

# **Studium pevnosti svařovaných spojů z termoplastů**

**Bc. Ondřej Dlouhý**

---

**Diplomová práce**

**2010**



**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta technologická**

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej DLOUHÝ**  
Osobní číslo: **T080379**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Studium pevnosti svařovaných spojů z termoplastů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na dané téma
2. Provedte experimentální svařování různých polymerních materiálů vybranou technologií
3. Provedte experimentální vyšetření pevnosti spojů
4. Sestavte FEM modelové studie spojů a srovnajte s výsledky experimentů



Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucí práce**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **19. února 2010**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2010**

Ve Zlíně dne 19. ledna 2010

  
doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: ..... DLOUHÝ ONDŘEJ .....

Obor: ..... KTZ .....

## 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 užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně ..... 27.8.2010 .....

.....  
.....

<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 nahlázení 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 dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího 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**

Tato diplomová práce řeší problematiku pevnosti svařovaných spojů z termoplastů. V teoretické části popisuje technologii svařování a její dva typy, svařování laserem a ultrazvukem. Dále popisuje použité materiály a stroje pro praktickou část a také nás seznamuje s firmou PLASTIKA a.s., která se podílela na výrobě zkušebních těles. Praktická část nás seznamuje s popisem a výrobou zkušebních vzorků a průběhem studia pevnosti svarových spojů.

Klíčová slova: svarový spoj, polyethylen, trhací zkouška, pevnost, ultrazvukové svařování

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with problems of strength of welded joints from thermoplastics. In theoretical part diploma thesis describes technology of welding and her two tips, laser welding and ultrasonic welding. Thesis describes also materials and machines used to an practical part and acquaints us with PLASTIKA a.s. company, they involve in production of experimental solids. Practical part describes process of study of strength of welded joints.

Keywords: welded joint, polyethylen, blasting test, strength, ultrasonics welding

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucím diplomové práce paní Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. a panu doc. Ing. Oldřichu Šubovi CSc. za cenné zkušenosti, rady a připomínky, které pomohly ke vzniku této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Janu Volejníkovi a celé firmě PLASTIKA a.s. se sídlem v Kroměříži za cenné rady, spolupráci a za poskytnuté prostory pro provedení experimentu.

V neposlední řadě patří mé poděkování také rodině, která mě po celou dobu studia výrazně podporovala.

# OBSAH

ÚVOD .....	9
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
<b>1 SVAŘOVÁNÍ .....</b>	<b>11</b>
1.1 VÝHODY A NEVÝHODY SVAŘOVÁNÍ .....	11
1.2 UŽITÍ SVAŘOVACÍCH METOD V PRAXI .....	11
<b>2 METODY PRO SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ .....</b>	<b>12</b>
2.1 SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ LASEREM .....	12
2.1.1 Lasery pro svařování termoplastů .....	12
2.1.2 Podstata procesu svařování termoplastů laserem .....	14
2.1.2.1 Propustné svařování .....	15
2.1.2.2 Svařování na tupo .....	17
2.2 SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ ULTRAZVUKEM .....	17
2.2.1 Podstata procesu svařování ultrazvukem .....	18
2.2.2 Ultrazvukové svařování ve vzdáleném a blízkém poli .....	19
<b>3 PŘEHLED POUŽITÝCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>24</b>
3.1 POLYPROPYLEN (PP) .....	24
3.2 MATRICE .....	25
3.2.1 Polymerní matrice .....	25
3.2.2 Kovové a keramické matrice .....	27
3.3 Skleněná vlákna .....	29
3.3.1 Historie skleněných vláken .....	30



3.3.2	Současnost a budoucnost skleněných vláken .....	30
3.3.3	Vstřikování vláknny plněných termoplastů .....	31
<b>4</b>	<b>POUŽITÉ STROJE PŘI VÝROBĚ A TESTOVÁNÍ SVARŮ .....</b>	<b>32</b>
4.1	SVAŘOVACÍ ZAŘÍZENÍ BRANSON .....	32
4.2	ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICKNPRO TRHACÍ ZKOUŠKU .....	34
<b>5</b>	<b>FIRMA PLASTIKA A.S. ....</b>	<b>36</b>
5.1	ZKUŠENOSTI FIRMY A ZÁKLADNÍ ÚDAJE .....	36
5.2	TECHNOLOGIE .....	37
5.2.1	Vstřikování plastů .....	37
5.2.2	Montáže .....	38
5.2.3	Svařování ultrazvukem .....	39
5.2.4	Další technologie .....	40
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>OPTIMALIZACE PARAMETRŮ EXPERIMENTÁLNÍHO PROCESU .....</b>	<b>46</b>
6.1	CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI PRÁCE .....	46
6.2	PŘÍPRAVA A POŽADAVKY.....	46
6.3	ZKUŠEBNÍ MATERIÁLY .....	46
6.4	ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA .....	47
<b>7</b>	<b>FEM ANALÝZA .....</b>	<b>48</b>
7.1	PŘÍPRAVA FEM ANALÝZY .....	48
7.2	VÝSLEDKY FEM ANALÝZY .....	49

7.2.1	Jednoosé napětí v ose x .....	49
7.2.2	Jednoosé napětí v ose y .....	52
7.2.3	Dvouosé napětí v osách x, y .....	54
7.2.4	Von Missesovo srovnávací napětí .....	57
<b>8</b>	<b>TRHACÍ ZKOUŠKA .....</b>	<b>59</b>
8.1	PŘÍPRAVA A PRŮBĚH TRHACÍ ZKOUŠKY .....	59
8.2	VÝSLEDKY TRHACÍ ZKOUŠKY .....	59
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>78</b>

## ÚVOD

Plasty a jejich aplikace zasahují v současné době význačně do našeho života a tvoří jeho nedílnou součást. Vzrůst jejich výroby a spotřeby velmi podstatně převyšuje podobné ukazatele u klasických materiálů, jako jsou například kovové a nekovové materiály.

Rostoucí počet dílů z plastu si žádá nutnost jejich rychlého spojování. Pokud nebudeme brát v úvahu metodu lepení, tak hlavní oblastí spojování je svařování, které je aplikovatelné pro řadu plastických materiálů. Stejně tak jako u kovů, i zde dochází ke spojení v důsledku působení teploty. V průběhu několika let byly vyvinuty různé metody zahřívání (tavení) svařované oblasti. Mezi tyto metody patří například:

- svařování laserem
- ultrazvukové svařování
- rotační (třecí) svařování

Žádná z těchto metod není dokonale aplikovatelná na všechny materiály a každá má své výhody a nevýhody.

Nejranější příklady technologie svařování pocházejí už z doby bronzové. V době železné se Egypťané naučili svařovat železo, což dokládá množství takto vyrobených železných nástrojů. Ve středověku se pak vyvinulo tzv. kovářské svařování. Svařování, tak jak jej známe dnes, bylo objeveno až v 19. st. n.l., nejprve to bylo svařování a řezání plynem podmíněné objevením acetylénu v roce 1836, svařování elektrickým obloukem zase bylo podmíněno vynálezem elektrického generátoru. První automatické svařování pak bylo představeno v roce 1920. V současné době pak byly vynalezeny nejmodernější metody svařování, jako je například svařování ultrazvukem a také laserem.

# I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1. SVAŘOVÁNÍ

Svařování je proces, který slouží k vytvoření trvalého, nerozebíratelného spoje dvou a více materiálů. Obecným požadavkem na proces svařování je vytvoření takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik meziatomárních vazeb. Protože prakticky není možné dosáhnout spojení na úrovni meziatomových vazeb za okolních podmínek (běžná teplota, tlak), kdy je termodynamický stav materiálů stabilní resp. metastabilní, je nutné tento termodynamický stav změnit. Proto je při svařování nutné působit buď tlakem, teplem nebo oběma faktory najednou. Obecně platí závislost, že čím větší tlak působí, tím méně je potřeba vnést teplo a obráceně. Tlakové svařování je označením svařování

za působení převážně tlaku a tavné při působení tepla. Svařovat lze kovové i nekovové materiály, materiály podobných i různých vlastností. Ale pro každý typ spoje je vhodná i jiná metoda svařování. Při svařování dojde vždy ke změně fyzikálních nebo mechanických vlastností základního materiálu (spojovaného) v okolí spoje. Jiné metody nerozebíratelného spoje jsou např. pájení nebo lepení.[13]

### 1.1. Výhody a nevýhody svařování

Mezi hlavní výhody svařovaného spoje patří dlouhodobá trvanlivost, dále pak jsou mechanické vlastnosti spoje často stejné nebo lepší v porovnání se základním materiálem, a také poměrně nízká spotřeba materiálu při procesu.

Mezi hlavní nevýhody lze považovat nerozebíratelnost spoje, vznik různých vnitřních pnutí a deformací a také změnu vlastností a struktury materiálu v okolí spoje.

### 1.2. Užití svařovacích metod v praxi

Aby se plastové součásti mohly spojit, vyžaduje většina svařovacích metod vytvoření vysoké lokální teploty. Typ zdroje ohřevu označuje často svařovací metodu, například svařování plamenem, obloukové svařování, apod.

Jedním z hlavních problémů je to, že plasty reagují s atmosférou rychleji, když stoupá jejich teplota. Metody, jak chránit plasty před atmosférou, jsou druhým nejdůležitějším rozlišujícím znakem.

Některé metody byly vyvinuty pro velmi konkrétní aplikace, zatímco jiné jsou flexibilní a pokrývají široký sortiment svářečských prací. Ačkoliv se svařování užívá zásadně pro spojování stejných i nesejných plastových částí, užívá se stále více k opravám a renovacím opotřebovaných nebo poškozených součástí.

Jednotlivá zařízení pro svařování plastových dílců se mohou lišit co do velikosti a komplexnosti.

## 2. METODY PRO SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ

Technologie výroby termoplastů, kam patří rozličné způsoby spojování, prochází neustálým vývojem. Patrné je to i při pozornějším sledování svařovaných míst, kde po rozličných dosavadních postupech svařování horkým tělesem nebo horkým plynem dnes přicházejí ke slovu různé netradiční technologie, jako je svařování ultrazvukem, vysokofrekvenční svařování nebo v poslední době i svařování laserem, které se kromě jiného vyznačuje už z pouhého laického pohledu naprosto neporušeným povrchem spojovaných dílů.

### 2.1. Svařování termoplastů laserem

#### 2.1.1. Lasery pro svařování termoplastů

Slovo LASER pochází z angličtiny a je složeno z počátečních písmen anglického názvu popisujícího jeho funkci, tedy **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, což v překladu do češtiny znamená Zesílení světla pomocí vynucené emise záření. Laser se označuje také jako Kvantový generátor světla, ale toto označení ustoupilo zažitéjšímu, rychleji vyslovitelnému pojmu laser. Od klasického světla se laserové světlo liší tím, že je monochromatické (jednobarevné), koherentní (uspořádané) a má malou divergenci (rozbíhavost). Z definice vyplývá, že laser je zařízení, které přeměňuje dodávanou energii na laserové světlo. Energie může být dodávaná například pomocí světla výbojky (opticky), dále pak chemicky, elektricky, atd. Konstrukce samotných laserů můžou být různorodé, záleží hlavně na druhu laseru, na jeho konstrukci a také na jeho použití. [11]



*Obr. 1. Rozdíl mezi světlem vyzařovaným laserem a žárovkou*

Použití různých typů laseru se řídí druhem použitého aktivního prostředí laseru a také druhem buzení. V oblasti svařování plastů se využívá hlavně oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) - plyný laser, dále pak Nd:YAG (Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat)- pevnolátkový laser a také vysoce-výkonový diodový laser. Tyto typy laserů mohou být použity jak v časově konstantním vyzařování (cw - continuous wave), tak v pulzním režimu s emitovanými krátkými pulzy.

V tabulce (Tab. 1.) jsou srovnány tři typy laserů využívané při laserovém svařování podle významných charakteristických hodnot. Významný rozdíl mezi danými typy laserů je ve vlnové délce emitovaného záření. Jak u Nd:YAG tak i u vysoce-výkonového diodového laseru je emitováno záření blízké infračervené oblasti při  $1,064 \mu\text{m}$ , příp.  $0,8 - 1 \mu\text{m}$ , u  $\text{CO}_2$  laseru leží hodnota vlnové délky řádově výše, na  $10,6 \mu\text{m}$ . Tento rozdíl má výrazný vliv na absorpci paprsku ve svařovaném plastu. Laserové světlo (svazek) Nd:YAG a paprsky vysoce-výkonového diodového laseru jsou vedeny optickým kabelem.[12]

vlastnosti / typ laseru	CO <sub>2</sub> – laser	Nd:YAG – laser	vysocovýkonný diodový laser
vlnová délka [μm]	10,6	1,064	0,8-1,0
účinnost [%]	5-10	1-3	30-40
velikost laserové hlavy [dm <sup>3</sup> ]	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	1
střední výstupní výkon [kW]	do 30	do 3	do 2
střední intenzita fokusovaných paprsků [W/cm <sup>2</sup> ]	10 <sup>6...30</sup>	10 <sup>5...9</sup>	10 <sup>3...5</sup>
cena [\$/W]	150-300	200-600	100-300
interval údržby [h]	1000	500	2000-10000

Tab.1. Srovnávací tabulka laserů pro svařování plastů

Velké rozdíly mezi lasery jsou i ve stupni účinnosti. Zatímco u Nd:YAG musí být chlazením odvedeno 97-99 % přivedené energie, tzn. účinnost je 1-3 %, u CO<sub>2</sub> laseru leží hodnota účinnosti na 5 - 10 % a u vysoce-výkonného diodového laseru dokonce na 30 - 40 %. Naproti tomu leží dosažitelná hodnota intenzity záření (energie vztažená na jednotku plochy). Vysoce-výkonného diodového laseru má hodnotu intenzity znatelně pod hodnotami dosažitelnými Nd:YAG nebo CO<sub>2</sub> laserem. Minimální dosažitelná stopa vysocevýkonného diodového laseru je elipsa o rozměrech obou hlavních průměrů (0,25 mm a 0,5 mm), např. u Nd:YAG – laseru je nastavitelný minimální průměr ohniska několik málo μm. Méně dobrá schopnost fokusování emitovaného záření vysoce-výkonného diodového laseru není u svařování plastů nevýhodou. Obecně (ve srovnání s mnoha jinými laserovými technologiemi) jsou zde používány větší průměry záření.[12]

### 2.1.2. Podstata procesu svařování termoplastů laserem

Při svařování plastů laserem dochází k zahřívání a plastifikaci svařované oblasti díky absorpci infračervených paprsků do materiálu. Absorpce se liší podle použitého typu laseru, podle druhu materiálu a podle jeho přísad.

Mezi hlavní výhody laserového svařování plastů patří:



- žádné kmitání spojovaných částí
- žádný brusný otěr
- žádné problémy s adhezí
- místně omezený přívod tepla

Za dané chemické kompatibility je možné spolu svařovat různé plasty. Pevnost svaru vyplývá ze souhrnu veličin: teplota, čas teplotního účinku, tlak a případně také přetok taveniny.[12]

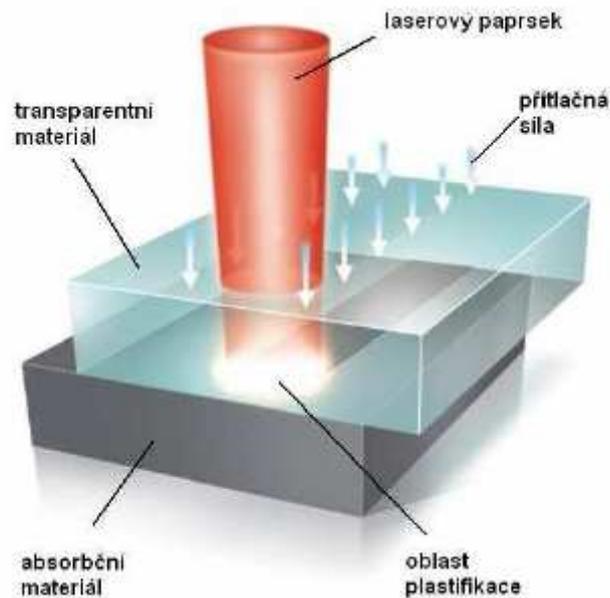
Pro svařování plastů laserem rozeznáváme dvě procesní varianty:

- transmisivní (propustné) svařování
- svařování na tupo

#### **2.1.2.1. Propustné svařování**

Propustné neboli transmisivní svařování je používanější metoda oproti metodě svařování na tupo. Transmisivním svařování mohou být spojovány termoplasty, které mají rozdílné absorpční vlastnosti.

Obě spojované součásti jsou před svařením přivedeny do kontaktu, laserový paprsek pronikne transparentní spojovanou součástí a v absorpční součásti je přeměněn v teplo (Obr.2.). Vedením tepla se transparentní součást rovněž ohřeje a plastifikuje se tak, že dojde ke spojení. Teplo takhle vznikající bude tepelnou vodivostí transportováno, jak do hlubších vrstev absorpční spojované součásti, tak do součásti pro laserový paprsek transparentní. Podle druhu zařízení musí být použit buď na začátku nebo nejpozději ke konci svařování přítlačný tlak v celé spojované oblasti. Absorpce dojde ke zvýšení teploty ve spojované oblasti. Vznikající tavenina zlepšuje tepelný kontakt mezi spojovanými částmi a ovlivňuje objemovou roztažností vnitřní spojovací tlak.[9]



Obr.2. Princip transmisivního svařování

Transmisivní svařování se dále dělí na několik metod, jsou to:

- **obrysově svařování** (Contour Welding) - metoda je založená na kopírování svařovací kontury laserovým paprskem, kde se vedení paprsku se uskutečňuje prostřednictvím optického vlákna mezi laserovým generátorem a optikou laseru
- **kvazi-simultánní svařování** (Quasi-Simultaneous Welding) - laserový paprsek je veden v optice pomocí skenovacích zrcadel vysokou pracovní rychlostí podél svařované kontury
- **simultánní svařování s více diodami** (Simultaneous Welding) - stejně jako u předchozího kvazi-simultánního svařování je celá plocha stejnoměrně ohřívána s tím rozdílem, že je celá plocha ozářena najednou
- **svařování s maskou** (Mask Welding) - přímkový laserový paprsek je ke spojovaným částem přiváděn z vysokovýkonného diodového laseru a oblasti, které nejsou určeny ke sváření, jsou odstíněny maskou

Transmisivním svařováním mohou být svářeny kombinace z prostupných a absorpčních termoplastů, např. zadní vícebarevné světlometry automobilů, automobilové armatury, tělesa čerpadel, nárazníky nebo elektronické řídicí systémy.[9]

#### 2.1.2.2. Svařování na tupo

Svařování na tupo je oproti metodě transmisivního svařování metodou méně používanou. Jsou využívány dvě varianty pro svařování plastů za využití laseru.

- **s šikmým zrcadlem** - díly jsou spojené způsobem, který je podobný zahřátým svařovacím nástrojům. Laserový paprsek se odrazí od vychýleného zrcadla do oblasti sváru. Energie z laserového paprsku se absorbuje na povrchu dílů a přetvoří se v teplo, které způsobí jejich roztavení. Samotné spojení se děje v druhé fázi, kdy je laser vypnut, zrcadlo odstraněno a svařené části určitou silou stlačeny k sobě
- **bez šikmého zrcadla** - svařované díly jsou spolu v kontaktu již na začátku, jelikož síla působí po celou dobu svařování. Laser působí přímo na spojované části do místa sváru

Metoda svařování na tupo není již příliš používaná, protože při procesu dochází k vytlačení velkého množství taveniny na povrch, což je nežádoucí.[9]

## 2.2. Svařování termoplastů ultrazvukem

Ultrazvuková svařovací technika se během posledních dvaceti let prosadila jako důležitá spojovací technologie a prochází od té doby prudkým vývojem. Jak se technologie vyvíjí, rozsah materiálů, které mohou být svařovány, se zvětšuje. Nejprve bylo možno svařovat jen neflexibilní plasty, protože jejich vlastnosti materiálu dovolily účinný přenos akustické energie od části k části. V dnešní době se však již běžně tato technologie používá ke svařování téměř veškerých kovů a plastů.

Její použití je velmi všestranné - především k opravě prasklin a porušených nebo jiným způsobem opotřebovaných forem. Zařízení nedeformuje materiál. Široké spektrum použití tato technologie našla zejména při konstrukci elektrických přístrojů, domácích spotřebičů,

v automobilovém a textilním průmyslu, kde se vyskytují velké výrobní série. Pro úspěšné svařování je totiž nutno pro každý spoj na míru vyrobit příslušné nástroje a přípravky. To je prakticky jediná nevýhoda této technologie. [14]

Jejími největšími přednostmi jsou naopak vysoká rychlost (desetiny, maximálně jednotky sekund), čistota a kompaktnost (zařízení zabírá málo místa a nepotřebuje speciálně upravené pracovní místo, lze jej umístit kdekoli ve výrobní hale), nenáročnost na připojení (běžné napětí 230V a přívod tlakového vzduchu), prakticky žádná údržba a to, že nevyžaduje žádný spotřební materiál, jako pájky apod. Velkou předností je rovněž vysoká životnost nástrojů, zpravidla statisíce svarů. Ultrazvukové svařování je také jedinečné v tom, že nejsou potřeba žádné šrouby, spojky, hřebíky, pájecí materiály, nebo jiná adheziva nutná ke spojení dvou součástí.

### **2.2.1. Podstata procesu svařování ultrazvukem**

Za ultrazvukové svařování plastů je možné pokládat takový způsob pevného spojení termoplastů, plněných termoplastů, kompozitních materiálů a některých jiných materiálů za použití kmitavé ultrazvukové energie v místech spoje (sváru). Různé plastické materiály, které je potřeba svařit (desky, pásy, folie, tvarované dílce apod.), se svaří, jakmile v místě sváru zajistíme určitou statickou sílu, čímž zaručíme akustickou vazbu, při současném použití ultrazvukových vibrací v kolmém směru na rovinu spojovaných ploch.

Při ultrazvukovém svařování plastů se spoj vytváří kolmým působením ultrazvukových kmitů na rovinu spoje při současném působení přítláčné síly, viz. Obr.3. Působením tepla, které vzniká třením na styčných plochách (kontakt představující akustický odpor) nebo absorpcí ultrazvukové energie v materiálech na místě sváru, dochází nejdříve ke změknutí a potom tavení, a tím vzájemnému promíchání styčných materiálů, dokud vznikne v místě pevná vazba. Přítláčná síla se nechává působit ještě po ukončení ultrazvukových kmitů, aby spoj přešel z plastického do tuhého stavu. Celkový svařovací čas je krátký i při uvážení obou dvou operací, obvykle nepřesahuje 2 až 3 s. Ultrazvukové svařování se nejčastěji využívá pro spojování polotovarů a výlisků z termoplastických hmot.

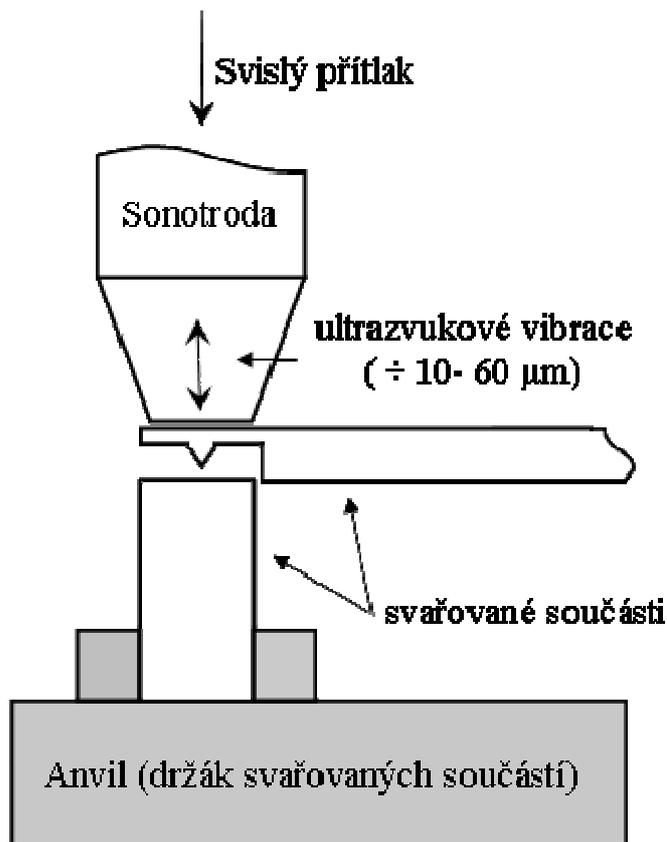
Tepelná energie, potřebná k natavení termoplastu, se nepřivádí z venku, ale vytváří se přímo v samotném svařovaném materiálu. Princip je založen na kmitání elektrody, tzv. sonotrody v oblasti ultrazvuku (frekvence 20 kHz a vyšší) a přenos těchto kmitů na jednu

ze svařovaných součástí. Ultrazvukové kmity se potom šíří k místu styku obou svařovaných ploch, kde se mění v teplo vlivem vzájemného tření molekul o sebe, dochází k natavení polymeru a malým tlakem sonotrody (0,2 až 0,3 MPa) se obě součásti svaří. Svařovací tlak působí v ose sonotrody.[14]

### 2.2.2. Ultrazvukové svařování ve vzdáleném a blízkém poli

Pevnost svarů závisí na energii kmitů, na době jejich působení, na velikosti přitlačné plochy a na čistotě svarových ploch. Aby se energie během svařování při průchodu termoplastem neztrácela, musí být sonotrody co nejbližší místa svaru. U součástí z amorfních plastů (PS, PVC, ABS, PMMA) je dovolená vzdálenost od místa svaru až 20 mm - tzv. **svařování ve vzdáleném poli** (odlehlé). U krystalických plastů (PE, PP, PA) je dovolená vzdálenost maximálně 5 mm - tzv. **svařování v blízkém poli**.

Možnosti ultrazvukového sváření v blízkém i vzdáleném poli pro různé typy plastů a systémů jsou uvedeny v Tab.2. [5]



Obr.3. Uspořádání pro svařování plastických materiálů ultrazvukem

Svařování plastických materiálů a kompozitu			
Materiál	Sváření v blízkém poli	Sváření ve vzdáleném poli	Doporučení
Krystalický polystyrén	Excelentní	Excelentní	Jedná se o materiál, který umožňuje nejlepší svařování. Kritická vzdálenost: 12 cm.
Standardní polystyrén	Excelentní	Excelentní	Velmi dobré akustické vlastnosti. Nadbytek energie rozbijí kus na polovinu.
Částečně rázuvzdorný	Excelentní	Dobré	Je vyžadováno více energie než standardní polystyren.

polystyrén			Kritická vzdálenost: 3 cm.
Rázuvzdorný polystyrén	Dobré	Dostatečně dobré	Nedostatečné výsledky, když je obsah butadienu příliš vysoký.
Styrén-akrylonitril S.A.N. a AS (polystyrén a styrenakrylonitrilové kopolymery)	Velmi dobré	Dobré	Kritická vzdálenost: 4 cm.
Standardní ABS	Velmi dobré	Dobré	Totožné vlastnosti jako u rázuvzdorného polystyrenu.
Rázuvzdorný ABS	Obtížné	Nemožné	Obsah butadienu způsobuje vysokou absorpci. Plocha sonotrody vymezuje opěrnou plochu.
Vstříkovaný polymethylmetakrylát (plexisklo)	Velmi dobré	Dostatečně dobré	Velký přítlak sonotrody je nezbytný pro zabránění zanoření.
(MSB) Rázuvzdorný polymethyl methacrylát	Dobré	Dostatečně dobré	Obsah butadienu omezuje svařování.
Extrudovaná nebo vstříkovaná Akrylová pryskyřice (plexisklo)	Špatné	Špatné	Esteticky nevzhledné. Téměř nemožné svařování.

Polykarbonát (Makrolén)	Excelentní	Špatné	Vyžaduje hodně energie. Kritická vzdálenost: 2 cm.
Acetal (Debuin nebo Hostaform - polyformaldehyd)	Dobré	Dostatečně dobré	Porézni spojení, svařování je dosaženo se speciálně navrženým spojem.
Polyamid (silon)	Dobré (závislé na geometrii)	Špatné	Je požadován speciální svářecí spoj. Svařování je možné až po předcházejícím procesu sušení, vyžaduje velkou sílu.
Trogamid	Velmi dobré	Dobré	Kritická vzdálenost: 1 cm. Je to důležité pro polyamidy (silony). Proces sušení zlepšuje výsledky.
Polamid s obsahem skelných vláken	Velmi dobré	Dostatečně dobré	Velmi pevné spojení. Vyžaduje velmi vysoký výkon.
Polypropylén	Dobré	Dostatečně dobré	Vyžaduje dostatek energie. Různé výsledky podle tvaru spoje. Každý problém vyžaduje své vlastní řešení. Obsah skleněného vlákna zlepšuje výsledky.
Acetát	Dobré	Nemožné	Omezené možnosti pro pevný acetát.
Celulósa Acetylbutyrol	Dostatečně dobré	Nemožné	
Vysoko hustotní BP polyetylén	Dobré	Nemožné	Omezené možnosti při svařování desek a uzavírání



Nízkohustotní AP polyetylén	Dobré	Nemožné	lahví nebo tub.
Kompozitní filmy polyetylén - aluminium - polypropylén	Dobré	Nemožné	Je možné kontinuální svařování.
Polyfenyl oxid PPO	Dobré	Omezené	Kritická vzdálenost: 1 cm. Je požadován dostatečný výkon.
Poly sulfon	Dobré	Omezené	Je požadován dostatek výkonu.
NORYL	Dobré	Omezené	Kritická vzdálenost: 2 cm.
NORYL s obsahem skelných vláken	Velmi dobré	Omezené	Obsah skelných vláken výrazně zlepšuje spojení.
CELANEX Poly butyl - butyl	Dobré	Omezené	Kritická vzdálenost: 2 cm.
PVC	Dobré	Dostatečně dobré	Dobré výsledky na pevném PVC
Měkčené PVC	Dobré	Nemožné	Omezeno měknutím materiálu při svařování.

*Tab.2. Možnosti ultrazvukového svařování v blízkém i vzdáleném poli*

### 3. PŘEHLED POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

#### 3.1. Polypropylén (PP)

Polypropylén (PP) je termoplastický polymer, používaný v mnoha odvětvích potravinářského a textilního průmyslu a v laboratorních vybaveních. Prodává se pod obchodním názvem Triplen, Tatren atd. Je to částečně krystalický plast, který se získává za pomoci katalyzátorů polymerizací propenu. Jako základní surovina pro výrobu se používá Propen.

##### Vlastnosti:

Polypropylén vyniká velmi dobrou chemickou a mechanickou odolností. Má přidělené mezinárodní identifikační číslo pro plasty. V roce 2001 dosáhla roční celosvětová produkce polypropylenu přes 30 miliónů tun.

Tvoří dva druhy: tzv. **izotaktický** polypropylén (krystalicky tuhý, houževnatý, chemicky odolný plast širokého použití, například pro výrobu vláken) a tzv. **ataktický** polypropylén (lepkavá parafinovitá hmota, vznikající též při výrobě polypropylenu, využívaná jako cenově výhodná surovina zejména pro výrobu izolačních hmot).

Polypropylén je odolný proti všem látkám mimo benzenu, benzinu, chloroformu, trichlorethylenu, bromovým vodám, a kyselině dusičné. Je zdravotně nezávadný.

Polypropylén je chemicky stabilní a nezanechává pachové stopy, jeho měrná hmotnost je  $0,92 \text{ g/cm}^3$ . Tepelná odolnost  $-10$  až  $+90$  °C. Má hladký lesklý povrch, je snadno omyvatelný, má nízkou hmotnost je cenově dostupný.

##### Využití:

Výroba fólií a vstřikovaných výrobků, textilních pásek (pytle a vaky), netkaných textilií (dětské plenkové kalhotky, jednorázové obleky, textilie pro stavebnictví a zemědělství). Stejně jako polyethylen nachází uplatnění v automobilovém průmyslu, při výrobě hraček,

kuchyňského nádobí či bazénů. Velké využití našel jako výchozí surovina pro výrobu obalů na potraviny – nejrůznějších kelímků na jogurty, tuky, mražené výrobky i saláty.[18]

## 3.2. Matrice

### 3.2.1. Polymerní matrice

Spojité složka, která zastává funkci pojiva výztuže a chrání většinou křehká vlákna, se nazývá matrice. Polymerní matrice jsou výrazně poddajnější než vlákna, pevnost v tahu je u všech matic menší než pevnost v tahu vláken (u polymerních matic až o dva řády). Pro kompozity s kontinuálními vlákny se nejvíce využívají matrice polymerní, buď reaktoplastické nebo termoplastické.

Nejpoužívanější matrice jsou nenasyčené polyestery (UP), vinylestery (VE) a epoxidy (EP) a z termoplastů polypropylen (PP) a polyamidy (PA). Reaktoplasty a aromatické termoplasty s vysokou teplotou tvarové stálosti se vzhledem k své ceně používají především ve vojenském průmyslu (například spodní kompozitní díly tryskových letadel s kolmým startem musí mít matici s vysokou tepelnou odolností), případně pro výrobu špičkových zařízení (družice, raketoplány, střely s plochou dráhou letu apod.). Směsi pro hromadnou výrobu dílu lisováním a pryskyřice pro injektážní a infuzní technologie mají specifické nároky na kinetiku vytvrzovacích procesu reaktoplastů (co nejrychlejší reakce, nízká viskozita). Snaha zkrátit dobu vytvrzování a zároveň odstranit z výrobního procesu zdravotně závadné těkavé látky vede k používání i dražších typů reaktoplastů na bázi uretanu (hybridní uretanové pryskyřice, tzv. akrylamáty).

Snaha o recyklovatelnost materiálu kompozitních dílu vyráběných ve velkých sériích (automobilový průmysl) vede k nahrazování reaktoplastů termoplasty. Většinou se uplatňují levnější typy termoplastů (polypropyleny a polyamidy), vyztužené krátkými skleněnými vlákny. Lze je zpracovávat vstřikováním na běžných vstřikovacích strojích. U kompozitů s reaktoplastovou maticí budou recyklována pouze drahá vlákna (uhlíková nebo polymerní), jinak je odpad po rozemletí využít jako plnivo do nekonstrukčních směsí. Od roku 1998 je výzkum zaměřen i na recyklaci reaktoplastů selektivní pyrolýzou ve vzhledu. Výsledkem pyrolýzy je směs fenolu, která se dále upravuje na výchozí monomery. Také při vysokých nárocích na chemickou odolnost nebo houževnatost kompozitu jsou reaktoplasty

nahrazovány termoplasty. Z termoplastu vyztužených vláken lze vyrobit desky, které lze tvarovat za tepla (materiály Azdel®, Azmet®, Azloy® na bázi termoplastů a jejich směsí a skleněných vláken). Skladovatelnost polotovaru je oproti polotovarům s nevytvrzeným reaktoplastem neomezená. Stejně výhody mají i prepregy s termoplastickým pojivem. Problémy se smáčivostí vláken viskózními taveninami termoplastu vyžadují speciální technologie přípravy prepregu (nános pomocí rozpouštědel, emulzní nanášení částic polymeru, koextruze vyztužujících vláken a termoplastu, výroba hybridních tkanin z vláken termoplastu a vyztužujících vláken).

V hromadné dopravě osob a ve stavebnictví si zvětšené nároky na bezpečnost vynucují používání nehořlavých matric s malým vývinem netoxického kouře. Těmto podmínkám vyhovují především levné fenolické pryskyřice. Nehořlavé aromatické termoplasty nacházejí uplatnění i v konstrukci letadel (vnitřní obklady, prvky interiéru), přestože jejich cena je značně vysoká. [15]

Při výběru vhodné pryskyřice se musí přihlížet k následujícím vlastnostem:

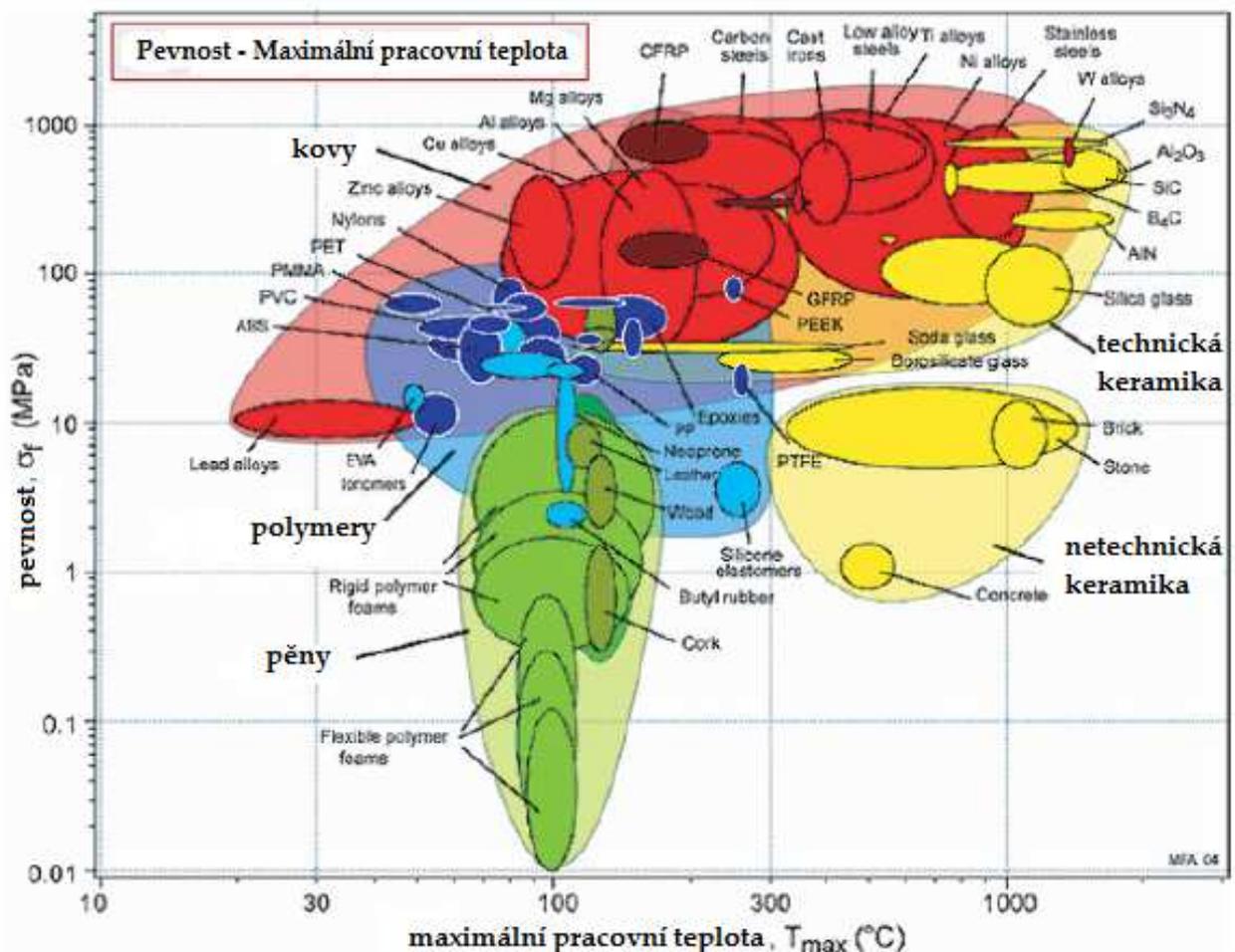
<b>Užitné vlastnosti</b>	<b>Technologické vlastnosti</b>
Pevnost	Viskozita pryskyřice
Modul pružnosti	Smáčivost vláken
Prodloužení při přetržení	Doba želatinace
Houževnatost	Skladovatelnost
Odolnost proti tečení	Reakční rychlost
Tepelná odolnost	Doba želatinace
Hořlavost	Obsah těkavých látek
Navlhavost	Smrštění při reakci
Odolnost proti UV záření	Citlivost na poměr složek
Dielektrické vlastnosti	Vedlejší produkty vytvrzování
Chemická odolnost	Adheze k povrchu formy

*Tab.3. Důležité vlastnosti při výběru vhodné pryskyřice*

### 3.2.2. Kovové a keramické matrice

Keramické matrice mají dobrou pevnost v tahu i při teplotách, kterým některé kovové matrice neodolávají. Přípravou kompozitu s kontinuálními keramickými vlákny v keramické matici se získají materiály s větší lomovou houževnatostí, než má monolitická keramika.

Vysokou pevnost v tahu (okolo 800 MPa) při vysoké pracovní teplotě (pres 1000 °C) má zvláště keramika SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>., viz graf ("Copyright Granta Design Ltd.", dostupný z <http://www.grantadesign.com/>). Kompozity s kovovou a keramickou maticí je vhodné uvádět spolu s technologií přípravy. [15]



Obr.4. Závislost pevnosti v tahu na maximální pracovní teplotě u vybraných druhů materiálů

Lití:

Při použití kontinuálních vláken je možno předem vytvarovanou vláknovou výztuž (tzv. preformu), umístěnou do formy, zalít roztaveným kovem. Polymerní vazebný prostředek vláken, který umožnil vytvarování výztuže a zabraňuje posunutí vláken výztuže proudem roztaveného kovu, se spálí. Směs taveniny kovu a krátkých keramických, uhlíkových vláken nebo whiskeru se může odlévat nebo vsťikovat. Při běžném gravitačním odlévání směsi hliníkové nebo hořčíkové slitiny a krátkých uhlíkových vláken mají vlákna tendenci vyplouvat na povrch taveniny, protože mají menší hustotu. Vhodnější je proto použít tlakové lití, při kterém se navíc dosahuje jemnějších krystalu kovu .

#### Lisování za tepla ve vakuu:

Jde o metodu výroby vrstevnatých kompozitu s kovovou maticí a kontinuálními vlákny. Díl je vyroben prokládáním vláknové výztuže kovovými fóliemi. Ke vzájemnému spojení obou složek dojde difúzními pochody při lisování.

#### Práškové metody:

Prášková metoda se používá při výrobě disperzně zpevněných kovů. Kompaktní výrobek je získán postupy práškové metalurgie. Nejvýznamnější uplatnění má prášková metoda při výrobě kompozitu s keramickými maticemi, protože podstatou výroby konstrukční keramiky je zhutnění a následné slinutí prášku oxidu, karbidu nebo nitridu za vysokých teplot a tlaku. Částice keramické matrice je možno na kontinuální keramická vlákna nanášet v podobě vodné suspenze (eventuálně s přídavkem polymerního vazebného prostředku, který se při slinování vypálí). Silnostěnné díly se připravují slinováním předem připravených tenčích vrstev. Keramické nebo kovové whiskery je také možno vmíchat do prášku keramické matrice.

#### Infiltrace výztuže plynou fází:

Při metodě označované CVI (“Chemical Vapour Infiltration”) je výztuž z kontinuálních vláken prosyncována parami vzniklými tepelným rozkladem chemických sloučenin, prekurzoru matrice.

Na ohřátých vláknech výztuže dochází ke kondenzaci přesycených par a vzniku tuhé fáze. U matrice na bázi SiC se jako prekurzor používá například methyltrichlorsilan. Metoda dává

kompozit s velkým podílem póru. Pro snížení pórovitosti (a dosažení dobré pevnosti kompozitu) je nutno celý postup několikrát opakovat.

#### Plazmové nástřiky:

Vyztužující vlákna uložená v tenké vrstvě jsou pokryta kovovou nebo keramickou maticí pomocí plazmového nástřiku. Získané vrstvy se dále spojují žárovým lisováním (keramické matrice) nebo tvářením za tepla ve vakuu (kovové matrice).

#### Kapalný prekursor matrice:

Keramickou nebo uhlíkovou maticí lze získat prosycením výztuže kapalným prekurzorem matrice a jeho chemickou přeměnou za vysokých teplot. Protože během přeměny dochází k úbytku hmoty prekursoru a při ochlazování výrobku v matici vznikají trhliny, postup se musí několikrát opakovat, aby podíl póru a počet nezacelených trhlin byl co nejmenší. Pro keramickou maticí je používána pyrolýza polymerního prekursoru (např. polysiloxanových pryskyřic), pro uhlíkovou maticí buď fenolická pryskyřice nebo uhelná či ropná mezofázová smola (smola s kapalnými krystaly). Kompozity uhlíková matrice-uhlíková vlákna jsou používány pro třecí elementy (disky) brzd letadel a uplatňují se i pro další vysoce tepelně namáhané díly (trysky raketových motorů, destičky tepelných štítů raketoplánu).

### **3.3. Skleněná vlákna**

Skleněná vlákna jsou jedním ze sklářských výrobků, jehož využití v technické i každodenní praxi se stále rozšiřuje.

Oproti masivnímu sklu mají vlákna především vyšší pevnost v tahu a mohou se použít pro výrobu moderních kompozitních materiálů. Skleněná vlákna jsou tradičním výrobkem českého průmyslu a vyrábějí se ve formě stříže nebo nekonečných vláken vhodných pro další využití ve stavebních, chemických i konstrukčních odvětvích průmyslu.

### 3.3.1. Historie skleněných vláken

Výroba skla byla známa již Egyptanům okolo roku 1800 př. n. l. a můžeme s jistotou tvrdit, že první výrobci skla znali i skleněná vlákna, která dokázali snadno vytáhnout z roztavené skloviny.

Laboratorní výrobu a technické použití skleněných vláken uvádějí ve svých pracích zakladatelé moderní fyziky Hooke a Réaumur (17. až počátek 18. století). Koncem 19. stol. se objevují první zmínky o technickém využití skleněného vlákna v patentové literatuře. V roce 1916 podává R. Kemp první patent na vlákno vyztužený plast a od roku 1934 jsou průmyslově vyráběna tepelně-izolační skleněná vlákna v Newarku (Ohio, USA). V následujících letech probíhal vývoj E-skloviny pro skleněná vlákna a v roce 1951 získává patent na allylsilanovou povrchovou úpravu vláken R. Steinman.

### 3.3.2. Současnost a budoucnost skleněných vláken

Skleněná vlákna jsou vlákna anorganická s širokou škálou použití. Ceněná jsou hlavně pro svoje výborné technické vlastnosti, jako jsou vysoká pevnost, vysoká hodnota Youngova modulu v tahu, odolnost vůči vysokým teplotám, nehořlavost, dobrá chemická odolnost a dobré elektrické vlastnosti. Vynikajících tepelně a zvukově izolačních vlastností využívá v široké míře stavební průmysl.

Vlastnosti skleněných vláken jsou výhodné zvláště ve výrobě kompozitních materiálů jako vyztužující kontinuální vlákna nebo ve formě stříže. Skleněná vlákna jsou používána ke konstrukci vláknových kompozitů o vysoké kvalitě s vysokými nároky na mechanické a tepelné vlastnosti. Konečné výrobky se využívají především v automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, leteckém průmyslu, chemickém průmyslu, elektrotechnice a v jiných odvětvích. V elektrotechnickém průmyslu se aplikují zejména ve výrobě laptopů, počítačů a mobilních telefonů. V současné době se věnuje větší pozornost výrobě a použití skleněných vláken ve formě nekonečného vlákna.

Moderní kompozitní konstrukční materiály se bez skleněných výztuží neobejdou. V roce 2001 byla celosvětová výroba skleněných vláken na úrovni 2,5 milionu tun. V roce 2000 byla v Evropě spotřeba sklolaminátů rozdělena následovně: 37 % dopravní aplikace, 25 %



elektrické a elektronické výrobky, 31 % stavební prvky, 5 % výrobky pro sport a volný čas a 2 % ostatní aplikace. Technologie zpracování moderních kompozitních prvků zahrnuje kromě klasického ručního kladení a prosycování textilních vrstev využití autoklávové techniky, navíjení vláken, tažení profilů (pultruze), injekční vstřikování, tlakové prosycování pryskyřicemi (resin transfer molding) a další způsoby.

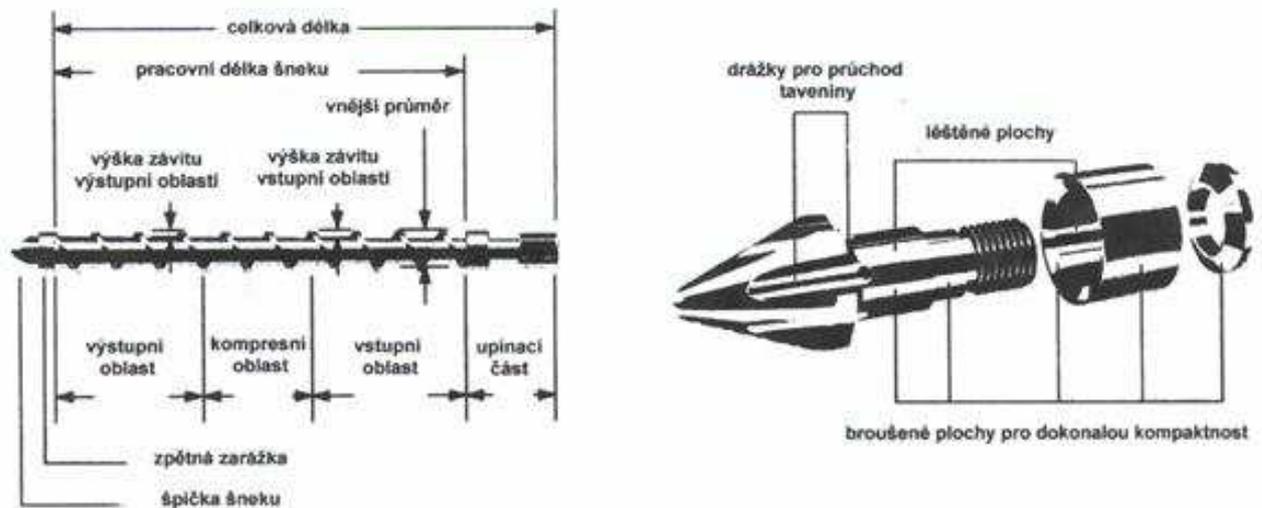
Budoucnost vyžaduje stále kvalitnější materiály. Lze předpokládat především rozvoj kompozitních materiálů s hybridní výztuží - tedy kombinací skleněných, uhlíkových, aramidových, případně dalších typů vláken. Pro dosažení speciálních efektů budou uplatňovány nanotechnologie, jak v povrchových úpravách vláken, tak i ve funkčních úpravách výrobků.

Vysokých pevností kompozitních materiálů určitě využije i výroba energie. Nedávno se spojily firmy GERMAN WIND a DENMARK's LM GLASFIBER a vyvinuly lopatky pro větrnou elektrárnu s výkonem 5 MW. Při průměru rotoru 125 m se jedná o největší lopatky, které budou sériově vyráběny od roku 2004. [16]

### 3.3.3. Vstřikování vlákný plněných termoplastů

Termoplasty, plněné minerálními plnivými (krátkými nebo dlouhými vlákny), mají díky netavitelnému podílu anorganického materiálu v plastickém stavu větší vnitřní tření taveniny, než neplněné plasty. Ke vstřikování jsou nezbytné teploty nejméně o 10 °C vyšší. Rovněž tlaky, teplota formy a rychlost vstřikování jsou doporučovány vyšší, neboť taveniny plněných termoplastů rychle tuhnou a nedoporučuje se vyrábět díly s tloušťkou menší, než 2 mm. Délky šneků se doporučují v poměru 26 D.

V současné době se začínají prosazovat plněné plasty dlouhými vlákny (10 až 12 mm), což výrazně zvyšuje tuhost vyráběných dílů a s tím spojené i ostatní výhody, které přinášejí dlouhá vlákna. Při zpracování (šnekování, plastikaci) sice dochází k rozlámání granulí, ale i přes tento nedostatek jsou výsledná vlákna mnohem delší, než-li u materiálu s krátkými vlákny (zhruba desetkrát). Plastikace se musí provádět velmi šetrně speciálně provedeným šnekem, který se může otáčet oběma směry.



Obr.5. Konstrukce šneku pro plastikaci dlouhovláknových kompozitů

Výrobky, které byly získány touto technologií, mají zvýšenou tuhost, vysokou rázovou houževnatost, výbornou rozměrovou stabilitu a tyto vlastnosti si podržují i při extrémních teplotách.[57]

## 4. POUŽITÉ STROJE PŘI VÝROBĚ A TESTOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

### 4.1.Svařovací zařízení Branson

Svařovací zařízení vyrobené v německé firmě Branson vlastní firma PLASTIKA a.s. a je určeno ke svařování plastových dílců ultrazvukem. Zařízení je ovládáno řídicím panelem, na kterém můžeme v různém rozsahu nastavovat hodnoty veličin potřebných pro svařování.

#### Technické údaje:

Čas svařování: 0,1 – 2 [s]

Svářená hloubka: 0,1 – 0,5 [mm]

Čas setrvání v přítlaku: 5 [s]

Pracovní tlak: 100 - 600[kPa]

Amplituda: 70 - 100[%]

Frekvence: 20 - 50[kHz]

Pracovní teplota: dle typu svařovaného materiálu, řádově 200 - 300 [°C]



*Obr.6. Ultrazvukové svařovací zařízení Branson*



Obr.7. Ultrazvukové svařovací zařízení Branson, ovládací panel

## 4.2. Zkušební stroj Zwick

Zkušební stroj se nachází v laboratořích ÚVI v budově U5. Stroj je využíván v největší míře jako zařízení k určování tahových a smykových vlastností kovových, plastových a dalších materiálů. Zkušební stroj je napojen na počítač, který vyhodnocuje vlastnosti materiálu při trhání zkušebních tělísek oddalováním jeho dvou čelistí.

### Technické údaje:

Celý název ..... Zwick 145 665

Maximální zkušební síla.....20 kN

Celková výška ..... 2012 mm

Celková šířka..... 630 mm

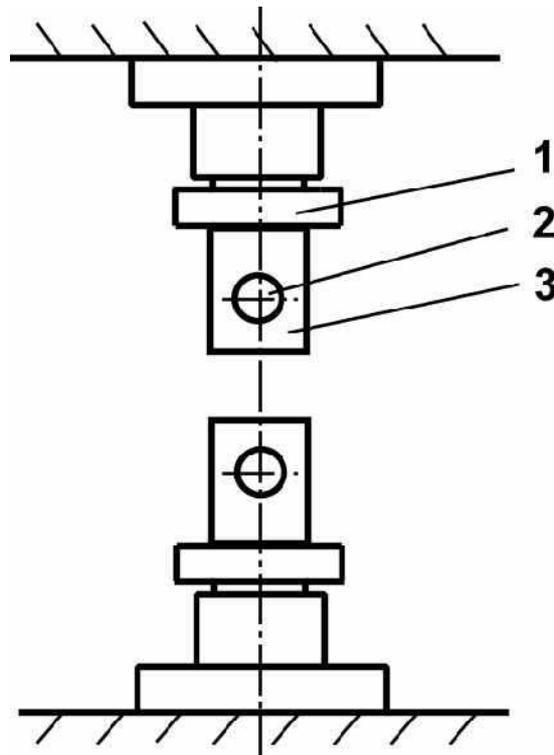
Strojová výška ..... 1284 mm

Pracovní šířka ..... 420 mm

Rozpětí čelistí..... 15 mm

Hmotnost .....150 kg

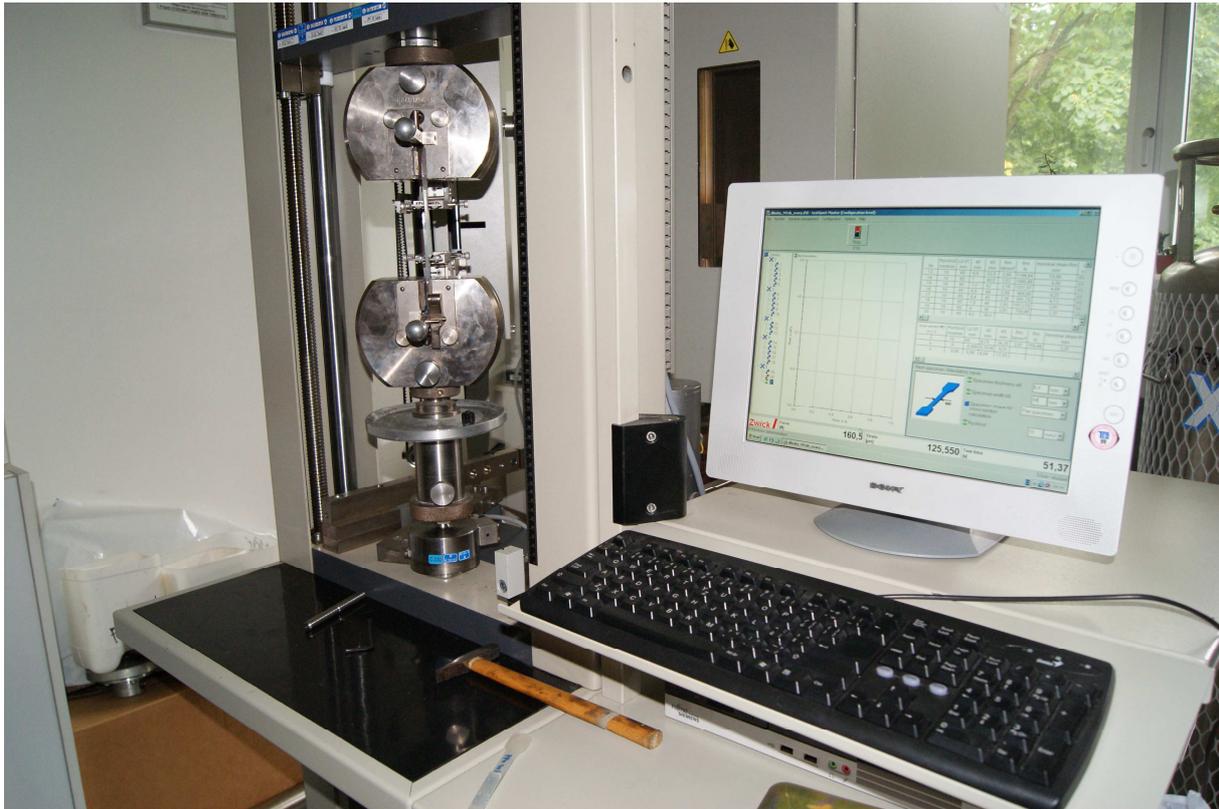
Upínací zařízení stroje:



*Obr.8. Upínací zařízení zkušebního stroje*

Legenda:

1. utahovací matice
2. otvor pro pojistný kolík
3. spojovací čep



*Obr.9. Zkušební stroj s počítačem vyhodnocujícím jeho činnost*

## **5. FIRMA PLASTIKA a.s.**

### **5.1. Zkušenosti firmy a základní údaje**

Firma PLASTIKA a.s. sídlí na Kaplanově ulici v Kroměříži. Její více než padesátiletá historie v oblasti průmyslového zpracování plastů jí dává velké zkušenosti v tom, jak uspět u náročných renomovaných zákazníků z oblasti počítačového, automobilového nebo elektrotechnického průmyslu.[2]

Je plně adaptována v globálním prostředí, zodpovědně podniká a za přední hodnoty pro zákazníka považuje flexibilitu, spolehlivost a rychlost. Velký důraz klade na trvalou integraci nových technologií.

Má certifikovaný systém řízení jakosti dle norem ISO 9001:2000 (2003), ISO 14001 (2000) a ISO/TS 16949:2002 (2003).

PLASTIKA a.s. je členem Plastikářského klastru, který se zaměřuje na zvýšení konkurenceschopnosti a výkonnosti plastikářského odvětví v kraji. [2]

Základní údaje:

Založení společnosti	1956
Počet zaměstnanců	324
Rozloha závodu	30000 m <sup>2</sup>
Tržby (2009)	473 mil. Kč
Export (2009)	60%
IČ	27448550
DIČ	CZ27448550
Spisová značka	B 10716 vedená u MS Praha

*Tab.4. Základní údaje společnosti PLASTIKA a.s.*

Skupina Plastika:

Ve skupině Plastika jsou tyto společnosti:

- **PLASTIKA a.s.**, Kroměříž, komplexní servis při výrobě plastových technických vstříkovaných dílů
- **PLS Lakovna s.r.o.**, Kroměříž, lakování plastů

## 5.2. Technologie

PLASTIKA a.s. zajišťuje komplexní servis při výrobě plastových technických vstříkovaných dílů. Provádí průmyslové zpracování plastů, montáž, potisk a další následné operace. [2]

### 5.2.1. Vstříkování plastů

Výroba plastových výlisků z termoplastů včetně dvoukomponentního vstříkování a vstříkování s podporou dusíku. V lisovně firmy PLASTIKA a.s. se vyrábí plastové výlisky z termoplastických materiálů na vstříkovacích strojích o velikosti 25-700 tun s možností

vstřikování vylisků do hmotnosti 1 960 g. Vstřikovací stroje jsou vybaveny moderními řídicími systémy a potřebnými periferiemi pro spolehlivé a stabilní řízení procesu. [2]



*Obr.10. Vstřikolis Engel firmy PLASTIKA a.s.*

### 5.2.2. Montáže

Firma PLASTIKA a.s. nabízí jednoduché i komplexní montáže a podmontáže z vyrobených plastových dílů a nakoupených komponentů. Nejkomplexnějším a nejmasovějším systémovým výrobkem jsou počítačové klávesnice.

**Proces montáže** lze obecně shrnout do modelu:

- výroba vlastních plastových komponent vstřikováním,
- lakování plastových dílů a potisk tamponem,
- nákup ostatních komponent (mechanické, elektronické, pryžové),
- montáž (3 linky),
- stoprocentní funkční testování,
- potisk laserem a tamponem v mnoha jazykových mutacích,
- balení (rozličné provedení podle požadavku zákazníka),
- logistické služby (skladování a on line dodávání mnoha desítek provedení klávesnic).





*Obr.11. Ruční montáž dílů pro automobilový průmysl*

### **5.2.3. Svařování ultrazvukem**

Svařování ultrazvukem zajistí kvalitní nerozebíratelné spojení plastových dílů.

Firma provádí montáž plastových dílů svařováním ultrazvukem. Tato vysoce produktivní technologie umožňuje kvalitní nerozebíratelné spojení více plastových dílů a to i vyrobených z různých materiálů. [2]



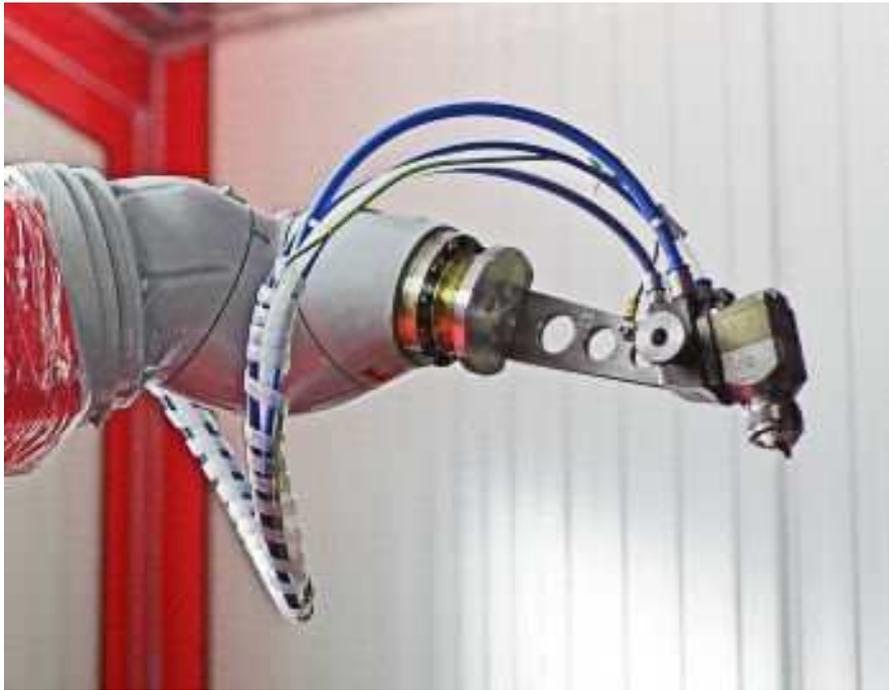
*Obr.12. Zařízení na svařování ultrazvukem*

Společnost využívá technologii svařování ultrazvukem na 7 strojích značky *Branson* a *Hermann* pro kompletaci masek pro přístrojové panely automobilů. [2]

#### **5.2.4. Další technologie**

##### Lakování:

Firma vybuodovala novou lakovnu pro lakování plastů. Mimo t má ověřené dodavatele pro lakování plastových dílů a to v ručním i automatickém režimu. Nejmodernější lakovací linka od firmy *Afotek* je určena na lakování hlavně vodou ředitelnými dvousložkovými barvami. Lakovací linka je vybavena šestiosým robotem a lakuje plastové díly v plně automatickém režimu s vysokou opakovatelností a stabilitou procesu. Hlavní výrobní zařízení je doplněno o nezávislý ruční lakovací box, který slouží především pro nezbytné testování procesu lakování, přípravu vzorků, případně malosériové dodávky. [2]



*Obr.13. Robot pro lakování plastových dílů*

#### Potisk laserem:

Firma používá technologii laserového potisku hlavně pro popis počítačových klávesnic. Tato moderní technologie umožňuje vysoce produktivní a flexibilní potisk malosériových i masově vyráběných výrobků. Provádí se laserový popis počítačových klávesnic a dále se může provádět laserový popis různých plastových výrobků do velikosti 430×140 mm. [2]

Pro potisk laserem se používají stroje značky Rofin Sinar.



*Obr.14. Zařízení Rofin Sinar pro potisk laserem*

Tampoprint:

Provádí se tampoprintový potisk počítačových klávesnic a dalších plastových výrobků do maximální popisové plochy 430×140 mm. [2]



*Obr.15. Tampoprint - potisk klávesnice*

Pro tamponový potisk (tampoprint) se využívají celkem 4 stroje. Dva stroje *Tampoprint* (do 430×140 mm) a dva stroje *Printing International* (průměr 60 mm).

#### Horká ražba:

Horká ražba (hot camping) slouží pro dekorativní zušlechťení plastových výrobků. Tato moderní technologie se vyznačuje vysokou kvalitou a odolností výsledného produktu.

[2]



*Obr.16. Horká ražba*

Společnost PLASTIKA a.s. horkou ražbu současně využívá na 5 strojích pro dekoraci krycích skel přístrojových panelů pro automobily. [2]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ EXPERIMENTÁLNÍHO PROCESU

### 6.1. Cíle experimentální části práce

Na základě literární rešerše byla stanovena následující náplň experimentální části práce:

- příprava a výběr zkušebních těles z různých polymerních materiálů pro svařování ultrazvukem
- experimentální svařování pomocí ultrazvuku ve firmě PLASTIKA a.s.
- provedení trhacích zkoušek a zhodnocení výsledků
- provedení FEM analýzy a její vyhodnocení

### 6.2. Příprava a požadavky

Cílem praktické části diplomové práce je studium pevnosti plastových spojů svařovaných vybranou svařovací metodou. Pevnost svařovaných spojů se řeší jak experimentálně na zkušebním stroji, tak pomocí FEM analýz v programu COSMOS/M.

Po domluvě s vedoucím diplomové práce a firmou PLASTIKA a.s. byla jako svařovací metoda zvoleno svaření ultrazvukem. Naším úkolem je změřit pevnosti daných typů svarů různých materiálů a výsledky porovnat.

### 6.3. Zkušební materiály

Pro výrobu zkušebních těles byly zvoleny materiály polypropylén a polyamid s různými typy plnění a to jak skleněnými vlákny, tak mastkem a také bez plniv. Po svaření se však ukázalo, že všechny typy polyamidů a některé typy kombinací PP + plnivo jsou špatně svařitelné a spoj má velmi malou pevnost, proto byly ze zkoušky vyloučeny a trhací zkouška probíhala jen u několika typů polypropylénu. Dále se zkouška rozdělovala na zkoušení delších a kratších svarů, delší svary měly délku asi 40mm a kratší asi 20mm.

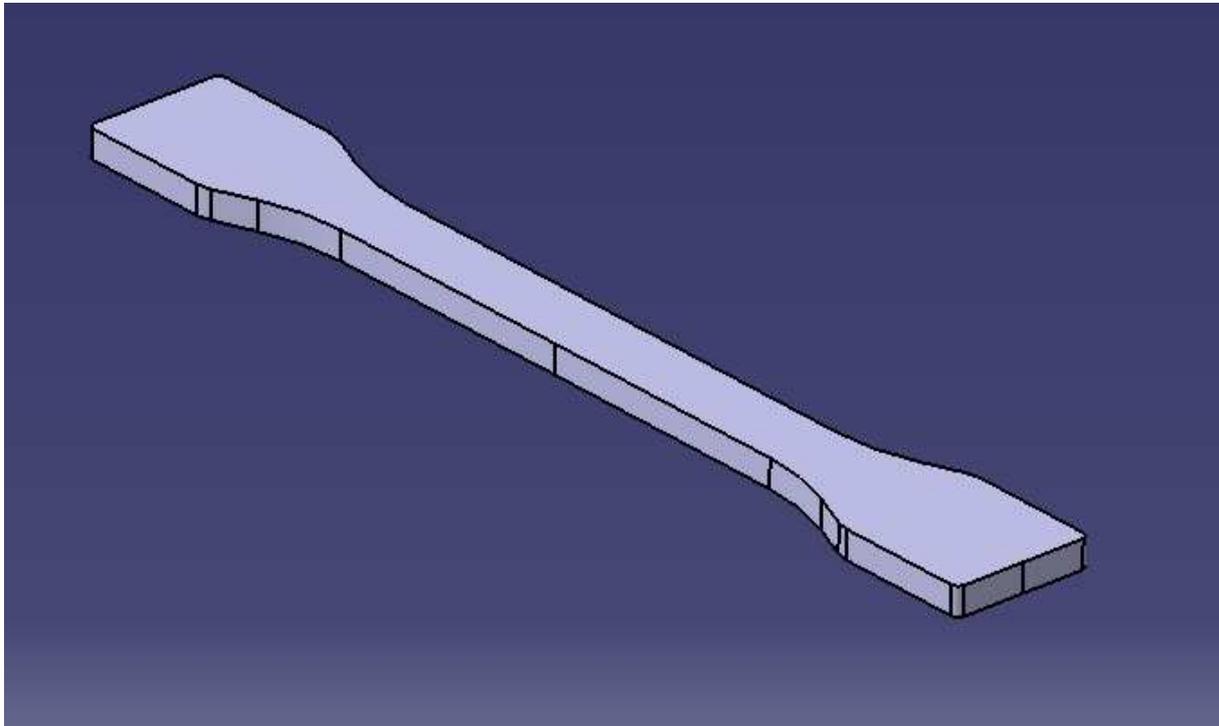
#### Parametry při svařování na ultrazvukovém svařovací zařízení Branson:

Pracovní tlak:	500kPa
Hodnota amplitudy:	80%
Čas svařování:	0,7s
Čas setrvání v přitlaku:	5s
Pracovní teplota:	231°C



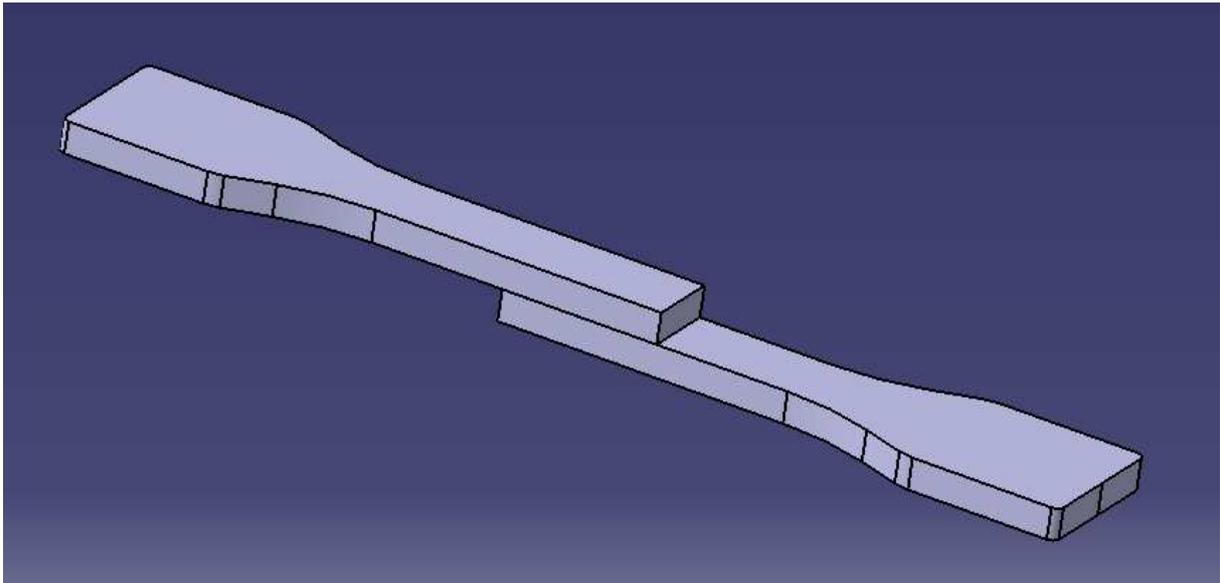
#### 6.4. Zkušební tělíska

Zkušební tyčinky, které byly určeny pro svařování, mají klasický tvar pro zkoušku tahem dle normy ISO 3167. Model zkušební tyčinky je na Obr.17. Tyčinka byla vymodelována v programu CATIA V5R18. Výrobní výkres zkušební tyčinky se nachází v příloze.

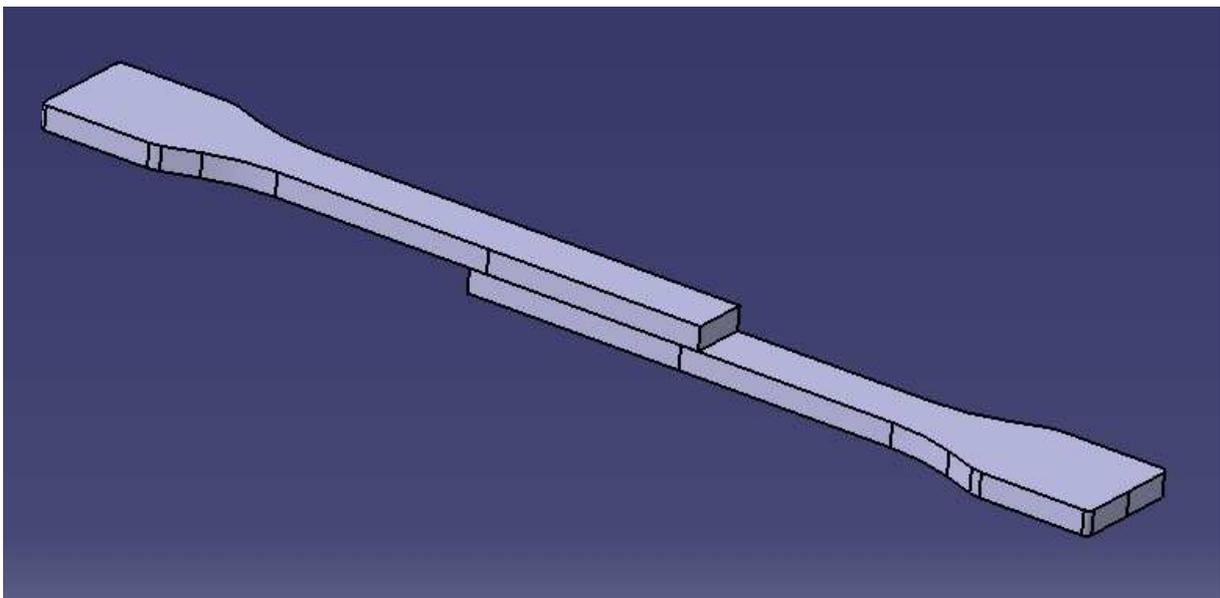


*Obr.17. Model tyčinek určených pro svařování, CATIA V5R18*

Tyčinky byly následně rozřezány dle toho, k jakému typu svaru byly určeny. Pro kratší svary byla každá tyčinka rozřezána v polovině, její konce se přes sebe položily pro vzdálenost asi 20mm a obě části tyčinky k sobě byly přivařeny. Pro delší svary bylo použito vždy dvou tyčinek tak, že každé dvojici byla uřezána z jedné strany krajní rozšířená část, tyčinky na sebe byly přiloženy uřezanými konci ve vzdálenosti asi 40mm a svařeny. Svařené tyčinky byly vymodelovány v programu CATIA V5R18, na Obr.18. a Obr.19. jsou znázorněny jak krátké, tak dlouhé svary.



*Obr.18. Model krátkého svaru, CATIA V5R18*



*Obr.19. Model dlouhého svaru, CATIA V5R18*

## 7. FEM ANALÝZA

### 7.1. Příprava pro FEM analýzu

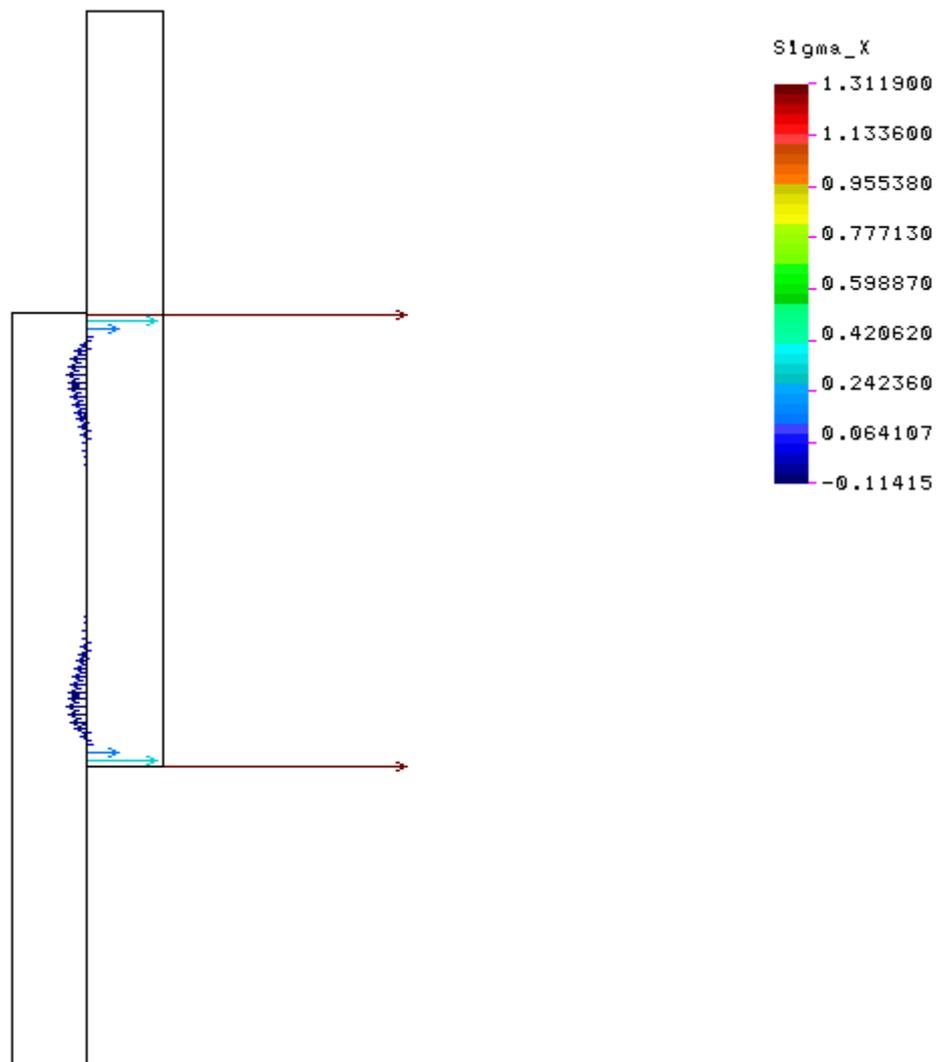
Analýza zatížení svarů byla prováděna ve FEM programu Cosmos/M. Analýza má spíše demonstrativní charakter a rozměry zkušebních těles a délky svarů přesně neodpovídají skutečnosti, výsledky slouží hlavně k zjištění míst s největším namáháním a k porovnání rozdílů při zatěžování kratších a delších svarů. Průřez zkušebních vzorků byl zvolen 10x5mm.

Délka svaru byla zvolena 10mm pro krátké svary a 30mm pro dlouhé svary. Nominální napětí bylo zvoleno jak pro krátké, tak pro dlouhé svary 1MPa.

## 7.2. Výsledky FEM analýzy

### 7.2.1. Jednoosé napětí $\sigma$ v ose x

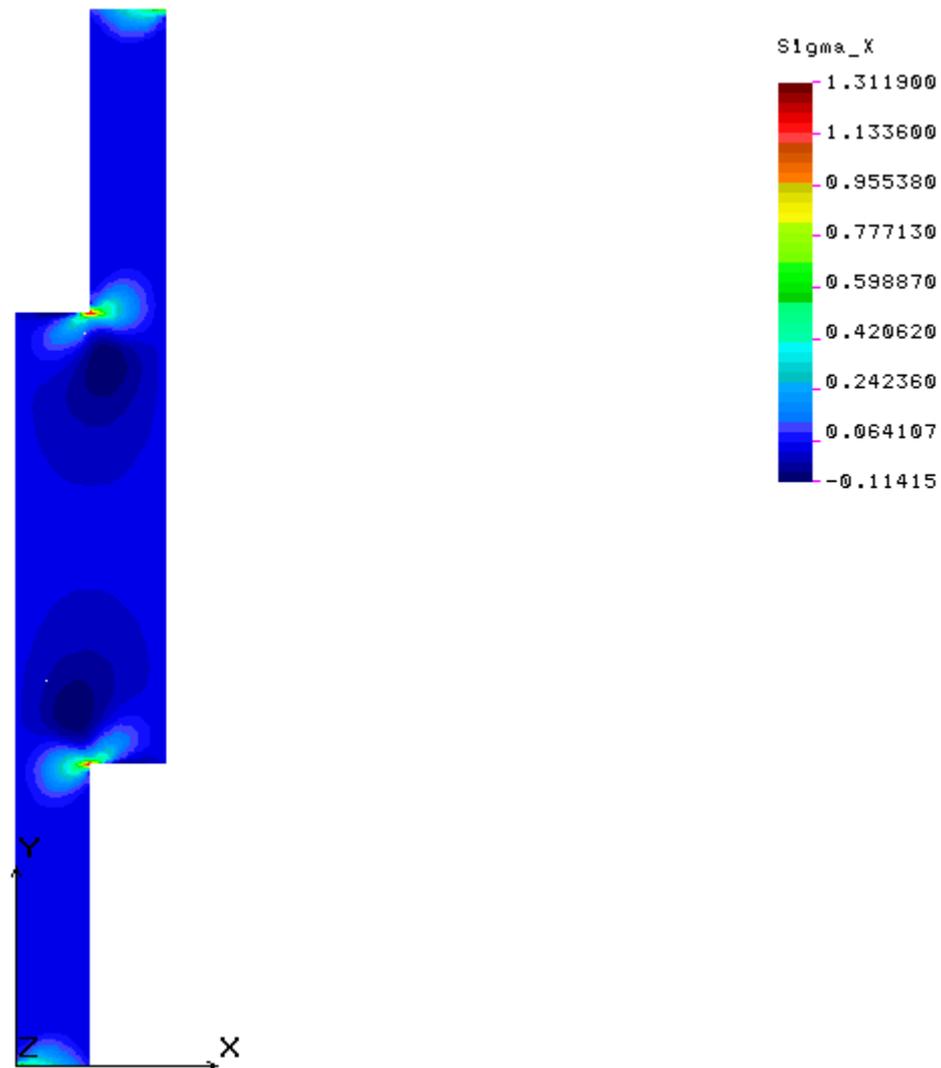
Dlouhý svar:



Obr.20. Jednoosé napětí v ose x ve svarovém spoji, dlouhý svar

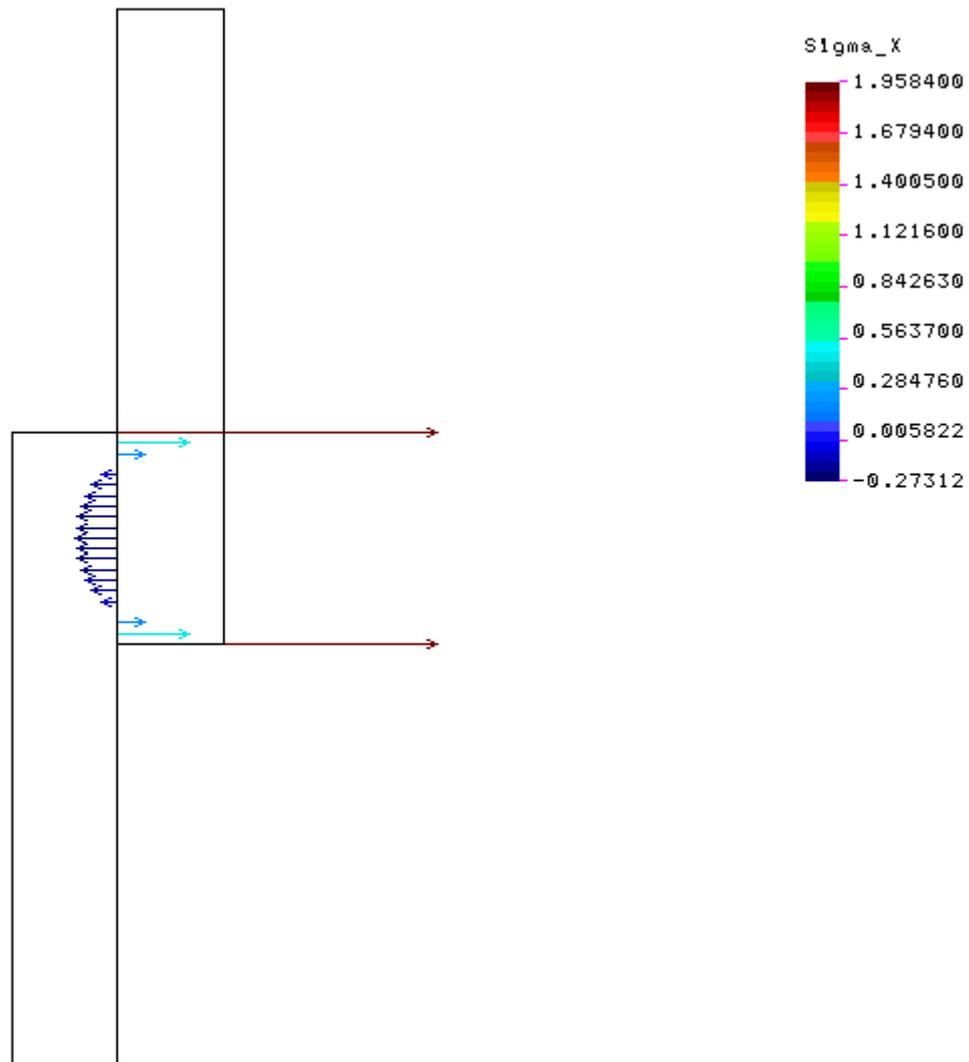
Dle obrázku zjišťujeme, že nejmenší hodnota  $\sigma_x$  se nachází u téměř u konce svaru a jeho hodnota je asi 0,11 MPa a má směr  $-x$ . Z těchto míst směrem ke koncům svaru začne napětí

prudce narůstat, až největší hodnota  $\sigma_x$  nastane na koncích svaru, a to asi 1,31 MPa. Uprostřed svaru není žádné napětí v ose x.



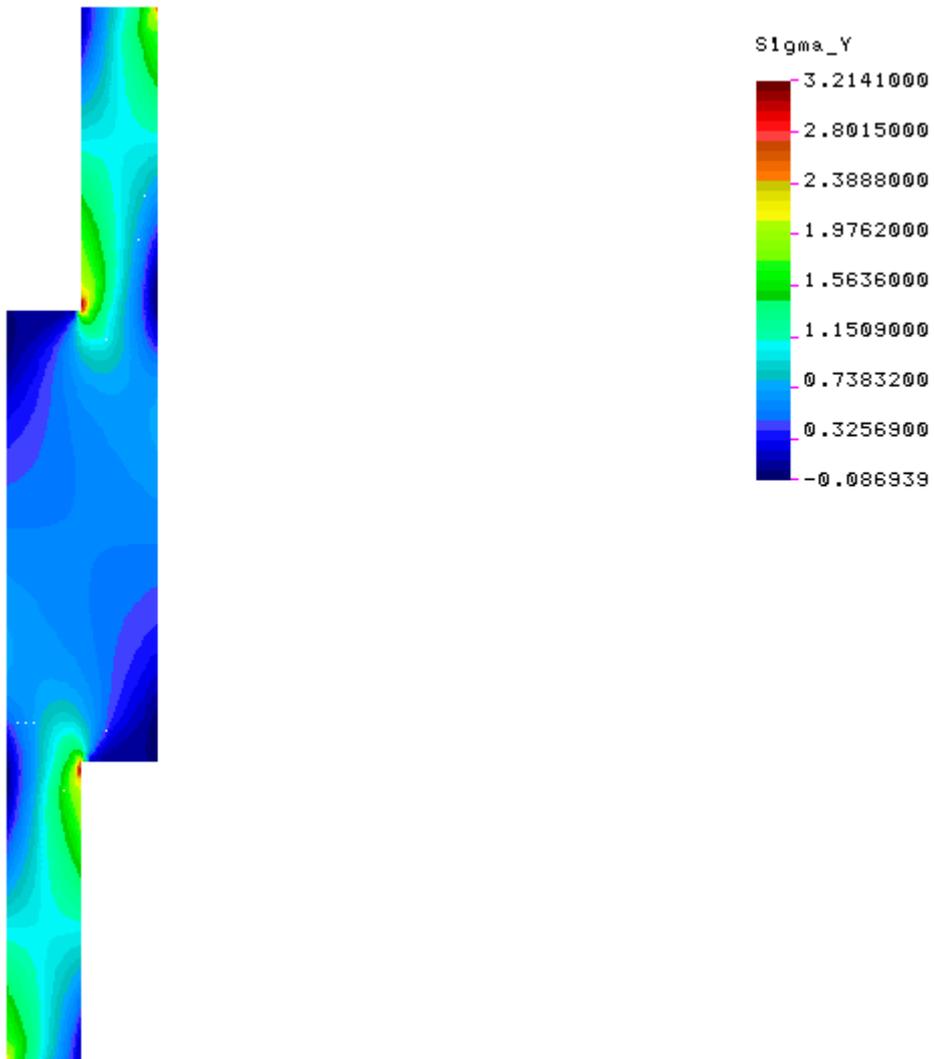
Obr.21. Jednoosé napětí v ose x v celém průřezu, dlouhý svar

Co se týče celého průřezu, nejvyšší napětí se nachází opět na koncích svaru. Vyšší napětí také vzniká na konci zkušebních tyčinek.

Krátký svar:

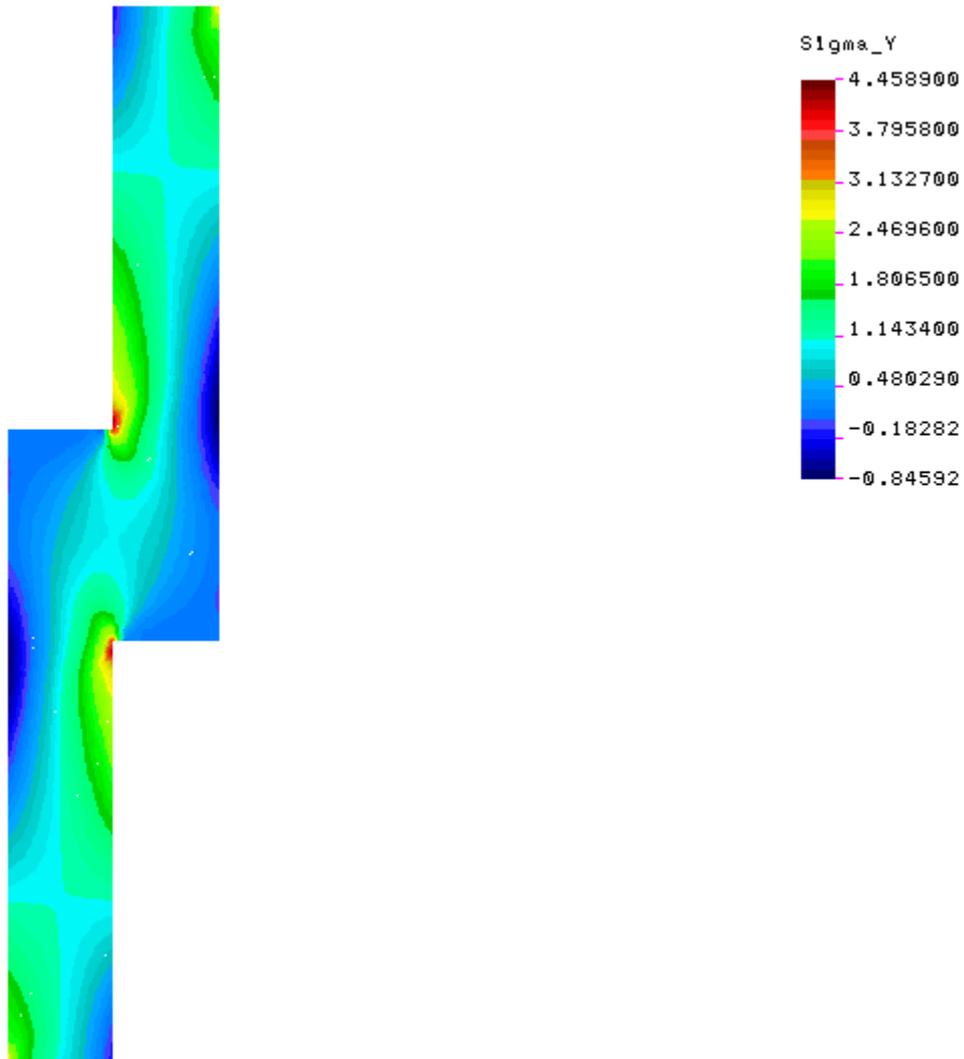
Obr.22. Jednoosé napětí v ose  $x$  ve svarovém spoji, krátký svar

Obrázek poukazuje na to, že uprostřed svaru je nejnižší napětí  $\sigma_x$ , a to ve směru  $-x$ . Jeho hodnota je asi 0,27 MPa. Nejvyšší hodnotu vykazují naopak oba konce svaru, a to asi 1,96MPa. Zde napětí působí ve směru  $+x$ . Napětí je vyšší než u dlouhých svarů.

7.2.2. Jednoosé napětí  $\sigma$  v ose yDlouhý svar:

Obr.23. Jednoosé napětí v ose y v celém průřezu, dlouhý svar

Nejvyšší napětí  $\sigma_y$  se nachází na koncích svaru, jeho hodnota je 3,21 MPa.

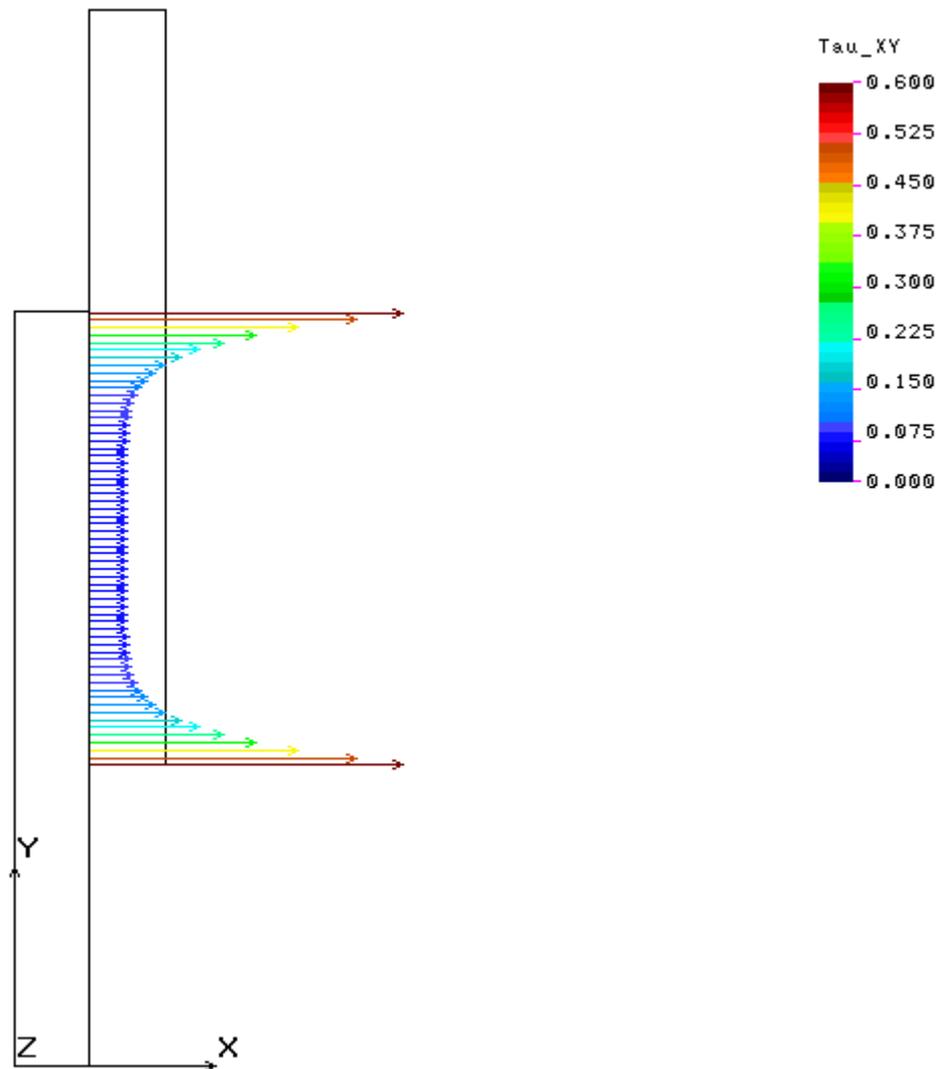
Krátký svar:

Obr.24. Jednoosé napětí v ose y v celém průřezu, krátký svar

Nejvyšší hodnota  $\sigma_y$  se nachází opět na koncích svaru, jeho hodnota je 4,46 MPa. U kratších svarů maximální napětí  $\sigma_y$  také dosahuje vyšší hodnoty.

### 7.2.3. Dvousé napětí $\tau$ v osách x,y

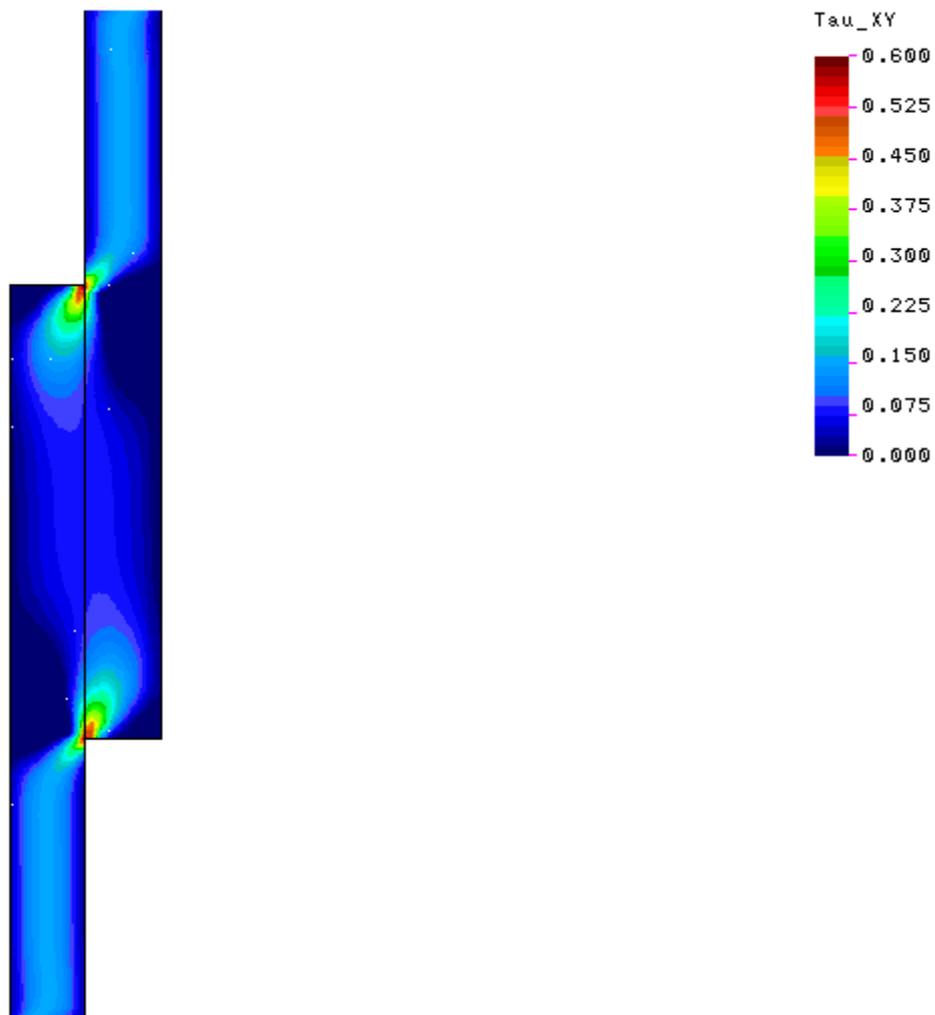
Dlouhý svar:



Obr.25. Dvousé napětí  $\tau_{xy}$  ve svarovém spoji, dlouhý svar

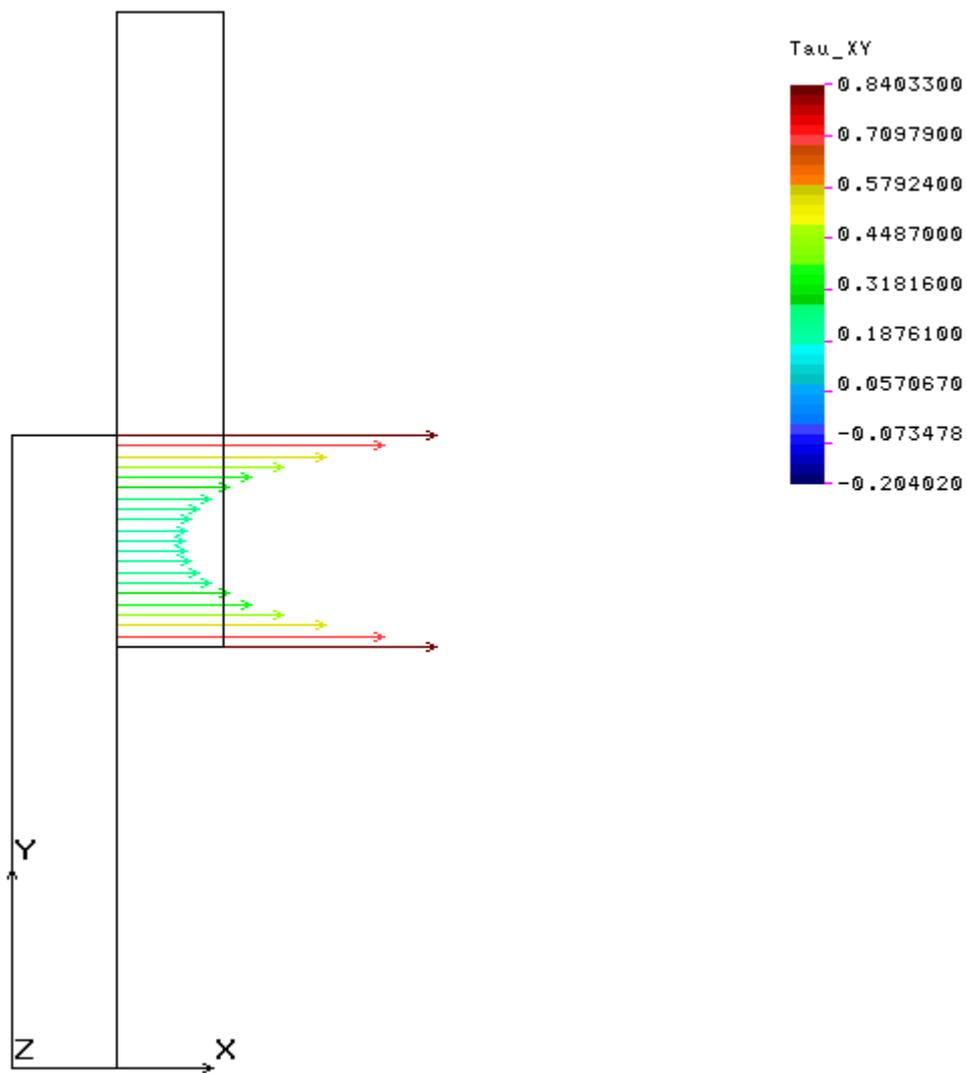
Napětí  $\tau_{xy}$  má u střed svaru nepatrnou hodnotu a směrem je krajům se zvyšuje, na koncích má nejvyšší hodnotu, a to 0,6MPa.





Obr.26. Dvousé napětí  $\tau_{xy}$  v celém průřezu, dlouhý svar

Z obrázku opět můžeme vidět, že i dvousé smykové napětí  $\tau_{xy}$  má nejvyšší hodnotu na koncích svaru, při trhací zkoušce by tedy měl být zkušební vzorek přetržen právě v těchto místech.

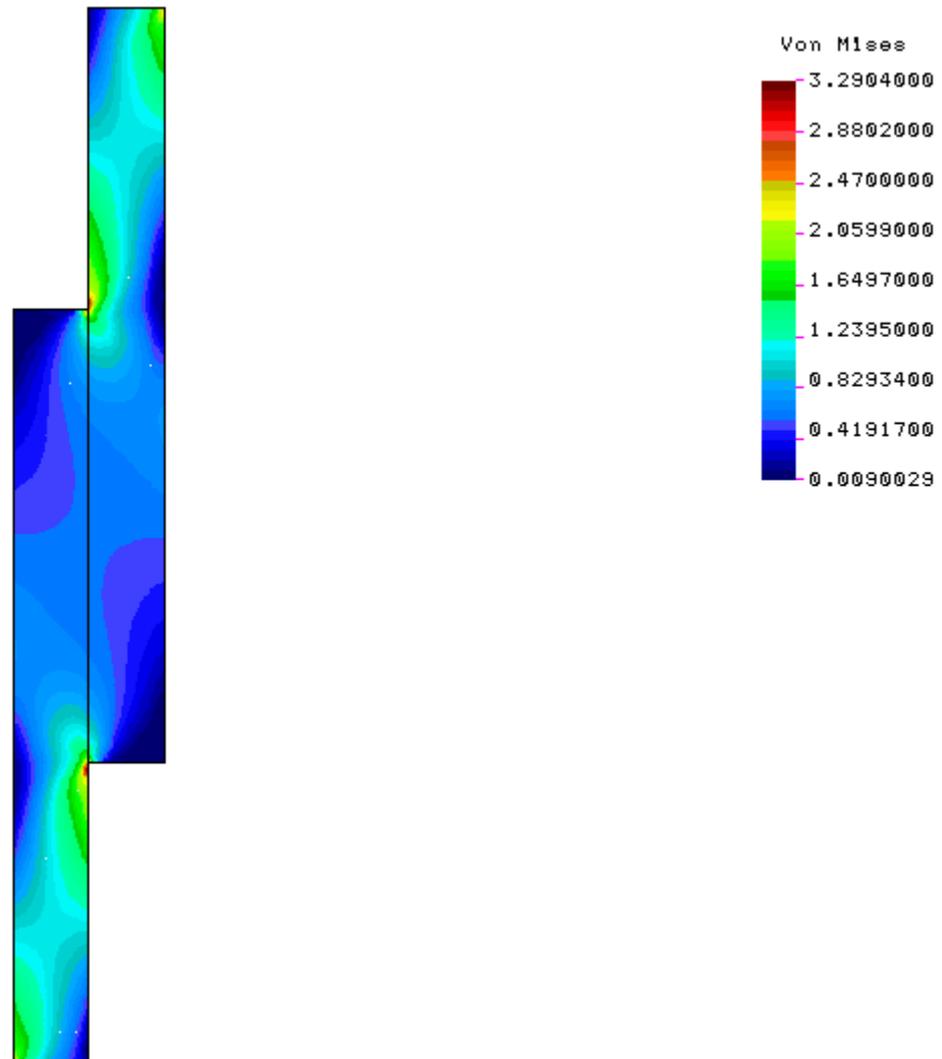
Krátký svar:

Obr.27. Dvouosé napětí  $\tau_{xy}$  ve svarovém spoji, krátký svar

U krátkých svarů se maximální hodnota  $\tau_{xy}$  příliš nezvyšuje, v tomto případě je napětí rovno asi 0,84MPa.

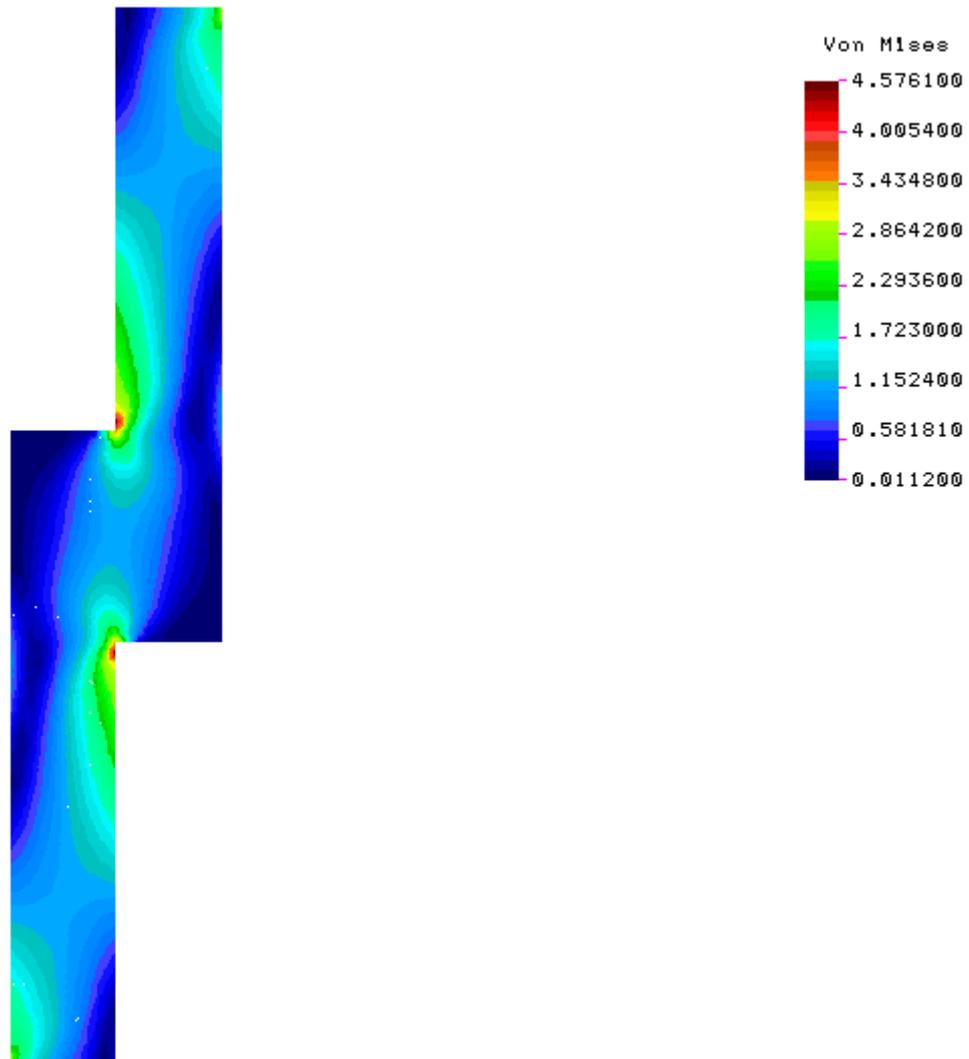
#### 7.2.4. Von Missesovo srovnávací napětí

Dlouhý svar:



*Obr.28. Von Missesovo napětí v celém průřezu, dlouhý svar*

Nejvyšší hodnota Von Missesova napětí se nachází opět na koncích svaru, u dlouhého svaru je jeho maximální velikost 3,29MPa.

Krátký svar:

Obr.29. Von Missesovo napětí v celém průřezu, krátký svar

U krátkých svarů je hodnota Von Missesova napětí také větší než u delších svarů. V tomto případě je jeho nejvyšší hodnota rovna asi 4,58MPa a nachází se opět na konci svaru.

Srovnávací tabulka:

	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$	Von Misses
Dlouhý svar	1,31MPa	3,21MPa	0,6MPa	3,29MPa
Krátký svar	1,96MPa	4,46MPa	0,84MPa	4,58MPa

Tab.5. Tabulka pro srovnání výsledků FEM analýzy

## 8. TRHACÍ ZKOUŠKA

### 8.1. Příprava a průběh trhací zkoušky

Zkouška probíhala na zkušebním stroji Zwick 145 665 v laboratořích ÚVI v budově U5. Program je určen pro automatizované vyhodnocení trhacích zkoušek. Pracuje s měřicí kartou, která zajišťuje jednak měření síly na zkušebním vzorku a jednak měření jeho délky.

Po spuštění programu obsluha nejprve definuje počáteční rozměry vzorku, tvar průřezu a délku nastavenou extenzometrem. Poté je možno zahájit měření, během něhož jsou na displeji zobrazovány průběžné hodnoty síly a délky vzorku. Měření je ukončeno po předem stanovené době nebo na pokyn obsluhy.

Následuje vyhodnocení měření daného zkušebního vzorku. Na monitoru se zobrazí graf závislosti síly na prodloužení nebo graf závislosti napětí na poměrném prodloužení, z něhož uživatel odečte pomocí grafických kurzorů maximální prodloužení a sílu na mezi pevnosti, popřípadě maximální napětí a poměrné prodloužení na mezi pevnosti. Dále zde vymezí úsek křivky pro výpočet modulu pružnosti. Po zadání konečných rozměrů průřezu vzorku má program údaje pro výpočet řady veličin, jako např. maximální sílu, poměrné prodloužení na mezi kluzu, mez pevnosti, mez kluzu, elastická a plastická deformace, tažnost apod. Naměřené a vypočtené hodnoty je možné uložit do souboru nebo vytisknout do protokolu.

### 8.2. Výsledky trhací zkoušky

Zkoušení bylo rozděleno celkem do osmi skupin dle zkoušeného materiálu a dle velikosti svaru. Byla měřena jak závislost napětí  $\sigma$  [MPa] na poměrném prodloužení  $\varepsilon$  [%], tak závislost síly  $F$  [N] na protažení  $\Delta l$  [mm]. Průměrné výsledky jednotlivých skupin jsou rozděleny do příslušných tabulek. Následně budou v závěrečné tabulce srovnávány. V příloze jsou pak zaznamenány všechny grafy závislostí a tabulka výsledků všech smykových vlastností každé zkoušky.

1.skupina: PP + 5% skleněných vláken

Série #1	v	$L_{0, ST}$	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{Rm}$	$F_{Rm}$	$\Delta l_{Rm}$
n = 3	mm/min	mm	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N	mm
$\bar{x}$	10	61,67	8,287	42,73	3,18	964,13	3,93
s	0	2,887	1,363	15,44	1,77	13,4	0,78
{ny}	0	4,68	16,44	36,13	55,61	1,39	19,86

$L_0$	E	$\epsilon_{Rm}$	$\sigma_B$	$\epsilon_B$	$\Delta l_{Fmax}$	$\Delta l_B$
mm	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%	mm	mm
61,67	168,39	2,54	3,01	2,76	1,56	1,67
2,89	35,46	1,68	1,48	2,05	1,01	1,2
4,68	21,06	66,31	49,04	74,46	64,41	71,48

Tab.6. Tabulka odečtených hodnot pro 1.skupinu

Závěr pro 1.skupinu:

1.skupina se skládá ze tří zkušebních tělísek (č.1, č.2 a č.3) o průměrné délce 42,7mm. Průměrná síla  $F_{max}$  na mezi pevnosti má hodnotu 964 N a průměrné prodloužení při  $F_{max}$  je 1,56 mm. Průměrné napětí na mezi pevnosti  $\sigma_{max}$  je 3,18 MPa a průměrné poměrné prodloužení při  $\sigma_{max}$  je 2,54%.

2.skupina: PP + 15% skleněných vláken

Série #2	v	$L_0, s_T$	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{Rm}$	$F_{Rm}$	$\Delta l_{Rm}$
n = 4	mm/min	mm	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N	mm
$\bar{x}$	10	65	8,225	42,5	4	1383,69	4,7
s	0	0	0,9674	5	0,17	67,81	0,49
{ny}	0	0	11,76	11,76	4,27	4,9	10,49

$L_0$	E	$\epsilon_{Rm}$	$\sigma_B$	$\epsilon_B$	$\Delta l_{Fmax}$	$\Delta l_B$
mm	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%	mm	mm
65	353,29	2,45	3,89	2,79	1,6	1,81
0	18,97	0,34	0,23	0,58	0,22	0,38
0	5,37	13,92	6,02	20,81	13,85	20,89

Tab.7. Tabulka odečtených hodnot pro 2.skupinu

Závěr pro 2.skupinu:

2.skupina se skládá ze čtyř zkušebních tělísek (č.4, č.5, č.6 a č.7) o průměrné délce 42,5mm. Průměrná síla na mezi pevnosti  $F_{max}$  má hodnotu 1384 N a průměrné prodloužení při  $F_{max}$  je 1,6 mm. Průměrné napětí na mezi pevnosti  $\sigma_{max}$  je 4 MPa a průměrné poměrné prodloužení při  $\sigma_{max}$  je 2,45%.

3.skupina: PP

Série #3	v	$L_0, s_T$	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{Rm}$	$F_{Rm}$	$\Delta l_{Rm}$
n = 2	mm/min	mm	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N	mm
$\bar{x}$	10	65	8,7	45,5	2,98	1150,06	9,63
s	0	0	0	10,61	0,61	31,54	1,44
{ny}	0	0	0	23,31	20,63	2,74	14,92

$L_0$	E	$\epsilon_{Rm}$	$\sigma_B$	$\epsilon_B$	$\Delta l_{Fmax}$	$\Delta l_B$
mm	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%	mm	mm
65	165,37	4,76	2,96	4,93	3,09	3,2
0	39,36	0,11	0,6	0,05	0,07	0,04
0	23,8	2,25	20,14	1,09	2,2	1,14

Tab.8. Tabulka odečtených hodnot pro 3.skupinu

Závěr pro 3.skupinu:

3.skupina se skládá ze dvou zkušebních tělísek (č.8 a č.9) o průměrné délce 45,5mm. Průměrná síla na mezi pevnosti  $F_{max}$  má hodnotu 1150 N a průměrné prodloužení při  $F_{max}$  je 3,09 mm. Průměrné napětí na mezi pevnosti  $\sigma_{max}$  je 2,98 MPa a průměrné poměrné prodloužení při  $\sigma_{max}$  je 4,76%.



4.skupina: PP + 15% mastku

Série #4	v	$L_{0, ST}$	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{Rm}$	$F_{Rm}$	$\Delta l_{Rm}$
n = 4	mm/min	mm	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N	mm
$\bar{x}$	10	65	7,75	43,13	3,03	1003,65	4,41
s	0	0	0,6137	2,394	0,41	26,33	0,42
{ny}	0	0	7,92	5,55	13,62	2,62	9,52

$L_0$	E	$\epsilon_{Rm}$	$\sigma_B$	$\epsilon_B$	$\Delta l_{Fmax}$	$\Delta l_B$
mm	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%	mm	mm
65	223,83	2,18	3,02	2,23	1,42	1,45
0	19,3	0,49	0,4	0,54	0,32	0,35
0	8,62	22,33	13,09	24,34	22,64	24,05

Tab.9. Tabulka odečtených hodnot pro 4.skupinu

Závěr pro 4.skupinu:

4.skupina se skládá ze čtyř zkušebních tělísek (č.10, č.11, č.12 a č.13) o průměrné délce 43,1mm. Průměrná síla na mezi pevnosti  $F_{max}$  má hodnotu 1004 N a průměrné prodloužení při  $F_{max}$  je 1,42 mm. Průměrné napětí na mezi pevnosti  $\sigma_{max}$  je 3,03 MPa a průměrné poměrné prodloužení při  $\sigma_{max}$  je 2,18%.

**Krátké svary:****5.skupina: PP + 5% skleněných vláken**

Série #5	v	$L_0, s_T$	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{Rm}$	$F_{Rm}$	$\Delta l_{Rm}$
n = 3	mm/min	mm	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N	mm
$\bar{x}$	10	65	9,133	22,63	2,83	580,4	3,01
s	0	0	0,3512	1,002	0,53	76,12	0,68
{ny}	0	0	3,85	4,43	18,78	13,11	22,63

$L_0$	E	$\varepsilon_{Rm}$	$\sigma_B$	$\varepsilon_B$	$\Delta l_{Fmax}$	$\Delta l_B$
mm	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%	mm	mm
65	288,97	1,89	1,35	4,36	1,23	2,83
0	42,79	0,77	1,42	2,88	0,49	1,87
0	14,81	40,53	105	65,91	40,04	66,14

Tab.10. Tabulka odečtených hodnot pro 5.skupinu

Závěr pro 5.skupinu:

5.skupina se skládá ze tří zkušebních tělísek (č.14, č.15 a č.16) o průměrné délce 22,6 mm. Průměrná síla na mezi pevnosti  $F_{max}$  má hodnotu 580 N a průměrné prodloužení při  $F_{max}$  je 1,23 mm. Průměrné napětí na mezi pevnosti  $\sigma_{max}$  je 2,83 MPa a průměrné poměrné prodloužení je 1,89%.

6.skupina: PP + 15% skleněných vláken

Série #6	v	$L_0, ST$	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{Rm}$	$F_{Rm}$	$\Delta l_{Rm}$
n = 4	mm/min	mm	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N	mm
$\bar{x}$	10	65	9,025	12,88	5,49	489,25	2,15
s	0	0	0,6397	6,819	3,33	55,06	0,76
{ny}	0	0	7,09	52,97	60,57	11,25	35,43

$L_0$	E	$\epsilon_{Rm}$	$\sigma_B$	$\epsilon_B$	$\Delta l_{Fmax}$	$\Delta l_B$
mm	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%	mm	mm
65	825,58	1,07	2,72	2,22	0,7	1,44
0	168,82	0,86	1,51	1,82	0,56	1,19
0	20,45	80,16	55,71	82,21	79,66	82,46

Tab.11. Tabulka odečtených hodnot pro 6.skupinu

Závěr pro 6.skupinu:

6.skupina se skládá ze čtyř zkušebních tělísek (č.17, č.18, č.19, č.20) o průměrné délce 13 mm. Průměrná síla na mezi pevnosti  $F_{max}$  má hodnotu 489 N a průměrné prodloužení při  $F_{max}$  je 0,7 mm. Průměrné napětí na mezi pevnosti  $\sigma_{max}$  je 5,49 MPa a průměrné poměrné prodloužení při  $\sigma_{max}$  je 1,07%.

7.skupina: PP

Série #7	v	$L_{0, ST}$	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{Rm}$	$F_{Rm}$	$\Delta l_{Rm}$
n = 4	mm/min	mm	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N	mm
$\bar{x}$	10	65	7,975	20,92	4,45	690,72	3,02
s	0	0	0,55	2,03	0,52	38,98	0,32
{ny}	0	0	6,9	9,7	11,61	5,64	10,5

$L_0$	E	$\epsilon_{Rm}$	$\sigma_B$	$\epsilon_B$	$\Delta l_{Fmax}$	$\Delta l_B$
mm	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%	mm	mm
65	460,7	1,44	4,29	1,57	0,94	1,01
0	33,13	0,24	0,55	0,22	0,15	0,14
0	7,19	16,76	12,92	13,74	16,23	14,19

Tab.12. Tabulka odečtených hodnot pro 7.skupinu

Závěr pro 7.skupinu:

7.skupina se skládá ze čtyř zkušebních tělísek (č.21, č.22, č.23 a č.24) o průměrné délce 21 mm. Průměrná síla na mezi pevnosti  $F_{max}$  má hodnotu 691 N a průměrné prodloužení při  $F_{max}$  je 0,94 mm. Průměrné napětí na mezi pevnosti  $\sigma_{max}$  je 4,45 MPa a průměrné poměrné prodloužení při  $\sigma_{max}$  je 1,44%.

8.skupina: PP + 15% mastku

Série #8	v	$L_{0, ST}$	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{Rm}$	$F_{Rm}$	$\Delta l_{Rm}$
n = 3	mm/min	mm	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N	mm
$\bar{x}$	10	65	8,433	15,27	5,34	684,41	3,49
s	0	0	0,6028	2,411	0,74	129,8	0,99
{ny}	0	0	7,15	15,79	13,92	18,96	28,34

$L_0$	E	$\epsilon_{Rm}$	$\sigma_B$	$\epsilon_B$	$\Delta l_{Fmax}$	$\Delta l_B$
mm	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%	mm	mm
65	570,27	1,55	4,4	2,34	1,01	1,53
0	177,73	0,65	1,88	0,62	0,42	0,4
0	31,17	41,67	42,83	26,63	41,64	26,53

Tab.13. Tabulka odečtených hodnot pro 8.skupinu

Závěr pro 8.skupinu:

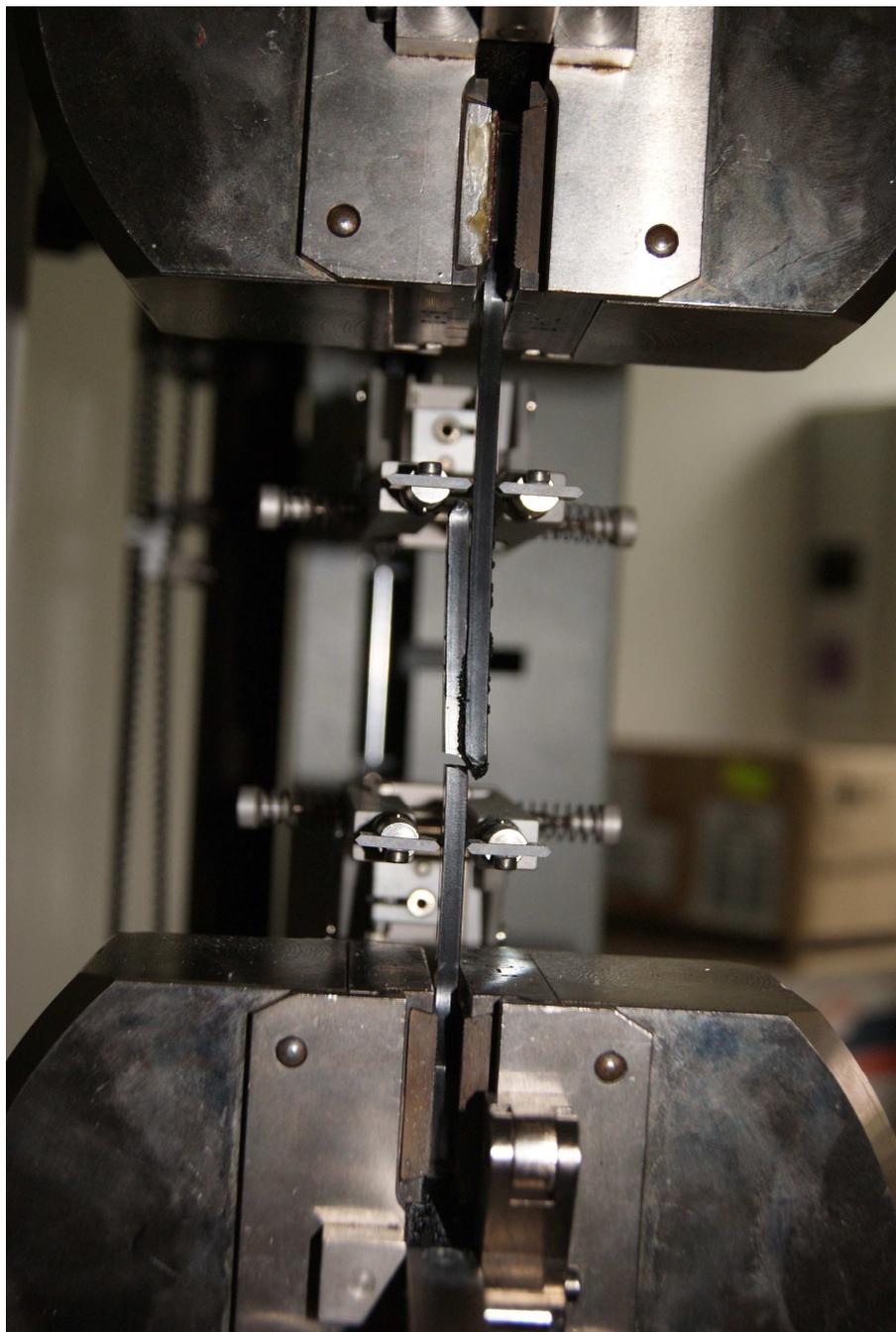
8.skupina se skládá ze tří zkušebních tělísek (č.25, č.26 a č.27) o průměrné délce 15 mm. Průměrná síla na mezi pevnosti  $F_{max}$  má hodnotu 684 N a průměrné prodloužení při  $F_{max}$  je 1,01 mm. Průměrné napětí na mezi pevnosti  $\sigma_{max}$  je 5,34 MPa a průměrné poměrné prodloužení při  $\sigma_{max}$  je 1,55%.

Tabulka srovnání výsledků:

Skupina	Materiál	F [N]	$\Delta l$ [mm]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	svar
1	PP+5%GF	964	1,56	3,18	2,54	dlouhý
2	PP+5%GF	1384	1,6	4	2,45	dlouhý
3	PP	1150	3,09	2,98	4,76	dlouhý
4	PP+15%M	1004	1,42	3,03	2,18	dlouhý
5	PP+5%GF	580	1,23	2,83	1,89	krátký
6	15%GF	489	0,7	5,49	1,07	krátký
7	PP	691	0,94	4,45	1,44	krátký
8	PP+15%M	684	1,01	5,34	1,55	krátký

*Tab.14. Srovnání výsledků jednotlivých skupin*

Ukázky typů přetržení testovaných vzorků:



*Obr.30. Přetržení vzorku, typ 1*



*Obr.31. Přetržení vzorku, typ 2*



*Obr.32. Přetržení vzorku, typ 3*



## ZÁVĚR

Tato diplomová práce shrnuje základní poznatky při studiu pevnosti spojů termoplastů svařovaných ultrazvukovým svařováním.

V teoretické části popisuje diplomová práce technologii svařování, výhody a nevýhody této technologie a užití svařovacích metod v praxi. Dále nás pak seznamuje s dvěma typy svařování, a to se svařováním laserem a svařováním ultrazvukem. Právě druhá metoda svařování je užitá v praktické části pro studium pevnosti svarových spojů. Dále pak teoretická část obsahuje přehled použitých materiálů a také stroje použité jak při výrobě, tak při trhací zkoušce, která stanovuje výsledné hodnoty. Poslední část teoretické části nám ukazuje profil společnosti PLASTIKA a.s., která se podílela při výrobě zkušebních tělísek. Hlavním cílem praktické části bylo zjistit, jaký pevnostní rozdíl nastává při zatěžování krátkých a delších svarových spojů. Výsledky byly prezentovány jak na FEM analýze, kde byly svarové spoje vymodelovány, tak i na trhací zkoušce. FEM analýza poukázala na důležité výsledky, které byly ověřeny i při trhací zkoušce. Bylo zjištěno, že největší napětí při zatěžování se nahází jak u kratších, tak i delších svarů na konci svarů, s největší pravděpodobností je tedy jasné, že přetržení by mělo nastat tak, jak je poukázáno na Obr. 30. Ve většině případů se tak i stalo, vznikly však i další dva případy, jako můžeme vidět na Obr. 31 a Obr. 32. Tyto případy jsou zastoupeny však pouze v minimu a dle mého názoru způsobeny nedokonalým svařením. Dalším poznatkem je to, že ačkoli se na první pohled jeví, že menší svarový spoj musí mít menší pevnost, výsledky tuto skutečnost vyvrátily. Jak kratší, tak i delší svarové spoje vykazovaly řádově stejnou pevnost. Vyplyvá tedy, že velikost svarového spoje celkovou pevnost příliš neovlivňuje, rozdíly by začaly nastávat až v případech například několikanásobně větších spojů oproti několikanásobně menším spojům, než bylo v našem případě.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:**

[1] MLEZIVA, J. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*.

1st ed. Praha :Sobotáles, 1993

[2] *Firma PLASTIKA a.s.* [online]. [cit. 2010-05-04] Dostupný z www:

<http://www.plastika.cz>

[3] *Plasty pro strojaře* [online]. [cit. 2010-05-04]. Dostupný z

www:[http://www.fp.tul.cz/kch/texty/Fakulta\\_strojni/Prednasky\\_SF/plasty\\_pro\\_strojare.doc](http://www.fp.tul.cz/kch/texty/Fakulta_strojni/Prednasky_SF/plasty_pro_strojare.doc)

[4] *Svařování termoplastů laserem* [online] [cit. 2010] Dostupný z

<http://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-termoplastu-laserem>

[5] *Ultrazvukové svařování* [online] [cit.2010] Dostupný z

<http://www.ultratech.cz/ultrazvukove-svarovani-plastu/>

[6] *Skleněná vlákna* [online] [cit. 2010-05-02] Dostupný z

<http://www.czechdesign.cz/index.php?lang=1&clanek=34&status=c>

[7] LAMBOROVÁ, R. *Technologie laserového paprsku : seminární práce*. Zlín : FT UTB, 2008. 22 p.

[8] KREČMEROVÁ, Z. *LBM - technologie laserového paprsku : seminární práce*. Zlín : FT UTB, 2008. 25 p.

[9] BARTOŠ, V. *Optimalizace svařovacích parametrů pro technologii svařování laserem u vybraných termoplastů: diplomová práce*. Zlín : FT UTB, 2009

[10] VESELÝ, K. *Polymery*. Brno : ČSPCH - Česká společnost průmyslové chemie - pobočka , UNIPLAST Brno, 1992.

[11] *Laser* [online]. [cit. 2010-05-02]. Dostupný z www: <http://referaty.atlas.sk/prirodne-vedy/fyzika-a-astronomia/2521/?print=1>

[12] EHRENSTEIN, G. W. *Handbuch Kunststoff - Verbindungstechnik*. 1st ed. München : Carl Hanser Verlag, 2004. 710 p. ISBN 3-446-22340-1.

[13] *Svařování* [online] [cit. 2010-08-02] Dostupný z www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD>

[14] *Ultrazvukové svařování* [online] [cit. 2010-05-02] Dostupný z www: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-06-41.pdf>

[15] *Matrice* [online] [cit. 2010-08-02] Dostupný z www: [www.volny.cz/zkorinek/matrice.pdf](http://www.volny.cz/zkorinek/matrice.pdf)

[16] *Skleněná vlákna* [online] [cit. 2010-08-02] Dostupný z www: <http://www.czechdesign.cz/index.php?lang=1&clanek=34&status=c>

[17] ZÁMORSKÝ, Z. *Nauka o polymerech*. Brno : VUT, 1980.

[18] *Polyethylén a polypropylén* [online] [cit. 2010-08-02] Dostupný z www: <http://ireferaty.lidovky.cz/303/4851/Polyethylen-a-Polypropylen>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$v$	rychlost posuvu čelistí
$L_{0,ST}$	referenční vzdálenost na extenzometru
$a_0$	šířka svaru
$b_0$	délka svaru
$\sigma_{Rm}$	napětí na mezi pevnosti
$F_{Rm}$	síla na mezi pevnosti
$E$	modul pružnosti
$\sigma_B$	napětí při tržení
$\Delta l_{Rm}$	protažení na mezi pevnosti
$\varepsilon_{Rm}$	poměrné prodloužení na mezi pevnosti
$\varepsilon_B$	poměrné prodloužení při přetržení
$\Delta l_{Fmax}$	protažení při maximální síle
$\Delta l_B$	protažení při přetržení
$\bar{x}$	aritmetický průměr hodnot
$s$	směrodatná odchylka
$\{ny\}$	variační koeficient
PP	polypropylén
GF	glassfibril (skleněné vlákno)
M	mastek

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rozdíl mezi světlem vyzařovaným laserem a žárovkou</i> .....	13
<i>Obr.2. Princip transmisivního svařování</i> .....	16
<i>Obr.3. Uspořádání pro svařování plastických materiálů ultrazvukem</i> .....	20
<i>Obr.4. Závislost pevnosti v tahu na maximální pracovní teplotě u vybraných druhů materiálů</i> .....	27
<i>Obr.5. Konstrukce šneku pro plastikaci dlouhovláknových kompozitů</i> .....	32
<i>Obr.6. Ultrazvukové svařovací zařízení Branson</i> .....	33
<i>Obr.7. Ultrazvukové svařovací zařízení Branson, ovládací panel</i> .....	34
<i>Obr.8. Upínací zařízení zkušebního stroje</i> .....	35
<i>Obr.9. Zkušební stroj s počítačem vyhodnocujícím jeho činnost</i> .....	36
<i>Obr.10. Vstřikolis Engel firmy PLASTIKA a.s.</i> .....	38
<i>Obr.11. Ruční montáž dílů pro automobilový průmysl</i> .....	39
<i>Obr.12. Zařízení na svařování ultrazvukem</i> .....	40
<i>Obr.13. Robot pro lakování plastových dílů</i> .....	41
<i>Obr.14. Zařízení Rofin Sinar pro potisk laserem</i> .....	42
<i>Obr.15. Tampoprint - potisk klávesnice</i> .....	43
<i>Obr.16. Horká ražba</i> .....	44
<i>Obr.17. Model tyčinek určených pro svařování, CATIA V5R18</i> .....	47
<i>Obr.18. Model krátkého svaru, CATIA V5R18</i> .....	48
<i>Obr.19. Model dlouhého svaru, CATIA V5R18</i> .....	48
<i>Obr.20. Jednoosé napětí v ose x ve svarovém spoji, dlouhý svar</i> .....	49
<i>Obr.21. Jednoosé napětí v ose x v celém průřezu, dlouhý svar</i> .....	50
<i>Obr.22. Jednoosé napětí v ose x ve svarovém spoji, krátký svar</i> .....	51
<i>Obr.23. Jednoosé napětí v ose y v celém průřezu, dlouhý svar</i> .....	52
<i>Obr.24. Jednoosé napětí v ose y v celém průřezu, krátký svar</i> .....	53
<i>Obr.25. Dvouosé napětí <math>\tau_{xy}</math> ve svarovém spoji, dlouhý svar</i> .....	54
<i>Obr.26. Dvouosé napětí <math>\tau_{xy}</math> v celém průřezu, dlouhý svar</i> .....	55

<i>Obr.27. Dvouosé napětí <math>\tau_{xy}</math> ve svarovém spoji, krátký svar .....</i>	56
<i>Obr.28. Von Missesovo napětí v celém průřezu, dlouhý svar .....</i>	57
<i>Obr.29. Von Missesovo napětí v celém průřezu, krátký svar .....</i>	58
<i>Obr.30. Přetržení vzorku, typ 1 .....</i>	69
<i>Obr.31. Přetržení vzorku, typ 2 .....</i>	70
<i>Obr.32. Přetržení vzorku, typ 3 .....</i>	70

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab.1. Srovnávací tabulka laserů pro svařování plastů .....</i>	14
<i>Tab.2. Možnosti ultrazvukového svařování v blízkém i vzdáleném poli .....</i>	20
<i>Tab.3. Důležité vlastnosti při výběru vhodné pryskyřice .....</i>	26
<i>Tab.4. Základní údaje společnosti PLASTIKA a.s. ....</i>	37
<i>Tab.5. Tabulka pro srovnání výsledků FEM analýzy .....</i>	58
<i>Tab.6. Tabulka odečtených hodnot pro 1.skupinu .....</i>	60
<i>Tab.7. Tabulka odečtených hodnot pro 2.skupinu .....</i>	61
<i>Tab.8. Tabulka odečtených hodnot pro 3.skupinu .....</i>	62
<i>Tab.9. Tabulka odečtených hodnot pro 4.skupinu .....</i>	63
<i>Tab.10. Tabulka odečtených hodnot pro 5.skupinu .....</i>	64
<i>Tab.11. Tabulka odečtených hodnot pro 6.skupinu .....</i>	65
<i>Tab.12. Tabulka odečtených hodnot pro 7.skupinu .....</i>	66
<i>Tab.13. Tabulka odečtených hodnot pro 8.skupinu .....</i>	67
<i>Tab.14. Srovnání výsledků jednotlivých skupin .....</i>	68

## SEZNAM PŘÍLOH:

Příloha P I: Grafy výsledků na trhacím stroji pro PP + 5% GF (dlouhý svar)

Příloha P II: Grafy výsledků na trhacím stroji pro PP + 15% GF (dlouhý svar)

Příloha P III: Grafy výsledků na trhacím stroji pro PP (dlouhý svar)

Příloha P IV: Grafy výsledků na trhacím stroji pro PP + 15% M (dlouhý svar)

Příloha P V: Grafy výsledků na trhacím stroji pro PP + 5% GF (krátký svar)

Příloha P VI: Grafy výsledků na trhacím stroji pro PP + 15% GF (krátký svar)

Příloha P VII: Grafy výsledků na trhacím stroji pro PP (krátký svar)

Příloha P VIII: Grafy výsledků na trhacím stroji pro PP + 15% M (krátký svar)

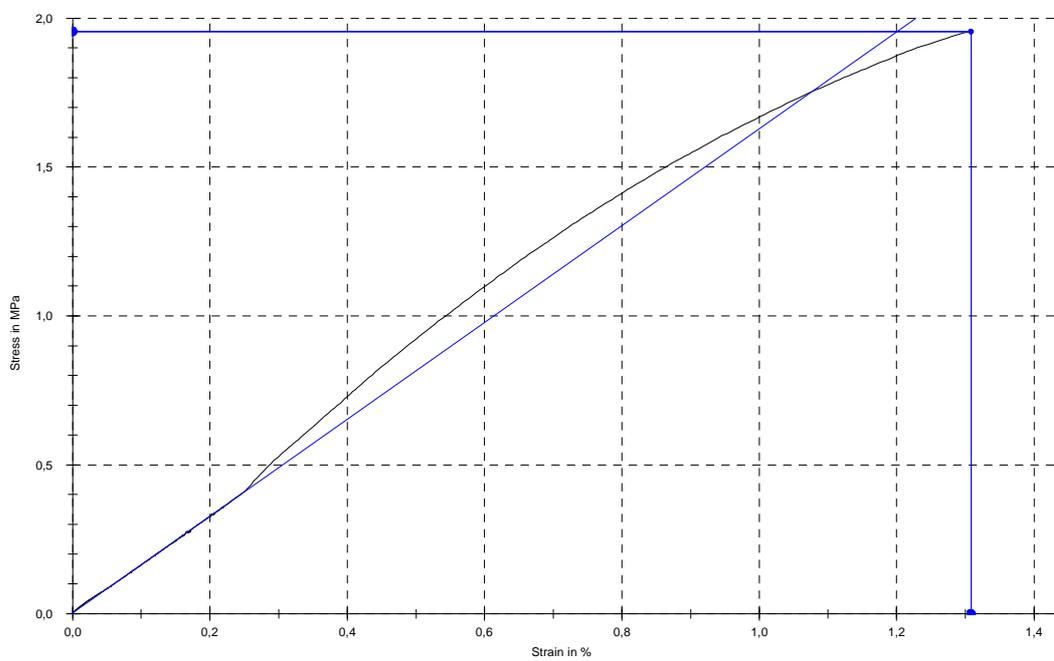
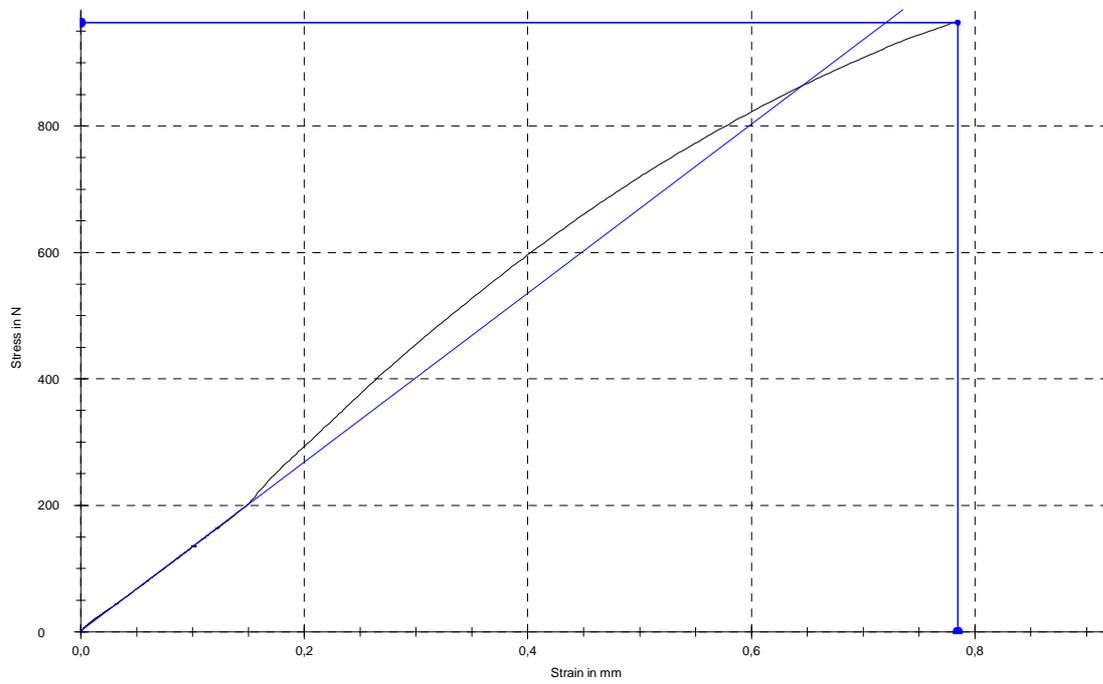
Příloha P IX: Tabulka výsledků jednotlivých zkušebních vzorků

Příloha P X: Výrobní výkres zkušební tyčinky

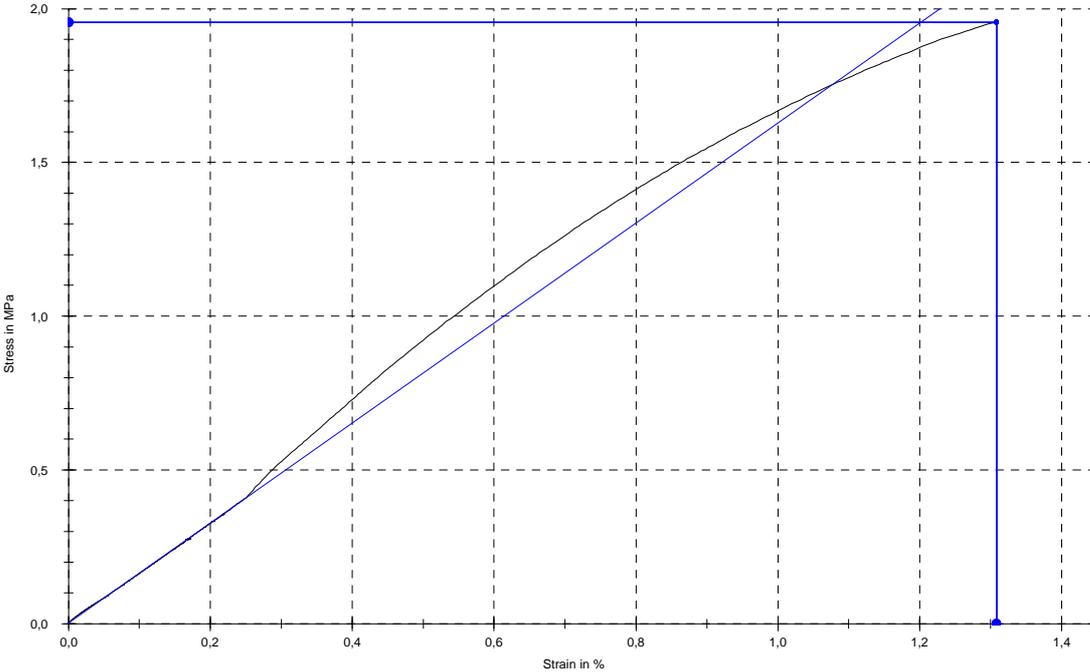
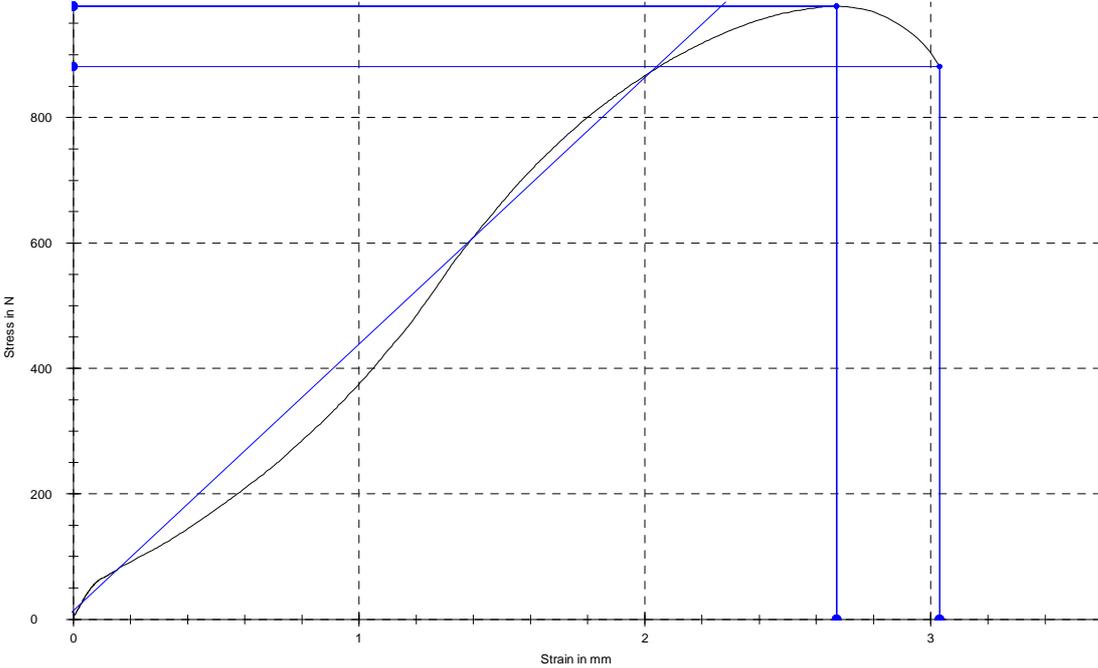


**PŘÍLOHA P I: GRAFY VÝSLEDKŮ NA TRHACÍM STROJI PRO PP + 5% GF  
(DLOUHÝ SVAR)**

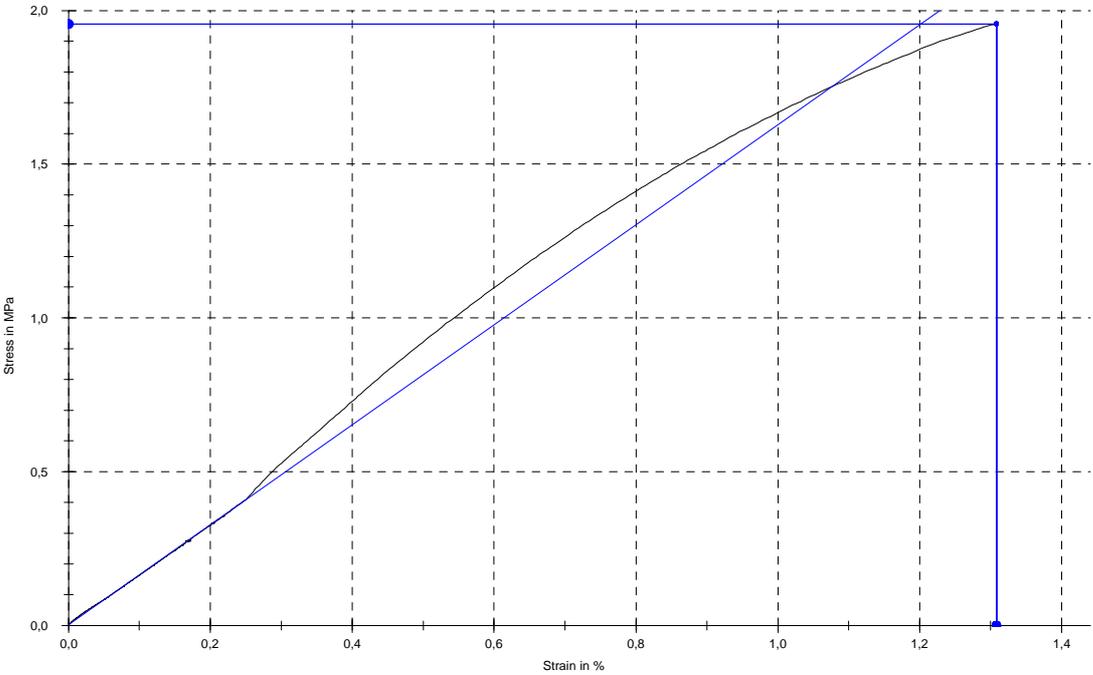
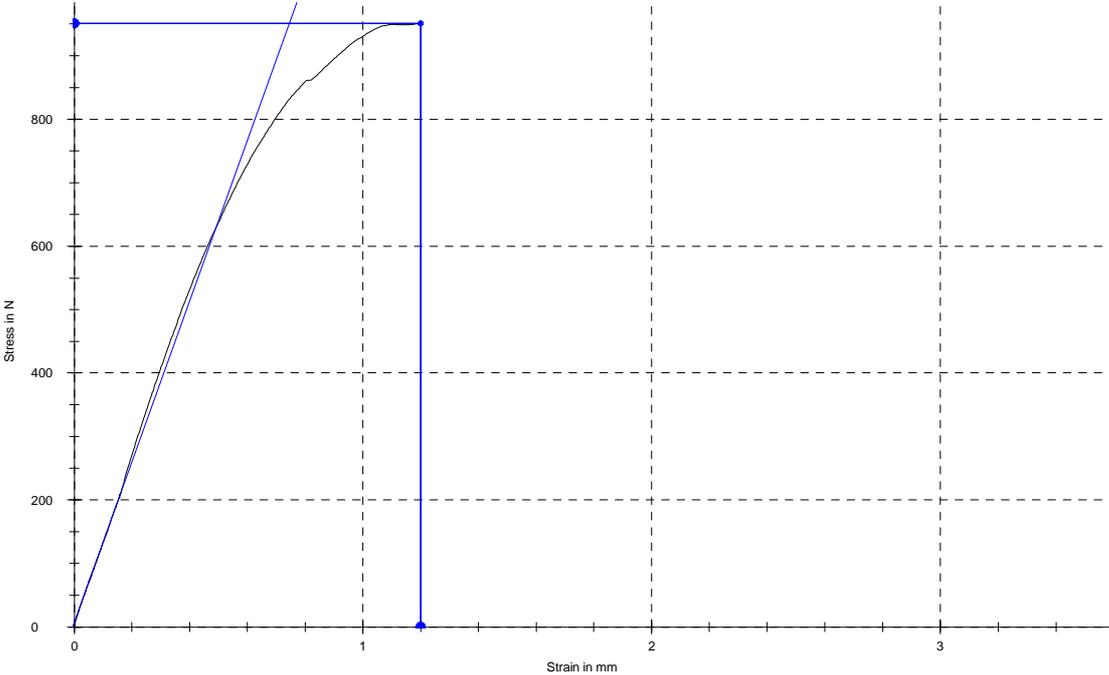
Zkušební vzorek č.1:



Zkušební vzorek č. 2:

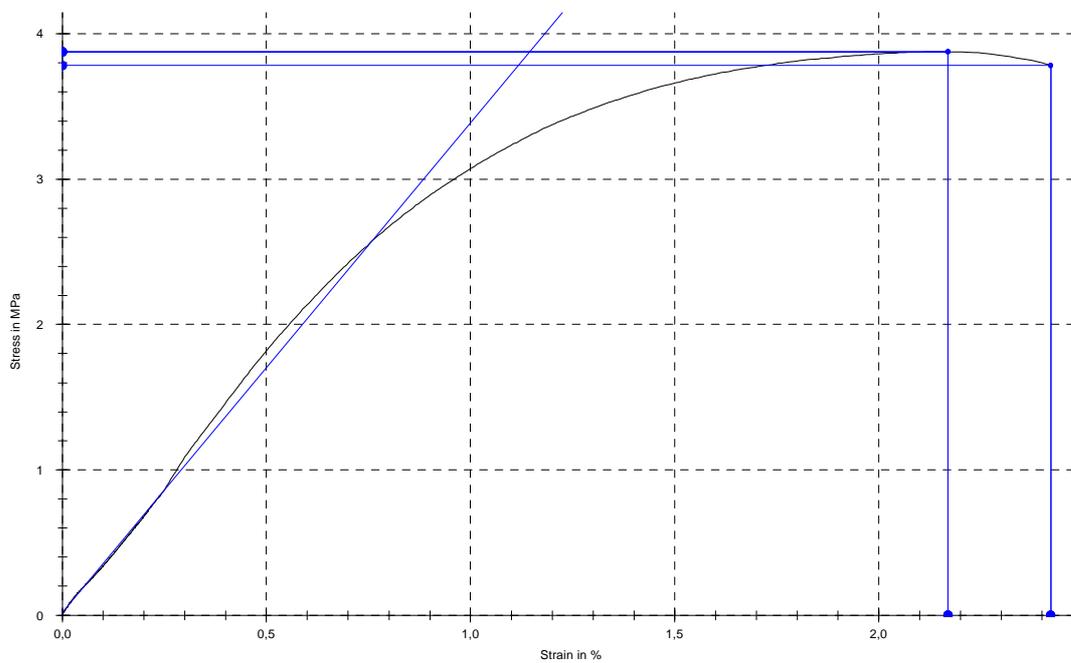
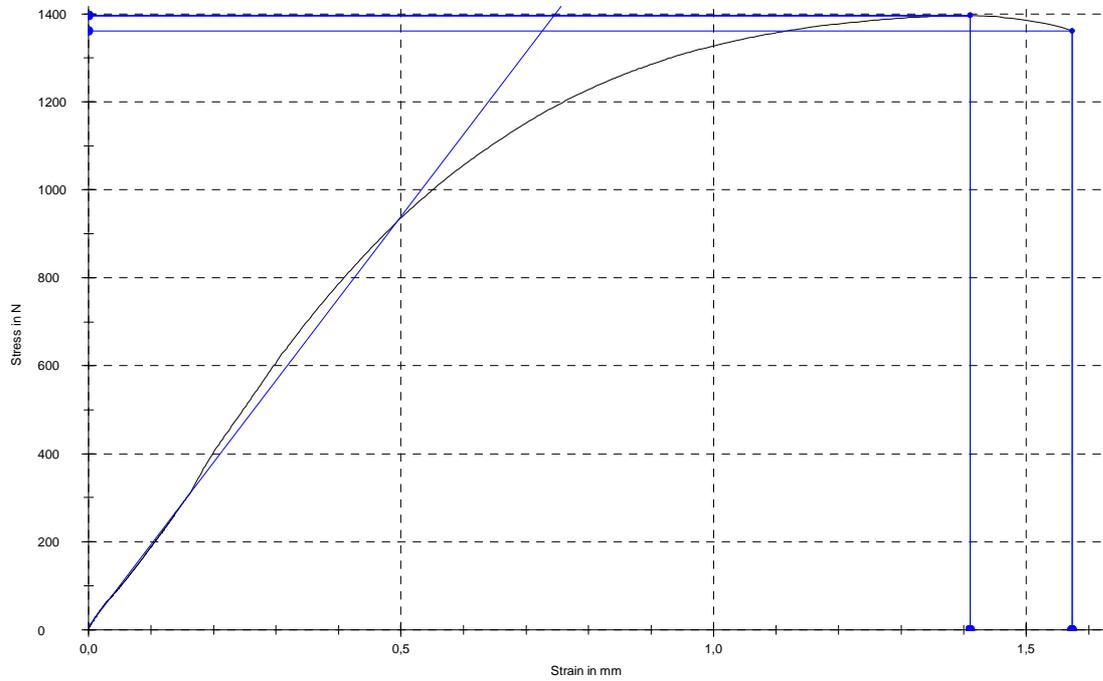


Zkušební vzorek č.3:

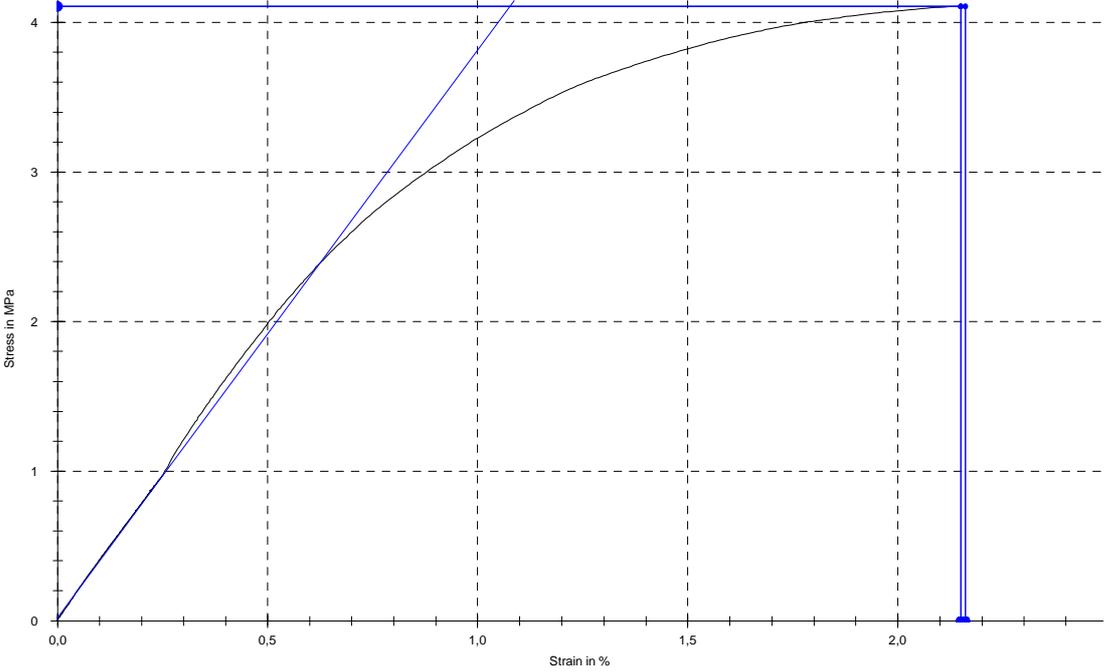
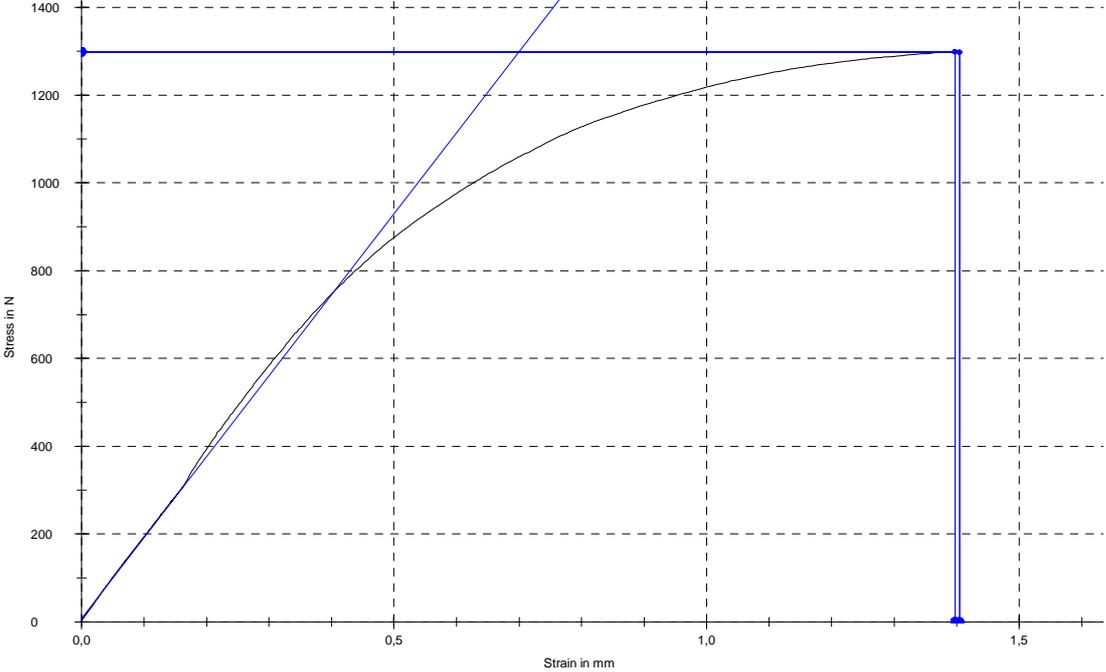


**PŘÍLOHA P II: GRAFY VÝSLEDKŮ NA TRHACÍM STROJI PRO PP +15%GF  
(DLOUHÝ SVAR)**

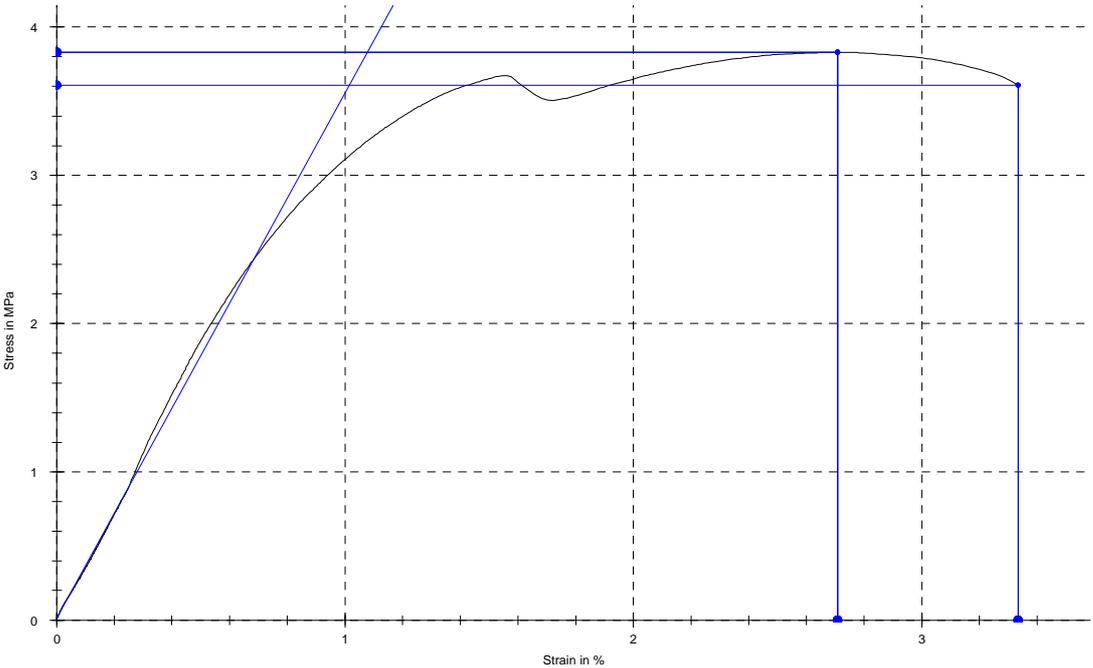
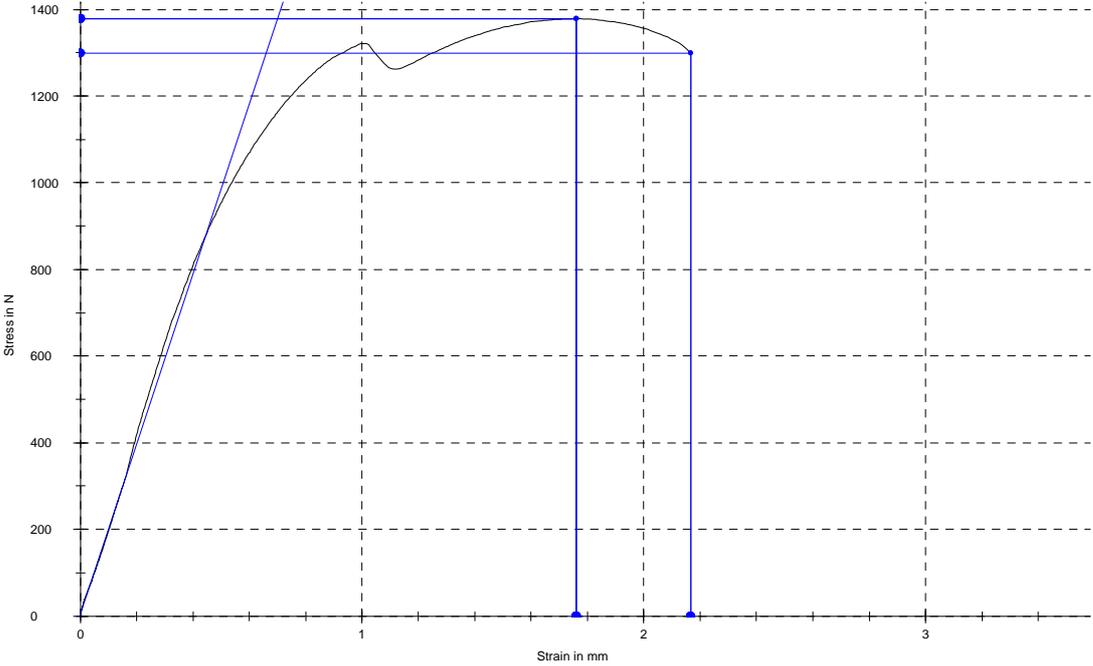
Zkušební vzorek č.4:



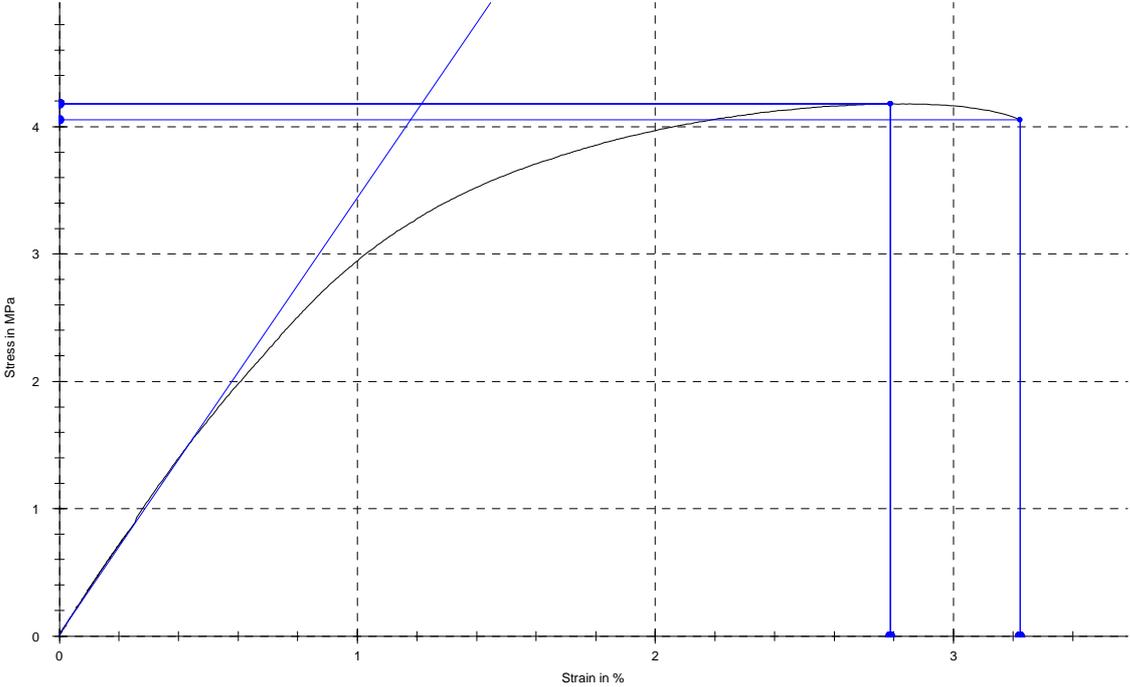
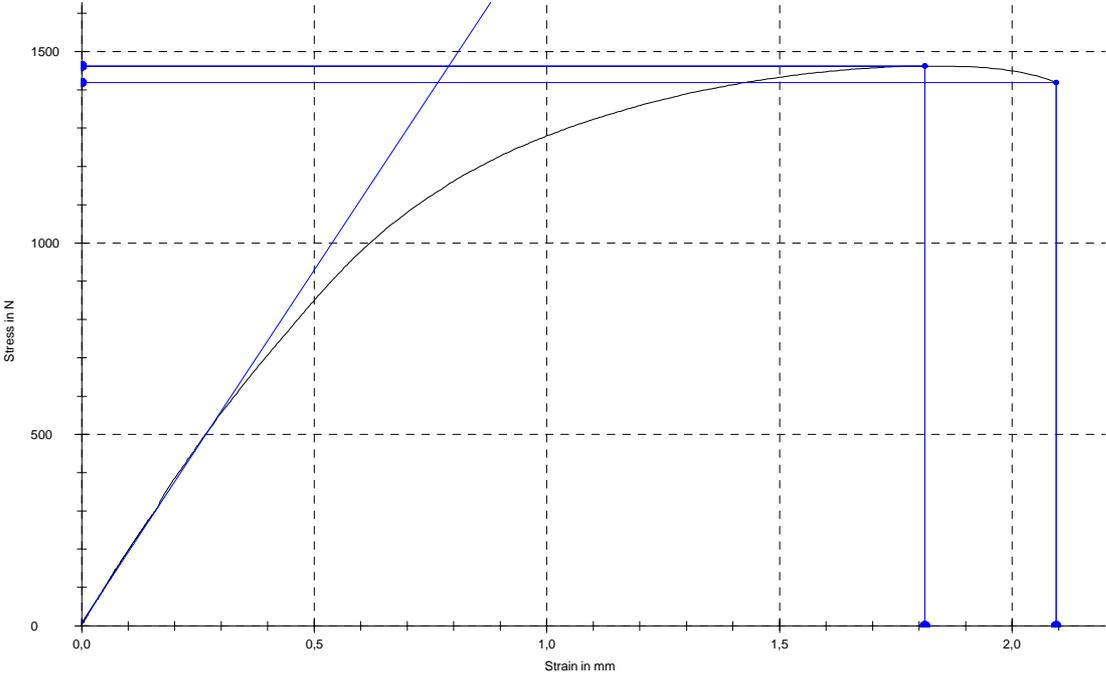
Zkušební vzorek č.5:



Zkušební vzorek č.6

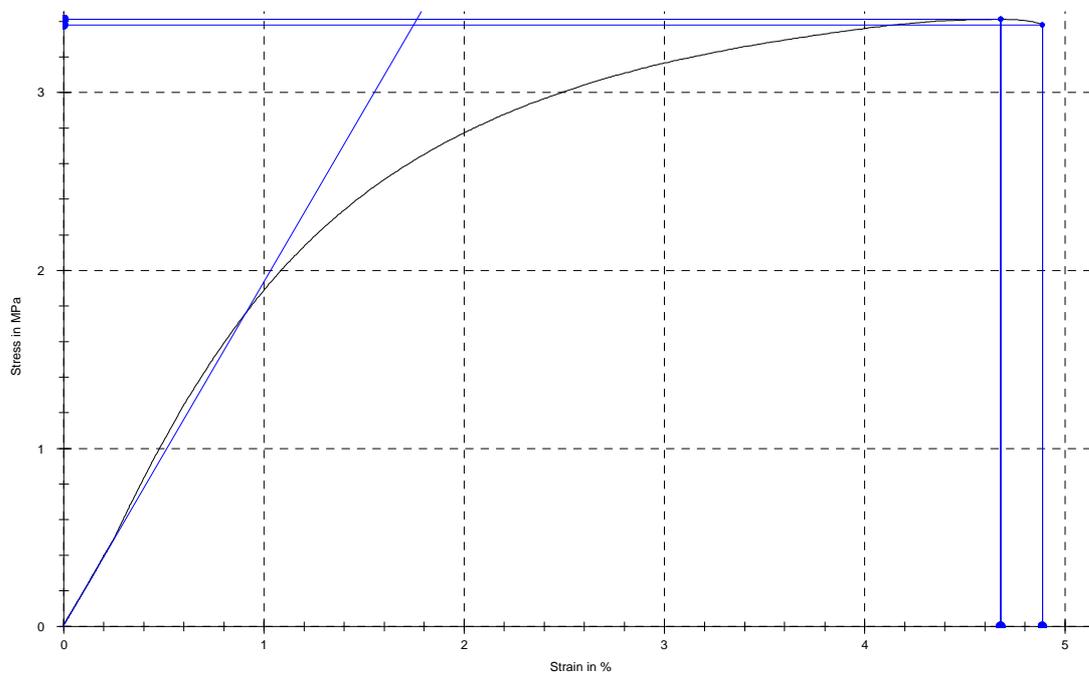
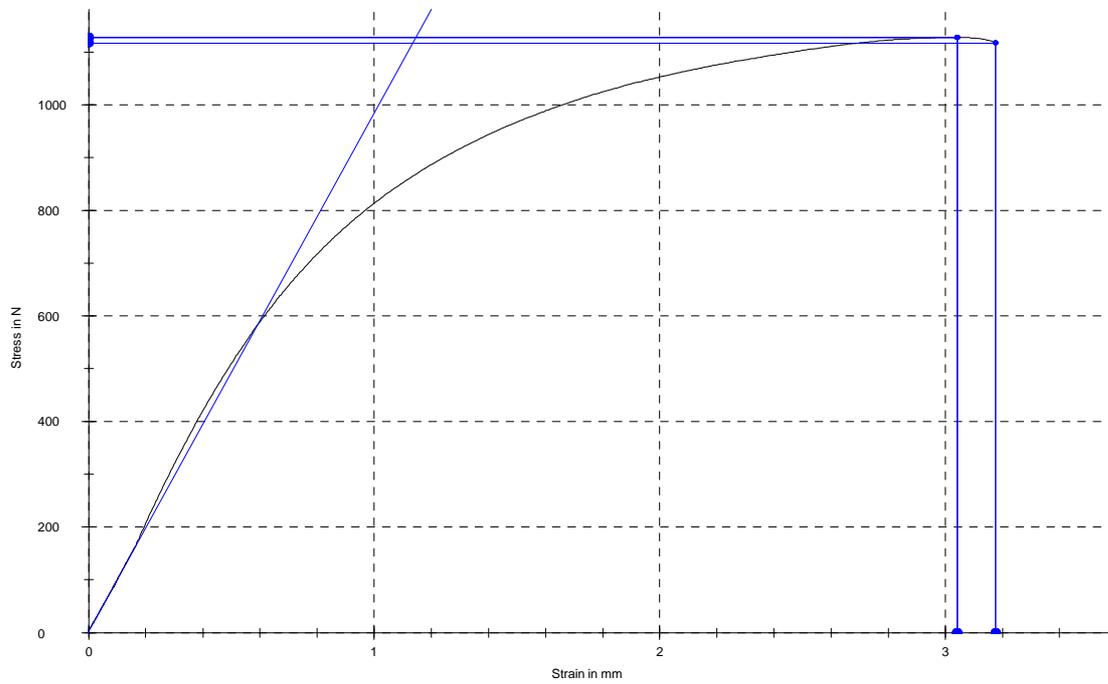


Zkušební vzorek č.7:



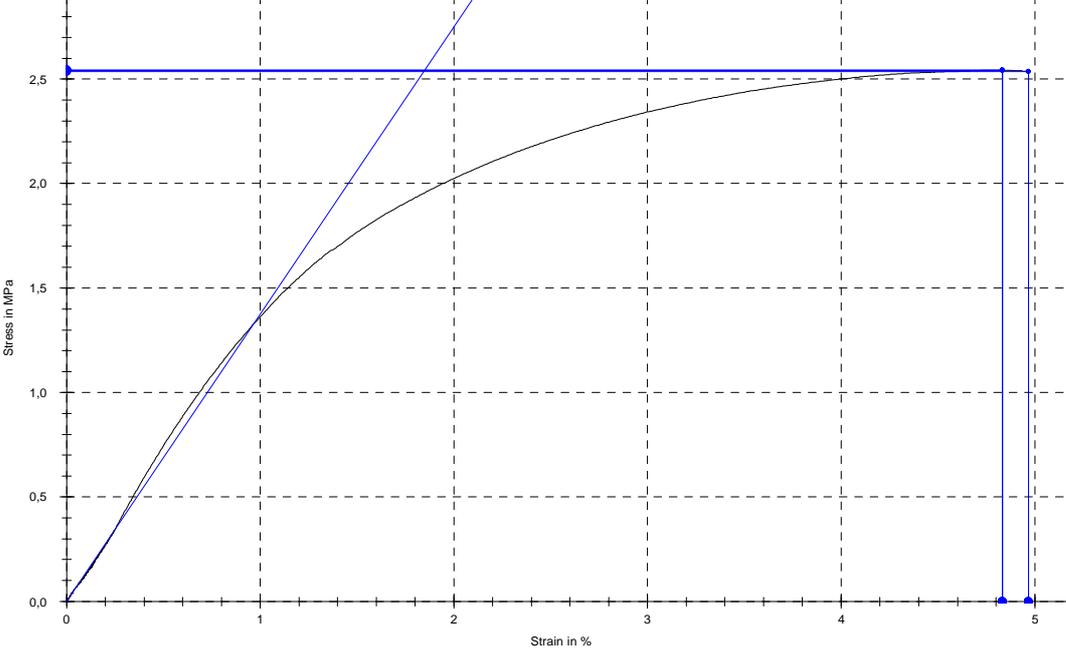
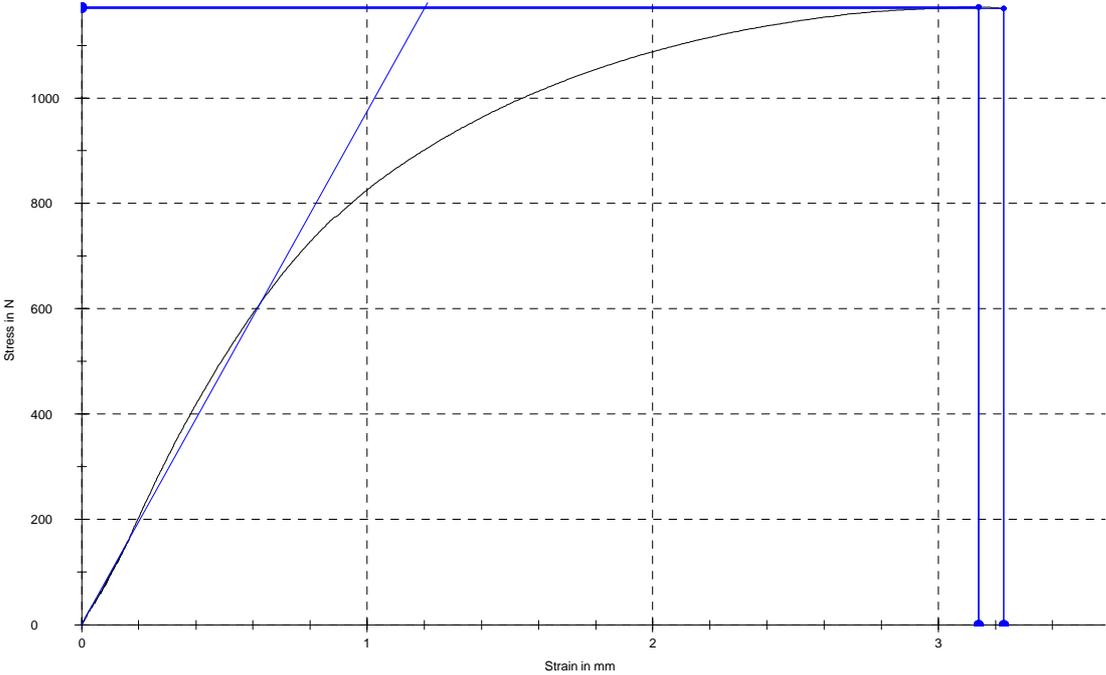
**PŘÍLOHA P III: GRAFY VÝSLEDKŮ NA TRHACÍM STROJI PRO PP (DLOUHÝ SVAR)**

Zkušební vzorek č.8:



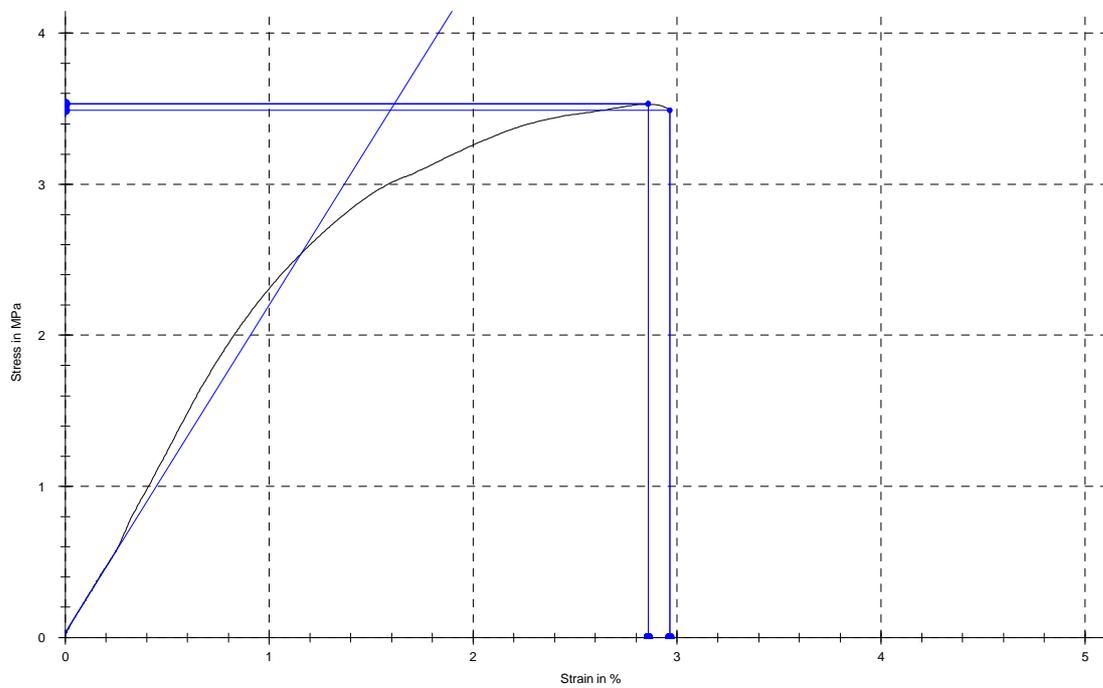
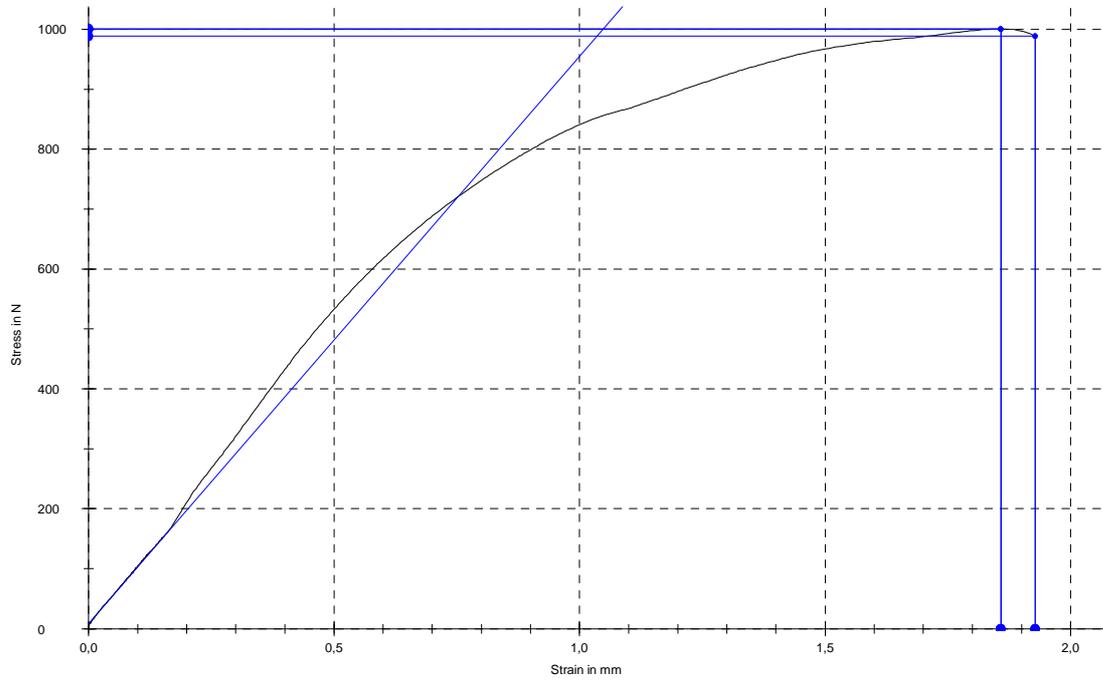


Zkušební vzorek č.9:

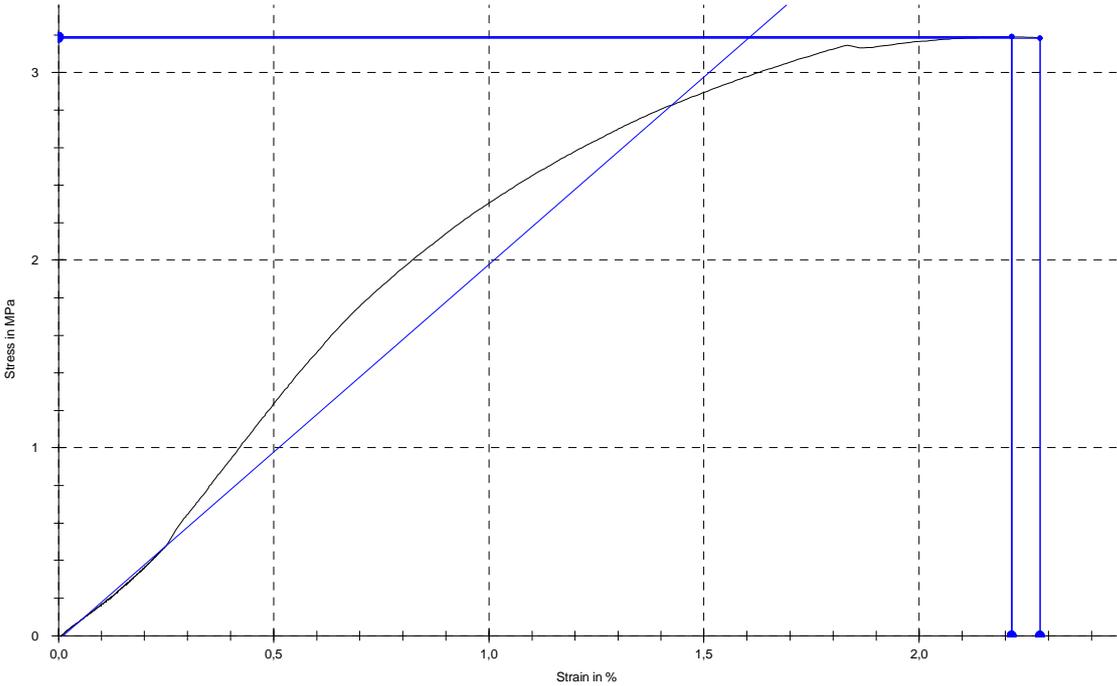
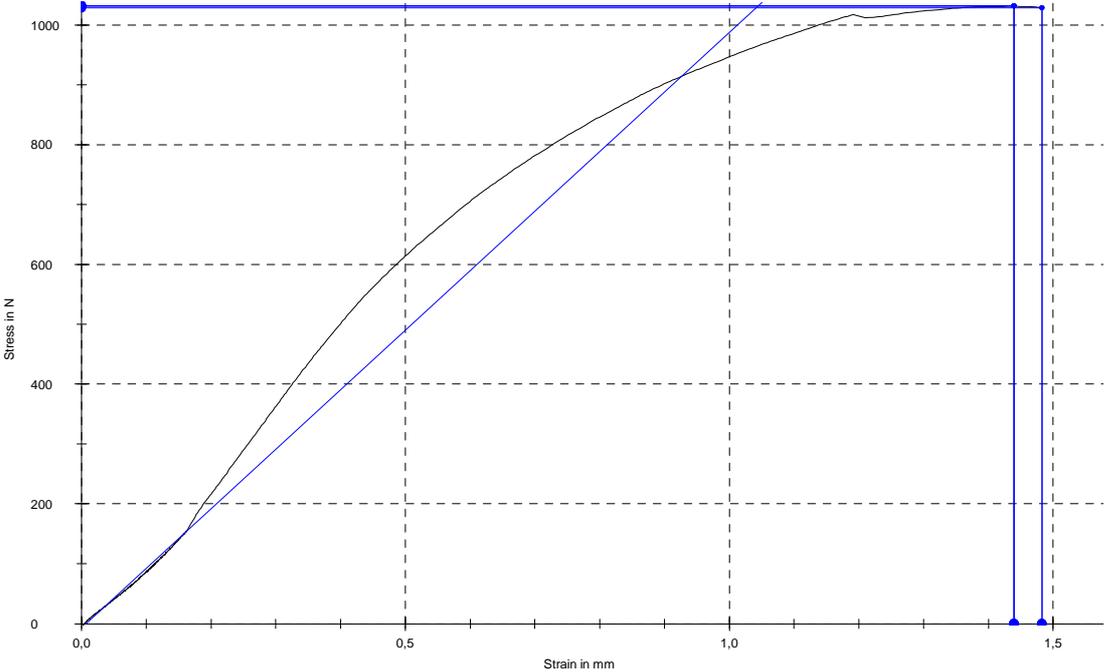


**PŘÍLOHA P IV: GRAFY VÝSLEDKŮ NA TRHACÍM STROJI PRO PP+15%M  
(DLOUHÝ SVAR)**

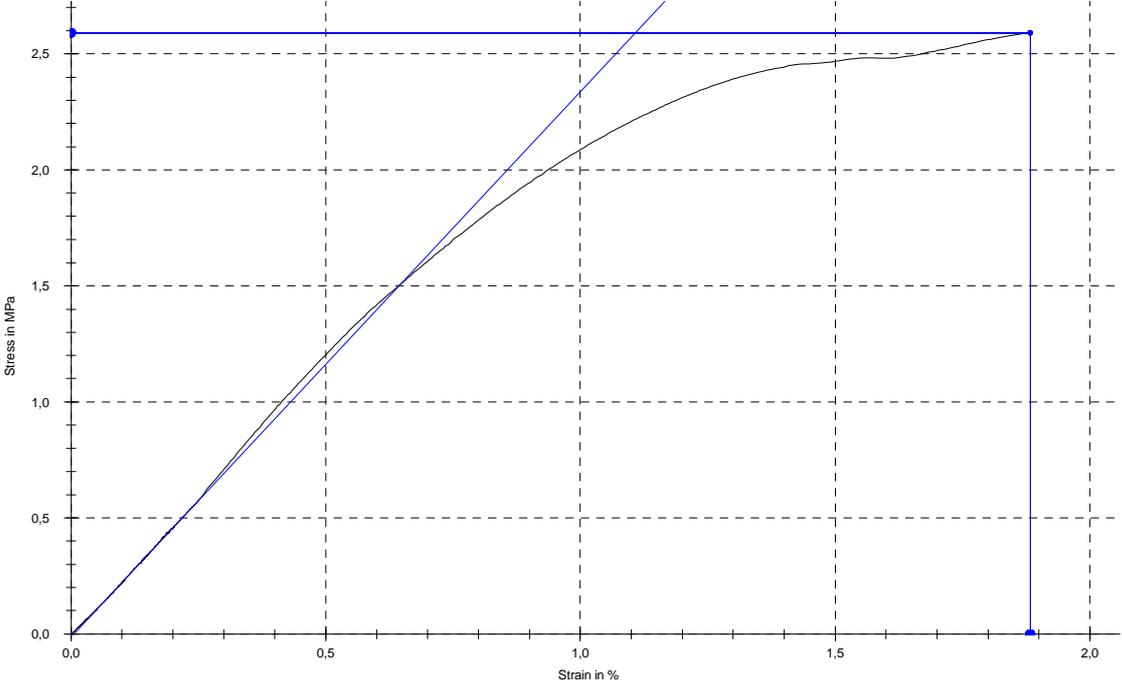
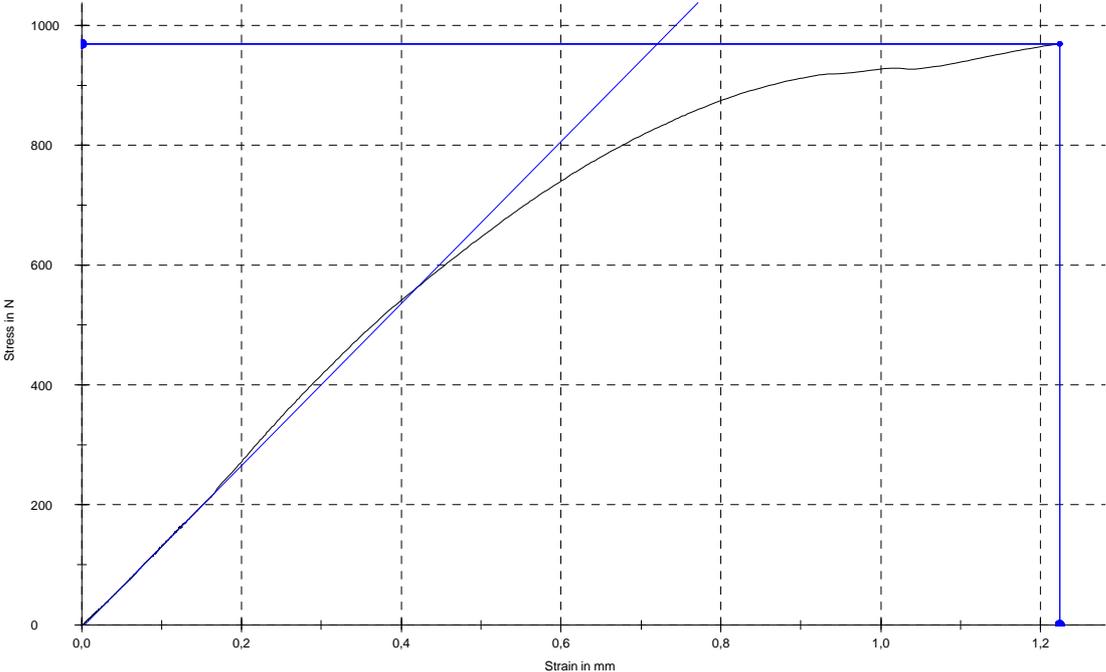
Zkušební vzorek č.10:



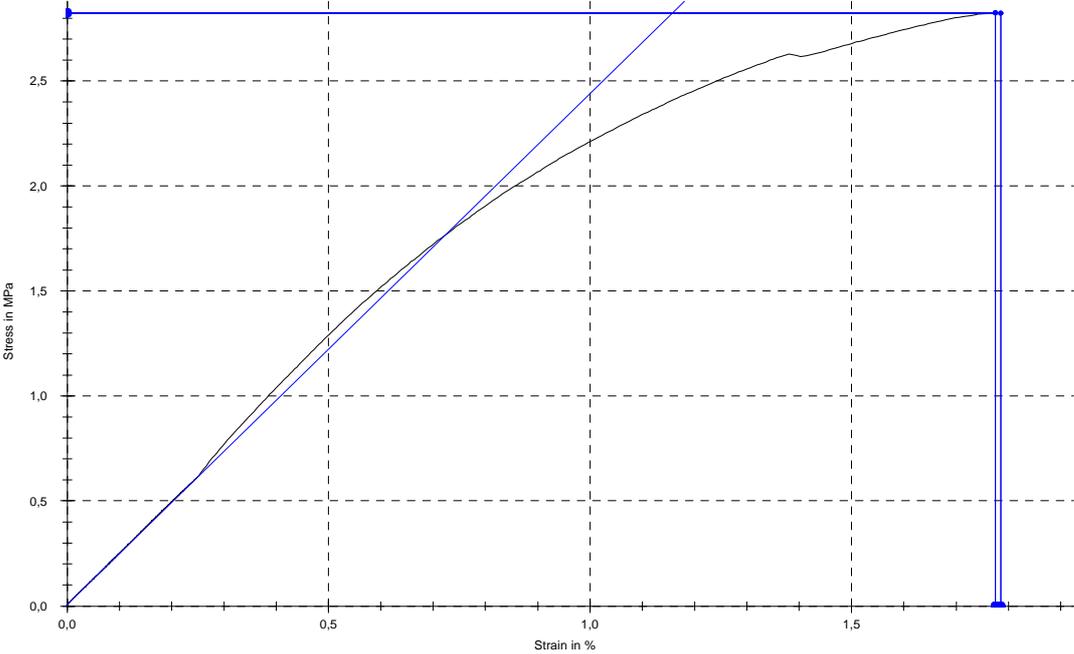
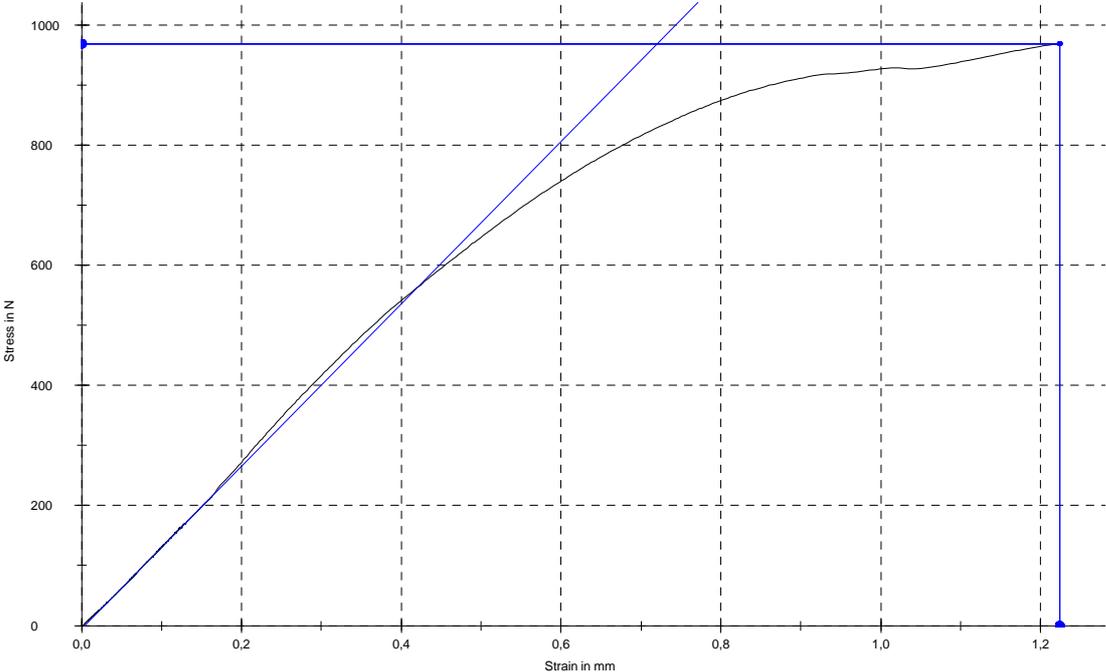
Zkušební vzorek č.11:



Zkušební vzorek č.12:

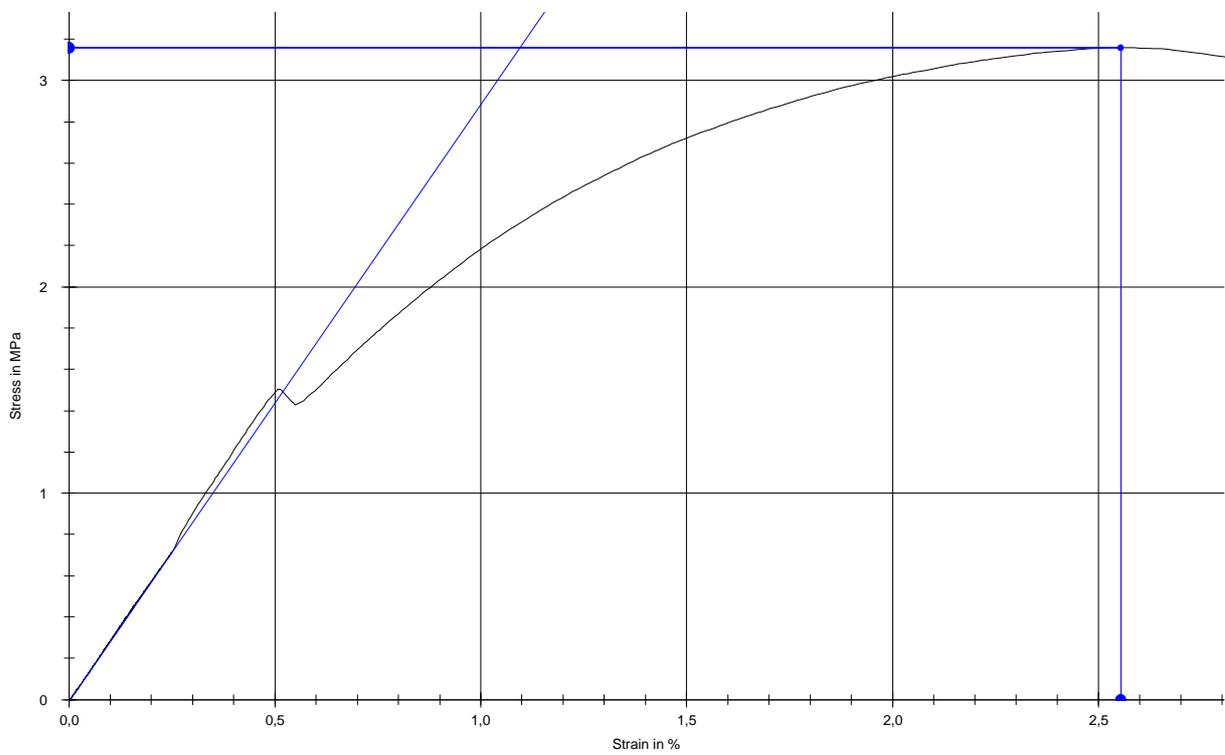
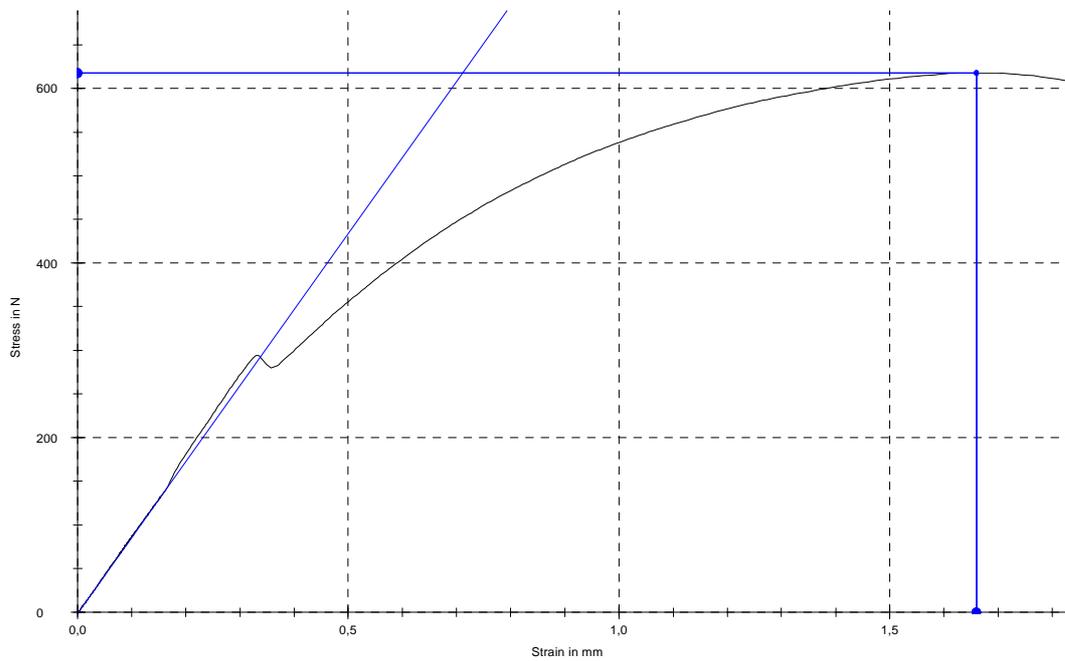


Zkušební vzorek č.13:

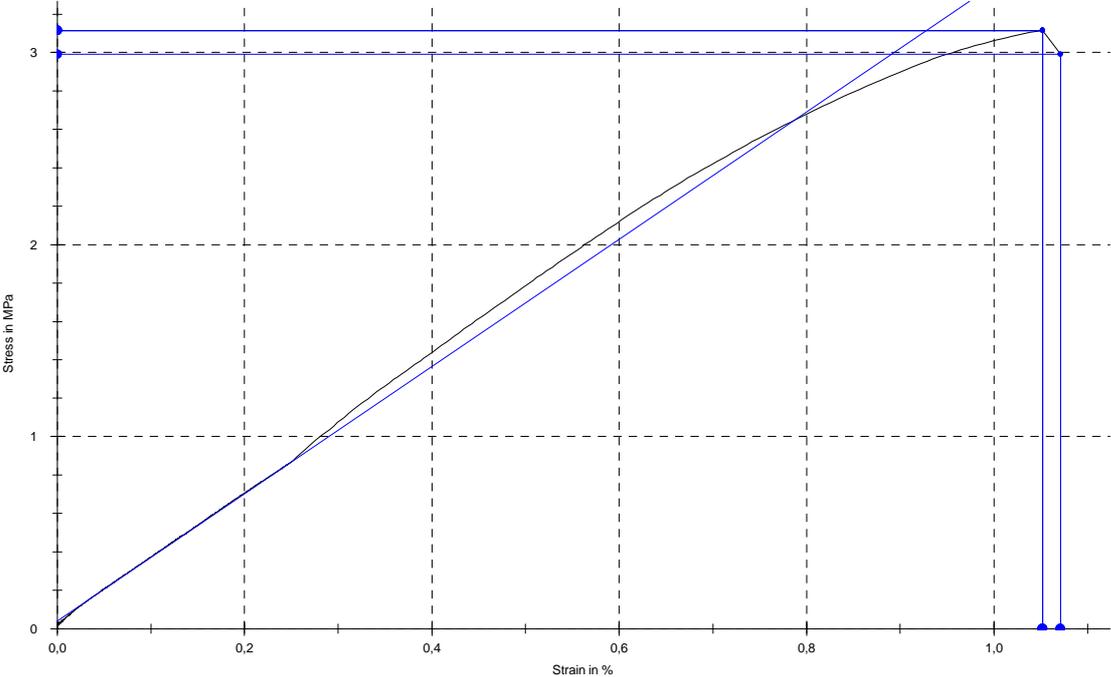
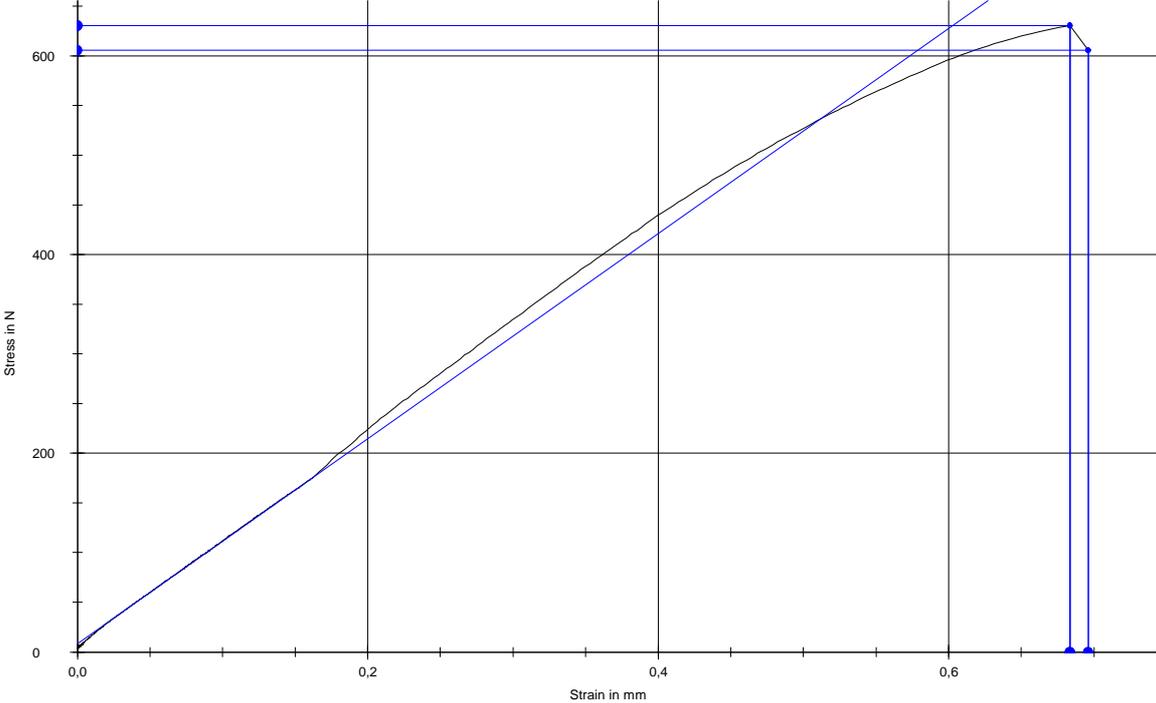


**PŘÍLOHA P V: GRAFY VÝSLEDKŮ NA TRHACÍM STROJI PRO PP + 5%GF  
(KRÁTKÝ SVAR)**

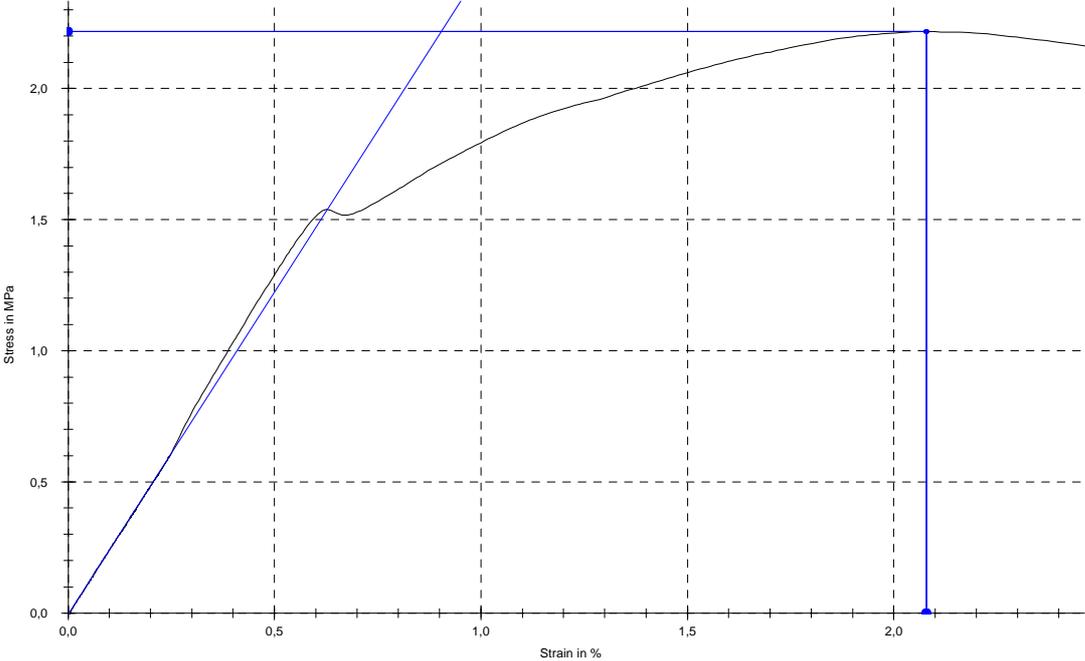
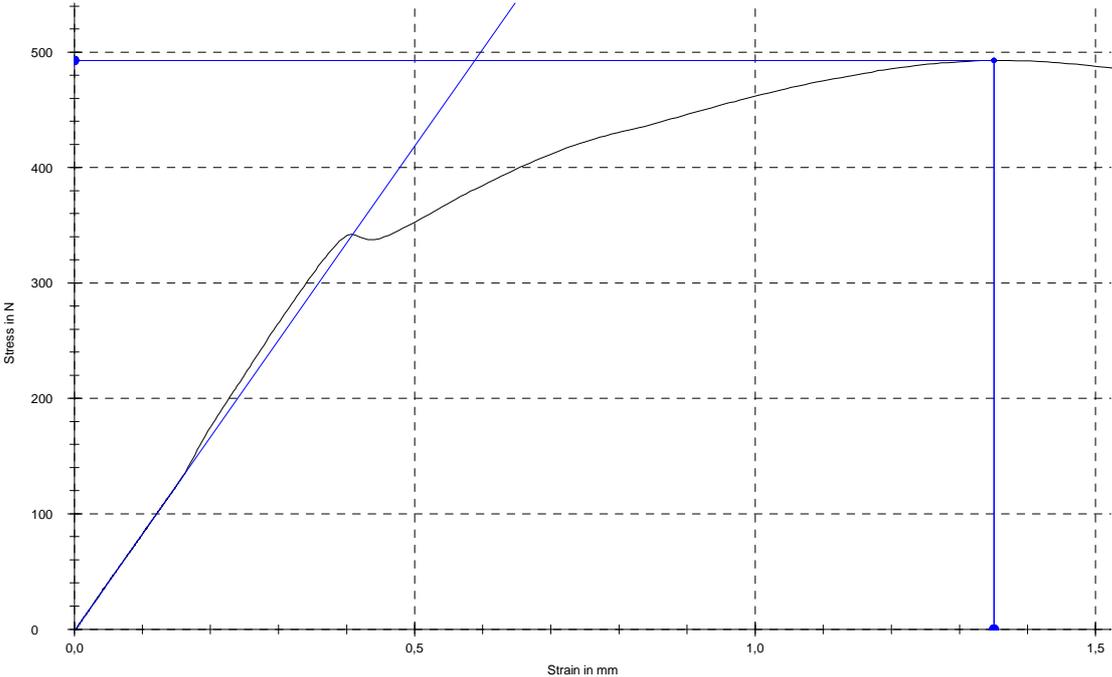
Zkušební vzorek č.14:



Zkušební vzorek č.15:



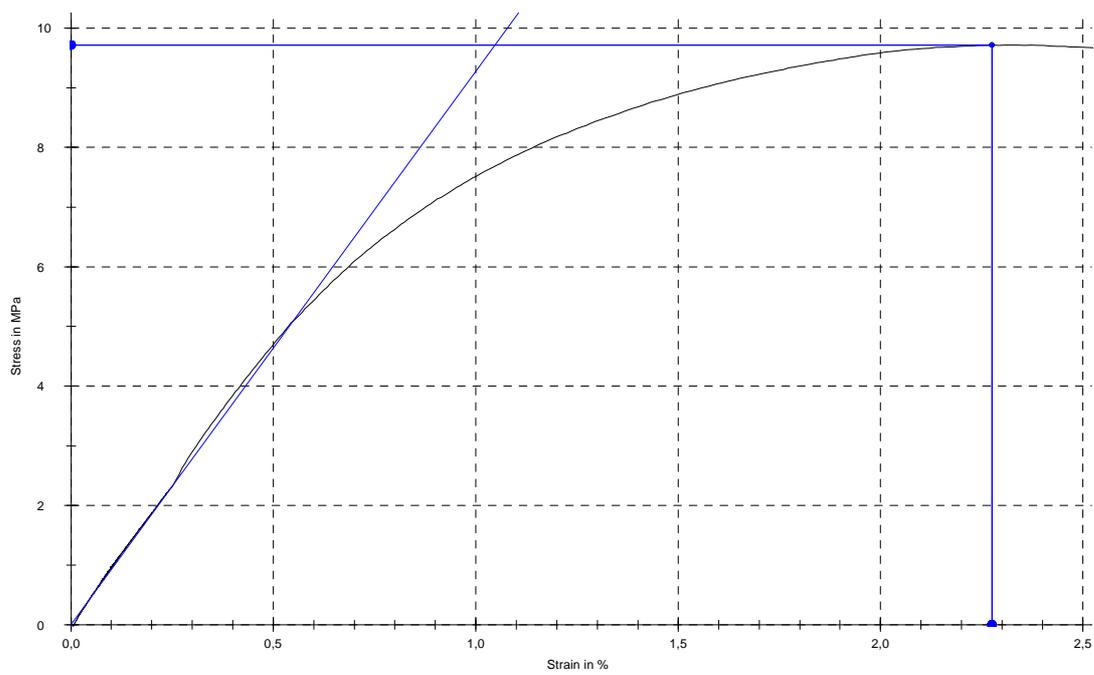
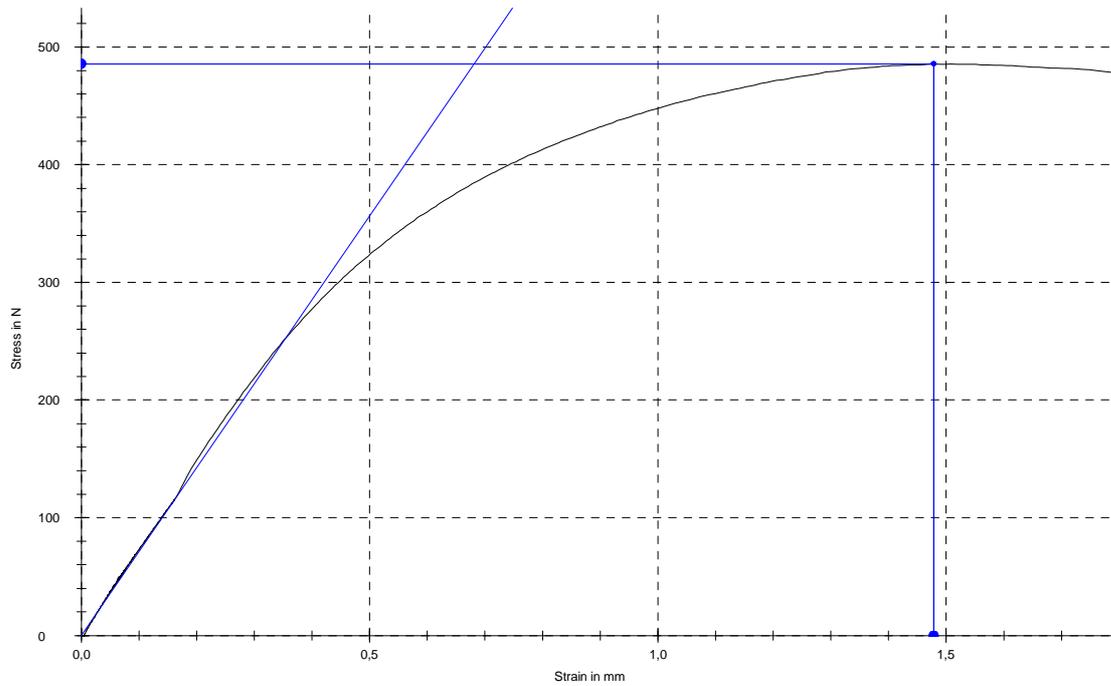
Zkušební vzorek č.16:



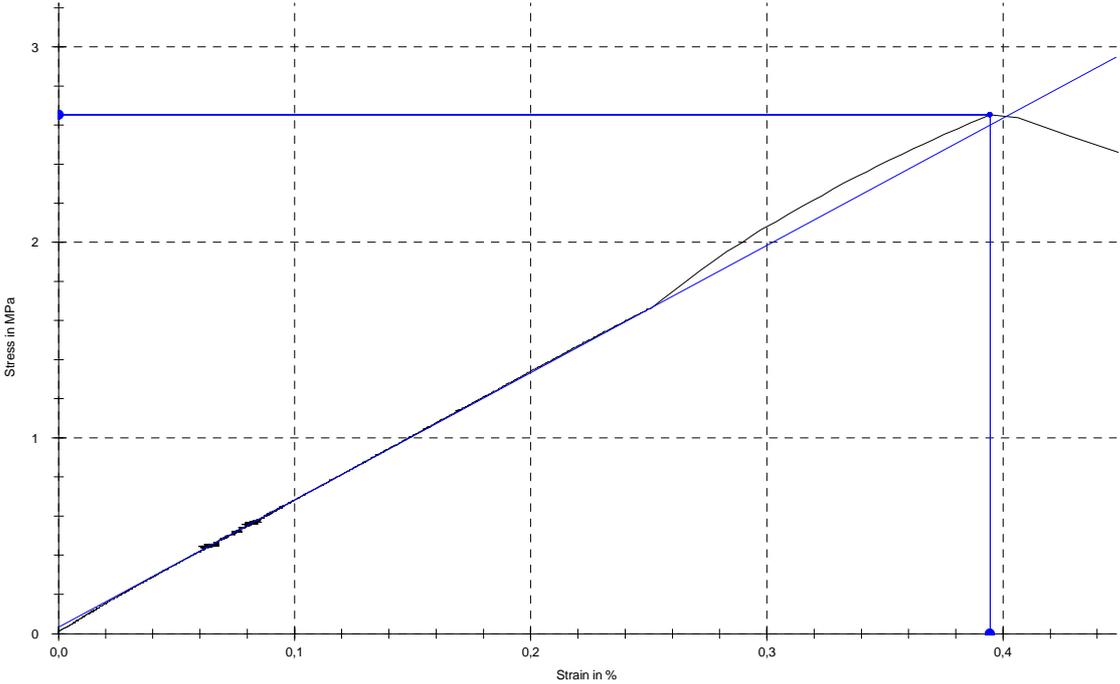
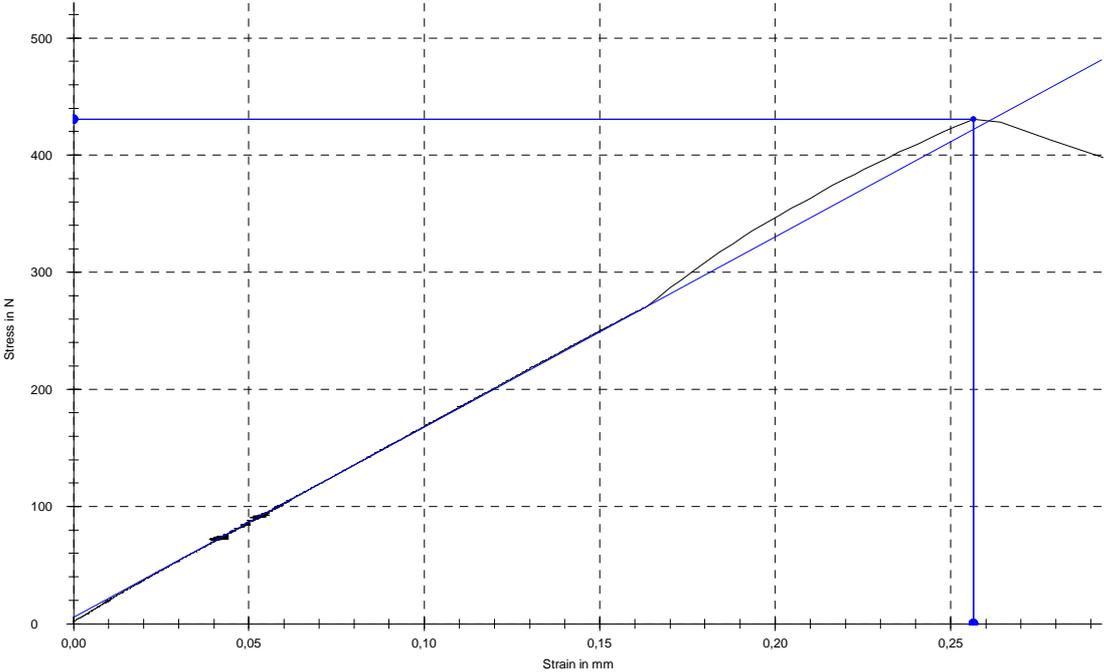


**PŘÍLOHA P VI: GRAFY VÝSLEDKŮ NA TRHACÍM STROJI PRO PP + 15%GF  
(KRÁTKÝ SVAR)**

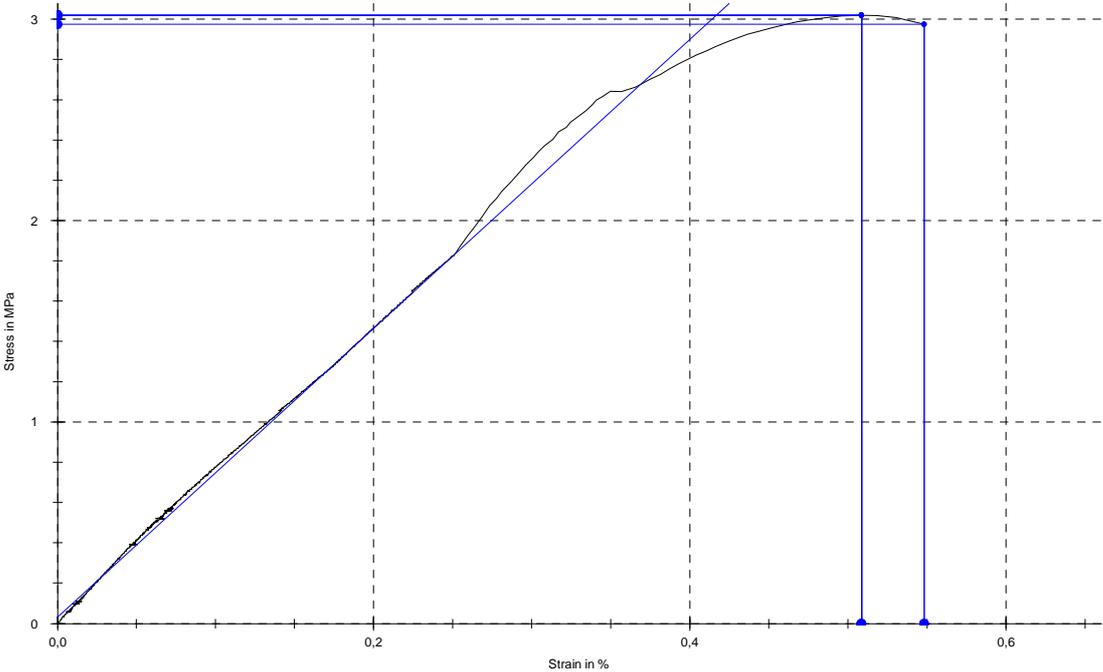
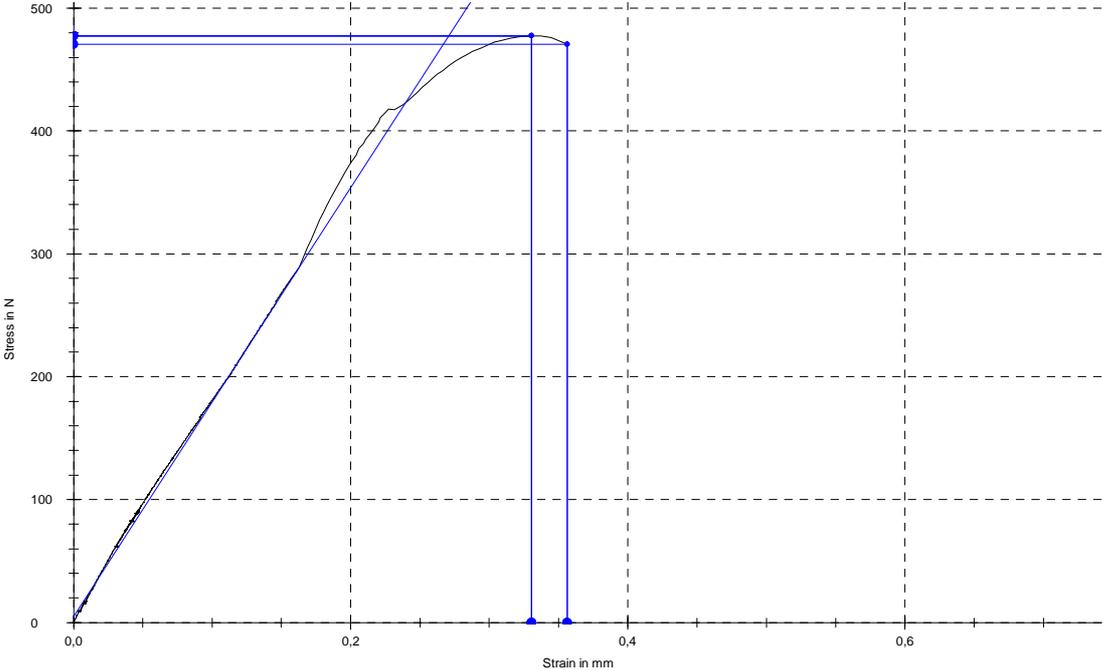
Zkušební vzorek č.17:



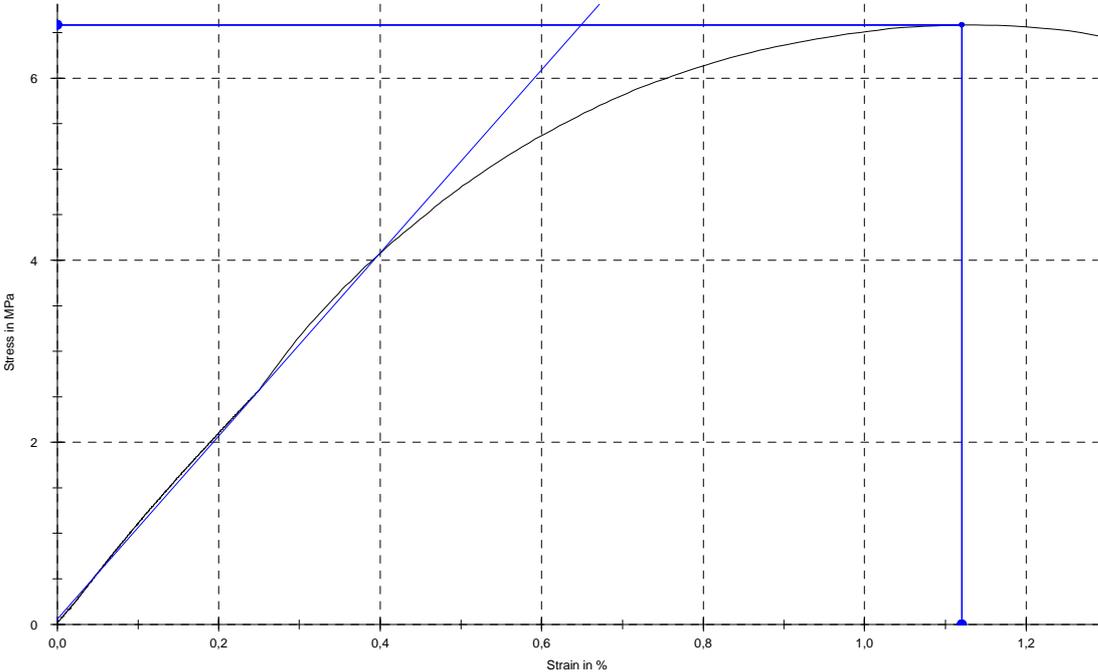
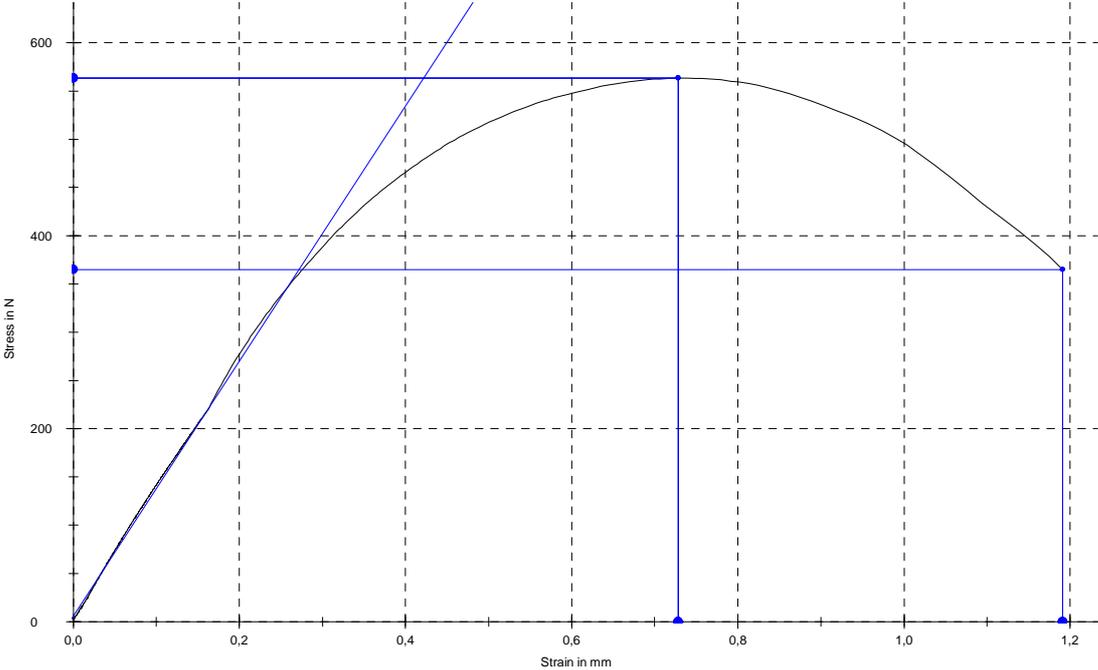
Zkušební vzorek č.18:



Zkušební vzorek č.19:

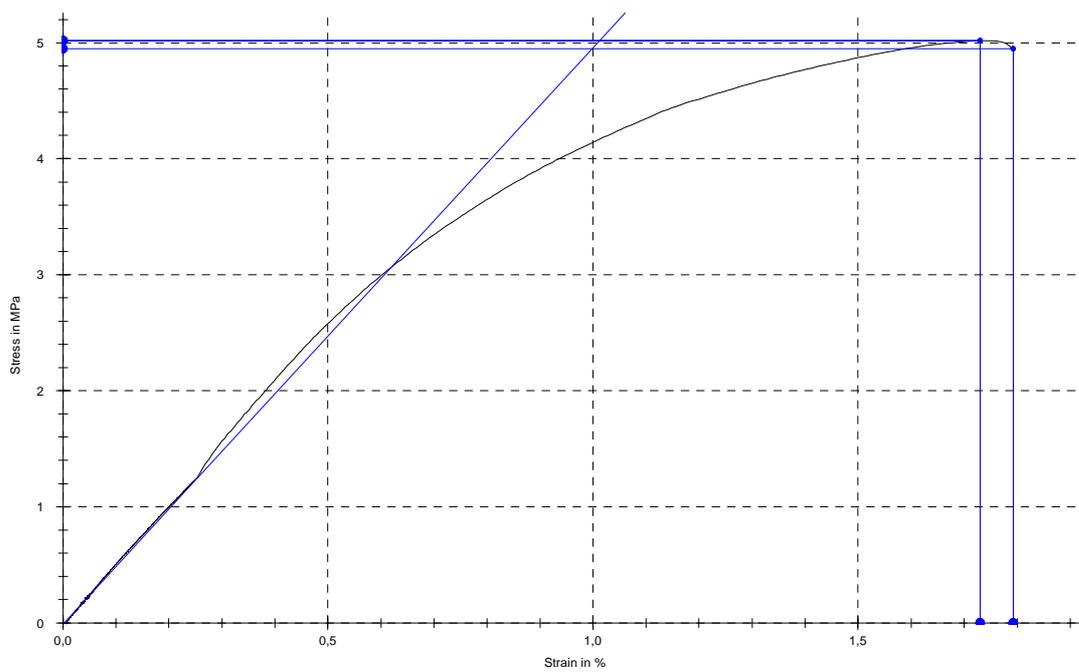
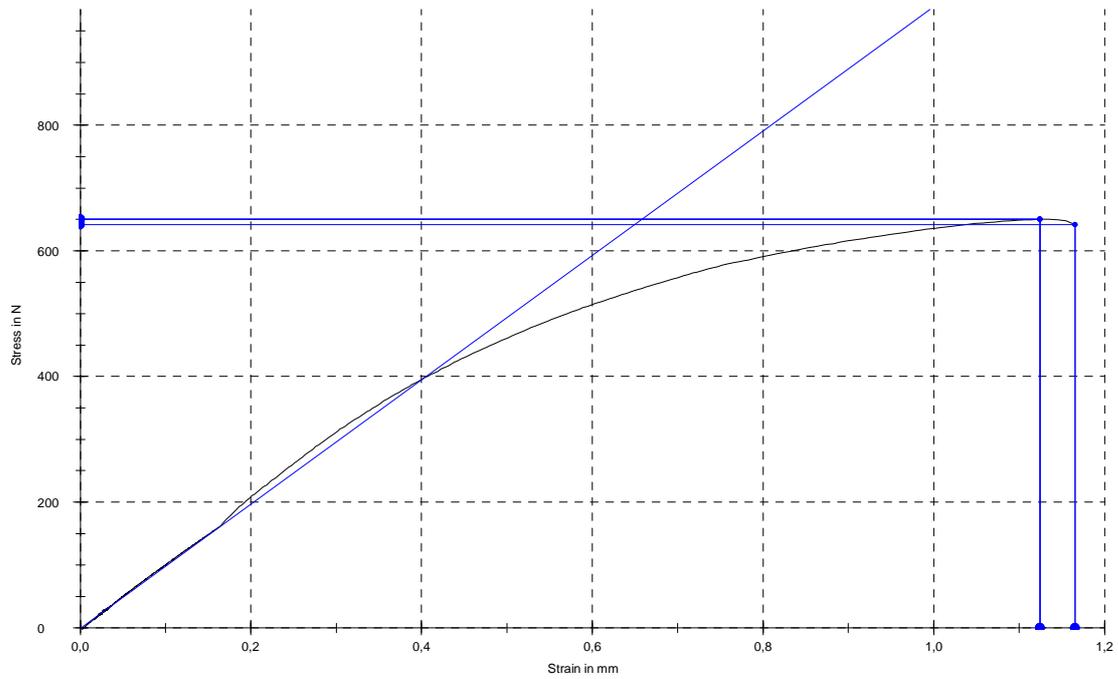


Zkušební vzorek č.20:

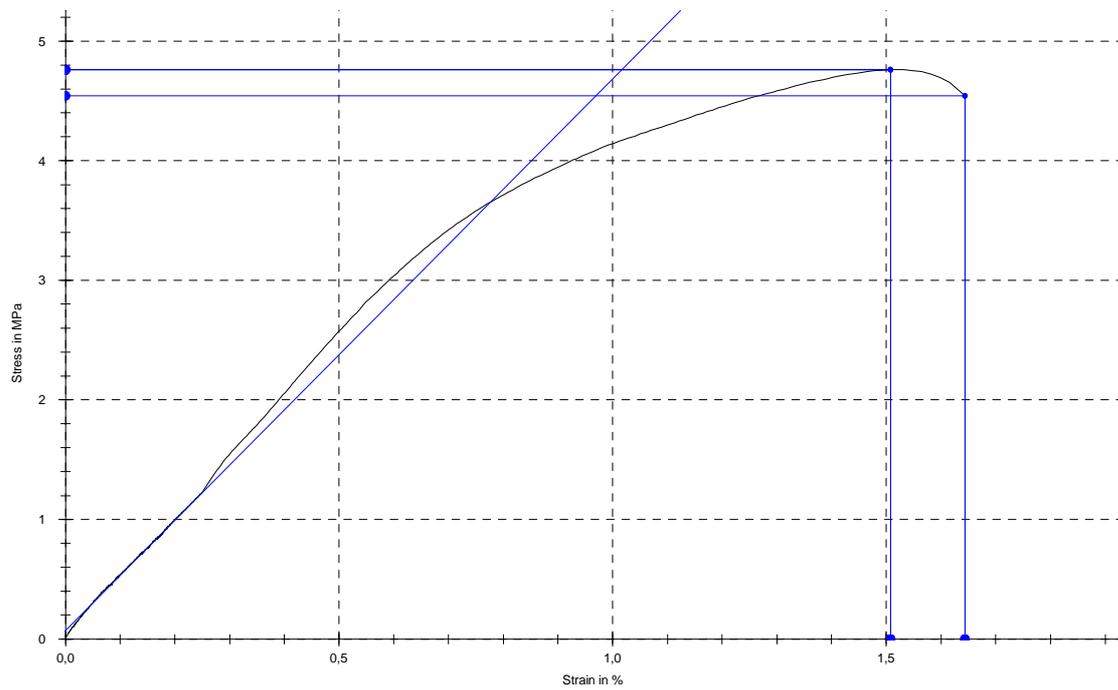
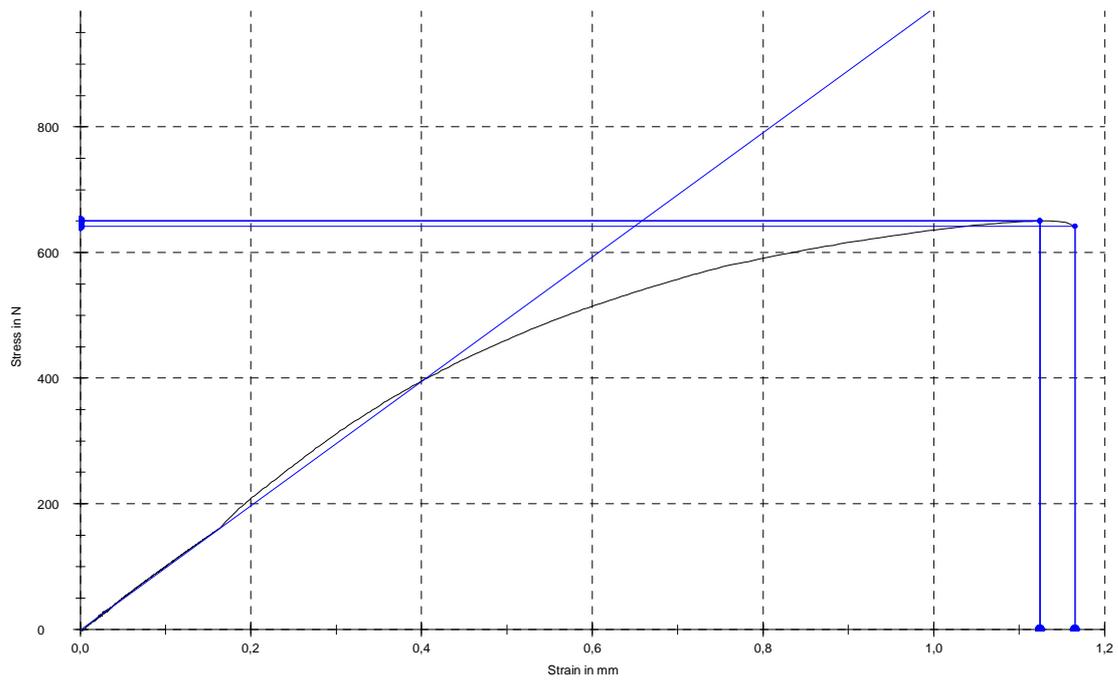


**PŘÍLOHA P VII: GRAFY VÝSLEDKŮ NA TRHACÍM STROJI PRO PP (KRÁTKÝ SVAR)**

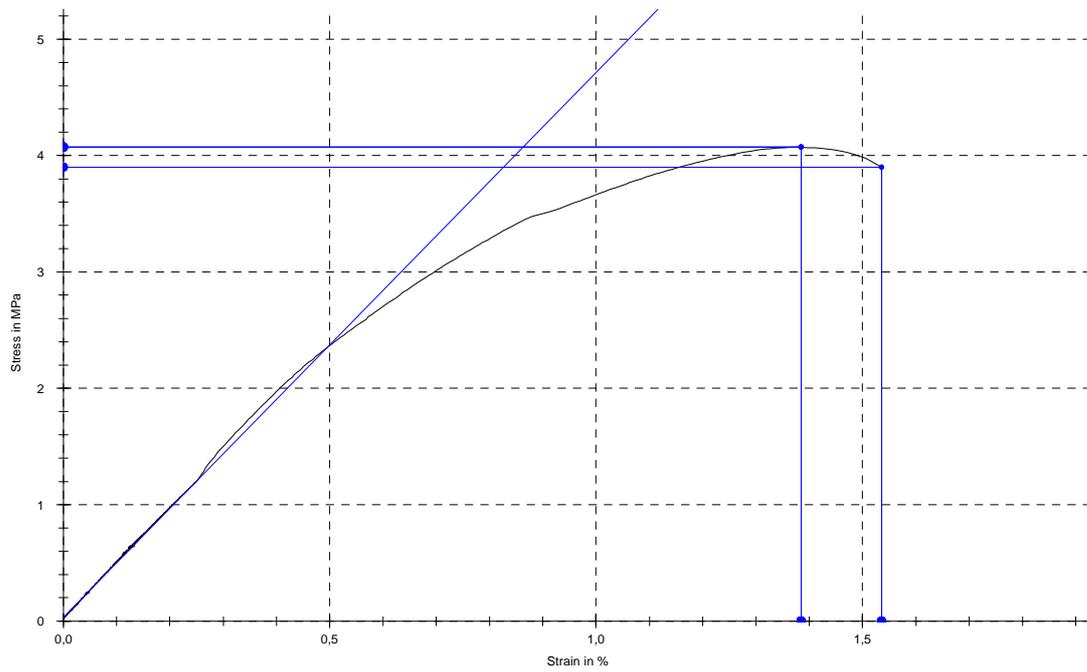
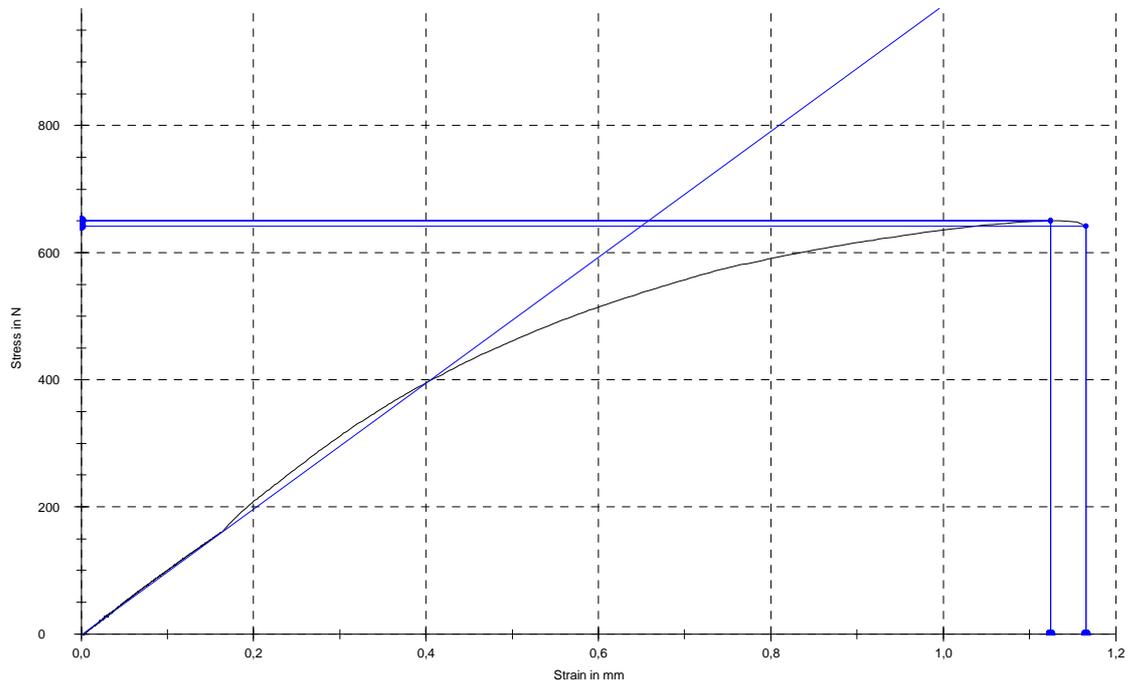
Zkušební vzorek č.21:



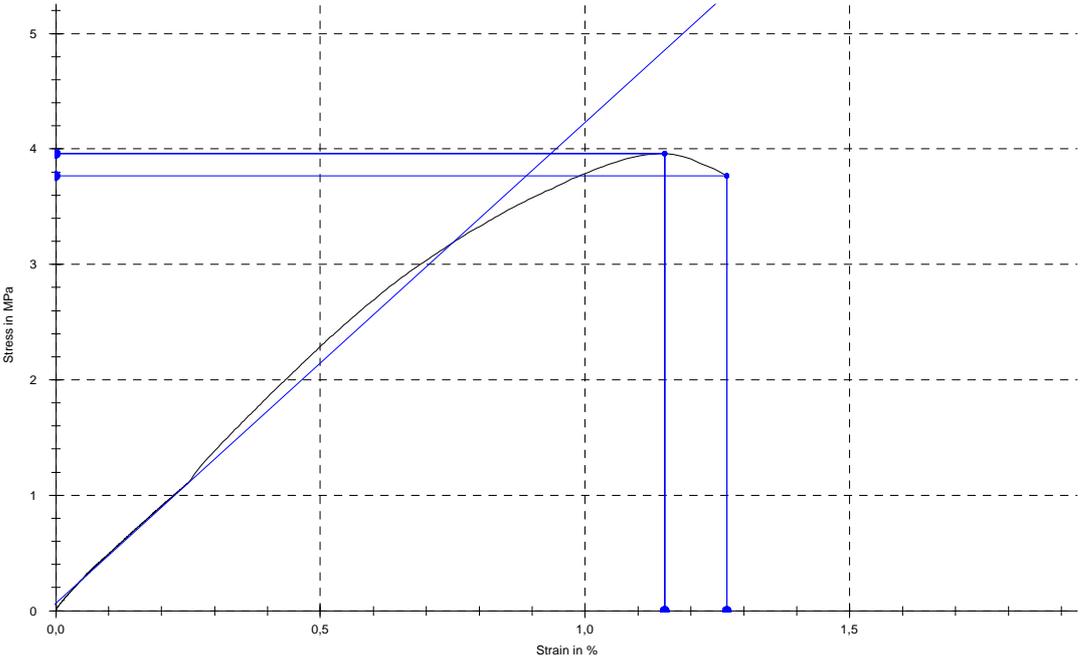
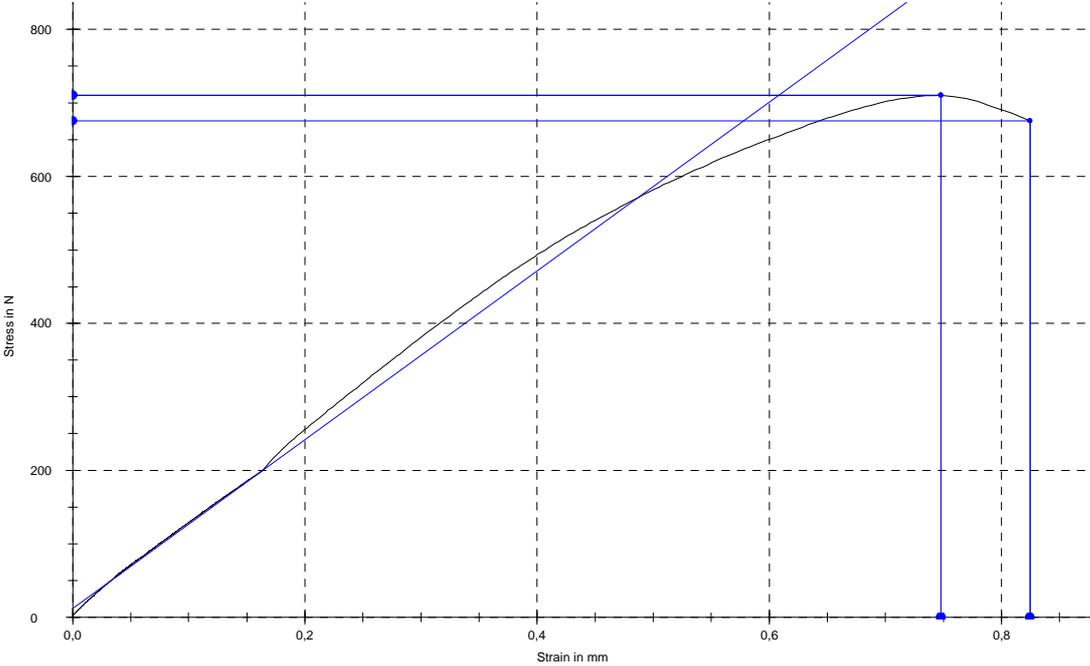
Zkušební vzorek č.22:



Zkušební vzorek č.23:



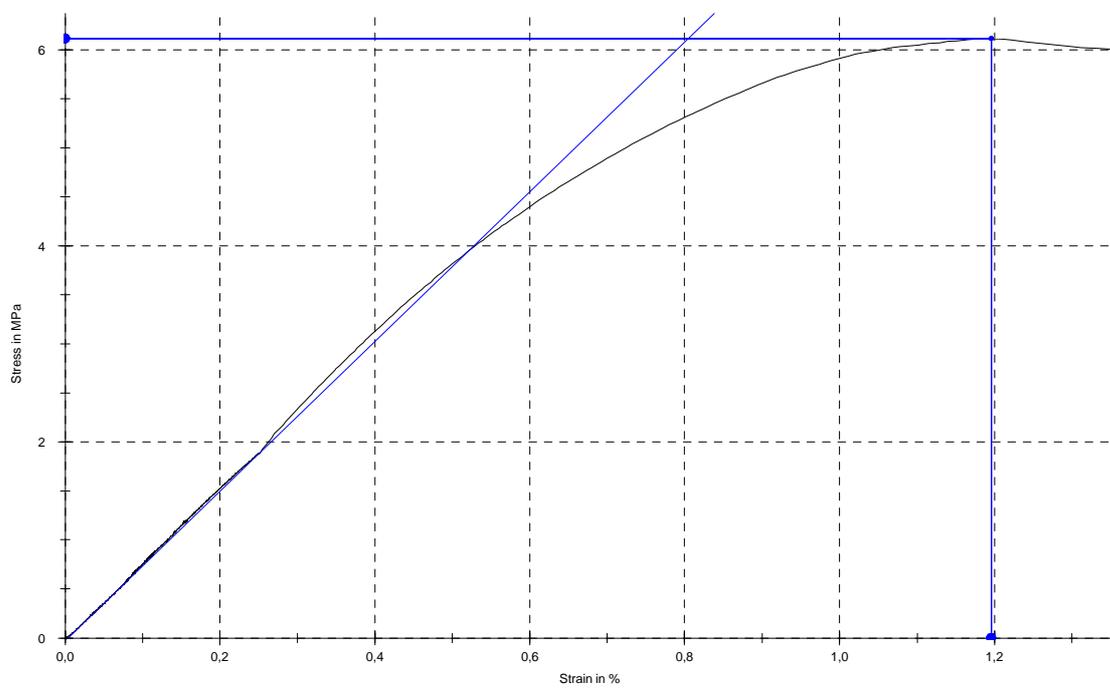
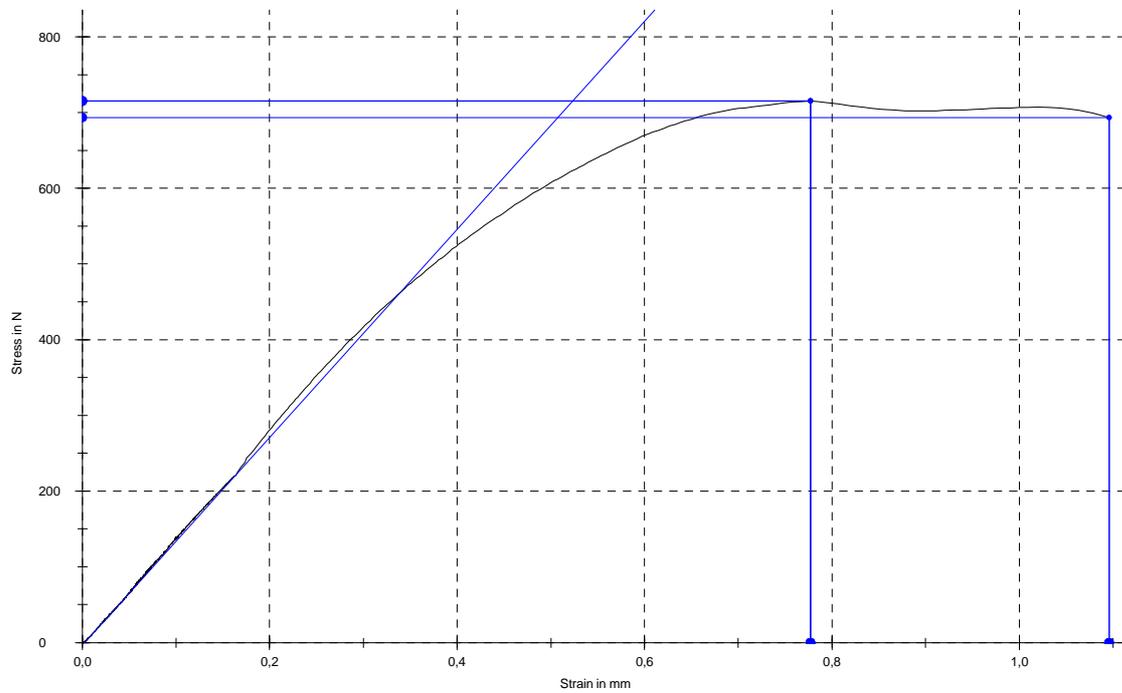
Zkušební vzorek č.24:



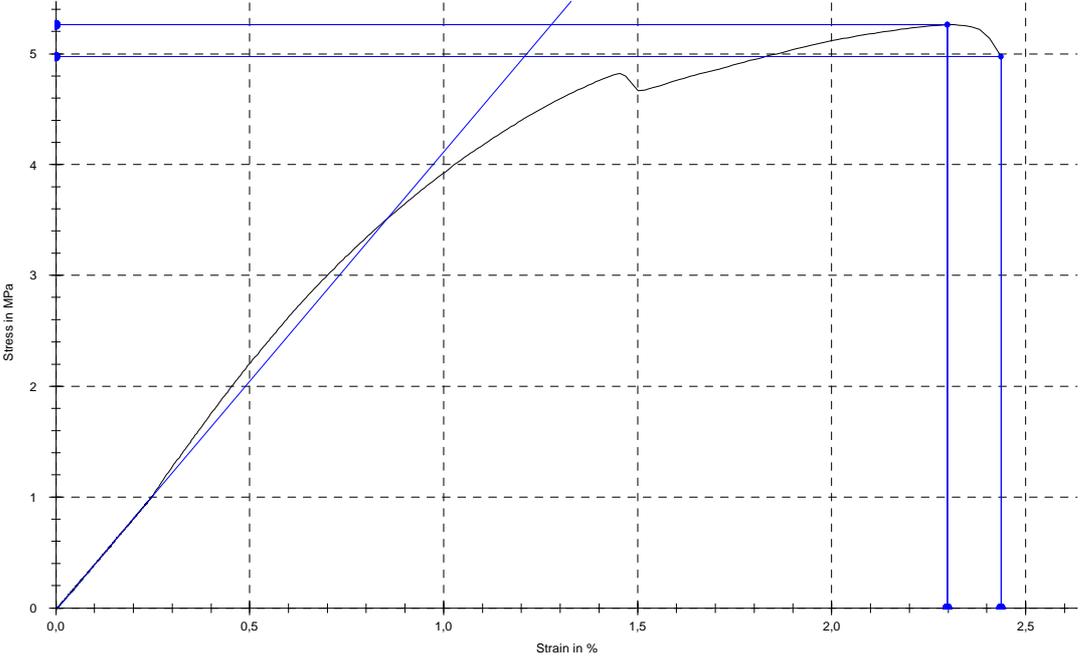
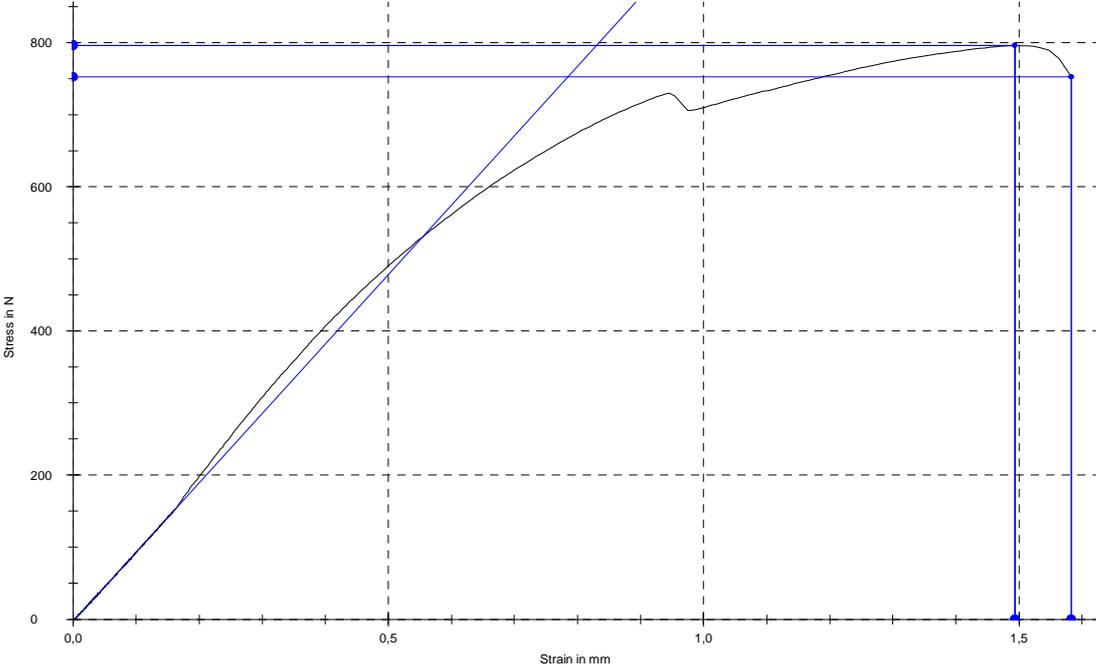


**PŘÍLOHA P VIII: GRAFY VÝSLEDKŮ NA TRHACÍM STROJI PRO PP + 15%M  
(KRÁTKÝ SVAR)**

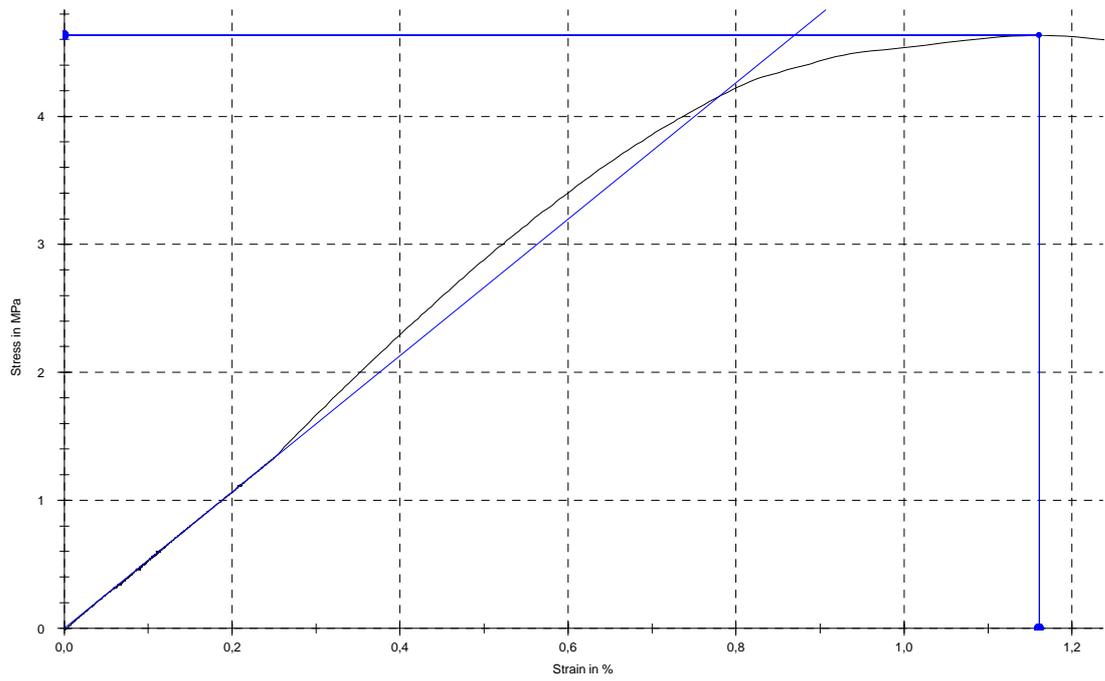
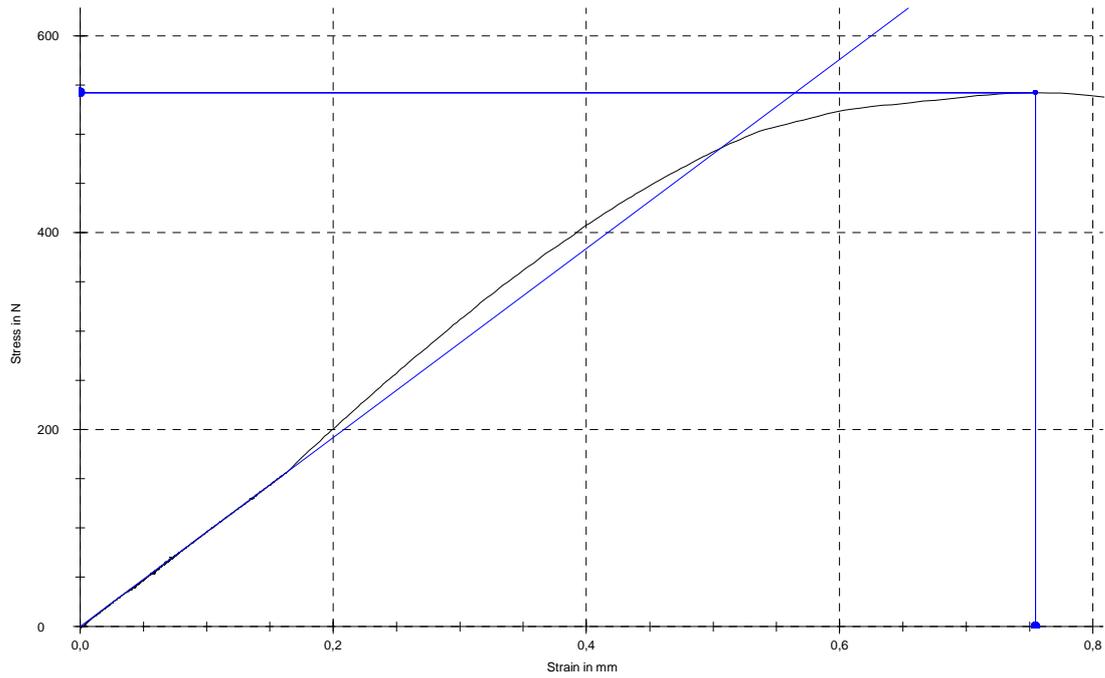
Zkušební vzorek č.25:



Zkušební vzorek č.26:



Zkušební vzorek č.27:



**PŘÍLOHA P IX: TABULKA VÝSLEDKŮ JEDNOTLIVÝCH ZKUŠEBNÍCH  
VZORKŮ**

Nr	Rychlost mm/min	LOST mm	a0 mm	b0 mm	Rm N/mm <sup>2</sup>	Rm N	Nominal strain-Rm mm	LO mm	E-Modulus N/mm <sup>2</sup>	{epsilon} Rm %	RB N/mm <sup>2</sup>	{epsilon} Break %	{epsilon} Fmax. mm	{epsilon} Break mm
1	10	60	9,86	50	1,96	964,12	3,44	60	162,7	1,31	1,96	1,31	0,79	0,78
2	10	60	7,5	25	5,21	977,53	4,83	60	136,13	4,45	4,7	5,11	2,7	3,03
3	10	65	7,5	53,2	2,38	950,73	3,52	65	206,36	1,85	2,38	1,85	1,21	1,2
4	10	65	9	40	3,88	1395,96	4,57	65	336,78	2,17	3,78	2,43	1,41	1,57
5	10	65	7,9	40	4,11	1297,68	4,06	65	379,47	2,15	4,11	2,17	1,4	1,4
6	10	65	9	40	3,83	1378,56	5,05	65	354,56	2,71	3,61	3,34	1,76	2,17
7	10	65	7	50	4,18	1462,56	5,13	65	342,33	2,79	4,05	3,23	1,82	2,09
8	10	65	8,7	38	3,41	1127,76	8,61	65	193,2	4,68	3,38	4,89	3,04	3,18
9	10	65	8,7	53	2,54	1172,37	10,64	65	137,54	4,83	2,54	4,97	3,14	3,23
10	10	65	7	40,5	3,53	1000,98	4,58	65	217,11	2,86	3,49	2,98	1,87	1,93
11	10	65	7,7	42	3,19	1031,57	4,89	65	199,95	2,22	3,18	2,27	1,43	1,48
12	10	65	8,5	44	2,59	968,95	4,27	65	235,02	1,88	2,59	1,88	1,22	1,22
13	10	65	7,8	46	2,82	1013,1	3,91	65	243,24	1,78	2,82	1,79	1,16	1,16
14	10	65	9,1	21,5	3,16	617,86	3,66	65	289,43	2,55	0,63	6,45	1,66	4,2
15	10	65	8,8	23	3,12	630,53	2,3	65	331,53	1,05	2,99	1,08	0,69	0,7
16	10	65	9,5	23,4	2,22	492,81	3,07	65	245,95	2,08	0,44	5,55	1,35	3,61
17	10	65	9,8	5,1	9,72	485,57	3,13	65	928,22	2,28	2,99	4,82	1,48	3,13
18	10	65	8,5	18,6	2,65	430,49	1,37	65	650,48	0,39	0,64	1,67	0,26	1,08
19	10	65	8,5	18,6	3,02	477,57	1,76	65	717,47	0,51	2,98	0,55	0,33	0,36
20	10	65	9,3	9,2	6,58	563,37	2,35	65	1006,17	1,12	4,27	1,84	0,73	1,19
21	10	65	7,2	18	5,02	650,1	3,47	65	496,61	1,73	4,95	1,79	1,12	1,17
22	10	65	8,1	22,3	4,76	667,3	2,92	65	461,18	1,51	4,54	1,66	0,99	1,07
23	10	65	8,1	22,3	4,07	735,18	2,72	65	468,37	1,38	3,9	1,54	0,9	1
24	10	65	8,5	21,1	3,96	710,29	2,98	65	416,62	1,15	3,77	1,28	0,76	0,82
25	10	65	7,8	15	6,11	715,13	3,18	65	763,54	1,2	5,93	1,68	0,77	1,1
26	10	65	8,5	17,8	5,26	796,1	4,6	65	413,87	2,3	4,98	2,43	1,49	1,58
27	10	65	9	13	4,63	542,01	2,7	65	533,42	1,16	2,29	2,92	0,75	1,9

PŘÍLOHA P X: VÝROBNÍ VÝKRES ZKUŠEBNÍ TYČINKY

