

# **Mechanické vlastnosti lepených sendvičových struktur polyuretanu**

Bc. Jiří Tomašík

---

Diplomová práce 2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Tomašík**

Osobní číslo: **T11795**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Mechanické vlastnosti lepených sendvičových struktur polyuretanu**

Zásady pro vypracování:

- 1. Zpracovat teoretickou část vlastností polyuretanů a lepidel pro tvorbu sendvičových struktur.**
- 2. Výběr zkoušek pro zjištění mechanických vlastností sendvičových struktur.**
- 3. Návrh polyuretanů a lepidel pro vytvoření sendvičové struktury.**
- 4. Praktické zpracování zkoušek k ověření mechanických vlastností lepených struktur.**
- 5. Vyhodnocení získaných výsledků a doporučení pro praktické využití.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Ptáček L. a kolektiv, **Nauka o materiálech I a II. ISBN: 8072042831 (I) a ISBN: 8072042483 (II).**
2. Mills, N.J. **Polymer Foams Handbook, Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide, ISBN: 978-0-7506-8069-1.**
3. Langmaier F., **Adheze a adheziva, FT VUT 1999.**
4. LAPČÍK, Lubomír a Miroslav RAAB. **Nauka o materiálech II. Vyd. 2. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2004, 133 s. ISBN 80-7318-229-7.**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Martin Juříčka, Ph.D.**

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce:

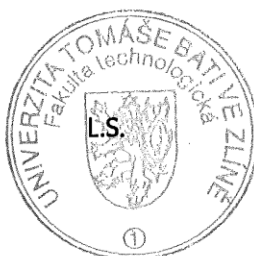
**10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: .....Tomaščík Jiří.....

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 .....24.4.2013.....

.....Tomaščík Jiří.....

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

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

---

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

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

<sup>2)</sup> *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě 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 výtěžku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

## **ABSTRAKT**

Polymerní materiály mají velmi široké použití v nejrůznějších oblastech průmyslu. Polyuretany (PUR) patří k jednomu s nejfrekventovaněji vyráběným a používaným polymerům. Použitelnost se rozšiřuje s možností různých technologií, ale také kombinace základních polyuretanových struktur poskytuje nepřehledné množství různých aplikací. Jednou ze základních vlastností PUR je jejich porézní struktura, díky které polymer tlumí akustickou a mechanickou energii. Druhou, ale specifickou vlastností je samo-zhášivost, díky které mohou být tyto polymery aplikovány pro speciální potřebu v leteckém průmyslu. S ohledem na tyto vlastnosti, se tato práce zabývá výslednými mechanickými vlastnostmi lepeného spoje mezi polyuretany samotnými, ale i polyuretany nalepenými na leteckém hliníku v okrajových částech - nosnících. Cílem je získat různou porézní strukturu v izolační vrstvě. Takto instalovaný (nalepený) materiál je namáhán zejména na odtrhávání, což vystavuje lepený díl namáhání, které hraničí až s odtržením od podkladu. Výsledky získané z laboratorních podmínek napomáhají najít vhodný poměr lepidla a polyuretanu pro akustickou izolaci protipožární přepážky a bočnic trupu ultralehkých letadel, tak aby nebyla ovlivněna funkce UL letadla.

Klíčová slova:

Lepení, polyuretany, pevnost v tahu, peel-test, UL letadla.

## **ABSTRACT**

Nowadays has polymers width range of application in the different industry. One of all using is polyurethane in basic and specific application. The main properties of polyurethanes are porosity for damping acoustic emission. A second property is self-extinguishing for application in aerospace industry. This diploma work is focused on basic bonding of different polyurethanes. The aim of bonding two or more polyurethanes is gradient structure in insulation layer. This isolation has specific usage on firewall in ultra-light aircraft. This insulation layer on the walls of aircraft is exposing to mechanical stress and impacts depending on moving inside pilot cabin. The results obtained from laboratory exams and tests provide new information to select of glue and type of polyurethane. Combination of polyurethanes and glues using inside fuselage of ultra-light aircraft must not affect airworthiness.

Keywords:

Bonding, polyurethanes, tensile strength, peel-test, ultra-light aircrafts.

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Juříčkovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi věnoval při vypracování této diplomové práce.

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

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>12</b>
1.1 POLYURETHANY.....	13
1.2 ROZDĚLENÍ POLYURETHANŮ .....	15
1.2.1 Lehčené hmoty .....	15
1.2.1.1 Základní příprava.....	15
1.2.1.2 Tvrdé pěny .....	15
1.2.1.3 Měkké pěny.....	15
1.2.1.4 Polotvrdé pěny .....	16
1.2.1.5 Integrované pěny .....	16
1.2.2 Polyuretanové elastomery .....	17
1.2.3 Sendvičové systémy .....	18
1.2.4 Meze pevnosti polymerů .....	19
1.3 ADHEZE A ADHEZIVA .....	22
1.3.1 Teorie adheze a základní pojmy.....	22
1.3.2 Sorpční teorie adheze .....	24
1.3.3 Klasifikace adheziv .....	26
1.3.4 Vztah mezi fyzikální a technickou adhezí .....	27
1.4 TECHNIKY LEPENÍ .....	28
1.5 VELKOPLOŠNÉ SPOJE.....	29
1.5.1 Překládané spoje .....	30
1.5.2 Spoje čelních ploch .....	31
1.5.3 Násuvné (trubkové) spoje .....	32
1.5.4 Sendvičové konstrukce.....	33
1.6 ZPŮSOBY ZKOUŠENÍ LEPENÝCH SPOJŮ .....	33
1.6.1 Metody destruktivní .....	34
1.6.1.1 Pevnost lepených spojů ve smyku .....	34
1.6.1.2 Pevnost lepených spojů v tahu.....	34
1.6.1.3 Pevnost lepených spojů v odlupování.....	34
1.6.1.4 Pevnost lepených spojů při namáhání rázem.....	35
1.6.1.5 Zkouška lámavosti lepených spojů.....	35
1.6.1.6 Zkouška trvalé.....	35
1.6.2 Metody nedestruktivní .....	35
1.6.2.1 Akustická defektoskopie.....	36
1.6.2.2 Optické zkušební metody.....	36
1.6.2.3 Defektoskopie pomocí radioizotopů.....	36
1.6.2.4 Ultrazvuková defektoskopie .....	36
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>37</b>
<b>2 PRAKTICKÉ ZKOUŠENÍ LEPENÍ</b> .....	<b>38</b>
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY A METODY MECHANICKÝCH ZKOUŠEK .....	38
2.1.1 Tahová zkouška.....	41
2.2 MATERIÁL PRO ZKOUŠENÍ .....	42
2.2.1 Polyuretany .....	42



2.3	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	43
2.3.1	Trhací stroj .....	43
2.3.2	Hydraulický vysekávací lis .....	44
2.4	LEPIDLA .....	46
2.4.1	Lepidlo Pattex Chemoprén Univerzál KLASIK .....	46
2.4.2	Lepidlo UHU KONTAKT KRAFTKLEBER.....	47
2.4.3	Lepení vzorků.....	48
2.4.3.1	Značení vzorků .....	49
2.4.3.2	Vzorek lepený po celé délce .....	49
2.4.3.3	Vzorek přeplátovaný.....	49
2.4.3.4	Vzorek pro peel test .....	50
<b>3</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....</b>	<b>51</b>
3.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	52
3.1.1	Samostatné vzorky .....	52
3.1.1.1	Měření série 1 .....	52
3.1.1.2	Série měření 2 .....	56
3.1.2	Lepení spoj celistvý.....	60
3.1.2.1	Lepení spoj – stejné materiály .....	60
3.1.2.2	Lepení spoj - kombinace materiálů.....	68
3.1.3	Lepení spoj přeplátovaný .....	76
3.1.3.1	Lepení spoj přeplátovaný – stejné materiály .....	76
3.1.3.2	Lepení spoj přeplátovaný – kombinace materiálů .....	92
3.1.4	Peel-test .....	108
3.2	PRAKTICKÁ APLIKACE LEPENÉHO SPOJE .....	113
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>115</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>117</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>119</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>121</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>128</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>129</b>

## ÚVOD

Polyuretany jsou porézní materiály, které mohou mít poměrně široký rozsah hustot. Pro letecké aplikace se využívají hlavně skupina velmi lehkých polyuretanů, u kterých je hodnota hustoty nižší než  $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Lepený spoj porézního materiálu má svá specifika a je nutné k němu přistupovat s ohledem na výslednou aplikaci a použití. Pro řešení problematiky lepení polyuretanů v kabině UL letadla byly vybrány tři druhy polyuretanů, u kterých se zkoušely základní pevnostní spoje s ohledem na možnost použití. Výsledné hodnoty a postupy lepení byly použity pro návrh lepení akustické porézní izolace v letadle typu ALFA a SportStar (ultra lehká letadla s váhou do 450 kg).

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZÁKLADNÍ MATERIÁLY

Syntetické polymery jsou relativně nové materiály, které ještě před 70 lety v podstatě neexistovaly, ale dnes se používají téměř ve všech oborech lidské činnosti. Historie syntetických polymerů začíná těsně před první světovou válkou, kdy Američan Baekeland připravil fenolformaldehydové pryskyřice. Před druhou světovou válkou činila světová výroba syntetických polymerů něco přes čtvrt miliónu tun. Neobyčejně rychlé a všestranné rozšíření výroby a zpracování polymerů má několik hlavních příčin. [1]

Polymery jednak mohou nahrazovat klasické materiály (kovy, keramiku, sklo, kůži, vlnu, přírodní kaučuk aj.), a také mohou mít vlastnosti zcela odlišné od těchto klasických surovin, takže umožňují zcela nové aplikace a nová řešení materiálových problémů. [2]

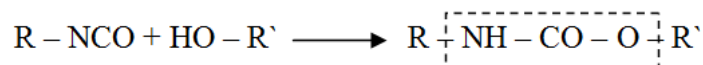
Řada polymerů se vyrábí z relativně levných a dostupných surovin, a může tedy nahradit nedostatkové a drahé materiály. Polymery lze velmi snadno zpracovávat tvářením z taveniny nebo roztoku, a proto umožňují rychlou a levnou výrobu předmětů hromadné spotřeby.

Názvoslovná norma rozlišuje dvě velké skupiny plastů: termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty jsou složeny z jednotlivých makromolekul, které jsou vzájemně poutány jen fyzikálními vazbami. Proto při zvýšené teplotě postupně měknou a přecházejí do taveniny. Stojí za zmínku, že tento přechod je pozvolný, jak to vyplývá z amorfní matrice všech termoplastů. Právě tím se liší termoplasty od běžných kovů a viskózní konzistence taveniny termoplastů vlastně umožňuje všechny běžné zpracovatelské technologie. Naproti tomu makromolekuly reaktoplastů jsou propojeny do husté souvislé sítě, takže s růstem teploty se nemohou roztavit a obvykle ještě zvyšují svoji tuhost a tvrdost (proto se jím také dříve říkalo termosety). Při dostatečně vysoké teplotě pak reaktoplasty degradují neb i hoří. Existují i přechodné materiály, např. sesítovaný polyethylen v němž je polymerní síť poměrně řídká ale přesto zvyšuje teplotu tání materiálu. [2]

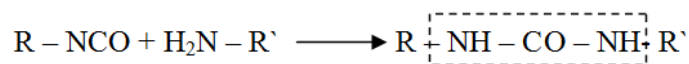
## 1.1 POLYURETHANY

Polyurethany patří do skupiny polymerů, které jsou relativně nové materiály.

Pod pojmem polyuretany rozumíme skupinu polymerů vzniklých reakcí vícefunkčních isokyanátů s polyalkoholy. Reakcí isokyanátů s alkoholy vznikají uretany – estery kyseliny karbamové:



Tato hlavní růstová reakce je často záměrně nebo samovolně doprovázena dalšími vedlejšími reakcemi, kterými vznikají jiné než uretanové strukturní jednotky. Isokyanáty reagují totiž s mnoha sloučeninami obsahujícími aktivní vodíkové atomy. Tak s aminy reagují za vzniku substituovaných močovín:



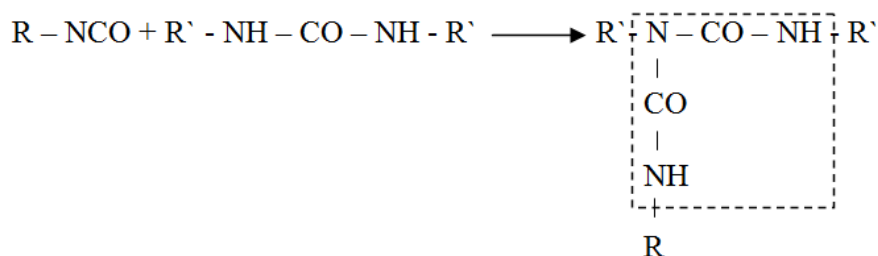
Reakcí s vodou vznikají aminy a uvolňuje se oxid uhličitý:



Vzniklý amin reaguje s další molekulou isokyanátu za vzniku substituované močoviny. S karboxylovými kyselinami vytvářejí isokyanáty substituované amidy a oxid uhličitý:



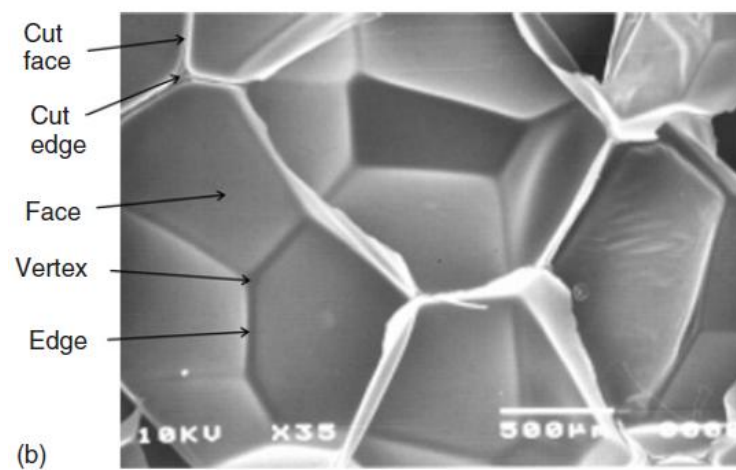
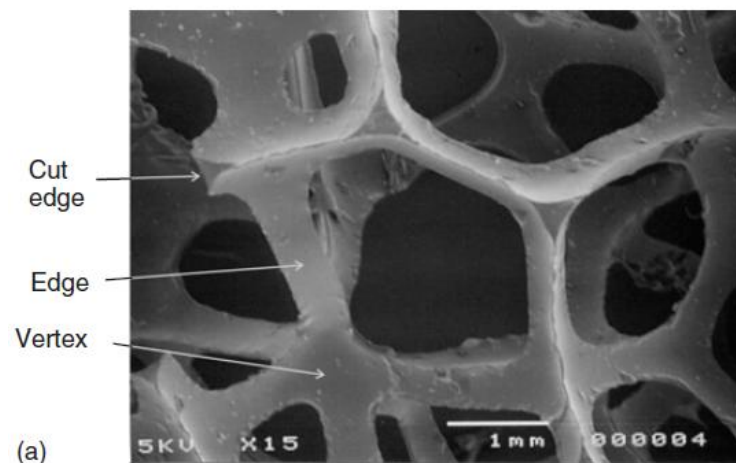
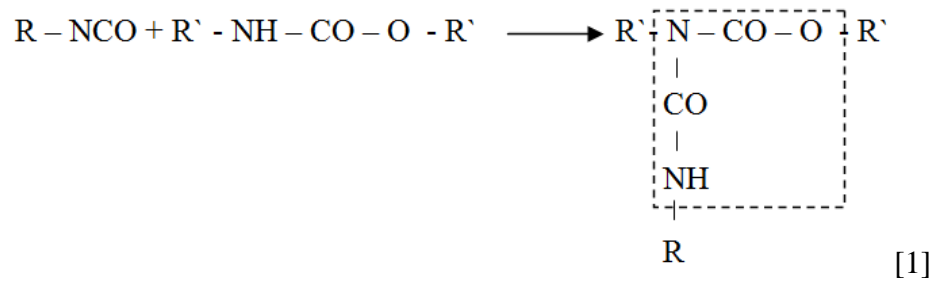
Za určitých podmínek může isokyanát reagovat se substituovanou močovinou (produktem primární reakce – NCO s aminem) za vzniku N- substituovaného biuretu:



[1]

Podobně může reagovat isokyanát s vodíkem urethanové skupiny za vzniku

N-substituovaných esterů kyseliny allofanové:



Obr. 1 Otevřená (a) a uzavřená struktura polyuretanu (b). [4]

## 1.2 ROZDĚLENÍ POLYURETHANŮ

### 1.2.1 Lehčené hmoty

Polyuretany se používají při výrobě lehčených hmot (pěnových materiálů), které vznikají současnými reakcemi diisokyanátů s polyhydroxysloučeninami (polyethery nebo polyesteru) a vodou. Reakcemi diisokyanátů s hydroxylovými skupinami vznikají polyuretanové vazby a při reakcích isokyanátových skupin s vodou se odštěpuje  $\text{CO}_2$ , které působí jako nadouvadlo. Aminy vzniklé při této reakci ihned reagují s přítomnými isokyanátovými skupinami za vzniku močovunových seskupení. Zesíťované polyuretanové pěny obsahují podle výsledků IČ-spektroskopie urethanové, močovinové a biurethanové struktury. [1]

#### 1.2.1.1 Základní příprava

Pro přípravu měkkých pěn se jako hydroxylová složka používají lineární nebo slabě rozvětvené polyesteru kyseliny adipové a diethylenglykolu (s přidavkem trimethylolpropanu) vedle polyetherů připravených polymerací propylenoxidu, ethylenoxidu nebo tetrahydrofuranu. Lehčené hmoty z polyetherů jsou elastičtější a stálější vůči hydrolyze než polyesterové hmoty, avšak podléhají snáze oxidaci. Pro přípravu měkkých pěn je třeba, aby mezi uzly polymerní sítě byly dlouhé a elastické řetězce. Hmotnostní podíl isokyanátové složky proto nemá překročit 40%. Převážně lineární polyetherové nebo polyesterové složky mají proto relativně nízké hydroxylové číslo (40 až 80 KOH na  $\bar{T}g$ ) a  $M$  2000 až 4000. [1]

#### 1.2.1.2 Tvrdé pěny

Tvrdé pěny se připravují v otevřených nebo uzavřených formách. Je možno také pracovat dvoustupňově; z polyesteru nebo polyetheru a přebytku diisokyanátu se připraví předpolymer, který je delší dobu skladovatelný a může být vypěněn přidavkem vody, popř. fyzikálně pomocí fluortrichlormethanu. [1]

#### 1.2.1.3 Měkké pěny

Téměř 90% měkkých pěn se připravuje v blocích. Převážně se používají polyethery (zejména pro polštářování; je tak získávána asi 1/3 všech matrací v SRN). Měkké polyesterové pěny se používají pro laminování textilu, pro obaloviny, izolační a těsnící pásy aj.

Vedle bloků se měkké pěny vyrábějí také ve formách, zejména pro potřeby nábytkářského a automobilového průmyslu. Zde se rozmáhá použití tzv. studených pěn, při jejichž výrobě se používají vysoce reaktivní polyethery o  $\bar{M}$  5000 a více a isokyanáty s funkčností na 2, které se získávají smíšením toluylendiisokyanátu s polymerním difenylmethandiisokyanátem.

Pěny ve formách se vyrábějí tam, kde jsou zapotřebí takové tvary, které by se nedaly získat přirezáváním. [1]

#### ***1.2.1.4 Polotvrdé pěny***

Polotvrdé pěny se připravují výhradně v blocích na polyesterové bázi o hustotě 100 až 150 kg.m<sup>-3</sup>. Tvrdé pěny se připravují ve formě bloků a desek. Většina jich slouží pro vyplňování dutin a pro izolační účely (hlavně pro ledničky, pro stavebnictví, izolace potrubí aj.). [1]

#### ***1.2.1.5 Integrální pěny***

Významnou položkou jsou tzv. integrální pěny. Jsou to lehčené hmoty, v nichž se během přípravy ve formě vytvoří pórovité jádro a nepórovitá kůra, která je integrální součástí výrobku. Hustota hmoty od středu ke kraji vzrůstá. Jako nadouvadlo slouží v tomto případě fluortrichlormethan (b. v. 24,9 °C). V závislosti na teplotním gradientu mezi teplotou formy a vnitřku pěny dochází k rozdělení pórů; čím nižší je teplota formy, tím tlustší je kůra. Pro přípravu měkkých integračních pěn (150 až 800 kg.m<sup>-3</sup>) se používají výšemolekulární polyethery ( $\bar{M}$  = 5000) a přidává se jen nepatrné množství nízkomolekulárních polyolů jako síťovadel.

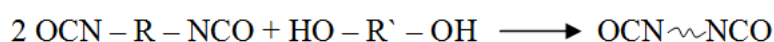
Při přípravě tvrdých integrálních pěn se pracuje s kratšími polyethery pro dosažení silného zesíťování. Směs se zpěňovadlem se vypouští do forem, kde se vlivem exotermické reakce odpařuje nadouvadlo, čímž se směs napění a vyplní dutinu formy. Přitom musí mít vzduch možnost uniknout z formy vhodnými otvory. Z vláčných integrálních pěn se vyrábějí tvarované podrážky dámských bot, automobilové nárazníky aj. Tvrdé lehčené hmoty se používají jako integrální pěny v nábytkářství, pro výrobu fotokříněk, jader lyží apod. [1]



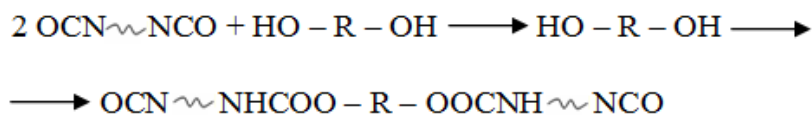
### 1.2.2 Polyuretanové elastomery

Polyuretanové elastomery se získávají z předpolymeru obsahujícího koncové – NCO, který se připravuje při 100 až 120°C smíšením dvojfunkčního isokyanátu v přebytku (asi 170% ekvivalentního množství) s lineárním polyesterem nebo polyetherem s koncovými skupinami –OH. Polyester bývá na bázi kyseliny adipové a ethylenglykolu, 1,3- nebo 1,4-butandiolu nebo propylenglykolu. Z polyetherů má nejlepší vlastnosti

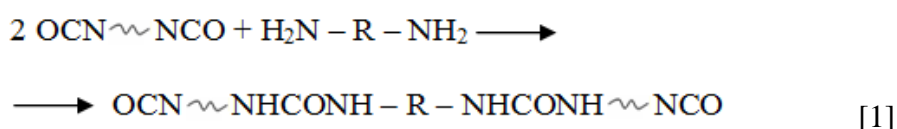
poly (1,4- oxybutylen) glykol z tetrahydrofuranu.  $\bar{M}$  těchto diolů bývá 800 až 3000. Jako isokyanáty slouží 2,4- diisokyanatotoluen, 4,4- diisokyantadifenlmetan a 1,5- diisokyanatonaftalen. [1]



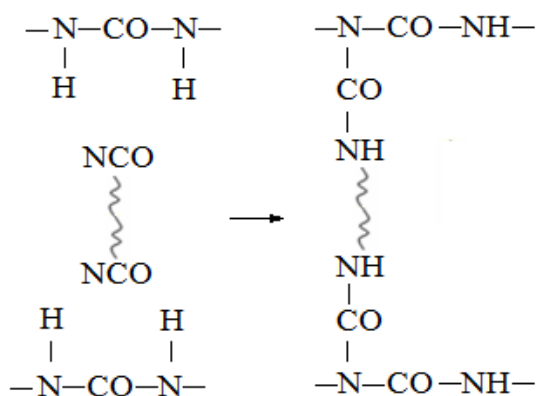
Ve druhém stupni se pro prodloužení řetězce při stejné teplotě přidávají v menším než ekvivalentním množství nízkomolekulární sloučeniny reagující se skupinami – NCO. Jde o dioly a diamanty (1,4- butandiol, 1,6- hexandiol, 3,3'-dichlor, 4,4'- diaminodifenylmethan, trimethylolpropan). Získají se polymerní řetězce, obsahující ještě koncové skupiny – NCO:



Nebo



Ve třetím reakčním stupni dochází při následném zahřívání k zesíťování. Zbývající volné skupiny – NCO makromolekulárních řetězců reagují se skupinami – NH– urethanových nebo močovinných skupin za vzniku allofanátových nebo bibretových vazeb a dochází ke stejnoměrnému zesíťování:



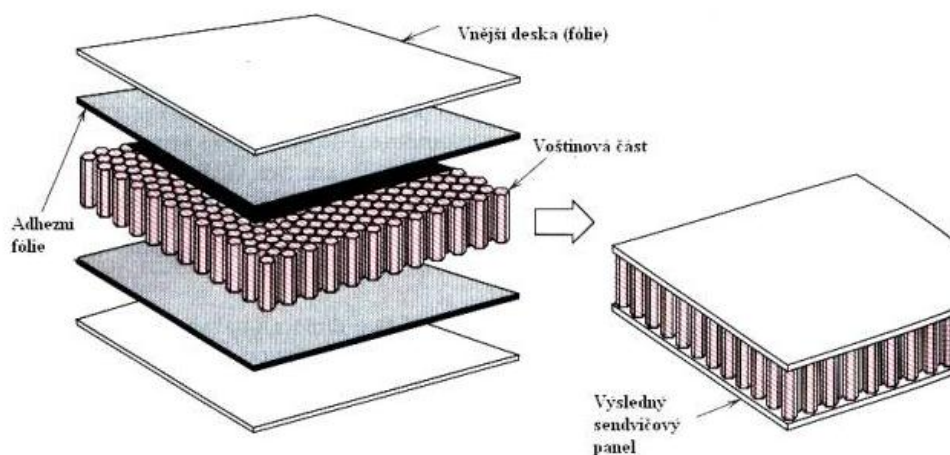
Konečné řídké zesíťování vzniká po nalití evakuací odplyněné hmoty do forem, kde se udržuje 4 až 24 h při 100°C. Místo tohoto licího postupu lze pracovat také na válcích, kde se lineární předpolymery zesíťují za tepla po zaválcování vhodných síťujících látek obsahujících reaktivní skupiny –OH nebo –NH<sub>2</sub>.

Lze připravit polyuretanové kaučuky různých tvrdostí s vysokou protažitelností. Vždy jde o kaučuky s vynikající elasticitou a lepší odolností proti opotřebení, než mají všechny ostatní elastomery. Jako nasycené sloučeniny kaučuky dobře odolávají světlu, kyslíku, ozonu i alifatickým uhlovodíkům. Nevýhodou je jejich relativně nízká tepelná odolnost (začínají se odbourávat již nad 100°C) a vysoká cena (asi čtyřnásobek ceny styrenbutadienových kaučuků). Používají se zejména na různá těsnění, membrány, pohonné řemeny a pro výrobu podešví. [1]

Polyuretanové elastomery jsou vyráběny také v podobě granulátu zpracovatelného jako běžné termoplasty na vstřikovacích strojích se šnekovou plastikací při teplotách 190 až 230°C. Při této teplotě jsou některé uretanové vazby reverzibilně štěpitelné (reakční komponenty použité pro uvedený účel musí být přísně dvoufunkční). Kromě výrobku pro technický sektor se tímto způsobem vyrábějí také moderní lyžařské boty. Vedle racionální výroby a dobré barvitelnosti je oceňována i kvalita povrchu. [1]

### 1.2.3 Sendvičové systémy

Sendvičové struktury představují zvláštní druh laminátového kompozitu, který se skládá ze dvou vnějších tuhých vrstev a jádra z lehkého materiálu (Sendviče se na rozdíl od jednoduchých laminátů vyznačují vyšší tuhostí, lepšími izolačními vlastnostmi a nižší hmotností. Používají se jako jádro u konstrukcí, kde je důraz kladen na nízkou hmotnost. [6]



Obr. 2. Sendvičový kompozit [6]

#### 1.2.4 Meze pevnosti polymerů

Z tvaru potenciálové bariéry meziatomové vazby vyplývá, že vazba se rozpadne přibližně při desetiprocentní deformaci. Pro teoretickou pevnost pak vychází jednoduchý vztah  $\sigma_{\text{teor}} = 0,1 E$ , kde  $E$  je Youngův modul pružnosti. Ve skutečnosti je však pevnost většiny pevných látek tisícinásobně nižší než teoretická hodnota. Zatímco v případě anorganických skel je rozdíl způsoben především povrchovými trhlinkami, je za nízkou pevnost běžných polymerních materiálů odpovědná amorfnní fáze. O její soudržnosti rozhodují především fyzikální interakce mezi makromolekulami (například zapleteniny) a vlastní pevnost polymerních řetězců se na vnějším chování nemůže uplatnit (viz. tabulka č. 1). Přitom jde o impozantní hodnoty. Například modul pružnosti podél molekulárního řetězce dokonale lineárního polyethylenu (polymethylenu), který se někdy přirovnává k „lineárnímu diamantu“, dosahuje 329 GPa. Z toho pak vyplývá teoretická pevnost dokonale orientovaného polyethylenu nejméně 30 GPa. [1]

Existují v zásadě dvě cesty, jak využít vysoké pevnosti meziatomových vazeb v polymerních molekulách. První z nich je chemická syntéza neohebných řetězců, které mají trvale tvar tuhých a pevných tyčinek. Druhý způsob pak je změnit nadmolekulární strukturu polymerů s ohebnými řetězci fyzikálními postupy. Je ještě třetí způsob přípravy tuhého a pevného materiálu a to řízenou karbonizací a grafitizací orientovaných syntetických vláken, zejména z polyakrylonitrilu. Získaná uhlíková vlákna však už nelze počítat mezi po-

lymerní materiály. Příkladem materiálů připravených prvním postupem jsou vlákna aromatických polyamidů, například Kevlar. Z fyzikálních způsobů úpravy nadmolekulární struktury byla úspěšně ověřena krystalizace ve smykovém poli ze zředěných roztoků, dloužení a vytlačování polymerů v tuhém stavu za definovaných podmínek a zejména dloužení nabotnalých (tzv. gelových) vláken, které se už využívá v průmyslovém měřítku. Tato metoda poskytuje u polyethylenu s pevností přes 5 GPa. Jak je patrné z tabulky č. 2, postavení polyethylenu mezi ostatními pevnými materiály vynikne zejména tehdy, když se jeho pevnost vztáhne na jednotku hmotnosti a vyjádří jako tzv. tržná délka. To je hypotetická délka pruhu materiálu, který by se při zavěšení přetrhl vlastní vahou. [1]

Vývoj extrémně pevných struktur ze semikristalických polymerů neskončil a lze očekávat, že ještě přinese pozoruhodné výsledky. Významné by například bylo zvýšení pevnosti u běžných polyamidů, které mají proti polyolefinům podstatně vyšší teplotní odolnost. [1]

Tab. 1 – Krátkodobé pevnostní vlastnosti některých polymerních materiálů při pokojové teplotě:

pevnost v tahu  $\sigma_b$ , lomová energie  $G_{Ic}$ , lomová houževnatost  $K_{Ic}$ . Jde pouze o přibližné orientační hodnoty, jejichž kolísání je ovlivněno experimentální metodikou, nadmolekulární strukturou, obsahem vlhkostí (u polyamidů) a orientací vláken (u kompozitů). [2]

<b>Materiál</b>	$\sigma_b$ Mpa	$G_{Ic}$ kJ.m <sup>-2</sup>	$K_{Ic}$ Mpa.m <sup>1/2</sup>
<b>Lineární sklovité polymery</b>			
Polymethylmethakrylát	100	0,5	1 – 3,5
Polystyren	50 – 100	0,3	0,6 – 2,3
Polyvinylchlorid	60	1,7	2,2 – 5,5
Polykarbonáty	60	1,5	3 – 10
<b>Sesíťované sklovité polymery (reaktoplasty)</b>			
Nenasycené polyestery	60	0,1	0,6 – 1,5
Epoxidy	55 – 130	0,1 - 0,2	0,5 – 1,7
Fenolformaldehyd. Pryskyřice	40-55	-	0,4 – 1,2
<b>Semikristalické polymery</b>			
Vysokohustotní polyethylen	30	2	1,7 – 6,5
Nízkohustotní polyethylen	10	30	5
Polypropylen	35	16	3 – 6
Polyamid 6	50 – 100	2 – 4	2,5 – 10
Polyoxymethylen	70	-	2,5 – 9
<b>Kompozity</b>			
Vlákný vyztužené reaktoplasty	$(0,4-3) \times 10^3$	3 – 8	10 – 50
Vlákný vyztužený polyamid 6	$1 \times 10^3$	5	4 – 10
Rázuvzdorný polystyren	50	2	2

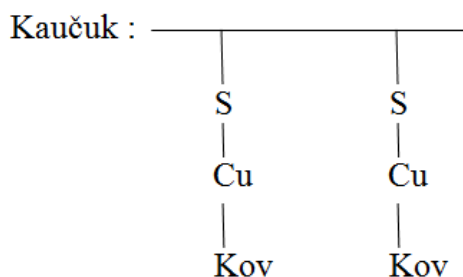
Tab. 2 – Mechanické vlastnosti pevných a tuhých materiálů. [2]

Materiál	Pevnost v tahu GPa	Hustota kg.m <sup>-3</sup>	Tržná délka km
Ocel	1 – 4	7800	10 – 50
Skleněné vlákno	2	2500	80
Uhlíkové vlákno	1,5 – 3	1800	60 – 170
Kevlar	2,5	1450	180
PE- běžný lineární typ	0,02	960	2
PE- dloužený za studena	0,4	960	40
PE- vytlačovaný v tuhém stavu	0,5	960	50
PE- krystalizovaný v roztoku	1	960	100
PE- dloužený z gelového vlákna	4 – 6	960	400 – 600

### 1.3 Adheze a adheziva

#### 1.3.1 Teorie adheze a základní pojmy

Chemické teorie adheze vycházejí z představy, že síly působící na fázovém rozhraní adherent / adhezivní film mají charakter chemických (kovalentních) vazeb, které jsou typické vysokým energetickým obsahem (100 – 1000Kj/mol). Tak při studii adheze kaučuků ke kovovým povrchům, pokovených mědí se podařilo poly-sulfidické vazby mezi mědí a kaučukem typu:



Obr. 3. Struktura vazeb kaučuku s mědí

Látky, které v takových případech zprostředkovávají adhezi (v daném případě měď) se označují jako promotory adheze. V různých systémech adherent / adhezivum mohou mít různou povahu. Např. pro systém sklo (skleněná vlákna) / polybutadien jsou dobrými promotory slitiny. Přítomnost promotorů není vždy nutnou podmínkou. Na příklad zvýšení autoafheze listů polyethylenu lze dobře dosáhnout přidáním 2% dikumylperoxydu, který při

teplotě 120 – 140°C napomáhá tvorbě příčných (chemických) vazeb mezi povrchy listů. [5]

Pevnost adhezivních spojení v rozlepení podle této koncepce je lineárně úměrná povrchové koncentraci promotoru C:

$$F/b = A_0 + A_1 C \quad (1)$$

Chemické teorie adheze jsou dnes zastávány jen malým počtem autorů především proto, že snahy zavést do adhezi či adherentů reakce schopné funkční skupiny vedly obecně spíše k zhoršení pevnosti adhezivních spojů než k jejímu zlepšení. [5]

Mechanická teorie vychází z představy, že po proniknutí kapalného adheziva do trhlin a kavit lepeného povrchu, dojde po zatuhnutí adheziva k jeho “zaklínění“ v povrchu adherentu. Původním autorem této koncepce je Mc Bain, teorie později rozpracovali především Brune a Houwink. Teoreticky by zvýšená penetrace adheziva do povrchu adherentu (nižší viskozita adheziva) měla vést k vyšší pevnosti spoje, avšak v praxi často dochází s poklesem viskozity adheziva k snížení pevnosti spojení následkem vzniku diskontinuálního adhezivního filmu (tzv. “hladové spoje“). Proto někteří pozdější autoři začali uvažovat mimo mechanické zaklínění adhezivního filmu v povrchu adherentu i vliv mezifázových interakcí. Pevnost adhezivního spoje, vyjádřená poměrem síly, potřebné k jeho rozlepení a šířky adhezivního spoje ( $F/b$ ) je pak podle nich výslednicí působení faktorů:

$$F/b = K \cdot P_M \cdot P_I \quad (2)$$

Teorie elektrostatické vyházejí z poznatku Děrjagina (1948), že při vzniku rozlepování adhezivních systémů skleněného vlákna, syntetický polymer vzniká na rozlepovaném povrchu elektrická dvojvrstva. Děrjagin proto spatřoval analogii mezi rozlepováním adhezivních spojů a separací desek nabitého rovinného kondenzátoru a vysvětloval adhezivní spojení pomocí elektrostatických sil. Energie potřebná pro separaci  $G_e$  je pak podle Děrjagina dána vztahem:

$$G_e = \frac{h \cdot \varepsilon}{8\pi} \left[ \frac{\delta \cdot V_e}{\delta \cdot h} \right]^2 \quad (3)$$

Při podrobnějších studiích nebyla prokázána korelace mezi velikostí povrchového elektrostatického náboje a pevností odpovídajících adhezních spojení a navíc bylo prokázáno, že eventuální podíl elektrostatických sil při rozlepování je ve srovnání s energií viskozního toku adhezního filmu zanedbatelný. Pevnost adhezivních spojů v rozlepení se snižující se teplotou navíc roste, zatím co snížení teploty vede u kondenzátoru k poklesu elektrostatického náboje. [2]

Teorie difúzní, za jejíhož zakladatele je považován S. S. Vojutskij, vychází v podstatě s teorie mechanické s tím, že místo úrovně mikroskopické uvažuje úroveň molekulární. Jejím základem byly studie autoadheze polymerů (adheze vrstev téhož polymeru). V takových případech uplatňuje interdifuze makromolekulárních segmentů přes fázové rozhraní tak výrazně, že vede k vymezení fázového rozhraní. Pokud jsou makromolekulární segmenty různých polymerů dostatečně pohyblivé a vzájemně kompatibilní (rozpuštěné), může se interdifuze uplatnit i v případech rozdílných polymerů. Pevnost adhezního spoje pak závisí na několika faktorech, především na:

- době kontaktu adheziva a adherentu
- teplotě
- charakteru polymerů (kompatibilitě)
- molekulární hmotnosti polymerů [2]

### 1.3.2 Sorpční teorie adheze

Dnes nejvíce přijímaná adsorpční teorie adheze vychází z analogie jevu smáčení, adsorpce a adheze. Za nejvýznamnější síly, působící v lepeném spoji přes fázové rozhraní pokládá síly van der Waalsovské (síly, působící na krátké vzdálenosti), které vzhledem k jejich univerzálním charakteru a četnosti považuje, přes poměrně nízký energetický obsah za postačující k dosažení dobré pevnosti adhezního spojení. [5]

V procesu adhezního spojování rozeznáváme dvě stadia. V prvním převažuje transport molekul adheziva k povrchu adherentu na vzdálenost, umožňující vzájemnou interakci obou fází silami van der Waalsovskými. Toto stadium urychlují všechny faktory, které zvyšují pohyblivost molekul (zvýšení teploty, tlaku, přídavek plastifikátorů, dobré smáčení povrchu adherentu kapalným adhezivem atd.). Druhá fáze, k níž dochází v okamžiku, kdy



se molekuly adherentu a adheziva přiblíží na vzdálenost, při které začínají působit van der Waalsvské síly (tj. řádově cca  $5A$ ) je analogická sorpci a je časově podstatně méně náročná. [5]

Zatím co uvnitř kapaliny je každá molekula obklopena sféricky symetrickým silovým polem, molekuly na jejím rozhraní se vzduchem (nasyčeným parami dané kapaliny mají silové pole nesymetrické a výslednice sil se projevuje tendencí "vááhnout" povrchovou molekulu do nitra kapaliny. Tato nevyváženost silového pole je charakterizována určitým množstvím volné energie  $\sigma$  ( $\text{Jm}^{-2}$ ). Taková situace je na každém fázovém rozhraní dvou nemísitelných kapalin. Má-li se dvoufázový systém vzájemně nemísitelných kapalin A a B rozdělit v rovině fázového rozhraní, je třeba vynaložit práci, definovanou Duprésovou rovnicí (4):

$$W_{AB} = \sigma_A + \sigma_B - \sigma_{AB} \quad (4)$$

Později tuto práci (energii)  $W_{AB}$  označil Harkins jako práci adheze. Podobně i na rozdělení sloupce kapaliny v hypotetické rovině je třeba vynaložit určitou práci, definovanou analogickým vztahem (5):

$$W_{AA} = \sigma_A + \sigma_B = 2\sigma_A \quad (5)$$

Kterou Harkins označil jako práci koheze.

U kapalin je volná povrchová energie  $\sigma$  ( $\text{Jm}^{-2}$ ) rozměrově i numericky totožná s povrchovým napětím  $\gamma$  ( $\text{N.m}^{-1}$ ). Vch fází je navíc obtížně přístupná přímému měření a obvykle se experimentální měření realizuje na styku tří fází systému, tvořeného kapkou kapaliny, nanesené na tuhý povrch, který je ve styku se vzduchem, nasyčeným parami dané kapaliny. Za rovnováhy musí platit:

$$\sigma_S = \sigma_{SL} + \sigma_L \cdot \cos \Theta \text{ resp.} \quad (6)$$

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cdot \cos \Theta \quad (7)$$

Pára kapaliny použité při takovém měření je sorbována sledovaným tuhým povrchem, takže volná povrchová energie tuhé fáze z Duprésovy rovnice (6) se tím mění na hodnotu ( $\sigma_{SV}$ ). Rozdíl  $\sigma_S - \sigma_{SV}$  se označuje jako rozestírací tlak  $\pi_e$  (8):

$$\pi_e = \sigma_S - \sigma_{SV} \quad (8)$$

Pro tuhé povrchy pak, exaktně vzato, platí Dupréssova rovnice (9) ve tvaru:

$$W_{SL} = \sigma_S - \sigma_{SV} + \sigma_L \cdot (1 + \cos \Theta) + p_e \quad (9)$$

Což znamená další komplikace. Experimentálně bylo zjištěno (Zisman), že zanedbání  $p_{eu}$  nízkoenergetických tuhých povrchů (definovaných volnou povrchovou energií (do  $0.1 \text{ J}\cdot\text{m}^{-1} = 100 \text{ erg}/\text{cm}^2$ ), za které lze považovat povrchy syntetických i přírodních polymerů) nevede k závažným chybám. Naproti tomu u skla, porcelánu, obecně silikátů které jsou povrch vysokoenergetickými (s vyšší volnou povrchovou energií než  $200 \text{ erg}/\text{cm}^2$ ) se zanedbáním rozestíracího tlaku  $p_e$  dopouštíme značně vysokých chyb. [5]

### 1.3.3 Klasifikace adheziv

Adheziva se v technické praxi klasifikují podle nejrůznějších hledisek. Důležitým hlediskem je např. chemická povaha základního polymeru, která zásadním způsobem ovlivňuje vlastnosti adheziva. Z tohoto pohledu se rozlišují adheziva anorganická a organická, která zahrnují adheziva na bázi přírodních polymerů - biopolyerů, reaktoplastů, termoplastů a eleastomerů. Zvláštní skupinou jsou směsná adheziva, obsahující v určitých poměrech složku reaktoplastickou i termoplastickou a spojují tak, v míře dané poměrem obou složek typické vlastnosti reaktoplastických a termoplastických adheziv. [5]

Oblíbeným kritériem výrobců adhezi je klasifikace na fyzikálním charakteru adhezi, který do jisté míry určuje podmínky praktické aplikace adhezi. Podle tohoto kritéria se rozlišují adheziva pevná (prášky nebo folie), polopevné (trvale lepidivé hmoty, resp. Adheziva citlivá na tlak) a adheziva tekutá, u kterých se dále rozlišuje mezi adhezivy roztočovými (roztoky polymerů v organických rozpouštědlech), dispersními (vodné disperze polymerů) pastami a pěny. [5]

Někteří autoři využívají jako klasifikačního kritéria typ reakce uplatňující se při praktických aplikacích adhezi a rozlišují pak mezi adheziva typu polyadičního, polymeračního, polykondensačního a vulkanizačního. Poslední dvě z uvedených kategorií někteří autoři označují jako adheziva reaktivní. [5]

Pro získání přehledu je nejvýhodnějším klasifikačním systémem třídění podle chemické povahy převazujícího polymeru, (adheziva na bázi polymerů přírodních, reaktoplastických, termoplastických, dále smíšené reaktoplasticko-termoplastické systémy a adheziva na bázi eleastomerů). [5]

### 1.3.4 Vztah mezi fyzikální a technickou adhezí

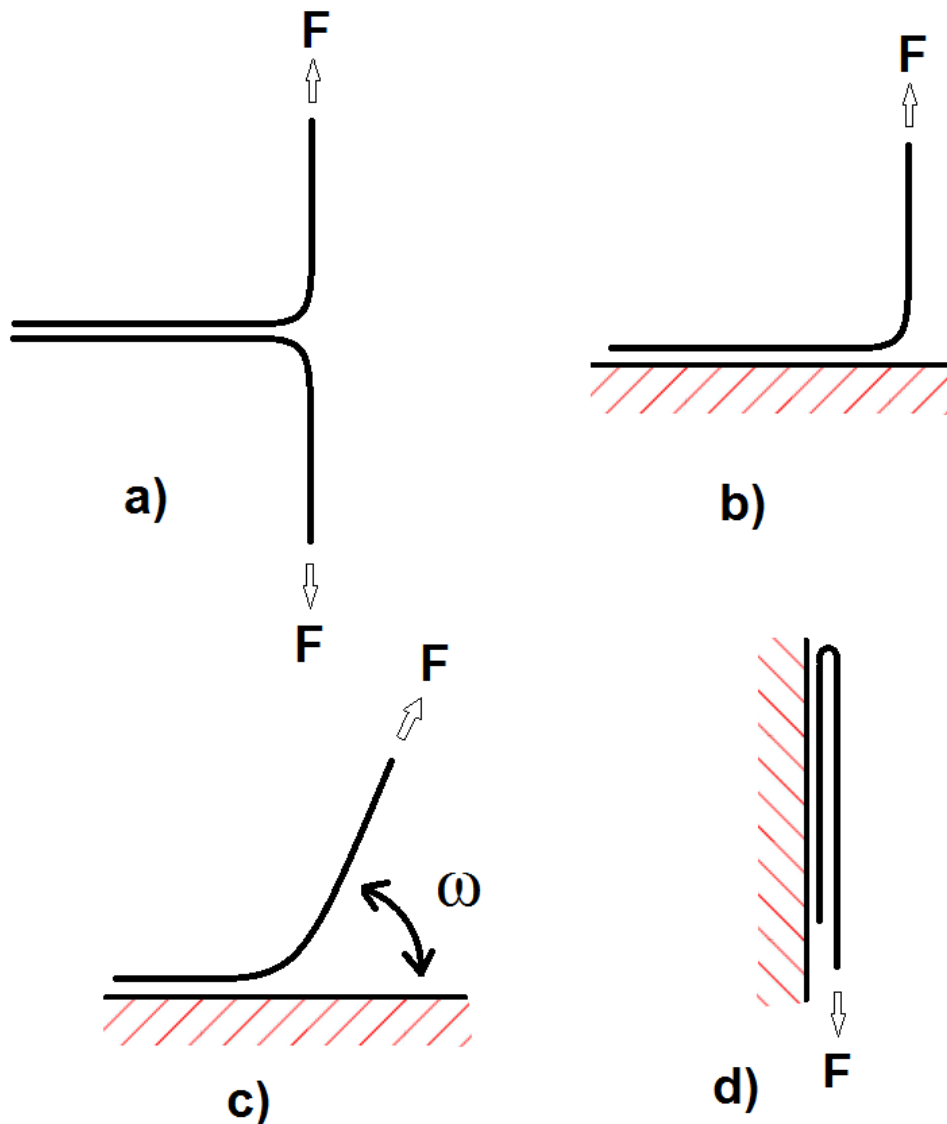
Zatímco adheze ve fyzikálně-chemickém slova smyslu je synonymem termodynamické práce adheze (termodynamická veličina), v technickém slova smyslu se adhezí rozumí pevnost adhezního spoje, totožná s energií (prací), kterou je potřebné vynaložit na rozrušení lepeného spoje. Ta ovšem závisí na řadě dalších faktorů, jako je geometrické uspořádání daného spoje, geometrie, způsob a rychlost jeho silového namáhání, na (reologických) tokových charakteristikách adherentu i adhezního filmu a některých dalších.

V běžné praxi kožedělné výroby, stejně jak řady dalších průmyslových výrob má největší význam pevnost spoje v rozlepení, (která se experimentálně zjišťuje v závislostech na flexibilitě adherentu a geometrii silového zatěžování spoje) pomocí T - nebo L- testu (obr.4.), případně testu kdy se adherentu spoje rozlepují v úhlu 180° (obr.4.). Geometrie takových testů a definice úhlu rozlepování je zřejmá z obrázku (obr.4.).

Analýzou procesu rozlepování při rychlostech rozlepování vyšších než je rychlost kritická (od které pevnost spoje v rozlepování již je na ní nezávislá) se zabývalo několik autorů. Poněvadž při vyšších než kritických rychlostech rozlepování je plastická deformace viskoelastických materiálů do značné míry potlačena, vycházeli vesměs ze zjednodušujícího předpokladu, že jak adheziva, tak polymerní adherentu se chovají v podstatě jako ideálně elastická tělesa. [5]

Tak Bikerman došel k závěru, že síla potřebná k rozlepení spoje při L-testu (jeden z adherentů rigidní, druhý flexibilní, úhel rozlepování 90°) je dána vztahem:

$$F = 0,3799 \cdot b \cdot \sum \max \cdot \left[ \frac{E_s}{E_A} \right]^{0,25} \cdot t_s^{0,75} \cdot t_A^{0,25} \quad (10)$$



Obr. 4 Geometrie testů lepených spojů v rozlepování [5]

(a) – T – test v rozlepování: oba adherenty flexibilní, (b) – L – test v rozlepování: rigidní a flexibilní adherent, (c) – definice úhlu rozlepování, (d) - uspořádání testu v rozlepování pod úhlem  $180^\circ$

#### 1.4 Techniky lepení

Lepené spoje jsou mechanicky namáhány v tahu, tlaku, ve smyku, v odlupování, v rázové pevnosti, v kroucení apod. Ne všem těmto jevům lepidla dobře odolávají. Proto musí být konstrukce upraveny tak aby byl spoj namáhán co nejméně v odlupování a kroucení, an němž je většina lepidel velmi citlivá. Namáhání se v takových případech soustřeďuje jen do určitých míst spoje, což vede k lokálnímu přetížení a poškození filmu lepidla. Také

spoje čelních ploch, tzv. spoje na tupo, namáhané převážně v tahu nebo v lámání, je možno volit jen tehdy, jsou-li spojované plochy dostatečně velké.

Optimálních hodnot mechanické pevnosti se za daných podmínek dosahuje použitím spojů s uměle zvětšenou spárou, zejména u spojů jednostranně a oboustranně přeplátovaných, u spojů s jednostrannými nebo oboustrannými příložkami, u spojů čelních ploch s tzv. spárou tvaru V, u spojů násuvných apod. Úpravami se zvětší geometrický povrch dotykových ploch a dosáhne se takového rozdělení sil, že spoj je zatěžován převážně ve smyku.

Z technologického hlediska je při konstrukci lepených spojů nutné dbát i na to, aby dotykové plochy byly co nejméně členité a po slepení nevyžadovaly další úpravy. Lepení souboru by mělo probíhat vždy v jedné operaci, aby nevznikaly časové ztráty a aby předchozí spoj nebyl dodatečně zatěžován vyšší teplotou a tlakem. [7]

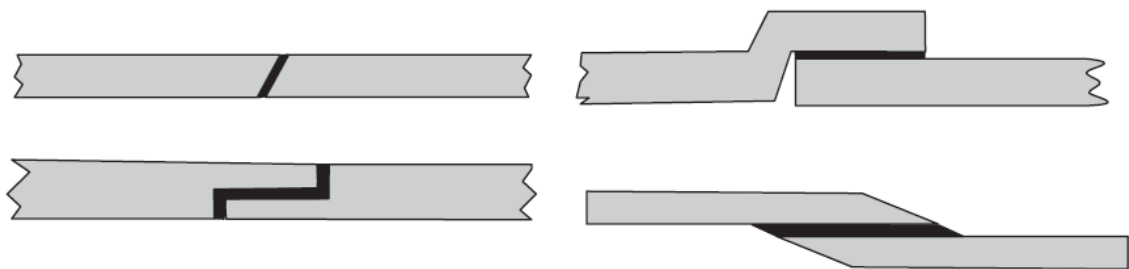
## 1.5 Velkoplošné spoje

Nejjednodušším typem lepeného spoje je spoj velkoplošný. Je častý hlavně při povrchových úpravách deskových materiálů a sendvičových konstrukcí za pomoci nábytkových krytin (laminátů), fólií, tapet a plechů. Respektování požadavku materiálové symetrie souboru je nutné, především tehdy spojují-li se materiály s rozdílnou délkovou roztažností a materiály objemově nestálé, tj. bobtnající nebo smršťující se podle změn vlhkosti a teploty prostředí.

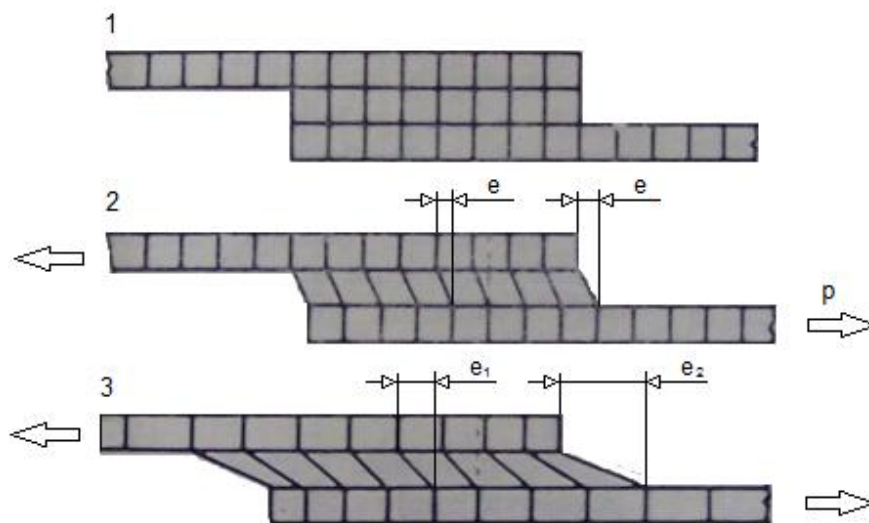
Velkoplošné spoje se dále využívají při výrobě vícevrstevných materiálů – laminátů. Kombinací syntetických pojiv s plnivý orientované struktury (s tkaninou, papírem) vznikají nové materiály s vynikajícími vlastnostmi. Lamináty jsou vhodné pro konstrukce předmětů namáhaných chvěním, rázy, kroucením apod. Jednotlivé vrstvy rozvádějí dynamické namáhání konstrukce natolik, že se destrukční vliv omezuje jen na vrstvy přilehlé silovému zatížení, např. nárazu. Jako příklad je možné uvést výrobky ze sklolaminátů (čluny, karoserie), kombinované lamináty z kovu a plastů (lyže). [7]

### 1.5.1 Přeplátované spoje

Spoje jednostranně přeplátované jsou rovněž plošné spoje a využívají se zejména při lepení tenkých materiálů (např. při lepení fólií z plastů, plechů, papíru, tkanin). V těchto případech lze totiž zanedbat vliv ohybového momentu, vznikajícího následkem excentricky zatíženého spoje u souborů tlustších adherentů. U jednostranně přeplátovaných spojů se soustřeďuje takové napětí především na obou koncích přeplátování a působí zde jako síla podporující odlupování. Při zvyšujícím se zatížení se na obou koncích přeplátování zvětšuje napětí až do kritického momentu, kdy se spoj směrem od konců přeplátování ke středu spáry naruší a roztrhne. Spoj se přetrhne tím dříve, čím větší je deformace lepených částí. Deformace na dílcích různého protažení ukazuje Obr. 6. Deformace adherentů mohou ovšem vzniknout nejen následkem vysokého zatížení spoje, ale i tečením materiálu při lepení tvrdých termoplastických hmot (PVC, PMMA aj.). Na vzniku kritického napětí se podílejí i další činitelé, např. jakost filmu lepidla, teplotní délková roztažnost obou adherentů. Film lepidla, který překonává rozdíly v protažení mezi lepenými částmi, je přitom zatížen smykovými silami, které jsou nejvyšší na obou koncích přeplátování a nejnižší uprostřed. Protažení adherentů a následné deformace lepeného souboru jsou tedy u jednostranně přeplátovaných spojů příčinou toho, že je dosahováno menších pevností v momentu zlomu, než jakých by se dosáhlo u materiálů absolutně tuhých, namáhaných výhradně ve smyku. [7]



Obr. 5. Ukázka konstrukčních možností přeplátovaného spoje. [9]



Obr. 6. Možnosti protažení adherentu a lepidla [7]

1 – nenamáhaný spoj; 2- spoj nepružných adherentů – posuv adherentů vůči výchozí poloze je stejný na okraji i uprostřed překlátování; 3- spoj pružných adherentů namáhaný ve smyku – posuv adherentů vůči výchozí poloze je na okraji větší než uprostřed překlátování.

### 1.5.2 Spoje čelních ploch

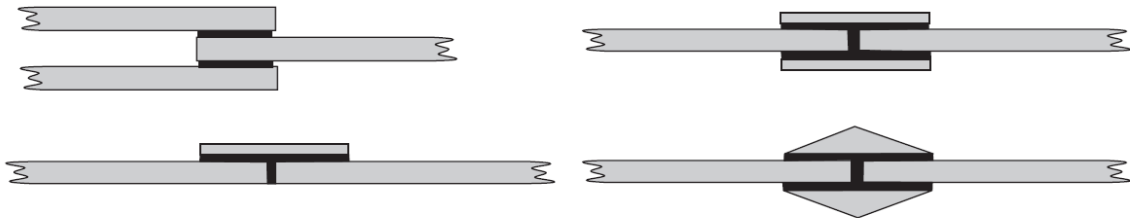
Jiným typem lepených spojů jsou spoje čelních ploch (obr. 6.), tzv. spoje na tupo. V neupravené formě jsou použitelné jen pro dostatečně tlusté materiály. Spodní hranici není možné jednoznačně stanovit, záleží na vlastnostech lepených dílců (např. na hmotnosti) a na požadované odolnosti spoje. Jde o desítky milimetrů v rozmezí 30 až 50 mm pro spodní limit. Při spojování tenkých adherentů musí být spoje na tupo vhodně upraveny zvětšením geometrického povrchu. Toho lze dosáhnout buď úkosem, anebo různě tvarovaný, i drážkami. [7]

Za nejúčinnější (téměř 100%) lze považovat spoje s úkosem, odpovídá-li poměr rozměrů vztahu:

$$s : D_p = 1:15,6 \quad (11)$$

Praktickou variantou spojů s úkosem jsou tzv. spoje zubové, používané zejména v dřevozpracujícím průmyslu. Jiným typem spoje s úkosem je úprava spáry do tvaru V. používá se např. při spojování desek z tvrdých plastů, zejména polymethylmethakrylátu, reaktiv-

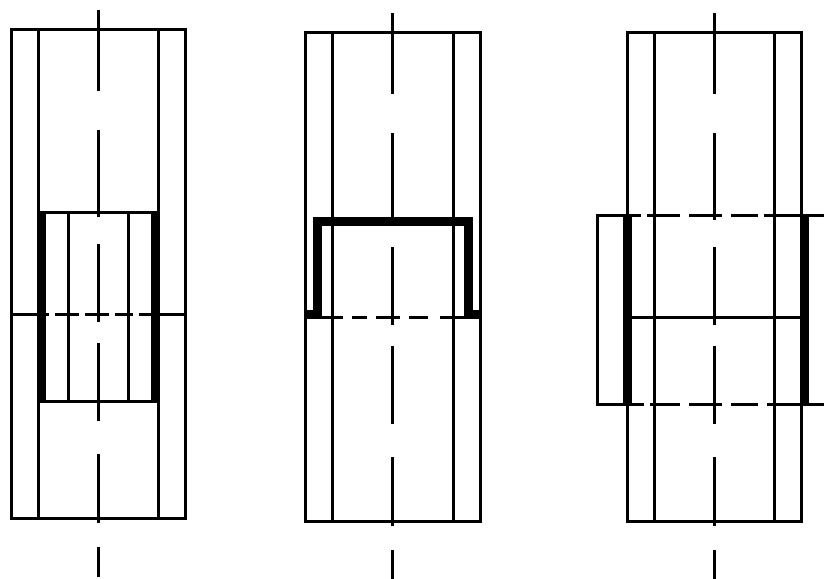
ními lepidly, která se nesmršťují. Vrcholový úhel spáry se řídí tloušťkou lepeného materiálu, optimálních vlastností spoje se dosahuje v rozmezí 30 až 60°. [7]



Obr. 7. Ukázka konstrukčních možností čelního spoje [9]

### 1.5.3 Násuvné (trubkové) spoje

Obdobou přelátovaných plochých spojů s příložkami jsou lepené násuvné spoje. Osvědčují se zejména při spojování trubek z lehkých kovů a z plastů. Při lepení trubek z PVC se určuje minimální hloubka nasunutí podle vztahu:  $0,6 \cdot d + 6\text{mm}$ . Toto doporučení platí pro trubkové spoje do průměru 75mm. Spoje se dělají navzájem přesunutě, s vnějším návlekm, popř. s vnitřní vložkou. Dobrých výsledků se dosahuje u trubkových spojů s lepenými přírubami, záslepkami a s kalibračními vložkami. Jednotlivé typy lepených spojů jsou uváděny. [7]



Obr. 8. Ukázka konstrukčních možností násuvného trubkového spoje



#### 1.5.4 Sendvičové konstrukce

Zvláštním druhem lepeného konstrukčního materiálu jsou vícevrstvé sendvičové konstrukce, které se pro svou lehkost a vynikající mechanické vlastnosti uplatňují ve stavebním a leteckém průmyslu i při stavbě lodí. Středovou vrstvou tvoří vždy lehký materiál např. tvrdé pěnové hmoty z PS, PUR nebo PVC, anebo voštinové materiály, např. z aluminiových plechů nebo papíru impregnovaných tvrditelnými pojivy. Krycí vrstvy bývají z duralových plechů (letectví), z dekoračních laminátů (bytová výstavba), z dřevovláknitých desek, z polyesterových sklolaminátů aj. Předpokladem stability je symetrie souboru a soudržný spoj mezi jádrem a krycí vrstvou. Největší pozornost vyžadují místa, kterými je do vrstev sendviče zaváděno zatížení, a popř. provedení oprav. Tato exponovaná místa musí být upravena tak, aby spoj mezi jádrem a pláštěm nebyl vystaven přímému působení sil, které by vedly k odlupování pláště. Proto se sendvičové konstrukce doplňují vložkami různých tvarů nebo průchozími spojkami, svírajícími soubor z obou stran pomocí kruhových příložek. [7]

#### 1.6 Způsoby zkoušení lepených spojů

Z množství metod navržených ke zkoušení lepených spojů se převážně používají metody destruktivní, spočívající v hodnocení pevnosti spoje namáhaného ve smyku, v tahu, v odlupování a v rázu. Doplňkovými zkouškami bývají zkoušky pevnosti spojů při statickém zatížení a zkoušky trvalé pevnosti za zvolených podmínek, např. za zvýšené teploty nebo po expozici v různých kapalinách. Výsledek slouží ke kontrole vlastností lepidel a spojů i jako podklad pro konstrukční výpočty. [7]

## 1.6.1 Metody destruktivní

### 1.6.1.1 Pevnost lepených spojů ve smyku

Běžné jsou lepené spoje přeplátované, trubkové nebo násuvné, u nichž se zkouší především pevnost ve smyku.

Zkouška spočívá v namáhání přeplátovaného spoje statickým tahem ve směru podélné osy do porušení vzorku. Při zatížení může podle druhu materiálu zkušební těleso dojít k vychýlení nebo k deformaci roviny lepeného spoje. Například při hodnocení pevnosti spoje ve smyku u plastů se zkušební těleso protahuje a spoj se vychyluje z osy namáhání. Při různých modulech pružnosti filmu lepidla a plastických hmot pak vzniká nerovnoměrné rozložení sil ve spoji a naměřené hodnoty pevnosti jsou zkreslené. Zjištěné hodnoty nelze proto v těchto případech považovat za čistou pevnost ve smyku, i když je tak uváděna. Proto byly pro zkoušení spojů plastů navrženy různé úpravy, které mají zajistit působení smykové síly ve směru osy lepeného spoje. Zkouška podle normy ČSN EN 1465 je teda vhodná především pro kovy, u nichž nedochází během zkoušky k větší deformaci. Pro zkoušení pevnosti lepených spojů ve smyku u lepidel na dřevo jsou normovány odlišné zkušební metody. [7,8]

### 1.6.1.2 Pevnost lepených spojů v tahu

Zkouška slouží k hodnocení tzv. čelních spojů a provádí se na normalizovaných válcových tělesech. Spoj se v trhačím stroji podrobí namáhání v tahu a při tom se měří síla potřebná k roztržení vzorku. [7]

### 1.6.1.3 Pevnost lepených spojů v odlupování

Tato zkouška se provádí, je-li alespoň jeden ze spojovaných materiálů ohebný. Podle tuhosti spojovaných materiálů se určí úhel odlupování. U polotuhých materiálů je menší než 90°. Při hodnocení lepidel na kovy se podle ČSN 66 8516 – Zkoušky lepených spojů (kov s kovem) stanoví pevnost spojů podle Wintera. Pevnost v odlupování se stanoví graficky, rozumí se jí průměrná hodnota vypočtená z hodnot střední části průběhové křivky.

Pevnost lepených spojů v odlupování se běžně zkouší např. u kaučukových roztočových lepidel nebo u disperzních lepidel určených k lepení ohebných materiálů na ohebné i neohebné podklady. [7]

#### **1.6.1.4 Pevnost lepených spojů při namáhání rázem**

Rázová pevnost spojů je nejmenší síla potřebná k porušení zkušebního vzorku rázem. Při zkouškách je lepený spoj namáhán ve smyku rázovým tlakem ve směru podélné osy. Zkouška se provádí na kyvadlovém přístroji. [7]

#### **1.6.1.5 Zkouška lámavosti lepených spojů**

Spoj je namáhán statickým tlakem kolmo na podélnou osu a plochou spoje do porušení zkušebního tělesa. Zkouška se doporučuje především pro hodnocení spojů tvrdých materiálů, např. kovů s kovy a pro kombinaci kovů s plastickými hmotami. Provádí se za normální teploty i za teplot zvýšených. [7]

#### **1.6.1.6 Zkouška trvalé**

Umožňuje zjistit chování lepených spojů při trvalém používání. V praxi je spoj podroben nejen dlouhodobému namáhání, ale někdy také vlivům teploty, vlhkosti, povětrnosti, prostředí apod., jež jsou příčinou jeho stárnutí. U lepidel na bázi termoplastů se např. při dlouhodobém namáhání snižuje pevnost spoje v závislosti na čase již při malém zatížení, pokles pevnosti však závisí i na teplotě. Pevnost spojů kovů, skla a plastů se rovněž snižuje po uložení ve vodě různé kvality.

Známý je i nepříznivý vliv migrace změkčovadel obsažených v lepených materiálech na stárnutí spojů. Projevuje se, jsou-li oba materiály, tj. lepená hmota i film lepidla, rozpustné ve změkčovadle nebo v něm bobtnají.

Změny vlastností lepených spojů způsobené uvedenými vlivy se hodnotí na vzorcích podrobených stárnutí. Skutečný obraz o jeho průběhu může ovšem přinést jen dlouhodobý vliv daných podmínek. Časově náročný průběh zkoušky přirozeného stárnutí se v praxi nahrazuje zkušebními cykly, za nichž je spoj vystaven střídavému působení vroucí vody, proudění suchého vzduchu apod. Výsledky těchto zkoušek mohou mít pouze orientační charakter. [7]

### **1.6.2 Metody nedestruktivní**

Okrajově lze využít i metody nedestruktivní defektoskopie umožňují ověřit jakost lepených výrobků, aniž by byly poškozeny. Nelze jimi však měřit pevnost lepeného spoje. Naproti tomu dovolují odhalit skryté vady spojů, např. neslepená místa, místa

s nedostatečným nánosem nebo bez nánosu lepidla, trhliny a puchýře. Rozlišujeme tyto typy nedestruktivních zkušebních metod:

#### ***1.6.2.1 Akustická defektoskopie***

Těleso vydává po rozkmitání v místech vadného spoje zvuk jiné amplitudy, jiné vlnové délky a zvukového spektra než v místech kvalitního spoje. Na tomto poznatku je založeno několik metod akustické defektoskopie, jimiž lze ověřovat spoje kovů, dřeva a plastů. [7]

#### ***1.6.2.2 Optické zkušební metody***

Spočívají v prosvětlení tenkých lepených celků intenzivními světelnými zdroji nebo u tlustších souborů rentgenovými paprsky. [7]

#### ***1.6.2.3 Defektoskopie pomocí radioizotopů***

Do lepidla se přidá vhodný radioizotop a kontroluje se jeho rozložení ve spoji. [7]

#### ***1.6.2.4 Ultrazvuková defektoskopie***

Zkoušený celek se umístí mezi ultrazvukový generátor a přijímač ultrazvukových vln, a tak se zjišťují místa s vadným slepením. Tato metoda se uplatňuje především při kontrole lepených spojů kovů. [7]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 2 PRAKTICKÉ ZKOUŠENÍ LEPENÍ

Pro praktickou část diplomové práce byly vybrány materiály a metody, které lze považovat za nejbližší reálnému stavu tenké vrstvy polyuretanu uvnitř trupu letadla. Takto lepený spoj má přesně dány místa, ve kterých může být spojen lepidlem. Následující popis praktické části ukazuje metodiku výběru vzorků a zkoušek při lepení tří druhů polyuretanů z kategorie velmi lehkých, tří druhů lepeného spoje a dvou druhů lepidel.

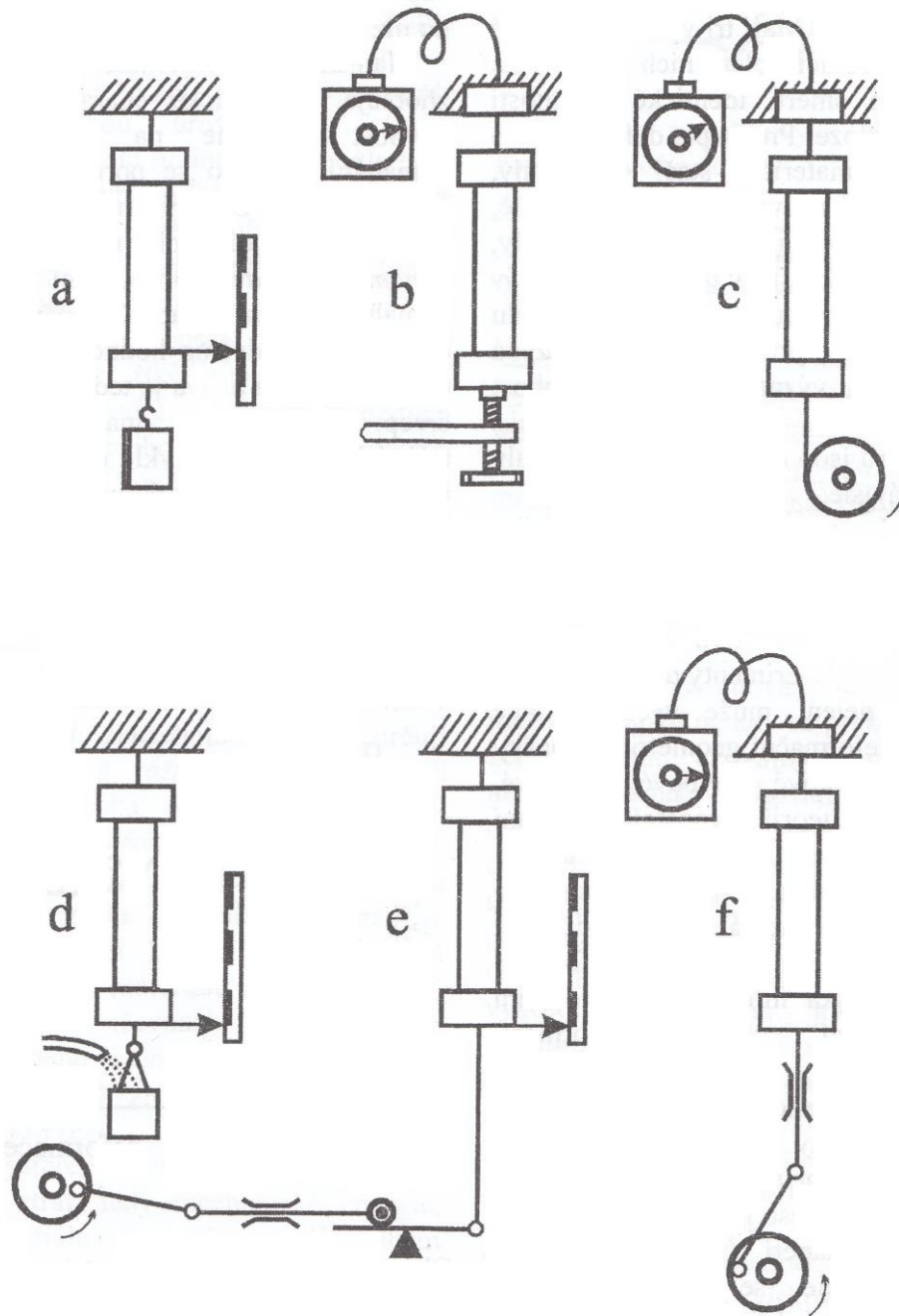
### 2.1 Základní pojmy a metody mechanických zkoušek

Pro popis mechanického chování polymerů je třeba nalézt vztahy mezi vnějšími silami a odezvou materiálu. Jelikož účinek síly závisí na rozměrech tělesa, je zvykem vztahovat sílu na jednotku plochy, tedy vyjádřit ji jako napětí a změnu rozměrů nebo úhlů vztáhnout na jednotku délky, tedy vyjádřit ji jako deformaci. Obecně jsou napětí a deformace symetrické tenzory, z nichž každý má 6 nezávislých složek, takže i jednoduchý lineární vztah mezi nimi (Hookův zákon) by popisovalo 36 koeficientů. Ukazuje se však, že i v nejobecnějším případě trojklonných krystalů stačí pro charakterizaci lineárního chování materiálu 21 nezávislých modulů. Jednosměrně vytužený laminát, extrudovaný profil z termoplastu nebo dřevo jsou příkladem ortotropních materiálů. Mají tři vzájemně kolmé osy takové, že po rotaci kolem nich o  $180^\circ$  má materiál v určitém směru identické vlastnosti jako ve výchozí poloze. Pro popis deformačního chování takového materiálu stačí 4 moduly, například dva tahové a dva smykové. Konečně, izotropní materiál popisují pouze dva moduly, například modul pružnosti  $E$  (Youngův modul) a smykový modul  $G$ . Součin modulu pružnosti a příslušného průřezu tělesa se nazývá tuhost. (V obecném významu znamená tuhost schopnost materiálu odolávat deformaci) V případě polymerů jsou ovšem moduly výrazně časově závislé. [2]

Experimentální metody mechanického hodnocení polymeru lze třídit podle různých hledisek. Podle velikosti deformace se rozlišují lineární, nelineární a destruktivní metody, podle časového průběhu se experimenty dělí na statické a dynamické a dělení může vyházet také z napěťové nebo deformační geometrie (zkoušky jednoosé, tahové, tlakové, ohybové, smykové, víceosé, atd.). Většina teorií pevnostního chování však vychází z namáhání jednoosým tahem. Důvodem je nejen strukturní srozumitelnost, ale také poměrná experimentální jednoduchost takového uspořádání. Podle rozsahu deformací podává tahová zkouška informace o lineárním deformačním chování, nelineární deformaci, případně pevnostním

(lomovém) chování. Základní režimy tahové zkoušky jsou schematicky na obr. 9. První z nich je creepový experiment (zkouška tečení, obr. 9, a). Zkušební těleso je při něm vystaveno stálému tahovému napětí (případně stálému zatížení) a registruje se časový průběh deformace, tj. creepová křivka. Při dostatečně vysoké úrovni napětí se zkušební těleso po určité době přetrhne. Tato doba se nazývá životnost nebo doba do přetržení  $t_b$ . Komplementární ke creepu je relaxace napětí (obr. 9, b). Zkušební těleso se podrobí konstantní deformaci a registruje se pokles (relaxace) napětí časem. Také tato zkouška může skončit přetržením vzorku, je-li deformace dostatečná. Tahové zkoušky napětí-deformace mohou být uspořádány dvěma způsoby. Běžné trhací stroje pracují nejčastěji v režimu konstantní rychlosti deformace (obr. 9, c), kdy se jedna upínací čelist posouvá stálou rychlostí a snímá se průběh síly v závislosti na čase, a tedy na deformaci. Tahová zkouška však může probíhat také s konstantní rychlostí zatěžování (obr. 9, d), například tak, že je vzorek zatěžován nádobou, do níž danou rychlostí přitéká voda. [2]

Namáhání polymerního materiálu postupně zhoršuje mechanické charakteristiky, až jeho pevnost poklesne na úroveň provozního namáhání a těleso se poruší. Tento proces se nazývá únava. U polymerů se rozlišuje statická únava, probíhající při neměnném zatížení a dynamická únava, probíhající při proměnném namáhání – mezi dvěma úrovněmi síly (obr. 9, e) nebo mezi dvěma hodnotami protažení (obr. 9, f). Statická únava je tedy totéž, co nelineární creep. Při dynamické únavě se však životnost udává jako počet  $N$  cyklů do porušení. Základní únavovou charakteristikou jsou pan Wöhlerovy křivky, vyjadřující závislost mezi napětím  $\sigma$  a životností  $N$  v logaritmických souřadnicích. [2]



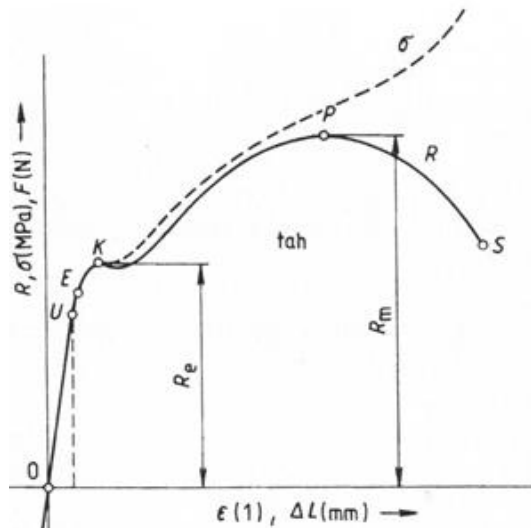
Obr. 9. Znázornění základních režimů tahové zkoušky.

(a) creep, (b) relaxační napětí, (c) zkouška napětí-deformací při konstantní rychlosti posuvu, (d) táž zkouška při stálé rychlosti zatěžování, (e) únavové zatěžování mezi dvěma úrovněmi síly, (f) únavové namáhání mezi dvěma hodnotami protažení. [3]



### 2.1.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška je nejrozšířenější statická zkouška. Zkušební těleso je upnuto do čelistí stroje a je konstantní rychlostí protahováno ve směru své podélné osy až do přetržení vzorku nebo do předem nastavené hodnoty maximálního protažení. Výsledkem zkoušky je tahový diagram (obr. 10.), který je závislostí síly na prodloužení nebo napětí na deformaci.



Obr. 10. Tahový diagram zkoušky tahem [15]

Z diagramu vidíme, že zpočátku je prodloužení vzorku přímo úměrné vzrůstajícímu zatížení, a to až do bodu U. Napětí  $\sigma_U$ , odpovídající bodu U, nazýváme mez úměrnosti a definujeme ji jako mezní napětí, při němž je prodloužení ještě přímo úměrné napětí (Hookův zákon). V dalším průběhu zkoušky přestává být prodloužení přímo úměrné zatížení. Až po bod E je protažení pružné, tj. po odlehčení nabývá tyč původních rozměrů. Napětí  $\sigma_E$  odpovídající bodu E je mez pružnosti a definujeme ji jako mezní napětí, které po odtížení (úplném odlehčení) nevyvolává trvalé deformace. Zvětšujeme-li zatížení dále, nastává přetváření plastické (trvalé) a tyč po odlehčení již nenabude původní délky. Napětí  $\sigma_{Kt}$  odpovídající bodu K označujeme jako mez kluzu v tahu a definujeme je jako nejmenší napětí, při němž nastávají podstatné deformace, které někdy dočasně pokračují, aniž se zároveň zvyšuje napětí. [14]

Zkouškou tahem slouží pro zjištění pevnosti v tahu, poměrného prodloužení, tažnosti a kontrakce zkoušeného materiálu. Pro naše měření má hlavní význam pevnost v tahu a poměrné prodloužení.

Pevnost v tahu (mez pevnosti v tahu)  $\sigma_{Pt}$  je smluvní hodnota napětí podělená podílem největší zatěžující síly  $F$ , kterou snese zkušební tyč.

$$\sigma_{Pt} = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{Pa}] \quad (11)$$

Poměrné prodloužení (deformace) je dáno poměrem změny délky  $\Delta l$  k původní délce zkušební tyče  $l_0$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad [-] \quad (12) [14]$$

## 2.2 Materiál pro zkoušení

Materiály (polyuretany) byly vybrány z komerčního prodeje zpracovatele HG Style Kojetín. Jedná se o dva samozhášivé polyuretany, které se využívají pro speciální aplikace tam, kde je požadavek na vyšší míru požární bezpečnosti, a jeden druh běžného lehkého polyuretanu, který má stejnou porozitu jako dva předchozí, ale není samozhášivý.

### 2.2.1 Polyuretany

Pro přípravu vzorků byly použity 3 typy materiálů:

- Polyuretan CRHM
- Polyuretan S 3535 F
- Polyuretan N 2130

Tab. 3. Charakteristika materiálů [14]

Typ	Rozlišovací barva	Objemová hmotnost netto [kg/m <sup>3</sup> ] ČSN 645411 DIN 53420	Odpor při stlačení [kPa] (40%) ČSN 645411 DIN 53577	Pevnost v tahu [kPa] ČSN 645431 DIN 53571	Tažnost [%] ČSN 645431 DIN 53571	Trvalá deformace [%] (50%, 23°C, 72h) ČSN 645442 DIN 53572
N 2130	bílá	21	3,2	80	150	7
S 3535 F	Tmavě šedá	35	3,5	130	190	2
Typ	Rozlišovací barva	Objemová hmotnost brutto [kg/m <sup>3</sup> ] ISO 845	Odpor proti stlačení [kPa] DIN EN ISO 3386-1	Pevnost v tahu [kPa] ISO 1798	Tažnost [%] ISO 1798	Trvalá deformace [%] (50%, 23°C, 72h) ČSN 645442 DIN 53572
CMHR 3532	Světle šedá	35	120	110	Šedá	-

## 2.3 Měřicí zařízení

Stanovení tahových vlastností bylo provedeno v laboratoři pro mechanické zkoušky UFMI a to zejména na stroji TIRATEST a Shimadzu. Provedené zkoušky byly zaměřeny na celkový průběh pevnostního namáhání v dynamickém tahu:

- Tahová zkouška pro samostatné vzorky (pevnost v tahu a prodloužení)
- Tahová zkouška pro lepené vzorky paralelně
- Tahová zkouška pro přeplátované vzorky
- Peel test pro vzorek na leteckém hliníku

### 2.3.1 Trhací stroj

Pro měření tahových zkoušek byly použity dva stroje: Shimadzu Ultra-High-precision Univerzal Testing Machines AG-X SHIMADZU a INSTRON 1122

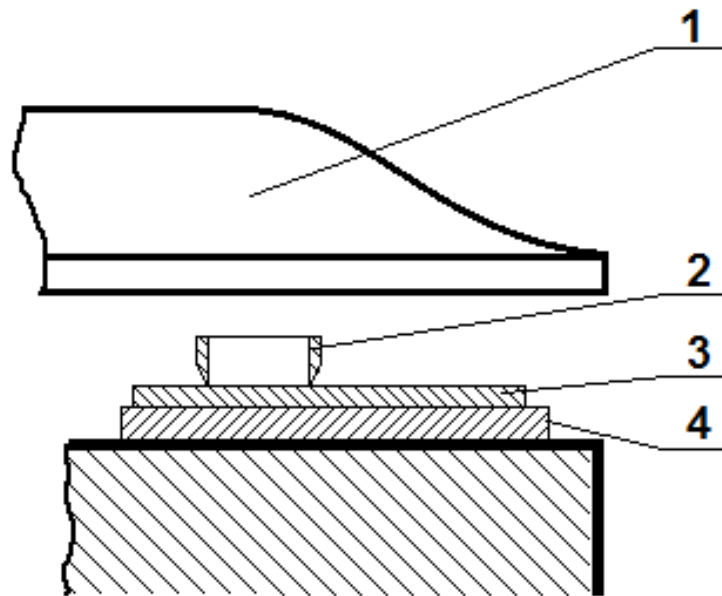


Obr. 11. Trhací stroj SHIMADZU a INSTRON [13]

Umožňuje měření modulu pružnosti při namáhání v tahu, v ohybu, v tlaku, peel. [13]

### 2.3.2 Hydraulický vysekávací lis

Vysekávání vzorků probíhalo na vysekávacím hydraulickém lisu s bezpečnostním ovládáním (obr. 13.). Pro vyseknutí vzorků bylo použito ocelových vysekávacích nožů (obr. 14.) s výsekovou plochou 10 x 100 mm. Pracovní ústrojí každého sekacího stroje (obr. 12) tvoří sekací rameno, vysekávací nůž a podložka. Při vysekávání se umístí na podložku materiál, na který se položí vysekávací nůž. Vysekávací rameno poté vyvine dostatečný úder nebo tlak a v důsledku toho nastane oddělení – vyseknutí.



Obr. 12. Strojní vysekávání [10]

1 - vysekávací rameno; 2 - vysekávací nůž; 3 - materiál; 4 – podložka



Obr. 13. Hydraulický vysekávací lis



Obr. 14. Vysekávací nůž

## 2.4 Lepidla

Pro lepení vzorků bylo použito dvou typů lepidel. První lepidlo bylo Pattex Chemoprén Univerzál KLASIK a druhé použité lepidlo je UHU KONTAKT KRAFTKLEBER. Hlavní rozdíl mezi lepidly je v udávané hustotě a viskozitě výrobcem (viz. kapitola 2.4.1 a 2.4.2). Proto se dá předpokládat, že bude rozdílná zatékavost u použitého typu lepidla do jednotlivých pórů vzorků polyuretanu.

### 2.4.1 Lepidlo Pattex Chemoprén Univerzál KLASIK



Obr. 15. Lepidlo Pattex Chemoprén Univerzál KLASIK [12]

**OBLAST POUŽITÍ:**

Na univerzální kontaktní lepení různých savých i nesavých materiálů, např.: dřevo, plasty, guma, kůže, plech, sklo, korek, karton a mnohé další. Nedoporučuje se k lepení polystyrenu, teflonu, měkčeného PVC, PE a PP

**TECHNICKÉ ÚDAJE:**

**Základní materiál/složení:** Polychloroprén

**Barva:** Světle béžová

**Konzistence:** Hustá kapalina

**Hustota:** 0,86 g/cm<sup>3</sup> (při +20°C)

**Viskozita:** min. 2000 mPa.s

**Teplota zpracování:** +18 až +25°C

**Odolnost vůči teplotě:** max. +70°C

**Spotřeba:** 150–250 g/m<sup>2</sup> na jednu stranu

**Doba odvětrání:** cca 15 minut

**Pevnost v smyku:** 0,59 N/mm<sup>2</sup>

**Pevnost v odlupování:** 0,99 kN/m [12]

**2.4.2 Lepidlo UHU KONTAKT KRAFTKLEBER**

Obr. 16. Lepidlo UHU KONTAKT KRAFTKLEBER [11]

**OBLAST POUŽITÍ:**

Vhodné zejména pro lepení dřeva, dřevotřísky, plastů, keramiky, porcelánu, skla, kovů, kůže, filcu, korku, textilu, gumy, pěnových materiálů aj. Lepidlo není vhodné pro lepení měkkého PVC a pěnového polystyrenu.

**TECHNICKÉ ÚDAJE:**

**Barva:** Žlutá

**Konzistence:** kapalina

**Relativní Hustota:** 0,8955 g/cm<sup>3</sup> (při 20 °C)

**Viskozita:** dynamická 3750 mPa.s (při 20°C)

**Teplota zpracování:** +18 až +25°C

**Odolnost vůči teplotě:** -20°C až +125°C

**Teplota vznícení:** 215°C

**Doba odvětrání:** cca 10 minut [11]

**2.4.3 Lepení vzorků**

Jeden z hlavních faktorů pro výslednou pevnost lepeného spoje jsou parametry lepené vrstvy. Pro možnost porovnávání naměřených hodnot jednotlivých spojů bylo potřeba, zajistit přibližně stejnou kvalitu spoje vnějšími podmínkami.

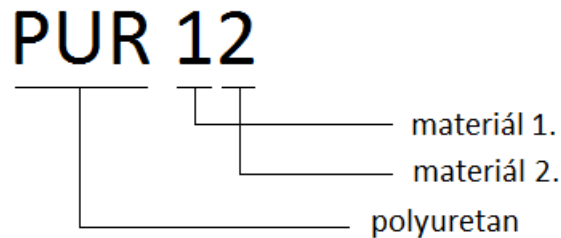
Mezi hlavní parametry pro stejné podmínky přípravy lepeného spoje patří:

- Množství lepidla (množství UHU i Pattex = 0,05 ml/cm<sup>2</sup> a aplikační čas lepidla  $t = 5$  s)
- Tlak vyvinutý pro spojení dvou částí (2,17 kPa)
- Čas, po který byl tlak aplikován (24h od počátku slepení do zkoušení spoje)
- Teplota ( $23,2 \pm 0,5$  °C) a vlhkost ( $48 \pm 5$  %)



### 2.4.3.1 Značení vzorků

Zkušební vzorky byly lepeny ze tří různých materiálů tak, aby vytvořily dvě hodnoty dle typu polyuretanu. Značení pro stejné vzorky bylo 11, 22, a 33. Pro kombinace těchto vzorků bylo užito následující značení, které je zobrazeno na obr. č. 17:



Obr. 17. Způsob značení vzorků (1 – CRHM, 2 – S3535F, 3 – N2130)

### 2.4.3.2 Vzorek lepený po celé délce

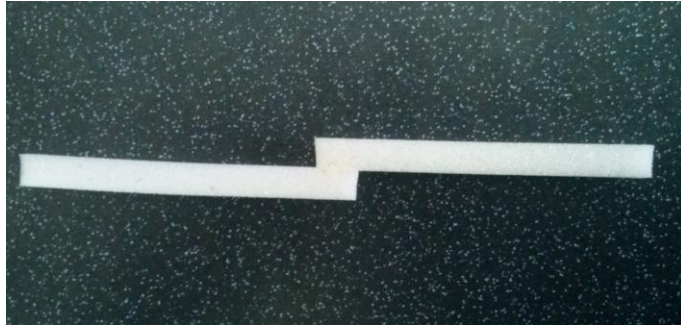
Lepidlo bylo nanášeno po celé délce na jeden vzorek a poté byl přiložen vzorek druhý.



Obr. 18. Vzorek lepený po celé délce

### 2.4.3.3 Vzorek přeplátovaný

Lepená délka přeplátování byla 5 mm a 10 mm.



Obr. 19. Vzorek přeplátovaný

#### 2.4.3.4 Vzorek pro peel test

Na letecký hliník byla nanášena tenká vrstva lepidla v délce 70 mm a šířce 10 mm. Vzorek byl přiložen na plíšek. Volná část vzorku byla pro upnutí do čelisti.



Obr. 20. Vzorky pro peel-test

### 3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Naměřená data z trhacího stroje byla zpracována v programu Microsoft Excel 2007 a převedena na grafy závislosti:

- síly na prodloužení (praktický výstup z měření)
- napětí na deformaci (přepočet z měření)
- napětí na deformaci z vybrané oblasti (modul pružnosti lepeného spoje)

*Tab. 4. Přehled způsobu přípravy jednotlivých sérií*

Číslo série	Způsob lepení	Použité lepidlo	Materiály vzorku	Délka lepeného spoje (mm)
Série 1	-	bez lepidla	pouze jeden	-
Série 2	-	bez lepidla	stejně	-
Série 3	Po celé délce	Pattex	stejně	100
Série 4	Po celé délce	Pattex	kombinace	100
Série 5	Přeplátování	Pattex	stejně	10
Série 6	Přeplátování	UHU	kombinace	5
Série 7	Po celé délce	UHU	stejně	100
Série 8	Po celé délce	UHU	kombinace	100
Série 9	Přeplátování	Pattex	stejně	5
Série 10	Přeplátování	UHU	stejně	10
Série 11	Přeplátování	UHU	stejně	5
Série 12	Přeplátování	UHU	kombinace	10
Série 13	Přeplátování	Pattex	kombinace	10
Série 14	Přeplátování	Pattex	kombinace	5
Série 15	Peel-test	Pattex	pouze jeden	70
Série 16	Peel-test	UHU	pouze jeden	70

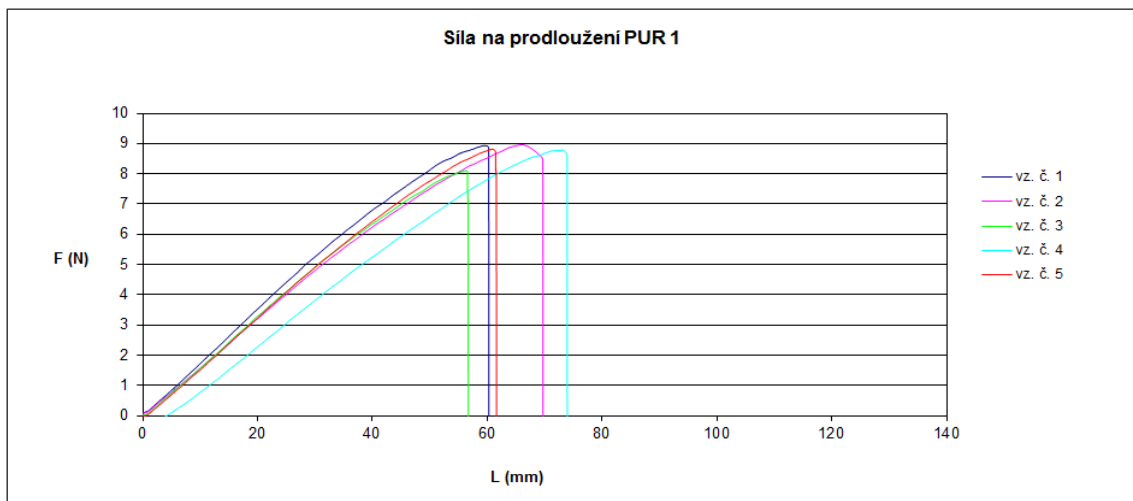
### 3.1 Tahová zkouška

Pro všechny zkoušené série byla stejná rychlost posuvu čelistí a to 50 mm/min. Pracovní délka vzorků lepených po celé délce byla 60mm, a u vzorků přeplátovaných 100mm.

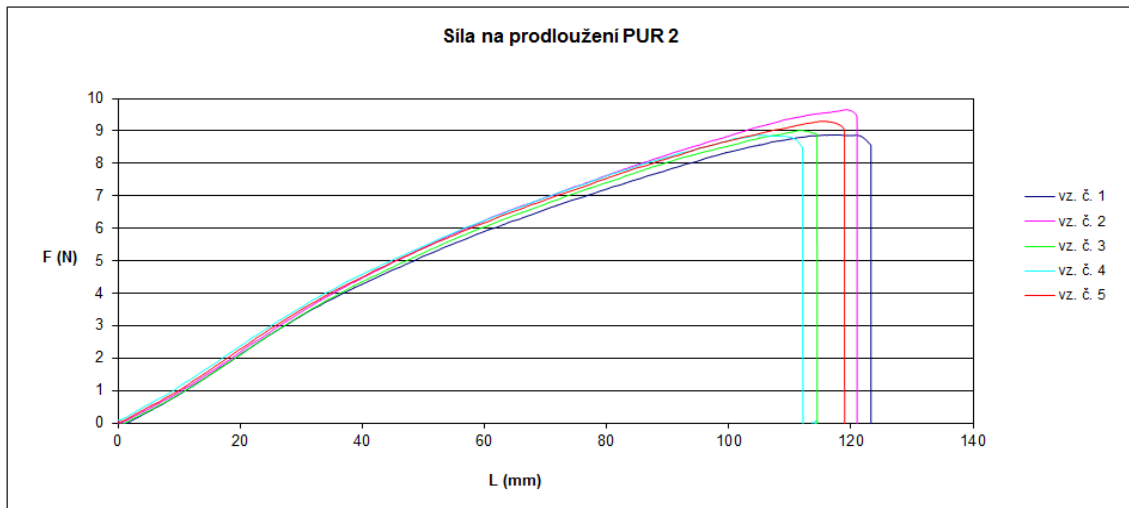
#### 3.1.1 Samostatné vzorky

První v sérii byly naměřeny tahové charakteristiky samostatných vzorků o rozměrech 10 x 10 x 100 mm. Tyto vzorky byly proměřeny celkem 5krát v jedné sérii pro každý vzorek. První série je tahová charakteristika dvou stejných vzorků bez použití lepidla a druhá série je charakteristika pouze samostatného vzorku.

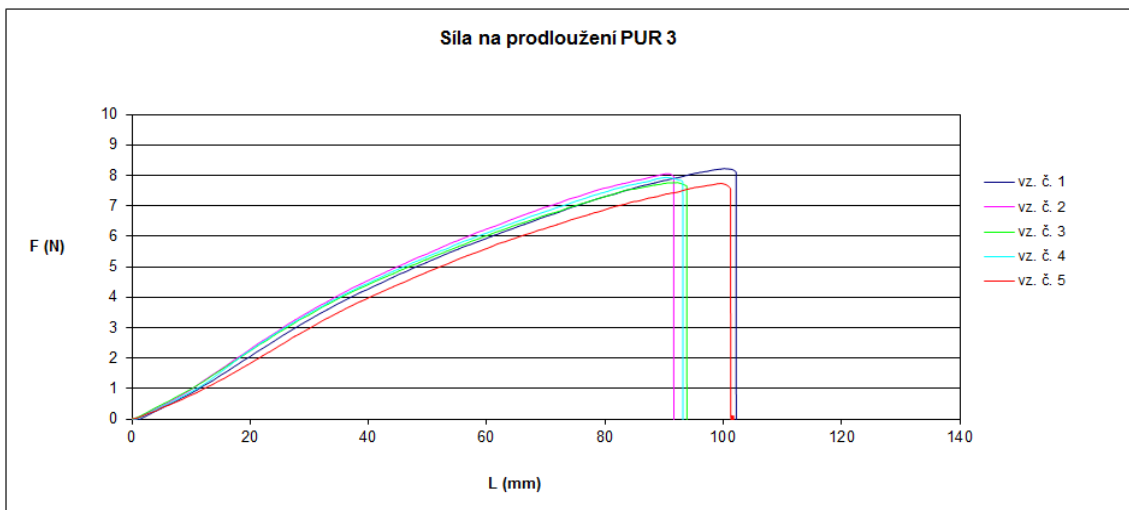
##### 3.1.1.1 Měření série 1



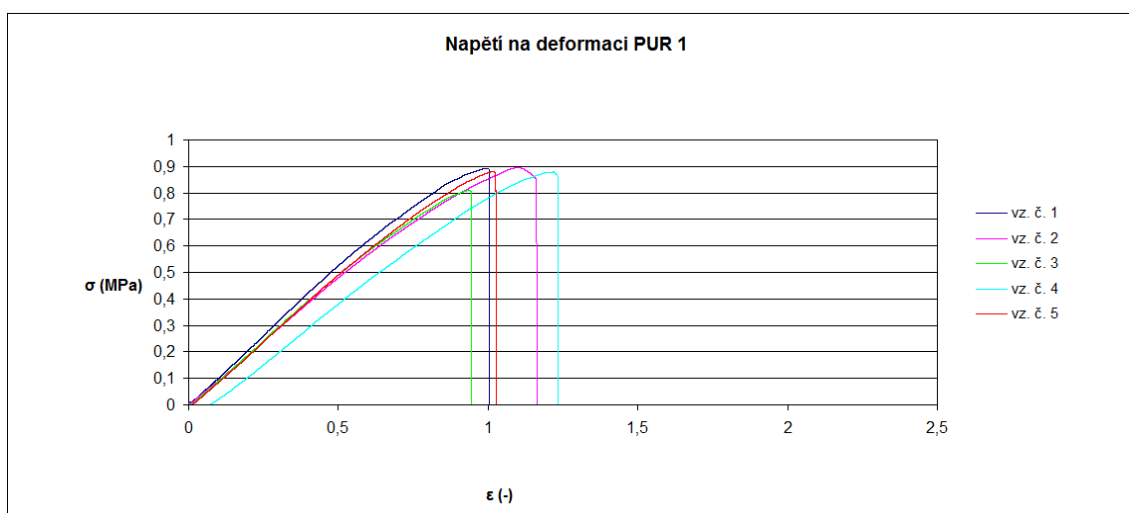
Obr. 21. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 1 – Série 1



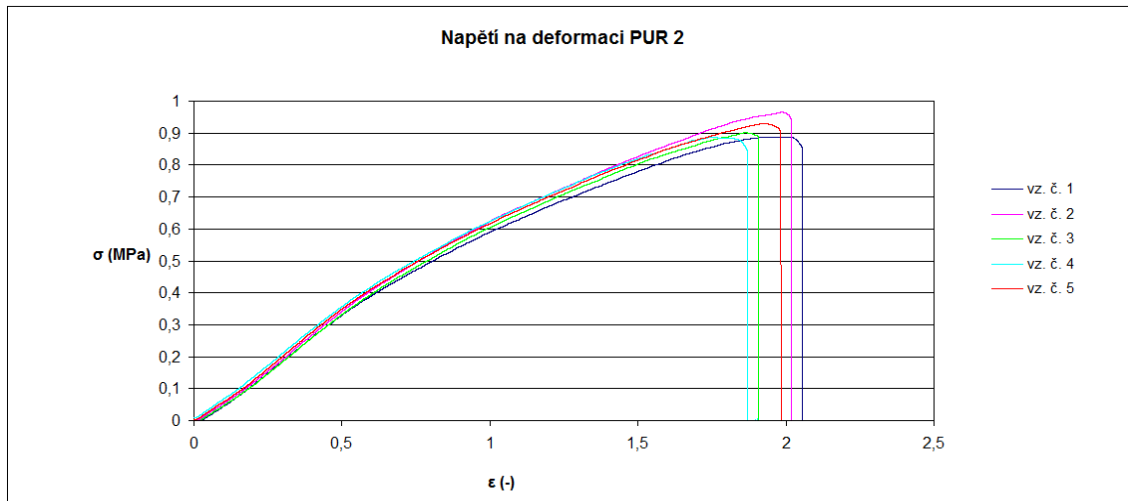
Obr. 22. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 2 – Série 1



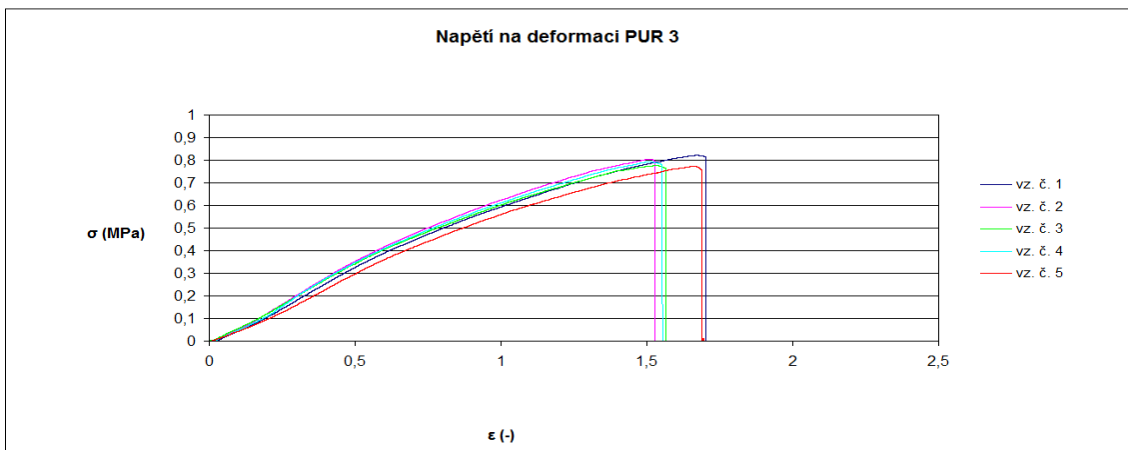
Obr. 23. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 3 – Série 1



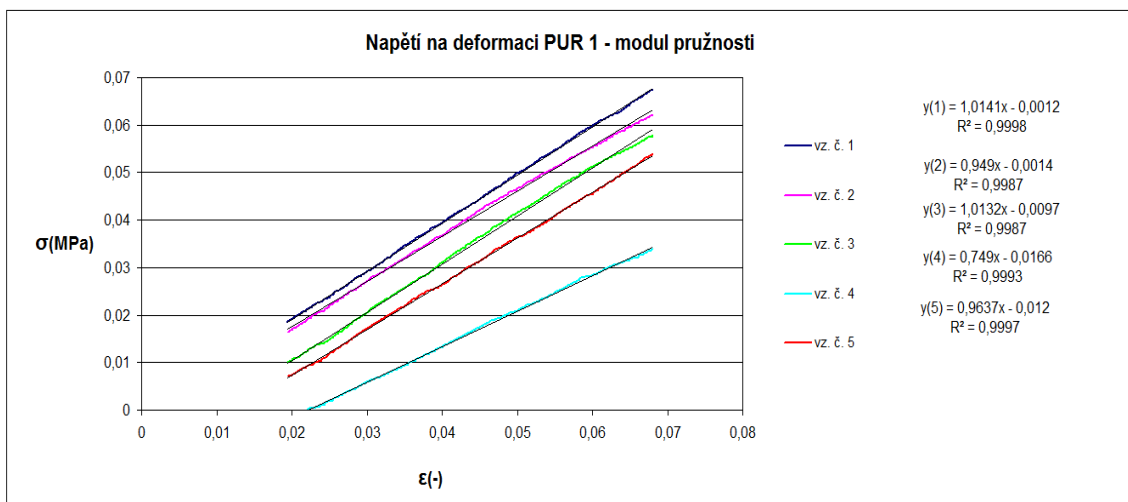
Obr. 24. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 1 – Série 1



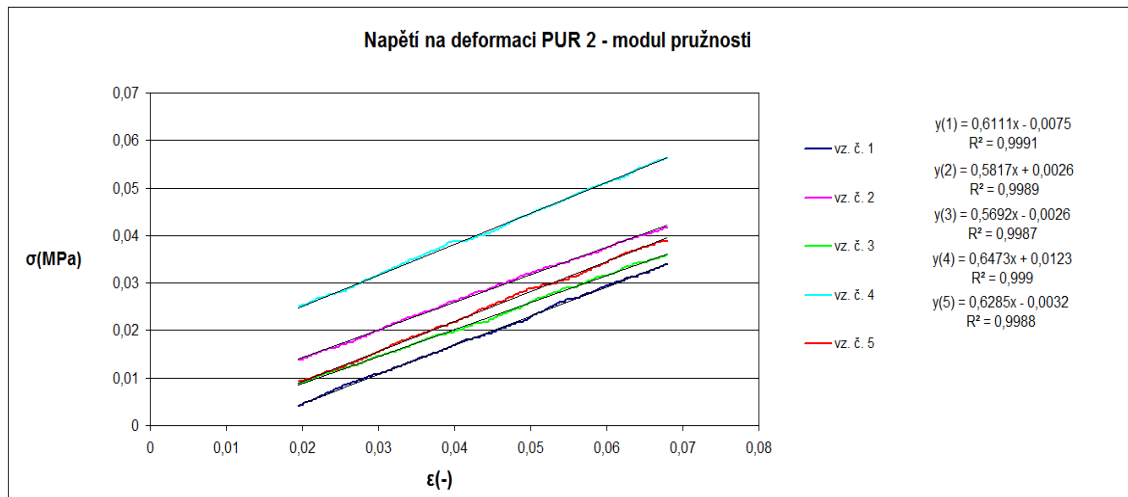
Obr. 25. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 2 – Série 1



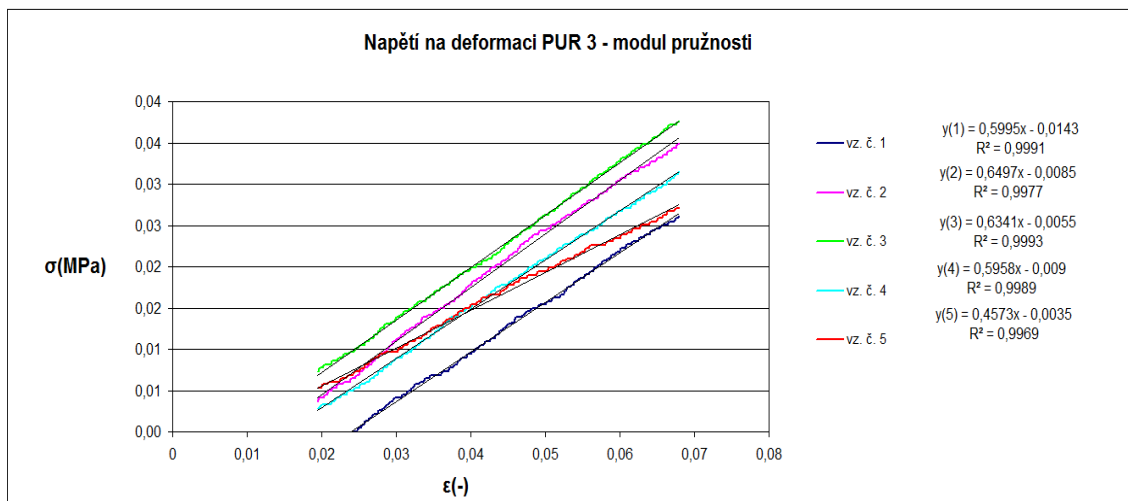
Obr. 26. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 3 – Série 1



Obr. 27. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 1 – Série 1



Obr. 28. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 2 – Série 1

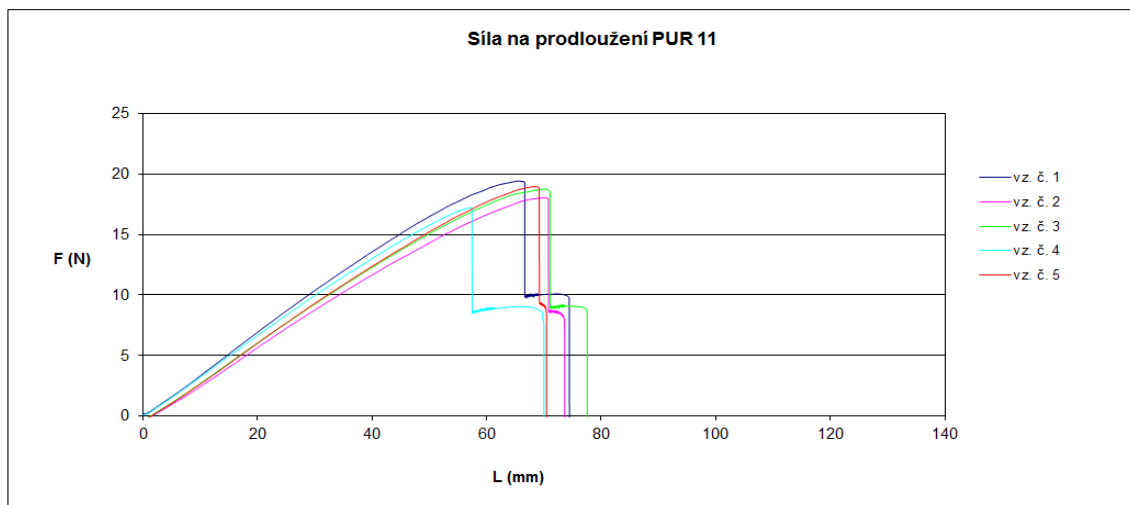


Obr. 29. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 3 – Série 1

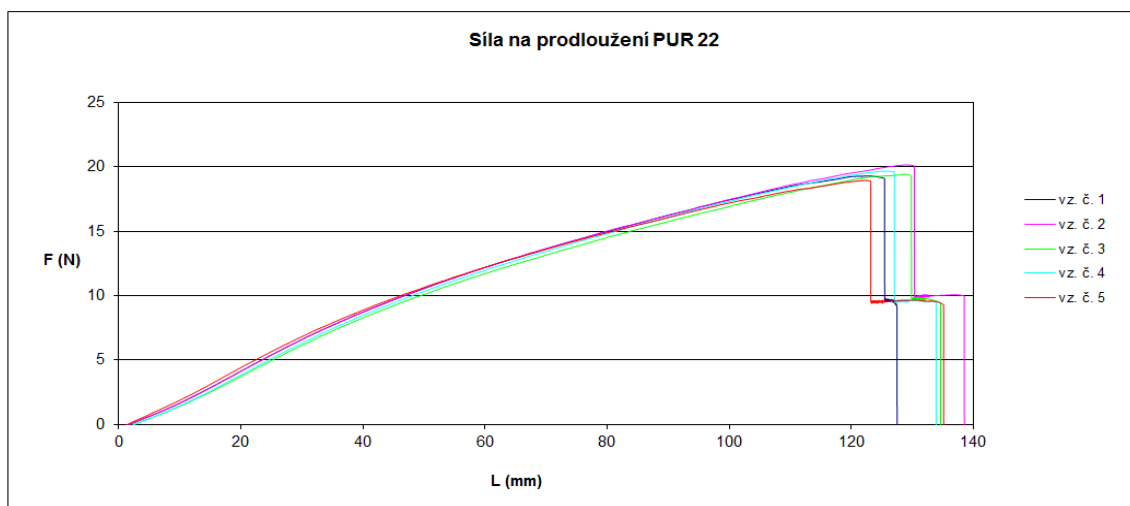
Tab. 5. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 1

Série 1									
	E (MPa)			Fmax (N)			Lmax (mm)		
	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33
vzorek č. 1	1,01	0,61	0,59	8,93	8,88	8,22	59,68	117,89	100,38
vzorek č. 2	0,94	0,58	0,64	8,96	9,65	8,05	66,11	119,43	90,77
vzorek č. 3	1,01	0,56	0,63	8,10	9,01	7,76	56,24	112,27	92,21
vzorek č. 4	0,74	0,64	0,59	8,79	8,87	7,93	73,21	105,07	90,39
vzorek č. 5	0,96	0,62	0,45	8,81	9,30	7,73	60,92	115,33	99,80
průměr	<b>0,93</b>	<b>0,60</b>	<b>0,58</b>	<b>8,72</b>	<b>9,14</b>	<b>7,94</b>	<b>63,23</b>	<b>114,00</b>	<b>94,71</b>
smodch	0,10	0,03	0,07	0,32	0,30	0,18	5,91	5,08	4,44

## 3.1.1.2 Série měření 2

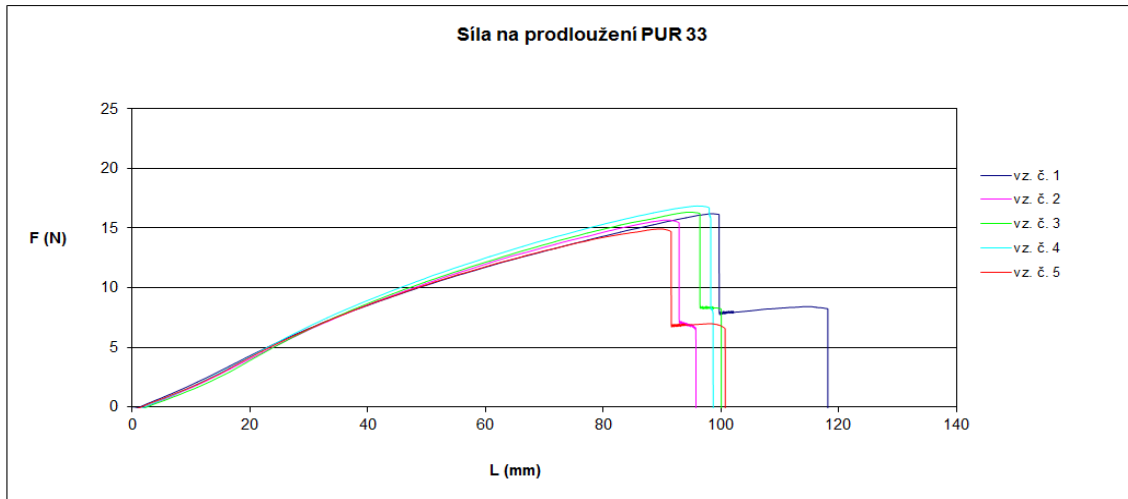


Obr. 30. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 2

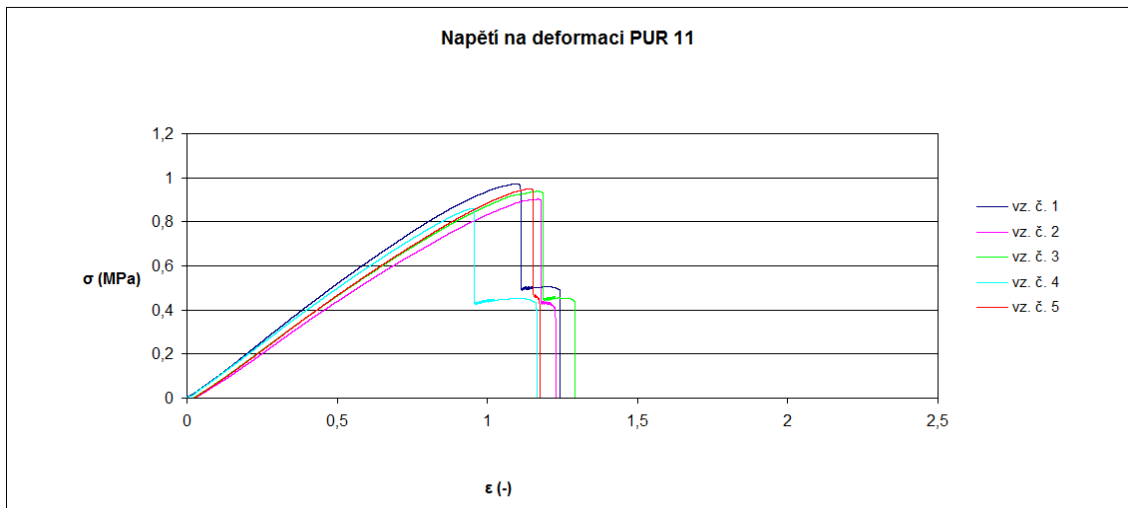


Obr. 31. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 2

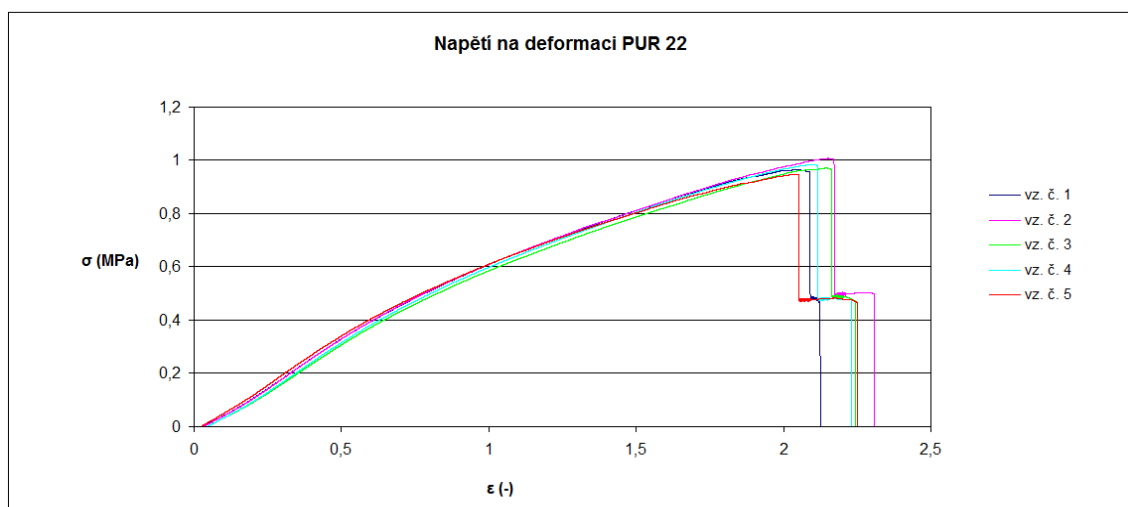




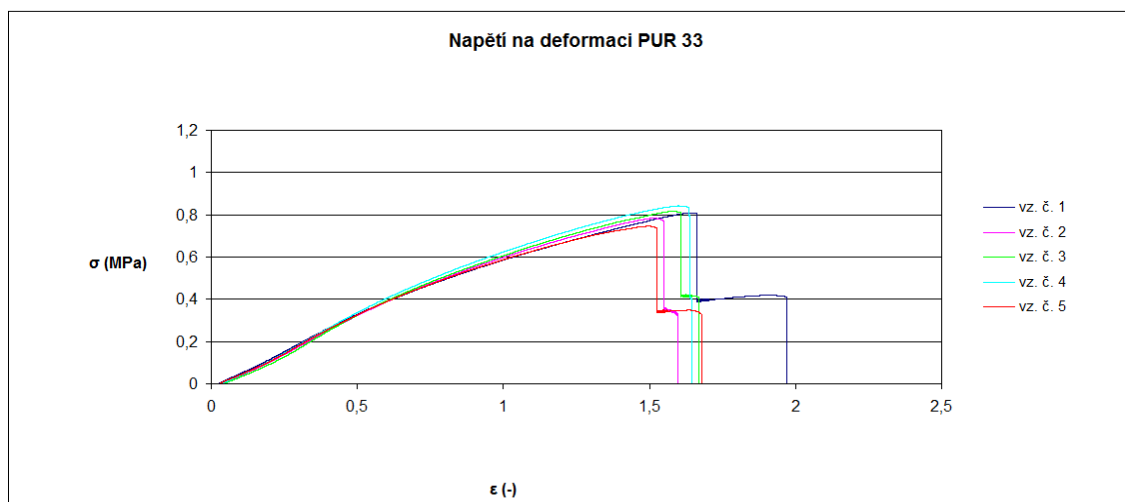
Obr. 32. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 2



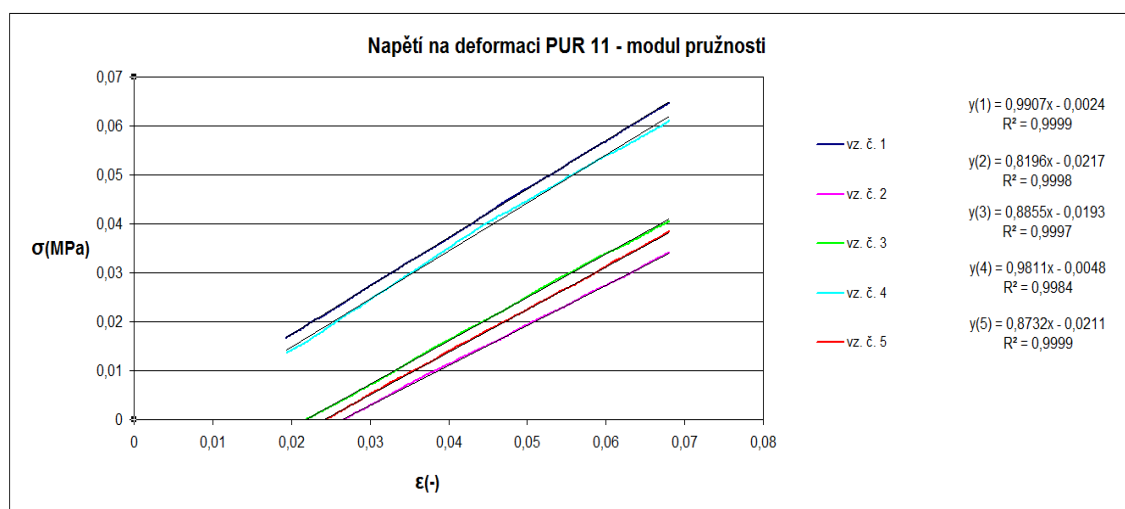
Obr. 33. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 2



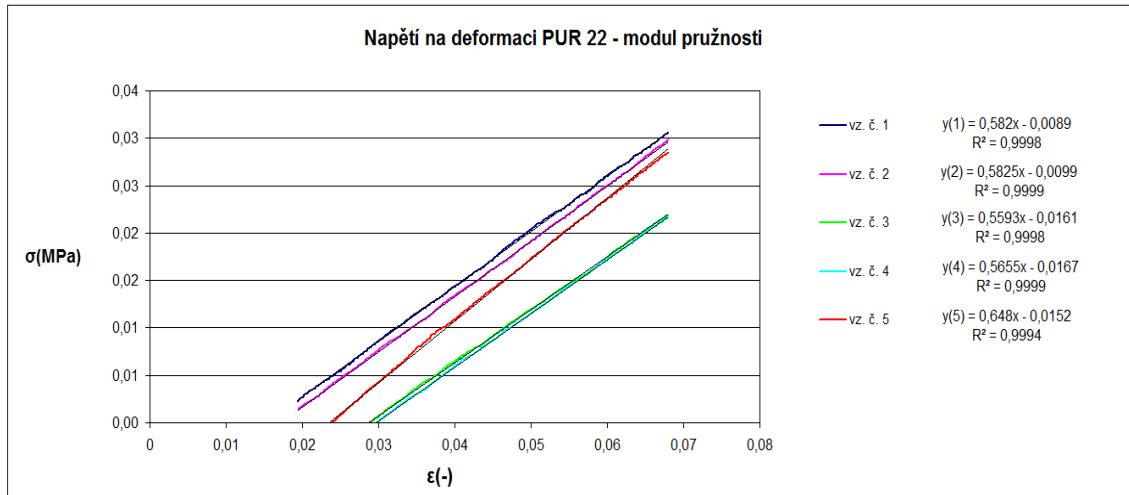
Obr. 34. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 2



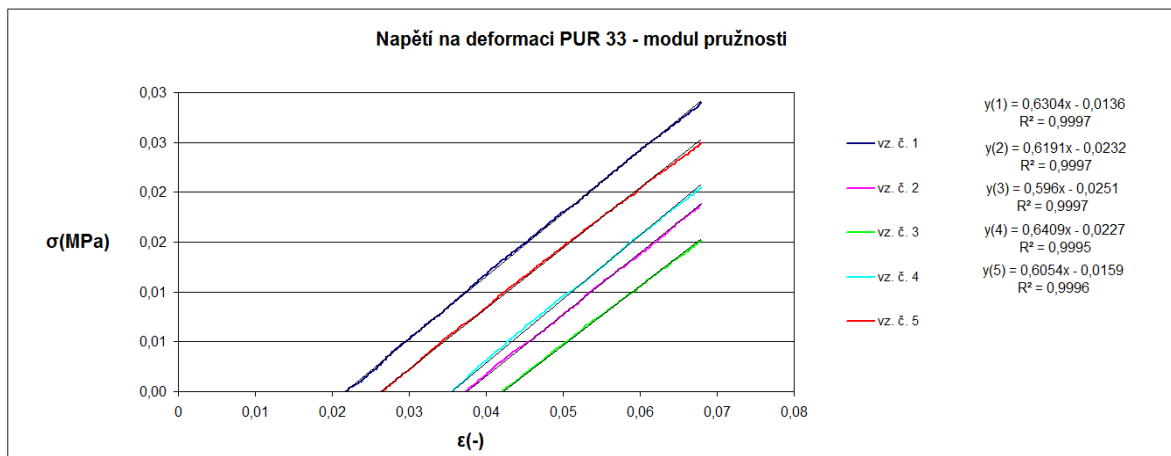
Obr. 35. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 2



Obr. 36. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 2



Obr. 37. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 2



Obr. 38. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 2

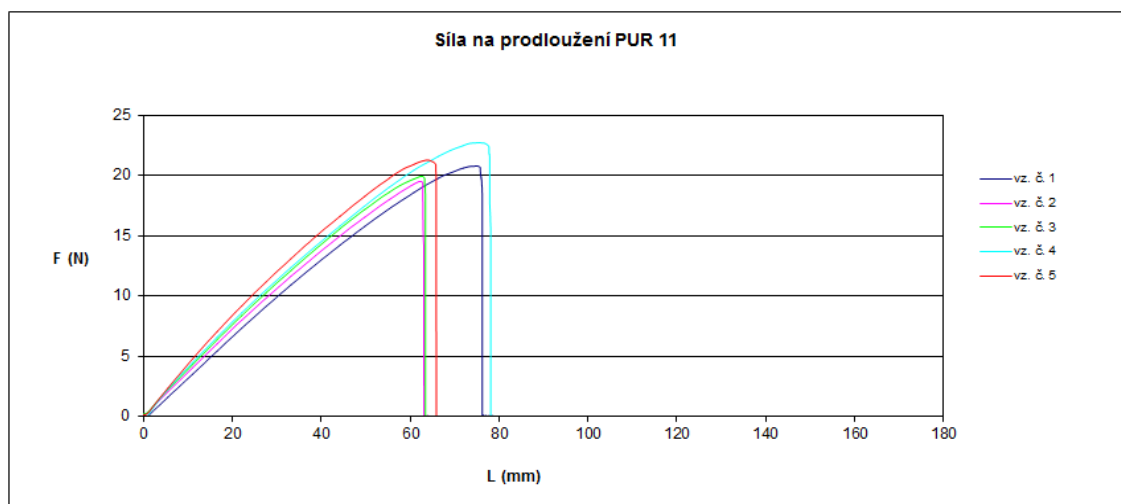
Tab. 6. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 2

<b>Série 2</b>									
	E (MPa)			Fmax (N)			Lmax (mm)		
	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33
vzorek č. 1	0,99	0,58	0,63	19,43	19,29	16,20	65,84	122,96	90,93
vzorek č. 2	0,81	0,58	0,61	18,05	20,15	15,67	70,08	129,26	98,41
vzorek č. 3	0,88	0,55	0,59	18,77	19,42	16,32	70,21	128,85	95,01
vzorek č. 4	0,98	0,56	0,64	17,23	19,66	16,85	57,39	125,63	96,08
vzorek č. 5	0,87	0,64	0,60	18,97	18,94	14,92	68,61	122,36	89,97
průměr	<b>0,91</b>	<b>0,58</b>	<b>0,61</b>	<b>18,49</b>	<b>19,49</b>	<b>15,99</b>	<b>66,42</b>	<b>125,81</b>	<b>94,08</b>
smodch	0,07	0,03	0,02	0,77	0,40	0,65	4,78	2,87	3,17

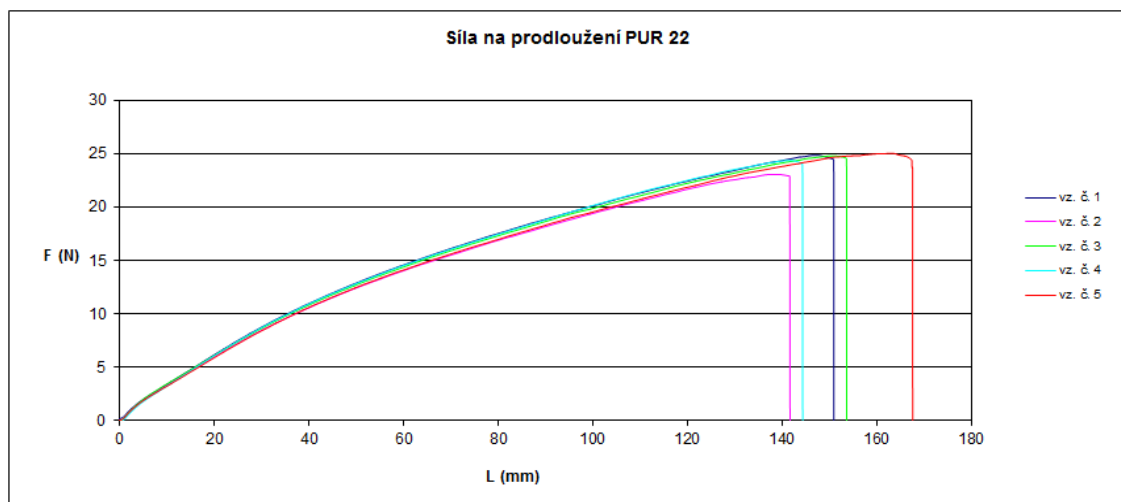
### 3.1.2 Lepený spoj celistvý

#### 3.1.2.1 Lepený spoj – stejné materiály

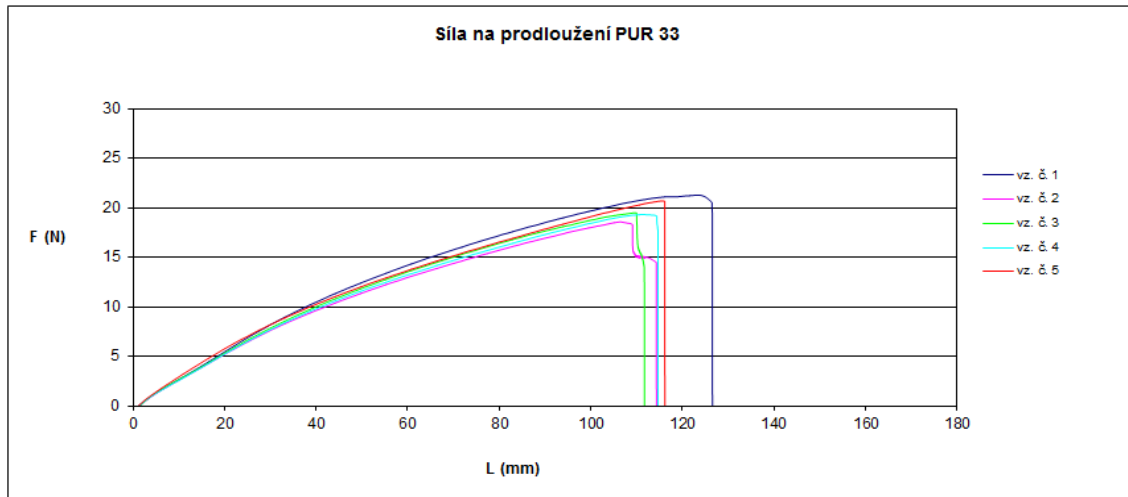
Pro třetí sérii měření bylo použito lepidla Pattex, které jsem nanesl po celé délce plochy jednotlivých lepených spojů.



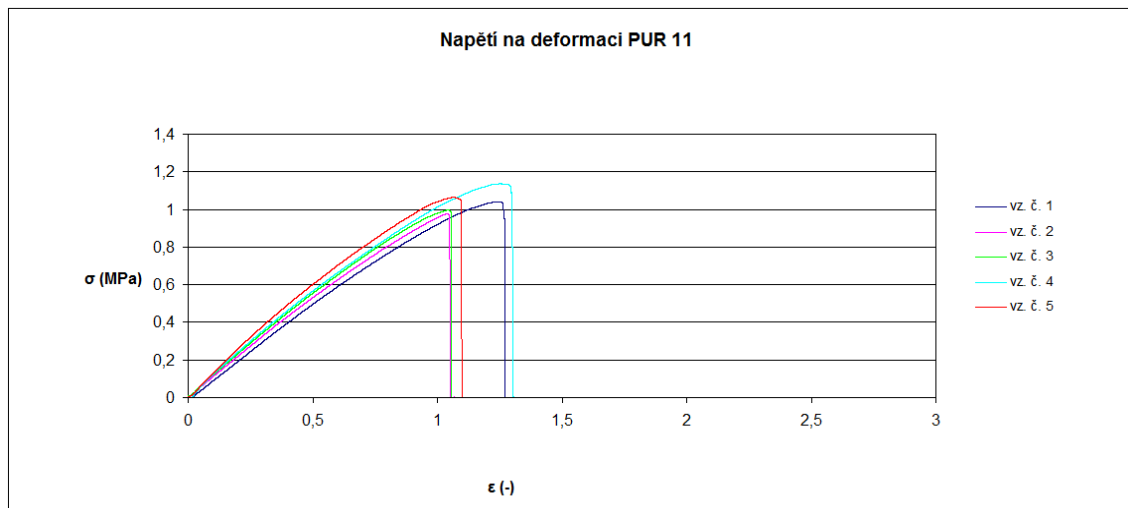
Obr. 39. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 3 (Pattex)



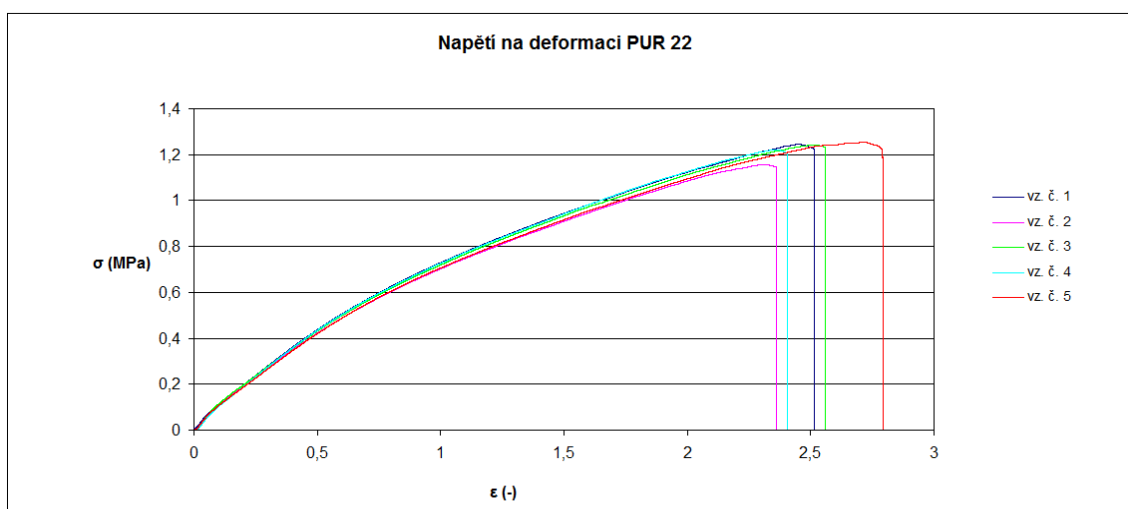
Obr. 40. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 3



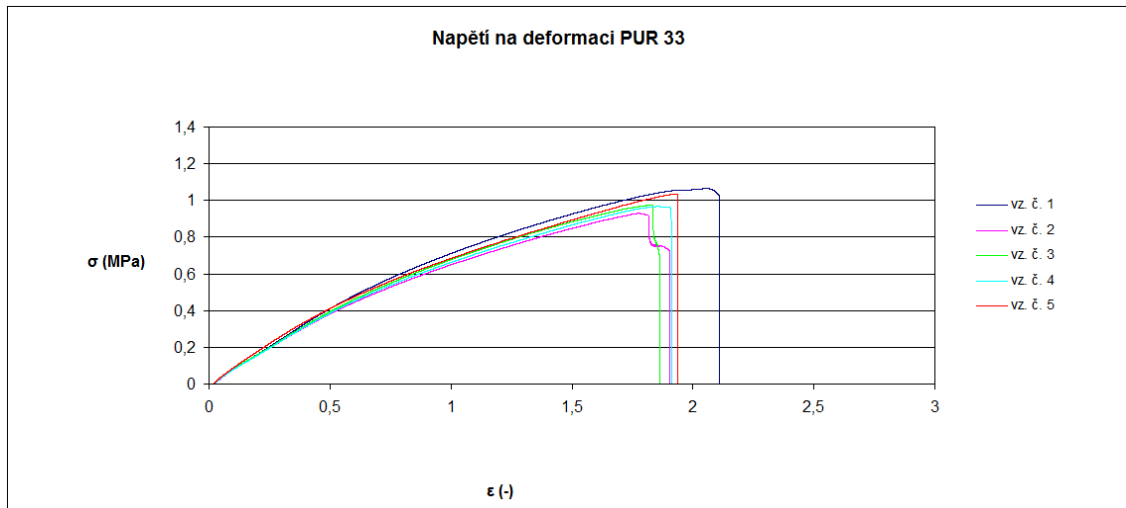
Obr. 41. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 3



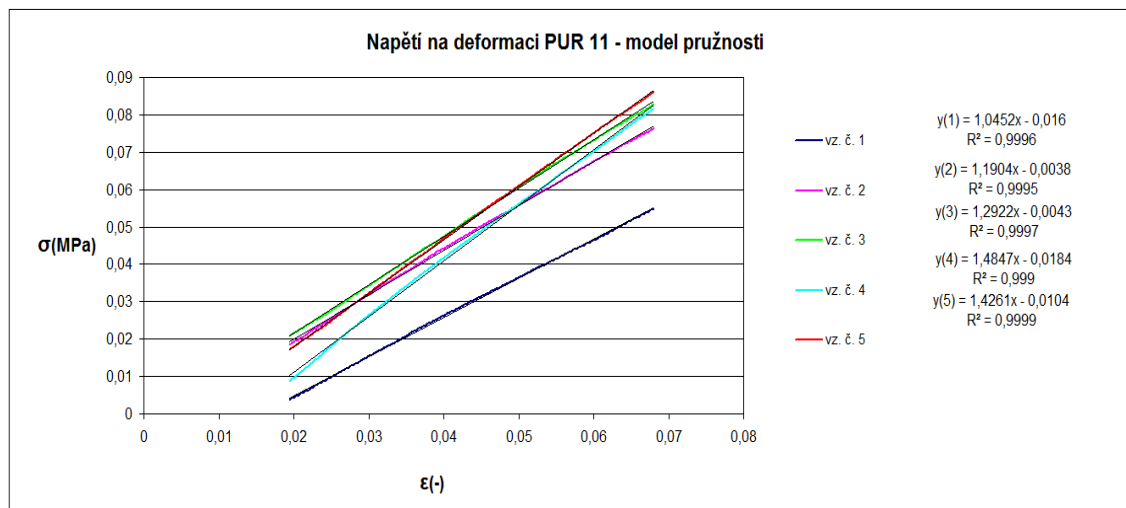
Obr. 42. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 3



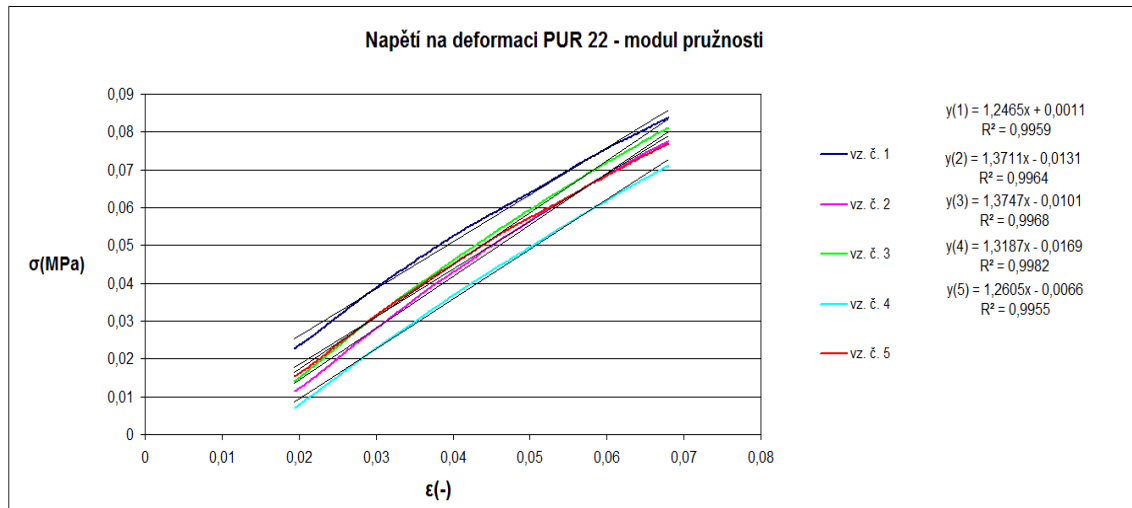
Obr. 43. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 3



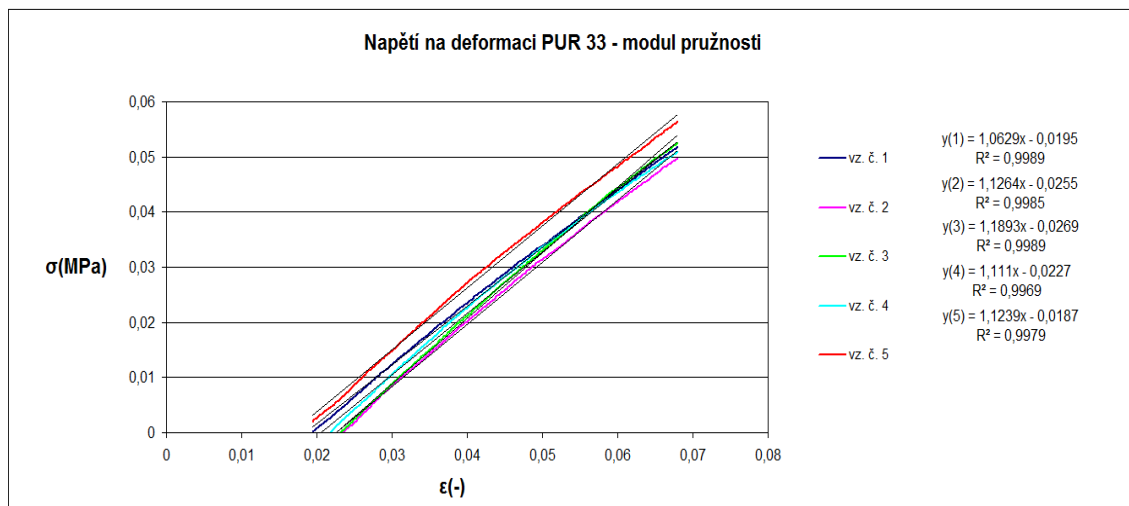
Obr. 44. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 3



Obr. 45. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 3



Obr. 46. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 3

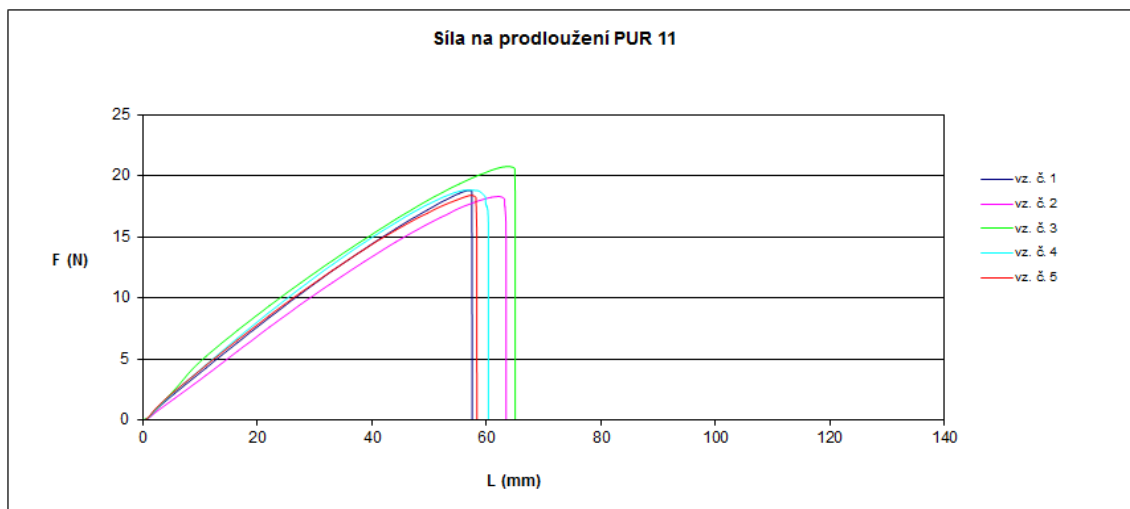


Obr. 47. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 3

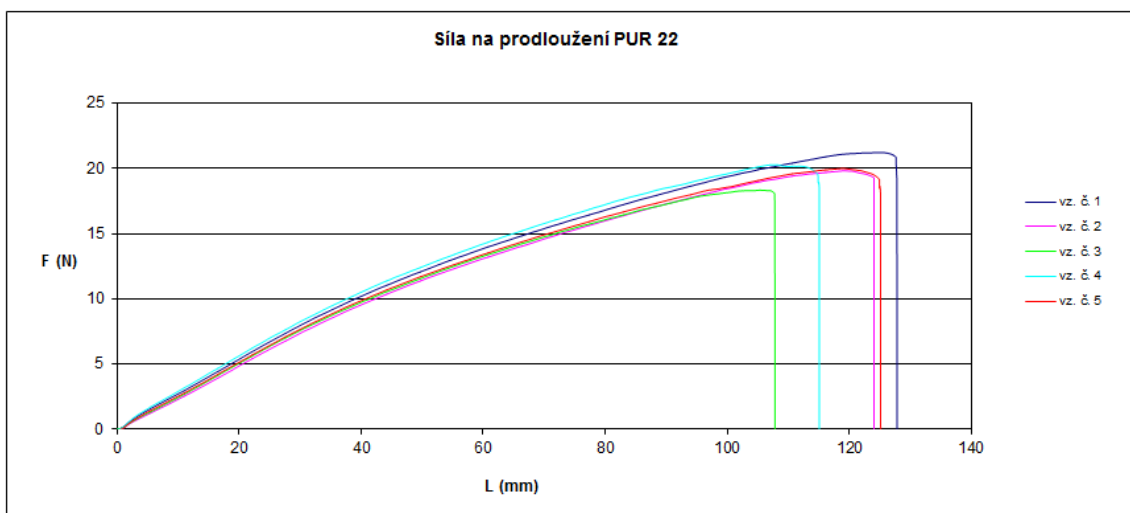
Tab. 7. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 3

	Série 3								
	E (Mpa)			Fmax (F)			Lmax (mm)		
	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33
vzorek č. 1	1,04	1,24	1,06	20,79	24,89	18,59	75,11	147,41	123,36
vzorek č. 2	1,19	1,37	1,12	19,51	23,10	21,29	62,29	139,29	106,67
vzorek č. 3	1,29	1,37	1,18	19,94	24,83	19,49	62,70	150,29	109,80
vzorek č. 4	1,48	1,31	1,11	22,73	24,40	19,34	75,59	141,79	111,25
vzorek č. 5	1,42	1,26	1,12	21,28	25,08	20,70	64,06	163,30	115,62
průměr	<b>1,28</b>	<b>1,31</b>	<b>1,12</b>	<b>20,85</b>	<b>24,46</b>	<b>19,88</b>	<b>67,95</b>	<b>148,42</b>	<b>113,34</b>
smoch	0,16	0,05	0,04	1,13	0,72	0,98	6,07	8,40	5,78

Série 7 – lepidlo UHU

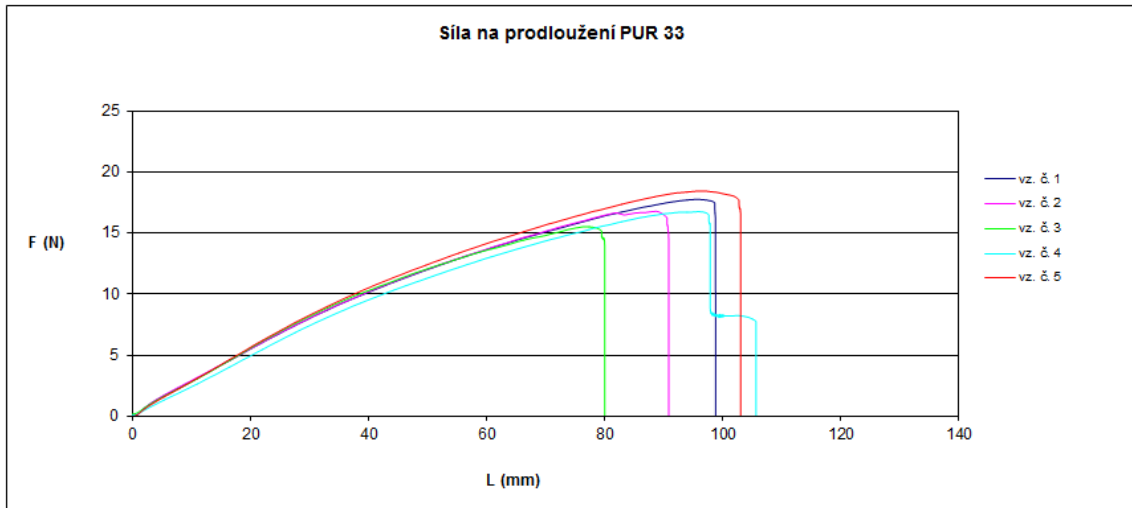


Obr. 48. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 7

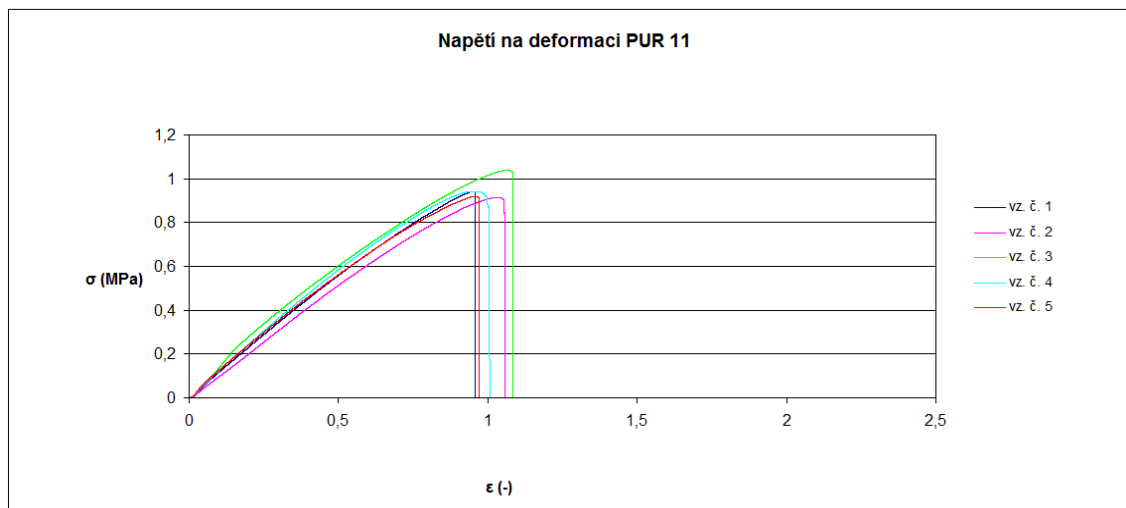


Obr. 49. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 7

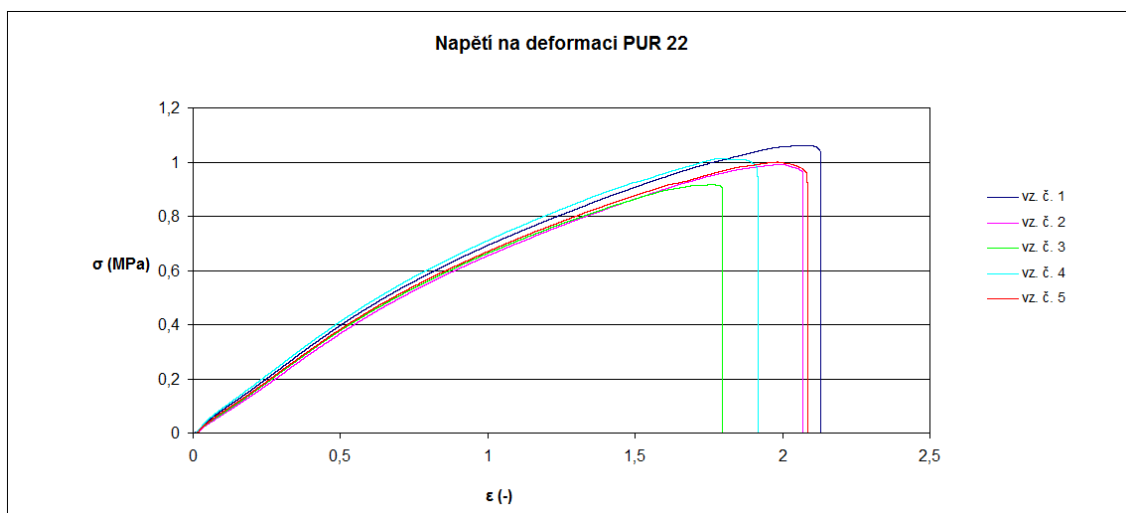




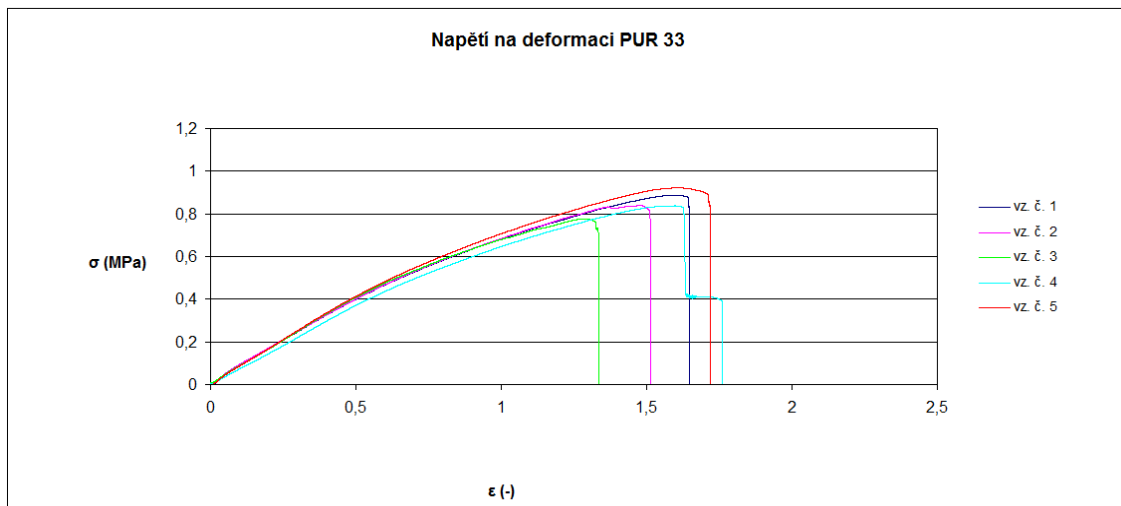
Obr. 50. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 7



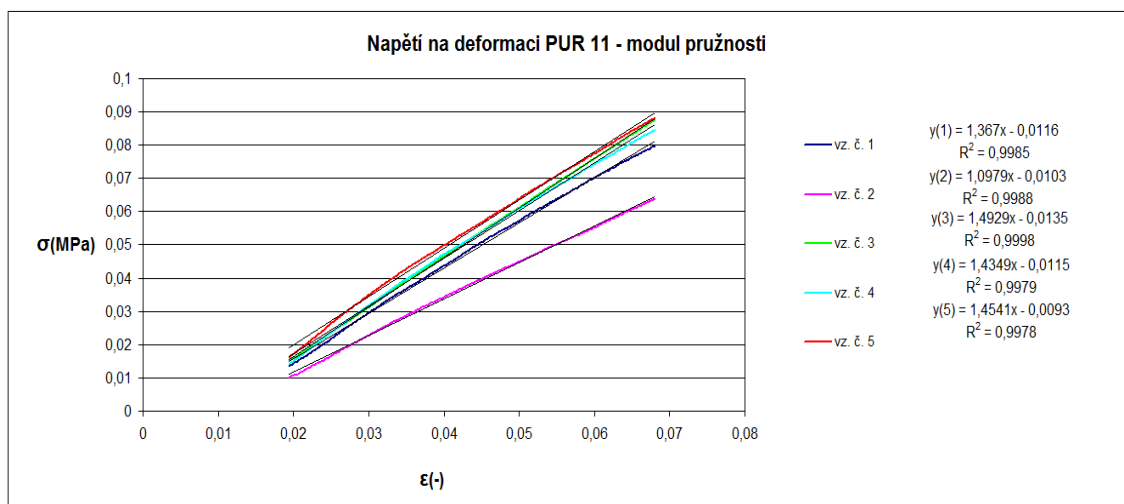
Obr. 51. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 7



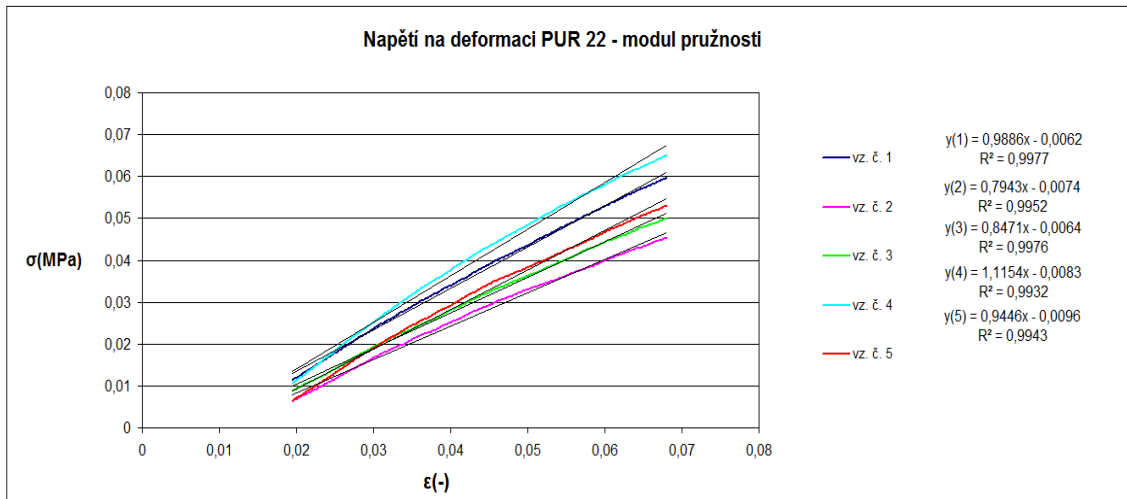
Obr. 52. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 7



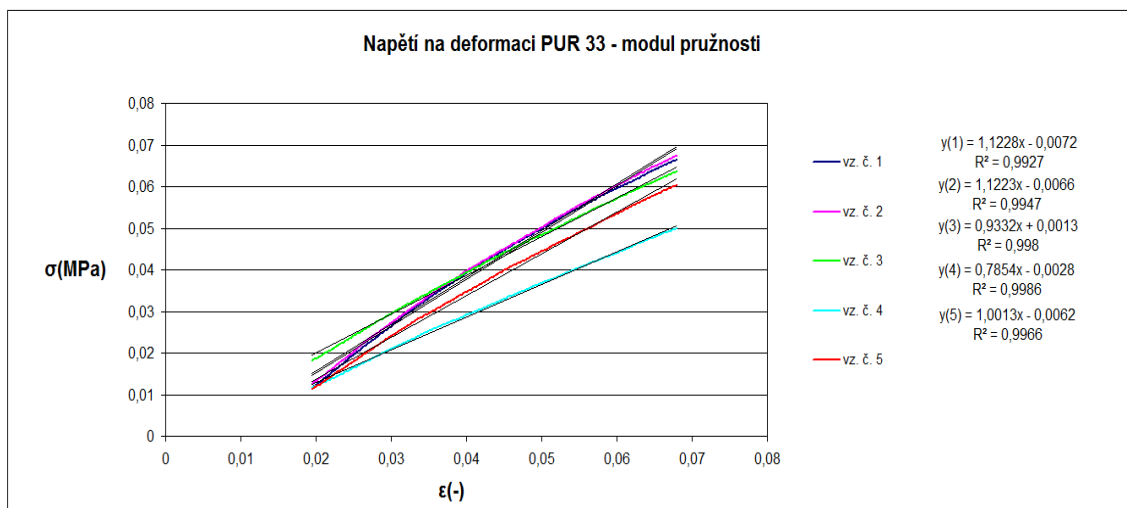
Obr. 53. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 7



Obr. 54. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 7



Obr. 55. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 7



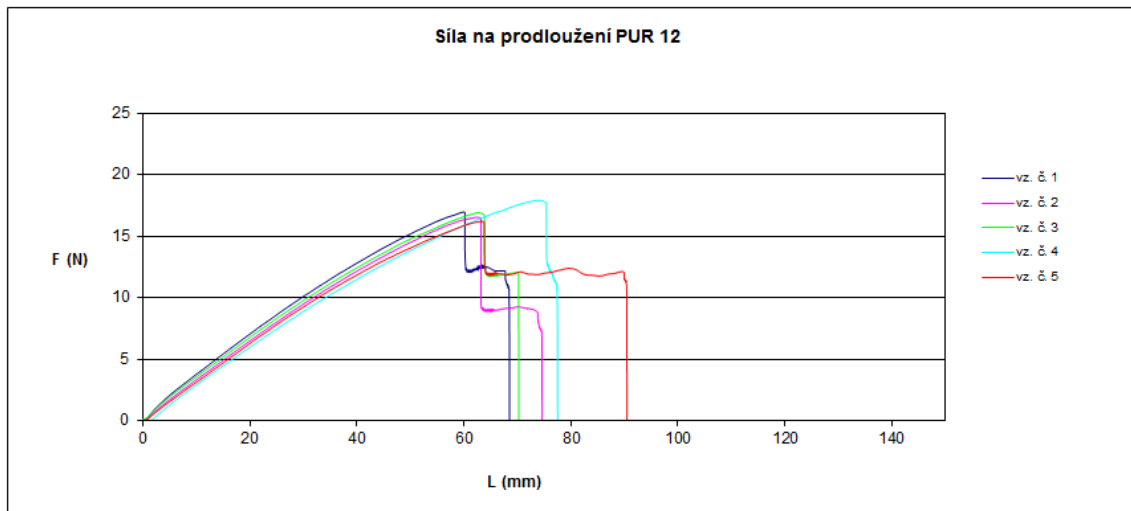
Obr. 56. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 7

Tab. 8. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 7

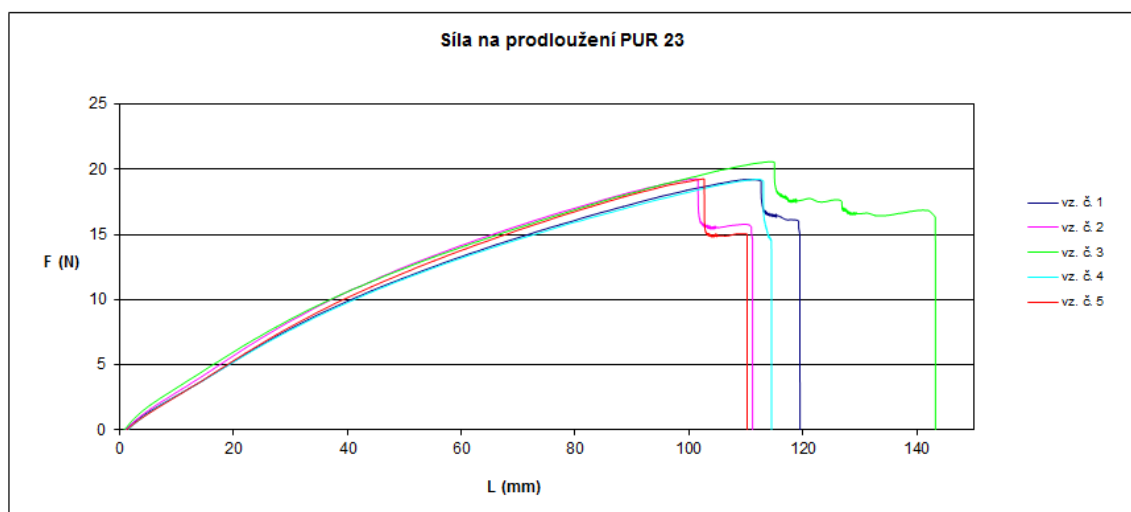
	<b>Série 7</b>								
	E (Mpa)			Fmax (N)			Lmax (mm)		
	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33
vzorek č. 1	1,36	0,98	1,12	18,81	21,23	17,77	56,97	125,10	95,92
vzorek č. 2	1,09	0,79	1,12	18,31	19,82	16,78	62,24	119,38	88,69
vzorek č. 3	1,49	0,84	0,93	20,76	18,34	15,53	56,89	105,49	76,99
vzorek č. 4	1,43	1,11	0,78	18,84	20,29	16,76	64,02	107,86	95,99
vzorek č. 5	1,45	0,94	1,00	18,40	20,00	18,45	57,23	118,99	96,88
průměr	<b>1,36</b>	<b>0,93</b>	<b>0,99</b>	<b>19,03</b>	<b>19,94</b>	<b>17,06</b>	<b>59,47</b>	<b>115,36</b>	<b>90,89</b>
smoch	0,14	0,11	0,13	0,89	0,94	0,99	3,04	7,45	7,55

### 3.1.2.2 Lepený spoj - kombinace materiálů

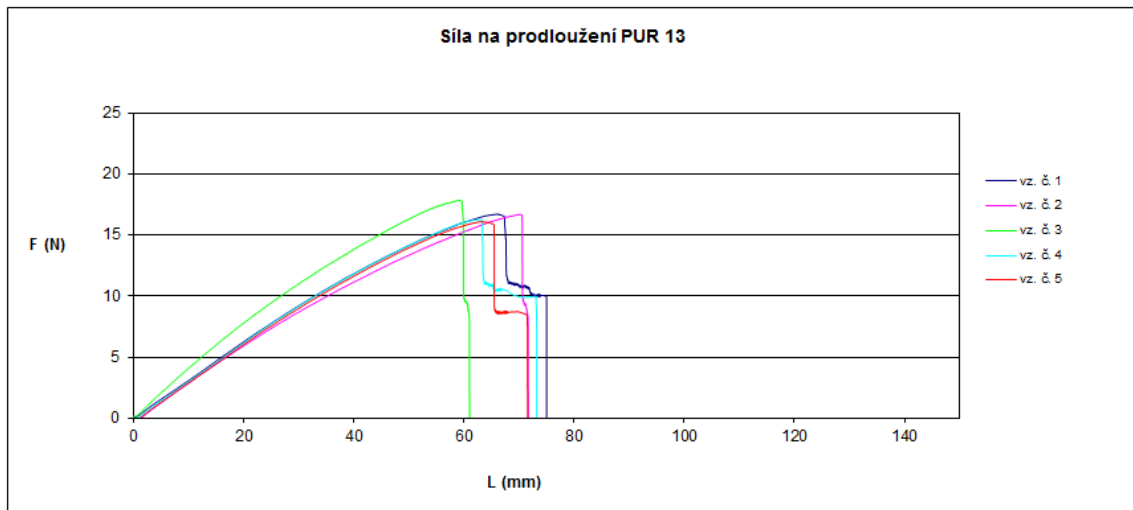
#### Série 4 – kombinace – lepidlo Pattex



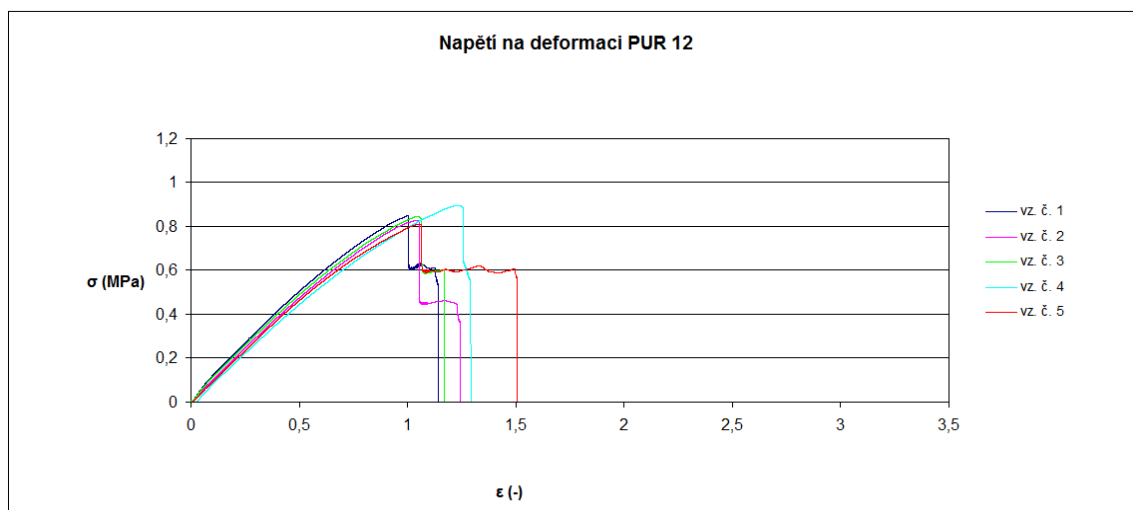
Obr. 57. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 4



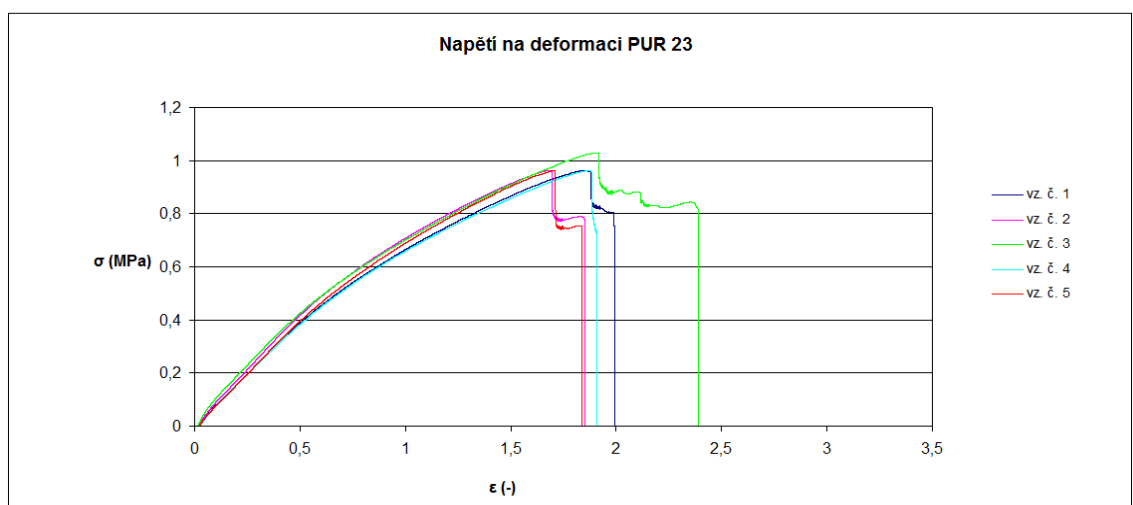
Obr. 58. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 4



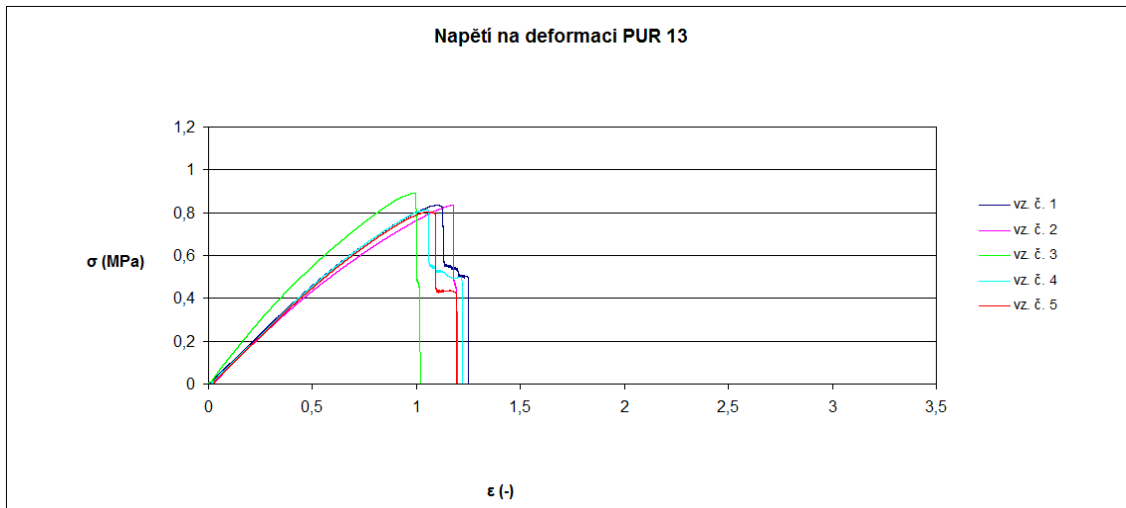
Obr. 59. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 13 – Série 4



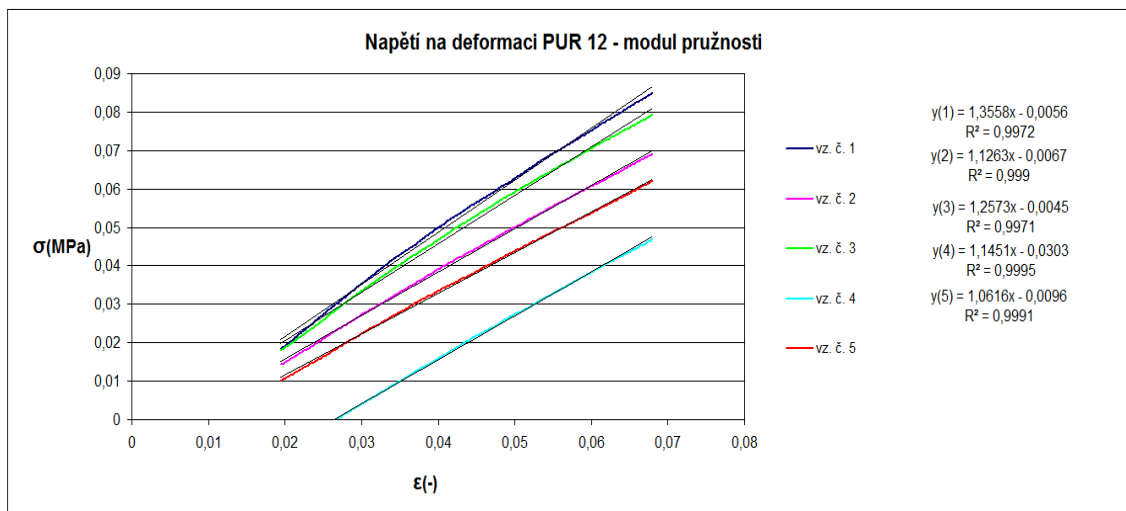
Obr. 60. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 4



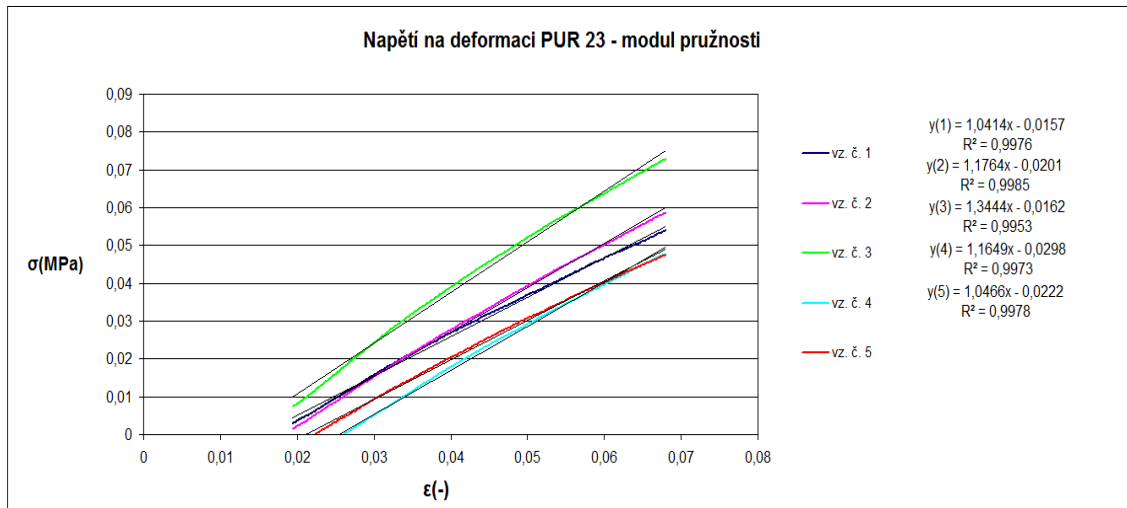
Obr. 61. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 4



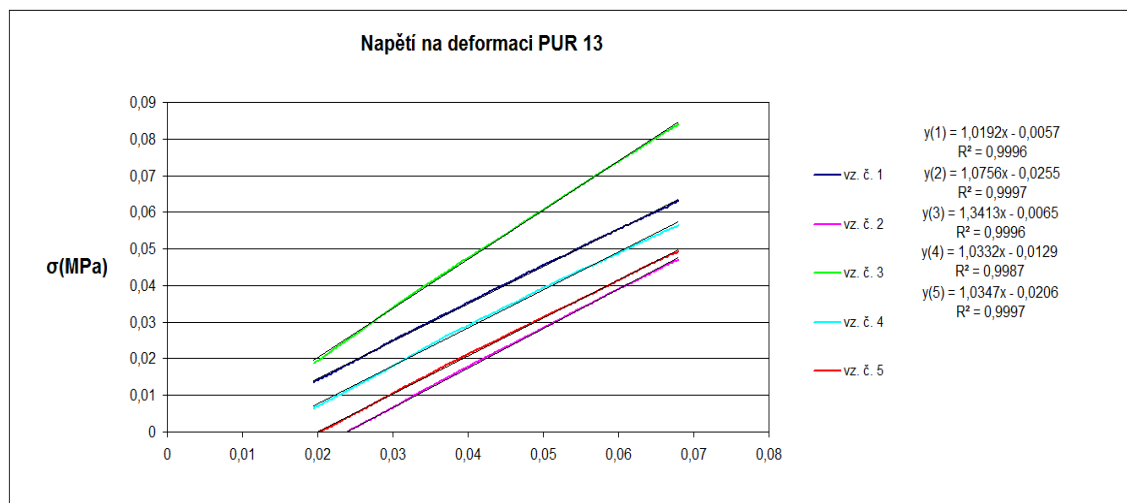
Obr. 62. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 4



Obr. 63. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 4



Obr. 64. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 4

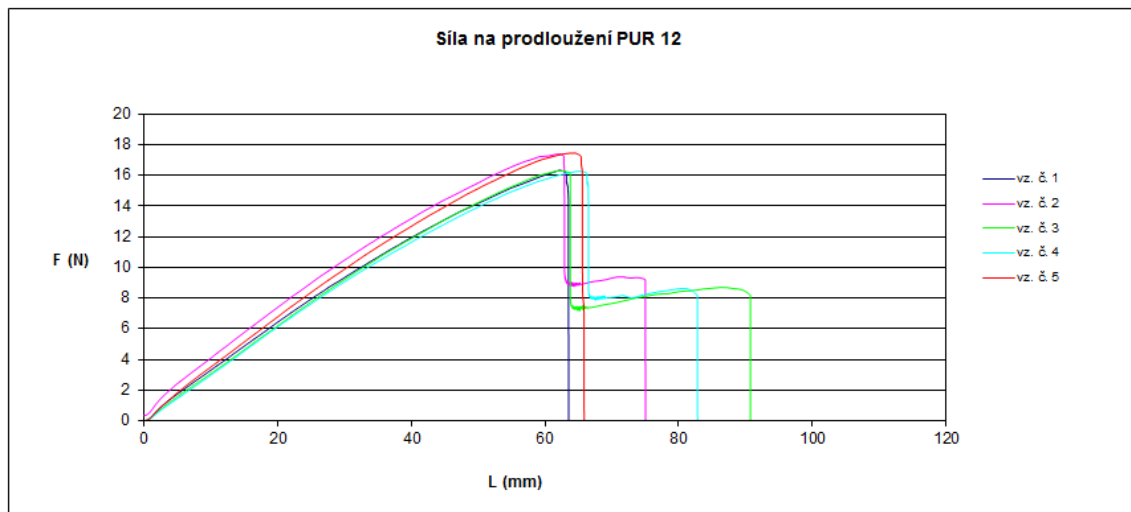


Obr. 65. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13 – Série 4

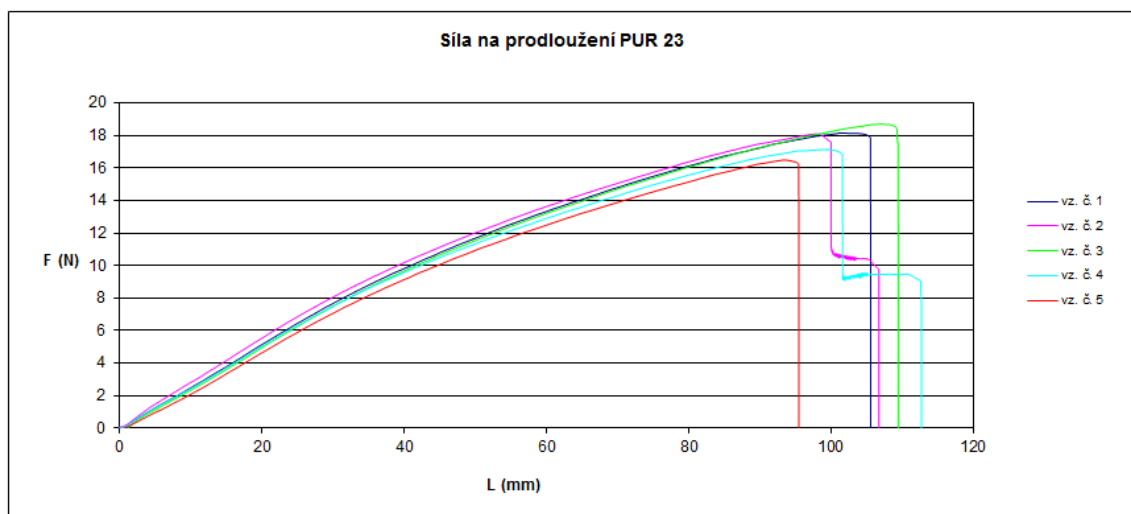
Tab. 9. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 4

	<b>Série 4</b>								
	E (Mpa)			Fmax (F)			Lmax (mm)		
	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13
vzorek č. 1	1,35	1,04	1,01	16,97	19,22	16,71	59,97	110,98	66,11
vzorek č. 2	1,12	1,17	1,07	16,53	19,27	16,68	62,26	101,13	70,28
vzorek č. 3	1,25	1,34	1,34	16,91	20,60	17,84	62,50	114,27	59,24
vzorek č. 4	1,14	1,16	1,03	17,92	19,24	16,26	73,93	112,11	62,85
vzorek č. 5	1,06	1,04	1,03	16,22	19,26	16,09	63,31	102,67	63,46
průměr	<b>1,18</b>	<b>1,15</b>	<b>1,10</b>	<b>16,91</b>	<b>19,52</b>	<b>16,72</b>	<b>64,39</b>	<b>108,23</b>	<b>64,39</b>
smodch	0,10	0,11	0,12	0,57	0,54	0,61	4,90	5,30	3,67

## Série 8 – kombinace – lepidlo UHU

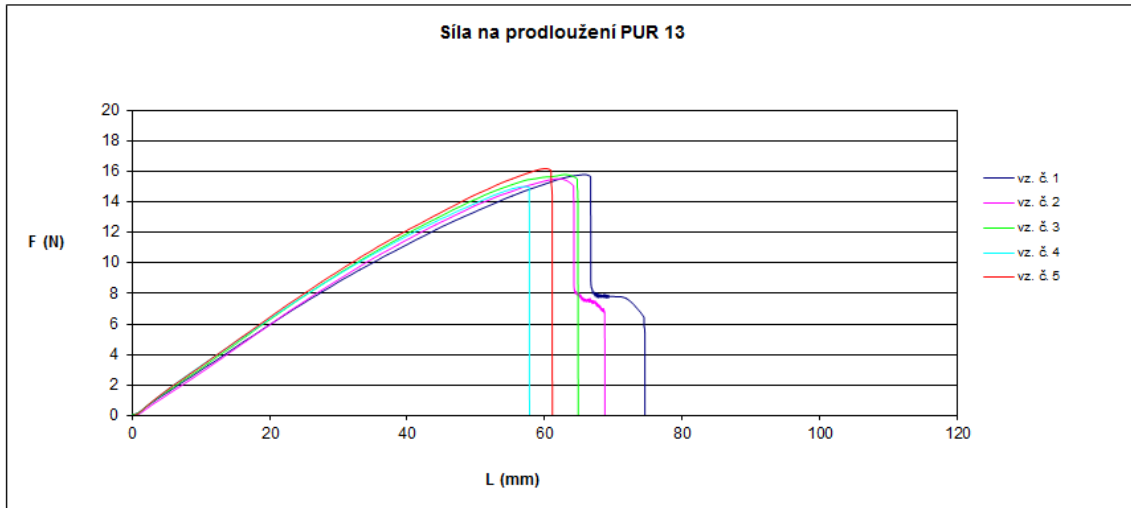


Obr. 66. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 8

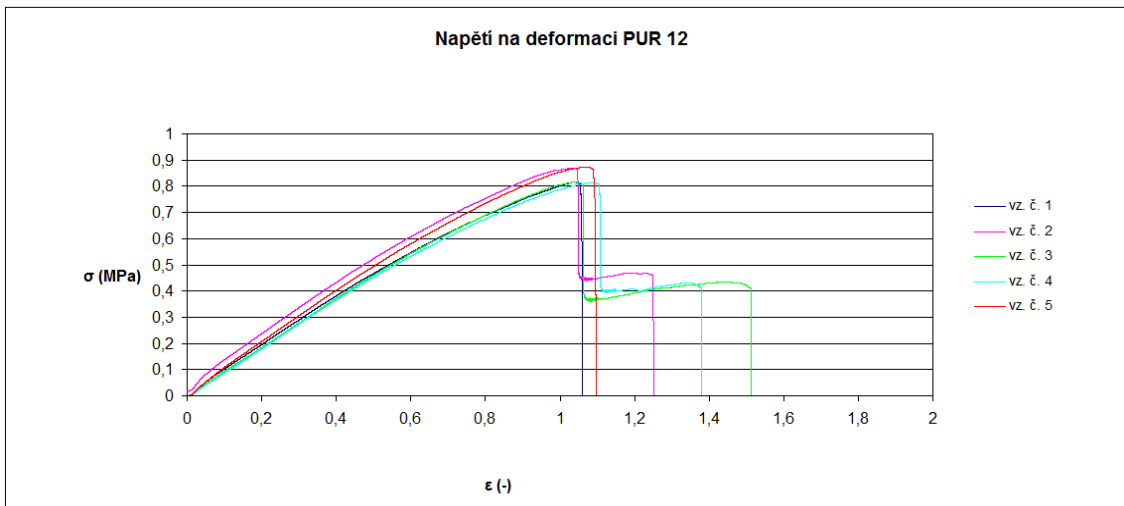


Obr. 67. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 8

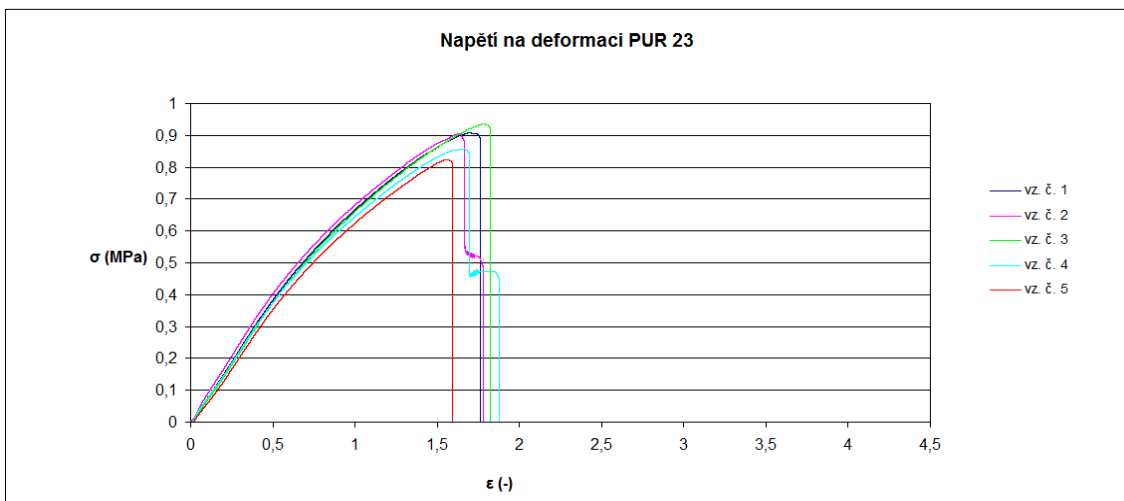




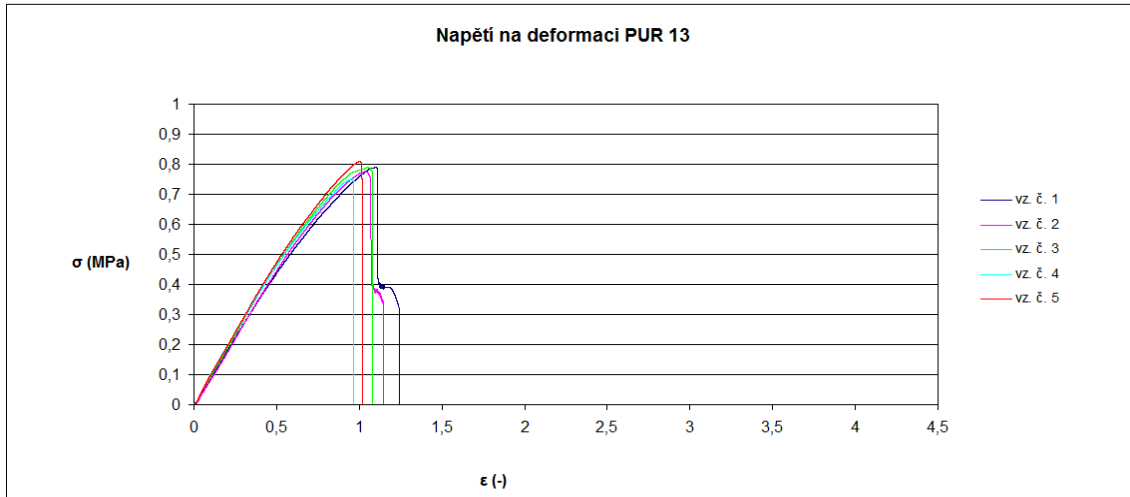
Obr. 68. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 32 – Série 8



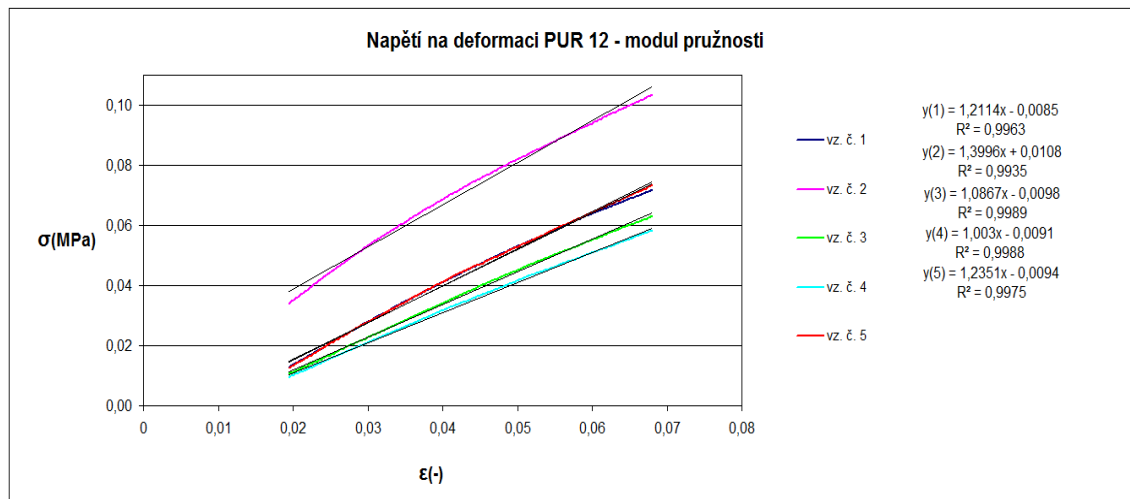
Obr. 69. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 8



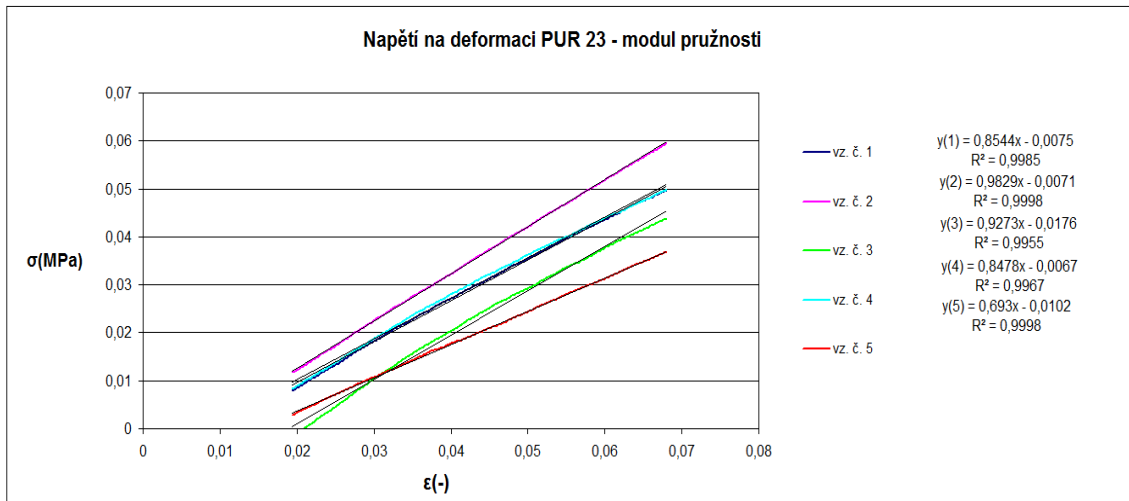
Obr. 70. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 8



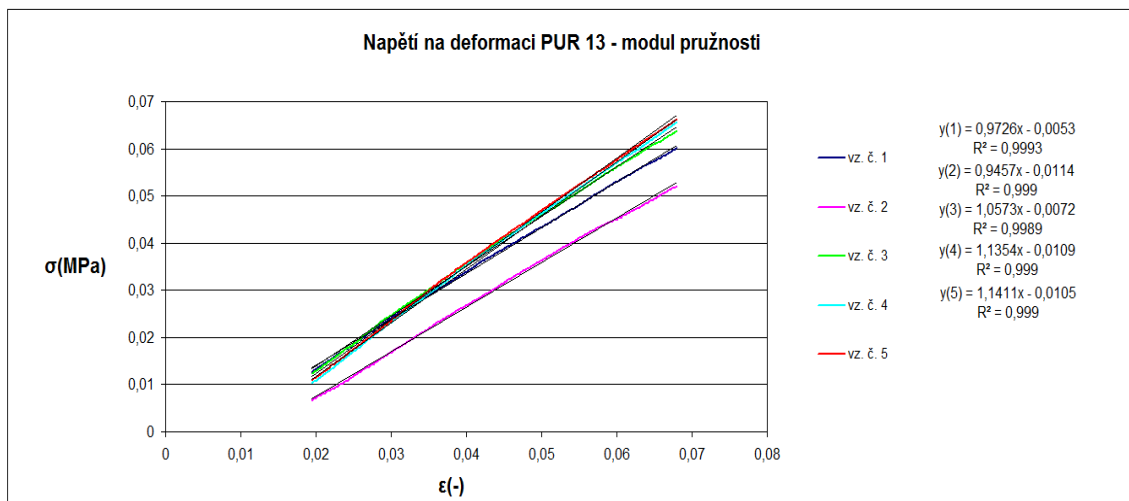
Obr. 71. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 8



Obr. 72. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 8



Obr. 73. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 8



Obr. 74. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13– Série 8

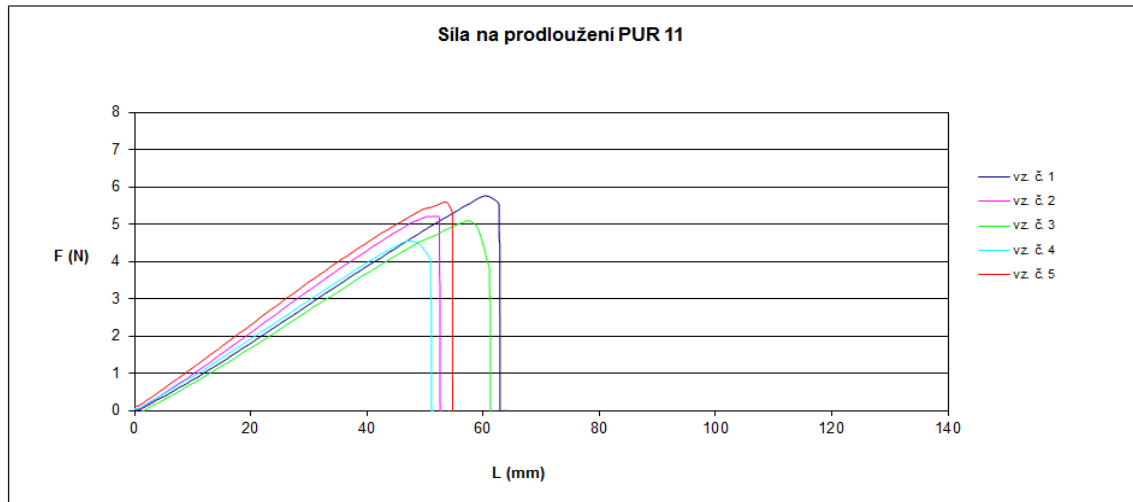
Tab. 10. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 8

Série 8									
	E (MPa)			Fmax (F)			Lmax (mm)		
	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13
vzorek č. 1	1,21	0,85	0,97	16,33	18,15	15,80	62,27	101,70	65,96
vzorek č. 2	1,39	0,98	0,94	17,40	18,10	15,52	62,22	98,27	62,15
vzorek č. 3	1,08	0,92	1,05	16,31	18,70	15,79	62,27	107,38	62,91
vzorek č. 4	1,00	0,84	1,13	16,28	17,14	15,01	65,08	98,88	57,35
vzorek č. 5	1,23	0,69	1,14	17,47	16,49	16,19	64,37	93,28	60,26
průměr	<b>1,18</b>	<b>0,86</b>	<b>1,05</b>	<b>16,76</b>	<b>17,72</b>	<b>15,66</b>	<b>63,24</b>	<b>99,90</b>	<b>61,73</b>
smodch	0,13	0,10	0,08	0,55	0,79	0,39	1,23	4,62	2,86

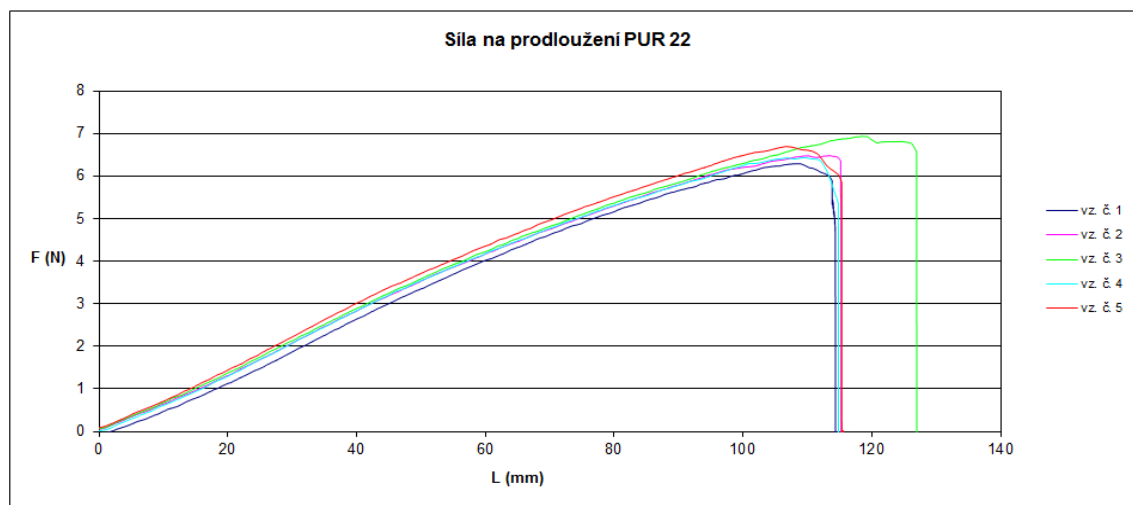
### 3.1.3 Lepený spoj přeplátovaný

#### 3.1.3.1 Lepený spoj přeplátovaný – stejné materiály

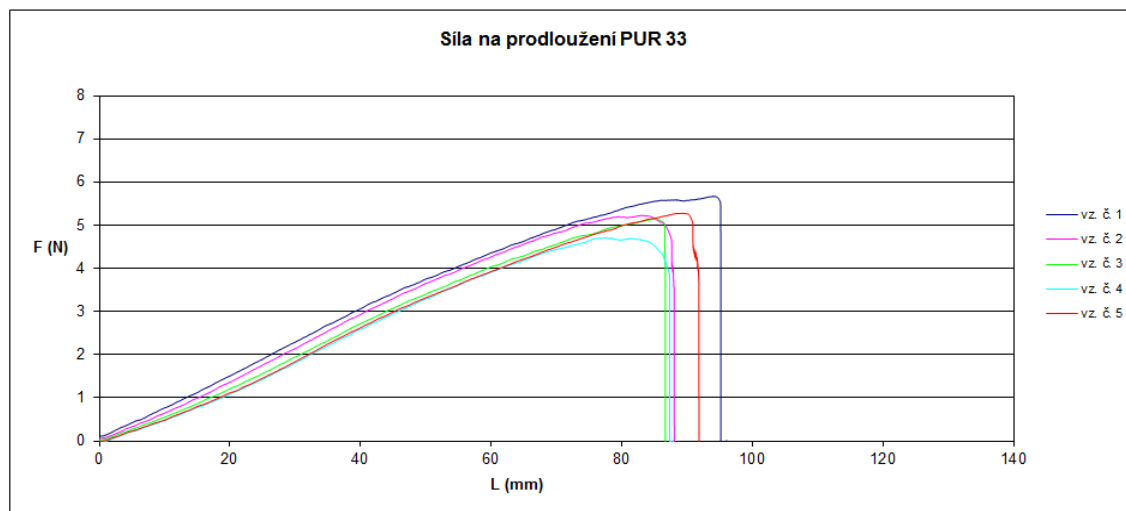
##### Série 5 – přeplátování 10mm – lepidlo Pattex



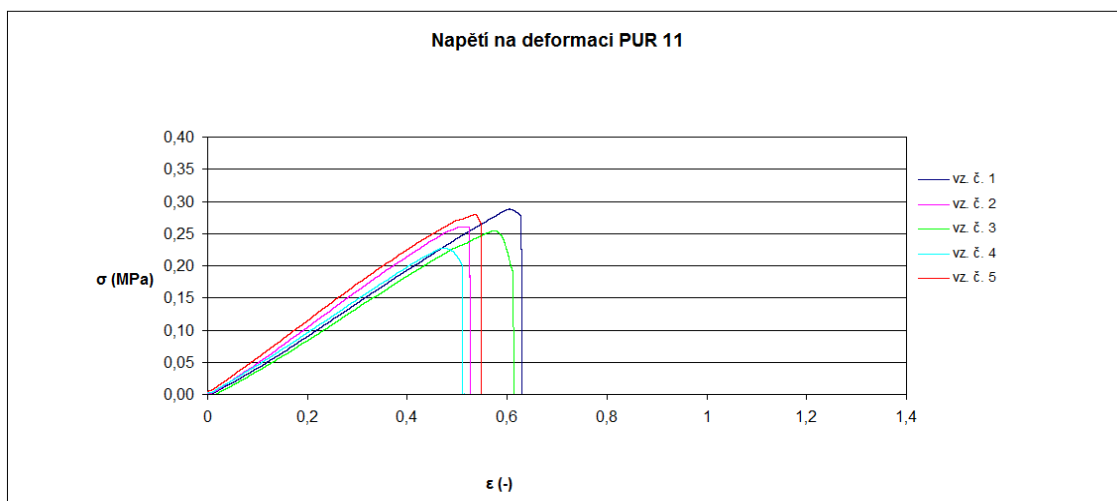
Obr. 75. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 5



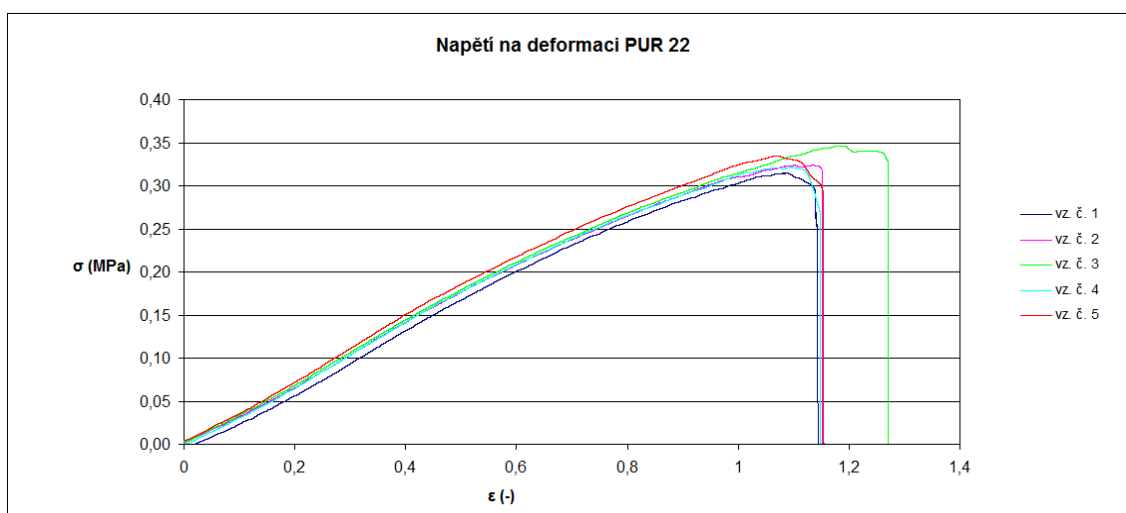
Obr. 76. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 5



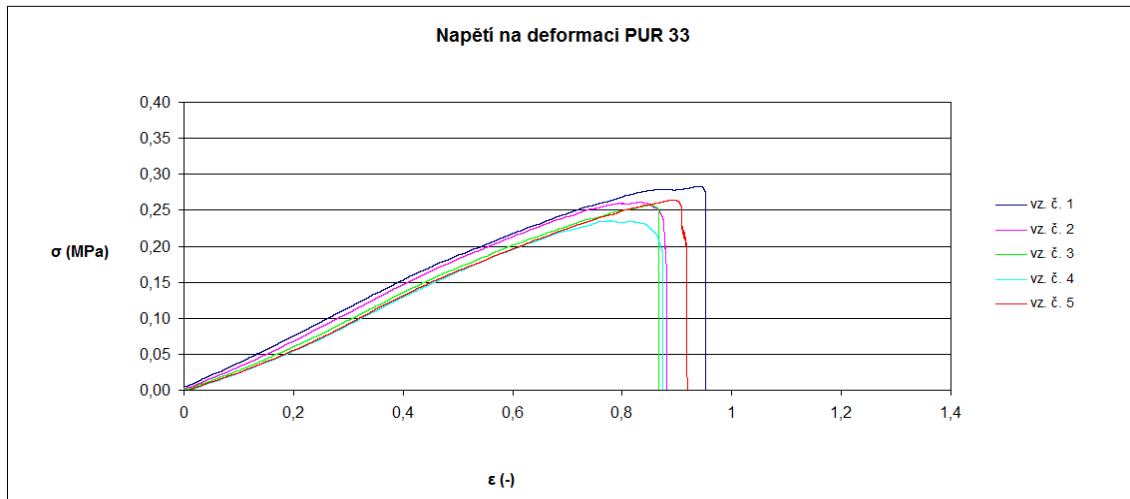
Obr. 77. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33– Série 5



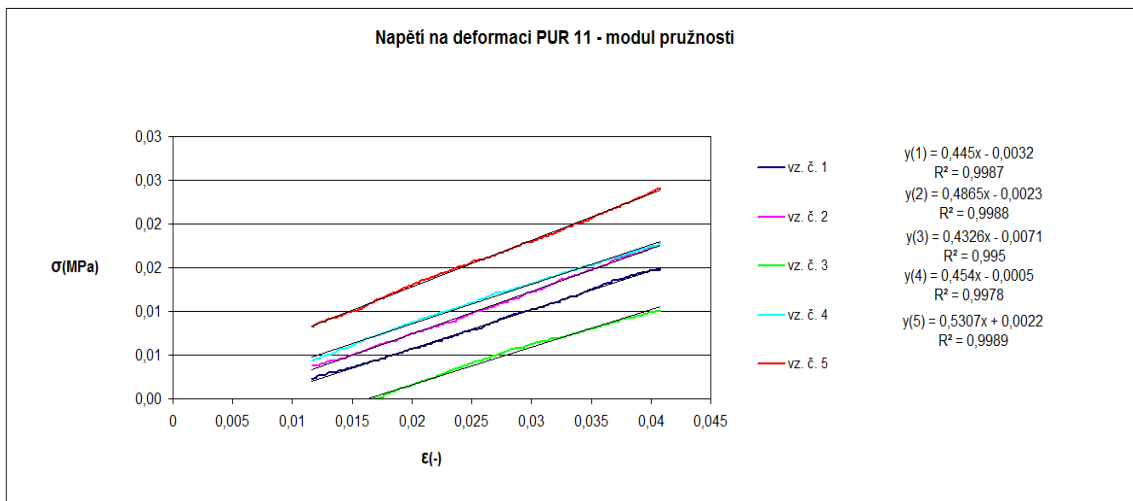
Obr. 78. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 5



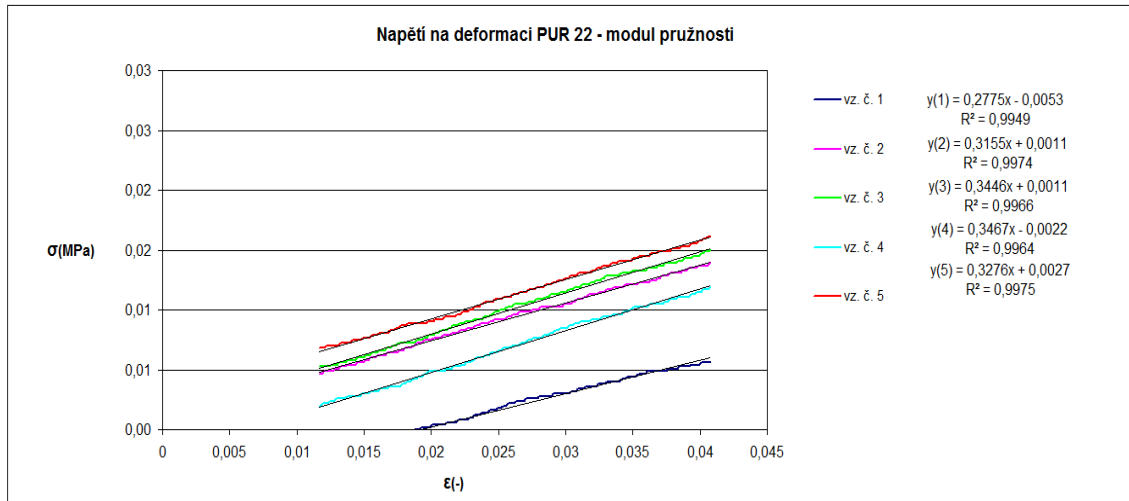
Obr. 79. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 5



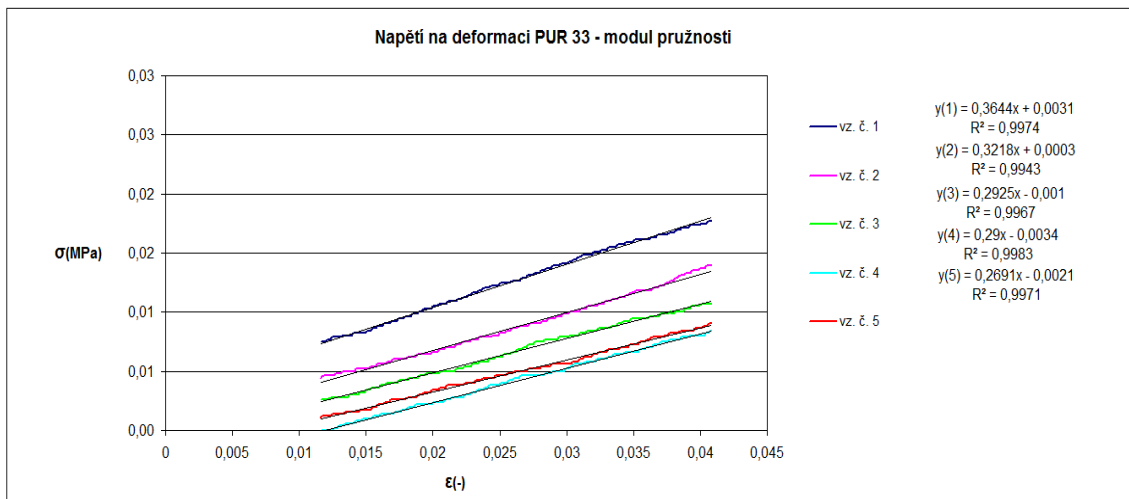
Obr. 80. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 5



Obr. 81. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 5



Obr. 82. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 5

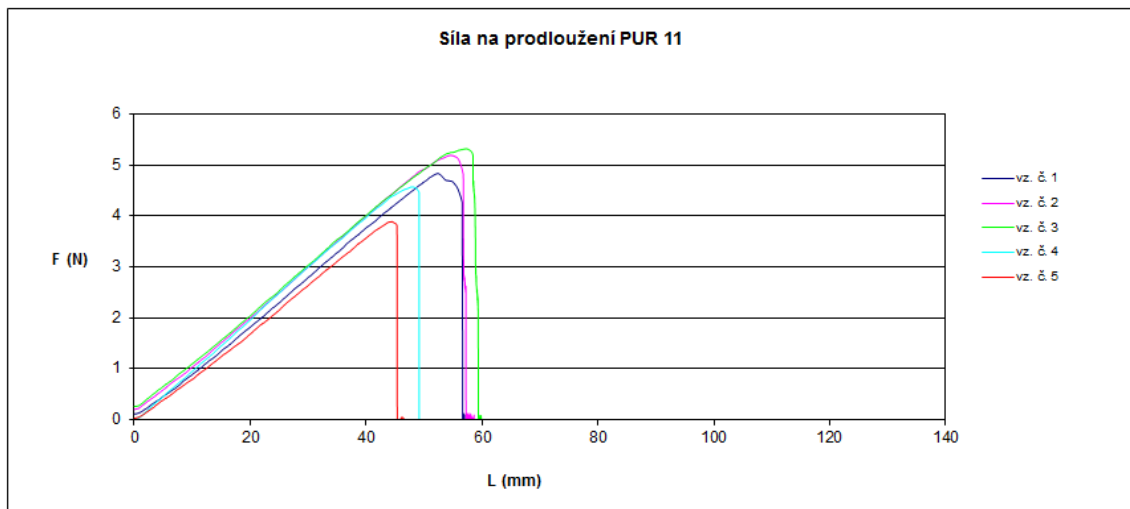


Obr. 83. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 5

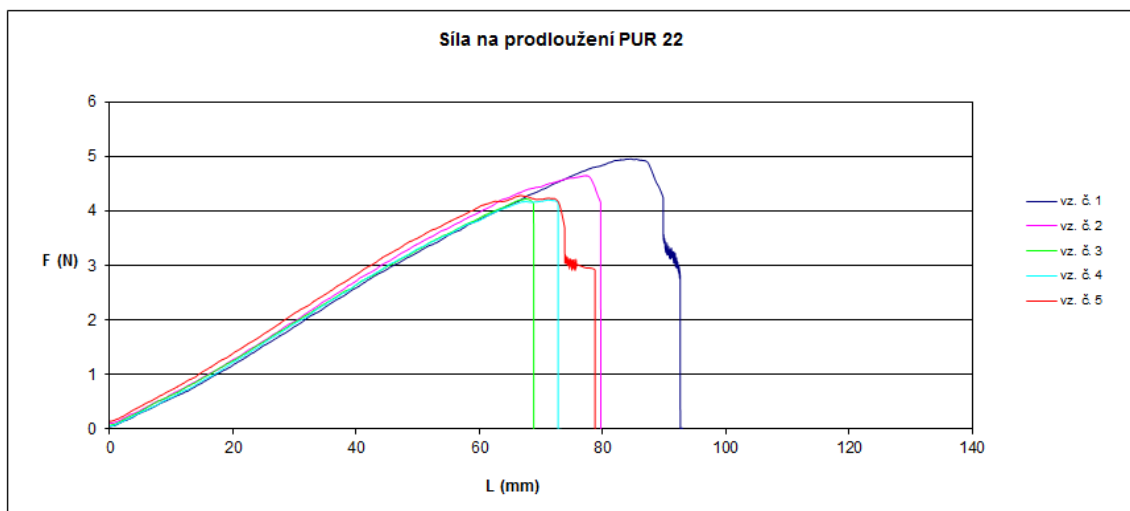
Tab. 11. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 5

	Série 5								
	E (MPa)			Fmax (F)			Lmax (mm)		
	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33
vzorek č. 1	0,44	0,28	0,36	5,76	6,29	4,70	60,59	108,96	94,32
vzorek č. 2	0,49	0,32	0,32	5,21	6,48	5,14	52,26	113,60	83,23
vzorek č. 3	0,43	0,34	0,29	5,09	6,93	5,22	57,63	118,63	85,11
vzorek č. 4	0,45	0,35	0,29	4,55	6,43	5,67	47,35	109,74	77,95
vzorek č. 5	0,53	0,33	0,27	5,59	6,69	5,28	53,71	106,97	89,38
průměr	<b>0,47</b>	<b>0,32</b>	<b>0,31</b>	<b>5,24</b>	<b>6,56</b>	<b>5,20</b>	<b>54,31</b>	<b>111,58</b>	<b>86,00</b>
smodch	0,04	0,02	0,03	0,42	0,22	0,31	4,55	4,13	5,55

## Série 9 – přeplátování 5 mm – lepidlo Pattex

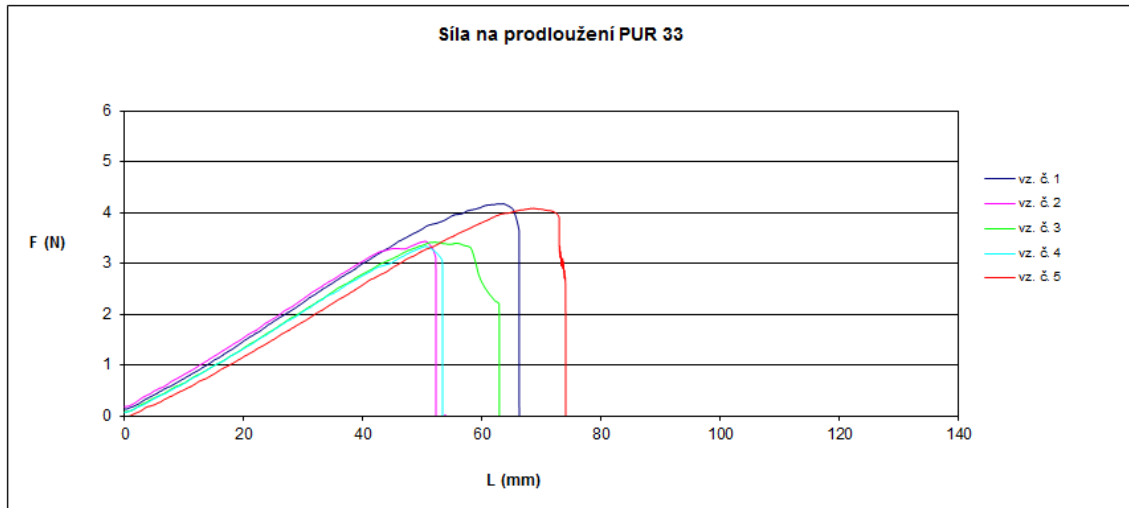


Obr. 84. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 9

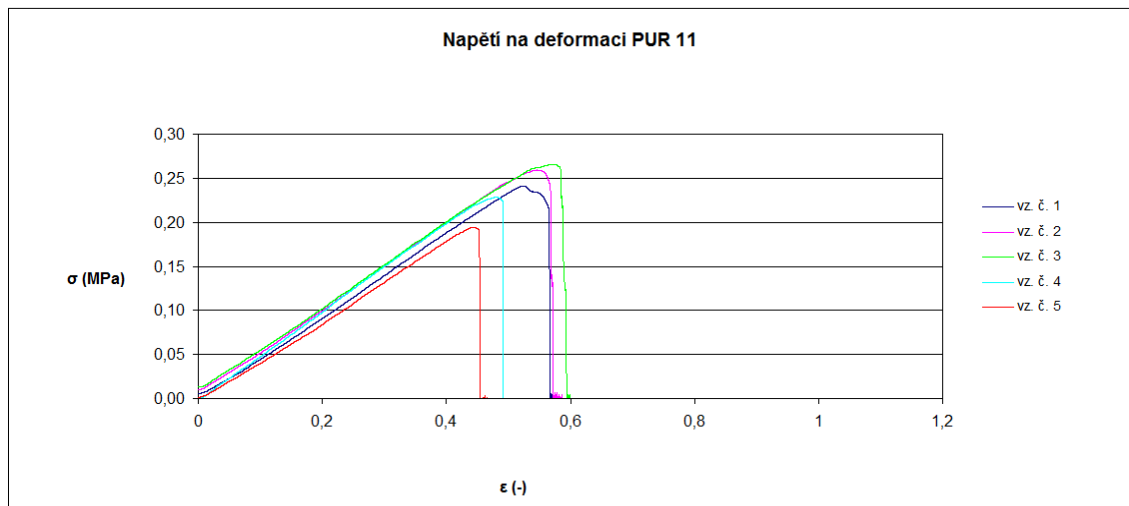


Obr. 85. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 9

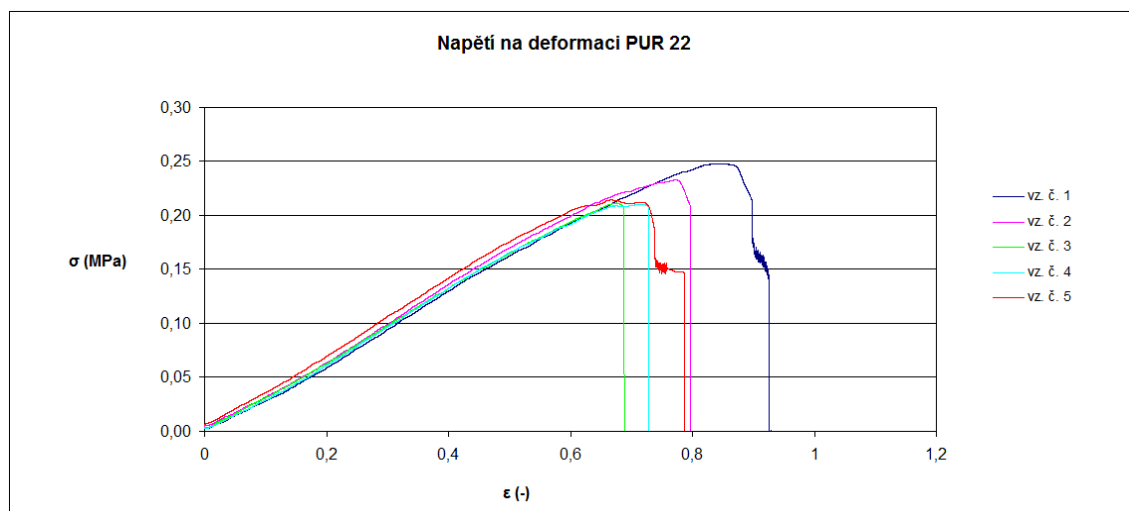




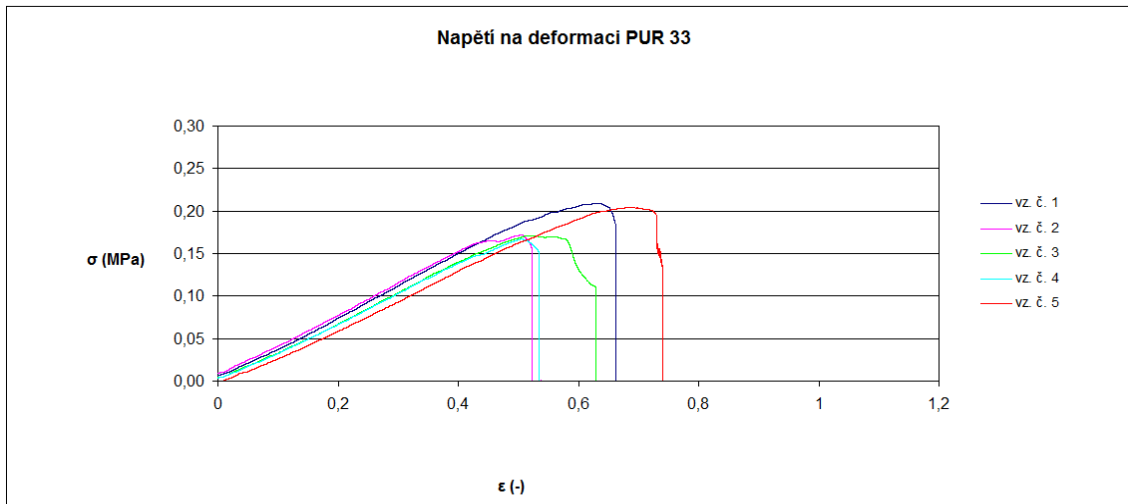
Obr. 86. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 9



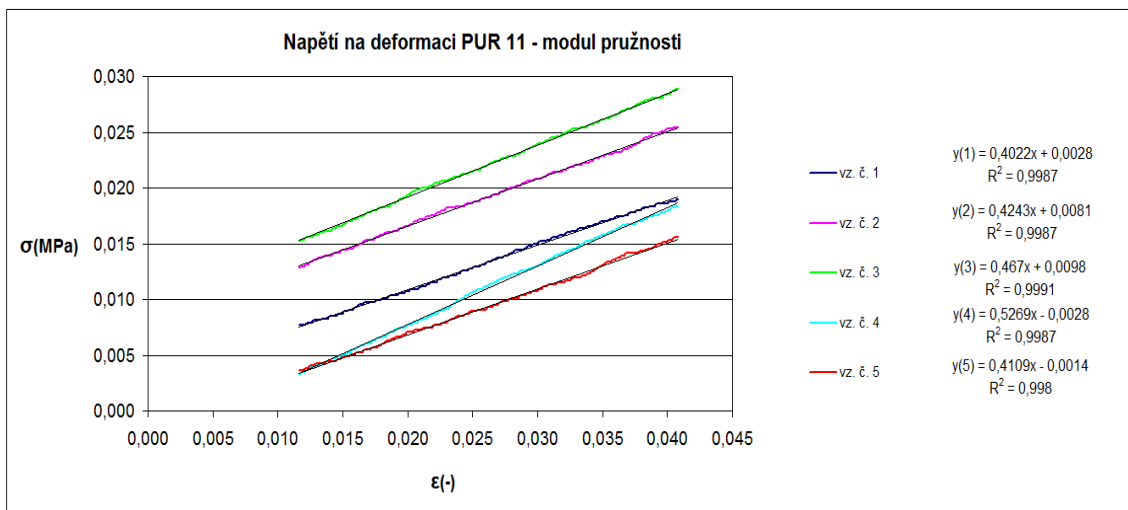
Obr. 87. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 9



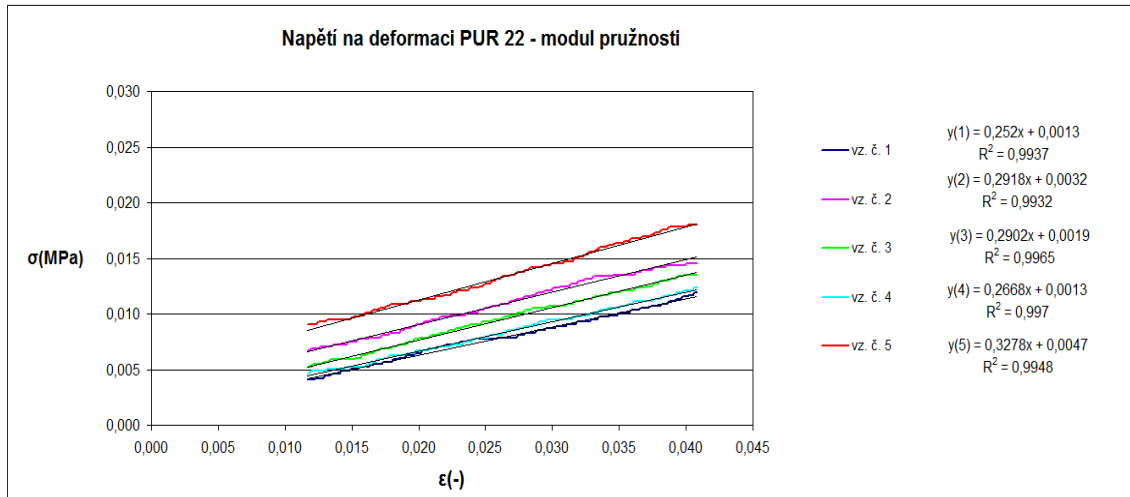
Obr. 88. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 9



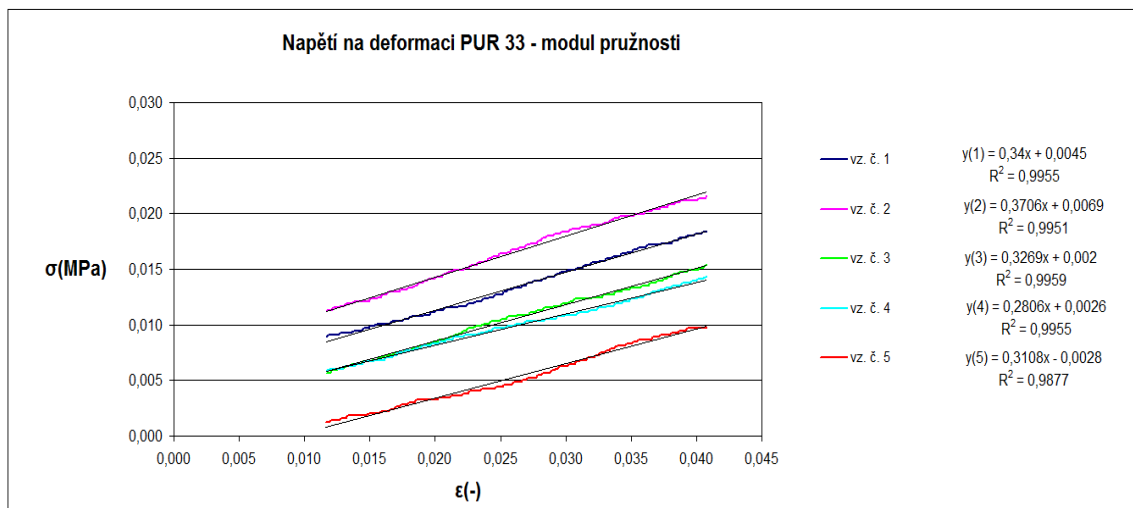
Obr. 89. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 9



Obr. 90. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 9



Obr. 91. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 9

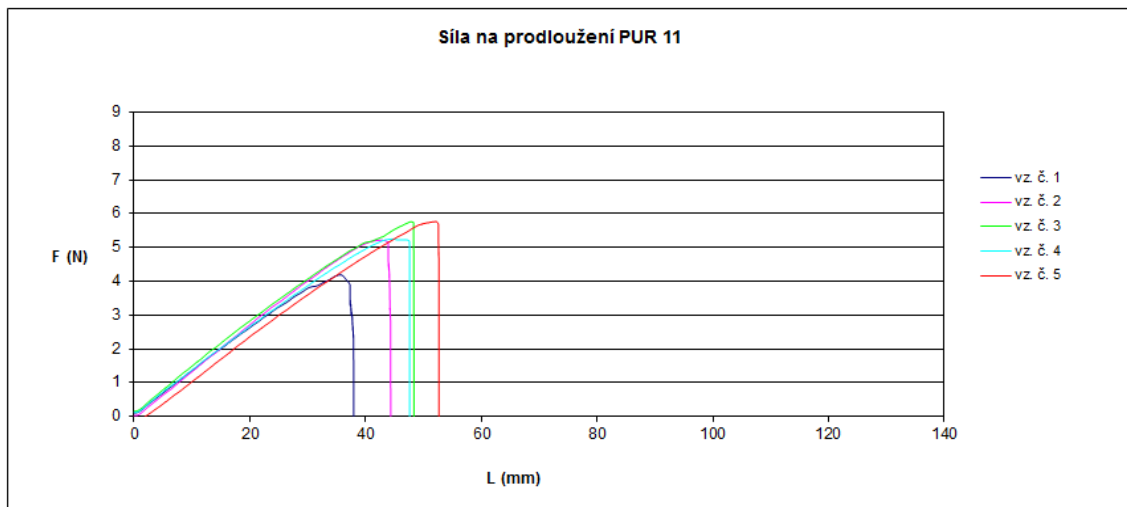


Obr. 92. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 9

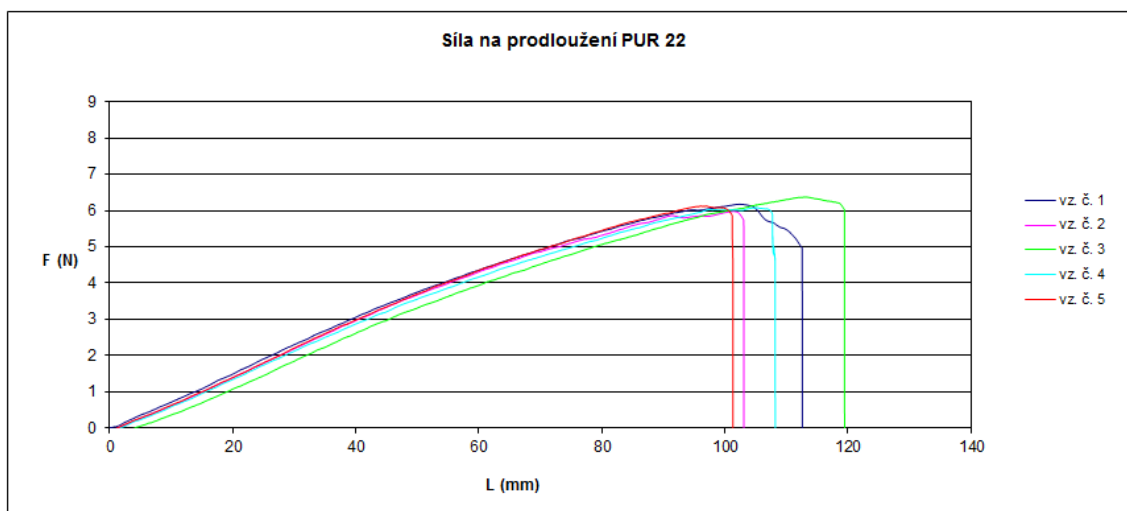
Tab. 12. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 9

	Série 9								
	E (kPa)			Fmax (F)			Lmax (mm)		
	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33
vzorek č. 1	0,40	0,25	0,34	4,83	4,96	4,18	52,53	84,65	63,61
vzorek č. 2	0,42	0,29	0,37	5,19	4,66	3,44	54,64	77,06	50,53
vzorek č. 3	0,47	0,29	0,33	5,32	4,23	3,42	57,35	67,58	52,21
vzorek č. 4	0,53	0,27	0,28	4,57	4,21	3,34	48,19	71,57	50,71
vzorek č. 5	0,41	0,33	0,31	3,88	4,29	4,09	44,50	66,95	68,91
průměr	<b>0,45</b>	<b>0,29</b>	<b>0,33</b>	<b>4,76</b>	<b>4,47</b>	<b>3,69</b>	<b>51,44</b>	<b>73,56</b>	<b>57,20</b>
smoch	0,05	0,03	0,03	0,51	0,30	0,36	4,58	6,61	7,61

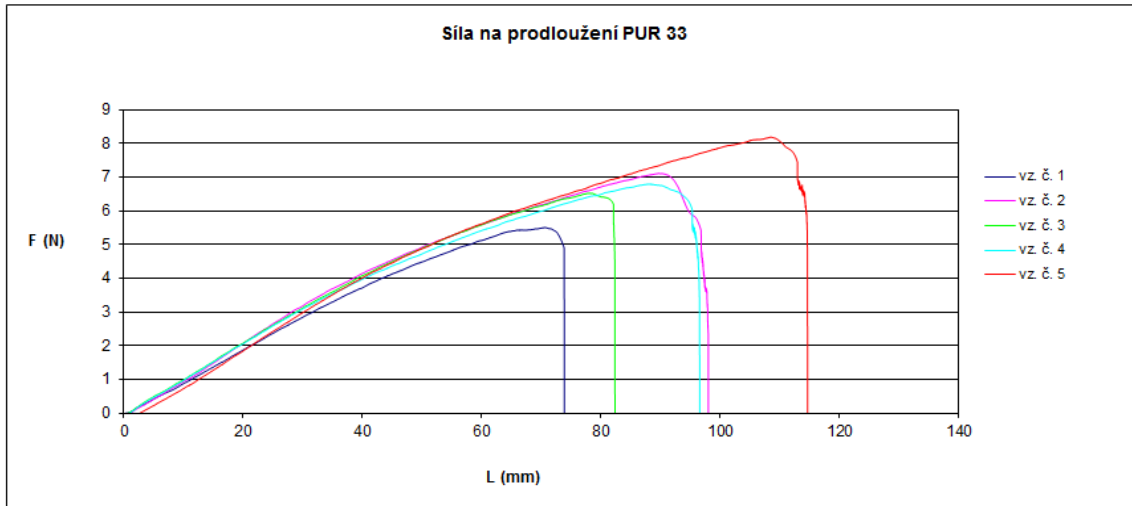
## Série 10



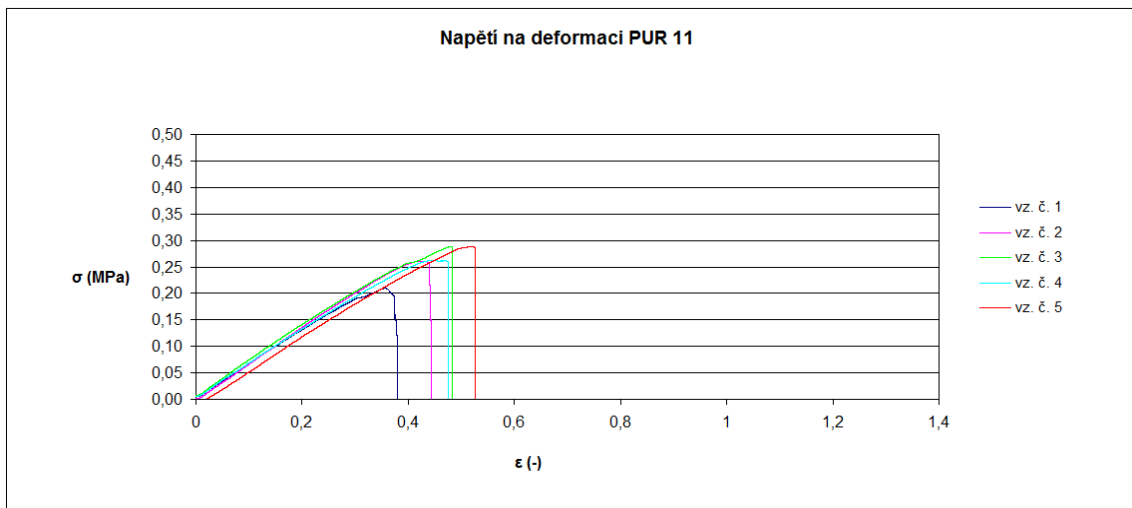
Obr. 93. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 10



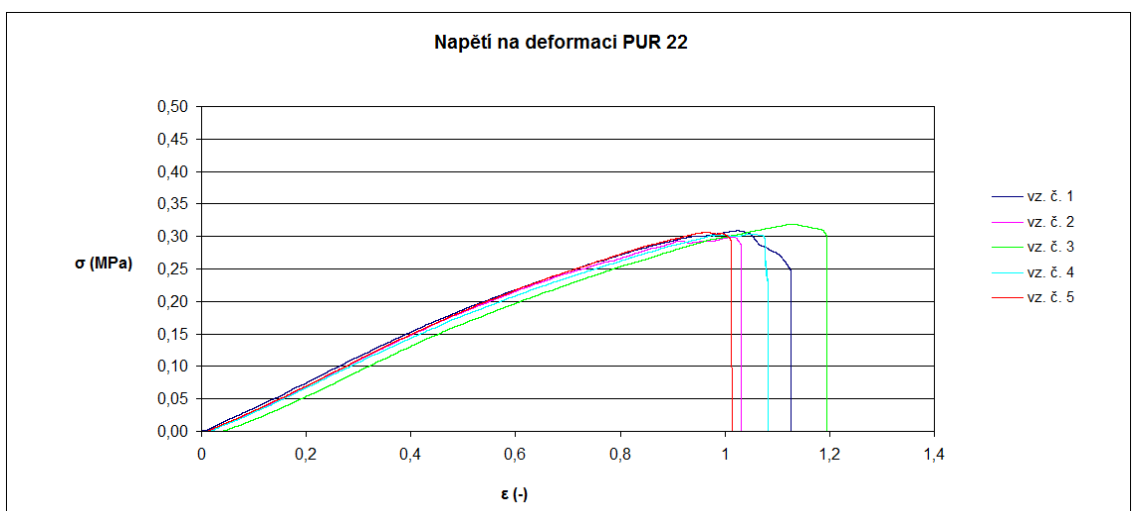
Obr. 94. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 10



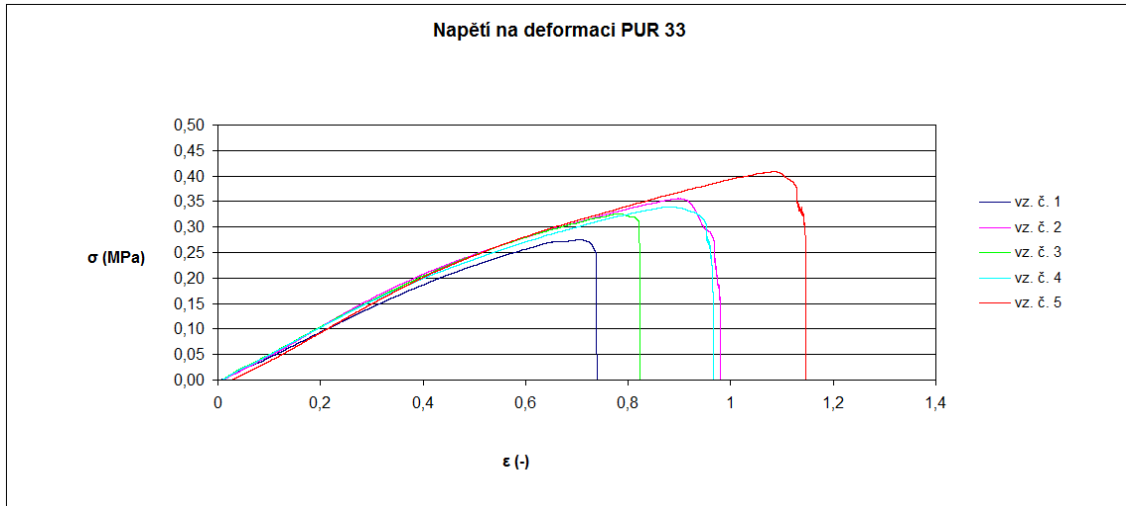
Obr. 95. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 10



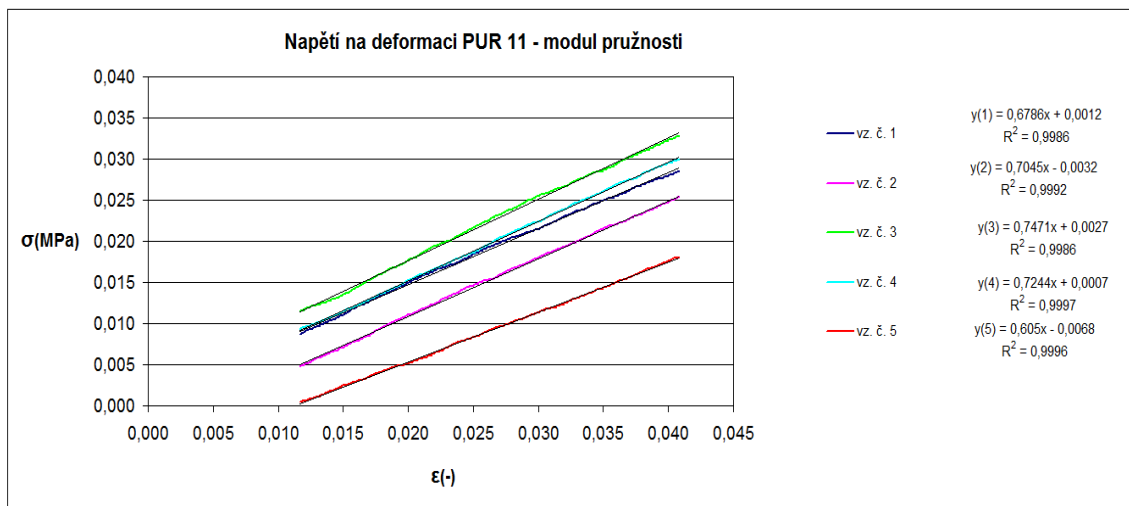
Obr. 96. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 10



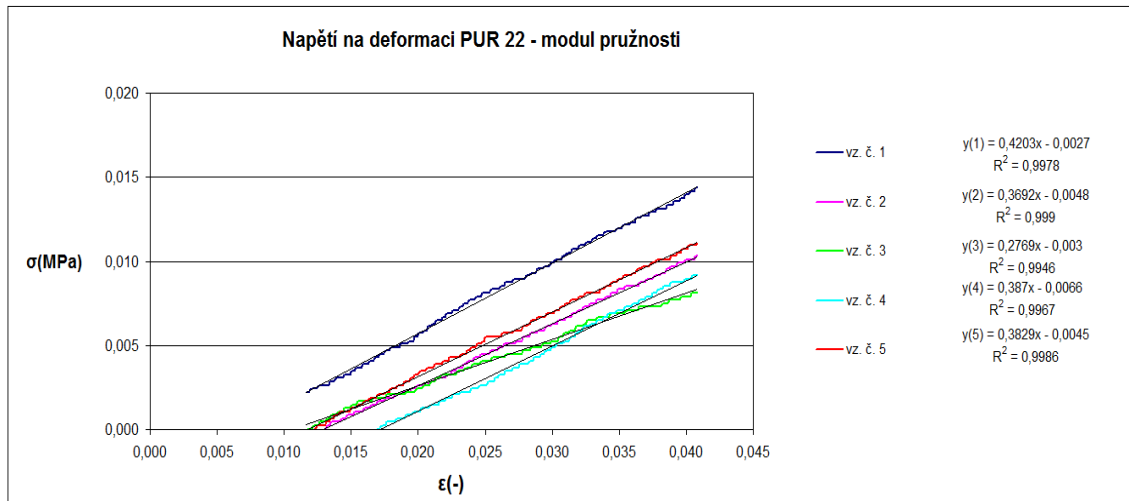
Obr. 97. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 10



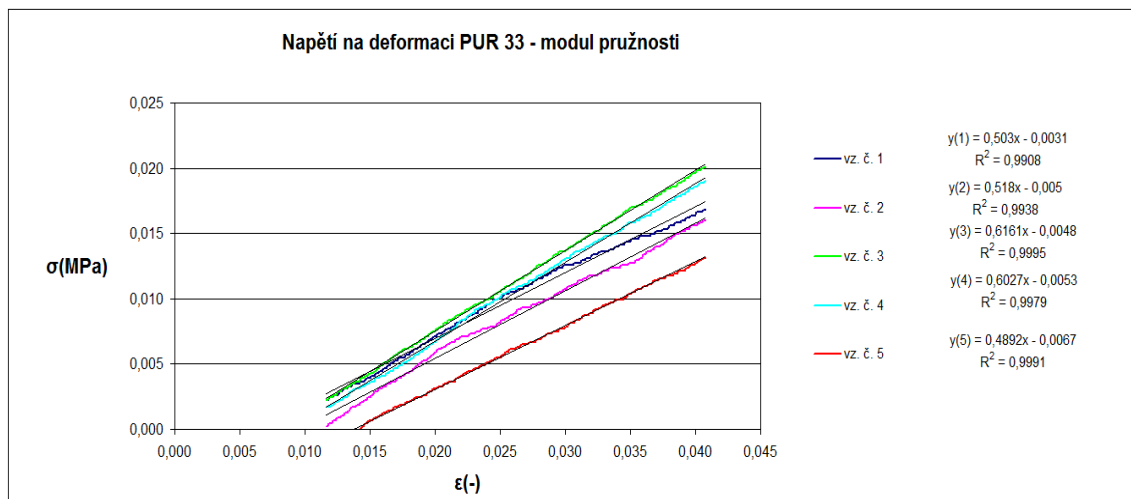
Obr. 98. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 10



Obr. 99. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 10



Obr. 100. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 10

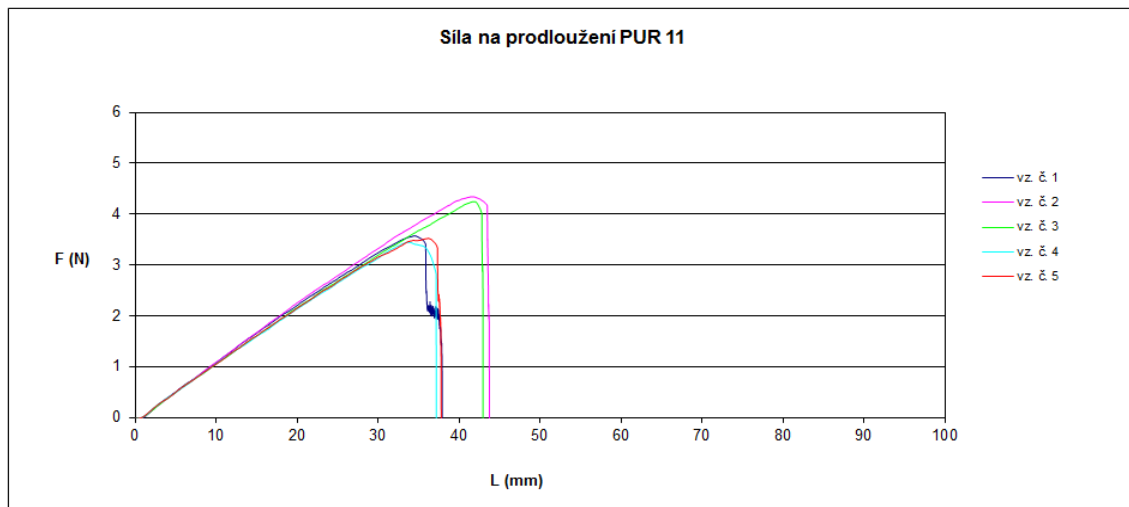


Obr. 101. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 10

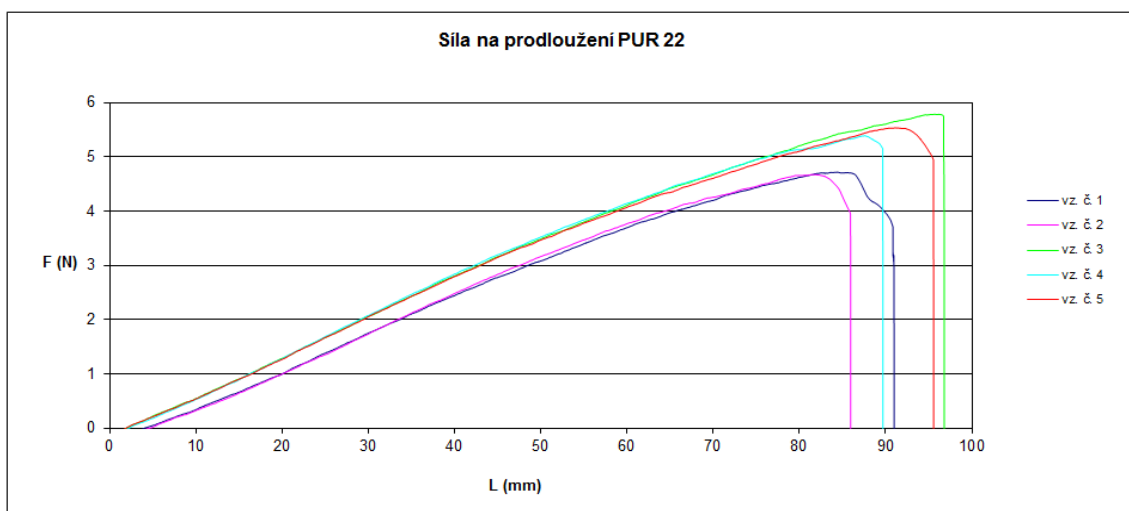
Tab. 13. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 10

<b>Série 10</b>									
	E (MPa)			Fmax (F)			Lmax (mm)		
	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33
vzorek č. 1	0,68	0,42	0,50	4,19	6,18	5,51	35,75	102,46	70,76
vzorek č. 2	0,70	0,37	0,52	5,21	6,37	7,11	43,00	101,48	90,24
vzorek č. 3	0,75	0,28	0,62	5,76	5,98	6,53	47,97	113,36	78,29
vzorek č. 4	0,72	0,39	0,60	5,25	6,08	6,80	44,66	105,35	88,32
vzorek č. 5	0,61	0,38	0,49	5,76	6,12	8,19	52,25	97,08	108,63
průměr	<b>0,69</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>5,23</b>	<b>6,15</b>	<b>6,83</b>	<b>44,72</b>	<b>103,95</b>	<b>87,25</b>
smoch	0,05	0,05	0,05	0,57	0,13	0,87	5,49	5,40	12,80

## Série 11- přeplátování 5mm – lepidlo UHU

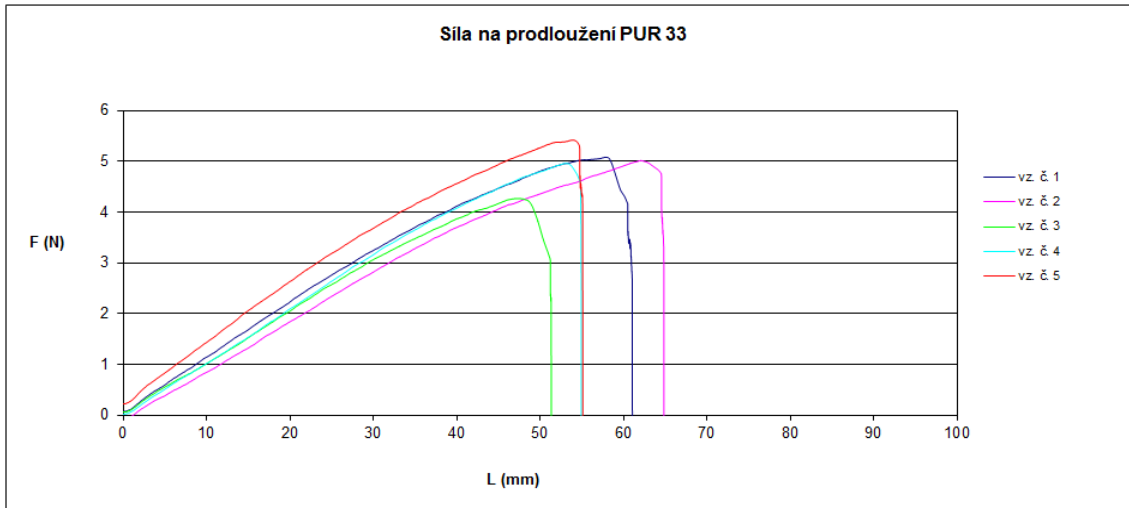


Obr. 102. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 11

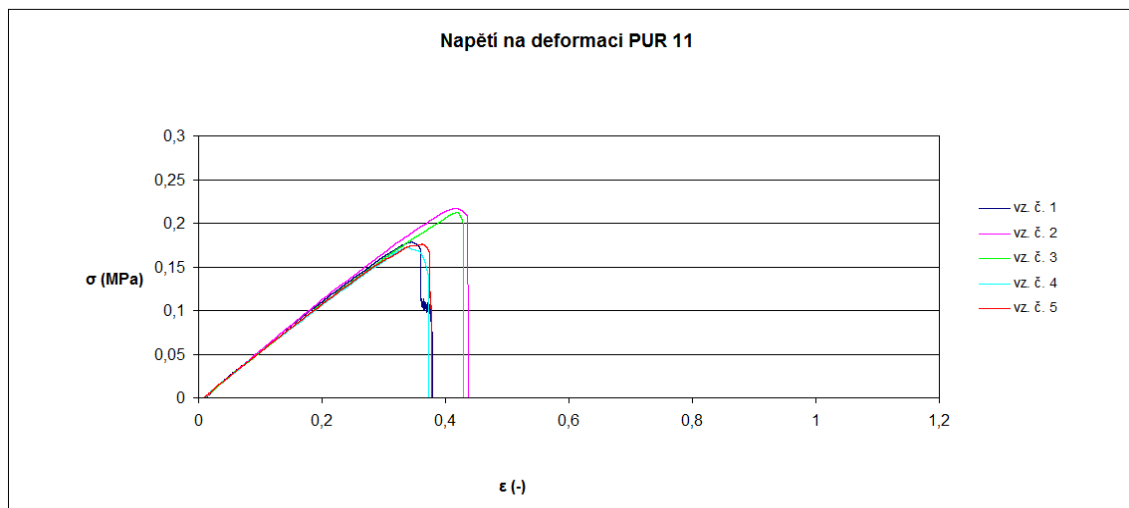


Obr. 103. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 11

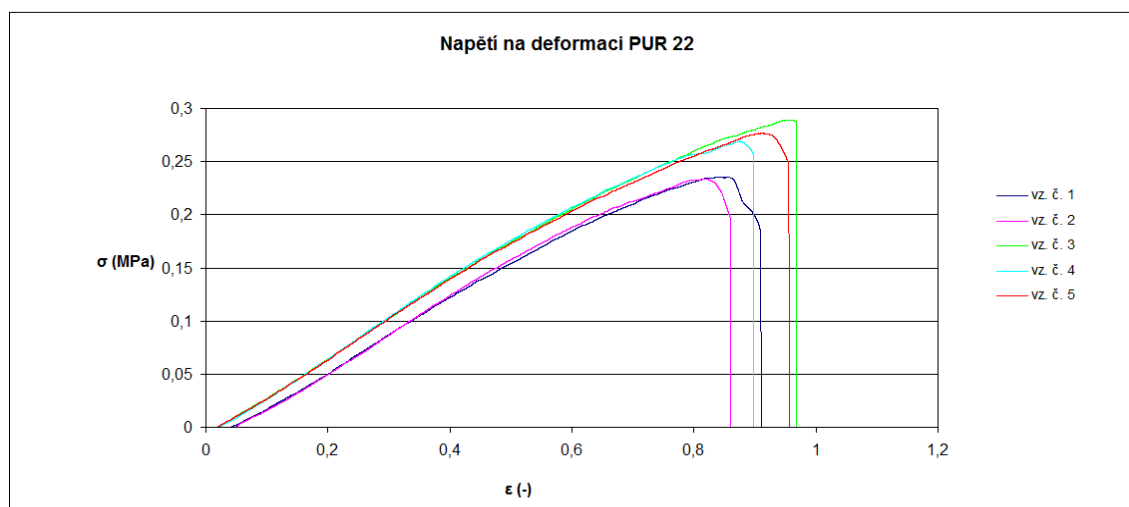




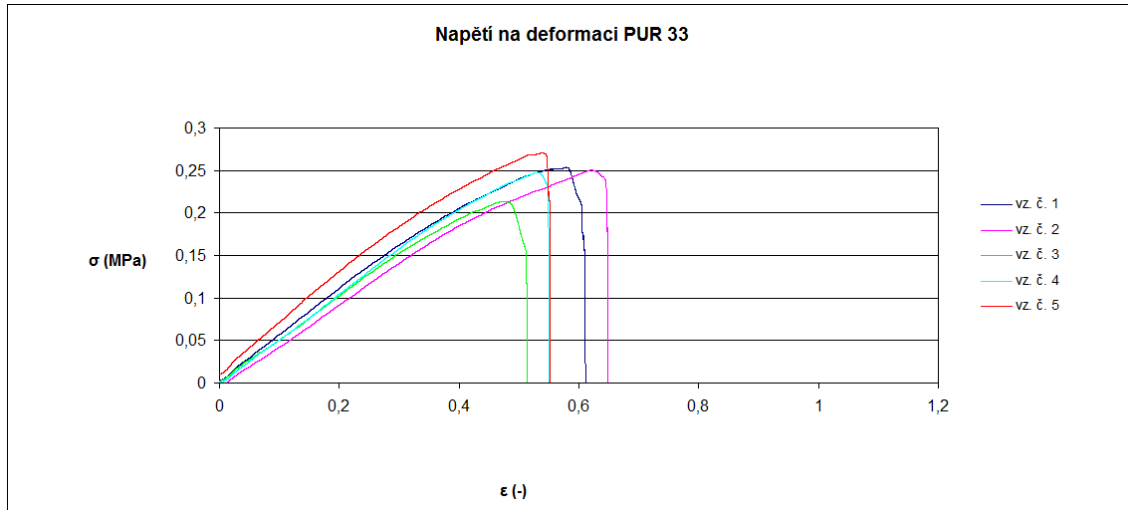
Obr. 104. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 11



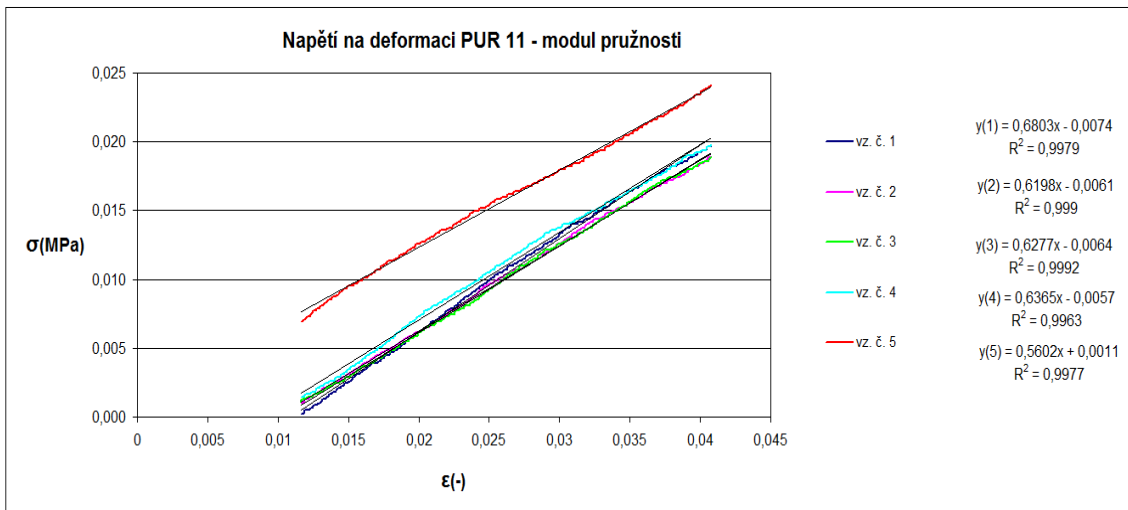
Obr. 105. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 11



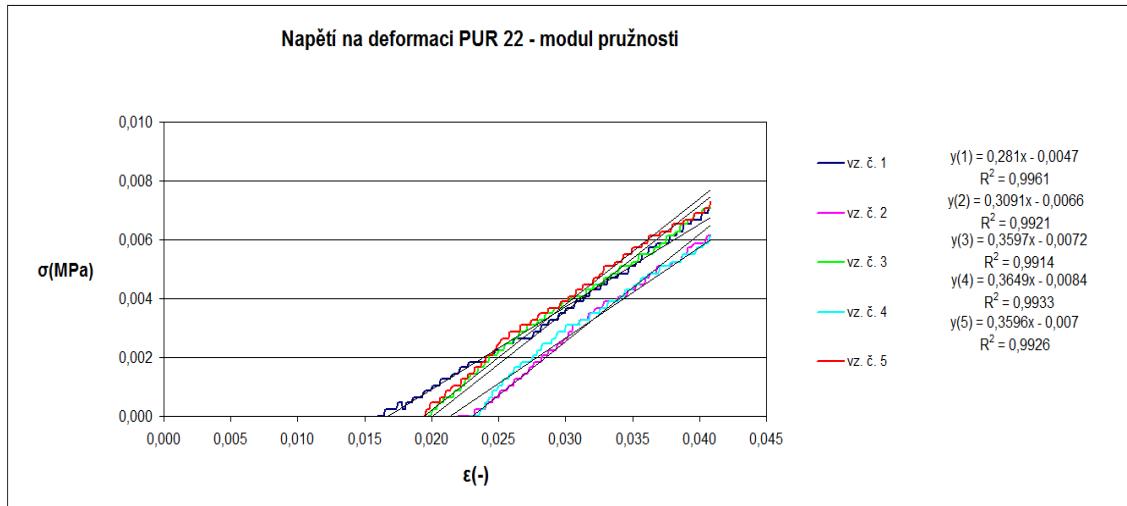
Obr. 106. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 11



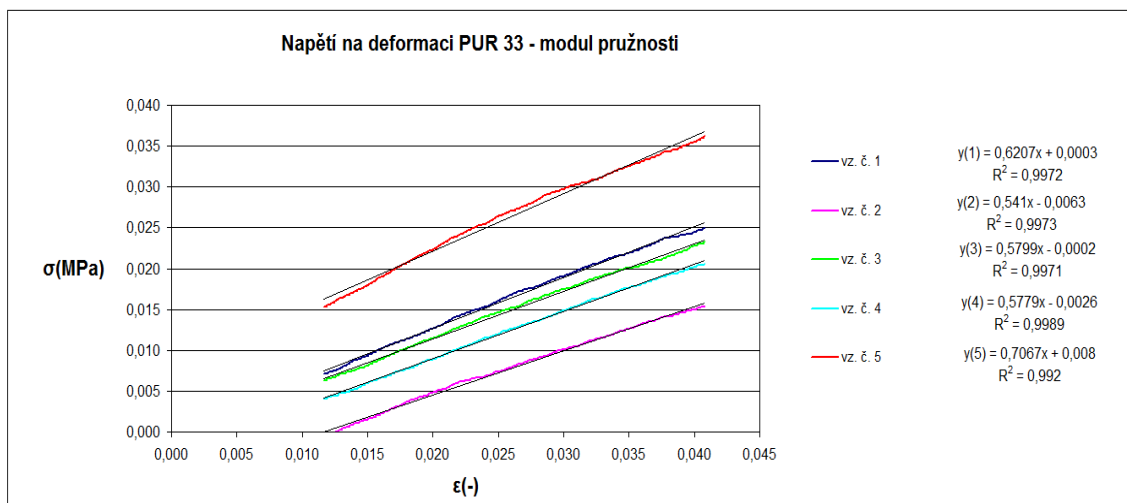
Obr. 107. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 11



Obr. 108. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 11



Obr. 109. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 11



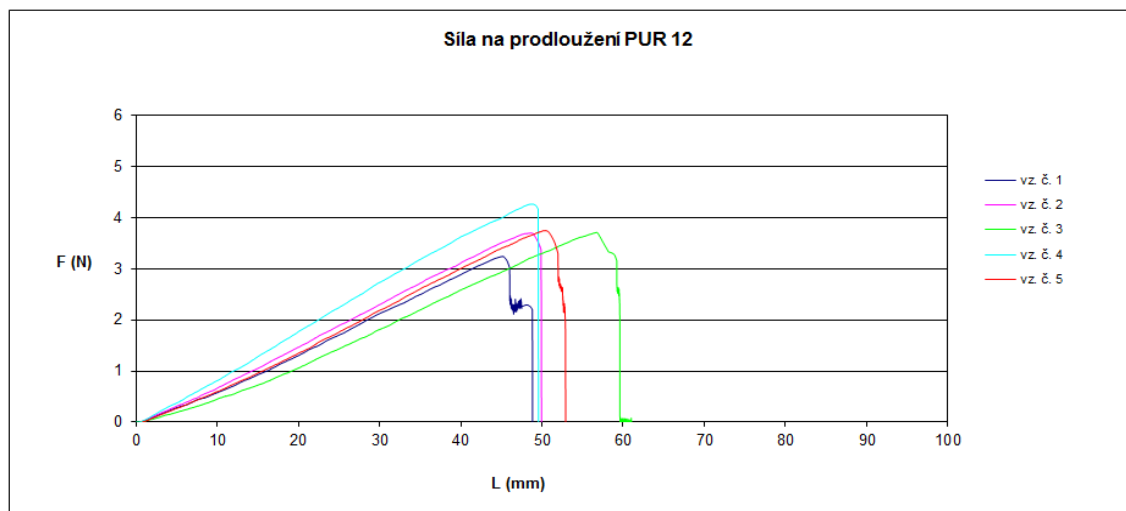
Obr. 110. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 11

Tab. 14. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 11

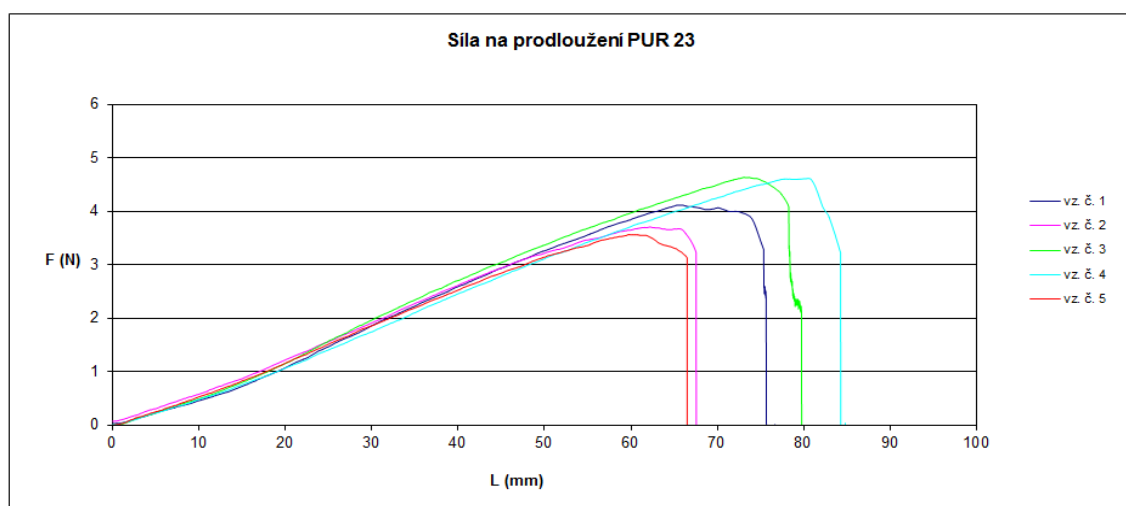
<b>Série 11</b>									
	E (MPa)			Fmax (F)			Lmax (mm)		
	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33
vzorek č. 1	0,68	0,28	0,62	3,57	4,71	5,08	34,67	84,43	57,91
vzorek č. 2	0,62	0,31	0,54	4,34	4,67	5,01	41,74	82,01	62,19
vzorek č. 3	0,63	0,36	0,58	4,24	5,78	4,27	41,96	96,22	47,61
vzorek č. 4	0,64	0,36	0,58	3,44	5,39	4,95	33,91	87,68	53,37
vzorek č. 5	0,56	0,36	0,71	3,52	5,53	5,41	36,31	91,50	54,11
průměr	<b>0,63</b>	<b>0,33</b>	<b>0,61</b>	<b>3,82</b>	<b>5,22</b>	<b>4,94</b>	<b>37,72</b>	<b>88,37</b>	<b>55,04</b>
smoch	0,04	0,03	0,06	0,39	0,45	0,37	3,46	5,06	4,86

### 3.1.3.2 Lepený spoj přeplátovaný – kombinace materiálů

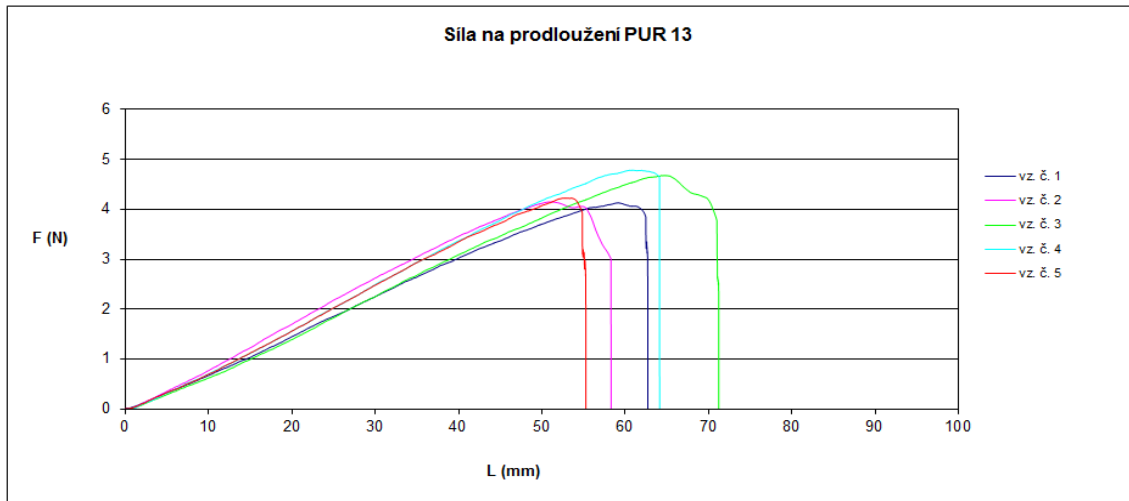
#### Série 6 – kombinace - přeplátování 5mm – lepidlo UHU



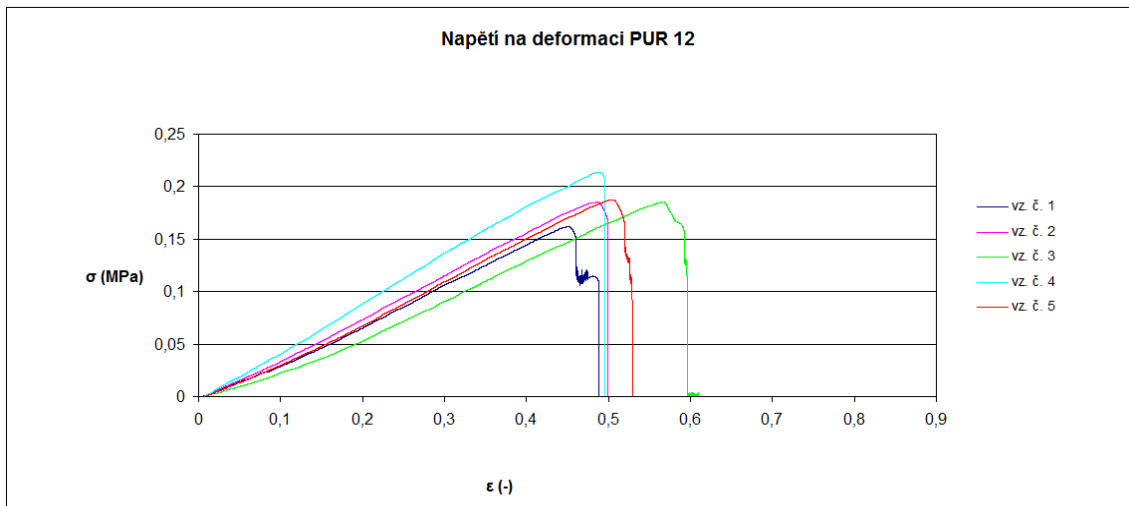
Obr. 111. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 6



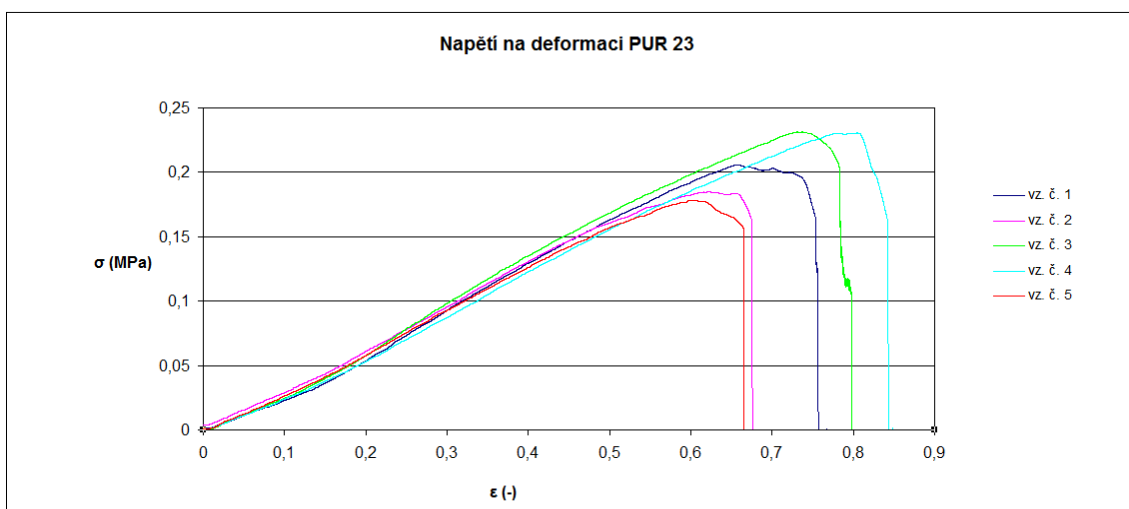
Obr. 112. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 6



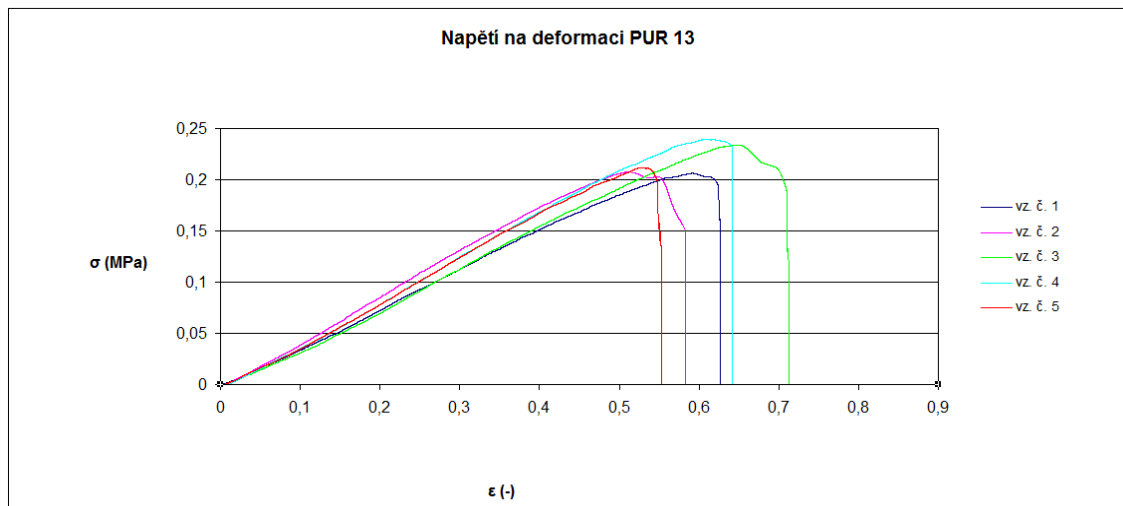
Obr. 113. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 13 – Série 6



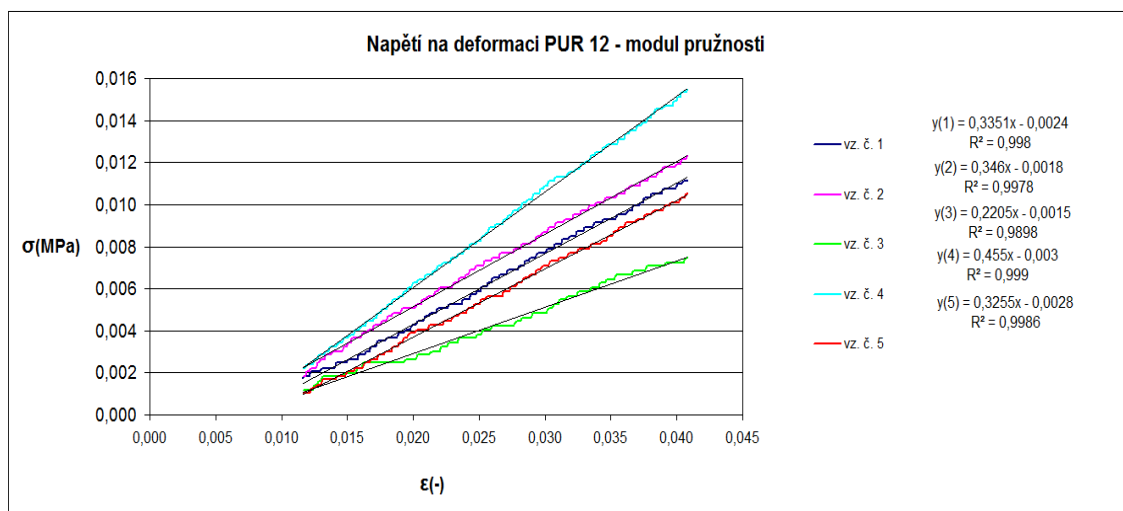
Obr. 114. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 6



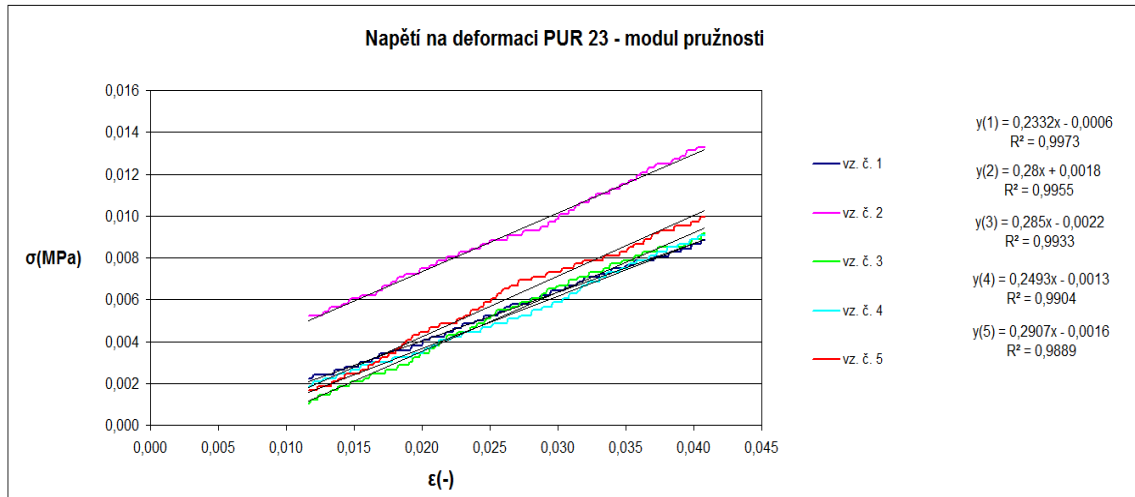
Obr. 115. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 6



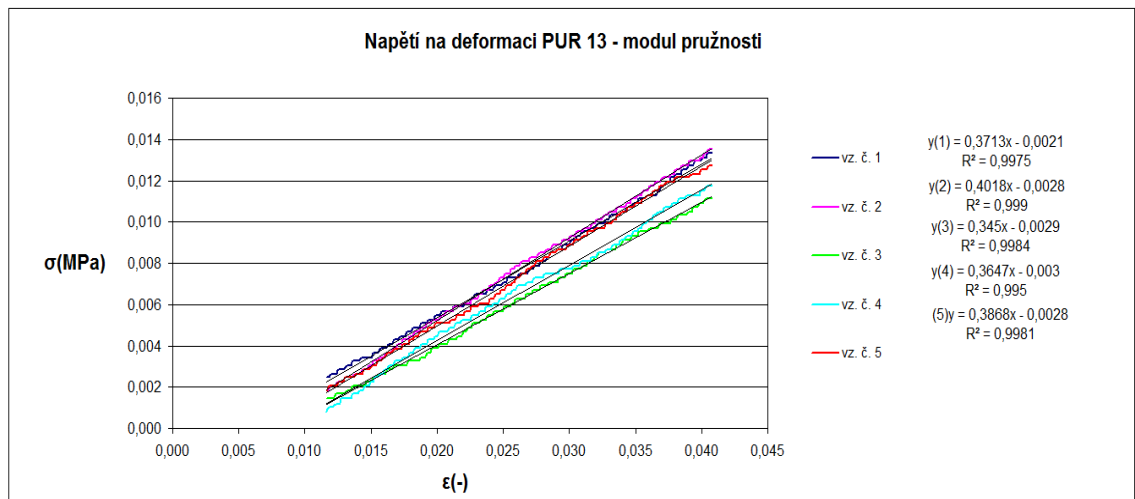
Obr. 116. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 6



Obr. 117. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 6



Obr. 118. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 6

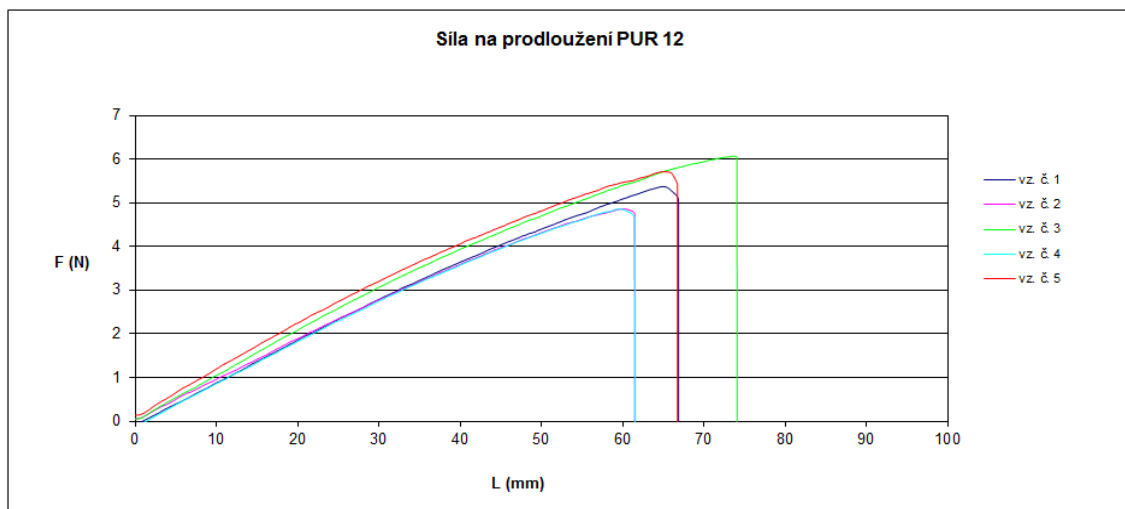


Obr. 119. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13 – Série 6

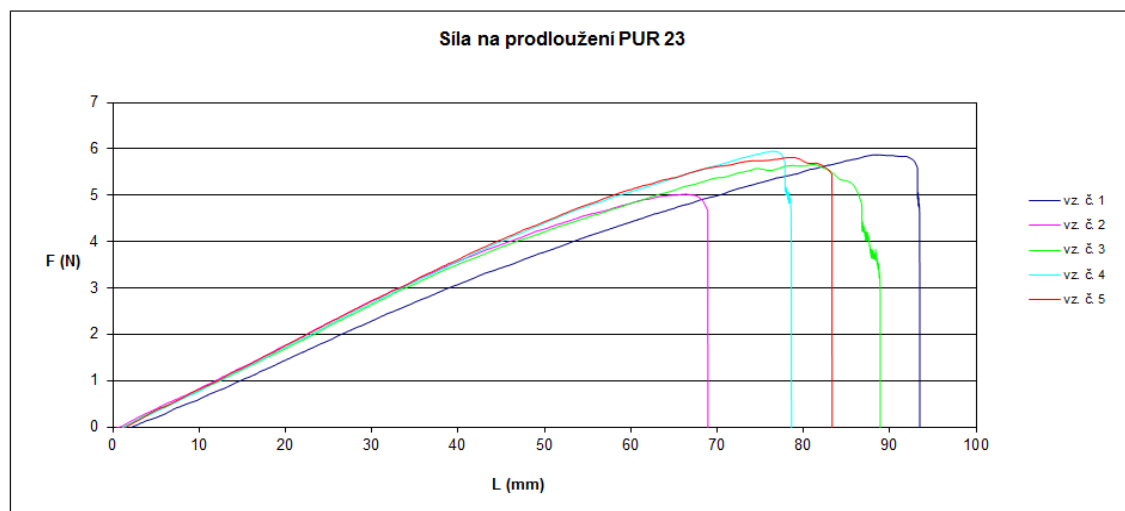
Tab. 15. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 6

<b>Série 6</b>									
	E (MPa)			Fmax (F)			Lmax (mm)		
	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13
vzorek č. 1	0,34	0,23	0,37	3,25	4,11	4,13	45,21	66,09	59,25
vzorek č. 2	0,35	0,28	0,4	3,70	3,70	4,15	48,76	62,35	51,26
vzorek č. 3	0,22	0,29	0,35	3,71	4,63	4,68	56,81	73,71	64,94
vzorek č. 4	0,45	0,25	0,36	4,27	4,61	4,78	48,94	80,48	61,99
vzorek č. 5	0,33	0,29	0,38	3,75	3,56	4,23	50,40	60,49	53,60
průměr	<b>0,34</b>	<b>0,27</b>	<b>0,37</b>	<b>3,74</b>	<b>4,12</b>	<b>4,39</b>	<b>50,03</b>	<b>68,62</b>	<b>58,21</b>
smodch	0,07	0,02	0,02	0,32	0,45	0,28	3,80	7,46	5,10

## Série 12 – kombinace – přeplátování 10mm – UHU

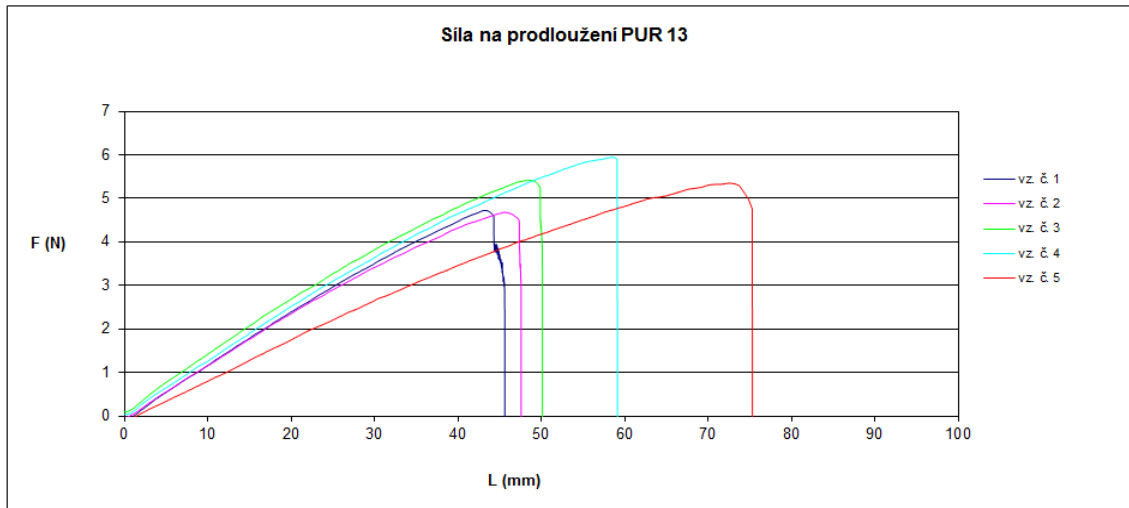


Obr. 120. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 12

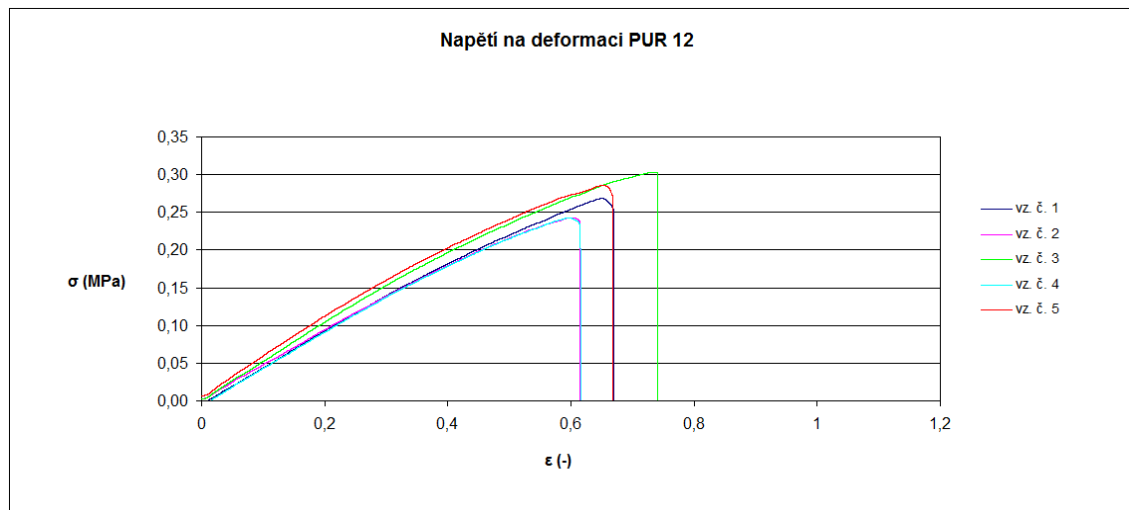


Obr. 121. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 12

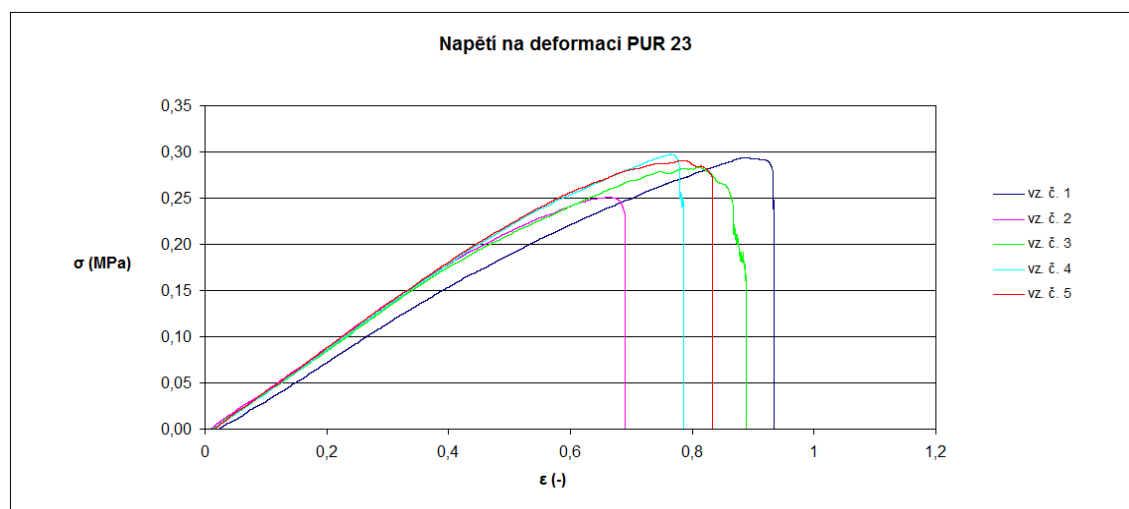




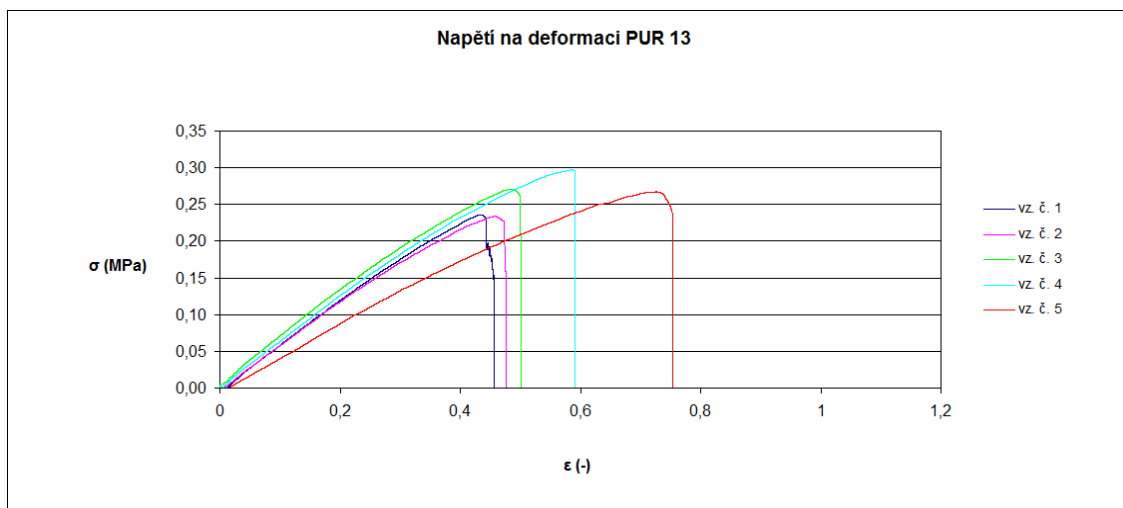
Obr. 122. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 13 – Série 12



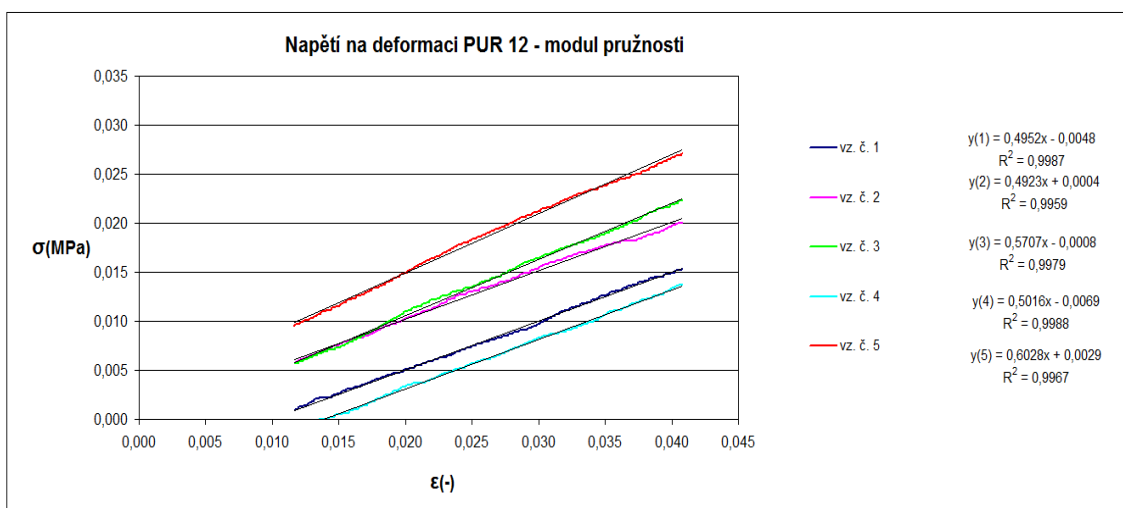
Obr. 123. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 12



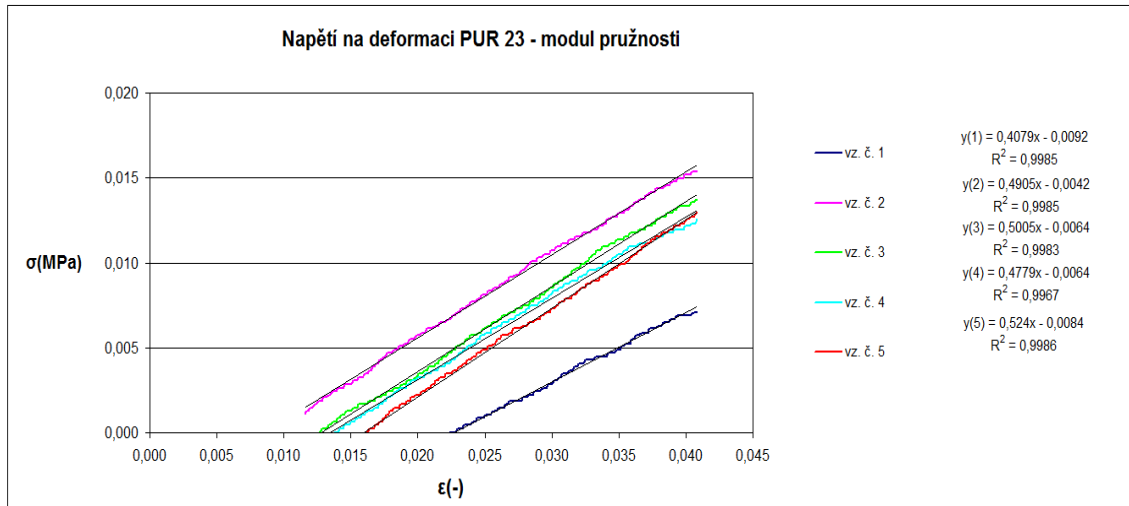
Obr. 124. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 12



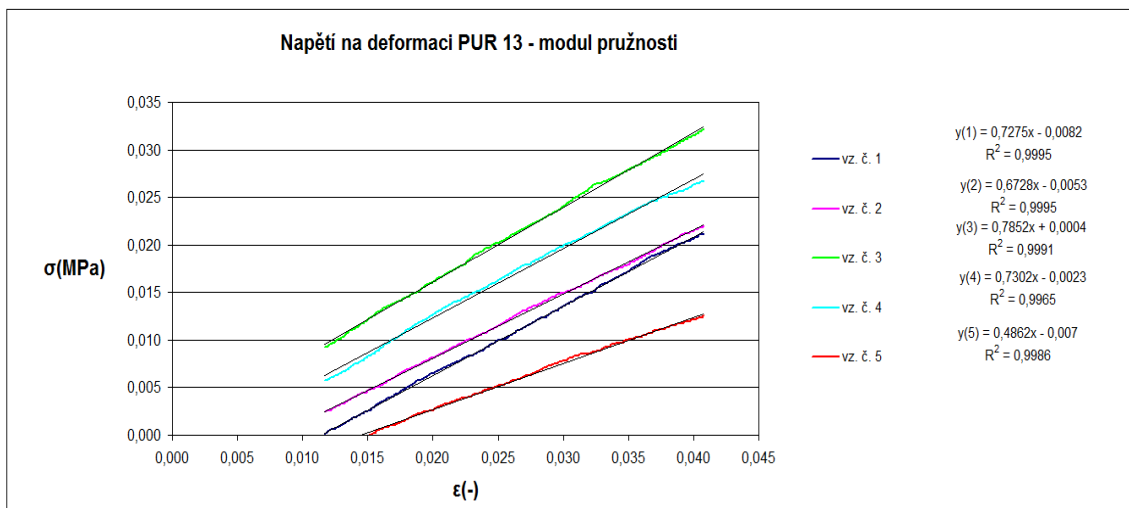
Obr. 125. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 12



Obr. 126. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 12



Obr. 127. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 12

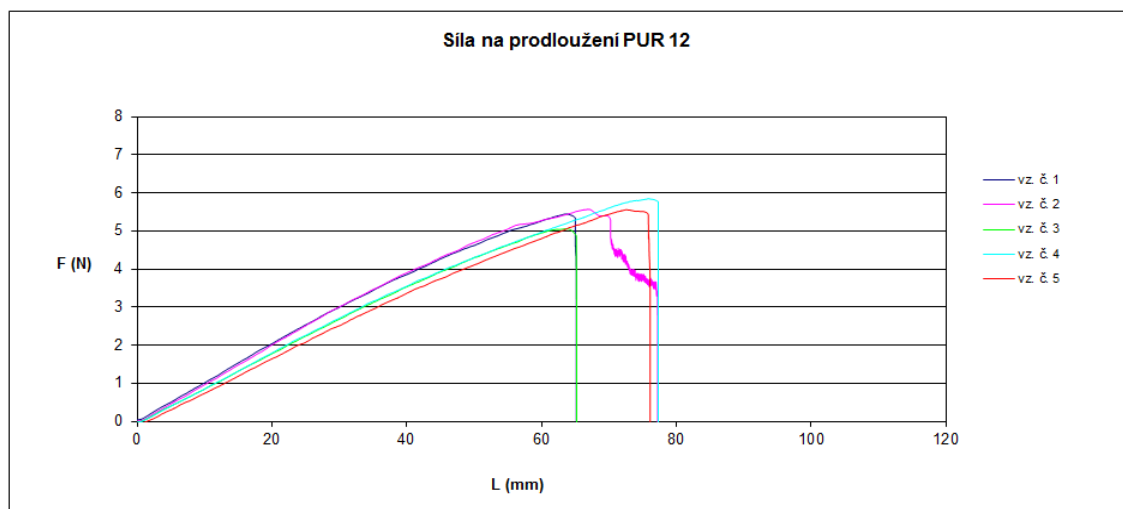


Obr. 128. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13 – Série 12

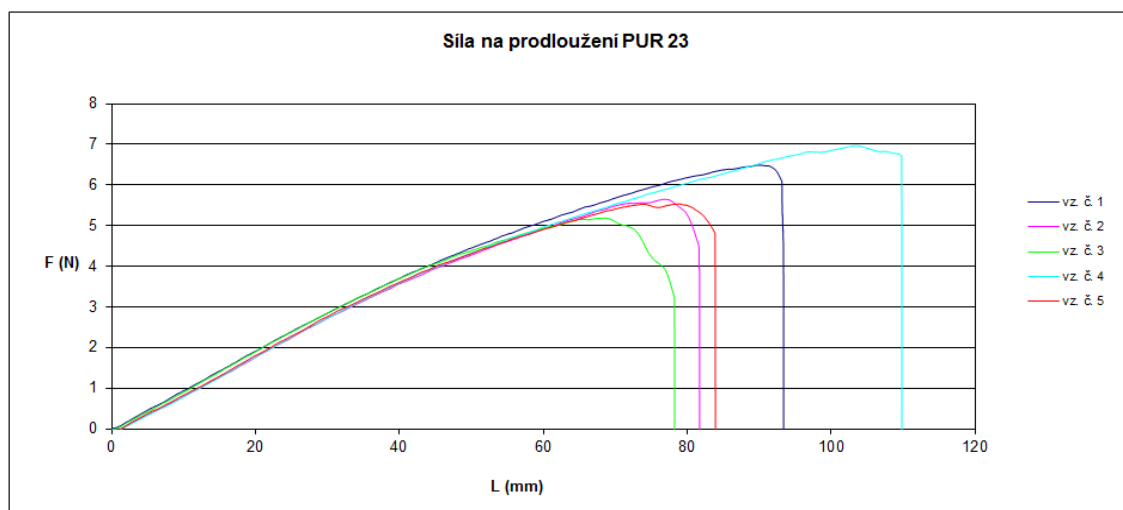
Tab. 16. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 12

Série 12									
	E (MPa)			Fmax (F)			Lmax (mm)		
	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13
vzorek č. 1	0,48	0,41	0,73	5,37	5,87	4,72	64,96	88,71	43,51
vzorek č. 2	0,49	4,90	0,67	4,86	5,02	4,68	60,01	66,46	45,79
vzorek č. 3	0,57	0,50	0,79	6,07	5,66	5,41	73,90	81,14	48,73
vzorek č. 4	0,50	0,48	0,73	4,86	5,95	5,94	59,80	76,46	58,69
vzorek č. 5	0,60	0,52	0,49	5,71	5,82	5,35	65,31	78,71	72,76
průměr	<b>0,53</b>	<b>1,36</b>	<b>0,68</b>	<b>5,37</b>	<b>5,66</b>	<b>5,22</b>	<b>64,79</b>	<b>78,30</b>	<b>53,90</b>
smodch	0,05	1,77	0,10	0,47	0,33	0,47	5,12	7,22	10,76

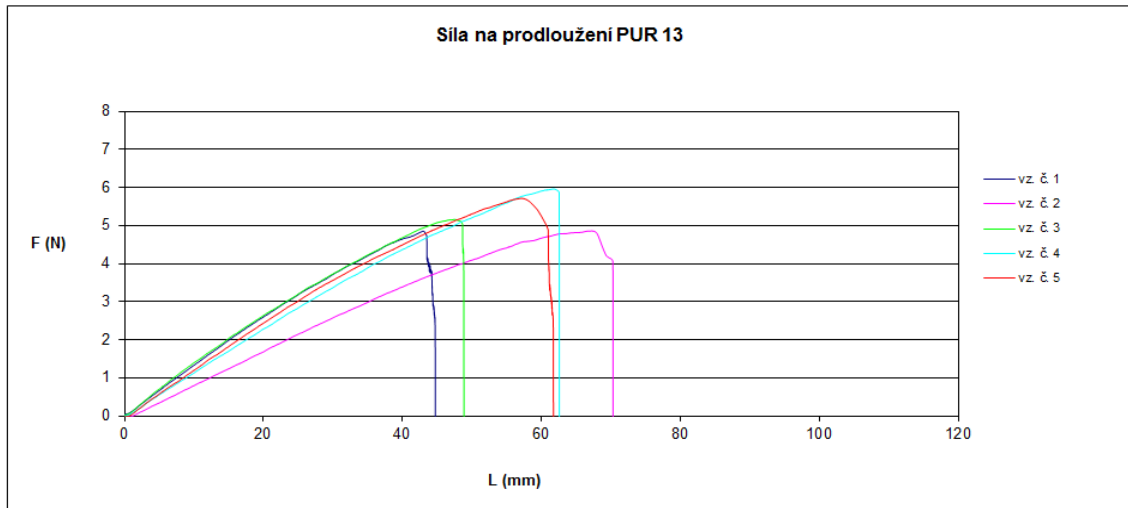
## Série 13 – kombinace – přeplátování 10mm – Pattex



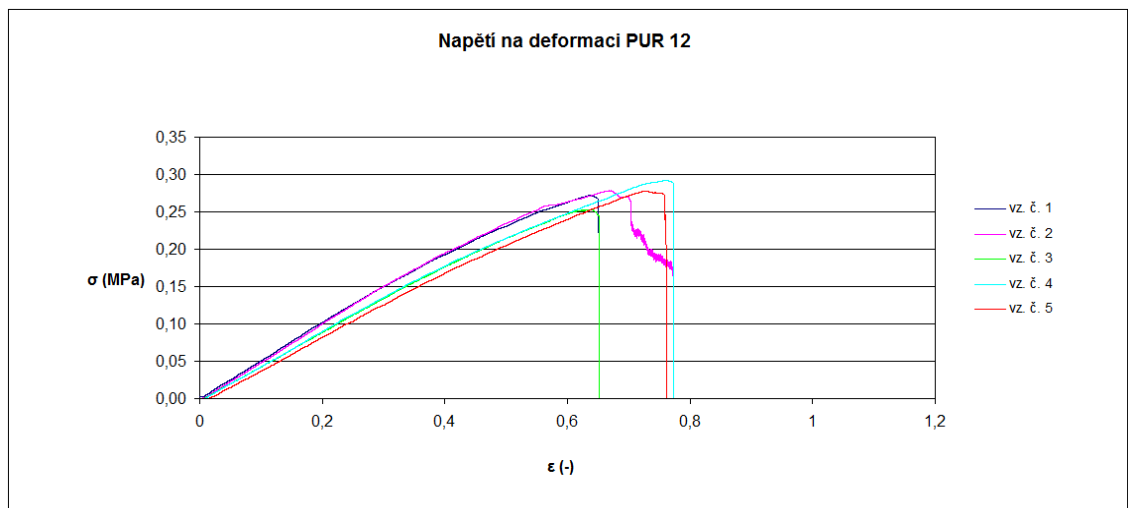
Obr. 129. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 13



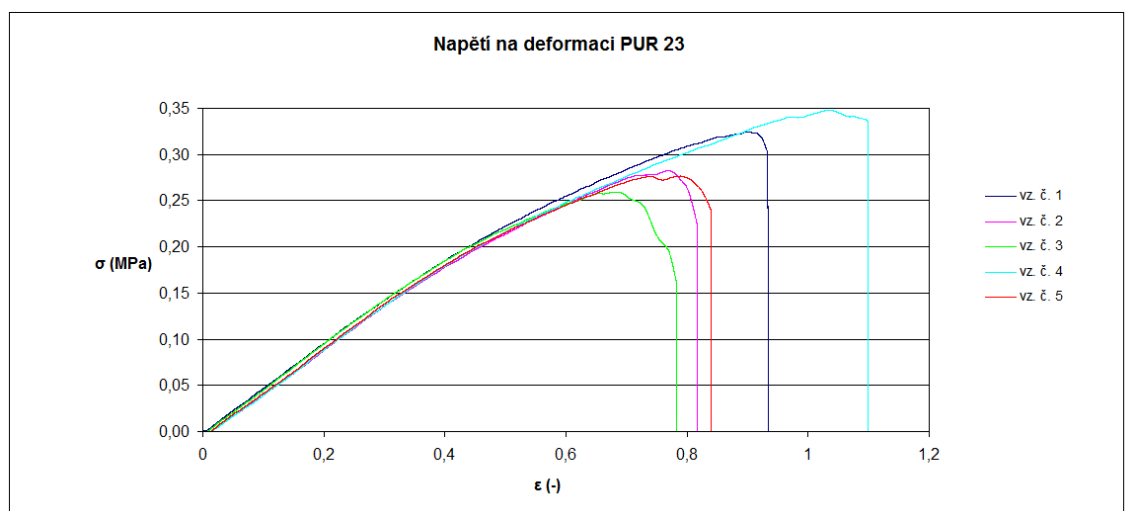
Obr. 130. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 13



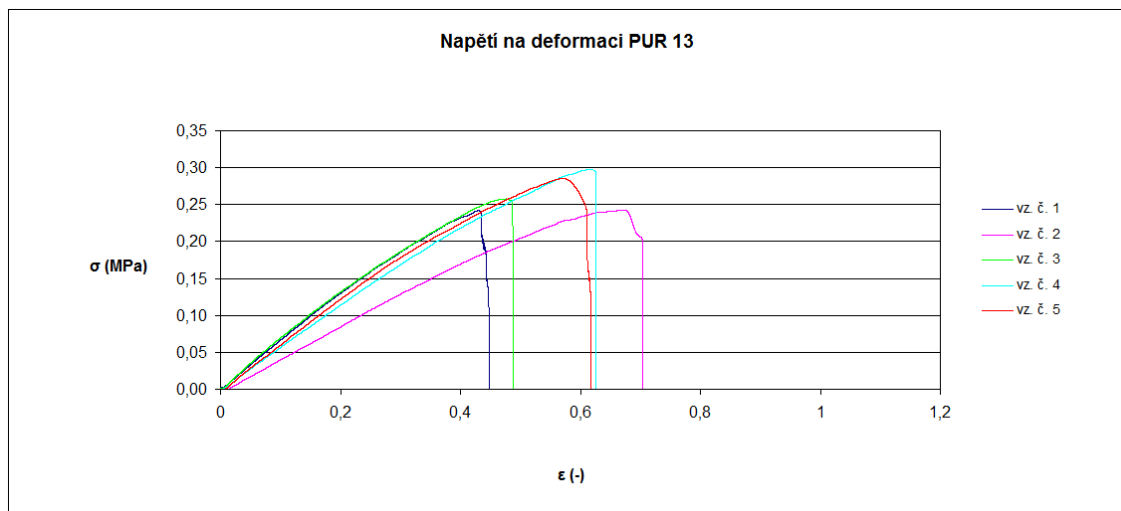
Obr. 131. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 13 – Série 13



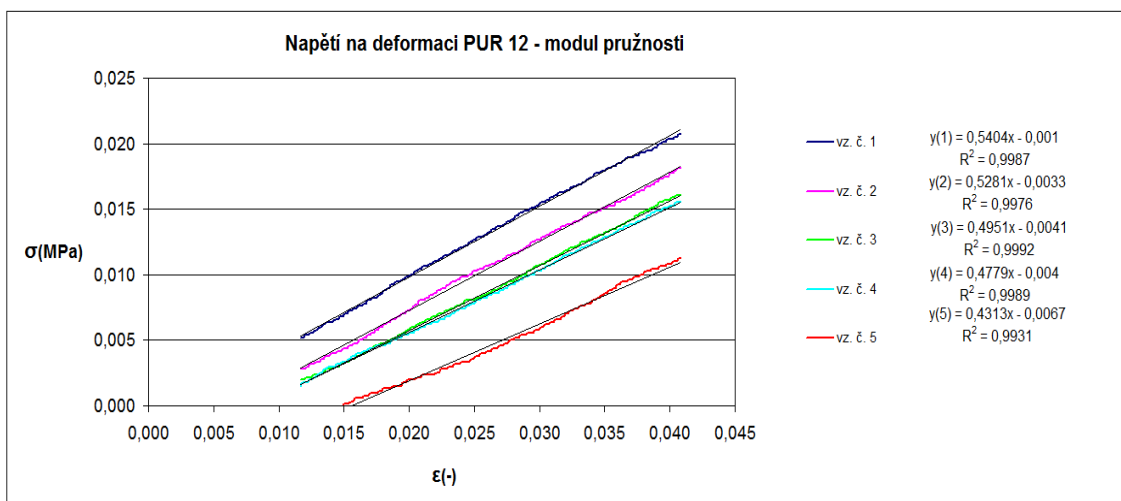
Obr. 132. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 13



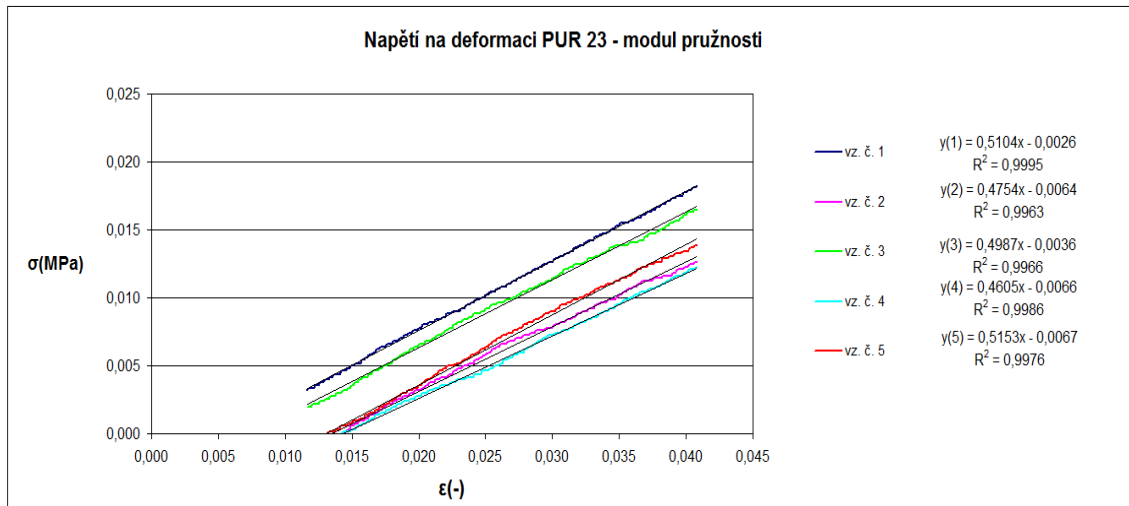
Obr. 133. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 13



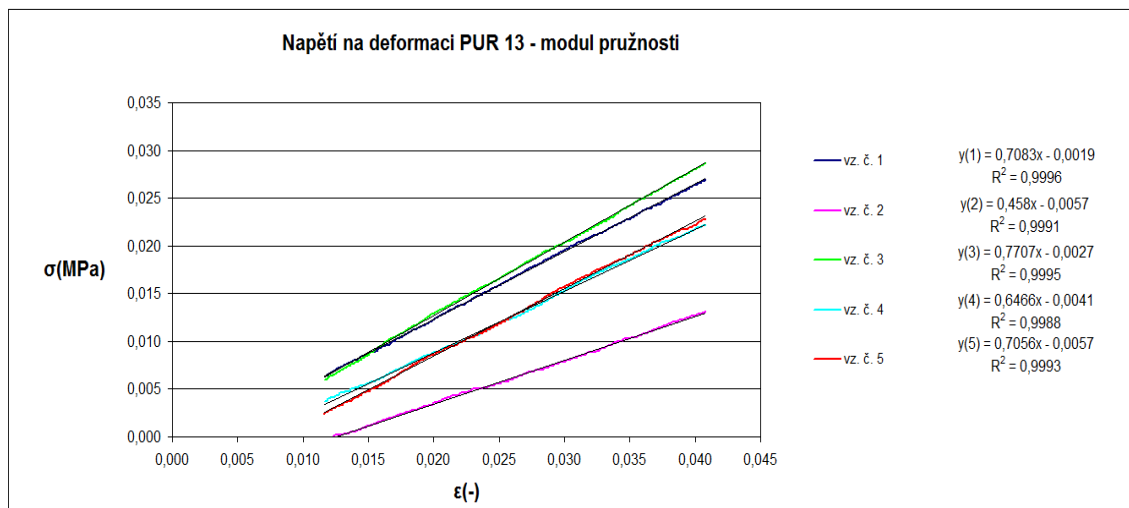
Obr. 134. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 13



Obr. 135. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 13



Obr. 136. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 13

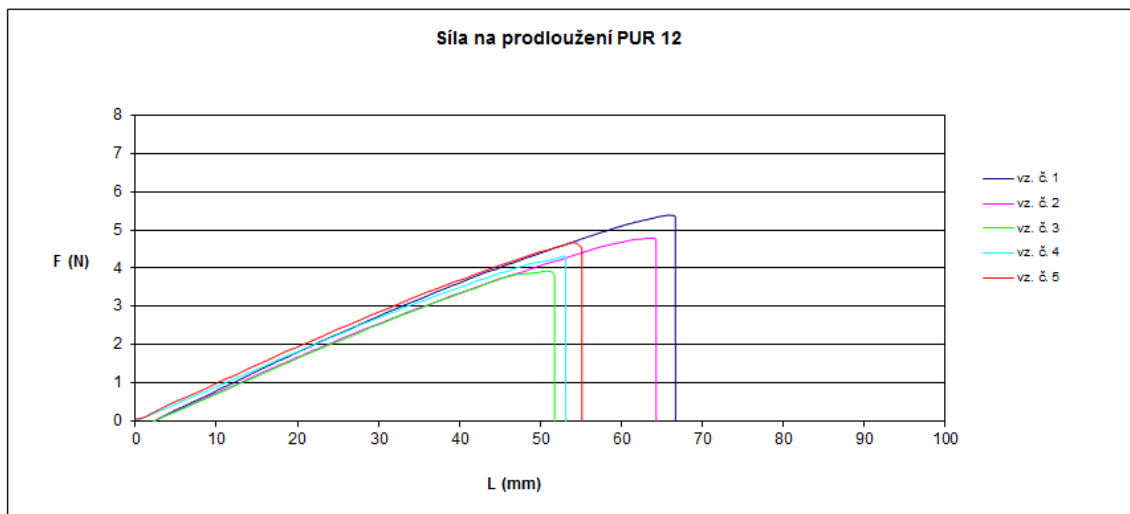


Obr. 137. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13 – Série 13

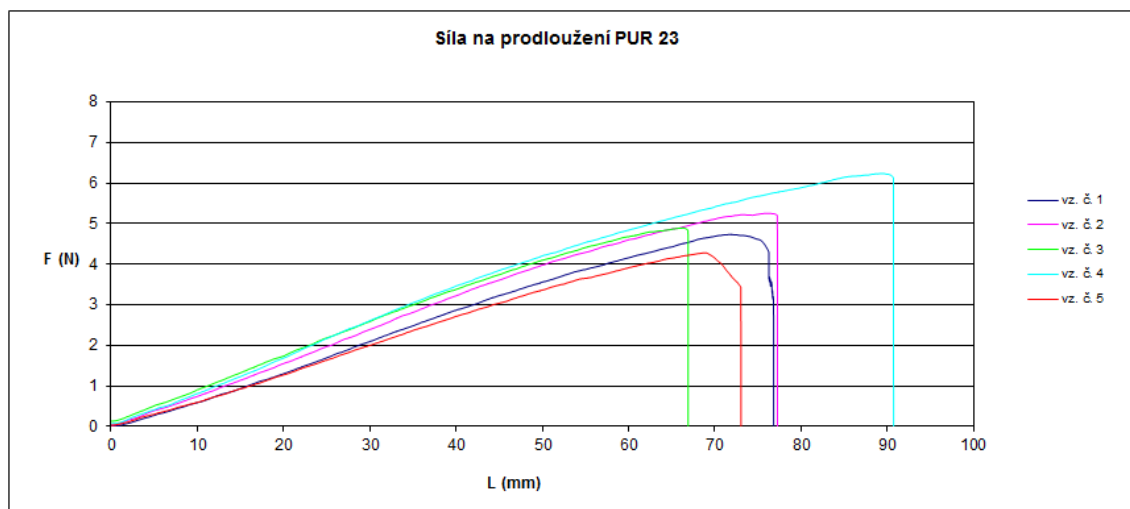
Tab. 17. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 13

Série 13									
	E (MPa)			Fmax (F)			Lmax (mm)		
	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13
vzorek č. 1	0,54	0,51	0,71	5,44	6,49	4,85	63,92	90,11	43,07
vzorek č. 2	0,53	0,48	0,46	5,57	5,65	4,86	67,10	77,01	67,34
vzorek č. 3	0,50	0,50	0,77	5,06	5,18	5,16	63,42	68,71	47,63
vzorek č. 4	0,48	0,46	0,65	5,84	6,97	5,96	76,18	103,65	61,84
vzorek č. 5	0,43	0,52	0,71	5,55	5,54	5,71	72,80	78,91	57,26
průměr	<b>0,50</b>	<b>0,49</b>	<b>0,66</b>	<b>5,49</b>	<b>5,97</b>	<b>5,31</b>	<b>68,68</b>	<b>83,68</b>	<b>55,43</b>
smodch	0,04	0,02	0,11	0,25	0,66	0,45	5,02	12,09	8,94

## Série 14 – kombinace – přeplátování 5mm – Pattex

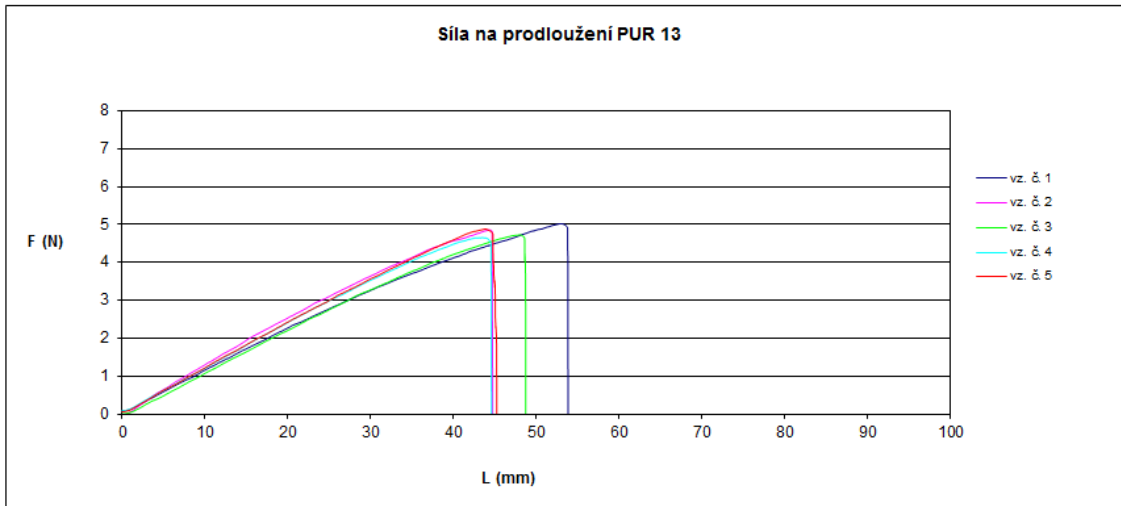


Obr. 138. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 14

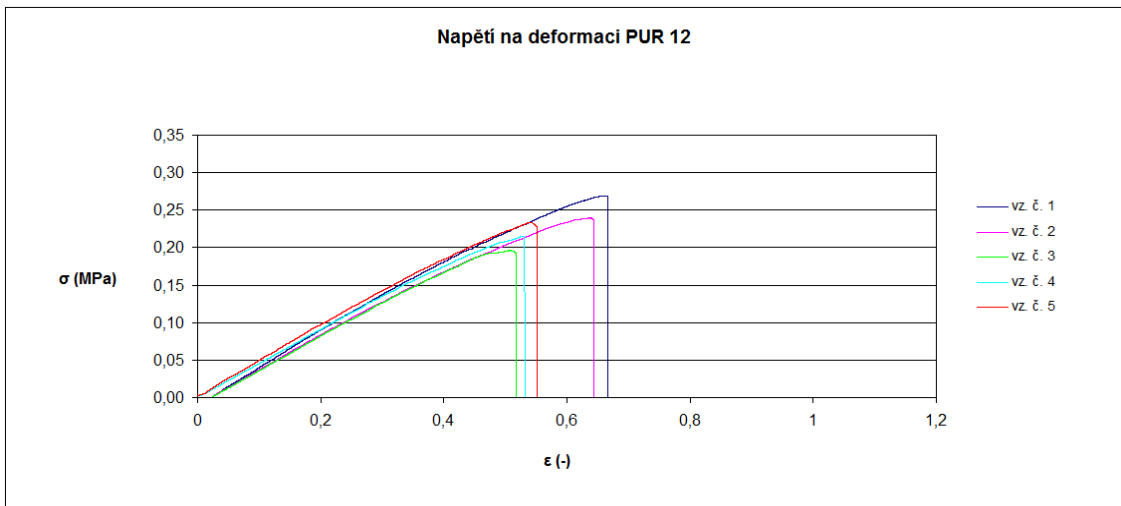


Obr. 139. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 14

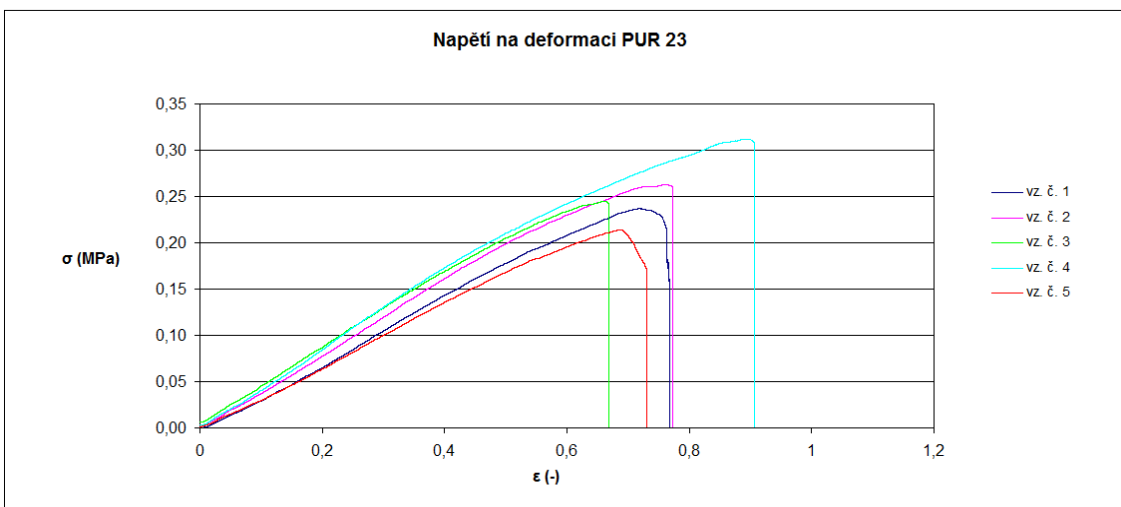




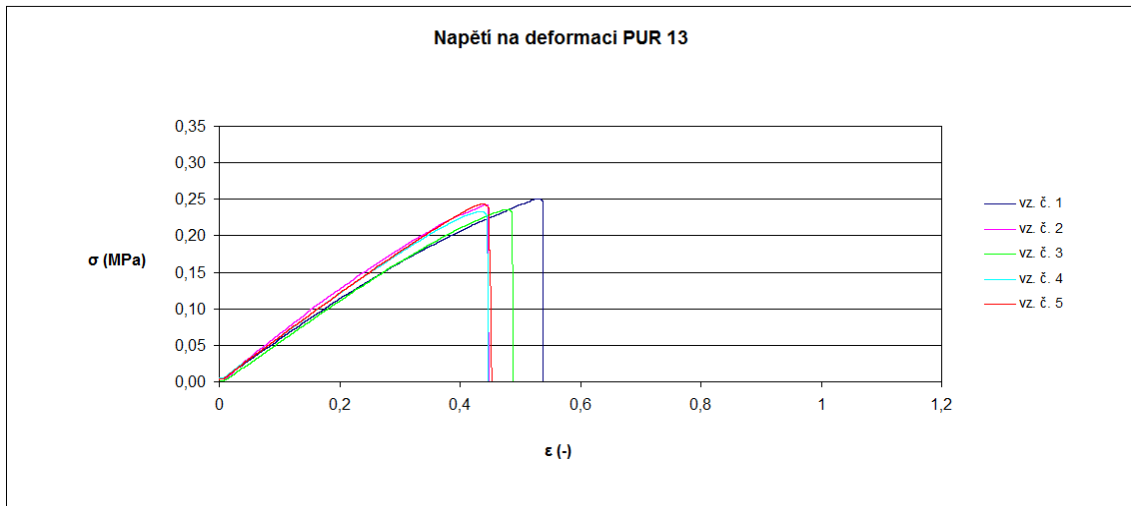
Obr. 140. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 13 – Série 14



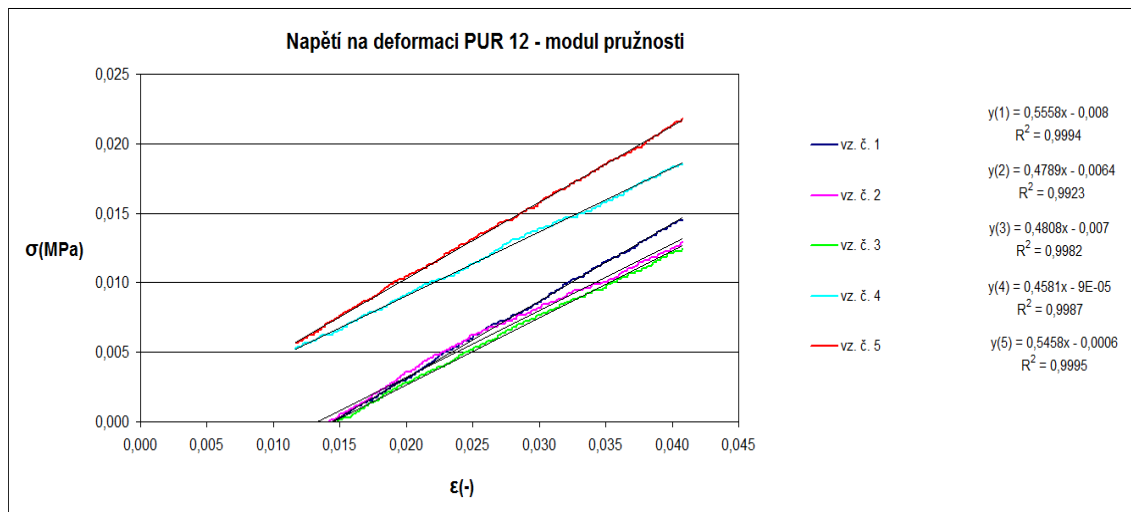
Obr. 141. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 14



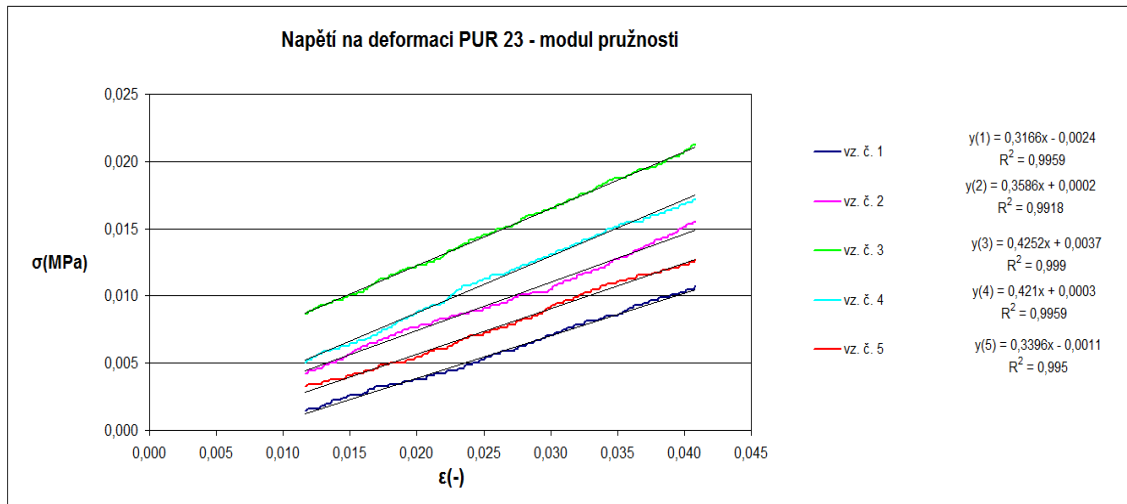
Obr. 142. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 14



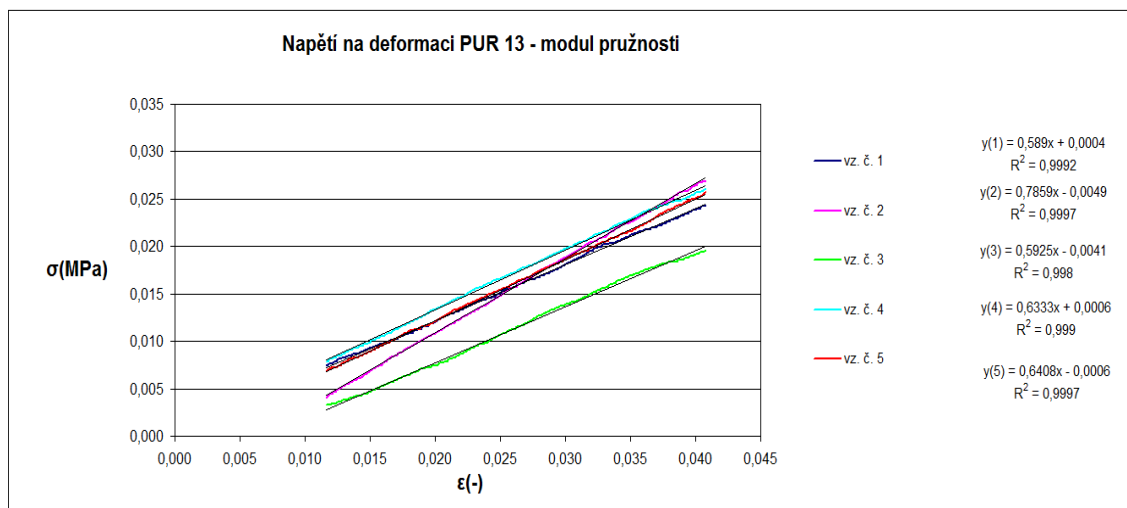
Obr. 143. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 14



Obr. 144. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 14



Obr. 145. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 14



Obr. 146. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13 – Série 14

Tab. 18. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 14

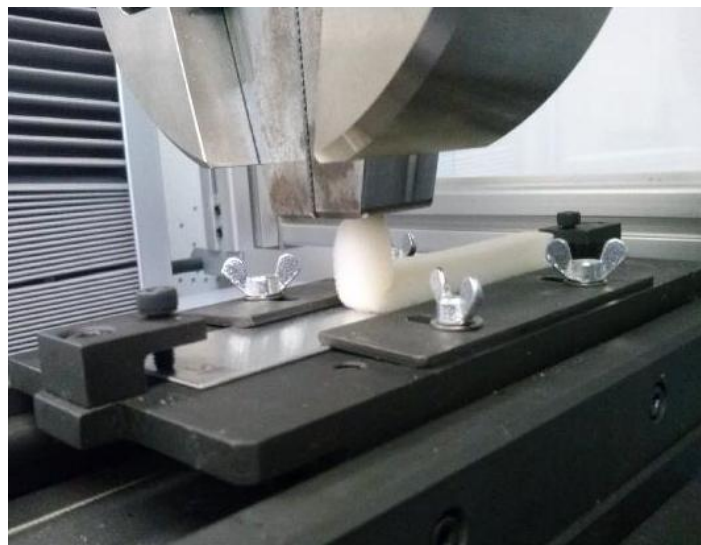
Série 14									
	E (MPa)			Fmax (F)			Lmax (mm)		
	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13
vzorek č. 1	0,56	0,32	0,59	5,38	4,73	5,02	66,31	72,15	53,05
vzorek č. 2	0,48	0,36	0,79	4,79	5,25	4,86	64,01	76,41	44,46
vzorek č. 3	0,48	0,43	0,59	3,93	4,90	4,73	50,86	66,46	48,14
vzorek č. 4	0,46	0,42	0,63	4,31	6,24	4,65	53,09	89,46	43,61
vzorek č. 5	0,55	0,34	0,64	4,67	4,28	4,88	54,16	69,00	43,83
průměr	<b>0,51</b>	<b>0,37</b>	<b>0,65</b>	<b>4,61</b>	<b>5,08</b>	<b>4,83</b>	<b>57,69</b>	<b>74,70</b>	<b>46,62</b>
smodch	0,04	0,04	0,07	0,49	0,66	0,13	6,24	8,10	3,61

### 3.1.4 Peel-test

Pro měření peel-testu na trhacím stroji je potřeba vyměnit pevnou čelist za speciální přípravek. Díky přípravku je odlepovaný spoj stále kolmo pod pohyblivou čelistí a úhel odlepování je stále 90°.



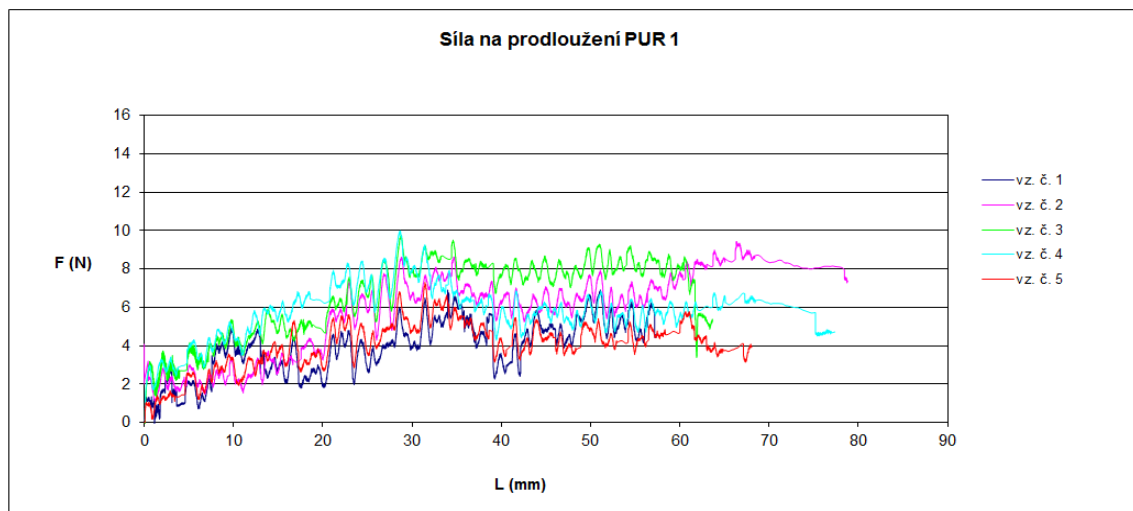
Obr. 147. Přípravek pro měření peel-testu



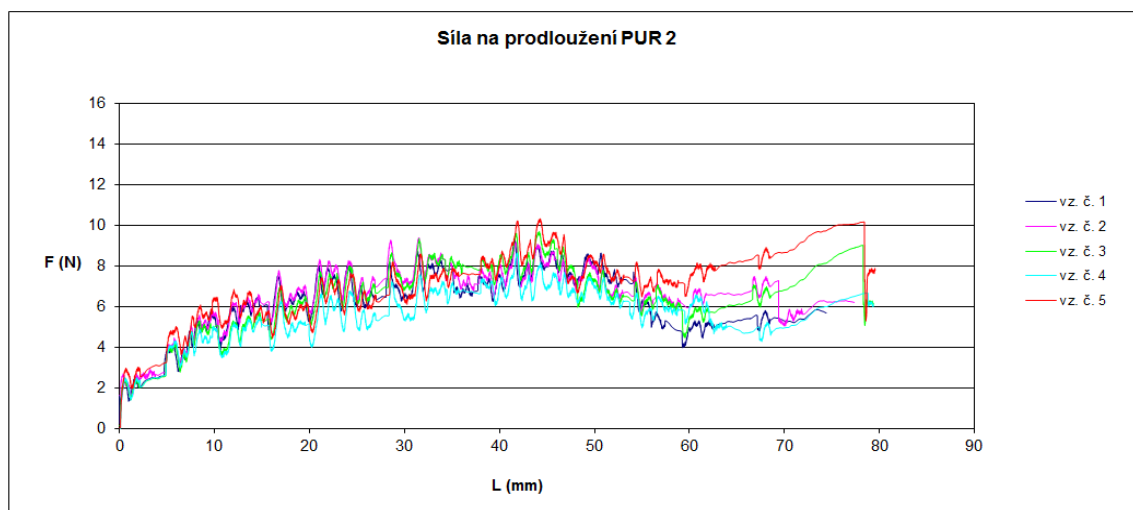
Obr. 148. Způsob uchycení vzorku

Pro požadavek dalšího výzkumu byla pro peel-test vybrána nejmenší možná lepená plocha, která se nachází uvnitř konstrukce ultra-lehkého letadla. Tato plocha byla stanovena na 10 mm x 100 mm, což odpovídá 1000 mm<sup>2</sup>. Všechny další kontaktní plochy byly větší než uvedených 1000 mm<sup>2</sup> a lze u nich předpokládat větší lepicí plochu a tudíž vyšší pevnost v odtržení.

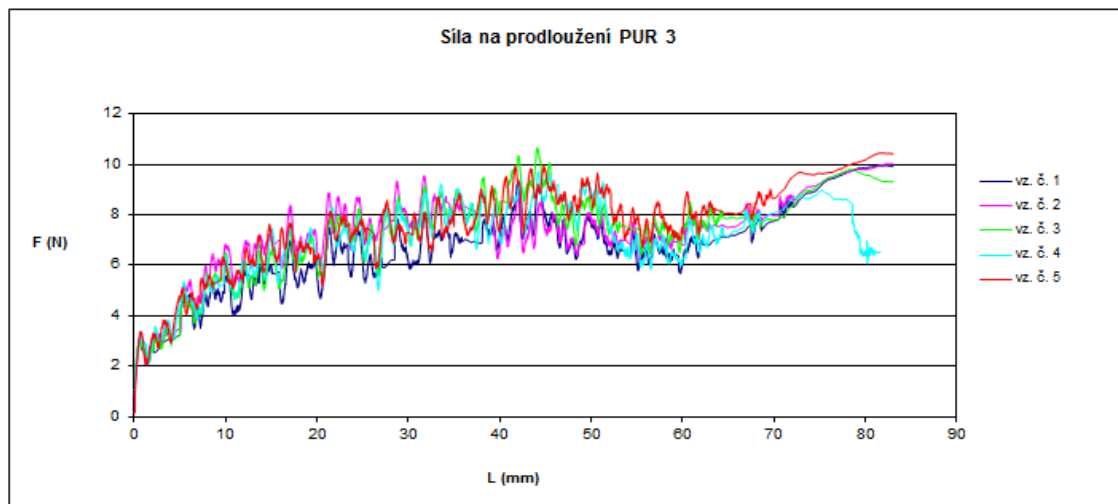
## Série 15 – Peel-test – Pattex



Obr. 149. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 1– Série 15



Obr. 150. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 2 – Série 15

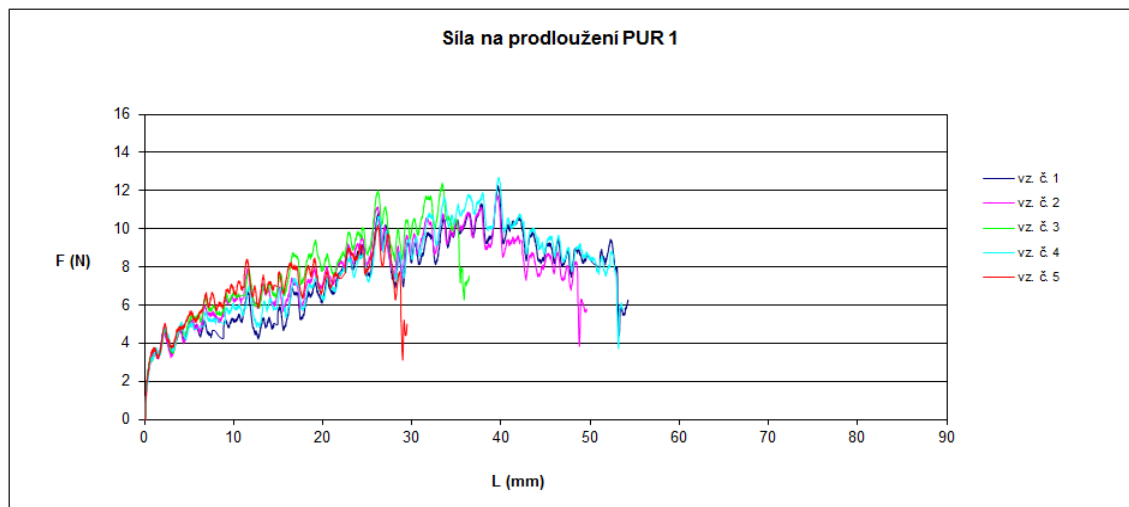


Obr. 151. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 3 – Série 15

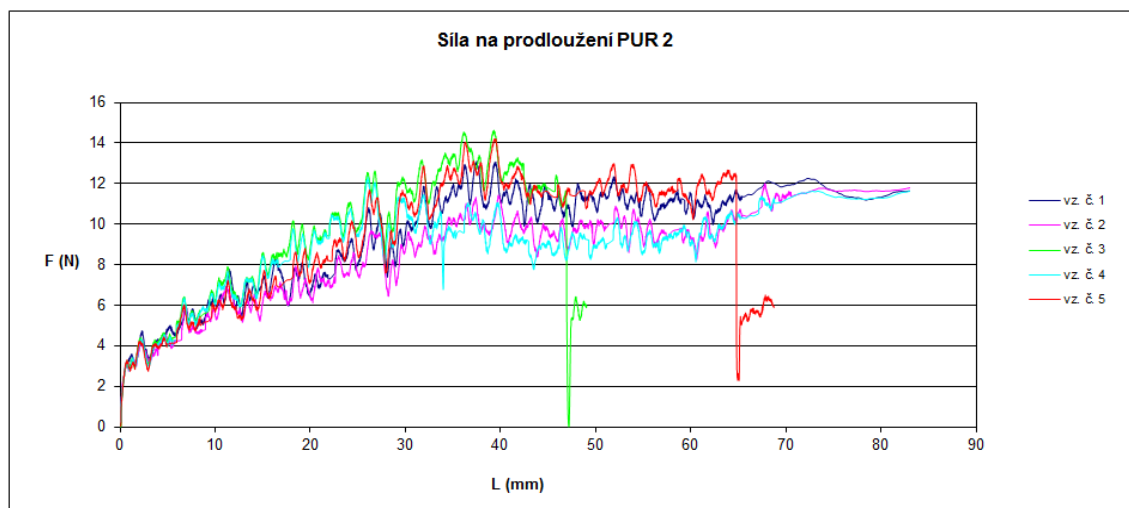
Tab. 19. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 15. Naměřené hodnoty z oblasti protažení od 20 mm do 50 mm.

<b>Série 15</b>					
PUR 1					
	vzorek č. 1	vzorek č. 2	vzorek č. 3	vzorek č. 4	vzorek č. 5
průměr	4,46	6,48	7,69	6,61	4,72
SMODCH	1,04	0,86	0,95	1,15	0,85
MAX	6,85	8,63	9,76	10,00	7,30
MIN	1,80	3,24	4,66	4,28	2,68
PUR 2					
	vzorek č. 1	vzorek č. 2	vzorek č. 3	vzorek č. 4	vzorek č. 5
průměr	7,35	7,63	7,65	6,46	7,57
SMODCH	0,75	0,65	0,85	0,81	1,09
MAX	9,32	9,39	9,70	8,65	10,33
MIN	5,26	5,65	5,09	3,99	4,71
PUR 3					
	vzorek č. 1	vzorek č. 2	vzorek č. 3	vzorek č. 4	vzorek č. 5
průměr	6,98	7,74	8,09	7,90	8,00
SMODCH	0,80	0,67	0,97	0,88	0,90
MAX	9,25	9,55	10,67	9,71	9,93
MIN	4,66	5,96	5,52	5,00	5,18

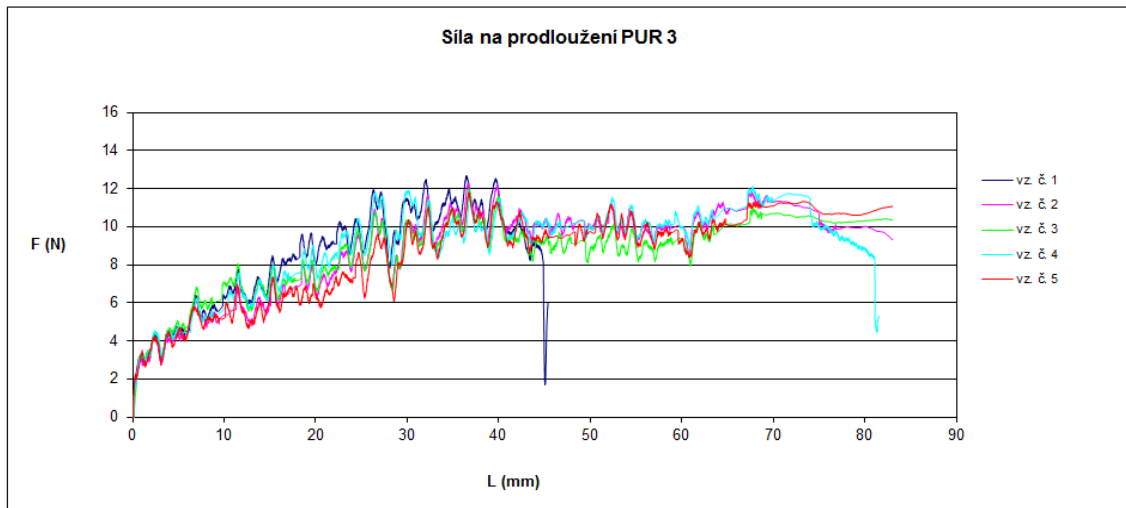
## Série 16 – Peel-test – UHU



Obr. 152. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 1 – Série 16



Obr. 153. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 2 – Série 16



Obr. 154. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 3 – Série 16

Tab. 20. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 16. Naměřené hodnoty z oblasti protažení od 20 mm do 50 mm.

Série 16					
PUR 1					
	vzorek č. 1	vzorek č. 2	vzorek č. 3	vzorek č. 4	vzorek č. 5
průměr	9,03	8,92	9,69	9,35	7,91
SMODCH	1,10	1,22	1,28	1,32	1,30
MAX	12,27	11,73	12,41	12,70	10,19
MIN	6,43	6,76	6,25	6,29	3,11
PUR 2					
	vzorek č. 1	vzorek č. 2	vzorek č. 3	vzorek č. 4	vzorek č. 5
průměr	10,38	9,17	11,26	9,66	11,09
SMODCH	1,50	1,09	2,24	0,88	1,51
MAX	13,11	11,43	14,63	12,33	14,21
MIN	6,83	6,11	8,49	6,77	7,57
PUR 3					
	vzorek č. 1	vzorek č. 2	vzorek č. 3	vzorek č. 4	vzorek č. 5
průměr	10,16	9,70	9,30	9,86	9,10
SMODCH	1,42	1,18	1,00	0,88	1,31
MAX	12,68	12,30	12,00	11,90	11,79
MIN	7,82	6,40	6,64	7,29	5,73



Tab. 21. Průměrné hodnoty všech sérií

Samostatné vzorky bez lepidla									
	E (Mpa)			Fmax (N)			Lmax (mm)		
	PUR 1	PUR 2	PUR 3	PUR 1	PUR 2	PUR 3	PUR 1	PUR 2	PUR 3
Série 1 - samostatný vzorek	<b>0,93</b>	<b>0,60</b>	<b>0,58</b>	<b>8,72</b>	<b>9,14</b>	<b>7,94</b>	<b>63,23</b>	<b>114,0</b>	<b>94,71</b>
	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33
Série 2 - dva vzorky	<b>0,91</b>	<b>0,58</b>	<b>0,61</b>	<b>18,49</b>	<b>19,49</b>	<b>15,99</b>	<b>66,42</b>	<b>125,8</b>	<b>94,08</b>

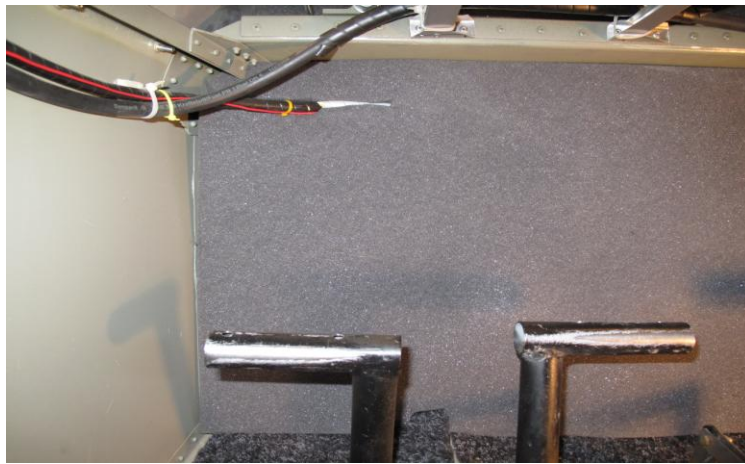
Lepený spoj po celé délce									
	E (Mpa)			Fmax (N)			Lmax (mm)		
	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33
Série 3 - Pattex	<b>1,28</b>	<b>1,31</b>	<b>1,12</b>	<b>20,85</b>	<b>24,46</b>	<b>19,88</b>	<b>67,95</b>	<b>148,4</b>	<b>113,3</b>
Série 7 - UHU	<b>1,36</b>	<b>0,93</b>	<b>0,99</b>	<b>19,03</b>	<b>19,94</b>	<b>17,06</b>	<b>59,47</b>	<b>115,3</b>	<b>90,89</b>
	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13
Série 4 - kombinace vzorků - lep. Pattex	<b>1,18</b>	<b>1,15</b>	<b>1,10</b>	<b>16,91</b>	<b>19,52</b>	<b>16,72</b>	<b>64,39</b>	<b>108,2</b>	<b>64,39</b>
Série 8 - kombinace vzorků - lep. UHU	<b>1,18</b>	<b>0,86</b>	<b>1,05</b>	<b>16,76</b>	<b>17,72</b>	<b>15,66</b>	<b>63,24</b>	<b>99,90</b>	<b>61,73</b>

Lepený spoj přeplátovaný									
	E (Mpa)			Fmax (N)			Lmax (mm)		
	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33	PUR 11	PUR 22	PUR 33
Série 5 – přeplátování 10mm – lepidlo Pattex	<b>0,47</b>	<b>0,32</b>	<b>0,31</b>	<b>5,24</b>	<b>6,56</b>	<b>5,20</b>	<b>54,31</b>	<b>111,5</b>	<b>86,00</b>
Série 10 – přeplátování 10mm – lepidlo UHU	<b>0,69</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>5,23</b>	<b>6,15</b>	<b>6,83</b>	<b>44,72</b>	<b>103,9</b>	<b>87,25</b>
Série 9 – přeplátování 5mm – lepidlo Pattex	<b>0,45</b>	<b>0,29</b>	<b>0,33</b>	<b>4,76</b>	<b>4,47</b>	<b>3,69</b>	<b>51,44</b>	<b>73,56</b>	<b>57,20</b>
Série 11 – přeplátování 5mm – lepidlo UHU	<b>0,63</b>	<b>0,33</b>	<b>0,61</b>	<b>3,82</b>	<b>5,22</b>	<b>4,94</b>	<b>37,72</b>	<b>88,37</b>	<b>55,04</b>
	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13	PUR 12	PUR 23	PUR 13
Série 13 – kombinace přepl. 10mm – lepidlo Pattex	<b>0,50</b>	<b>0,49</b>	<b>0,66</b>	<b>5,49</b>	<b>5,97</b>	<b>5,31</b>	<b>68,68</b>	<b>83,68</b>	<b>55,43</b>
Série 12 – kombinace přepl. 10mm – lepidlo UHU	<b>0,53</b>	<b>1,36</b>	<b>0,68</b>	<b>5,37</b>	<b>5,66</b>	<b>5,22</b>	<b>64,79</b>	<b>78,30</b>	<b>53,90</b>
Série 14 – kombinace přepl. 5mm – lepidlo Pattex	<b>0,51</b>	<b>0,37</b>	<b>0,65</b>	<b>4,61</b>	<b>5,08</b>	<b>4,83</b>	<b>57,69</b>	<b>74,70</b>	<b>46,62</b>
Série 6 – kombinace přepl. 5mm – lepidlo UHU	<b>0,34</b>	<b>0,27</b>	<b>0,37</b>	<b>3,74</b>	<b>4,12</b>	<b>4,39</b>	<b>50,03</b>	<b>68,62</b>	<b>58,21</b>

### 3.2 Praktická aplikace lepeného spoje

V současnosti jsou ultra-lehké letadla na vysokém stupni vývoje z hlediska technického pokroku. Nicméně kvalita hlučnosti a interiérů není ve stejném stupni vývoje jako jsou

technické možnosti těchto letadel. Akustické emise vznikající uvnitř kabiny letadel vykazují nejširší složku frekvencí v oblasti od 100 – 300 Hz, což vyžaduje v ideálním případě rozdílnou strukturu tlumícího materiálu (v tomto případě polyuretanu). Výroba polyuretanu vykazujícího gradient porézní struktury je velmi nákladná, proto se nabízí levnější varianta lepeného spoje dvou a více materiálů tak jak je popsáno v této práci. Níže uvedené ilustrace ukazují typické aplikace polyuretanu na protipožární přepážce ultra-lehkého letadla.



Obr. 155. PUR v pozadí nalepený na protipožární přepážce (v popředí pedály směrových kormidel)



Obr. 156. Vnitřní prostor kabiny (dvoumístného) ultra-lehkého letadla

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo zjistit, zda lepený spoj v kombinaci uvedených polyuretanů s vybranými komerčními druhy lepidla vykazuje výrazné zvýšení maximální pevnosti a modulu pružnosti. Pokud budeme uvažovat, že materiály použité pro zkoušky popsané v práci jsou čistě komerční polymerní materiály, lze je vyhodnotit následujícím způsobem.

Polyuretany zkoušené jako samostatné vzorky měly rostoucí tendenci s ohledem na počet vzorků umístěných v trhacím mechanismu stroje. Pokud se měřil jeden vzorek samostatně, tak získané hodnoty 7,94 N; 8,72 N a 9,14 N byly přibližně dvakrát nižší než tyto vzorky ve dvojici. Toto lze hodnotit jako přirozené chování polyuretanu s ohledem na počet vzorků vedle sebe. Naproti tomu moduly pružnosti, měly přibližně stejné hodnoty, což poukazuje na stejné elastické chování v pásmu, kdy se vzorek tahem nepoškodí.

Pokud uvažujeme lepený spoj v celé délce, tak již dojde k navýšení hodnot jak maximální pevnosti v tahu, tak i modulu. Tento jev je dán přidavkem lepidla po celé délce lepeného spoje. Lze konstatovat, že lepený spoj pro samostatné vzorky (PUR 11, PUR 22 a PUR 33) mají vyšší hodnoty moduly pružnosti, ale stejně tak i maximální pevnosti v tahu a tažnost. Z toho jasně vyplývá, že kombinace materiálů má nižší pevnosti než samostatné vzorky. U samostatných vzorků byla nejvyšší hodnota pevnosti v tahu dosažena u materiálu PUR 22 = 24,46 N v kombinaci s lepidlem Pattex. Toto je zapříčiněno mírně odlišnou porositou (85 – 90 %) a hustotou vzorků (polyuretany měly hustotu 21 a 35 kg.m<sup>-3</sup>). Nejvyšší hodnoty pevnosti vykazovala kombinace vzorků PUR 23 = 19,52 N při přetržení. Naopak nejnižší hodnoty pro kombinované lepené spoje ukazuje PUR 13 (pro samostatné byla také nejnižší hodnota u PUR 33), a toto je ovlivněno hustotou, která je u PUR 3 jen 21 kg.m<sup>-3</sup>. Takto stanovené maximální pevnosti ukazují, že z těchto materiálů je na tom nejlépe polyuretan s označením S3535F, který je přímo speciálním typem pro technicky náročné aplikace (odolnost proti ohni, trvanlivost, mechanická odolnost).

Přeplátované spoje měly ukázat, které vzorky jsou schopné při vzájemném přesahu vykazovat co nejlepší pevnostní charakteristiky. Přesahy byly 5 a 10 mm pro samostatné a kombinované vzorky. Pro přeplátované spoje s délkou 10 mm bylo dosaženo o cca 20 – 30 % vyšší pevnosti v tomto spoji než pro 5 mm. Nejlépe vycházely hodnoty  $F_{\max} = 6,83$  N pro kombinaci PUR 33 s přesahem 10 mm a UHU lepidlem. V kombinacích různých PUR byly nejvyšší hodnoty dosaženy kombinací PUR 23 = 5,97 N v přesahu 10 mm a lepidlo Pattex.

Zkouška peel-testem pro vzorky měla přibližně stejný průběh s dosahem síly při odtržení kolem 10 N pro všechny samostatné vzorky na povrchu hliníku při lepení Pattex. V kombinaci UHU lepidla a vzorků byly hodnoty přibližně o 2 – 3 N vyšší, proto je lepení přímo na povrch leteckého hliníku efektivnější v tomto případě efektivnější.

Pro konečnou aplikaci v letadle bylo zjištěno, že nejlépe vychází v lepení vrstvy polyuretanu PUR 2 (S3535F), který jak již bylo zmíněno je speciálním typem pro technicky náročné aplikace. V souladu s tímto hodnocením vychází z peel testu nejlépe podklad pro vrstvu polyuretanu UHU lepidlo, které vykazovalo v průběhu utržení z hliníkové podložky nejvyšší hodnoty.

Závěrem lze konstatovat, že lepení takto malých součástí polyuretanu je poměrně složitou záležitostí, která má své opodstatnění pro výrobce letadel. Izolace v těchto typech letadel bývá doplněna do trupu letadla ve velké míře až dodatečně, proto má studium takto lepených spojů uvnitř struktury svůj význam a může výrazně ovlivnit vnitřní prostředí různě hlučných letových režimů.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití: engineering and biomechanics applications and design guide*. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1993, 525 s. ISBN 80-901-5704-1.
- [2] LAPČÍK, Ľubomír. *Nauka o materiálech II: engineering and biomechanics applications and design guide*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2000, 115 s. ISBN 80-238-6527-7.
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-720-4283-1.
- [4] MILLS, N. *Polymer foams handbook: engineering and biomechanics applications and design guide*. 1st ed. Boston: Butterworth Heinemann, 2007, xxv, 535 p. ISBN 07-506-8069-5.
- [5] LANGMAIER, Ferdinand. *Adhese a adhesiva*. 1. vyd. Zlín, 1999, 106 s. ISBN 80-214-1373-5.
- [6] Keramika, kompozity, polymery: Laminární kompozity. [online] © 2009–2013 Pedagogická fakulta MU. [cit. 2013-02-05]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm>
- [7] OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. 3. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1986, 285 s.
- [8] ING. JIŘÍ HRAZDIL. *Normy* [online]. © 3.1.2013 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: <http://shop.normy.biz/detail/84221>.
- [9] TROUGHTON, Michael John. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. 2nd ed. Cambridge, UK: TWI/The Welding Institute, 2008, xxii, 590 p. ISBN 978-081-5515-814.
- [10] STÁREK, Oldřich a Zdeněk POSPÍŠIL. *Technologie galanterního zboží pro 2. ročník SPŠ kožařské*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1978, 209 s.

- [11] Lepidla, tmely a odmašťovače UHU: Produkty. [online]. 28.11.2011 [cit. 2013-05-5]. Dostupné z: [http://www.uhu.cz/bezpecnostnilisty/soubory/UHU\\_power\\_transparent\\_-\\_UHU\\_POWER\\_TRANSPARENT\\_blistr.pdf](http://www.uhu.cz/bezpecnostnilisty/soubory/UHU_power_transparent_-_UHU_POWER_TRANSPARENT_blistr.pdf)
- [12] Pattex: Produkty, kontaktní lepidla. [online]. 2006 [cit. 2013-05-5]. Dostupné z: <http://www.pattex.cz/files/pattex-chemopren-univerzal-klasik-technicky-list.pdf>
- [13] Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická: Přístrojové vybavení. [online]. [cit. 2013-05-7]. Dostupné z: <http://www.utb.cz/ft/struktura/pristrojove-vybaveni-1>
- [14] Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: Fakulta technologická. DVOŘÁK, Zdeněk a Romana LAMBOROVÁ. *Studijní podpora: Fyzika kovů*[online]. [cit. 2013-05-7]. Dostupné z: [http://web.ft.utb.cz/cs/docs/T1PR\\_fyzika\\_kovu.pdf](http://web.ft.utb.cz/cs/docs/T1PR_fyzika_kovu.pdf)
- [15] Strojirenstvi: Pružnost a pevnost. *Vlastnosti materiálů* [online]. [cit. 2013-05-7]. Dostupné z: [http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a\\_pruznost\\_pevnost.php](http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

F	Síla potřebná pro rozlepení spoje. (N)
b	Šířka adhezního spoje. (m)
C	Povrchová koncentrace promotoru.
A <sub>0</sub>	Empirická konstanta
A <sub>1</sub>	Empirická konstanta
P <sub>M</sub>	Charakteristika mechanického ukotvení filmu adheziva v povrchu adherentu
P <sub>I</sub>	Komponenta, charakterizující intenzitu mezifázových interakcí adhezního filmu a adherentu
V <sub>e</sub>	Povrchový potenciál
h	Vzdálenost povrchů (m)
ε	Dielektrická konstanta
σ	Množství volné energie (Jm <sup>-2</sup> )
W <sub>AB</sub>	Práce adheze (J)
γ	Povrchové napětí (N.m <sup>-1</sup> )
π <sub>e</sub>	Rozestírací tlak (Pa)
Σ <sub>max</sub>	Maximální napětí, které je schopen přenést film adheziva (N.m <sup>-2</sup> )
b	Šířka rozlepovaného spoje (m)
E <sub>S</sub>	Youngův modul pružnosti adherentu (N.m <sup>-2</sup> )
E <sub>A</sub>	Youngův modul pružnosti adheziva (N.m <sup>-2</sup> )
t <sub>S</sub>	Tloušťka adherentu (m)
t <sub>A</sub>	Tloušťka adhezního filmu (m)
s	Tloušťka adherentu (mm)
D <sub>p</sub>	Délka přeplátování (mm)
d	Vnější průměr trubky (mm)
σ <sub>Pt</sub>	Pevnost v tahu (MPa)

$F_{\max}$  Maximální zatěžující síla (N)

$S_0$  Plocha průřezu ( $\text{m}^2$ )

$\varepsilon$  Poměrné prodloužení

$\Delta l$  Změna délky (mm)

$l_0$  Původní délka (mm)



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Otevřená (a) a uzavřená struktura polyuretanu (b). [4] .....	14
Obr. 2. Sendvičový kompozit [6].....	19
Obr. 3. Struktura vazeb kaučuku s mědí.....	22
Obr. 4 Geometrie testů lepených spojů v rozlepování [5] .....	28
Obr. 5. Ukázka konstrukčních možností přeplátovaného spoje. [9].....	30
Obr. 6. Možnosti protažení adherentu a lepidla [7] .....	31
Obr. 7. Ukázka konstrukčních možností čelního spoje [9].....	32
Obr. 8. Ukázka konstrukčních možností násuvného trubkového spoje.....	32
Obr. 9. Znárodnění základních režimů tahové zkoušky. ....	40
Obr. 10. Tahový diagram zkoušky tahem [15] .....	41
Obr. 11. Trhací stroj SHIMADZU a INSTRON [13].....	44
Obr. 12. Strojní vysekávání [10] .....	45
Obr. 13. Hydraulický vysekávací lis.....	45
Obr. 14. Vysekávací nůž.....	46
Obr. 15. Lepidlo Pattex Chemoprén Univerzál KLASIK [12].....	46
Obr. 16. Lepidlo UHU KONTAKT KRAFTKLEBER [11].....	47
Obr. 17. Způsob značení vzorků (1 – CRHM, 2 – S3535F, 3 – N2130) .....	49
Obr. 18. Vzorek lepený po celé délce.....	49
Obr. 19. Vzorek přeplátovaný.....	50
Obr. 20. Vzorky pro peel-test .....	50
Obr. 21. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 1 – Série 1 .....	52
Obr. 22. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 2 – Série 1 .....	53
Obr. 23. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 3 – Série 1 .....	53
Obr. 24. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 1 – Série 1 .....	53
Obr. 25. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 2 – Série 1 .....	54
Obr. 26. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 3 – Série 1 .....	54
Obr. 27. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 1 – Série 1 .....	54
Obr. 28. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 2 – Série 1 .....	55

Obr. 29. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 3 – Série 1 .....	55
Obr. 30. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 2 .....	56
Obr. 31. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 2 .....	56
Obr. 32. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 2 .....	57
Obr. 33. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 2 .....	57
Obr. 34. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 2 .....	57
Obr. 35. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 2 .....	58
Obr. 36. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 2 .....	58
Obr. 37. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 2 .....	59
Obr. 38. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 2 .....	59
Obr. 39. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 3 (Pattex) .....	60
Obr. 40. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 3 .....	60
Obr. 41. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 3 .....	61
Obr. 42. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 3 .....	61
Obr. 43. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 3 .....	61
Obr. 44. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 3 .....	62
Obr. 45. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 3 .....	62
Obr. 46. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 3 .....	63
Obr. 47. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 3 .....	63
Obr. 48. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 7 .....	64
Obr. 49. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 7 .....	64
Obr. 50. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 7 .....	65
Obr. 51. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 7 .....	65
Obr. 52. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 7 .....	65
Obr. 53. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 7 .....	66

Obr. 54. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 7 .....	66
Obr. 55. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 7 .....	67
Obr. 56. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 7 .....	67
Obr. 57. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 4 .....	68
Obr. 58. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 4 .....	68
Obr. 59. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 13 – Série 4 .....	69
Obr. 60. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 4 .....	69
Obr. 61. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 4 .....	69
Obr. 62. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 4 .....	70
Obr. 63. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 4 .....	70
Obr. 64. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 4 .....	71
Obr. 65. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13 – Série 4 .....	71
Obr. 66. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 8 .....	72
Obr. 67. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 8 .....	72
Obr. 68. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 32 – Série 8 .....	73
Obr. 69. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 8 .....	73
Obr. 70. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 8 .....	73
Obr. 71. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 8 .....	74
Obr. 72. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 8 .....	74
Obr. 73. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 8 .....	75
Obr. 74. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13– Série 8 .....	75
Obr. 75. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 5 .....	76
Obr. 76. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 5 .....	76
Obr. 77. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33– Série 5 .....	77

Obr. 78. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 5 .....	77
Obr. 79. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 5 .....	77
Obr. 80. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 5 .....	78
Obr. 81. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 5 .....	78
Obr. 82. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 5 .....	79
Obr. 83. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 5 .....	79
Obr. 84. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 9 .....	80
Obr. 85. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 9 .....	80
Obr. 86. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 9 .....	81
Obr. 87. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 9 .....	81
Obr. 88. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 9 .....	81
Obr. 89. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 9 .....	82
Obr. 90. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 9 .....	82
Obr. 91. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 9 .....	83
Obr. 92. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 9 .....	83
Obr. 93. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 10 .....	84
Obr. 94. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 10 .....	84
Obr. 95. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 10 .....	85
Obr. 96. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 10 .....	85
Obr. 97. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 10 .....	85
Obr. 98. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 10 .....	86
Obr. 99. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 10 .....	86
Obr. 100. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 10 .....	87
Obr. 101. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 10 .....	87

Obr. 102. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 11 – Série 11 .....	88
Obr. 103. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 22 – Série 11 .....	88
Obr. 104. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 33 – Série 11 .....	89
Obr. 105. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 11 – Série 11 .....	89
Obr. 106. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 22 – Série 11 .....	89
Obr. 107. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 33 – Série 11 .....	90
Obr. 108. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 11 – Série 11 .....	90
Obr. 109. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 22 – Série 11 .....	91
Obr. 110. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 33 – Série 11 .....	91
Obr. 111. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 6 .....	92
Obr. 112. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 6 .....	92
Obr. 113. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 13 – Série 6 .....	93
Obr. 114. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 6 .....	93
Obr. 115. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 6 .....	93
Obr. 116. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 6 .....	94
Obr. 117. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 6 .....	94
Obr. 118. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 6 .....	95
Obr. 119. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13 – Série 6 .....	95
Obr. 120. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 12 .....	96
Obr. 121. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 12 .....	96
Obr. 122. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 13 – Série 12 .....	97
Obr. 123. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 12 .....	97
Obr. 124. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 12 .....	97
Obr. 125. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 12 .....	98
Obr. 126. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 12 .....	98

Obr. 127. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 12 .....	99
Obr. 128. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13 – Série 12 .....	99
Obr. 129. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 13 .....	100
Obr. 130. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 13 .....	100
Obr. 131. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 13 – Série 13 .....	101
Obr. 132. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 13 .....	101
Obr. 133. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 13 .....	101
Obr. 134. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 13 .....	102
Obr. 135. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 13 .....	102
Obr. 136. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 13 .....	103
Obr. 137. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13 – Série 13 .....	103
Obr. 138. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 12 – Série 14 .....	104
Obr. 139. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 23 – Série 14 .....	104
Obr. 140. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 13 – Série 14 .....	105
Obr. 141. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 12 – Série 14 .....	105
Obr. 142. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 23 – Série 14 .....	105
Obr. 143. Graf závislosti napětí na deformaci PUR 13 – Série 14 .....	106
Obr. 144. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 12 – Série 14 .....	106
Obr. 145. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 23 – Série 14 .....	107
Obr. 146. Graf závislosti napětí na deformaci z dané oblasti pro určení modulu pružnosti vzorků PUR 13 – Série 14 .....	107
Obr. 147. Přípravek pro měření peel-testu.....	108
Obr. 148. Způsob uchycení vzorku.....	108
Obr. 149. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 1– Série 15 .....	109
Obr. 150. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 2 – Série 15 .....	109
Obr. 151. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 3 – Série 15 .....	110

---

Obr. 152. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 1 – Série 16.....	111
Obr. 153. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 2 – Série 16.....	111
Obr. 154. Graf závislosti síly na prodloužení PUR 3 – Série 16.....	112
Obr. 155. PUR v pozadí nalepený na protipožární přepážce (v popředí pedály směrových kormidel).....	114
Obr. 156. Vnitřní prostor kabiny (dvoumístného) ultra-lehkého letadla.....	114

**SEZNAM TABULEK**

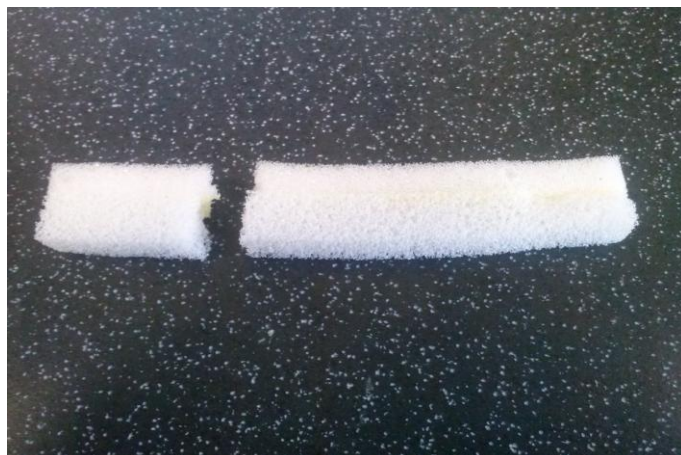
<i>Tab. 1 – Krátkodobé pevnostní vlastnosti některých polymerních materiálů při pokojové teplotě:</i> .....	21
<i>Tab. 2 – Mechanické vlastnosti pevných a tuhých materiálů. [2]</i> .....	22
<i>Tab. 3. Charakteristika materiálů [14]</i> .....	43
<i>Tab. 4. Přehled způsobu přípravy jednotlivých sérií</i> .....	51
<i>Tab. 5. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 1</i> .....	55
<i>Tab. 6. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 2</i> .....	59
<i>Tab. 7. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 3</i> .....	63
<i>Tab. 8. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 7</i> .....	67
<i>Tab. 9. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 4</i> .....	71
<i>Tab. 10. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 8</i> .....	75
<i>Tab. 11. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 5</i> .....	79
<i>Tab. 12. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 9</i> .....	83
<i>Tab. 13. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 10</i> .....	87
<i>Tab. 14. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 11</i> .....	91
<i>Tab. 15. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 6</i> .....	95
<i>Tab. 16. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 12</i> .....	99
<i>Tab. 17. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 13</i> .....	103
<i>Tab. 18. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 14</i> .....	107
<i>Tab. 19. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 15. Naměřené hodnoty z oblasti protažení od 20 mm do 50 mm.</i> .....	110
<i>Tab. 20. Přehled naměřených a vypočtených hodnot pro sérii 16. Naměřené hodnoty z oblasti protažení od 20 mm do 50 mm.</i> .....	112
<i>Tab. 21. Průměrné hodnoty všech sérií</i> .....	113



## SEZNAM PŘÍLOH

PI – FOTKY VZORKŮ PO PŘETRŽENÍ

## PŘÍLOHA P I: FOTKY VZORKŮ PO PŘETRŽENÍ



Vzorek PUR 11 – lepidlo Pattex



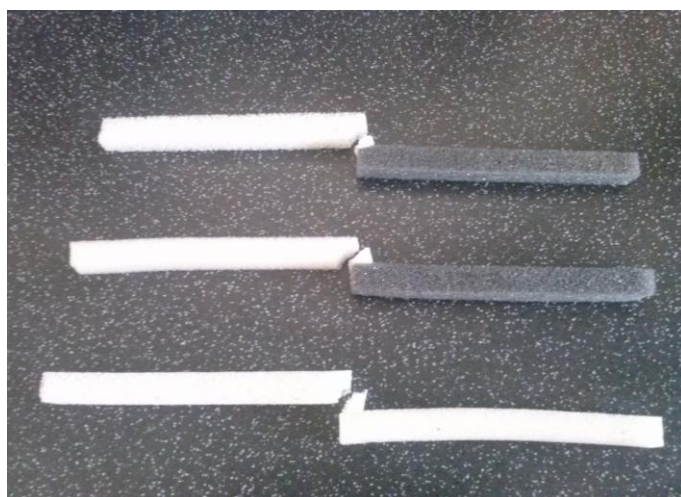
Vzorek PUR 12 – lepidlo Pattex



Vzorek PUR 33 – lepidlo Pattex



Vzorky PUR 12 – přeplátování 5mm - Pattex



Vzorky PUR 12,23,13 – přeplátování 5mm- UHU



Vzorky PUR 13 – přeplátování 10mm - UHU



Vzorek PUR 1 č. 1 – lepidlo UHU



Vzorek PUR 2 č. 8 – lepidlo UHU



Vzorek PUR 3 č. 13 – lepidlo UHU