatěžování zkušebního tělesa je 1 % délky tělesa za minutu. Maximální deformace nemá překročit 0,5 %, aby nenastalo ovlivnění oblastmi, kde se již tvoří poškození materiálu. [1,15]

### 2.1.2 Tlak

Pro zkoušku tlakem u jednosměrně vyztužených laminátů jsou nejvhodnější (ČSN EN ISO 604) pravoúhlá prizmata válce nebo trubky, protože dovedou zajistit rovnoměrné zatížení. Zkušební vzorky je nutno pečlivě navrhnout z důvodu možné ztráty stability při určování pevnosti v tlaku. Při dobré adhezi mezi vláknem a matricí nastává lom vlivem smyku, kdežto při špatné adhezi vlivem delaminace. K vyloučení vychýlení zkušebního tělesa byly navrženy různé opěrné přípravky, za účelem eliminování rozvrstvení v kontaktní rovině se zatěžovacím zařízením. Rychlost zkoušky se volí 1mm/min pro měření modulu pružnosti  $E$  a pevnosti materiálu a 5mm/min pro měření pevnosti materiálu s mezí kluzu.



Obr. 12- Zkušební těleso před a po zkoušce tlakem [17]

Při zatížení tlakem je obtížné v celém zkušebním tělese realizovat jednoznačně čistý stav napjatosti a to po dobu celé zkoušky. Plochy sloužící k zavedení zatížení musí být zcela rovné a je důležité zaručit jejich rovnoběžnost. Zeslabení tloušťky vede k rozdlům v odolnosti vůči ztrátě stability. Lze ji zvýšit pomocí připevnění zesílení v koncových místech. Tvar a velikost zesílení může mít vliv na výsledné hodnoty zvláště při zkoušce za vyšších teplot. [1,17]

### 2.1.3 Ohyb

Při zkoušce ohybem se předpokládá lineární rozdělení normálních napětí po průřezu. Poloha vláken k neutrální rovině má výrazný vliv na hodnoty pevnosti materiálu v ohybu. Tato zkouška probíhá při tří nebo čtyřbodovém uložení. V případě tříbodového ohybu nastává ve zkušebním tělese napjatost s maximálním zatížením, která lze definovat místem lomu uprostřed tělesa. Největší smykové napětí je uprostřed tloušťky tělesa a mezi vrstvami. Výhodou čtyřbodového ohybu je ohybový moment  $M_0$ , který je po celé délce rozteče uložení zkušeb-

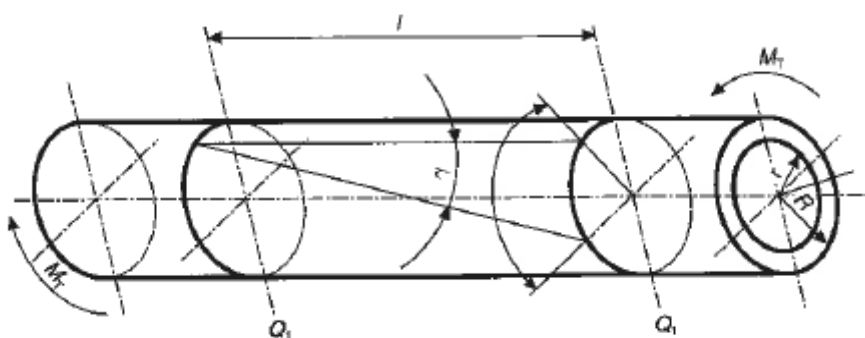
ního tělesa konstantní. Toto má velký význam pro zjištění modulu pružnosti v ohybu. Pro zkoušku ohybem slouží několik norem pro různé druhy vyztužení viz. ČSN EN ISO 178 (nebo 14125). [15]



Obr. 13- Metoda třibodového ohybu [15]

#### 2.1.4 Smyk

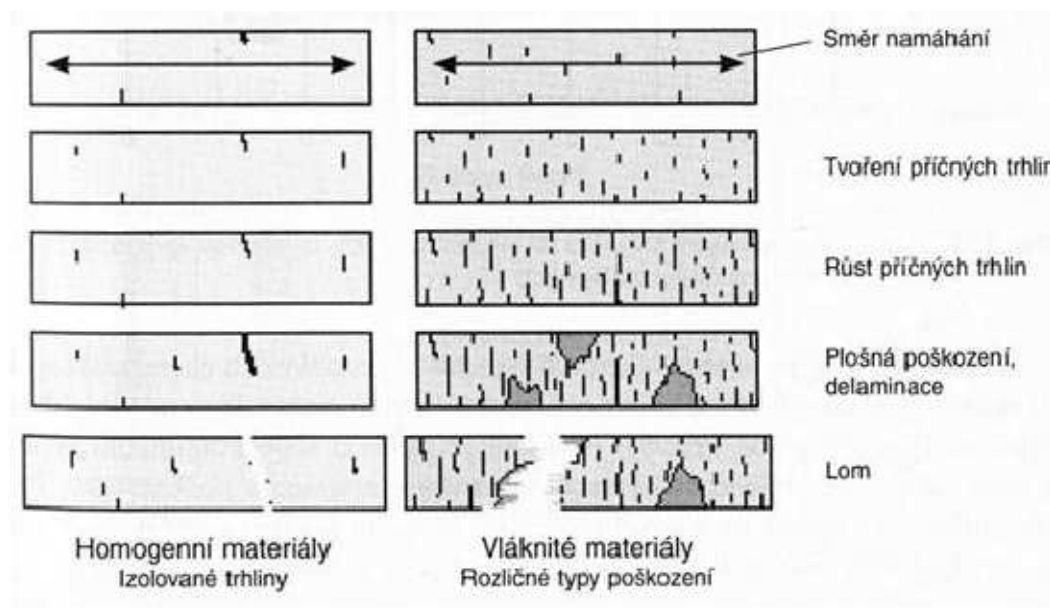
Mezi zvláštnosti kompozitních materiálů patří závislost pevnosti ve smyku na směru zatížení. Únosnost jednosměrně vyztuženého laminátu při tahu ve směru vláken je mnohem vyšší než ve směru kolmo na vlákna. Při namáhání tlakem jsou tyto skutečnosti opačné. Namáhání v prostém smyku je v praxi obtížné, proto jsou nejčastěji zkušební tělesa tvaru trubky namáhána krutem. [1]



Obr. 14- Schéma zkoušky krutem na trubce [1]

## 2.2 Dynamické zkoušky

Při dynamickém namáhání vlákniny vyztužených kompozitů je poškozování při namáhání provázáno vznikem a šířením různých typů poruch, které jednotlivě nemají takový význam jako trhlinka například v kovovém materiálu. Tyto poruchy můžeme rozdělit na porušení soudržnosti vlákna s matricí, lom vlákna, trhlinka v matrici, porušení soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami (hlavně u vrstvených materiálů při postupujícím procesu únavy). Růst trhliny u kompozitního materiálu může být zastaven sousedící pevnější složkou. Přesto, že kompozitní materiály umožňují optimalizaci struktury s ohledem na předpokládaný způsob namáhání, na dlouhé straně existuje značná rozmanitost ve způsobu a průběhu porušování. To v důsledku jejich mikro- i makroskopicky heterogenní struktury. Většina těchto mechanismů poškozování se nevyskytuje u homogenních materiálu (např. kovů, nevyztužených plastů), což činí při práci s izotropními materiály problémy správně pochopit a interpretovat chování kompozitu při tomto únavovém namáhání. [1]

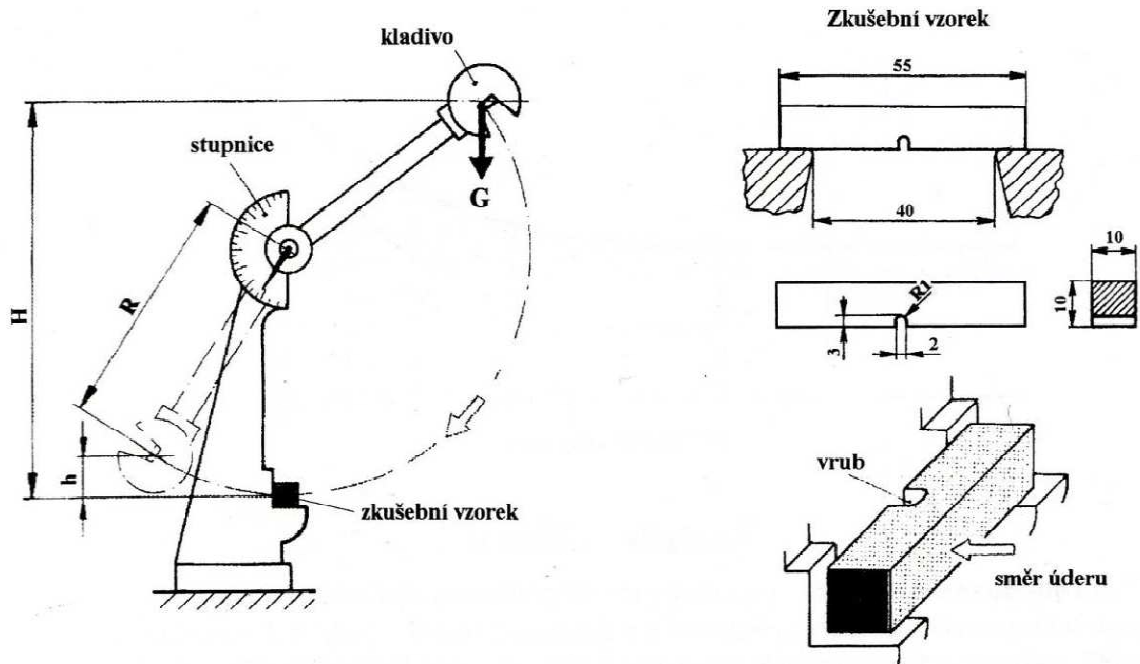


Obr. 15 - Průběh poškozování u materiálů homogenních a vláknitých [1]

### 2.2.1 Rázové zkoušky

Zkoušky se mohou uskutečnit při namáhání v tahu, tlaku, ohybu a krutu stejně jako zkoušky statické. Neznámější a nejpoužívanější je rázová zkouška v ohybu, která se provádí především u oceli. Zkušební vzorky jsou opatřeny vrubem, aby došlo k porušení materiálu, které by jinak nenastalo vlivem vysoké houževnatosti. Rázové zkoušky se používají ke zjištění

houževnatosti materiálu, jehož měřítkem je energie potřebná pro porušení zkušební tělesa. Vrubovou houževnatost zjišťujeme na Charpyho kladivu. [17]



Obr. 16- Schéma zkoušky na Charpyho kladivu [17]

Při této zkoušce se kladivo o dané hmotnosti  $G_k$  upevní v počáteční poloze  $h_0$  a v nejnižším bodě dráhy se umístí zkušební vzorek. Po uvolnění se kladivo pohybuje po kruhové dráze, přerazí zkušební těleso a vykývne ho do konečné polohy  $H$ . Pro plasty a vlákny vyztužené materiály se jako zkušební těleso používá pás o různé délce, šířce 10mm a tloušťce 4mm.

Z této zkoušky je možné vyhodnotit tyto veličiny:

### Nárazová práce KU

$$KU = G_k * (h_0 - H) [J] \quad (1)$$

**Vrubová houževnatost KCU** je podíl nárazové práce a původního průřezu  $S_0$ .

$$KCU = \frac{KU}{S_0} [J/cm^2] \quad (2)$$

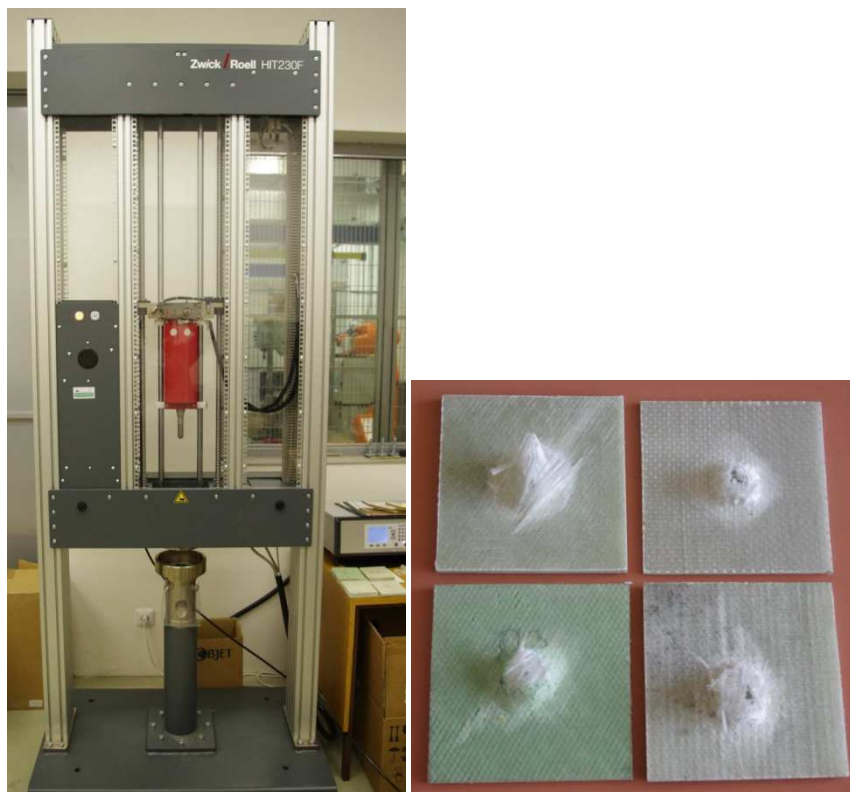
Podle ČSN EN ISO 6603-1-2 se provádí zkouška metodou padajícího tlouku, při které se stanoví chování tuhých plastů při více-osem rázovém namáhání. Pro přístroje s otočným kladivem platí určitá omezení a mají své nedostatky, hlavně v oblasti volby energie a rychlosti. Přístroje zvané padostroje tyto nedostatky odstraňují svým principem, který je založen na volně padajícím tělese s libovolně volenou kinetickou energií (ta závisí na hmotě tělesa a



výchozí výšce). Těleso je spuštěno z dané výšky a zkušební těleso je jím proraženo. Velikost kinetické energie  $E$  [J] lze určit ze vztahu (3).

$$m * g * h = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (3)$$

Kde  $m$  je hmotnost tělesa [kg],  $h$  výška pádu [m] a  $v$  okamžitá rychlost pádu tělesa [m/s].



Obr. 17- Padostroj a zkušební vzorky po provedené zkoušce [14]

Norma ISO 6603 specifikuje metodu pro stanovení rázových vlastností plastů průrazem desky, která je připevněna ke stroji ve formě kruhových nebo čtvercových zkušebních těles standardních rozměrů. Tato metoda se používá k hodnocení plastových desek a výlisků vystavených rázovému zatížení působícímu kolmo k rovině desky. Rázová houževnatost (odolnost proti porušení) zkušebního tělesa se stanoví nárazem indentoru (tlouku), který padá volným pádem z předem známé výšky. [22,23]

ISO 6603-1 se používá v případech, kdy k popisu rázového chování postačuje jediná prahová hodnota energie potřebné k porušení zkušebního tělesa. Pro nastavení velikosti energie jsou používány dva způsoby. První způsob docílí změny energie změnou hmotnosti tlouku (při zachování výšky pádu). V druhém případě dochází ke změně energie změnou výšky pádu tlouku (při zachování jeho hmotnosti). [22]

Část ISO 6603-2 se používá v případech, kdy je požadován celý průběh procesu rázu, vyjádřený pomocí vzniklé křivky závislosti síly na průhybu nebo závislosti síly na čase. Při této zkoušce je těleso podrobena nárazu tlouku, který dopadá konstantní rychlostí kolmo na povrch testovaného tělesa. Upnutí zkušební tělesa je volitelné. Padající tlouk je konstruován tak aby bylo možné ho opatřit snímačem síly, který výslednou křivku závislosti zaznamenává a následně převádí do elektronické podoby. [23]

$$E = m_z * h * g \quad (4)$$

Kde  $m_z$  je hmotnost závaží [g],  $g$  je gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ] a  $h$  je výška pádu [mm].

Zkouška se dělí na dvě statistické metody a to stupňovitou a metodu a skupinovou. Přednostně se používá metoda stupňovitá. Při tomto postupu se během zkoušky pracuje se stálou velikostí přírůstků energie. Po každém rázu na zkušební těleso se energie změní. Změnu energie během zkoušky je možno realizovat změnou hmotnosti padajícího tlouku při konstantní výšce pádu nebo změnou výšky pádu při konstantní hmotnosti tlouku. Přednostně se volí výška pádu kolem 1m. [22]

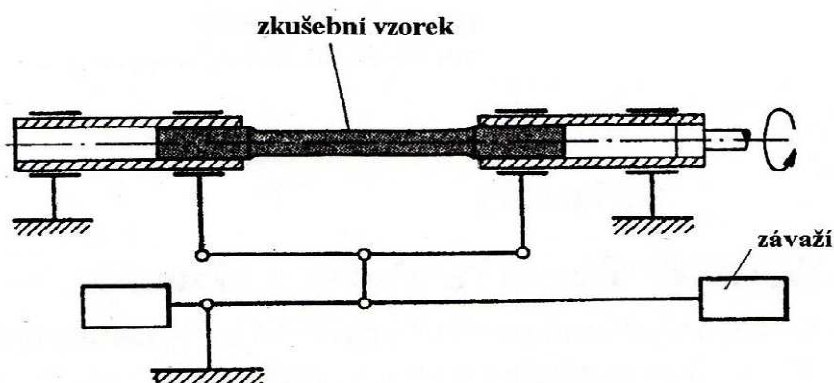
Nejprve se provede předběžná zkouška pro odhad energie, při které dojde k porušení 50% zkušebních těles. Použije se 10 zkušebních těles. Stanovení se provádí tak, že se na zkušební těleso nechá volně padat padací čidlo, jehož hmotnost lze dodatečně navyšovat závažím. Hledá se přitom taková hmotnost, při níž dojde ke zlomení alespoň 50% všech zkušebních těles (z pravidla se jedná o sérii 10 vzorků). energii k tomu vynaloženou lze stanovit z následujícího vztahu (4).

Pomocí skupinové metody se zkouší pořadové skupiny nejméně 10 zkušebních těles. Pro každou skupinu se použije jedna hodnota energie, která se pro každou skupinu stanoví odlišně o určitý přírůstek. Změna energie je realizována obdobně jako u stupňovité metody. Ve zkoušení se pokračuje do té doby, až se dosaženo alespoň pěti výsledků s následujícími procenty porušení : jeden výsledek s 0% porušení, jeden výsledek se 100% porušení a alespoň tři výsledky mezi 0% a 100% porušení. Tyto výsledky v rozmezí 0% a 100% porušení nesmí být všechny nižší nebo všechny vyšší než 50 %. [22,23]

### 2.2.2 Zkoušky opakovaným namáháním

Při namáhání materiálů vznikají často poruchy dříve, než jak by odpovídalo jejich statické pevnosti. Tento jev se nazývá únava materiálu, z toho je odvozen i jiný název a to zkoušky únavy. Při překročení určité hranice, která se nazývá mez únavy, hrozí nebezpečí lomu ma-

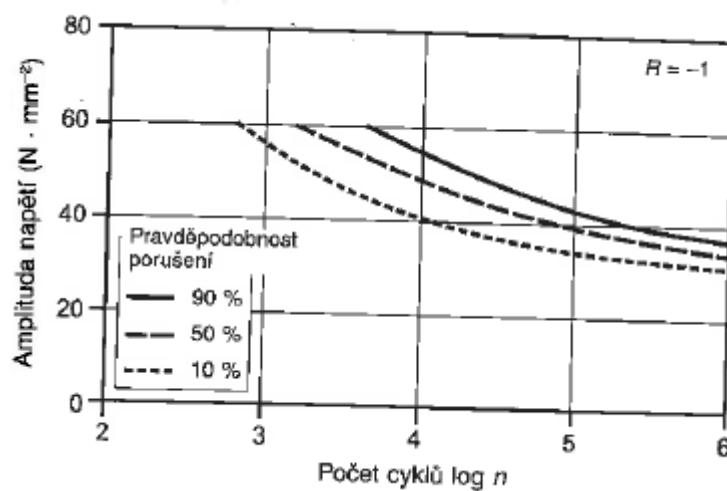
teriálu. Pro namáhání tahem nebo tlakem platí, že převládající tahové napětí snižuje mez únavy a převládající tlakové napětí naopak mez únavy zvyšuje. Dále ji snižují zářezy, ostré změny průřezů, otvory a špatný nebo zkorodovaný povrch.



Obr. 18- Schéma Schenckova přístroje pro zkoušku opětovným namáháním [17]

Únavu materiálu můžeme zjistit na Schenckově přístroji. Při této zkoušce je první tyč zatížena na danou hodnotu a opětovně uvolněna a poté se počítá počet cyklů zatížení do lomu materiálu. U dalších tyčí snižujeme postupně napětí, až do okamžiku kdy tyč nepraskne.

K popisu jejich únavového chování slouží Wöhlerova křivka, do které vnášíme získané hodnoty v závislosti na počtu cyklů a napětí. Vyhodnocení výsledků u zkoušek statistickými postupy dovoluje poměrně dobře určit vhodnost materiálů pro jejich využití v podmínkách únavového namáhání. Kritériem únavy je lom (úplné porušení zkušebního tělesa). Většina vlákniny vyztužených plastů s rostoucí dobou zatížení a postupující únavou více nebo méně vykazují pokles tuhosti, proto pro dynamické zatížení je lom jakožto jediné kritérium únavy nedostatečný. Pokles tuhosti je přípustný např. při použití vlákniny vyztužených plastů, kde se může změna vlastností s počtem cyklů v jistých mezích měnit. Pro získání dalších informací vneseme údaje o poklesu tuhosti (obvykle 10-20%) do Wöhlerovy křivky. Získáme tak další informace o časovém průběhu únavy. Ke stanovení zbytkové pevnosti je poté zkušební těleso po daném počtu cyklů zatížení podrobeno ještě statické zkoušce. [15,17]



Obr. 19- Příklad Wöhlerovy křivky [1]

Tato křivka se asymptoticky blíží k mezi únavy, což je napětí, při kterém materiál vydrží nekonečný počet cyklů. V praxi stanovujeme smluvní mez únavy (napětí), při které materiál vydrží daný počet cyklů stanovených jako základ zkoušky. [1]

### 3 ZKOUŠKA STLAČENÍM PO IMPAKTU

Při výrobě, montáži, údržbě nebo v jiné situaci během své životnosti mohou kompozitní materiály utrpět poškození způsobená různými druhy nárazu. Za nejnebezpečnější bývá považován náraz s nízkou energií, protože takové poškození může uniknout pozornosti při běžné vizuální kontrole povrchu materiálu postižené součásti. K výraznému ovlivnění mechanických vlastností totiž může dojít už při nárazu, který má mnohem nižší energii než jaká je potřeba ke způsobení viditelného poškození součásti.

Pravděpodobně nejvýznamnějším problémem je delaminace vzhledem k náročnosti jejího vizuálního odhalení. Závažná je také vzhledem k rozsahu, jakým se zhorší mechanické vlastnosti. K velkému zhoršení dochází hlavně u pevnosti v tlaku, která může poklesnout až na 40-60% hodnoty naměřené u nepoškozené součásti.

Tolerance laminátů k poškození se z pravidla určuje zjištěním vlivu různých energií nárazu na jejich zbytkovou pevnost. K experimentálnímu ověření součástí, které poškodil nízkoenergetický náraz, se používá zkouška stlačením po impaktu zvaná CAI (z anglického názvu compression after impact).

Mezinárodní norma ISO-18352 specifikuje metodu pro stanovení zbytkové pevnosti v tlaku u vyztužených kompozitních desek s polymerní matricí, které byly poškozeny energetickým nárazem ještě před aplikací tlakového zatížení v rovině zkušebního tělesa. Uplatnění metody popsané touto normou je omezeno na vlákna vyztužené lamináty z jednosměrných předimpregnovaných tkanin nebo tkané látky. Tato metoda může být použita pro získání dat k materiálové specifikaci, k vyhodnocení daného materiálu, k výzkumu či vývoji nebo při konstruování. [7,4]

#### 3.1 Zkušební tělesa

Každý testovací vzorek by měl být plochý obdélníkový plát laminátu. Tato norma předepisuje zkoušku pro testování laminátů s vyztuží jednosměrnými vlákny nebo prepregy.

Norma uvádí počet testovaných vzorků 5 a více a to u každé jednotlivé velikosti energie nárazu, nebo v každé variantě experimentálních podmínek (v případě, že dojde ke změně). Avšak test který poskytne širokou škálu rozdílných výsledků a nebo takový, kde vznikne velká neočekávaná chyba, není možné brát v potaz. Je nutné vyhledat faktor způsobující chybu, odstranit jej nebo alespoň eliminovat a poté zkoušku opakovat.

### 3.2 Průběh zkoušky

Zkouška se skládá ze tří kroků. Nejprve je zkušební těleso (vzorek) vystaveno nízkoenergetickému příčnému nárazu na padostroji, který uvnitř laminátu vytvoří poškození. Toto poškození se ve zkratce nazývá BVID (z anglického názvu barely visible impact damage). Jedná se o poškození nárazem odpovídající promáčknutí do hloubky 0,3mm. Zkušební těleso se podrobí příčnému koncentrovanému nárazu způsobenému padajícím závažím s polokulatým indentorem (tloukem). Je nutné podrobit zkušební těleso pouze jednomu nárazu. Druhému nebo opakovanému nárazu by mělo být zabráněno pomocí zařízení k tomu konstruovaných. Energie nárazu je dána hmotností a počáteční výškou padajícího tlouku, ze které byl spuštěn. Dle normy by měla být tato energie rovna 6,7J na mm tloušťky vzorku. Je možné ale stanovit jinou smluvní hodnotu a to v případě pokud je testovaný materiál příliš křehký nebo naopak příliš odolný. [4]

$$E_N = E_C * d [J] \quad (5)$$

Kde  $E_N$  je požadovaná energie nárazu,  $E_C$  je specifikovaná hodnota energie na 1mm tloušťky a  $d$  je tloušťka vzorku v [mm].

Výpočet výšky  $h$  ze které bude náraz proveden, lze spočítat z následujícího vztahu:

$$h = \frac{E_N}{m_z * g} [m] \quad (6)$$

Kde  $m_z$ [kg] je hmotnost závaží a  $g$ [m/s<sup>2</sup>] je gravitační zrychlení pro danou nadmořskou výšku.

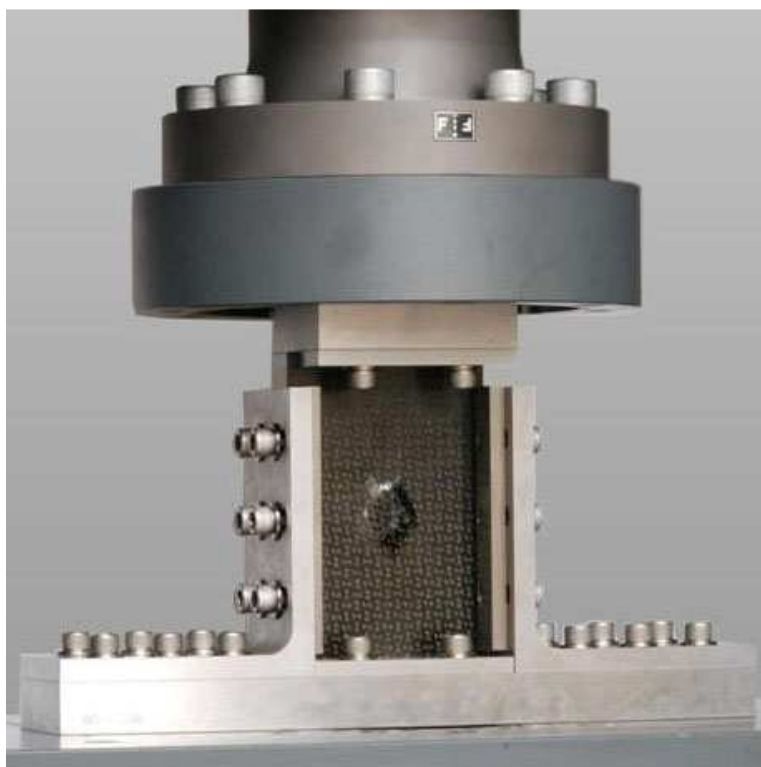
V druhém kroku se hodnotí úroveň poškození a to za pomoci nedestruktivní zkoušky (NDT) jako je kupříkladu ultrazvukový C-sken nebo rentgen. Také probíhá měření hloubky poškození v rovině nárazu. Měříme geometrii škod vzniklých v oblasti nárazu a všechny parametry jako delaminace a průměr delaminace a také je posuzován typ poškození. Poté je vzorek podroben vizuální posouzení poškozené a opačné strany, které se provádí pro určení viditelného poškození tvaru a rozměru, poškození vláken a lámání vrstev.

Zde je nutné provést kontrolu zda nedošlo ke znehodnocení zkoušky, některým z ovlivňujících faktorů. Je nutné aplikovat zatížení ekvivalentní 10% odhadovanému tlakovému zatížení potřebnému ke zničení vzorku. Poté je uložen záznam z umístěných tenzometrů. Následně je tlakovou sílu zredukována na 10N a nebo méně. Po zpětném vyhodnocení záznamu z tenzometrů získáme možnost stanovit procentuální hodnotu ohybu při maximálním aplikova-

ném zatížení pro každý pár protilehlých tenzometrů. Porovnáním naměřených a středních hodnot je možné zjistit zda je zkouška skreslená. Pokud jsou hodnoty odlišné o méně než 10% oproti středním hodnotám, tak se jedná o skreslení zanedbatelné. Lze toho využít i pro určení zda se jedná o chybu systematickou nebo ji způsobil přístroj, případně zda se jedná o chybu náhodnou.

Naopak pokud je vyšší, tak je nezbytné zkontrolovat uchycení zkušební tělesa a upravit ho tak, aby nedocházelo ke skreslení. Případně vyhledat příčinu ovlivnění zkoušky a učinit nápravu.

Ve třetím kroku se provádí určení zbytkové pevnosti poškozené součásti jejím vystavením rovinnému tlaku. Ten je aplikován na zkušební těleso, dokud nedojde k jeho selhání. Zbytková pevnost v tlaku, modul pružnosti a deformace jsou vypočteny z naměřených hodnot odezvy stroje. Další charakteristikou z této zkoušky může být také odolnost proti poškození a jeho tolerance. Zkoušku CAI je třeba provádět v zařízení s použitím přípravků (chlopní, vodících desek, upínacích desek atd.), které zabrání celkové deformaci poškozeného tělesa. K defektu tak dojde následkem postupu delaminace v místě lokální deformace, kterou náraz způsobil.



Obr. 20- Zkouška stlačením po impaktu [7]

Na vzorky je vyvíjen tlak trvalým posunem o dané rychlosti. Zkouší se několik vzorků a to vzorky nevystavené nárazu, ale také vzorky, které byly vystaveny nárazu o dané velikosti energie. Srovnáním lze stanovit úbytek zbytkové pevnosti způsobený nárazem. Avšak vlastnosti stanovené z této zkoušky jsou vysoce závislé na několika faktorech. Některé z nich jsou geometrie vzorku a jeho poloha uchycení, hmotnost a geometrie padajícího tlouku, nárazová energie, velikost a umístění poškození a jiné. Z toho plyne, že výsledky jsou obecně nesrovnatelné s jinak konfigurovaným provedením zkoušky. [4]

### 3.3 Standardy

Doporučení pro provádění zkoušky CAI vydalo několik organizací a společností (např. NASA, Boeing, SACMA, CRAG atd.). Vydané normy k této zkoušce se liší a každá stanovuje svou geometrii vzorku a testované proměnné. Většina zkoušek snažících se o poškození laminátu se provádí pomocí zkoušky padajícím závažím, která reprodukuje náraz objektu o velké hmotnosti při relativně nízké rychlosti.

Dle ISO, EN a Airbus norem je vzorek nutno upnout za horní a dolní konce zkušební tělesa a postraní okraje jsou pouze vedeny. Naproti tomu normy ASTM, DIN, SACMA nebo Boeing vyžadují, aby byl vzorek veden pomocí vodících desek pouze přes jeho čtyři okraje. Není zde použito upnutí. Při této zkoušce se používají tenzometry, sloužící ke sledování ohybu či jakéhokoliv vybočení zkušební tělesa z dané polohy.

Velikost vzorku a způsob jeho upnutí se mezi různými studii liší, zařízení a postupy jsou však podobné. Společnosti NASA a Boeing upřednostňují použití vzorku o tloušťce větší než 3 mm. Společnost CRAG používá zkoušku, kdy je vzorek uchycen na všech stranách. Tato metoda vyžaduje rozměrově velké vzorky, tudíž i větší množství materiálu. Naproti tomu v mnoha leteckých a vesmírných aplikacích se používají lamináty tenké 1,5-2 mm. Z toho plyne, že údaje získané z jednotlivých zkoušek nemusí být pro skutečnou strukturu platné, protože způsob poškození částečně závisí na tloušťce zkušební tělesa, což je patrné ze vztahu (5).

Možností jak se tomuto problému vyhnout bylo navržení chlopní u tenkých vzorků. V jiných studiích jsou navíc používány desky bránící celkové deformaci. Ne však místní deformaci způsobené daným nárazem. Problémem těchto metod je fakt, že vzorky s koncovými chlopněmi je třeba upevnit pomocí úzkých čelistí, podobně jako u tahových zkoušek. Většina na-

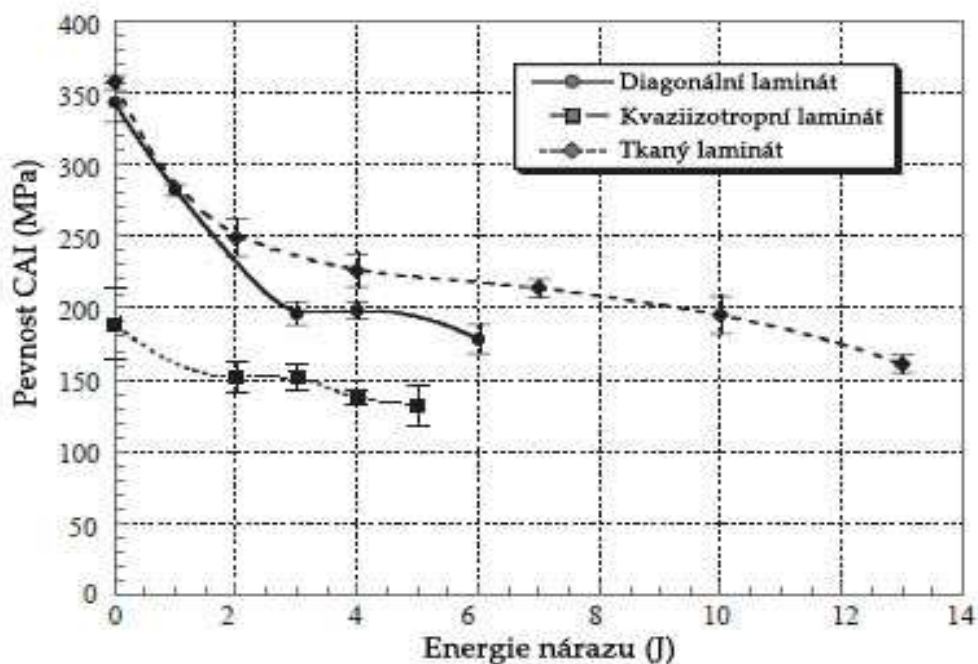


vrhovaných metod vyžaduje chlopně a zúžené vzorky, což v některých případech vyžaduje změnu geometrie vzorku ještě před zkouškou. Tento fakt zkoušky dále komplikuje. [4,5,6,7]

### 3.4 Vyhodnocování zkoušky

Delaminace se šíří převážně kolmo ke směru působení tlaku ( $90^\circ$ ) a ve směru  $0^\circ$  je slabší. Ohybová tuhost sublaminátů je nižší než u laminátu nevystaveného nárazu, z čehož plynou časté místní deformace a defekty nastávající už při nižším zatížení než u nepoškozeného laminátu

U různých metod lze vypočítat střední hodnotu a směrodatnou odchylku zbytkové pevnosti zkoušeného laminátu. Autoři uskutečněných zkoušek se shodují, že rozptyl těchto výsledků byl menší než 10 % a to i u nepoškozených vzorků. U nich je provedení zkoušky náročnější, protože jsou náchylné k celkové deformaci, chybnému umístění a faktorům vysoké koncentrace stresu na všech okrajích.



Obr. 21- Průměrné hodnoty zbytkové pevnosti [7]

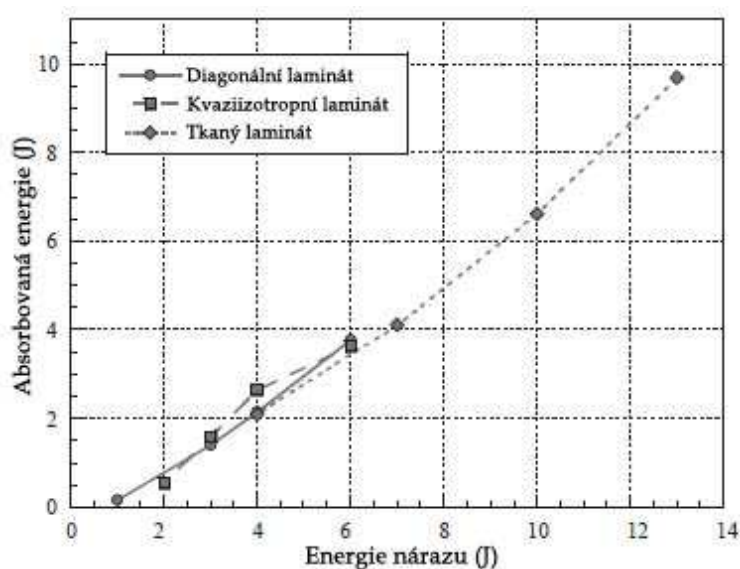
Z grafu lze vyčíst průměrnou pevnost zkoušených vzorků v tlaku jako funkce energie nárazu, a to včetně vzorků, které nebyly nárazu vystaveny. Na základě tohoto grafu lze stanovit zbytkovou pevnost laminátů. Zřetelný je výrazný pokles zbytkové pevnosti při nízko energetickém nárazu a následně menší pokles při dalším zvyšování této energie. Ukázalo se, že tkaný laminát má při všech energiích nárazu větší zbytkovou pevnost oproti ostatním lami-

nátům, která je způsobena omezením delaminace a stříhových trhlin, které plynou z uspořádání vyztužujících vláken.

Je možnost měřit sílu, kterou bylo na vzorek v průběhu zkoušky působeno. Z těchto hodnot lze sestavit křivku síly a z ní následně vyhodnotit sílu (energi) v okamžiku defektu materiálu. Tuto hodnotu lze použít ke zjištění zbytkové pevnosti zkušební tělesa dle vztahu (7).

$$\sigma_{CAI} = \frac{F_{max}}{b*t} [MPa] \quad (7)$$

Kde  $F$  je maximální tlaková síla [N],  $t$  je tloušťka zkušební tělesa [mm] a  $b$  je jeho šířka [mm].



Obr. 22- Křivka absorbované energie u tří druhů laminátů [7]

Pomocí hodnot získaných z tenzometrů lze také stanovit modul pružnosti při zkoušce CAI  $E_{CAI}$ .

$$E_{CAI} = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) * b * t * 10^{-3}} [GPa] \quad (8)$$

Kde  $\varepsilon_1$  je smluvní hodnota pnutí 0,0005 (nejblíže nejnižšímu limitu napětí v tělese)  $\varepsilon_2$  je hodnota pnutí 0,0025 (nejblíže nejvyššímu bodu napětí).  $F_1$  je tlaková síla zatížení při hodnotě  $\varepsilon_1$ .  $F_2$  je tlaková síla zatížení při hodnotě  $\varepsilon_2$ .  $t$  je tloušťka zkušební tělesa a  $b$  je jeho šířka. [7]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 STANOVENÍ CÍLŮ

Praktická část práce se dle zadání zabývá konstrukčním návrhem přípravku pro zkoušku stlačením po impaktu. 3D modely a následná výkresová dokumentace byly vytvořeny za pomoci programu CATIA V5R19. Při navrhování a modelování bylo přihlédnuto ke skutečným rozměrům zkušebního tělesa a rozměrům upínacího zařízení zkušebního stroje. Návrh obsahuje i potřebný dílec pro uchycení na univerzálním (trhacím) stroji. K práci je přiložena kompletní výkresová dokumentace pro výrobu všech dílců navrhovaného přípravku.

Mezi hlavní cíle bakalářské práce patří:

- Návrh přípravku pro zkoušku stlačením po impaktu
- Tvorba modelu konstrukce
- Zhotovení výrobních výkresů dané konstrukce
- Technologický postup výroby

## 5 UNIVERZÁLNÍ STROJ

Navrhovaný přípravek je i svým uchycením přizpůsoben k montáži na stroj Zwick 1456, který je k dispozici v laboratořích Fakulty Technologické. Tento univerzální stroj se používá pro zkoušky tahem, tlakem, ohybem u různých typů materiálů (kovových materiálů, kompozitů, plástů, textilií, a jiných).



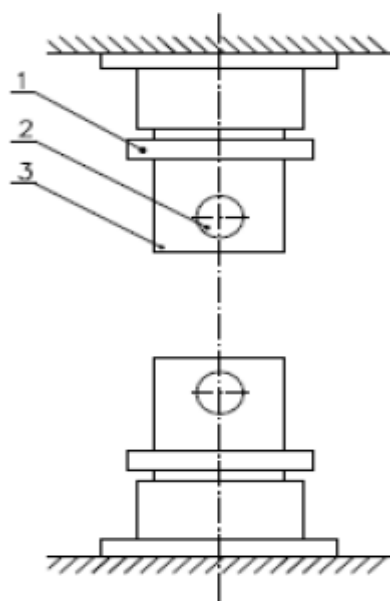
Obr. 23- Univerzální zkušební stroj Zwick 1456

Zkušební stroj se skládá ze stolu, základové desky, rámu s pojezdovými tyčemi, na které je připevněn příčník a extenzometr pro přesnější měření hodnot protažení vzorku. K dispozici je součástí stroje i tepelná komora pro zkoušky s uplatněním změny teploty. Aby bylo možné s ní pracovat a byl usnadněn i případný přístup k tenzometrům je uchycení přípravků ke

stroji pootočeno o 45° kolem svislé osy stroje. Toho lze využít i 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.

## 5.1 Upínací zařízení stroje

Rozměry upínacích částí byly směrodatné pro návrh konstrukce upínacích dílů, které slouží k upevnění navrhovaného přípravku na stroj Zwick 1456.



Obr. 24- Schéma upínacího zařízení stroje

Kde pozice 1 je utahovací matice, pozice 2 je otvor pro pojistný kolík a pozice 3 je spojovací čep k upnutí.

## 5.2 Technické parametry stroje

Následující technické parametry jsou specifické pro stroj Zwick 1456:

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

## 6 PADOSTROJ

Padostroj Zwick Roell HIT230F je svým uzpůsobením přednostně určen pro zkušební tělesa z kompozitních a polymerních materiálů. Je konstruován i pro možnost provádět více-ose rázové zkoušky. Stroj je vybaven padajícím závažím o hmotnosti 23,48kg, které dopadá na zkušební tělísko z předem stanovené výšky. Toto závaží je zvednuto do výchozí pozice za pomoci motorizovaného pohonu. Naměřené hodnoty z padostroje jsou opět zaznamenávány na počítači prostřednictvím programu TestExpert II verze 7.2.



Obr. 25- Padostroj značky Zwick Roell HIT230F

Tento stroj je také vhodný k přípravě kompozitních desek, pro standardní zkoušky, pro letecký a vesmírný průmysl, kam spadá i výše zmíněná zkouška stlačením po impaktu.

## 6.1 Vybrané vlastnosti stroje

Mezi výhody tohoto stroje patří jeho jednoduchá a bezpečná obsluha. Konstrukce stroje je navržena pro případnou snadnou a rychlou výměnu příslušenství k provádění zkoušky. Spodní část stroje je vybavena inovačním pneumatickým zařízením pro jednoduché upnutí vzorku do zkušebního stroje. Nevýhodou je možnost testování pouze plastových nebo kompozitních materiálů. Při použití zkušebních těles z jiných materiálů by mohlo dojít k poškození indentoru (tlouku) i samotného stroje.

## 6.2 Technické parametry stroje

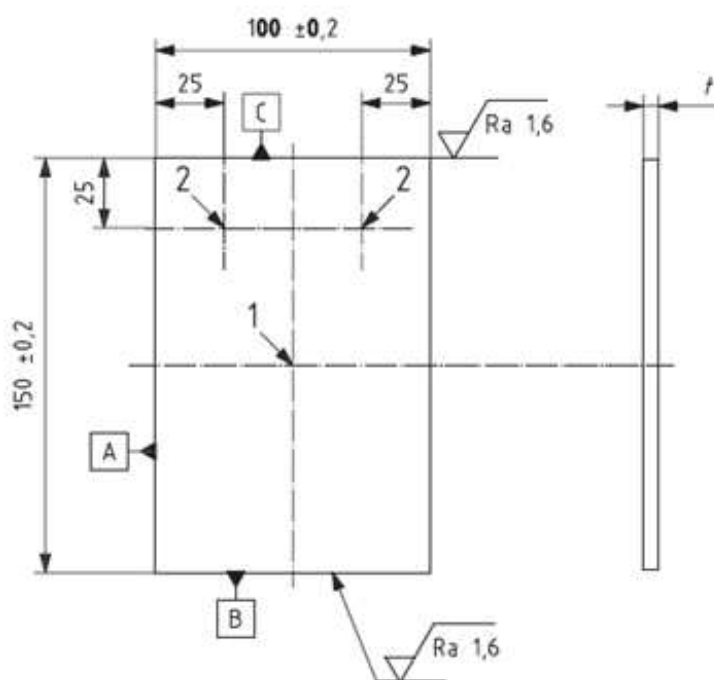
Zde jsou vypsány vybrané parametry stroje Zwick Roell HIT 230F:

- Hmotnost padajícího závaží: 23,48kg
- Výška pádu: Nastavitelná 0,11m až do 1m
- Rozsah rychlosti: až 4,4m/s při výchozí výšce 1m
- Měření rychlosti: před úderem za pomoci optických zařízení
- Energetický rozsah: až 230 J
- Celková výška stroje: 2600mm
- Celková šířka stroje: 1000mm
- Celková hmotnost stroje: 400kg



## 7 ZKUŠEBNÍ TĚLESA

Norma ISO 18352 předepisuje pro zkoušku stlačením po impaktu 5 a více zkušebních těles pro každou jednotlivou velikost testované energie nárazu. Každé zkušební těleso by mělo být plochý obdélníkový plát laminátu  $150 \pm 0,2$  mm dlouhý a  $100 \pm 0,2$  mm široký. Tloušťka vzorku je  $5 \pm 2$  mm pro lamináty s výztuží jednosměrnými vlákny nebo prepregy. Geometrie a rozměry jsou uvedeny na obr. 32 spolu s umístěním tenzometrů. Boční hrana A musí být rovnoběžná se směrem vyztužujících vláken. Je nutné zajistit rovnoběžnost mezi hranami B a C přesnější než 0,02 mm. Mezi hranou A a hranou protilehlou by měla být rovnoběžnost přesnější než 0,2 mm. Kolmost mezi A, B a C by měla být přesnější než 0,2 mm. Tyto rozměry byly důležitým údajem pro konstrukci přípravku v této práci.



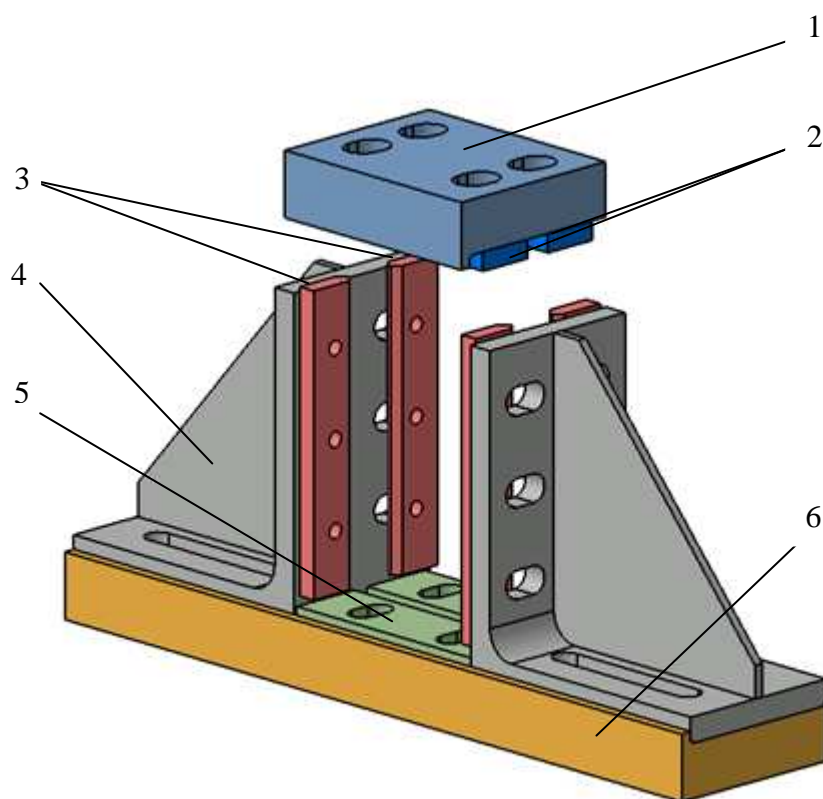
Obr. 26- Rozměry zkušebních těles v milimetrech

## 8 MODEL PŘÍPRAVKU

Pro tvorbu modelů byl použit program CATIA V5R19, za použití rozhraní pro tvorbu sestav. Byly zhotoveny jak model přípravku předepsaný normou, tak model navrhovaného přípravku včetně výkresové dokumentace jednotlivých dílů. Pro jednoduchost byly jednotlivé díly odlišeny barevně, aby nedošlo k případné záměně těch podobných.

### 8.1 Model dle normy

Norma ISO 18352 předepisuje přípravek pro zkoušku stlačením po impaktu u jednosměrně vyztužených kompozitů. Sestava tohoto přípravku se skládá z celkově dvanácti částí (ze šesti základních dílů, kdy některé jsou použity vícekrát). Tato norma uplatňuje upnutí zkušebního tělesa v přípravku za horní a dolní hranu, kdy boční hrany jsou pouze vedeny pomocí vodících desek. Tyto desky mají styčnou plochu sníženou na minimum pomocí zaoblení o poloměru 1mm v místě dotyku, aby nedošlo k příliš pevnému stisknutí zkušebního tělesa a následnému ovlivnění zkoušky. Norma nepředstavuje návrh dílce pro upnutí na zkušební stroj. Pouze doporučuje stroj, na kterém je možno danou zkoušku provést.



Obr. 27- 3D model přípravku dle normy ISO 18352

Kotevní deska (1) je spojena pomocí čtyř šroubů se dvěma horními upínacími deskami (2) a slouží jako prvek přenášející tlakové zatížení na zkušební těleso. Norma neuvádí jaký typ či rozměr spojovacího materiálu by měl být použit. Kotevní deska má na horní straně zhotoveny čtyři drážky pro možnost nastavení šroubů a tím i horních upínacích desek na danou tloušťku testovaného zkušebního tělesa. Přípravek dále obsahuje dvě opěrné desky (4) sloužící také k upevnění vodících desek (3). Každá je upevněna pomocí tří šroubů a nastavení jejich polohy je možné ve třech průchozích vodorovných drážkách umístěných nad sebou. Pohyb opěrných desek po základní desce (6) a tím i následné nastavení šířky zkušebního tělesa je možné díky dlouhým průchozím drážkám ve spodní části opěrných desek (4). Zde se nachází celkem dvanáct šroubů sloužících k zajištění polohy vůči základní desce (vždy tři šrouby na každou drážku). Ve spodní části přípravku se dále nachází spodní upínací desky (5) sloužící k uchycení a zajištění stále polohy spodní části zkušebního tělesa. Upevněny jsou opět pomocí dvou šroubů na každou upínací desku. Nastavení šířky mezery pro dané zkušební těleso je zde znovu řešeno pomocí průchozích drážek zhotovených na spodních upínacích deskách nikoliv v základní desce. Základní deska je mohutný kus materiálu sloužící k opoře ostatních dílů přípravku na ni připevněných.

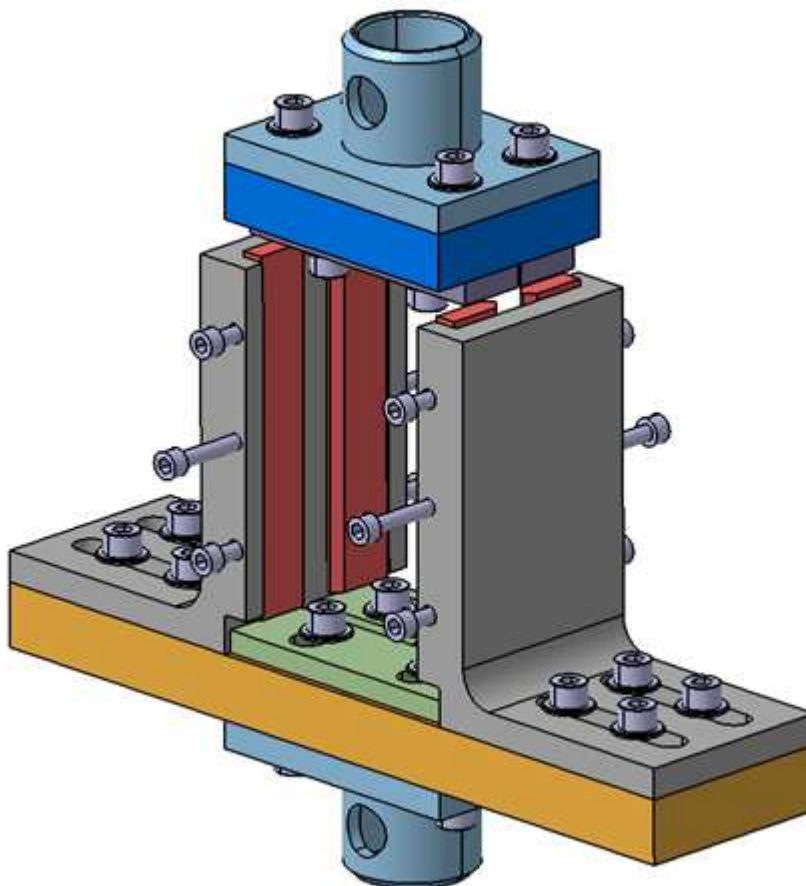
Obr.33 ukazuje přípravek předepsaný normou. Jeho konstrukce je výrobně náročná a stávající rozmístění prvků sloužící pro posuv jak horního tak i dolního upínání zkušebního tělesa je nevhodné pro následné upevnění na daný zkušební stroj. V případě ponechání rozmístění těchto prvků by nebyla možná výměna zkušebního tělesa bez nutnosti sundání přípravku ze stroje. Z dostupné literatury je zřejmé, že skreslení zkoušky může být důsledkem i nesprávné polohy upnutého zkušebního tělesa. Proto není v jisté míře vhodné nastavení vodících desek za pomocí průchozích vodorovných drážek umístěných vodorovně nad sebou. Může zde dojít snadno k vychýlení zkušebního tělesa od svislé polohy.

## 8.2 Model navrhovaného přípravku

Navrhovaný přípravek (obr.34) je přednostně zaměřen na možnost provedení této zkoušky na dostupném univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456, který se nachází v prostorách laboratoře Fakulty technologické.

Faktorů ovlivňujících zkoušku stlačením po impaktu je hned několik. Tento návrh má ve snaze představit možné konstrukční řešení vedoucí k eliminaci některých z nich. Dále se návrh zaměřuje na zjednodušení konstrukce pro snadnější možnost výroby při zachování funkčnosti jednotlivých částí i celku. Záměrem je také předejít případnému skreslení či zne-

hodnocení zkoušky z důvodu špatné polohy při uchycení zkušebního tělesa, ke kterému by mohlo dojít v případě rozmístění konstrukčních prvků dle návrhu normy. Tuto problematiku je ve snaze řešit za pomoci nové konstrukce upevnění a nastavení vodících desek.



Obr. 28- 3D model navrhovaného přípravku

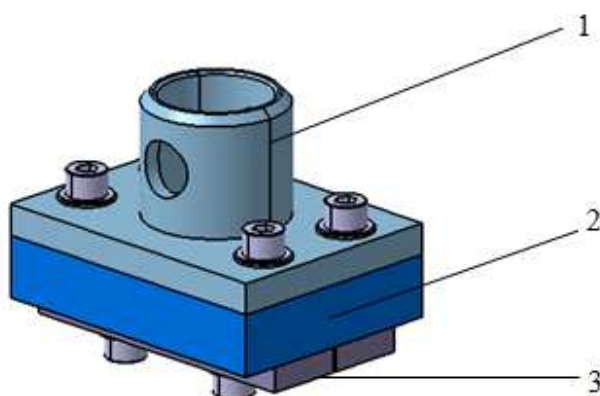
Návrh obsahuje novou konstrukci opěrné desky z důvodu obtížnosti výroby žebra sloužícího jako výztuž. V případě zachování žebra by bylo pro výrobu dílce zapotřebí polotovaru velkých rozměrů. Nebo by při zvolení polotovaru ve tvaru nerovnoramenného L bylo nezbytné žebro na dané místo přivařit. To by mohlo vést především ke zkroucení opěrných desek nebo případným dalším komplikacím. Pro zachování dostatečné tuhosti konstrukce při absenci žebra byly tyto desky navrženy s větší tloušťkou materiálu. S přihlédnutím i na tyto skutečnosti byla konstrukce opěrných desek navržena tak, aby byla za daných podmínek výroba realizovatelná a nedošlo k případné deformaci konstrukce a následnému znehodnocení zkoušky. Opěrné desky byly také konstrukčně přizpůsobeny k novému principu upevnění postraních vodících desek. Tyto jsou vedeny pomocí dvou šroubů sloužících k možnosti nastavení tloušťky mezery mezi protilehlými deskami a tím i postraní vedení zvoleného zku-

šebního tělesa. Kdy přitlačná síla aplikována na jednotlivé vodící desky působí ve shodném směru jako přitlačná síla těchto desek na zkušební těleso. Navíc je síla rozložena rovnoměrně pomocí její aplikace do středu zadních ploch. V případě přípravku představeného normou je tento směr působících sil kolmý, tudíž by mohlo dojít k nesprávnému upnutí a vychýlení od svislé osy.

### 8.3 Popis hlavních částí

Navrhovaný přípravek se skládá ze dvou hlavních částí, které nejsou vzájemně spojeny. Při zkoušce jsou spojeny pouze prostřednictvím zkušební tělesa (laminátové desky). Je zapotřebí zajistit zkušební těleso ve správné poloze a zamezit případnému zdeformování konstrukce ještě před poškozením zkušební tělesa.

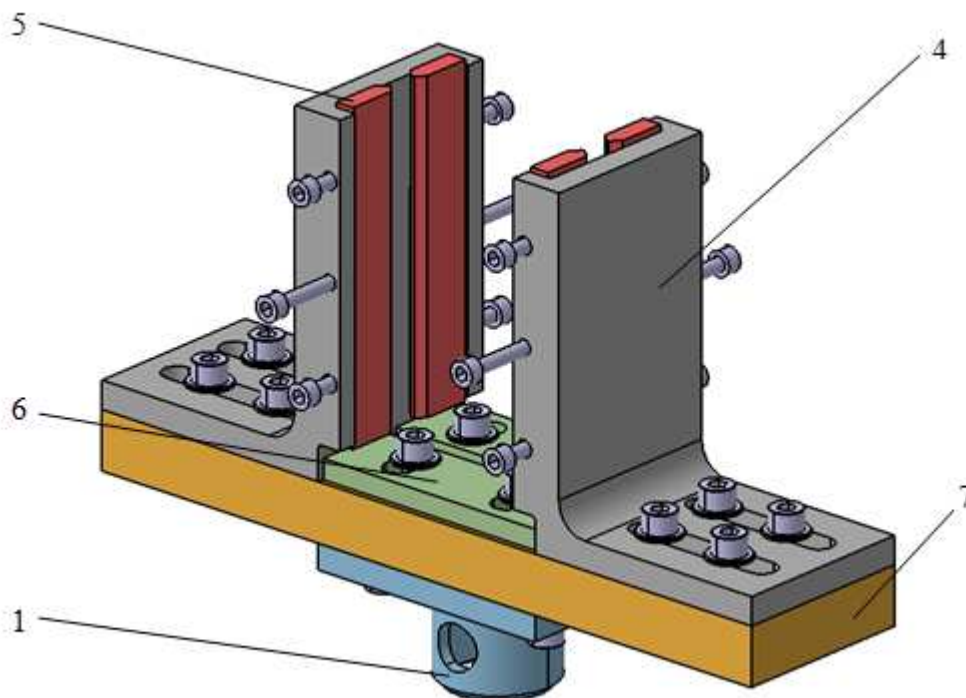
Sestava přípravku obsahuje 7 základních dílů (kdy některé díly jsou použity ve více kusech). Spojovacím materiálem jsou výhradně šrouby s vnitřním šestihranem (36 šroubů) a válcovými podložkami. Především za účelem snazší obsluhy jednotlivých částí v průběhu zkoušky.



Obr. 29- 3D model horní části přípravku

Horní část přípravku se skládá ze tří základních částí. Upínací dílec (1) je konstrukčně řešen tak, aby sloužil jako spojovací díl mezi přípravkem a zkušebním strojem. Pomocí čtyř šroubů s vnitřním šestihranem (ŠROUB M8x30 ISO 4762) s válcovými podložkami (PODLOŽKA 8,4 ČSN 02 1703.11) je dílec připevněn rozebíratelným spojem ke kotevní desce (2). Tato část slouží především k možnosti přenášení tlakového zatížení přímo na zkušební těleso. Obě horní upínací desky (3) jsou připevněny každá pomocí dvou šroubů (ŠROUB M8x30 ISO 4762) s válcovými podložkami (PODLOŽKA 8,4 ČSN 02 1703.11) ze spodní části ke kotevní desce. Drážky sloužící k nastavení tloušťky zkušební tělesa

jsou z konstrukčních důvodů umístěny na horních upínacích deskách namísto vrchní části kotevní desky, a to z výše zmíněných důvodů.



Obr. 30- 3D model spodní části přípravku

Spodní část přípravku se skládá z pěti základních částí. Opěrné desky (4) jsou každá za pomoci čtyř šroubů s vnitřní šestihranem (ŠROUB M8x30 ISO 4762) s válcovými podložkami (PODLOŽKA 8,4 ČSN 02 1703.11) uchyceny za spodní kratší rameno přímo k základní desce (7). Opěrné desky slouží také k připevnění postraních vodících desek (5). Každá tato deska je vedena na dvou šroubech (ŠROUB M6x30 ISO 4762) a přítlačnou sílu vyvolává šroub (ŠROUB M8x30 ISO 4762) umístěn do prostřední části zadní plochy vodících desek pro rovnoměrnější rozložení této síly. K základní desce jsou rovněž připevněny spodní upínací desky (6) a to totožným způsobem jako tomu je u horních upínacích desek. Na spodní straně základní desky je znovu použit totožný upínací dílec jako u horní části přípravku. Základní deska zajišťuje dostatečnou oporu celé konstrukce a také zkušební tělesa, především aby nedošlo k deformaci konstrukce dříve než ke zborcení zkušební tělesa.

## 8.4 Volba materiálu konstrukce

Jako materiál pro výrobu této konstrukce je zvolena ocel 12020. Jedná se o konstrukční ocel vhodnou k chemicko-tepelnému zpracování s obsahem 0,13-0,2% C. Je vhodná k cementování a vykazuje střední pevnost v jádře po kalení. Ocel má zaručenou svařitelnost (podle druhu a rozměru polotovaru) a není vhodná ke galvanickému pokovování. Lze použít pro méně namáhaná ozubená kola, řetězová kola, pouzdra, vodítka a jiné. V naftovém průmyslu nachází uplatnění pro záchytné zvony nebo trny. Ve stavu žíhaném lze použít pro háky jeřábů nebo výtahů.

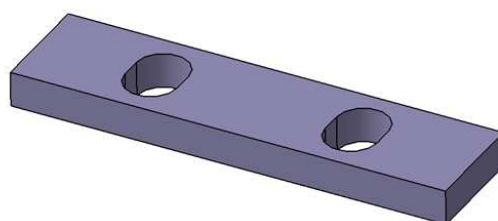
Zde jsou uvedeny teploty pro tepelné zpracování výše zmíněné oceli.

- kování 1150 až 750 °C
- normalizační žíhání 870 až 920 °C
- žíhání na měkko 680 až 720 °C
- cementování 850 až 880 °C
- kalení do vody (oleje) 780 až 920 °C
- popouštění 150 až 180 °C

Jako alternativa by mohl být použit materiál (ocel) 11600, nebo materiál vykazující obdobné vlastnosti.

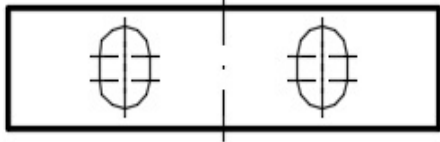
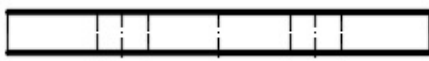
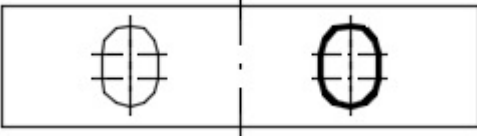
## 9 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY

Materiálem pro výrobu horní upínací desky (obr.37) je normovaný polotovar PLO28x10x110- ČSN 42 6522 - 12020. Dílec je po upnutí na stůl frézky za pomoci válcové frézy obvodově ofrézován na požadované tvarové rozměry 25x8x100[mm], aby bylo docíleno žádoucí drsnosti povrchu a funkčních rozměrů. Dle výkresové dokumentace jsou kotoučovou frézou o průměru 12 mm vyfrézovány dvě průchozí drážky dlouhé 17mm. Je nezbytné vyrobit dva tyto díly.



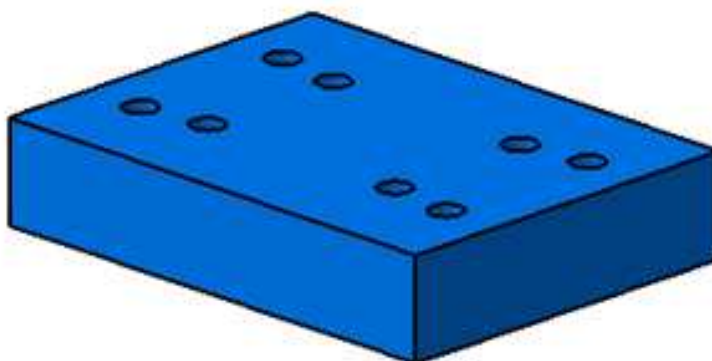
Obr. 31- 3D model horní upínací desky

Tab. 2 Technologický postup výroby horní upínací desky

Číslo operace	Název operace	Nákres	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar 28x10x110mm	-----	Pásová pila	Pilový pás
2	Frézovat obvodové plochy na rozměr 25x100mm		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
3	Frézovat horní a spodní plochu (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
4	Frézovat dvě průchozí drážky (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Kotoučová fréza průměr 12mm



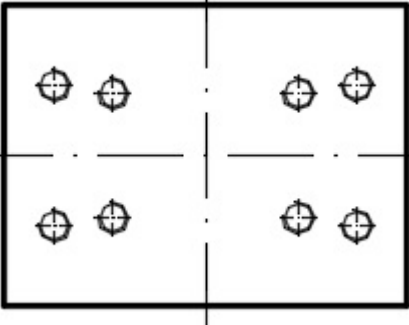
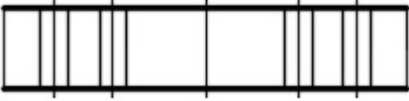
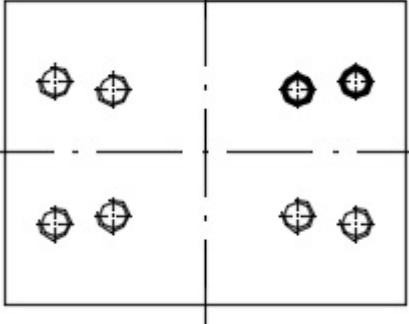
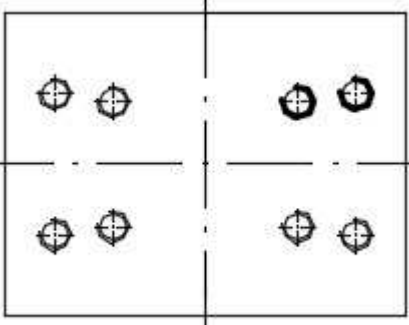
Kotevní deska (obr.38) je vyrobena z polotovaru PLO80x25x110 ČSN 42 6522 - 12020. Dílec je upnut na pracovní stůl frézky, kde je následně obvodovým frézováním válcovou frézou ofrézován na požadované tvarové rozměry 75x20x100[mm]. Dle výkresové dokumentace je za pomoci stojanové vrtačky předvrtáno osm průchozích děr vrtákem o průměru 6,8mm. Pomocí záhlubníku následně dosáhneme požadovaného náběhu pro šroub M8. Do těchto děr je následně tvářecím závitníkem zhotoven závit M8x1,25 po celé délce díry. Je zapotřebí zde dodržet geometrickou toleranci tvaru - rovinnost a to pro hodnotu 0,02mm. Větší nepřesnosti při výrobě toho dílce by mohly být přeneseny na další části přípravku. To by mohlo způsobit nesprávné upnutí horní částí zkušebního tělesa a tím i ke zkresleným hodnotám, případně ke znehodnocení celé zkoušky. Na přípravku se nachází pouze jedna kotevní deska. Není třeba vyrábět více těchto dílů pokud to nebude nutné (například z důvodu nedodržení předepsaných rozměrů výkresovou dokumentací )



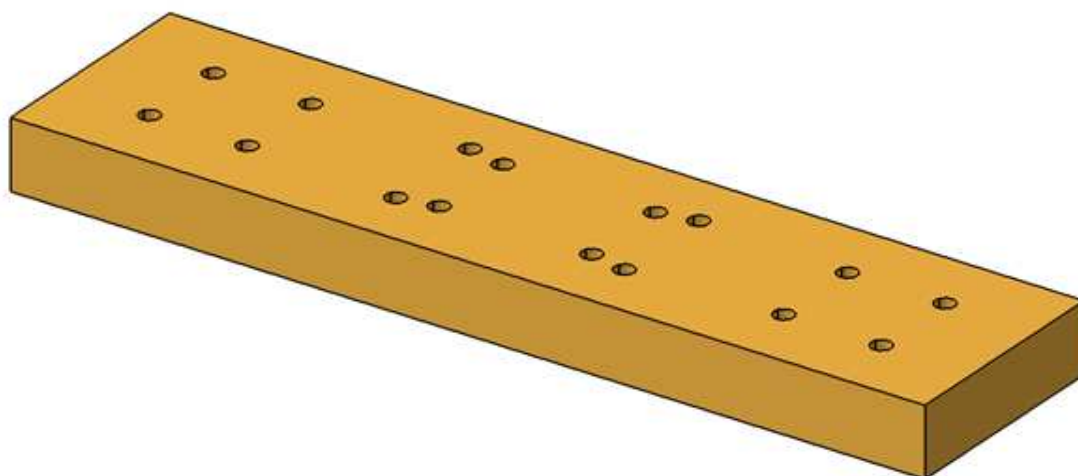
Obr. 32- 3D model kotevní desky

Tab. 3 Technologický postup výroby kotevní desky

Číslo operace	Název operace	Nákres	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar 80x25x110mm	-----	Pásová pila	Pilový pás

2	Frézovat obvodové plochy na rozměr 75x100mm		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
3	Frézovat horní a spodní plochu (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
4	Vyvrtat díry pro závit M8 (dle výkresové dokumentace)		Stojanová vrtačka	Vrták do kovů průměr 6,8mm
5	Okružovacím frézováním zhotovit závit M8x1,25		CNC obráběcí stroj	Krátký tvářecí závitník M8 s přímou drážkou

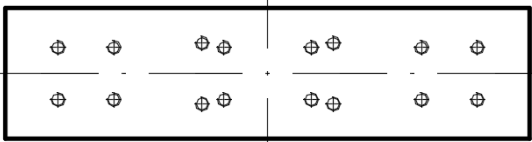

Základní deska (obr.39) vychází z polotovaru PLO80x25x310 - ČSN 42 6522 - 12020. Dílec je po upnutí na frézku obvodově ofrézován válcovou frézou na požadované tvarové rozměry 75x23x300[mm]. Dle požadavků výkresové dokumentace je na stojanové vrtačce předvrtáno šestnáct průchozích děr vrtákem o průměru 6,8mm. Poté pomocí záhlubníku zhotovíme požadovaný náběh pro šroub M8. Do těchto děr je následně tvářecím závitníkem zhotoven závit M8x1,25 po celé délce díry.

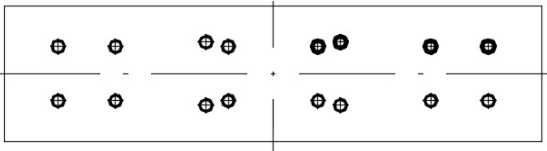
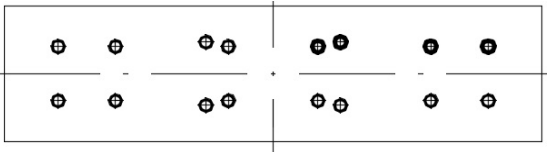


Obr. 33- 3D model základní desky

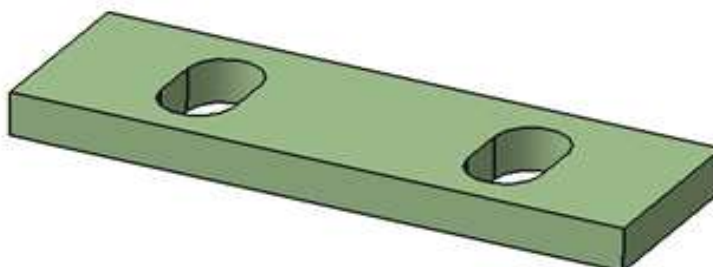
Je nutné dodržet geometrickou toleranci tvaru - rovinnost a to pro hodnotu 0,02mm. Větší nepřesnosti při výrobě toho dílce by mohly být přeneseny na další části přípravku. To by mohlo způsobit nesprávné upnutí opěrných desek a tudíž i zkušebního tělesa, což by mohlo vést k výše uvedeným nepříznivým následkům. Není třeba vyrábět tento díl vícekrát, pokud to nebude nutné pro dodržení předepsaných hodnot výkresovou dokumentací.

Tab. 4 Technologický postup výroby základní desky

Číslo operace	Název operace	Nákres	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar 80x25x310mm	-----	Pásová pila	Pilový pás
2	Frézovat obvodové plochy na rozměr 75x100mm		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
3	Frézovat horní a spodní plochu (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm

4	Vyvtat díry pro závit M8 (dle výkresové dokumentace)		Stojanová vrtačka	Vrták do kovů průměr 6,8mm
7	Okružovacím frézováním zhotovit závit M8x1,25		CNC obráběcí stroj	Krátký tvářecí závitník M8 s přímou drážkou

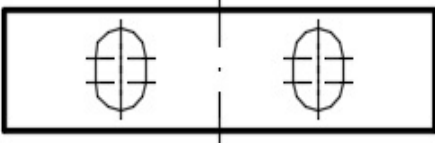

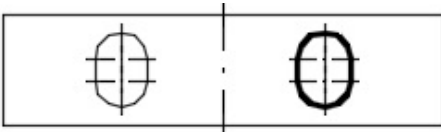
Materiálem pro výrobu spodní upínací desky (obr.40) je normovaný polotovar PLO36x10x110- ČSN 42 6522 - 12020. Dílec je po upnutí na pracovní stůl frézky za pomoci válcové frézy obvodově ofrézován na požadované tvarové rozměry 32x8x100[mm], aby bylo docíleno žádoucí drsnosti povrchu a funkčních rozměrů. Dle výkresové dokumentace jsou za pomoc kotoučové frézy o průměru 12mm zhotoveny dvě průchozí drážky dlouhé 21mm. Tyto dílce jsou pro funkčnost přípravku zapotřebí dva.



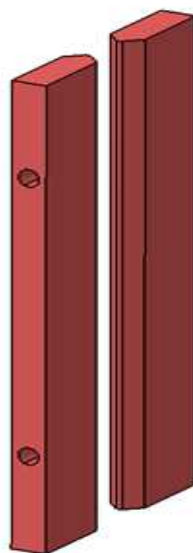
Obr. 34- 3D model spodní upínací desky

Tab. 5 Technologický postup výroby spodní upínací desky

Číslo operace	Název operace	Nákres	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar 36x10x110mm	-----	Pásová pila	Pilový pás

2	Frézovat obvodové plochy na rozměr 32x100mm		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
3	Frézovat horní a spodní plochu (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
4	Frézovat dvě průchozí drážky (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Kotoučová fréza průměr 12mm

Vodící deska (obr.41) vychází z polotovaru PLO25x10x130 - ČSN 42 6522 - 12020. Po upnutí na stůl frézky je polotovar ofrézován na požadované tvarové rozměry 25x8x128[mm].


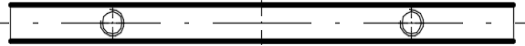

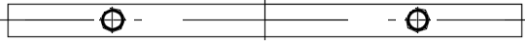
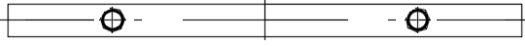


Obr. 35 - 3D model vodících desky

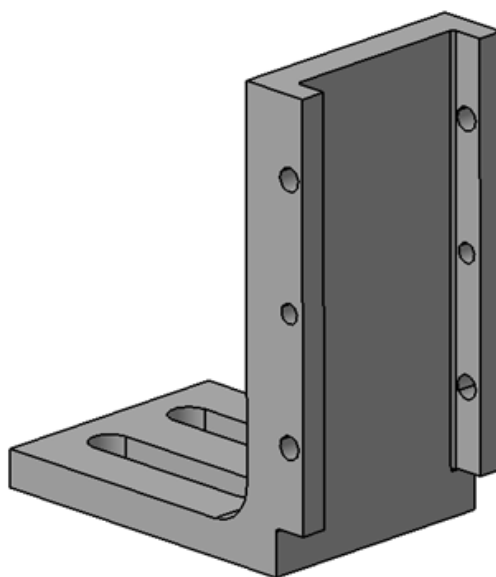
Následně je přední plocha ofrézována dle výkresové dokumentace tak, aby vznikly dvě plochy sdílející zaoblení o poloměru 1mm a tím vznikne potřebná styčná plocha pro vedení zkušebního tělesa. Po umístění tohoto dílce na stojanovou vrtačku jsou do zadní stěny vyvrtány dvě díry vrtákem o průměru 5mm a to do hloubky 10mm. Poté pomocí záhlubníku zho-

tovíme požadovaný náběh pro šroub M6. Do těchto děr je následně tvářecím závitníkem zhotoven závit M6x1,0. Z konstrukčního řešení přípravku vyplývá nutnost výroby čtyř takhle definovaných dílů.

Tab. 6 Technologický postup výroby vodících desek

Číslo operace	Název operace	Nákres	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovár 25x10x130 mm	-----	Pásová pila	Pilový pás
2	Frézovat obvodové plochy na rozměr 25x128 mm		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
3	Frézovat horní a spodní plochu (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
4	Frézovat profil se zaoblením 1 mm (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
5	Vyvrtat díry pro závit M6 do hloubky 10mm		Stojanová vrtačka	Vrták do kovů průměr 5mm
6	Okružovacím frézováním zhotovit závit M6		CNC obráběcí stroj	Krátký tvářecí závitník M6 s přímou drážkou

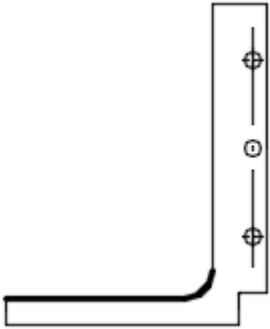
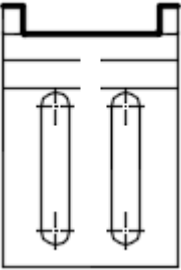
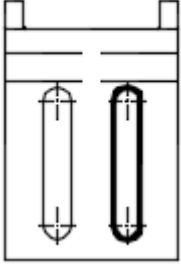
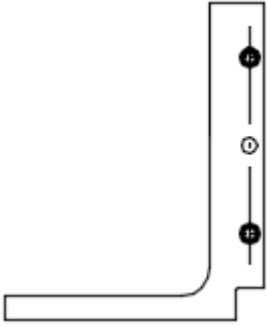
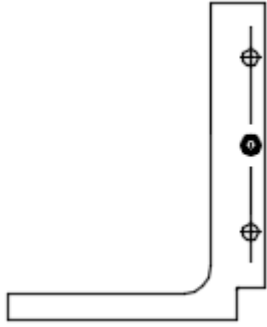
Pro výrobu opěrné desky (obr.42) je zapotřebí nenormovaného polotovaru ve tvaru nerovnoramenného písmene L o délce ramen 110mm a 150mm a tloušťce 23mm. Frézováním spodního (kratšího) ramene je docíleno tloušťky 11mm a přechodového zaoblení o poloměru 12mm umístěného mezi kratším a delším ramenem dílu. Následně je ofrézována i strana delšího ramene, tak aby vznikli dvě požadované lišty. Poté jsou kotoučovou frézou o průměru 12mm vyrobeny v kratším rameni dvě rovnoběžné drážky o délce 66mm. Následně jsou po upevnění na stojanovou vrtačku vyvrtány vždy dvě průchozí díry na každé liště vrtákem o průměru 7mm. Poté je mezi těmito dírami ve vzdálenosti 62mm od horního okraje vyvrtána díra vrtákem o průměru 6,8mm a to na každé jednotlivé liště. Do těchto děr je následně záhlubníkem zhotoven náběh pro šroub M8. V posledním kroku jsou tvářecím závitníkem tyto díry opatřeny závitem M8x1,25. Pro správné držení zkušebního tělesa je nutné dodržet kolmost ramen tohoto dílu a to pro hodnotu 0,2mm.



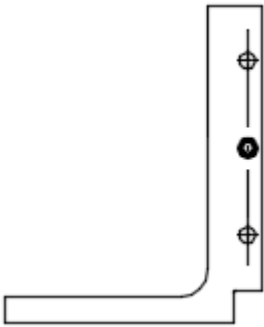
Obr. 36- 3D model opěrné desky

Tab. 7 Technologický postup výroby opěrné desky

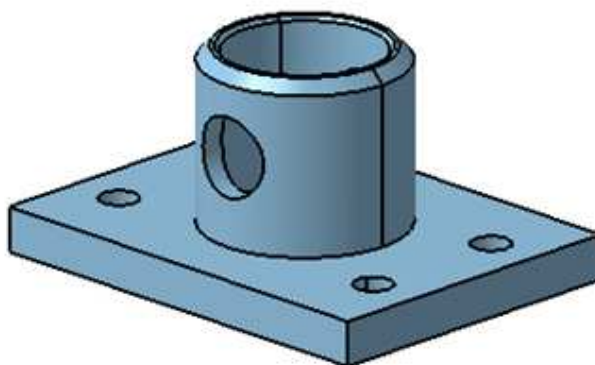
Číslo operace	Název operace	Nákres	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar nerovnoramenné "L" 110x150x23mm	-----	Pásová pila	Pilový pás

2	Frézovat profil se zaoblením 12mm z horní strany kratšího ramena		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
3	Frézovat profil na delším rameni (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
4	Frézovat dvě průchozí drážky do kratšího ramene dílce (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Kotoučová fréza průměr 12mm
5	Vyvrtat průchozí díry o průměru 7mm do svislých lišt delšího ramene (dle výkresové dokumentace)		Stojanová vrtačka	Vrták do kovů průměr 7mm
6	Vyvrtat díry pro závit M6 do svislých lišt delšího ramene (dle výkresové dokumentace)		Stojanová vrtačka	Vrták do kovů průměr 5mm



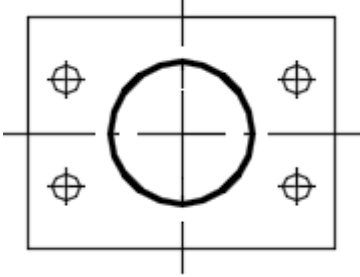
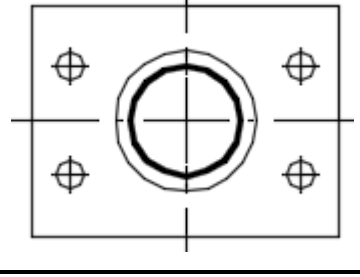
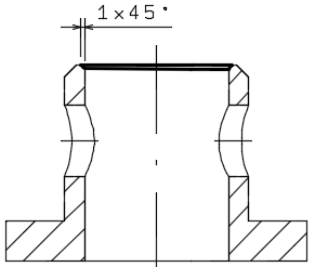
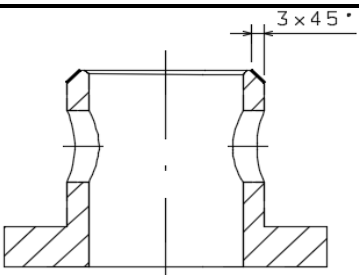
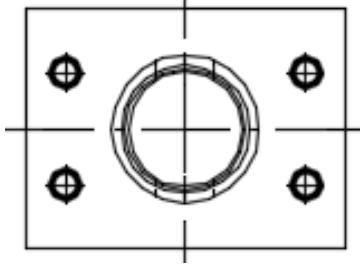
7	Okružovacím frézováním zhotovit závit M6x1		CNC obráběcí stroj	Krátký tvářecí závitník M6 s přímou drážkou
---	--	---	--------------------	---

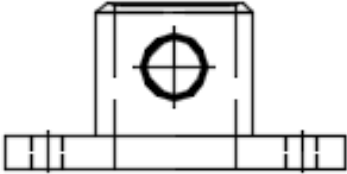
Pro výrobu upínacího dílce (obr. 43) sloužícího k upnutí na zkušební stroj je zapotřebí normovaný polotovar PLO75x50x110 - ČSN 42 6522 - 12020. Polotovar je upnut na pracovní stůl frézky a je ofrézován, tak aby dle výkresové dokumentace vznikla ve středu dílce válcová plocha o průměru 46mm s obdélníkovou podstavou o výšce 10mm. Ve středu této válcové části je vyfrézována průchozí díra o průměru 35,9mm sloužící jako otvor pro spojovací čep zkušebního stroje. Následně je zhotoveno vnitřní sražení hrany 1x45° a poté vnější sražení o rozměrech 3x45°. Poté je tento dílec upnut na stojanovou vrtačku kde jsou do podstavky vyvrtány čtyři průchozí díry vrtákem o průměru 9mm. Dále je vyvrtána průchozí díra o průměru 18mm v ose válcové plochy vzdálená 19mm od horního okraje. Je nutné zajistit aby vzniklé díry byly vzájemně souosé, z důvodu zabránění případnému křížení po vložení pojistného kolíku do těchto otvorů. Vyrobit je zapotřebí dva tyto díly a to k upnutí horní a také spodní části přípravku na zkušební stroj. Pro zjednodušení výroby byl horní i spodní upínací díl přípravku konstruován stejně.



Obr. 37- 3D model upínacího dílce

Tab. 8 Technologický postup výroby upínacího dílce

Číslo operace	Název operace	Nákres	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovary 75x50x110mm	-----	Pásová pila	Pilový pás
2	Frézovat válcový profil ve středu dílce		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
3	Frézovat uvnitř této válcové plochy průchozí díru 35,9mm		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
4	Frézovat vnitřní sražení hrany 1x45 (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
5	Frézovat vnější sražení hrany 3x45 (dle výkresové dokumentace)		CNC obráběcí stroj	Válcová fréza průměr 12mm
6	Vyvrtat do podstavy čtyři průchozí díry o průměru 9mm		Stojanová vrtačka	Vrták do kovů průměr 9mm

7	Vyvrtat průchozí díru o průměru 18mm kolmo na válcovou plochu	 A technical drawing of a cylindrical workpiece. It features a central hole with a crosshair symbol. A vertical slot is cut into the side of the cylinder. The drawing is shown in a perspective view.	Stojanová vrtačka	Vrták do kovů průměr 18mm
---	---	--	-------------------	---------------------------

Tento příklad zjednodušeného technologického postupu je jednou z variant možnosti výroby tohoto přípravku. Dnešní doba disponuje velkým množstvím technologií a výrobních strojů. Zajisté je možné přípravek vyrobit i jiným způsobem nebo za použití jiných strojů či nástrojů. Nejdůležitější podmínkou je ale za použití kterékoliv výrobní technologie zaručit splnění požadavků výrobních výkresů a následně podmínek nezbytných pro provedení zkoušky, ke které je přípravek konstruován a sestrojen.

## ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem přípravku pro zkoušku stlačením po impaktu u kompozitních materiálů. V teoretické části práce jsou charakterizovány dílčí složky kompozitních materiálu a popis vybraných vlastností. Následně jsou uvedeny možnosti výroby jednotlivých kompozitních materiálů. V posledním oddíle se teoretická část zabývá mechanickými zkouškami těchto materiálů. Důraz je kladen i na rázové zkoušky na padostroji a poté podrobně na zkoušku stlačením po impaktu.

Praktická část stručně seznamuje s univerzálním zkušebním strojem Zwick 1456 a padostrojem Zwick Roell HIT230F, které jsou vhodné pro uskutečnění zkoušky stlačením po impaktu u kompozitních materiálů. V této části byly dále zhotoveny 3D modely jednotlivých částí přípravku dle normy ISO 18352 a následně byl vytvořen model sestavy celého přípravku. Dále byla zhotovena i kompletní sestava 3D modelu navrhovaného přípravku. Tyto modely jsou součástí práce a jsou přístupné na přiloženém CD. Následně bylo vytvořeno sedm výrobních výkresů jednotlivých součástí, jeden výkres sestavy přípravku a také náležitý kusovník sestavy. Tyto práce byly prováděny především v prostředí programu CATIA V5R19. Konstrukce byla navržena s ohledem na rozměry upínacího zařízení univerzálního zkušebního stroje a také na rozměry zkušebních těles. Návrh je cíleně směřován ke zjednodušení výrobního procesu jednotlivých dílců, sestavení přípravku, bezpečné manipulaci s přípravkem a zkušebním tělesem a sjednocení použitých spojovacích materiálů. Záměrem byla i eliminace možnosti zkreslení dokonce až znehodnocení zkoušky z důvodů špatného upnutí zkušebního tělesa do přípravku. Z těchto důvodů obsahuje navrhovaný přípravek jiný systém upnutí zkušebního tělesa. Pro výrobu byly uvažovány především normalizované díly a polotovary, které by zjednodušily a zlevnily výrobní proces. Výroba je usnadněna také použitím pouze několika obráběcích strojů a nástrojů, kdy většinu dílu lze vyrobit za použití strojů stejných. Praktická část dále obsahuje i volbu materiálu vhodného pro tuto konstrukci. Jedním z cílů práce je technologický postup výroby částí přípravku. Tento postup je vyhotoven zjednodušeně pro lepší přehlednost nezbytných kroků pro výrobu všech dílů. Takto vyrobený přípravek je cíleně navrženou konstrukcí sloužící k provedení zkoušky stlačením po impaktu na stroji Zwick 1456.

Přípravek představen v této práci rozšíří možnosti testování kompozitních materiálů v Ústavu výrobního inženýrství a bude sloužit k vědecko-technickým účelům v laboratořích Fakulty technologické.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.4
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4
- [3] KOŘÍNEK, Zdeněk. Kompozity. In: KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. 2010 [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: [www.volny.cz/zkorinek/](http://www.volny.cz/zkorinek/)
- [4] BS ISO 18352. *Carbon-fibre-reinforced plastics-Determination of compression-after-impact properties at a specifies impact-energy level*. ICS 83.120,2009
- [5] DIN EN 6038, *Luft - und Raumfahrt - Faserverstärkte Kunststoffe - Prüfverfahren - Bestimmung der Restdruckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung: Deutsche und englische Fassung FprEN 6038:2014*. ICS 49.025.40, Berlin: DIN Deutsche Institut für Normung, 2014
- [6] ASTM D7137/D7137M - 12, *Standart Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates*. West Conshocken: American Society for Testing and Materials, 2012
- [7] SANCHEZ-SAEZ, E. BARBERO, R. ZAERA. *Compression after impact of thin composite laminates*, Madrid, Spain, Carlos III University of Madrid, 2005
- [8] MIKULA, Martin. *Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken*. Brno, Vysoké učení technické v Brně: Fakulta strojního inženýrství. 2012
- [9] LOSERTOVOÁ, Monika. *Progresivní materiály: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2575-5.
- [10] MATHEWS, F. L.; RAWLINGS, R.D. *Composite materials: engineering and science*. USA : Wood head publishing Limited, 2003
- [11] DAĐOUREK Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich využití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007.
- [12] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [13] Carbon fiber glass [online]. [vit. 2014-02-28]. Dostupné z: <http://www.moldedfiberglass.com/processes/filament-winding-process>

- [14] Havel Composites [online]. [vit. 2016-04-10]. Dostupné z:  
<http://www.havelcomposites.com>
- [15] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Brno, 2008. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/wwwbase/priloha.php dpid 52474>. Inovace VŠ oborů strojního zaměření. VUT Brno.
- [16] Šuba, O.: *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*, VUT v Čs. Redakci VN MON, 1988
- [17] Pružnost. *Wikipedie: otevřená encyklopedie*. [online]. 2001- [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Pružnost>
- [18] MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 3rd ed., [expanded and rev. ed.]. Boca Raton, FL: CRC Press, c2008. ISBN 0849342058.
- [19] MOTYČKA, M., *Technologie výroby kompozitních materiálů*, Západočeská univerzita v Plzni, 2007
- [20] HLUCHÝ, Miroslav a Josef BENEŠ. *Strojírenská technologie*. Vyd. 2. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986, 248 s.
- [21] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. Vyd. 5., upr. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4
- [22] ČSN EN ISO 6603 - 1, *Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázové namáhání - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*, ICS 83.080.01, Litvínov, Český normalizační institut, 2000.
- [23] ČSN EN ISO 6603 - 2, *Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázové namáhání - Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška*, ICS 83.080.01, Litvínov, Český normalizační institut, 2000.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

b	Šířka zkušebního tělesa
D	Tloušťka vzorku
E	Vynaložená energie
$E_C$	Specifikovaná hodnota energie
$E_{CAI}$	Modul pružnosti při zkoušce stlačením po impaktu
$E_N$	Požadovaná energie nárazu
$F_{max}$	Největší zatěžující síla
$F_1$	Tlaková síla zatížení při hodnotě $\varepsilon_1$
$F_2$	Tlaková síla zatížení při hodnotě $\varepsilon_2$
g	Gravitační zrychlení
$G_k$	Hmotnost kladiva
$h_0$	Počáteční poloha
h	Výška
H	Konečná poloha
KCU	Vrubová houževnatost
KU	Nárazová práce
$m_z$	Hmotnost závaží
$S_0$	Původní průřez zkušebního tělesa
t	Tloušťka zkušebního tělesa
v	Okamžitá rychlost pádu tělesa
$\varepsilon_{1,2}$	Smluvní hodnota pnutí
$\sigma_{CAI}$	Pevnost zkušebního tělesa při zkoušce stlačením po impaktu

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 - Viskozita termosetů a termoplastů při jejich prosycování [1].....	14
Obr. 2- Rozdělení podle geometrického tvaru výztuže [2].....	15
Obr. 3- Typy vazeb vyztužujících tkanin [8] .....	21
Obr. 4- Schéma ručního kladení [19].....	22
Obr. 5- Schéma technologie stříkání [14] .....	23
Obr. 6- Vakuové (nízkotlaké) prosycování [1] .....	23
Obr. 7- Schéma technologie lisování pomocí vakua [14].....	24
Obr. 8- Schéma autoklávu [1] .....	25
Obr. 9- Schéma technologie navíjení [13] .....	26
Obr. 10- Schéma tažení [19] .....	26
Obr. 11- Zkušební těleso pro zkoušku tahem [1].....	28
Obr. 12- Zkušební těleso před a po zkoušce tlakem [17].....	29
Obr. 13- Metoda tříbodového ohybu [15] .....	30
Obr. 14- Schéma zkoušky krutem na trubce [1] .....	30
Obr. 17 - Průběh poškozování u materiálů homogenních a vláknitých [1] .....	31
Obr. 18- Schéma zkoušky na Charpyho kladivu [17].....	32
Obr. 19- Padostroj a zkušební vzorky po provedené zkoušce [14].....	33
Obr. 20- Schéma Schenckova přístroje pro zkoušku opětovným namáháním [17].....	35
Obr. 21- Příklad Wöhlerovy křivky [1].....	36
Obr. 22- Zkouška stlačením po impaktu [7] .....	39
Obr. 23- Průměrné hodnoty zbytkové pevnosti [7].....	41
Obr. 24- Křivka absorbované energie u tří druhů laminátů [7].....	42
Obr. 25- Univerzální zkušební stroj Zwick 1456.....	45
Obr. 26- Schéma upínacího zařízení stroje .....	46
Obr. 27- Padostroj značky Zwick Roell HIT230F .....	47
Obr. 28- Rozměry zkušebních těles v milimetrech.....	49
Obr. 29- 3D model přípravku dle normy ISO 18352 .....	50
Obr. 30- 3D model navrhovaného přípravku .....	52
Obr. 31- 3D model horní části přípravku .....	53
Obr. 32- 3D model spodní části přípravku.....	54
Obr. 33- 3D model horní upínací desky.....	56
Obr. 34- 3D model kotevní desky .....	57



---

Obr. 35- 3D model základní desky .....	59
Obr. 36- 3D model spodní upínací desky.....	60
Obr. 37 - 3D model vodících desky .....	61
Obr. 38- 3D model opěrné desky .....	63
Obr. 39- 3D model upínacího dílce.....	65

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Porovnání viskozit při typických zpracovatelských teplotách [1] .....	13
Tab. 2 Technologický postup výroby horní upínací desky .....	56
Tab. 3 Technologický postup výroby kotevní desky .....	57
Tab. 4 Technologický postup výroby základní desky .....	59
Tab. 5 Technologický postup výroby spodní upínací desky .....	60
Tab. 6 Technologický postup výroby vodících desek .....	62
Tab. 7 Technologický postup výroby opěrné desky .....	63
Tab. 8 Technologický postup výroby upínacího dílce .....	66

## SEZNAM PŘÍLOH

PI Kopie práce včetně 3D modelů na CD

