

Mechanické vlastnosti polyuretanových pěn

Tomáš Uhýrek



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav fyziky a mater. inženýrství
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš UHÝREK**
Osobní číslo: **T10633**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Mechanické vlastnosti polyuretanových pěn**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na zadané téma.
2. Typové rozdělení polyuretanů dle hustoty.
3. Vlastností, které hustota ovlivňuje.
4. Výběr polyuretanů pro praktickou část.
5. Vybrané metody k měření s ohledem na vliv hustoty.
6. Diskuse výsledků a závěrečné vyhodnocení.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. MLEŽIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 8085920727.
2. LAPČÍK, Lubomír a Miroslav RAAB. Nauka o materiálech II. Vyd. 2. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2004, 133 s. ISBN 80-7318-229-7.
3. MILLS, N. Polymer foams handbook: engineering and biomechanics applications and design guide. 1st ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, 2007, xxv, 535 s. ISBN 978-0-7506-8069-1.
4. KLEMPNER D., FRISCH K.C. Polymeric foams, Oxford 1991, ISBN 3-446-15097-8.
5. BUIST and GUDGEON, Advances in polyurethane technology, ISBN 85334-023-4.
6. PRUD'HOMME, Robert K a Saad A KHAN. Foams: theory, measurements, and applications. New York: Marcel Dekker, c1996, viii, 596 s. ISBN 0-8247-9395-1.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Jurička, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

8. února 2013


Termín odevzdání bakalářské práce:

24. května 2013

Vc Zlíně dne 21. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




Mgr. Aloš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:.....

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

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

(1) Vysoká škola 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.

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

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, 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 vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem práce je analyzovat vybrané mechanické vlastnosti, které přímo charakterizují polymer (polyuretan) s ohledem na hustotu vybraného typu polyuretanu. Vlastnosti, pro které jsou polyuretany především využívány, patří porozita, hustota, tuhost, mechanická odolnost a pohltivost vůči akustické energii. Všechny výše zmíněné vlastnosti mají v dnešní době význam pro technickou praxi. S tím, že je polyuretan jeden z nejfrekventovaněji vyráběného polymeru se jeho využití a zpracování stále rozšiřuje. Ruku v ruce s objemem výroby se zvyšují i možnosti praktických aplikací, pro které je nutné znát co nejdůkladněji vlastnosti, kterými polyuretany disponují. Díky těmto poznatkům se mohou aplikace v nejrůznějších technických odvětvích posunout více k detailnímu použití tohoto porézního materiálu.

Klíčová slova: Hustota, polyuretany, mechanické vlastnosti, pevnost, akustické vlastnosti, porozita.

ABSTRACT

The aim of bachelor is study specific properties that are describing polymer – polyurethane with reference to different density of types. The basic properties of polyurethanes are density, mechanical ruggedness, acoustical properties, porosity and rigidity. All properties are very important for technical application. Polyurethane is most widespread produced polymer on the world. Support that is obtained from this polymer is very width for technical application and nowadays grow research project with new innovation and ideas focused on using of polyurethane. For new and innovation in technical application is to know concrete properties of polyurethane mechanical properties depending on density is necessary. Density for polyurethanes is basic factor for produced, manufacturing, selected and technical application.

Keywords: Density, polyurethanes, mechanical properties, strength, acoustical properties, porosity

Poděkování, motto a čestné prohlášení, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická, nahraná do IS/STAG jsou totožné ve znění:

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

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 9 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 10 |
| 1 ZÁKLADNÍ MATERIÁLY | 11 |
| 1.1 POLYURETANY | 11 |
| 1.1.1 Polyuretany obecně | 11 |
| 1.1.2 Polyuretany a základní chemismus | 12 |
| 1.1.3 Lehčené hmoty | 14 |
| 1.1.4 Základní příprava tvrdých a měkkých pěn | 15 |
| 1.1.5 Tvrdé pěny..... | 16 |
| 1.1.6 Měkké pěny | 16 |
| 1.1.7 Polotvrdé pěny..... | 17 |
| 1.1.8 Integrální pěny..... | 17 |
| 1.2 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA POLYURETANŮ | 18 |
| 1.2.1 Hustota pěnových polymerů..... | 18 |
| 1.2.2 Hustota a velikost pórů..... | 20 |
| 1.2.3 Mikro póry a tloušťka stěn | 22 |
| 1.3 ZÁKLADNÍ POSUZOVÁNÍ POLYURETANŮ | 25 |
| 1.3.1 Koeficient zvukové pohltivosti a odrazivosti..... | 25 |
| 1.3.2 Mechanické vlastnosti | 29 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 36 |
| 2 METODY A ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ | 37 |
| 2.1 AKUSTICKÉ VELIČINY | 37 |
| 2.1.1 Koeficient zvukové pohltivosti a odrazivosti..... | 37 |
| 2.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA | 40 |
| 2.3 VÝBĚR A PŘÍPRAVA VZORKŮ | 42 |
| 3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ | 44 |
| 3.1 KOEFICIENT ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI..... | 44 |
| 3.2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY | 52 |
| 3.2.1 Závislost síly na prodloužení..... | 52 |
| 3.2.2 Závislost napětí na deformaci | 57 |
| 3.2.3 Modul pružnosti | 63 |
| 3.2.4 Maximální síly a prodloužení..... | 68 |
| ZÁVĚR | 73 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 75 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 77 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 79 |
| SEZNAM TABULEK | 82 |

ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá vlivem hustoty polymerních materiálů, v tomto případě polyuretanů (PUR), na vybrané mechanické vlastnosti. V současnosti si pěnové materiály nacházejí stále širší uplatnění v různých průmyslových a technických aplikacích. Ať už vezmeme design, ortopedické pomůcky nebo technické použití v oblasti izolací, použitelnost a ekonomické náklady jsou v relativně dobrém poměru. Z dlouhodobého hlediska se jedná o jeden z nejčastěji vyráběných polymerů a to v celosvětovém měřítku. Trvanlivost polyuretanů (bez ohledu na to jestli se jedná o měkký nebo tvrdý typ PUR) lze počítat řádově na roky (výjimečně i desetiletí) v závislosti na mechanickém opotřebení nebo četnosti užitých vlastností, pro které byly zpracovány. V rámci práce byly vybrány polyuretany s různou hustotou a byly zkoušeny s ohledem nejběžnější mechanické vlastnosti, pro které se v dnešní době polyuretany vyrábí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ MATERIÁLY

Základní materiálovou složkou pro zpracování této práce byly vybrány polymerní materiály na bázi polyuretanu. Jejich výroba a základní vlastnosti s ohledem na vybraný parametr hustoty je uvedeno v následujících kapitolách. Jelikož se jedná o jeden z nejvíce vyráběných polymerů, jsou možnosti využití nadále zkoumány.

1.1 Polyuretany

1.1.1 Polyuretany obecně

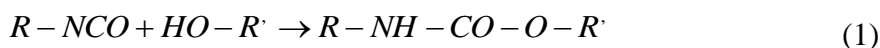
Před 80 lety syntetické polymery v podstatě neexistovali a dnes je jejich využití téměř ve všech oborech lidského snažení. Ovšem polymery přírodní jako kaučuk, celulóza (a její deriváty), kaseinové hmoty aj. se zpracovávají již od minulého století. Poprvé vyrobil syntetický polymer Američan Baekeland, který připravil fenolformladehydové pryskyřice. Stalo se tak již před první světovou válkou. Výroba těchto syntetických polymerů byla na vzestupu a před druhou světovou válkou již činila přes čtvrt milionu tun. Ovšem nebylo to nic oproti velkému rozmachu výroby syntetických polymerů, který nastal za druhé světové války a hlavně po ní. Největší rozvoj výroby byl hlavně ve státech, které neměly přístup ke klasickým zdrojům surovin zejména pak kaučuku. Mezi tyto státy patřili hlavně Německo a SSSR [1].

Tab. 1. Výroba jednotlivých polymerů ve světě v roce 1997 [1]

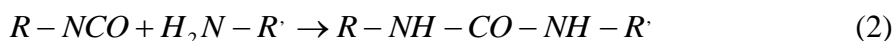
| Typ polymeru | Výroba v milionech tun: | |
|------------------------|-------------------------|-------|
| | 1990 | 1997 |
| Plasty | 100,0 | 135,5 |
| Syntetické kaučuky | 9,1 | 10,2 |
| Přírodní kaučuk | 4,9 | 6,4 |
| Syntetická vlákna | 15,7 | 28,3 |
| Polosyntetické kaučuky | 3,2 | 2,3 |
| Přírodní vlákna | 18 | 21 |

1.1.2 Polyuretany a základní chemismus

Unikátní vlastností této třídy polymerů je jejich široká možnost použití, které je umožněno velkým rozsahem dosažitelných vlastností. Jenom v roce 2000 byl objem spotřeby PUR na světě odhadován na 8,5 mil. tun, což ho řadí mezi první desítku, co se týče objemu výroby. PUR se vyrábějí reakcí vícefunkčních isokyanátů s polyakoholy. Konkrétně sloučením isokyanátů s alkoholy vznikají urethany jinak nazývané jako estery kyseliny karbamové [1].



Při této hlavní růstové reakci vznikají však i jiné než urethanové strukturální jednotky, což je zapříčiněno vedlejšími reakcemi, které mohou být buď samovolné, nebo záměrně vyvolané. Toto je zapříčiněno reakcí isokyanátů s velkou škálou sloučenin, které obsahují aktivní vodíkové atomy. Takto například reagují společně s aminy za vzniku substituovaných močovín [1]:



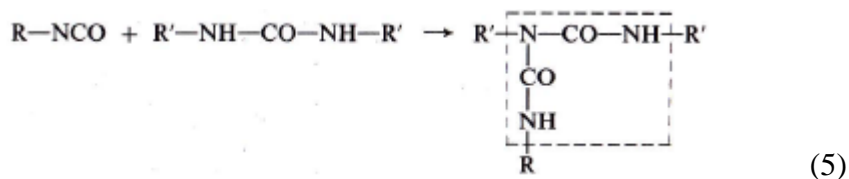
Při reakci vody s isokyanáty se uvolňuje oxid uhličitý za vzniku aminů [1].



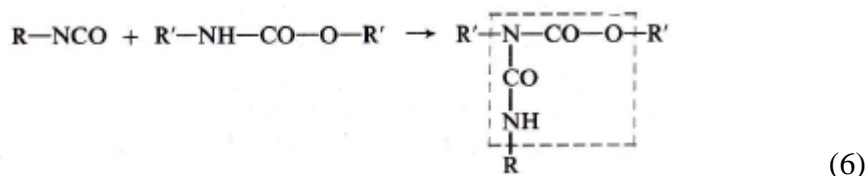
Tento amin následně reaguje za vzniku substituované močoviny s další molekulou isokyanátu. Dále pak isokyanáty vytvářejí substituované amidy a oxid uhličitý při reakci s karboxylovými kyselinami [1].



Za specifických podmínek isokyanát může reagovat s močovinou, která je ovšem substituovaná produktem primární reakce – NCO s aminem. Produktem je pak N – substituovaný biuret [1]:



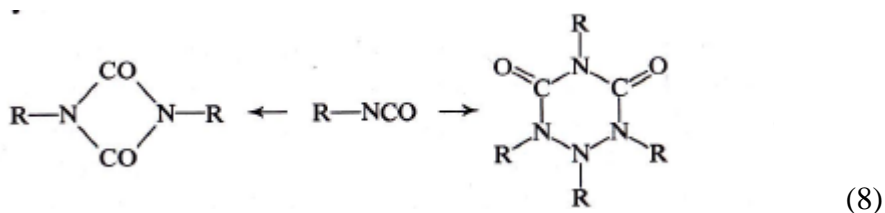
Analogicky probíhá reakce isokyanátu s vodíkem urethanové skupiny za vzniku N - substituovaných esterů kyseliny alofanové [1].



Sloučeniny obsahující aktivní vodík můžeme sestavit do řady podle klesající reaktivity s isokyanáty: alifatické aminy > aromatické aminy > alifatické substituované močoviny > primární alkoholy > sekundární alkoholy > voda > fenoly > aromatické substituované močoviny. Nejreaktivnější jsou pak primární aminy. Nejdůležitější v praxi je aby reakce polyhydroxysloučenin s isokyanátem probíhala v naprosto bezvodém prostředí, protože jinak dochází ke vzniku močovinových vazeb z důvodu odštěpení CO₂. Rychlost reakce primárních, sekundárních a terciárních alkoholů s isokyanáty je v poměru asi 1 : 0,3: 0,005. Při reakci aminu s alkoholy probíhající za teploty cca 20°C kvantitativně za silného tepelného zabarvení nevzniknou žádné vedlejší produkty. Při přípravě aminů je tedy nutné vycházet z polyhydroxysloučenin a di- nebo polyisokyanátů. Poté z diisokyanátu a diolu vznikne lineární polyuretan [1]:



Produkty nejrozmanitějších vlastností je možné připravit kombinací rozličných polyisokyanátů s polyalkoholy. Za účasti trialkylfosfinu a pyridinu vznikají z isokyanátu dimery obsahující uretdionový kruh už za teploty cca 20°C, který se poté reversibilně štěpí za vyšších teplot (obvykle nad 150°C). V přítomnosti alkalických katalyzátorů (octanu draselného) a za vyšších teplot vznikají isokyanuráty [1]:

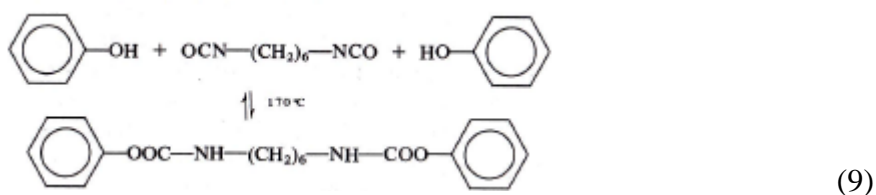


Přidáním sloučenin cínu a terciálních aminů je možno katalyticky urychlit adiční reakci isokyanátu s alkoholy [1].

Povaha skupin spojených urethanovou vazbou má vliv na teplotu disociace právě této vazby. Rozličné urethany jsou fakticky stabilní do těchto teplot [1]:

- aryl—NH—COO—aryl asi do 120 °C,
- alkyl—NH—COO—aryl asi do 180 °C
- aryl—NH—COO—alkyl asi do 200 °C,
- alkyl—NH—COO—alkyl asi do 250 °C.

V praxi se často těchto rozdílných teplotních stabilit urethanových skupin využívá. Lze připravit takzvané maskované isokyanáty, které se vyrábějí reakcí polyisokyanátu s fenoly, kaprolaktamem aj. Tyto jsou pak za standardní teploty úplně netečné vůči vodě a sloučeninám obsahující skupinu –OH. Při zvýšení teploty na teplotu rozkladu vznikne volný isokyanát za odštěpování maskovacího činidla. Tento pak může reagovat s přítomnými polyoly na polyurethan[1]:



Vzrůstající reaktivita isokyanátů je v tomto pořadí hydroaromatické-alifatické-aromatické isokyanáty. Svůj vliv má i sterické uspořádání a vliv substituentů[1].

1.1.3 Lehčené hmoty

Ze souhrnného objemu výroby PUR náleží 50% výrobě měkkých pěn a 30% výrobě tvrdých pěn. K výrobě PUR jsou potřeba 3 základní suroviny a to polyisokyanáty, polyoly a v neposlední řadě také voda. Při reakci diisokyanátů s hydroxilovými skupinami se vytvářejí polyurethanové vazby. Při další reakci pak isokyanát reaguje s vodou za následného odštěpení CO₂, které má funkci nadouvadla. Aminy vzešlé z této reakce okamžitě reagují s obsaženými isokyanatovými skupinami a vznikají močovinová seskupení. Pomocí IČ-spektroskopie následně zjistíme, že zesíťované polyuretanové pěny obsahují močovinové, urethanové a biuretové struktury [1].

Vedle polyetherů připravených polymerací propylenoxidu, ethylenoxidu nebo tetrahydrofuranu se jako hydroxilová složka pro výrobu měkkých pěn využívá lineárně nebo slabě rozvětvené polyestery kyseliny adipové a diethylenglykolu (s přídavkem trimethylolpropanu). Výhodou těchto lehčených hmot z polyetherů je jejich vyšší elasticita a odolnost vůči hydrolyze na rozdíl od polyesterových hmot. Nevýhodou naproti tomu je jejich snazší náchylnost k oxidaci. K přípravě měkkých pěn je nutné, aby byli dlouhé a elastické řetězce mezi uzly polymerní sítě. Hmotnostní část složky s isokyanátem by neměla být vyšší než 40%. Hlavně lineární polyetherové nebo polyesterové složky proto mají poměrně nízké hydroxilové číslo (40 až 60 KOH na 1 g) a M 2000 až 4000 [1].

Při výrobě tvrdých pěn se používá větší množství isokyanatové složky (až 70% celkové hmotnosti). To má za následek silné rozvětvení hydroxilové složky a hydroxilové číslo složky je mezi 300 až 600 mg KOH na 1g. Používanou isokyanatovou složkou je hlavně technický difenylmethandiisokyanat, díky kterému má produkt vyšší houževnatost než toluylendiisokyanát, který se používá jako směs izomerů pro měkké pěny [1].

1.1.4 Základní příprava tvrdých a měkkých pěn

Lehčené hmoty se nejčastěji připravují v kontinuálně pracujících zpěňovacích strojích. Do míchací hlavy se dávkuje kapalný isokyanát, polyhydroxysloučenina, voda a pomocné látky. Míchadlem s velkou frekvencí otáčení se vytvoří vysokoviskózní kapalina, která se lije do forem, kde bez přívodu tepla po několika sekundách vypění. Zvětšování objemu skončí během 1 až 2 min a po 10 až 20 min může být lehčená hmota z formy vyjmuta. Licí stroje mají výkon až 1 t.h⁻¹. Bezpodmínečně musí být zajištěno dokonalé odsávání diisokyanátových par. I když pění nastává při normální teplotě, může podle tloušťky pěny teplota uvnitř vzrůst až na 180 °C. Měkké pěny lze připravit o hustotě 15 až 70 kg.m⁻³ (běžně 25 kg.m⁻³). Tvrdé pěny lze připravit o hustotě 10 až 600 kg.m⁻³. Do směsí pro přípravu pěn se dávají katalyzátory, které mimořádně urychlují reakci diisokyanátů. Nejběžnější jsou terc.aminy, např. benzyldimethylamin (Desmorapid DB firmy Bayer). Polyethery z propylenoxidu reagují s isokyanáty pomaleji a pro urychlení reakce je nutno použít zvlášť účinné katalyzátory, jako je např. triethylendiamin (1,4-diazabicyklo[2,2,2]) oktan, firemní označení DABCO) [1].

Vedle terciárních aminů se jako katalyzátory používají také organokovové sloučeniny, zejména 2-ethylhexoát cínatý a dibutylcindilaurát. Pro urychlení reakce hydroxylových skupin s aromatickými isokyanáty je neúčinnější *DABCO*, naproti tomu při reakci s alifatickými isokyanáty je neúčinnější dibutylcindilaurát. V lacích se kombinace benzyldimethylaminu s dibutylcindilaurátem rovná účinku triethylendiaminu [1].

Předčasnému úniku CO₂ z vytvořených pórů brání (a rovnoměrnost pórů podporují) přísady kopolymerů polydimethylsiloxan-alkylenoxid. Měkké pěny mívají zpravidla 80 % otevřených pórů, tvrdé pěny mají větší podíl uzavřených pórů vzhledem k rychlejší výstavbě polymerní sítě. Uzavřené póry podmiňují dobrou izolační schopnost tvrdých pěn [1].

1.1.5 Tvrdé pěny

Tvrdé pěny mohou být připraveny v otevřených anebo uzavřených formách. Dále je možné taktéž pracovat dvoustupňově, kdy se z polyesteru nebo polyetheru a přebytku diisokyanátů připraví předpolymer, který má výhodu delšího skladování a může být vypěněn přísadkou vody, popř. fyzikálně pomocí fluor- trichlormethanu [1].

1.1.6 Měkké pěny

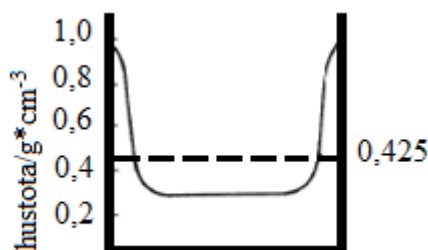
Metoda přípravy v bloku je využívána takřka u 90 % všech připravených měkkých pěn. Většinou se využívají polyethery (hlavně pro polštářování se tak získává cca 1/3 všech matrací v SRN). Měkké polyesterové pěny se užívají pro laminování textilu, pro obaloviny, izolační a těsnicí pásy aj. Vedle bloků se měkké pěny mohou vyrábět také ve formách, hlavně pro potřeby nábytkářského a automobilového průmyslu. Zde se rozšiřuje aplikace tzv. studených pěn, při jejichž přípravě se používají vysoce reaktivní polyethery o $M = 5000$ a více, a isokyanáty s funkčností nad 2, které se dají získat smísením toluylendiisokyanátu s polymerním difenylmethandiisokyanátem. Metody přípravy v blocích se využívá především tam, kde by později nebylo možné dosáhnout potřebného tvaru přiřezáváním [1].

1.1.7 Polotvrdé pěny

Polotvrdé pěny se vyrábějí téměř výhradně v blocích na polyesterové bázi o hustotě 100 až 150 kg.m⁻³. Tvrdé pěny se vyrábějí ve formě bloků a desek. Většina se jich používá, jako vyplň dutin a pro izolační účely (hlavně pro ledničky, pro stavebnictví, izolace potrubí aj.) [1].

1.1.8 Integrální pěny

Spadají do kategorie lehčených hmot, v nichž se v průběhu procesu výroby ve formě vytvoří pórovité jádro a nepórovitá kůra, která je integrální složkou výrobku. Hustota hmoty od středu ke kraji vzrůstá (Obr. 1.). Funkci nadouvadlo má v tomto případě fluortrichlormethan (b. v. 24,9 °C). V závislosti na teplotním gradientu mezi teplotou formy a vnitřku pěny dochází k rozdělení pórů a platí nepřímá úměra čím nižší je teplota formy, tím tlustší je kůra. Pro výrobu měkkých integrálních pěn (150 až 800 kg.m⁻³) se užívají výšemolekulární polyethery (M = 5 000) s přídavkem jen nepatrného množství nízkomolekulárních polyolů, které plní funkci síťovadla. Naproti tomu při výrobě tvrdých integrálních pěn je nutné pracovat s kratšími polyethery z důvodu dosažení silného zesíťování. Směs obsahující zpěňovadlo se vypouští do forem, kde se odpařuje nadouvadlo vlivem exotermické reakce, čímž se dosáhne napěnění směsi a následnému vyplnění dutin ve formě. Zároveň je však nutné, aby měl vzduch nacházející se ve formě možnost uniknout vhodnými otvory k tomu uzpůsobenými. Z vláčných integrálních pěn pak vznikají výrobky jako tvarované podrážky dámských bot, automobilové nárazníky aj. Z tvrdých lehčených hmot jsou pak vyráběny jádra lyží, fonoskříňky a nábytek [1].



Obr. 1. Průřez integrální polyuretanovou pěnou [1]

1.2 Základní charakteristika polyuretanů

Struktura, která je pro polyuretany typicky porézní, je díky tomuto vnitřnímu uspořádání otevřených buněk – pórů velmi specifická. Porosita obecně má velký význam pro pohltivost akustické energie, ale i pro tepelné chování. V případě vedení tepla jsou výhodné uzavřené póry, které potlačují fluktuaci částic vzduchu uvnitř pórů. Struktura polyuretanů je definována zejména v rámci:

- Hustoty
- Porosity
- Velikosti pórů
- Velikosti stěn

1.2.1 Hustota pěnových polymerů

Faktická hustota (nebo objemová hmotnost), je veličina, kterou charakterizujeme relativní obsah pevné látky a plynné fáze v materiálu, je základním morfologickým parametrem pěnových polymerů, a souvisí se všemi příslušnými fyzikálními vlastnostmi pěnových polymerů, jako je pevnost, termo-fyzikální vlastnosti, a elektrické vlastnosti [3].

Moderní buněčná polymerní technologie umožňuje výrobu pěnového plastu s velmi širokým rozpětím hustot ρ , od 3 - 900 kg.m⁻³, odpovídá vyplnění plynem v rozsahu 10 % až 99,5 %, tato hodnota se značí G. Hodnota ρ se používá k rozdělení všech lehčených plastů do pěti tříd [3]:

- velmi lehké ($g = 3 - 50 \text{ kg.m}^{-3}$),
- lehké ($g = 50 - 200 \text{ kg.m}^{-3}$),
- střední ($g = 200 - 500 \text{ kg.m}^{-3}$),
- těžké ($g = 500 - 700 \text{ kg.m}^{-3}$),
- supertěžké ($g > 700 \text{ kg.m}^{-3}$).

Můžeme bezpečně odhadnout, že většina z fyzikálních vlastností polymerních pěn je přímo spojena s hustotou. Jedná se o velmi obecný předpoklad, který platí jak pro elastické tak pro pevné pěny [3].

Obecně platí, že hustota se stanoví podle skutečné hustoty polymerní fáze a plynné fáze. To souvisí s vyplněním pěny plynem, jako v rovnici 10 [3]:

$$\rho = \rho_p(1 - G) + \rho_g \quad (10)$$

kde ρ_p je opravdová hustota fáze polymeru, a je rovna poměru celkové hmotnosti materiálu a rozdílu mezi celkovým objemem materiálu a objemem buněk, ρ_g je hustota plynu v buňkách, a G je vyplnění plynem tzv. poréznost pěnové hmoty, která se rovná poměru objemu buňky k celkové hmotnosti materiálu. V praxi se hustota plastových pěn vypočítá jako poměr m hmotnost vzorku a geometrické objemu V_0 [3]:

$$\rho = m/V_0 \quad (11)$$

kde je hustota dána v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Vztah mezi hustotou a střední průměrem buněk je popsán hyperbolickou funkcí, odvozenou analyticky z následujícího geometrického modelu [3].

Pokud si představíme pěnovou plastickou strukturu složenou výhradně z kulovitých buněk o průměru d uspořádaných v kubickou mříž, pak pro tloušťku stěny b a hmotnost polymeru (m_c) na jednu buňku je dána rovnice 12 [3]:

$$m_c = \rho_p \left[\frac{4\pi}{3} \left(\frac{d + \delta}{2} \right)^3 - \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d - \delta}{2} \right)^3 \right] = \frac{\pi}{3} (3d^2\delta + \delta^3) \rho_p \quad (12)$$

kde ρ_p je hustota polymerní fáze.

Počet buněk (N_b) v kubickém prostoru o straně b je $N_b = (b/d)^3$. Hmotnost polymeru v tomto prostoru, pak může být vyjádřena rovnicí 13 [3]:

$$m = N_b m_c = \frac{4}{3} (3d^2\delta + \delta^3) (b/d)^3 \rho_p \quad (13)$$

1.2.2 Hustota a velikost pórů

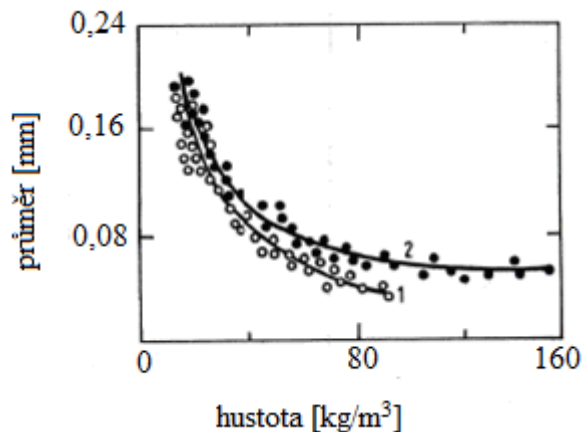
Od objemu $V = b^3$, je hustota pěnových plastů dána rovnicí 14 [3]:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\pi}{3} (3d^2\delta + \delta^3) (b/d)^3 \frac{\rho_p}{b^3} = \pi \frac{(3d^2\delta + \delta^3)}{3d^3} \rho_p \quad (14)$$

a bez ohledu na δ^3 konečně máme rovnici 15 [3]:

$$\rho = \frac{\pi\delta\rho_p}{d} \quad (15)$$

Pokud budeme předpokládat, že δ je konstantní, rovnice 15 dává dobré přiblížení vztahu mezi hustotou a středním průměrem buněk u malých rozsahů hustot. Děj v rovnici 15 (upravený) při konstantní tloušťce stěny $\delta = 1 \mu\text{m}$ pro dvě polystyrenové pěny dává graf zobrazený na obr. 2. Vypočtené hodnoty odchylek od experimentálních výsledků jsou v tomto případě v rozmezí 22 až 28 % [3].



Obr. 2. Vztah mezi středním průměrem, d , makro buněk (konstantní tloušťkou stěny, $\delta = 1 \mu\text{m}$) a hustoty pěnového polystyrenu ρ . Křivky vyneseny z rovnice 15. 1. stupeň PSB, SSSR 2. stupeň PSB-S, SSSR d_{cr} δ_{cr} ρ_p [3]

Hustota a tloušťka stěny

V širokém rozsahu hustot není tloušťka stěny stejná, ale je lineární funkcí hustoty v rovnici 16 [3]:

$$\delta = \delta_{cr}(1 + \alpha\rho) \quad (16)$$

Kde δ_{cr} je kritická (minimální) tloušťka stěny, která je ještě schopna podporovat buněčnou strukturu a je specifickým parametrem pro dané polymeru [3].

Dosazením rovnice 16 do rovnice 15, a vzhledem k tomu, že $d_{cr} = \pi \cdot \alpha \cdot \delta_{cr} \cdot \rho_p$ pak dostaneme rovnici 17 [3]:

$$\rho = \frac{\pi \delta_{cr} \rho_p}{d - d_{cr}} \quad (17)$$

Pro stabilní pěnové struktury, musí být základní buněčné parametry, jako je průměr a tloušťku stěny v určitém rozsahu. Tyto, omezující podmínky pro rovnice se dají vypočítat podle následujících nerovností [3].

$$d_{cr} \leq d \leq d_{max}$$

kde d_{cr} a d_{max} jsou minimální a maximální průměry buněk, respektive stabilní kapalné polymerní pěny [3].

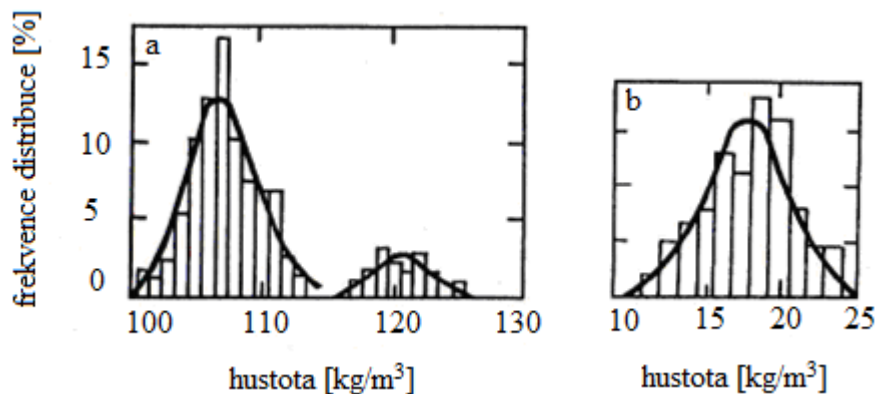
Experimentální stanovení průměru buněk závisí nejen na typu výchozí polymeru, ale také na složení nadouvadla a pěnicím procesu. A tak, kritické parametry buněčných struktur polystyrénových pěn dělíme do dvou následujících stupňů (ty samé jako na Obr. 2.) [3].

Tab. 2. Dělení kritických parametrů buněčných struktur [3]

| Parametry | d_{cr} [μm] | d_{max} [μm] | δ_{cr} [μm] |
|-------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| PSB, USSR | 26 | 215 | 0,85 |
| PSB-S, USSR | 10 | 140 | 0,40 |

Zdánlivá hustota je průměrná hodnota, protože hustota povrchové vrstvy může být až 3-10 krát větší než je průměrná hodnota (Obr. 3). Hustota není konstantní v objemu plastového

pěnového bloku, je změna je patrná jako funkce hloubky. Nerovnoměrnost v rozložení hustoty v pěnových plastech je závislé na podmínkách zpracování. A tak, v roztaveném polymerním bloku, může mít nerovnoměrnost v rozložení teplot za následek různé distribuce rozkladu produktů z nadouvadla napříč různými částmi roztaveného polymeru [3].



Obr. 3. Rozdělení hustoty v pěnách: a) polyuretan - 1. křivka vnitřní vrstva (jádro) 2. křivka povrchová vrstva b) polystyren [3]

1.2.3 Mikro póry a tloušťka stěn

Již byly zmíněny fyzikálně-chemické podmínky pěnicího procesu a kritéria pro pěnové stabilitu stanovení horní a dolní hranice velikosti buňky. V závislosti na typu polymeru, složení a procesních podmínkách pěnění, může být horní limit velikosti velký několik milimetrů. Až do nedávné doby jsme si mysleli, že minimální velikost pro buňku plastického polymeru musela být přinejmenším několik desítek mikrometrů (Tab. 3.). Nicméně, s posledních pozorování pomocí skenovací elektronové mikroskopu a metodou penetrace rtuť, byly v plastové pěnové struktuře zjištěno, že dutiny obsahující plyn mají minimálními rozměry menší než mikrometr, což je dva nebo tři řády menší než nejmenší buňky pozorovány dříve v buněčných polymerech [3].

Tab. 3. Makro strukturní parametry pěn [3]

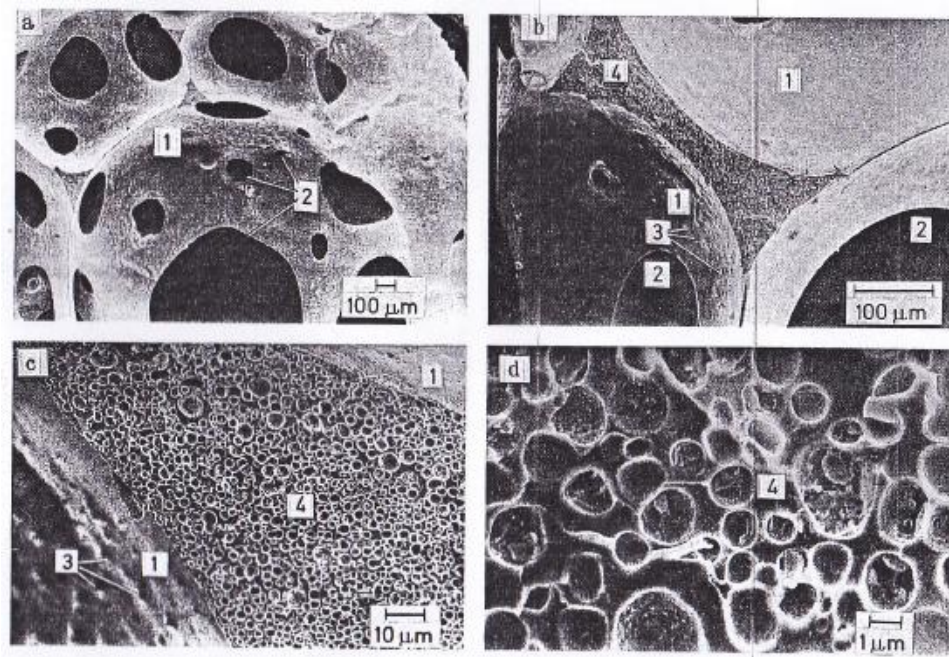
| Typ pěny | ρ_p hustota polymeru [kg/m ³] | ρ hustota pěny [kg/m ³] | d průměr buňky [mm] |
|------------------------------------|--|--|---------------------|
| Polystyren | 1050 | 160-220 | 0,02-0,2 |
| Polyvinylchlorid | 1380 | 50-220 | 0,1-0,3 |
| Polyuretan | 1200 | 50-500 | 0,1-0,5 |
| Fenol-formaldehydové pryskyřice | 1200 | 20-200 | 0,2-0,5 |
| Močovino-formaldehydové pryskyřice | 1450 | 8-20 | 0,2-0,5 |

Je možné nalézt, morfologické struktury, které byly nazvány mikro buňky a izolovány a předvedeny mikrosféry a jejich konglomeráty (nebo okna) pomocí rastrovací elektronové mikroskopie makromolekulárních stěn na vzorku fenolické pěny. Později byly mikro buňky nalezeny i v oligomerní pěnách jiných druhů, jako (polyuretanové pěny a vícesložkové plasty pěny na bázi polyuretanu-fenolické oligomery). V rámci zkoumání, polyuretanových pěn optickou mikroskopií procházejícím světlem tenkých částí, můžou být pozorovány 2 skupiny buněk, makro buňky z několika málo desítek až několika stovek mikrometrů, a mikro buňky ve velikosti od 0,01 až po 1 μ m, druhý typ byl asi o 2 nebo 3 řádů početnější než makro buňky. Tato struktura distribuce je možná, protože buňky v pění se skládají ze dvou nebo více skupin, na rozdíl od jiných buněk, které jsou odlišné, co se týče počtu a velikosti [3].

Tyto výsledky (Obr. 4.) vedou k závěru, že mikro buňky jsou nejčastěji se vyskytující formou plynu v dutinách v pěnových plastech na bázi reaktivních oligomerů. Dalším charak-

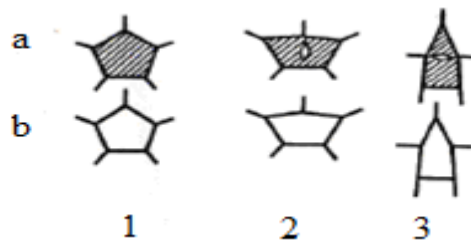
teristickým znakem mikro buněk je, že jejich celková velikost je prakticky nezávislá na hustotě pěny, přičemž se hustota pohybovala od 40-500 kg.m⁻³, jejich průměrná velikost je od 1 do 0,5 μm. Třetí rysem mikro buněk je jejich tvar: většina mikro buněk jsou kulovitá, zatímco většina makro buněk jsou oválné [3].

Pěnové plasty, které mají pouze mikro buňky v jejich struktuře, mohou být vyrobeny pomocí speciálních technik, a to jak z termoplastů tak teplem polymerní matice.



Obr. 4. Buněčné struktury tuhé fenolické pěny pod rastrovacím elektronovým mikroskopem. 1 - makro buňky; 2 - makro díry v makro buňkových stěnách; 3 - mikro díry v makro buňkových stěnách; 4 - mikro díry v žebrech makro buněk. [3]

Když se zvýší velikost buňky, pevnost v tlaku plastových pěn při vysokém tlakovém zatížení klesá, komprese flexibilních nezesíťovaných pěn zahrnuje ohýbání žebér a protahování stěn (viz Obr. 5.). Při dalším stlačení, mají doprovodná tahová napětí tendenci k prasknutí buněčné stěny, což způsobuje tvar podobný oknu. Trhání buněčné stěny však neproběhne, nicméně místo toho se trhají žebra, a proto materiály tohoto typu mohou podstoupit větší deformace než nezesíťované materiály [3].



Obr. 5. Změna tvaru buňky v pružných polyuretanových pěnách, a) nezesíťované, b) zesíťované: 1 - počáteční stav, 2 – stlačení, 3 – napínání [3]

1.3 Základní posuzování polyuretanů

Polyuretany lze charakterizovat v závislosti na hustotě podle těchto veličin:

- Akustické vlastnosti – koeficient zvukové pohltivosti
- Mechanické vlastnosti – mez pevnosti, napětí na deformaci, modul pružnosti

1.3.1 Koeficient zvukové pohltivosti a odrazivosti

Schopnost pohlcovat akustickou energii uvnitř struktury polyuretanu vychází z toho, že porézní struktura sama o sobě disponuje vysokým procentem volného prostoru uvnitř média. Díky tomuto poměru mezi pevnou částí PUR a vzduchem obsaženým uvnitř porézní struktury dochází k tomu, že částice vzduchu mezi sebou vytvářejí tření (teplo) a toto tření dále přenáší na stěny porézní struktury PUR. Tato přeměna mechanické energie na tepelnou energii je velmi důležitá s ohledem na výběr materiálu pro pohltivost a tlumení zvuku v požadovaném frekvenčním pásmu.

Jestliže akustická vlna dopadne na povrch např. pevného média, pak se část energie vlnění přeměňuje na jiný druh energií (nejčastěji tepelnou a také dané médium rozkmitá) a zbytek akustické energie se od média odrazí [4,5].

Akustická absorpce (pohltivost) je definována jako podíl akustické energie absorbované povrchem k energii dopadající na povrch čili rozhraní a je definována součinitelem pohltivosti α dle vztahu [4, 5]:

$$\alpha = \frac{E_{\text{ABSORBOVANÁ}}}{E_{\text{DOPADAJÍCÍ}}} = 1 - R^2, \quad (18)$$

kde R (-) je *součinitel odrazu*, je definován jako podíl akustických tlaků odražené a dopadající akustické vlny.

Součinitel pohltivosti je v rozmezí $0 \leq \alpha \leq 1$, přičemž $\alpha = 0$ odpovídá nulové pohltivosti, $\alpha = 1$ maximální pohltivosti rozhraní a daného materiálu. Při $\alpha = 1$ je veškerá energie vlnění pohlcována rozhraním, tedy povrchem média do struktury [4, 5].

Absorpce povrchu různých materiálů je funkcí mnoha parametrů, včetně efektivní drsnosti povrchu, jeho pórovitosti, poddajnosti a v některých případech i jeho rezonančních vlastností [4, 5].

Pro kolmý dopad vzdušné akustické vlny na rozhraní s akustickou impedancí Z_1 (podíl akustického tlaku a normálové složky rychlosti částic na rozhraní) je součinitel odrazu dán vztahem [4, 5, 7 a 9]:

$$R = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (19)$$

Kde $Z_0 = \rho_0 \cdot c_0$ je charakteristická impedance vzduchu, ρ_0 je hustota vzduchu, c_0 je rychlost zvuku ve vzduchu.

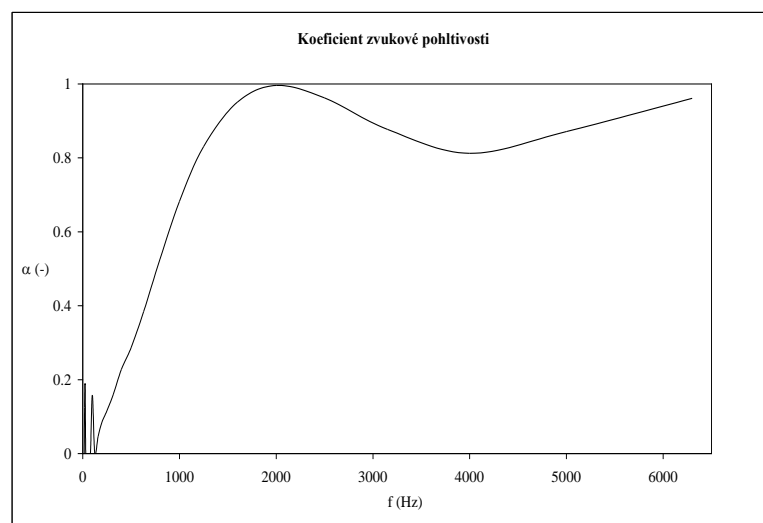
Vyhodnocení koeficientu zvukové pohltivosti je ukázáno na následujícím obrázku s jednotlivými hladinami α pro vyhodnocení pohltivosti. Hodnoty, kterých nabývá koeficient α bývá rozdělen do těchto hladin pohltivosti [4, 9]:

$\alpha = 0,4 - 0,6$; hodnocen jako dostačující akustická pohltivost

$\alpha = 0,6 - 0,8$; hodnocen jako dobrá akustická pohltivost

$\alpha = 0,8 - 1$; hodnocen jako velmi dobrá akustická pohltivost materiálu

Koeficient zvukové pohltivosti je ovlivňován strukturou materiálu. V praxi to znamená, že pokud je materiál hladký a tvrdý, tak koeficient zvukové pohltivosti velmi nízký, zpravidla $\alpha_{\max} = 0,1$. V takovém případě je struktura výhodná pro koeficient zvukové odrazivosti a zvuk téměř nepohlcuje, ale odráží. Pokud je materiál naopak měkký a porézní, tak jako je například pěnovka, je koeficient zvukové pohltivosti různě vysoký a to až do výše $\alpha_{\max} = 1$ v závislosti na tloušťce a frekvenci. V tomto případě je většina zvuku pohlcena v porézní struktuře materiálu [4, 6 a 9].



Obr. 6. Koeficient zvukové pohltivosti [15]

Abychom mohli lépe sledovat vlastnosti pohltivých látek, charakterizujeme si veličiny, pomocí kterých tyto vlastnosti definujeme. Co se děje s akustickou energií při dopadu na nějakou překážku nejlépe ukazuje schéma na (Obr. 7.) Akustický výkon dopadající na 1m^2 stěny, označený jako intenzita zvuku I_0 se rozdělí na tyto části [4, 6 a 9]:

I_1 – intenzita zvuku vlny odražené,

I_2 – intenzita zvuku vlny pohlcené,

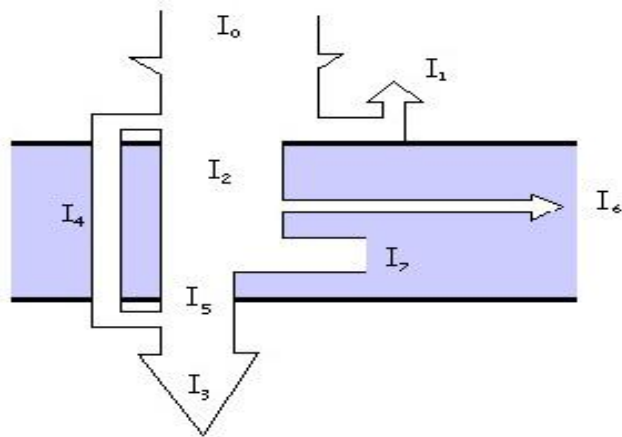
I_3 – intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem,

I_4 – intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry,

I_5 – intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru,

I_6 – intenzita zvuku vlny, která je vedena ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí,

I_7 – intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo.



Obr. 7. Rozdělení akustického výkonu na jednotlivé složky [15]

Činitel zvukové pohltivosti α , který jsme definovali výše, je definován poměrem energie I_2 , pohlcené určitou plochou, k energii I_0 , která na tuto plochu dopadá, což je vyjádřeno výrazem [4, 5 a 8]:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0} \quad (20)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že činitel pohltivosti je bezrozměrné číslo a jeho velikost se pohybuje v intervalu 0 až 1 [4, 5 a 8].

Podobným způsobem můžeme definovat činitele zvukové odrazivosti β [4, 5 a 8]:

$$\beta = \frac{I_1}{I_0} \quad (21)$$

a činitele průzvučnosti τ :

$$\tau = \frac{I_3}{I_0} = \frac{I_4 + I_5}{I_0} \quad (22)$$

Toto rozdělení dopadající akustické energie na jednotlivé složky vyhovuje v oblasti prostorové akustiky. Při navrhování zvuko izolačních konstrukcí je však třeba znát podíl akustické energie přeměněné ve stěně na teplo. Zavedeme proto další veličinu ε [4, 5 a 8]:

$$\varepsilon = \frac{I_7}{I_0} \quad (23)$$

který vyjadřuje podíl mezi energií přeměněnou ve stěně na teplo a energií na stěnu dopadající [4, 5 a 8].

V (Obr. 7.) je vyznačena hodnota I_6 v případě zvuko izolačních krytů, jejichž stěny jsou z ocelového plechu, prakticky rovna nule. Potom můžeme na základě platnosti zákona zachování energie psát vztah [4, 5, 8 a 9]:

$$\beta + \tau + \varepsilon = 1 \quad (24)$$

Z porovnání uvedených vztahů dále vyplývá, že:

$$\alpha = \varepsilon + \tau \quad (25)$$

Pro různé materiály lze měřit libovolně koeficient zvukové pohltivosti, nicméně pouze některé mají vysoký koeficient zvukové pohltivosti a tudíž jejich struktura poskytuje potřebnou absorpci akustické energie. Následující obrázek znázorňuje složky akustické energie v místě dopadu na pórovitý nebo vláknitý materiál [2, 12].

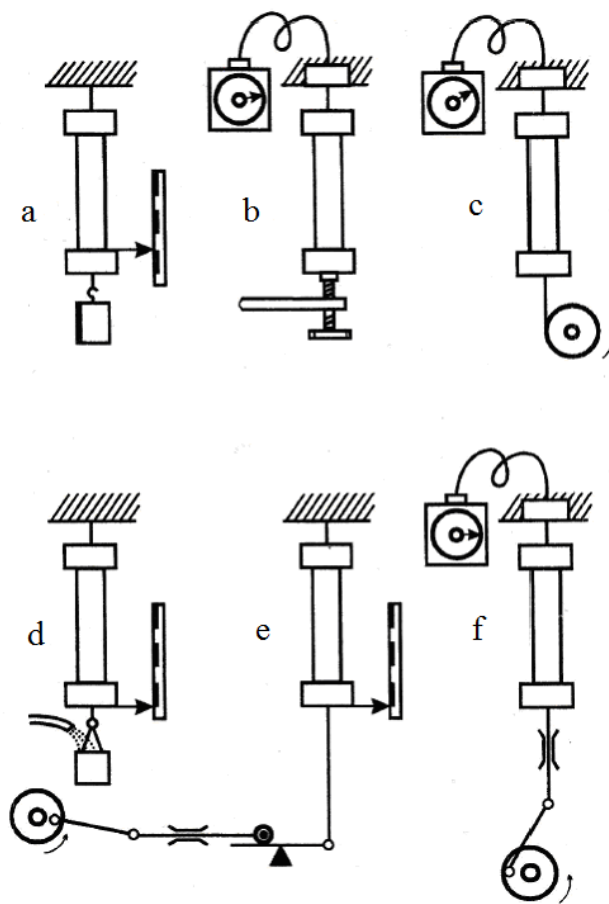
1.3.2 Mechanické vlastnosti

Jestli-že je třeba popsat mechanické chování polymerů je nutné nejprve nalézt vztahy mezi zevními silami a odezvou materiálu. Protože účinek síly je závislý na proporcích tělesa je běžné vztáhnout sílu na jednotku plochy, nebo-li zobrazit ji jako napětí a změnu proporcí nebo úhlu pak vztáhnout na jednotku délky a vyjádřit ji jako deformace. Standardně jsou přetvoření a napětí považovány za symetrické tenzory, a každý z nich je dále rozdělen na 6 nezávislých složek, tudíž i triviální vztah mezi nimi (Hookův zákon) by bylo nutno popsat 36 koeficienty. Bylo ovšem zjištěno že i pro nejobecnější případy trojklonných krystalů a charakterizaci lineárního chování materiálů postačí 21 nezávislých modulů. Ukázkou typických ortotropních materiálů jsou extrudovaný profil z termoplastu, jednosměrný vyztu-

žený laminát a dřevo. Všechny tyto materiály jsou typické třemi vzájemně kolmými osami, které po 180° rotaci kolem jejich osy mají v určitém směru stejné vlastnosti jako ve výchozí poloze. U takovýchto materiálů pro jejich charakteristiku deformačního chování postačí moduly 4. Pro ukázkou mohou být dva tahové a dva smykové. Například popis izotropního materiálu je dostatečný pomocí dvou modulů, a to třeba smykového modulu G a modulu pružnosti v tahu E (Youngův modul). Následné vynásobení daného průřezu tělesa a modulu pružnosti je známo jako tuhost. (Obecně je tuhost považována za možnost materiálu odolávat deformaci.) U polymerů jsou, ale veškeré moduly časově závislé [2].

Třídění mechanického hodnocení experimentálních metod polymerů je možné podle rozdílných aspektů. Za prvé je možno je dělit podle velikosti deformace a to na lineární, nelineární a destruktivní metody. Dalšími kritérii podle, kterých se mohou experimenty dělit je časový průběh a to statický nebo dynamický dále je možno vycházet z deformační nebo napěťové geometrie (zkoušky jednoosé, tahové, tlakové, smykové, ohybové, víceosé aj.). Ovšem nejčastěji používaná geometrie, která se uplatňuje ve většině teorií pevnostního chování, vychází z namáhání jednoosým tahem. Tato se používá nejen pro strukturní srovnatelnost ale i pro poměrnou experimentální jednoduchost tohoto uspořádání. Vycházející z rozsahu deformací nám předkládá tahová zkouška informace o pevnostním (lomovém) chováním, lineárním deformačním chováním a nelineární deformaci [2].

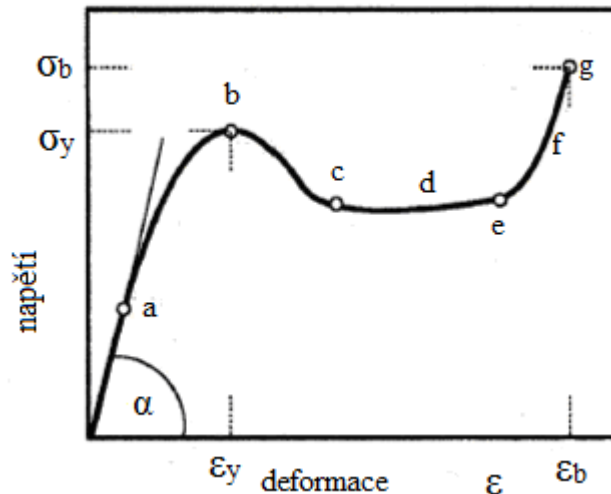
Základní režimy tahové zkoušky jsou schematicky znázorněny na Obr. 8. První z nich je creepový experiment (zkouška tečení, Obr. 8. a). Zkušební těleso je při něm vystaveno stálému tahovému napětí (případně stálému zatížení) a registruje se časový průběh deformace, tj. creepová křivka. Při dostatečně 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. 8. b). Zkušební těleso se podrobí konstantní deformaci a registruje se pokles (relaxace) napětí s 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. 8. 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. 8. d), například tak, že je vzorek zatěžován nádobou, do níž danou rychlostí přitéká voda [2].



Obr. 8. Znárodnění základních režimů tahové zkoušky: a) creep, b) relaxace napětí, c) zkouška napětí-deformace při konstantní rychlosti posuvu d) táž zkouška při stálé rychlosti zatěžování, e) únavové namáhání mezi dvěma hodnotami síly [2]

Mechanické charakteristiky se časem zhoršují díky namáhání polymerního materiálu a to až do bodu kdy se jeho pevnost sníží na úroveň provozního namáhání a těleso se poruší. Tento děj se jmenuje únava. U polymerů rozeznáváme dva druhy únavy a to: dynamickou únavu, která je charakteristická proměnným namáháním mezi dvěma úrovněmi síly popřípadě mezi dvěma hodnotami protažení a statickou únavu typickou neměním zatížením polymerů. Z toho vyplývá, že statická únava je to samé jako nelineární creep. Životnost u dynamického namáhání je udávána počtem N cyklů do porušení. Závislost mezi amplitu-

dou napětí a životností N v logaritmických souřadnicích nám formulují wohlerovy křivky, které jsou základní únavovou charakteristikou [2].



Obr. 9. Co lze vyčíst z tahové zkoušky: a) mez úměrnosti, b) horní mez kluzu, c) dolní mez kluzu, d) přirozený dloužící poměr, e) vyčerpání plasticity, f) oblast zpevnění (druhá lineární oblast), g) přetržení (lom). Souřadnice bodu b), a g) udává jí napětí na mezi kluzu σ_y , deformaci na mezi kluzu ϵ_y , pevnost v tahu σ_b , tažnost (deformaci při přetržení) ϵ_b . Směrnice ke křivce v počátku je Youngův model pružnosti, $\text{tg } \alpha = E$, a plocha uzavřená pod křivkou [2]

Dnes je již možné na moderních trhacích strojích provést jakýkoliv z režimů na (Obr. 8.) a také mnoho jiných. Fungují na principu uzavřené smyčky, jež je tvořena řídicí jednotkou, snímačem síly, testovacím tělesem a snímačem deformace. Posun mobilních čelistí je řízen elektronickou řídicí jednotkou, která ustavičně porovnává reálnou úroveň síly (nebo deformace) se zadanými hodnotami a podle toho koriguje posun. Významné je, že deformaci je možno snímat a ovládat extenzometrem ve specifické stanovené části testovaného tělesa. (třeba u vrcholu určené trhliny) [2].

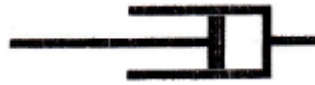
Na (Obr. 9.) je vidět pracovní diagram což je záznam tahové zkoušky v souřadnicích. Z něhož je možné vyčíst několik významných charakteristik polymerního materiálu: Youngův modul pružnosti E jako směrnici křivky v počátku ($E = \sigma/\epsilon$), napětí a deformaci na mezi kluzu σ_y , ϵ_y , které se stanoví buď z prvního lokálního maxima na křivce, nebo smluvně z bodu, v němž se křivka začíná zřetelně odchylovat od lineárního průběhu a konečně souřadnice konečného bodu křivky, který odpovídá přetržení zkušebního tělesa, určují pevnost v tahu σ_b a tažnost (deformaci při přetržení) ϵ_b . Plocha pod křivkou napětí-deformace udává deformační práci spotřebovanou až do přetržení tělesa a je mírou houževnatosti materiálu. Důležitou informací je ovšem i samotný tvar křivky, protože udává základní výpověď o materiálu: zda je pevný, křehký, tvárný, houževnatý apod. Průběh pracovního diagramu se změní, když je zkušební vzorek uvolněn a pak znovu zatěžován. Jde o mechanickou hysterezi [2].

Typickou vlastností polymerů při mechanickém namáhání je výrazná závislost na čase a to už od velice malých deformací. Kvůli matematickému popisu deformačního chování bylo nutno sestavit tzv. reologické modely. Tyto modely byly sestaveny sériovou nebo paralelní kombinací ideálních Hookeovských pružin, které jsou charakterizované jedinou hodnotou modulu E (nebo G) Obr. 10. [2]:



Obr. 10. Ideální Hookeovská pružina [2]

a pak také ideálních kapalinových tlumičů charakterizovaných viskozitou η na obr. 11. [2]:



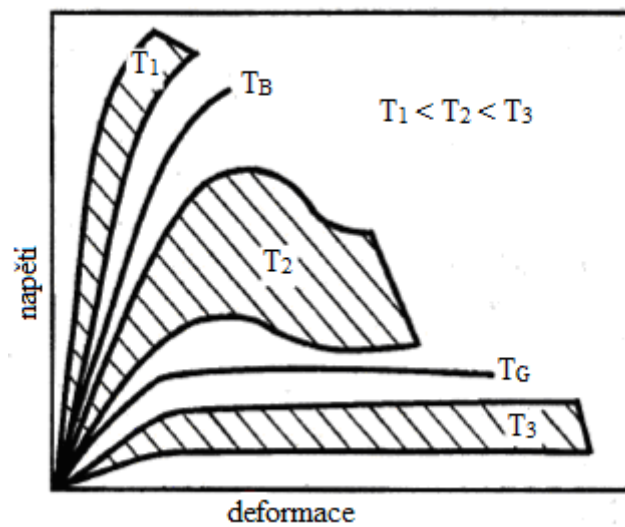
Obr. 11. Ideální kapalinový tlumič [2]

Při větších deformacích ale často není možné chování polymerů popsat pouze jako viskoelastické tj. spojením modelu pružin a tlumičů. Tudíž bylo nutno zavést další, třetí reologický prvek zachycující mechanické (coulombické) tření dvou plošek Obr. 12. [2]:



Obr. 12. Mechanické (coulombické) tření dvou plošek [2]

Tento prvek má chování tuhého spoje a to až do mezního napětí σ , kdy po zdolání napětí je spoj zcela rozvolněn. U tuhých i kapalných materiálů považovaných za reálné je toto chování nazváno plasticita, jež se pak charakterizuje velkými nevratnými deformacemi, nastupujícími až po přesáhnutí konkrétního mezního napětí, u polymerů nazývaného horní mez kluzu. Reálně, ale plasticitu polymerů není možné prostě vysvětlit vzájemným mechanickým třením strukturních elementů, a to z důvodu, že je závislá na teplotě a času. Plasticita polymerů je, ale zřetelně odlišitelná od nelineární viskoelasticity a to díky strukturním mechanismům. Jádrem viskoelasticity jsou konformační transformace makromolekul, popřípadě i přesun těžiště makromolekuly u viskózního toku, naproti tomu mechanismy plasticity jsou drastické a v důsledku vedou k trvalým změnám uvnitř molekulárního uspořádání, které se projeví výraznou orientací nebo krystalickými strukturami (transformací laminární struktury na fibrilární). Typickým je také nerovnoměrný růst plasticity v objemu deformovaného testovacího tělesa. Stopy plastického deformace v materiálu se nenacházejí pouze po průchodu krčku, nýbrž i na ploše lomu v blízkosti vměstku, a to vně puklin a kluzových pásů [2].



Obr. 13. Znázornění vlivu teploty na průběh křivek napětí deformace. Konkrétní obraz se může pro různé polymery měnit, ale obecně platí, že teplota křehnutí T_B leží pod teplotou skelného přechodu T_G . Pro oblast T_1 je typická elastická deformace, v oblasti T_2 převládá plasticita a oblast T_3 je charakteristická viskoelastickým a kaučukovitým chováním [2].

Typy chování se průběžně mění od jednoho ke druhému a to v závislosti na rostoucí teplotě viz (Obr. 13.) U značně nízkých teplot je pro polymery typické chování blíží se Hookeovské pružině a také křehký lom. Počátek rozvoje plasticity je vidět nad teplotou křehnutí T_B a je charakteristický tvárným charakterem lomu. Na konec při přesáhnutí teploty skelného přechodu T_G se chování změní na viskoelastické a to vydrží skoro až do teploty $T_G + 100$. Pokud se teplota ještě zvýší, převládne kaučukovitá oblast a působení teploty a času nemá již takový vliv, naproti tomu výrazně se projeví zasíťování polymerů [2].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 METODY A ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ

Pro stanovení závislosti mechanických vlastností na hustotě polyuretanu, byly vybrány následující zkoušky z oblasti mechanického chování materiálů:

- Měření akustických veličin (koeficient zvukové pohltivosti a odrazivosti)
- Tahová zkouška (mez pevnosti, modul pružnosti, tažnost)

2.1 Akustické veličiny

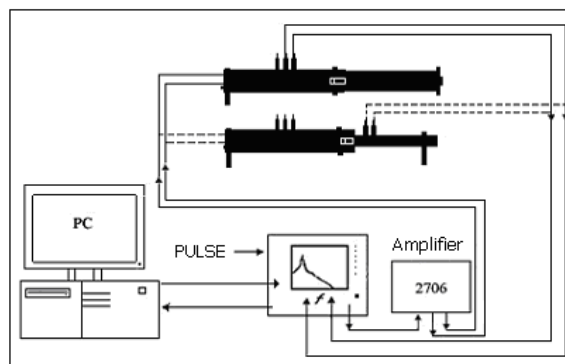
2.1.1 Koeficient zvukové pohltivosti a odrazivosti

Koeficient zvukové pohltivosti lze měřit v laboratorních podmínkách pro jednotlivé druhy tlouštěk vzorků (v našem případě nejčastěji polyuretanů a vybraných skelných vat, pro kombinace jednotlivých tlouštěk polyuretanů, jednotlivé tloušťky se vzduchovou mezerou 1, 2 a 3cm, kombinace jednotlivých tlouštěk se vzduchovou mezerou 1, 2 a 3cm, výslednou sendvičovou strukturu složenou z doporučených materiálů). Celkovou tloušťku vzorku a vzduchové mezery lze vyhodnotit až do 200 mm. Měření se takto provádí na Kundtově impedanční trubici Brüel & Kjaer typ 4206. Impedanční trubice je používána ke zjišťování koeficientu zvukové pohltivosti, koeficientu zvukové odrazivosti pro malé a velké vzorky. Skládá se ze dvou trubic o průměru 100 a 29 mm umožňující měření ve frekvenčním rozsahu od 50 Hz do 1.6 kHz a od 500 Hz do 6.4 kHz. Pro samotnou analýzu využívá dvoukanálový signální multi-analyzátořem PULSE - Brüel & Kjaer typ 3560-B-030 umožňující zpracování a analýzu signálů v reálném čase ve frekvenčním rozsahu od 0Hz do 25,6 kHz. V reálu lze měřit také celkem pět zdrojů, které mohou mít signál veden do analyzátořu. Pro měření akustické pohltivosti jsou nutné dva vstupy do tohoto přístroje, protože dochází k vyhodnocení vstupujícího a odraženého signálu od tělesa, které je umístěno v trubici, a které souhrnně nazýváme vzorkem. V kombinaci s dvou-mikrofonovou trubicí Brüel & Kjaer 4206 se používá k měření absorpčních charakteristik hladkých, pórovitých a sypkých materiálů. Jako zdroj signálu byl použit generátor Bruel & Kjaer typ 2076 [10, 11].



Obr. 14. Multianalýzator PULSE a Kundtova trubice se vzorky [13]

Kundtova impedanční trubice je zapojena do sériového měřícího obvodu, ve kterém jsou mimo impedanční trubici také zesilovač – generátor typ BaK 2706, multi-analýzátor PULSE a počítač. Schématické zapojení tohoto měřícího řetězce je znázorněno na obrázku č. 15.



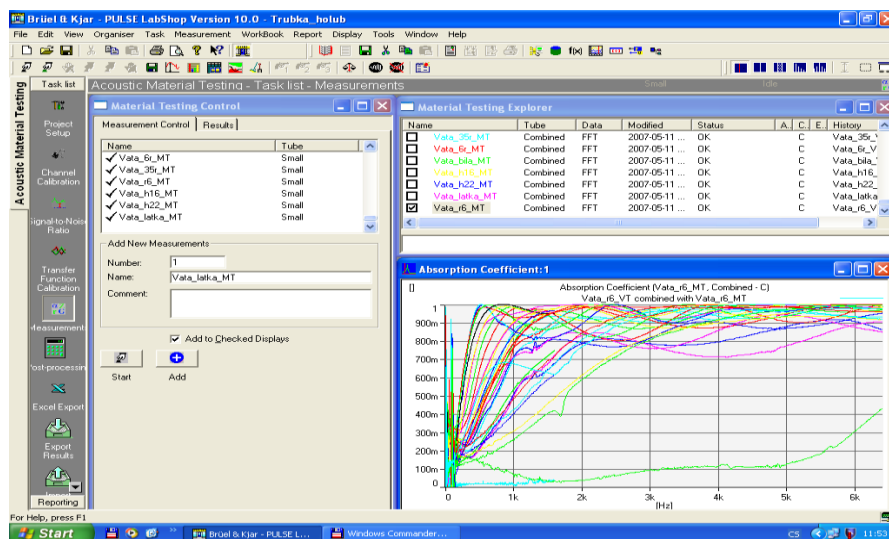
Obr. 15. Měřící schéma Kundtovy impedanční trubice a příslušenství [13]

Metodika měření pro tuhé a porézní látky musí být v souladu s přípravou vzorků, které mají rozměry:

- 100 mm (velká trubice s měřícím rozsahem od 20 – 1600 Hz)
- 30 mm (malá trubice s měřícím rozsahem od 20 – 6400 Hz).

Tyto vzorky se měří ve vodorovné poloze trubice, protože nedochází k žádné změně polohy těchto vzorků. Jiná situace nastává, pokud se měří modifikace práškového nebo sypkého materiálu. V tomto případě se měřit v horizontální poloze nemůže a je nutné trubici položit vertikálně, aby byla zaručena kompaktní tloušťka sypkého materiálu po celém pístu impedanční trubice. Výstupem je výsledek, stejný jako u tuhých vzorků.

Kombinace Kundtovy impedanční trubice s PULSE obstarává z hlediska softwarového prostředí program LabShop, jehož prostředí je znázorněno na následujícím obrázku.



Obr. 16. Prostedí LabShop [13]

Provedené měření a výstup z tohoto měření je graf, který popisuje závislost velikosti koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci. Tyto křivky mají různý charakter s ohledem na:

- tloušťku vzorku
- typ materiálu
- strukturu materiálu
- hustotu materiálu
- vzduchovou mezeru za vzorkem

2.2 Tahová zkouška

Byla provedena dle normy ČSN EN 527, která popisuje jak rozměry, tak metodiku upnutí do čelistí, ale i rychlosti dynamické části měřícího zařízení. Vzorky byly připraveny tak, jak ukazuje následující obrázek 17.



Obr. 17. Vzorky vytvořené dle normy (tvar lopatky) [Vlastní zpracování]

Pro vysekávání byl použit hydraulický lis a čelisti o předepsaném rozměru s pracovní délkou 110 mm dle normy ČSN EN 527-2. Následující obrázek ilustruje konkrétní použitý vysekávací lis.

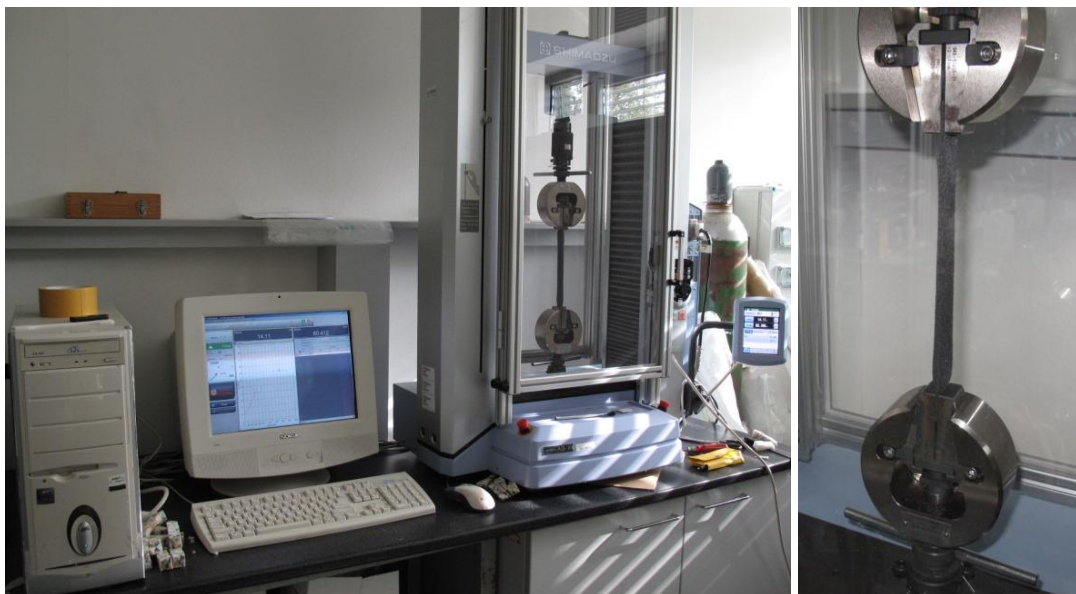


Obr. 18. Vysekávací hydraulický lis [Vlastní zpracování]

Zkouška provedená pro tahovou charakteristiku byly měřeny na trhacím stroji AG-X Shimadzu. V rámci tahové zkoušky byly získány následující výsledky:

- Závislost síly na prodloužení
- Závislost napětí na deformaci
- Modul pružnosti jednotlivých typů polyuretanů

Následující obrázek ukazuje aparaturu, na které bylo provedeno měření. Rychlost posuvu horní dynamické hlavy byla stanovena na 50 mm/min pro měkké polymery.



Obr. 19. Trhací stroj AG-X Shimadzu s použitým PC a detail vzorku v čelistech [Vlastní zpracování]

2.3 Výběr a příprava vzorků

Vzorky z polyuretanu byly připraveny tak, aby splňovaly jednotlivé normy pro získání dat v dané oblasti s ohledem na vlastnosti, které poskytovali:

- Tahová zkouška polyuretanů - norma ČSN EN 527 (vysekávání tělísek o velikosti, které předepisuje norma, tyto jsou zobrazeny na obr. 17)
- Koeficient zvukové pohltivosti dle ASTM E1050-10:2010 (velikosti polyuretano- vých vzorků byly vyseknyty dle požadavku normy o průměru 30 a 100 mm dle požadovaného frekvenčního rozsahu)

Následující tabulka ukazuje rozdělení materiálu dle tloušťky a jejich komerční označení, které bylo používáno pro další orientaci v měření. Označení polyuretanů se značí písmeny a čtyřmi čísly kdy první dvě hodnoty značí hustotu a druhé dvě tuhost pěny.

Například polyuretan **1820**, je popsán jako:

- 18 – značí hustotu 18 kg.m^{-3} (objemová hmotnost dle ČSN 645411, DIN 53420)
- 20 – značí tuhost (odpor při stlačení kPa – 40%, dle ČSN 545411, DIN 53577)

Tab. 4. Firemní označení, pracovní označení a tloušťka testovaných materiálů

| Firemní označení | Pracovní název | Tloušťka h (mm) |
|------------------|-----------------------|-----------------|
| 1820 | A.PUR-ruzova | 4,34 |
| 1820 | B.PUR-orange pink | 18,80 |
| RE 80 | C.PUR-recyklát small | 14,60 |
| RE 80 | D.PUR-recyklát big | 19,62 |
| S3535F | E.PUR-šedá dark small | 9,97 |
| S3535F | F.PUR-šedá dark big | 28,96 |
| 3535 | G.PUR-šedá ligh small | 7,63 |
| 3535 | H.PUR-šedá light big | 17,78 |
| 5015 | I.PUR-nasa small | 5,83 |
| 5015 | J.PUR-nasa big | 20,65 |
| 2130 | K.PUR-white | 9,98 |

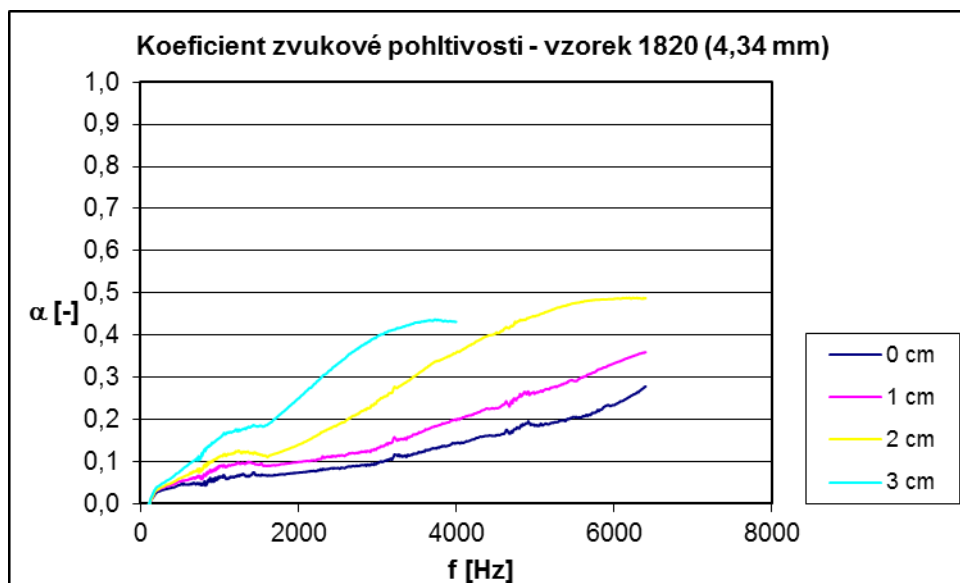
3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V následujících podkapitolách jsou zobrazeny výsledky měření pro vybrané polyuretany pro koeficient zvukové pohltivosti a mechanické tahové zkoušky. Na závěr jsou uvedeny souhrnné výsledky získané z těchto měření.

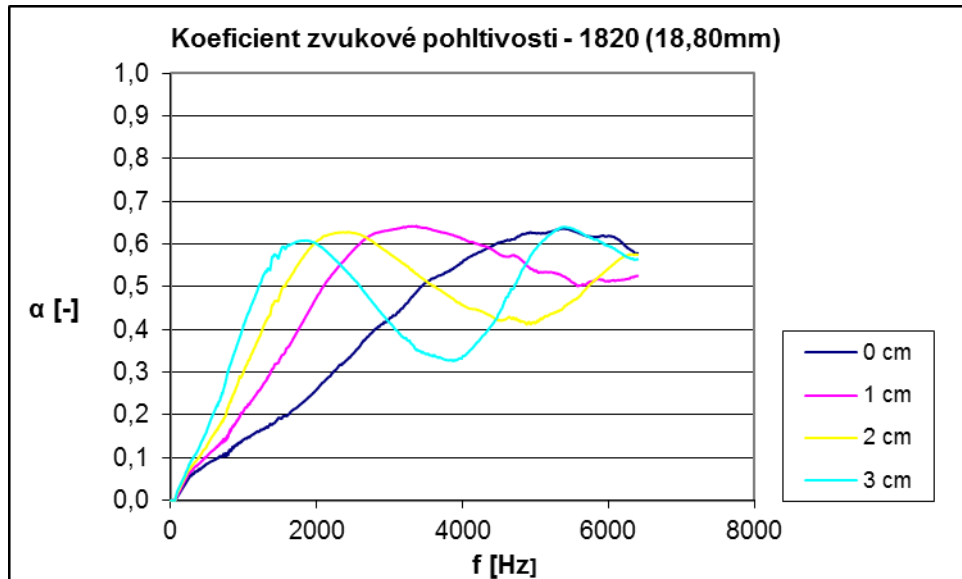
3.1 Koeficient zvukové pohltivosti

Pro základní měření ve frekvenčním rozsahu byly použity všechny vybrané druhy polyuretanu. V rámci měření koeficientu zvukové pohltivosti na Kundtově impedanční trubici bylo provedeno:

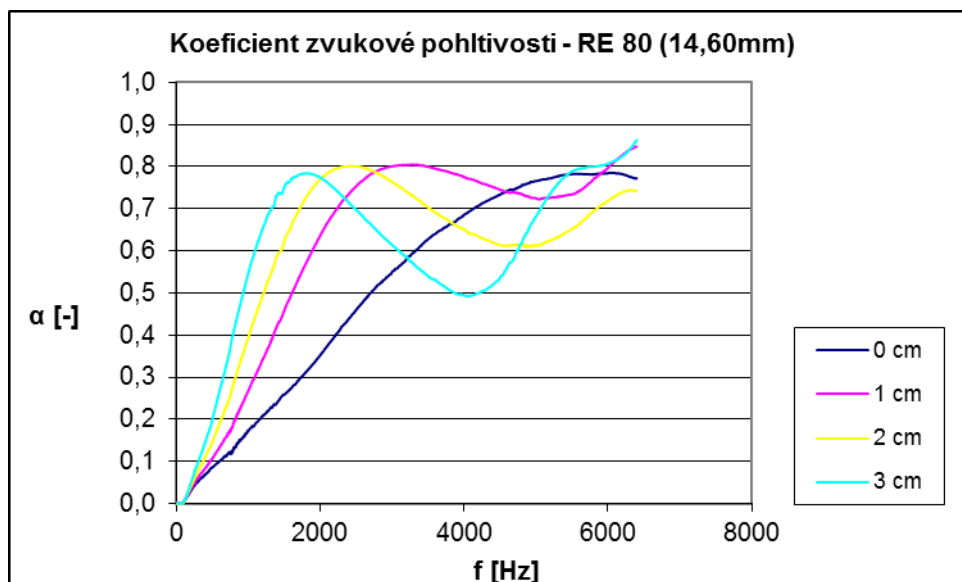
- základní měření bez vzduchové mezery mezi pístem a vzorkem (označeno v grafu jako hodnota 0 cm),
- měření se vzduchovou mezerou mezi vzorkem a pístem (velikosti vzduchové mezery byly 1, 2 a 3 cm, stejně tak jsou označeny i v následujících grafech)



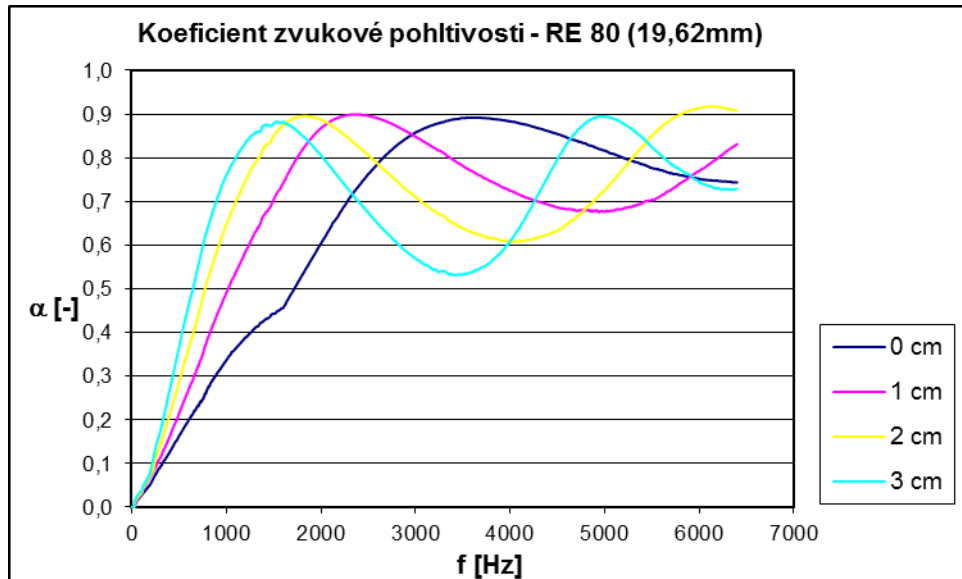
Obr. 20. Koeficient zvukové pohltivosti - 1820 (4,34mm)



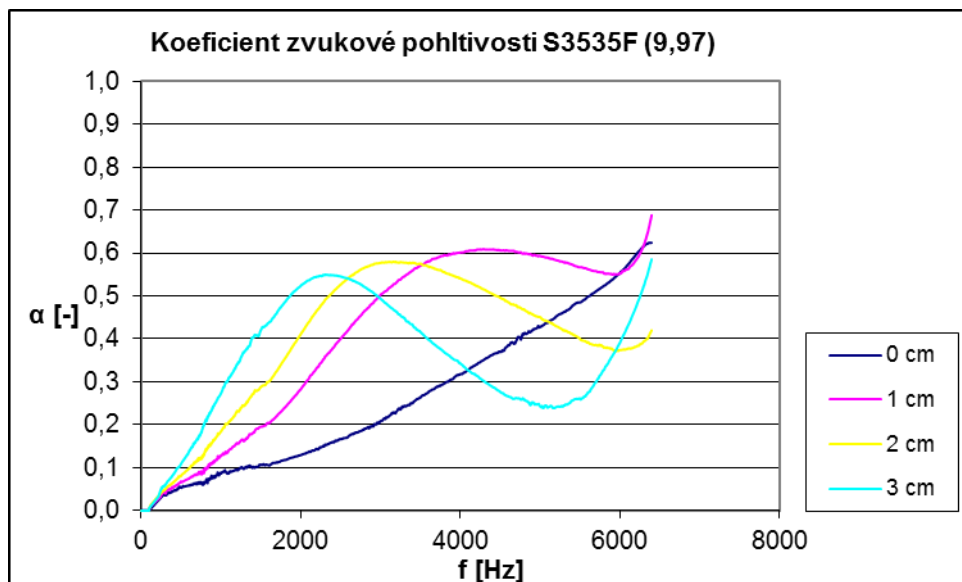
Obr. 21. Koeficient zvukové pohltivosti - 1820 (18,80mm)



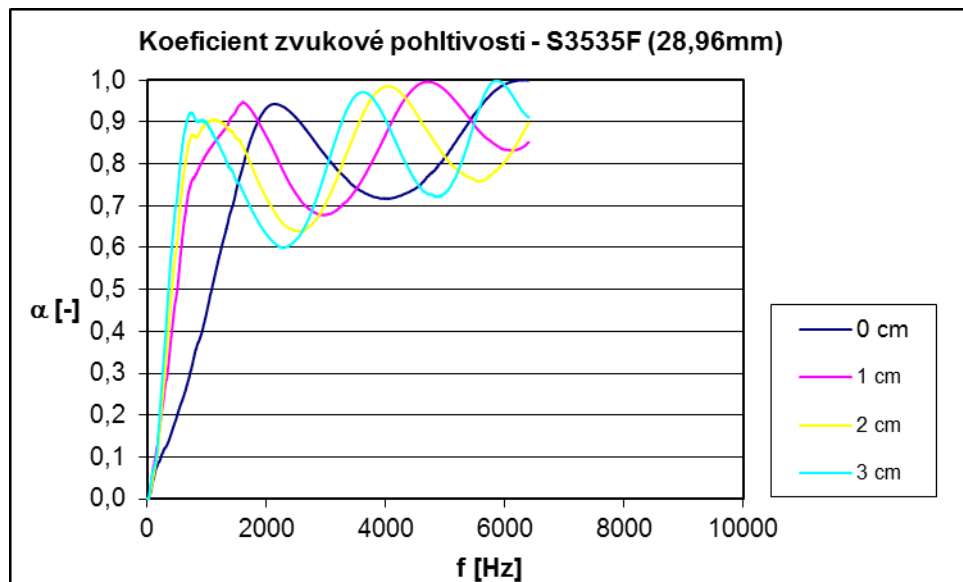
Obr. 22. Koeficient zvukové pohltivosti - RE 80 (14,60mm)



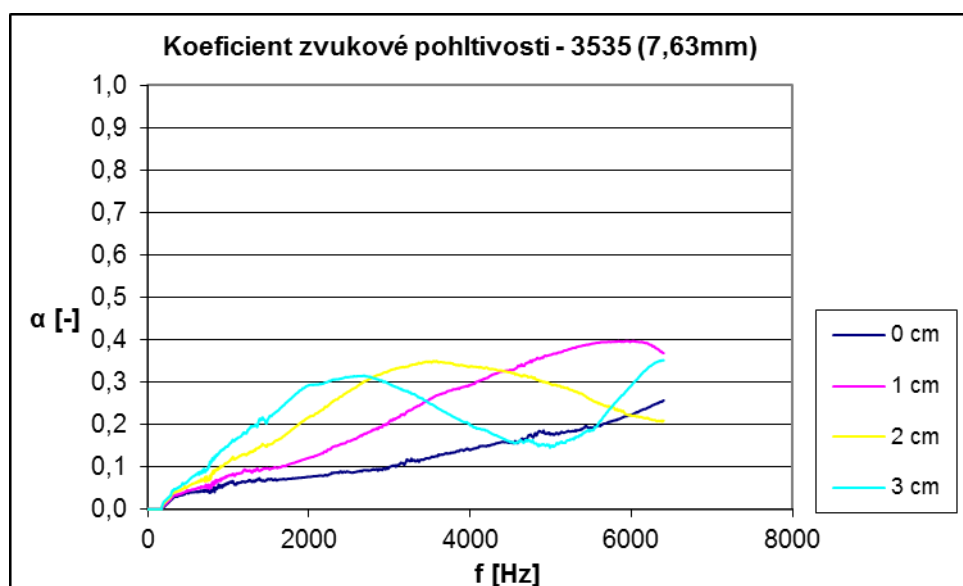
Obr. 23. Koeficient zvukové pohltivosti - RE 80 (19,62mm)



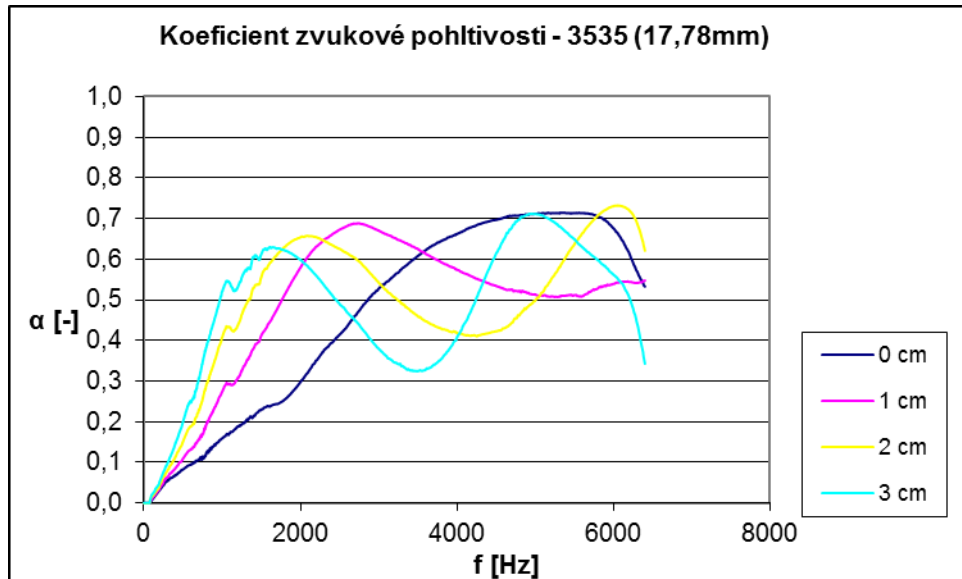
Obr. 24. Koeficient zvukové pohltivosti - S3535F (9,97mm)



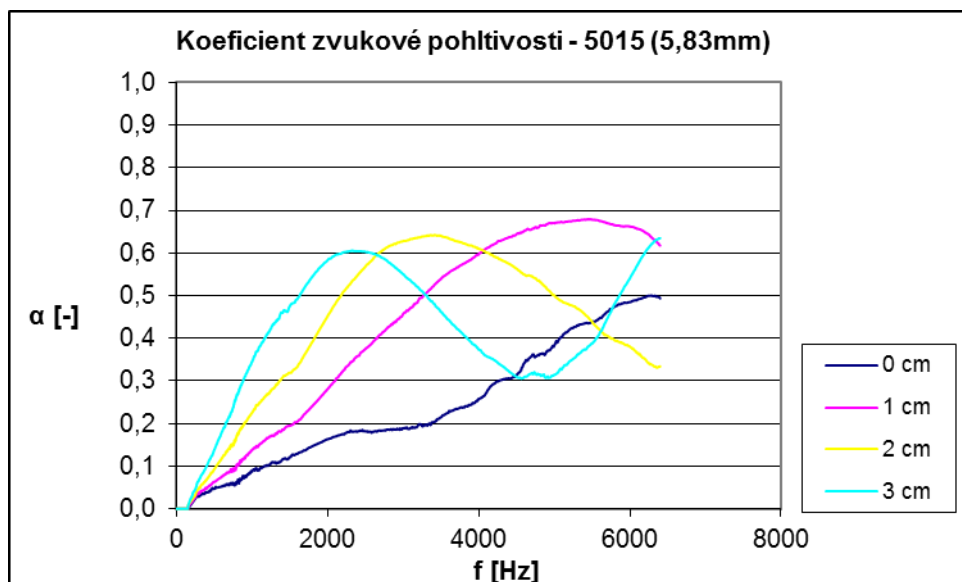
Obr. 25. Koeficient zvukové pohltivosti - S3535F (28,96 mm)



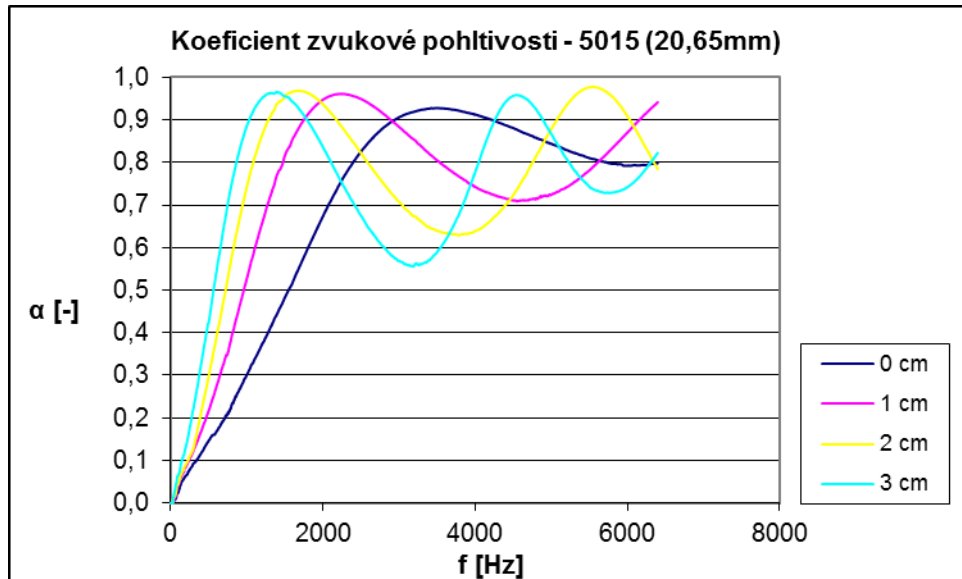
Obr. 26. Koeficient zvukové pohltivosti - 3535 (7,63mm)



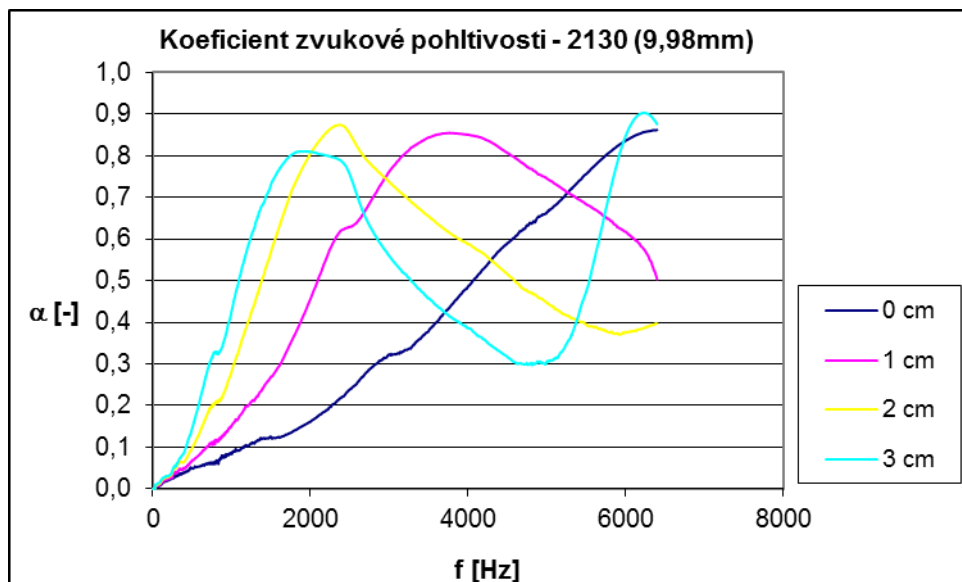
Obr. 27. Koeficient zvukové pohltivosti - 3535 (17,78mm)



Obr. 28. Koeficient zvukové pohltivosti - 5015 (5,83mm)



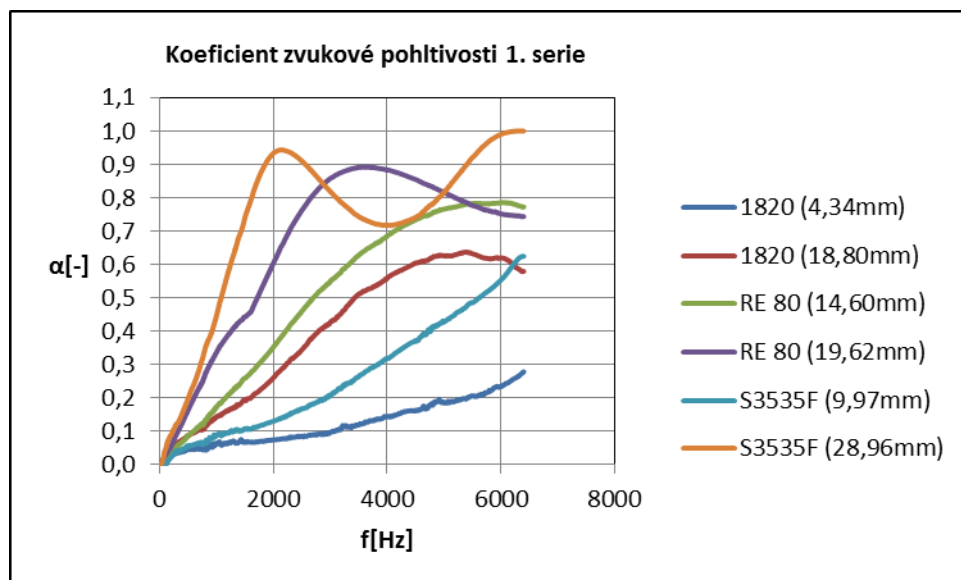
Obr. 29. Koeficient zvukové pohltivosti - 5015 (20,65mm)



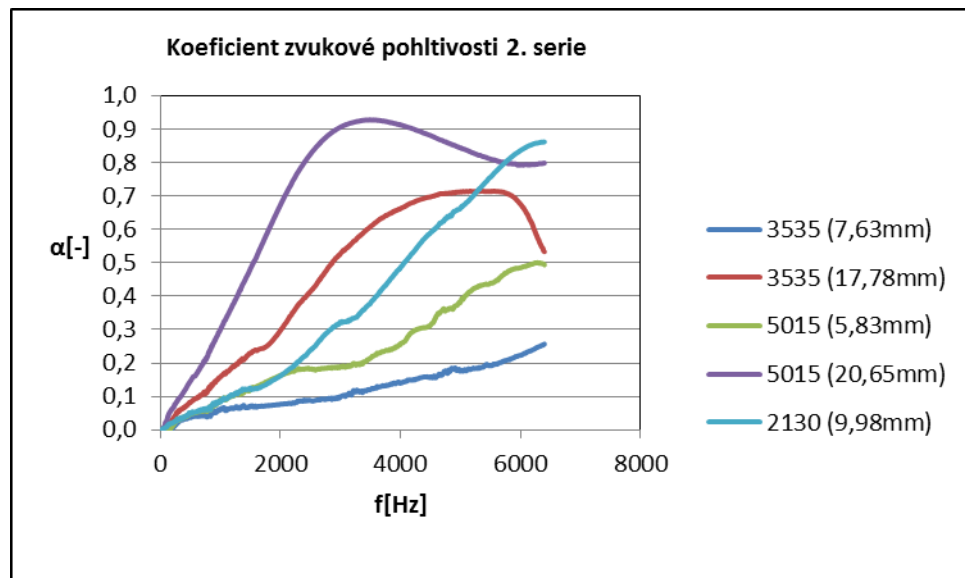
Obr. 30. Koeficient zvukové pohltivosti - 2130 (9,98mm)

Následující dva grafy ukazují závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci bez vzduchové mezery, ale s ohledem na:

- hustotu
- tloušťku



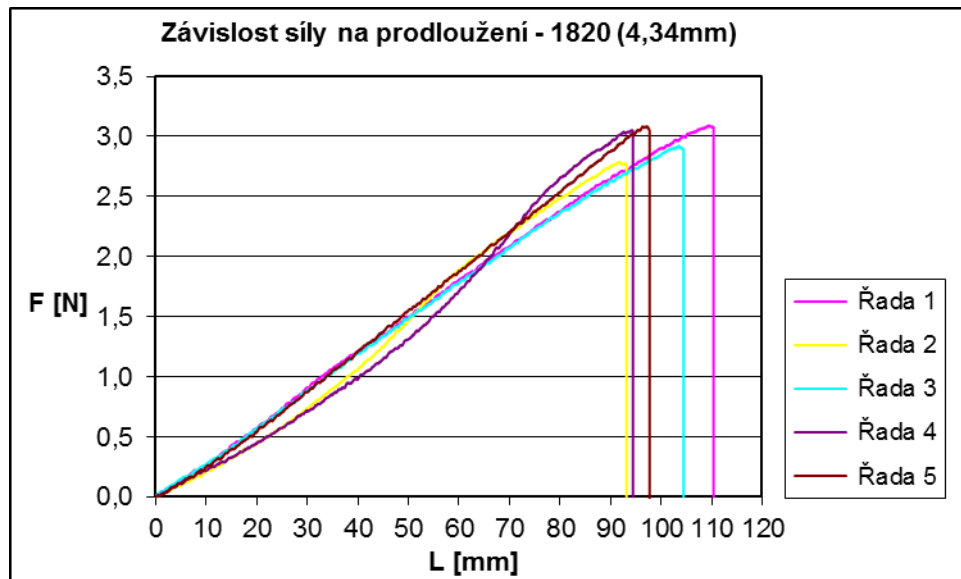
Obr. 31. Koeficient zvukové pohltivosti vzorků: 1820 (4,34mm), 1820 (18,80), RE 80 (14,60), RE 80 (19,62), S3535F (9,97mm), S3535F (28,96mm)



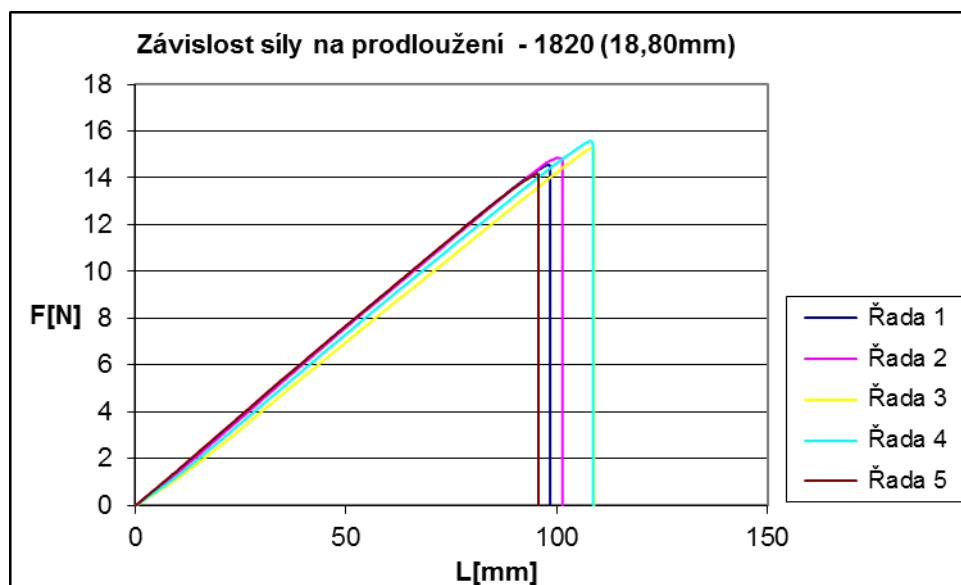
Obr. 32. Koeficient zvukové pohltivosti vzorků: 3535 (7,63mm), 3535 (17,78mm), 5015 (5,83mm), 5015 (20,65mm), 2130 (9,98mm)

3.2 Mechanické zkoušky

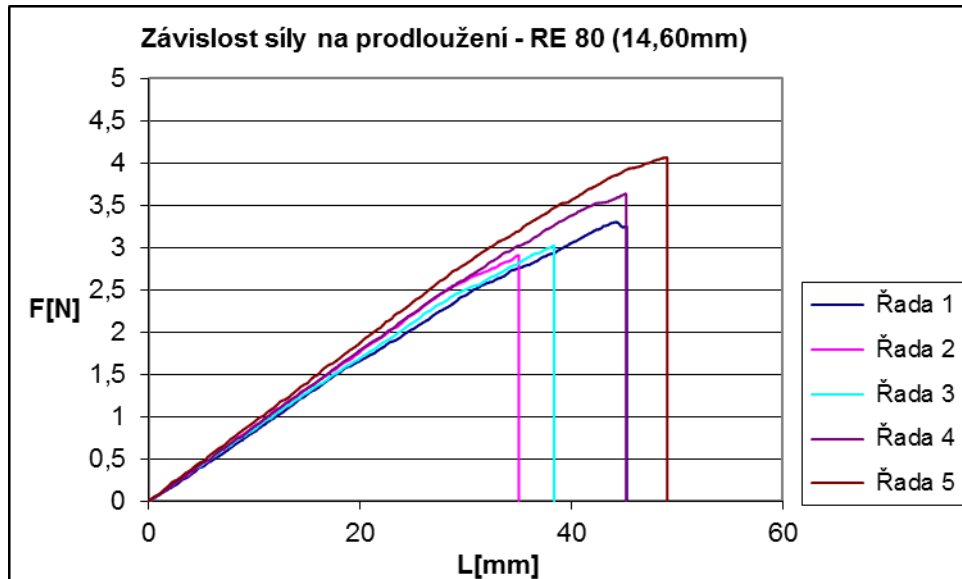
3.2.1 Závislost síly na prodloužení



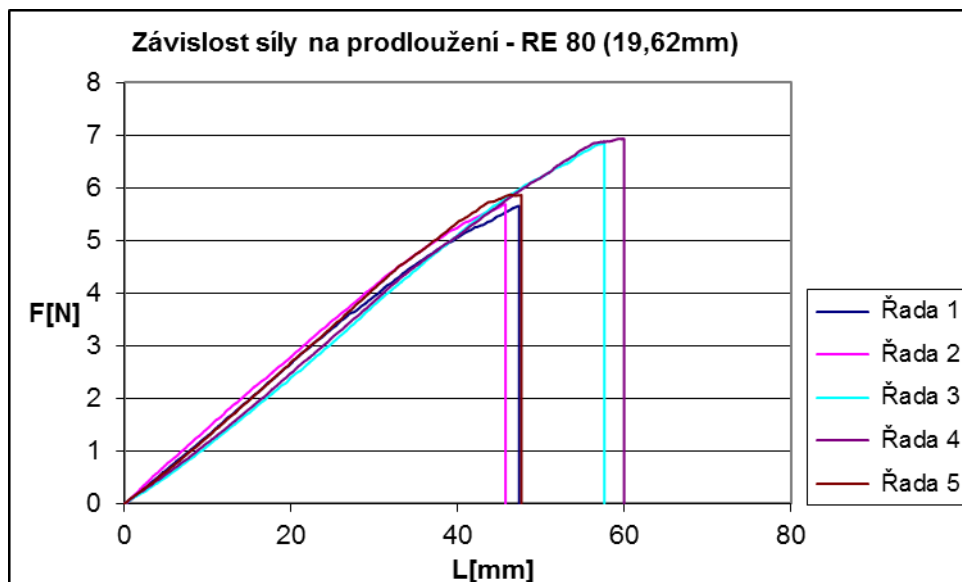
Obr. 33. Závislost síly na prodloužení - 1820 (4,34mm)



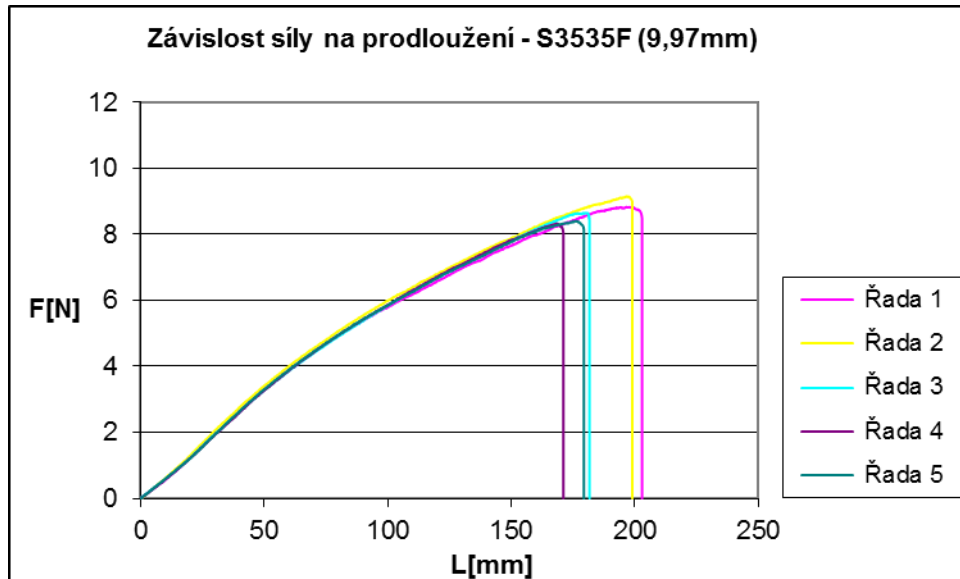
Obr. 34. Závislost síly na prodloužení - 1820 (18,80mm)



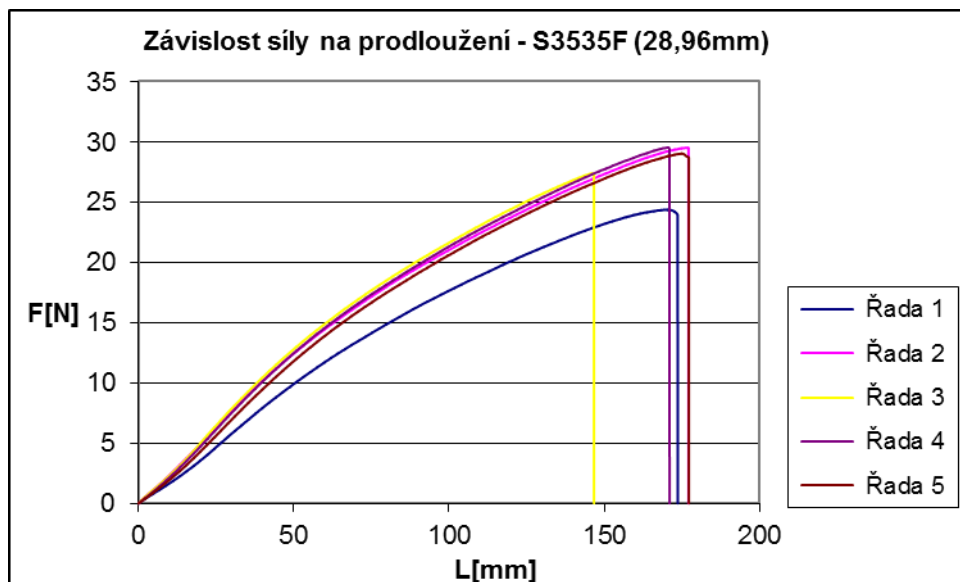
Obr. 35. Závislost síly na prodloužení - RE 80 (14,60mm)



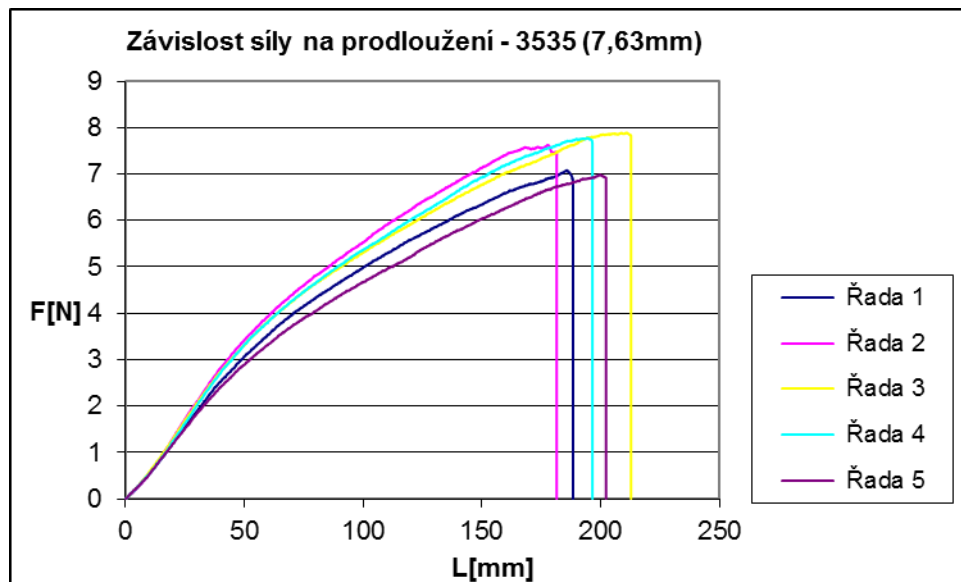
Obr. 36. Závislost síly na prodloužení - RE 80 (19,62mm)



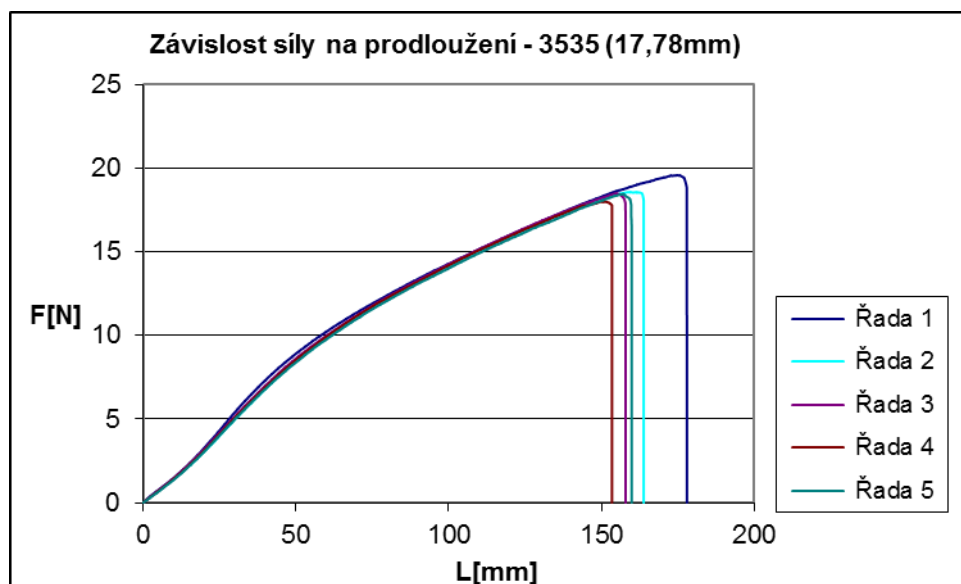
Obr. 37. Závislost síly na prodloužení - S3535F (9,97mm)



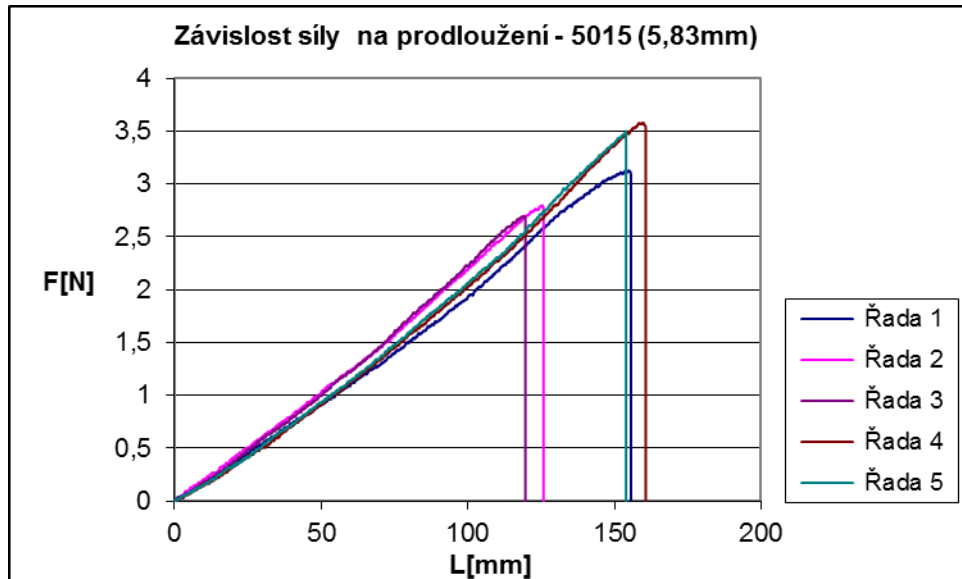
Obr. 38. Závislost síly na prodloužení - S3535F (28,96mm)



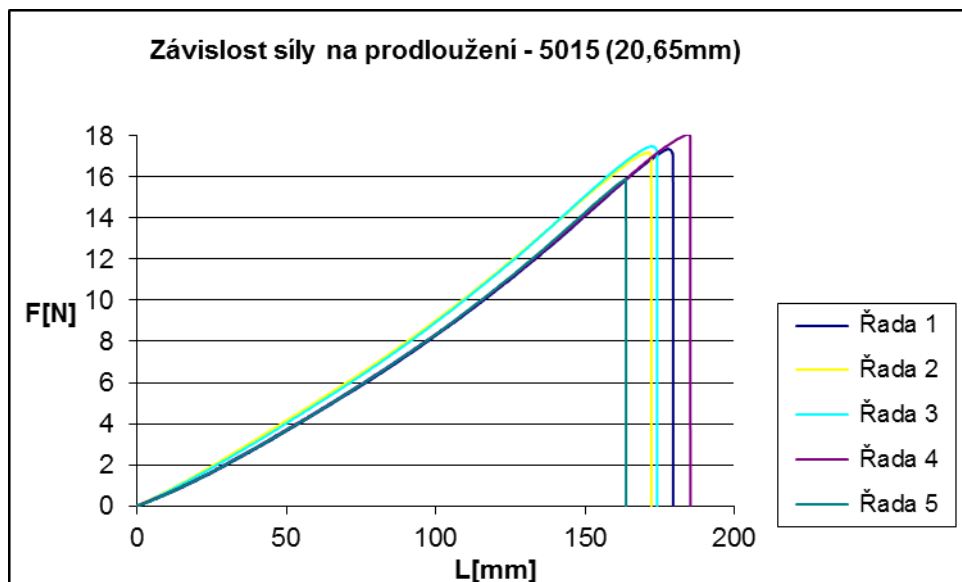
Obr. 39. Závislost síly na prodloužení - 3535 (7,63mm)



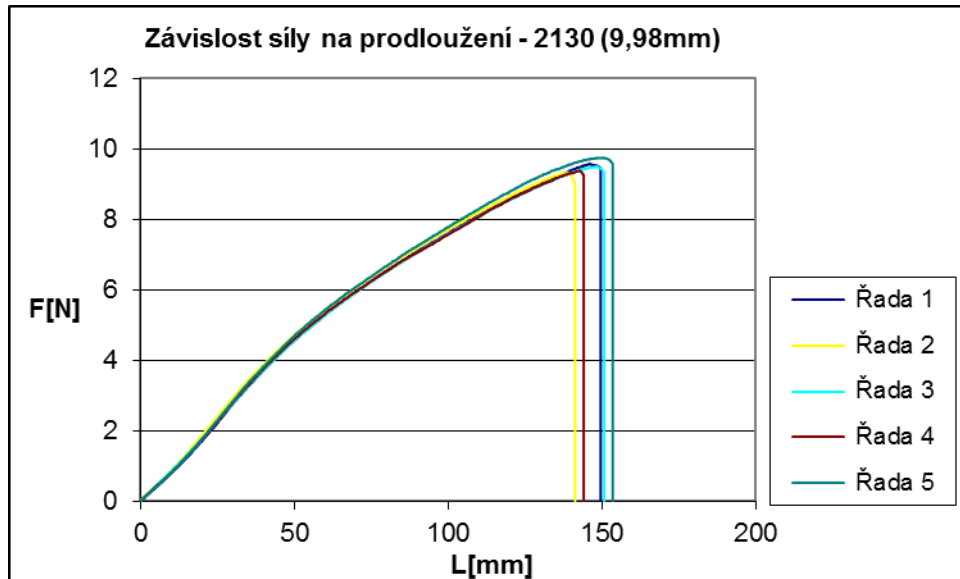
Obr. 40. Závislost síly na prodloužení - 3535 (17,78mm)



Obr. 41. Závislost síly na prodloužení - 5015 (5,83mm)

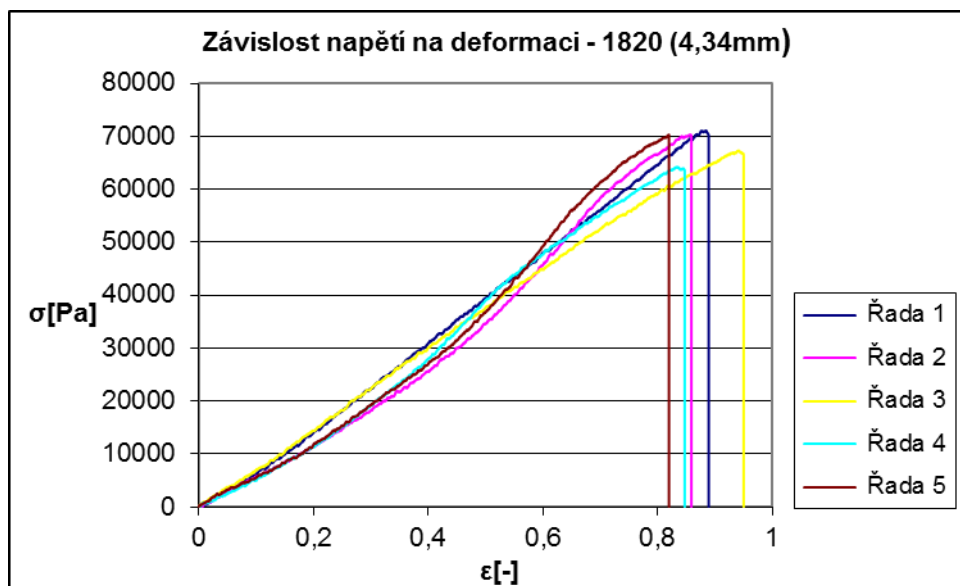


Obr. 42. Závislost síly na prodloužení - 5015 (20,65mm)

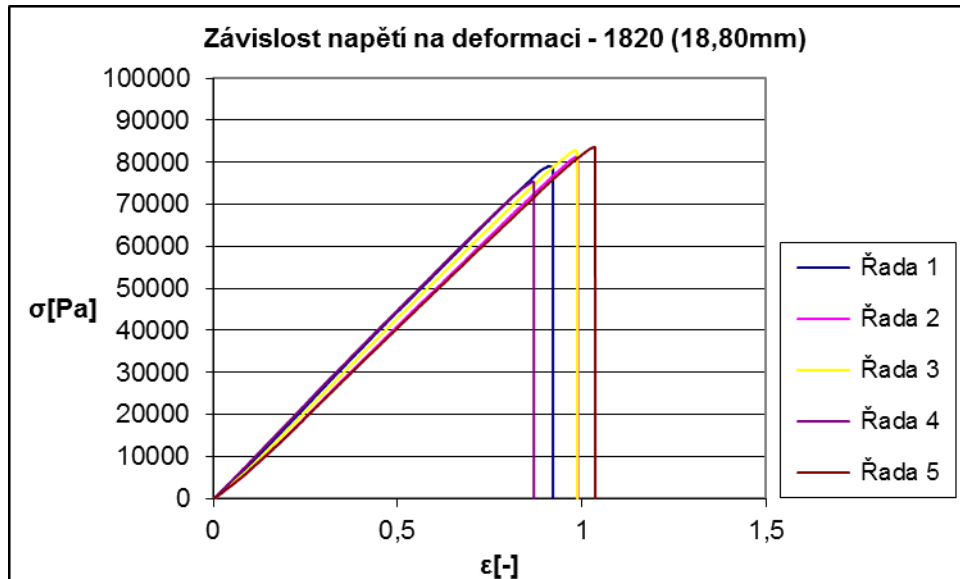


Obr. 43. Závislost síly na prodloužení - 2130 (9,98mm)

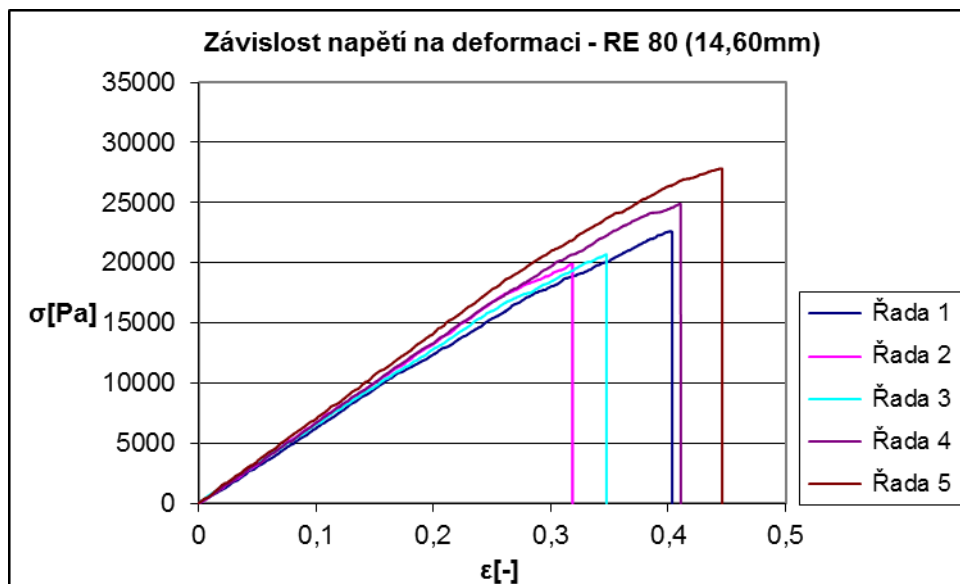
3.2.2 Závislost napětí na deformaci



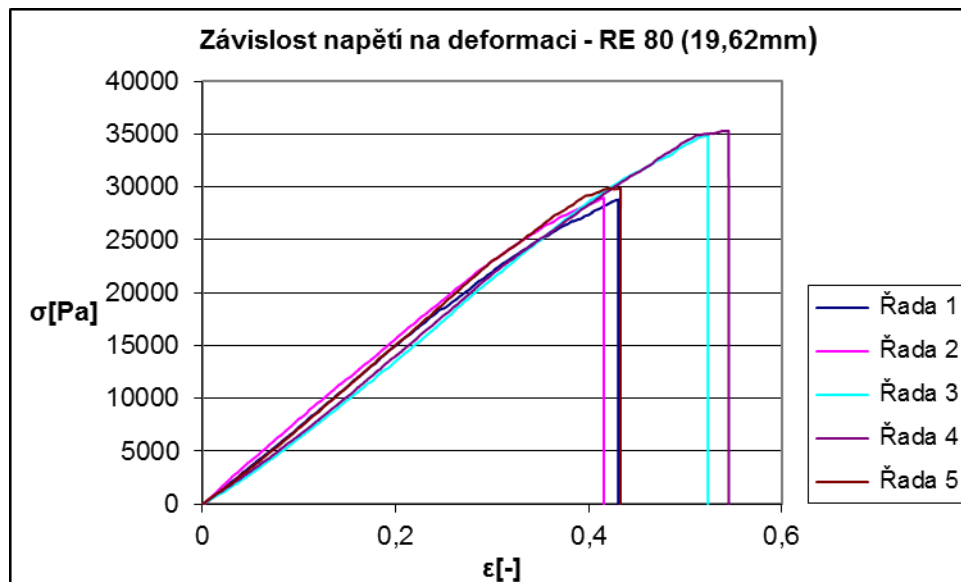
Obr. 44. Závislost napětí na deformaci - 1820 (4,34mm)



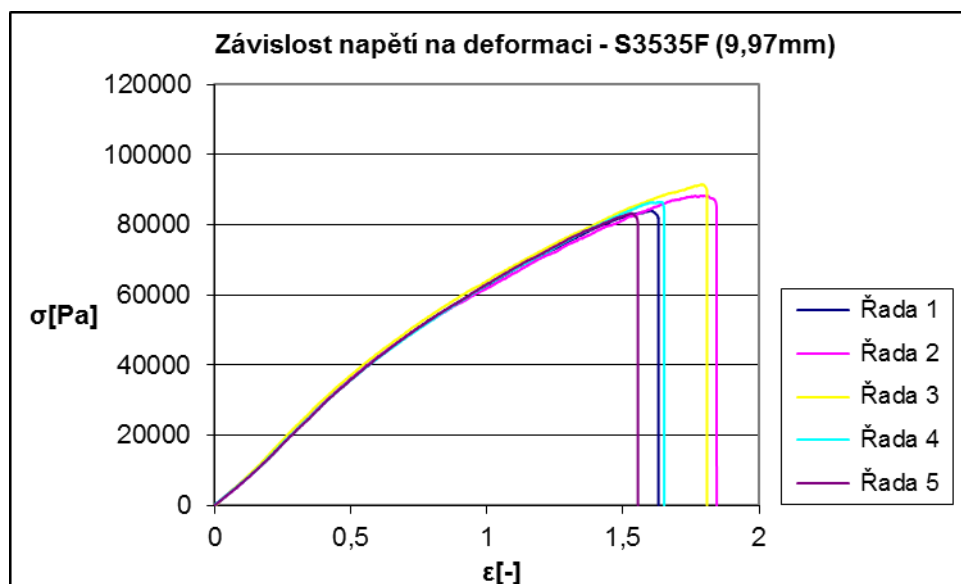
Obr. 45. Závislost napětí na deformaci - 1820 (18,80mm)



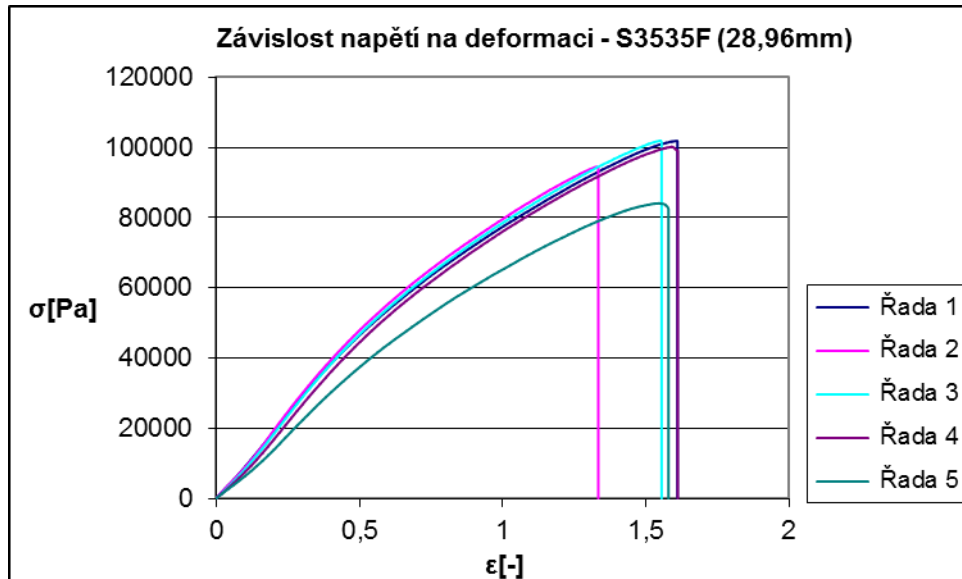
Obr. 46. Závislost napětí na deformaci - RE 80 (14,60mm)



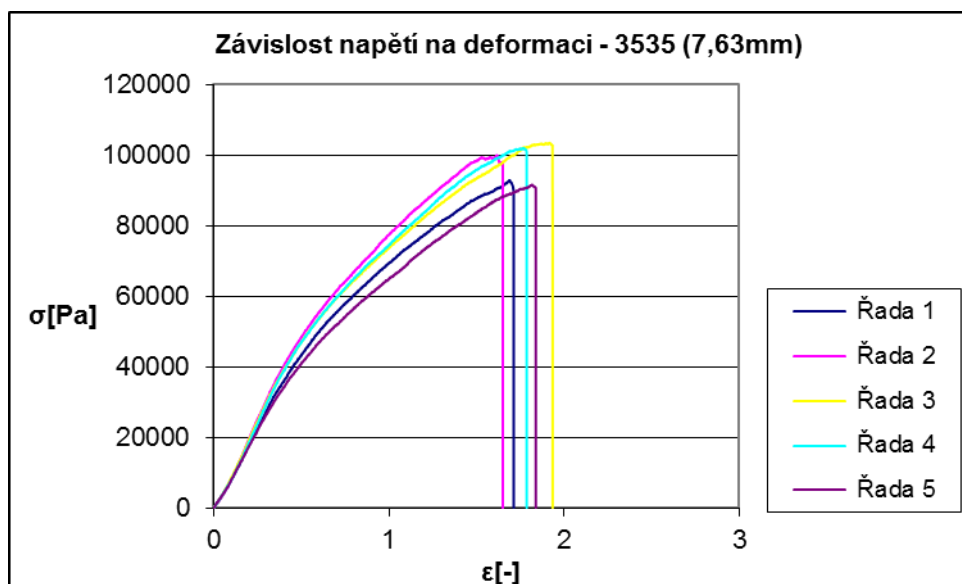
Obr. 47. Závislost napětí na deformaci - RE 80 (19,62mm)



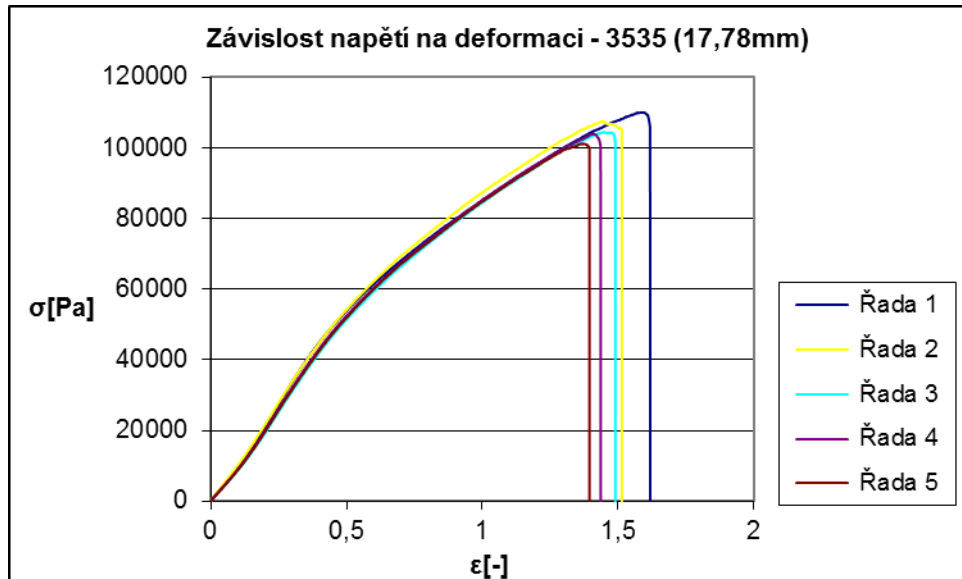
Obr. 48. Závislost napětí na deformaci - S3535F (9,97mm)



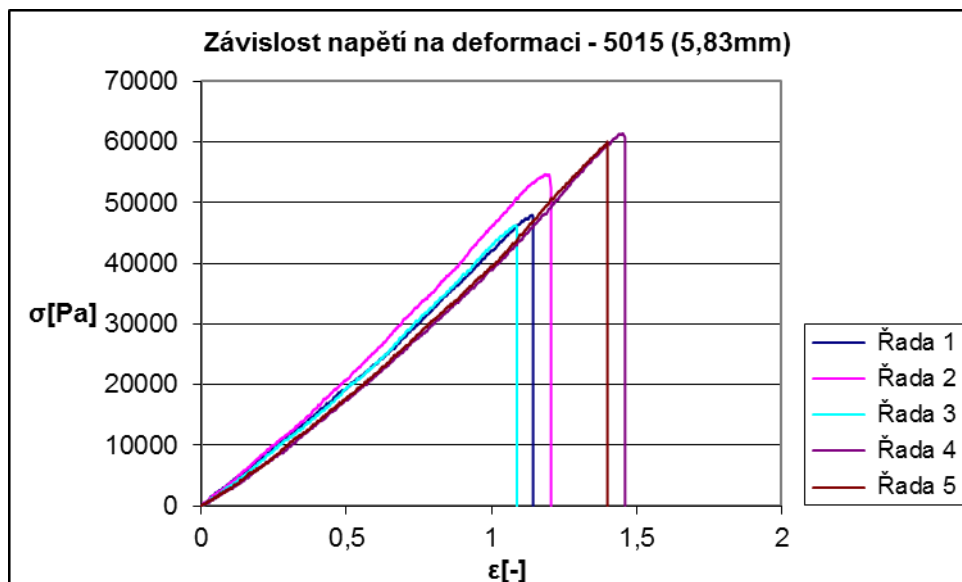
Obr. 49. Závislost napětí na deformaci - S3535F (28,96mm)



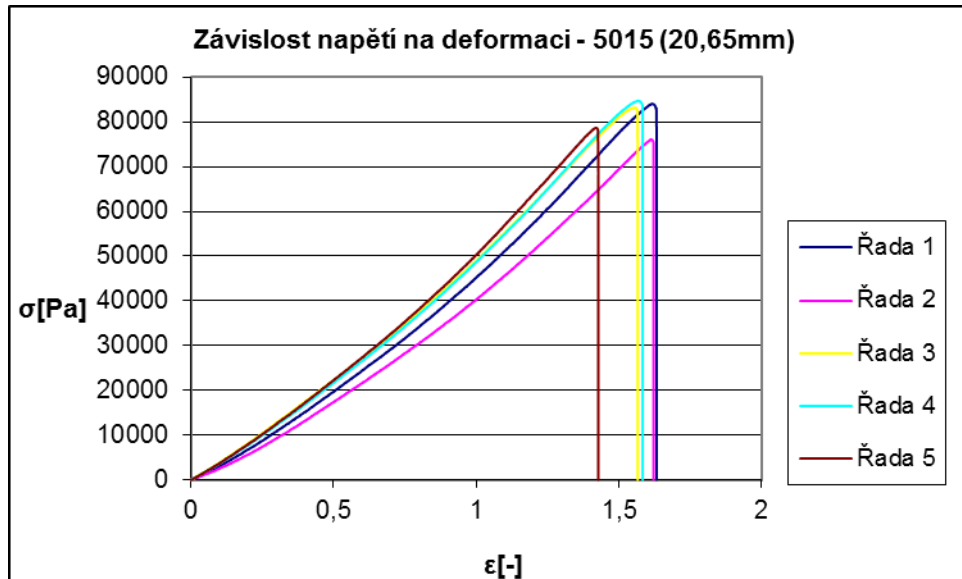
Obr. 50. Závislost napětí na deformaci - 3535 (7,63mm)



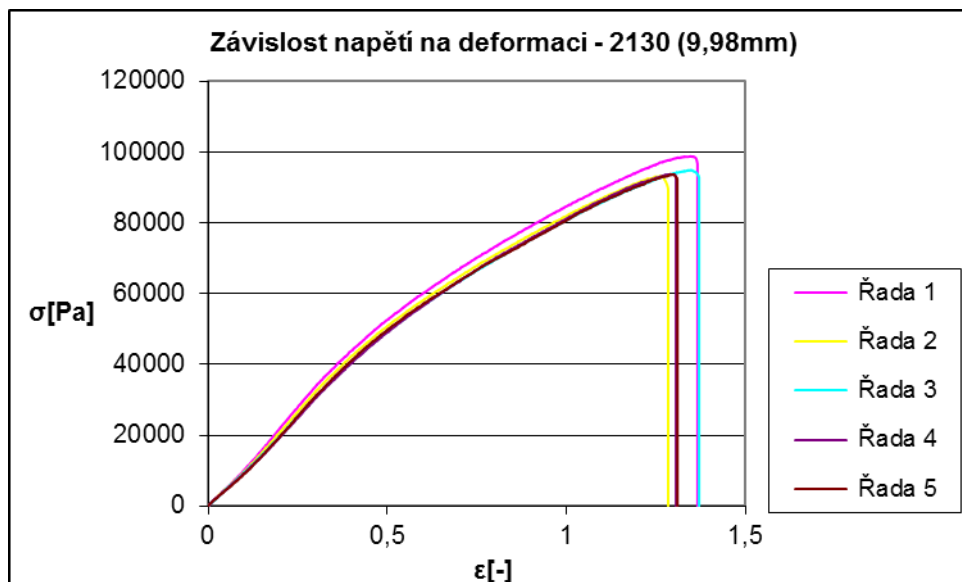
Obr. 51. Závislost napětí na deformaci - 3535 (17,78mm)



Obr. 52. Závislost napětí na deformaci - 3535 (5,83mm)

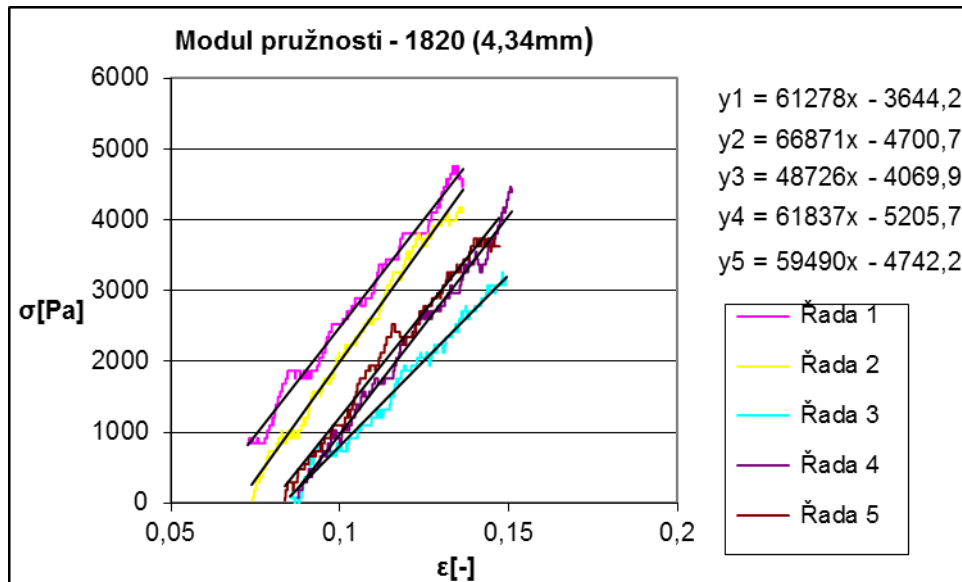


Obr. 53. Závislost napětí na deformaci - 5015 (20,65mm)

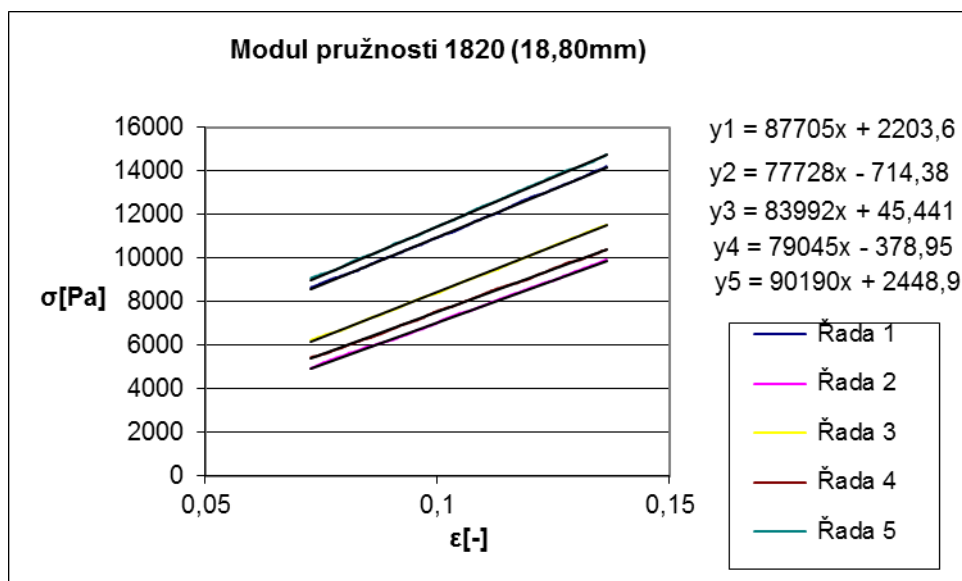


Obr. 54. Závislost napětí na deformaci - 2130 (9,98mm)

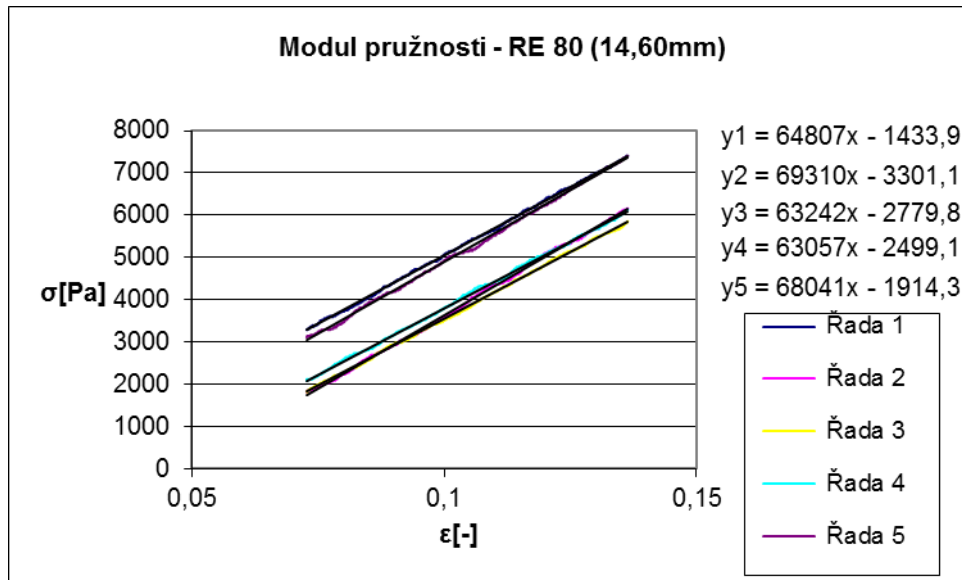
3.2.3 Modul pružnosti



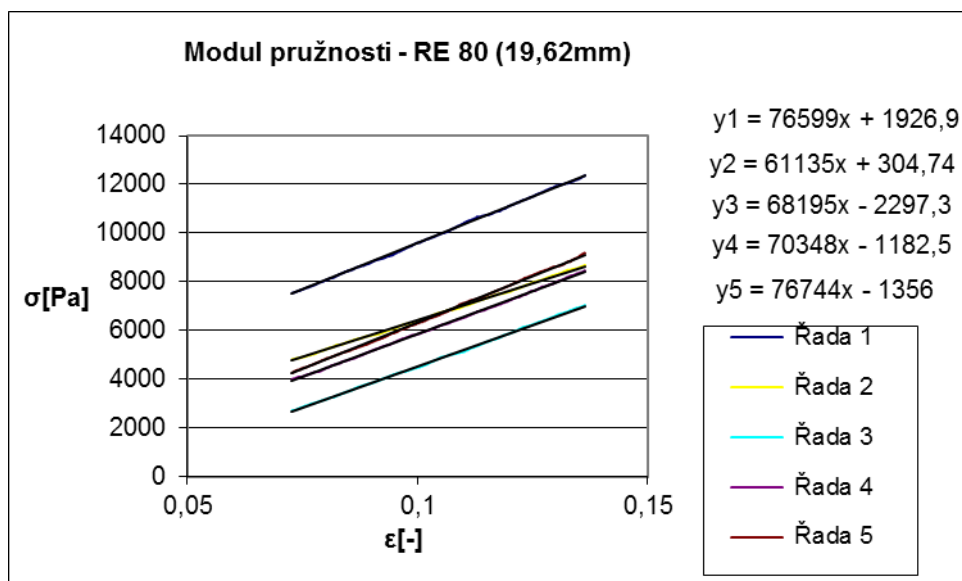
Obr. 55. Modul pružnosti - 1820 (4,34mm)



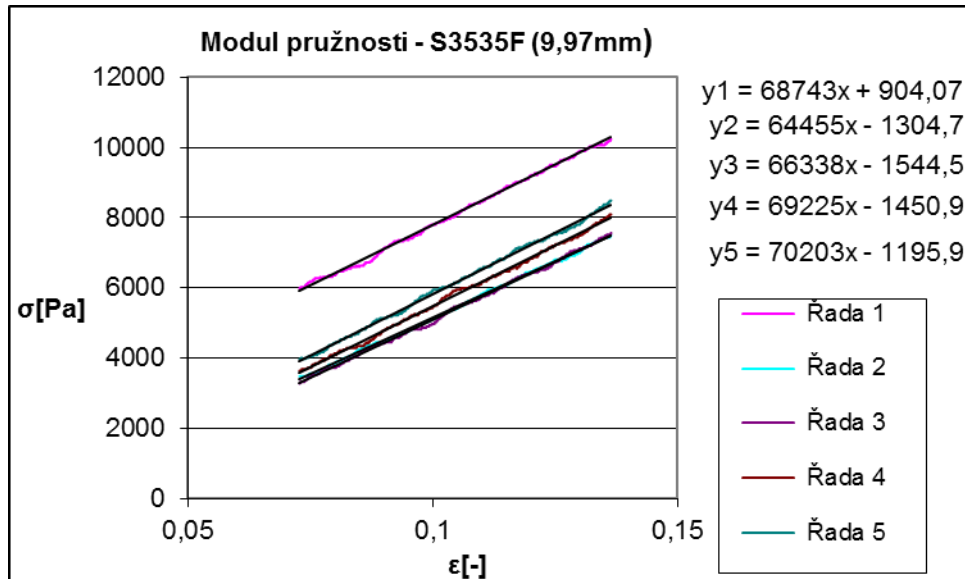
Obr. 56. Modul pružnosti - 1820 (18,80mm)



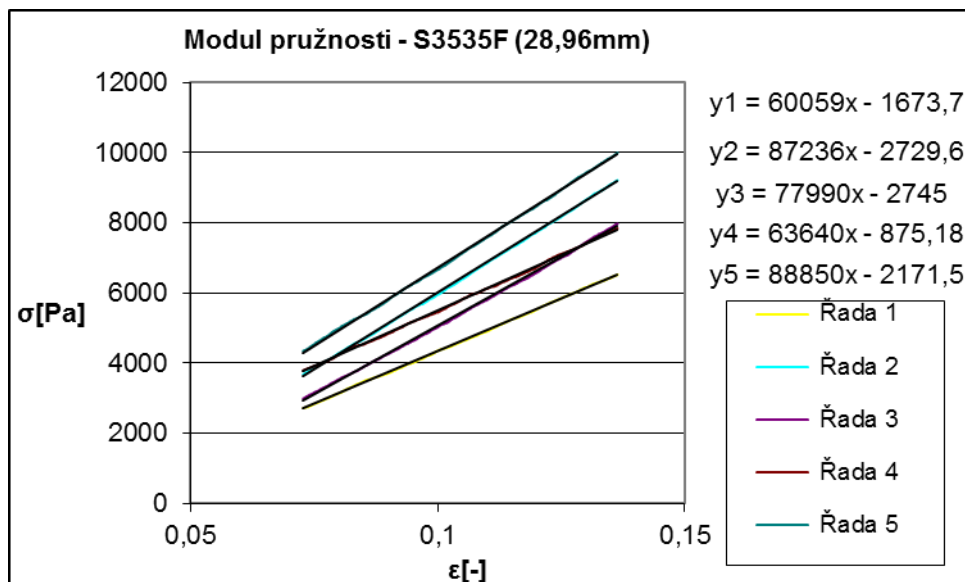
Obr. 57. Modul pružnosti RE - 80 (14,60mm)



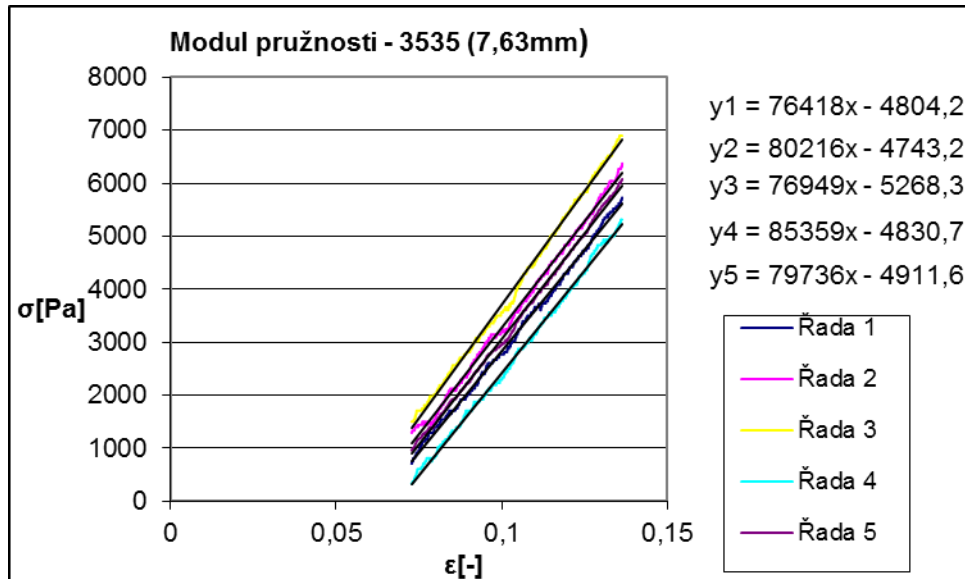
Obr. 58. Modul pružnosti - RE 80 (19,62mm)



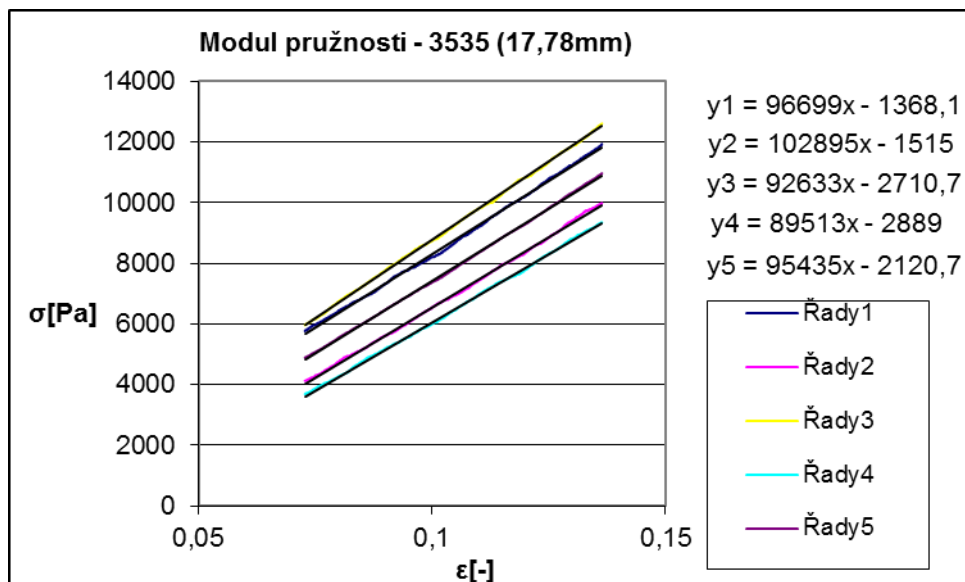
Obr. 59. Modul pružnosti - S3535F (9,97mm)



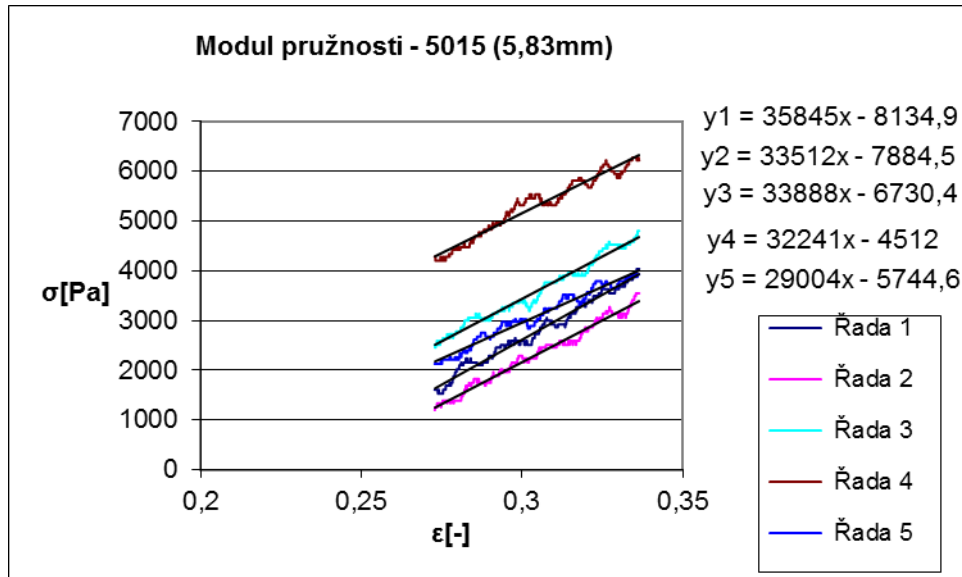
Obr. 60. Modul pružnosti - S3535F (28,96mm)



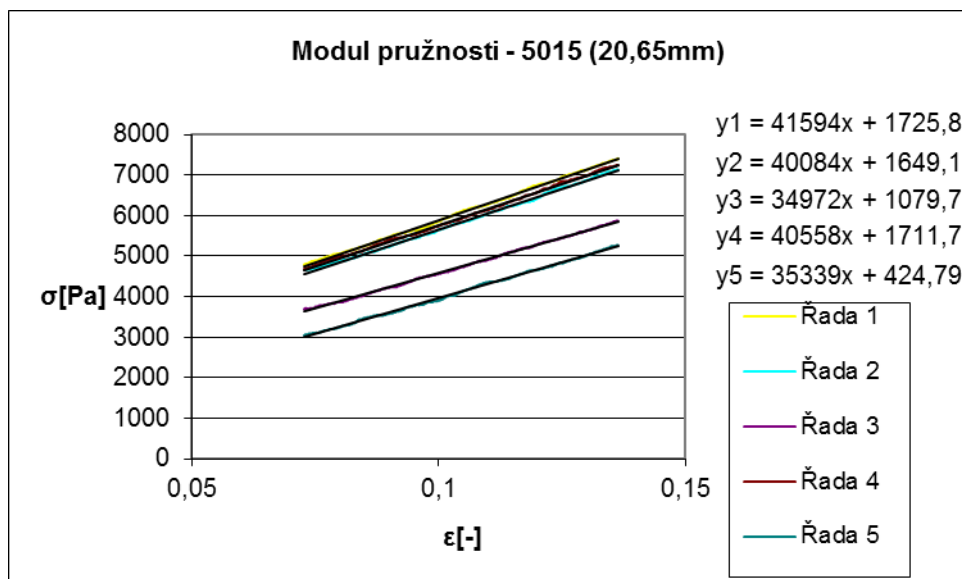
Obr. 61. Modul pružnosti - 3535 (7,63mm)



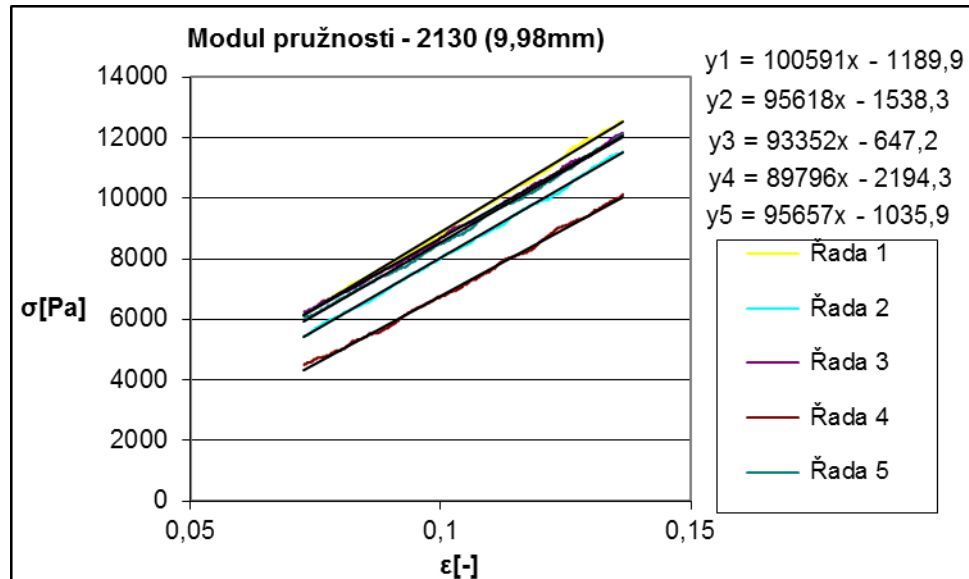
Obr. 62. Modul pružnosti - 3535 (17,78mm)



Obr. 63. Modul pružnosti - 5015 (5,83mm)



Obr. 64. Modul pružnosti - 5015 (20,65mm)



Obr. 65. Modul pružnosti - 2130 (9,98mm)

3.2.4 Maximální síly a prodloužení

Vyhodnocení v následujících tabulkách popisuje jakých maximálních hodnoty síly, tažnosti (v mm a procentech) a modulu pružnosti v tahu bylo získáno při tahové zkoušce u jednotlivých vzorků.

Tab. 5. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - 1820 (4,34mm)

| n | Fmax (N) | l (mm) | l (%) | E (kPa) |
|-----------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| 1 | 3,17 | 97,29 | 188,45 | 61,28 |
| 2 | 3,05 | 100,60 | 191,45 | 66,87 |
| 3 | 2,92 | 111,66 | 201,51 | 48,73 |
| 4 | 2,78 | 100,91 | 191,74 | 61,84 |
| 5 | 3,09 | 119,11 | 208,28 | 59,49 |
| Průměr | 3,00 | 105,91 | 196,29 | 59,64 |
| Sm.odch. | 0,14 | 8,18 | 7,44 | 5,98 |

Tab. 6. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%)
a modul pružnosti - 1820 (18,80mm)

| n | Fmax (N) | l (mm) | l (%) | E (kPa) |
|-----------------|----------|--------|--------|---------|
| 1 | 15,39 | 100,20 | 191,09 | 87,71 |
| 2 | 15,32 | 108,47 | 198,61 | 77,73 |
| 3 | 15,77 | 107,96 | 198,14 | 83,99 |
| 4 | 14,23 | 108,47 | 198,61 | 79,05 |
| 5 | 15,84 | 113,79 | 203,45 | 90,19 |
| Průměr | 15,31 | 107,78 | 197,98 | 83,73 |
| Sm.odch. | 0,58 | 4,35 | 3,95 | 4,81 |

Tab. 7. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%)
a modul pružnosti - RE 80 (14,60mm)

| n | Fmax (N) | l (mm) | l (%) | E (kPa) |
|-----------------|----------|--------|--------|---------|
| 1 | 3,25 | 47,26 | 142,96 | 64,81 |
| 2 | 2,91 | 39,92 | 136,29 | 69,31 |
| 3 | 1,72 | 26,09 | 123,72 | 63,24 |
| 4 | 3,02 | 42,91 | 139,01 | 63,06 |
| 5 | 3,63 | 48,05 | 143,68 | 68,04 |
| Průměr | 2,91 | 40,84 | 137,13 | 65,69 |
| Sm.odch. | 0,64 | 7,95 | 7,22 | 2,54 |

Tab. 8. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%)
a modul pružnosti - RE 80 (19,62mm)

| n | Fmax (N) | l (mm) | l (%) | E (kPa) |
|-----------------|----------|--------|--------|---------|
| 1 | 6,11 | 47,38 | 143,07 | 76,60 |
| 2 | 6,49 | 45,74 | 141,58 | 61,14 |
| 3 | 4,39 | 39,98 | 136,34 | 68,20 |
| 4 | 6,84 | 60,34 | 154,86 | 70,35 |
| 5 | 6,93 | 61,02 | 155,47 | 76,74 |
| Průměr | 6,15 | 50,89 | 146,27 | 70,60 |
| Sm.odch. | 0,93 | 8,37 | 7,61 | 5,82 |

Tab. 9. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - S3535F (9,97mm)

| n | Fmax (N) | l (mm) | l (%) | E (kPa) |
|-----------------|----------|--------|--------|---------|
| 1 | 8,63 | 176,28 | 260,25 | 68,74 |
| 2 | 8,97 | 196,62 | 278,74 | 64,46 |
| 3 | 9,25 | 196,80 | 278,91 | 66,34 |
| 4 | 8,65 | 182,09 | 265,54 | 69,23 |
| 5 | 8,33 | 170,79 | 255,26 | 70,20 |
| Průměr | 8,77 | 184,51 | 267,74 | 67,79 |
| Sm.odch. | 0,32 | 10,58 | 9,62 | 2,10 |

Tab. 10. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - S3535F (28,96mm)

| n | Fmax (N) | l (mm) | l (%) | E (kPa) |
|-----------------|----------|--------|--------|---------|
| 1 | 29,49 | 177,45 | 261,32 | 60,06 |
| 2 | 27,35 | 146,60 | 233,27 | 87,24 |
| 3 | 29,53 | 173,44 | 257,67 | 77,99 |
| 4 | 29,02 | 178,39 | 262,17 | 63,64 |
| 5 | 24,32 | 172,78 | 257,07 | 88,85 |
| Průměr | 27,94 | 169,73 | 254,30 | 75,56 |
| Sm.odch. | 1,98 | 11,77 | 10,70 | 11,84 |

Tab. 11. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - 3535 (7,63mm)

| n | Fmax (N) | l (mm) | l (%) | E (kPa) |
|-----------------|----------|--------|--------|---------|
| 1 | 7,08 | 192,67 | 275,15 | 76,42 |
| 2 | 7,62 | 183,52 | 266,83 | 80,22 |
| 3 | 7,89 | 216,56 | 296,87 | 76,95 |
| 4 | 7,77 | 202,12 | 283,74 | 85,36 |
| 5 | 6,99 | 216,11 | 296,47 | 79,74 |
| Průměr | 7,47 | 202,19 | 283,81 | 79,74 |
| Sm.odch. | 0,37 | 12,96 | 11,78 | 3,18 |

Tab. 12. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - 3535 (17,78mm)

| n | Fmax (N) | l (mm) | l (%) | E (kPa) |
|-----------------|----------|--------|--------|---------|
| 1 | 19,57 | 175,85 | 259,87 | 96,70 |
| 2 | 19,13 | 160,44 | 245,86 | 102,90 |
| 3 | 18,56 | 162,51 | 247,74 | 92,63 |
| 4 | 18,48 | 157,75 | 243,41 | 89,51 |
| 5 | 17,99 | 153,56 | 239,60 | 95,44 |
| Průměr | 18,75 | 162,02 | 247,29 | 95,44 |
| Sm.odch. | 0,50 | 6,88 | 6,25 | 4,09 |

Tab. 13. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - 5015 (5,83mm)

| n | Fmax (N) | l (mm) | l (%) | E (kPa) |
|-----------------|----------|--------|--------|---------|
| 1 | 2,79 | 151,28 | 237,53 | 35,85 |
| 2 | 3,18 | 158,73 | 244,30 | 33,51 |
| 3 | 2,70 | 140,89 | 228,08 | 33,89 |
| 4 | 3,58 | 168,10 | 252,82 | 32,24 |
| 5 | 3,50 | 168,83 | 253,48 | 29,00 |
| Průměr | 3,15 | 157,57 | 243,24 | 32,90 |
| Sm.odch. | 0,36 | 10,55 | 9,59 | 2,26 |

Tab. 14. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - 5015 (20,65mm)

| n | Fmax (N) | l (mm) | l (%) | E (kPa) |
|-----------------|----------|--------|--------|---------|
| 1 | 17,36 | 178,66 | 262,42 | 41,59 |
| 2 | 15,71 | 180,29 | 263,90 | 40,08 |
| 3 | 17,60 | 171,14 | 255,58 | 34,97 |
| 4 | 17,89 | 173,10 | 257,36 | 40,56 |
| 5 | 18,34 | 184,50 | 267,73 | 35,34 |
| Průměr | 17,38 | 177,54 | 261,40 | 38,51 |
| Sm.odch. | 0,90 | 4,86 | 4,42 | 2,78 |

Tab. 15. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - 2130 (9,98mm)

| n | Fmax (N) | l (mm) | l (%) | E (kPa) |
|-----------------|-----------------|---------------|--------------|----------------|
| 1 | 9,57 | 148,92 | 235,38 | 100,59 |
| 2 | 9,98 | 148,22 | 234,74 | 95,62 |
| 3 | 9,33 | 139,77 | 227,06 | 93,35 |
| 4 | 9,49 | 149,95 | 236,32 | 89,80 |
| 5 | 9,38 | 142,50 | 229,54 | 95,66 |
| Průměr | 9,55 | 145,87 | 232,61 | 95,00 |
| Sm.odch. | 0,23 | 4,00 | 3,64 | 3,52 |

ZÁVĚR

Cílem práce bylo zhodnotit vybrané typy polyuretanů, které byly definovány v průběhu textu. Hlavním záměrem bylo vyhodnotit vybrané zkoušky, které jsou závislé na hustotě materiálu. Tento je přímo spojen s porézní strukturou, která je pro polyuretany typická a svým způsobem jedinečná. Tyto polyuretany byly hodnoceny s ohledem na akustické a mechanické vlastnosti, které patří mezi nejdůležitější vlastnosti tohoto polymerního materiálu v současných technických aplikacích.

V první fázi byly provedeny měření v rámci koeficientu zvukové pohltivosti pro čtyři různé varianty: se vzorkem přímo na pístu a s definovanými tloušťkami vzduchové mezery, která významně ovlivňuje výslednou křivku. Z výsledných grafů bez ohledu na vzduchovou mezeru vychází nejlépe náběhová charakteristika v nízkých frekvencích pro S3535F pro tloušťku 28,96 mm. Druhý vychází RE 80 (19,62 mm) a 5015 (20,65 mm). Pro akustickou pohltivost jsou velmi důležité nízké frekvence, ve kterých vychází nejlépe zmíněný S3535F, který má samozhášivé schopnosti. Jedná se o retardéry hoření, které způsobují vyšší pohltivost zejména v oblasti do 2 000 Hz.

V rámci mechanických zkoušek byly provedeny měření maximální pevnosti, napětí a modulů. Maximální pevnosti vychází v rámci hustoty téměř úměrně. V souladu s tímto jsou maximální pevnosti také dány tloušťkou. Lze konstatovat, že s rostoucí hustotou a tloušťkou se maximální pevnost zvyšuje. Takto vychází výsledné síly nejlépe pro S3535F a 5015, kde je hustota 35 respektive 50 kg.m⁻³. Naproti tomu RE 80, který má nejvyšší hodnotu vychází v maximální síle méně, jelikož se jedná o recyklovaný polyuretan lepený z polyuretanové drti. Soudržnost je snížena díky lepení jednotlivých drcených částí.

Moduly pružnosti, které byly hodnoceny jako další mechanická veličina, měly bez ohledu na tloušťku a hustotu řádově podobné hodnoty. Pro vztah mezi hustotou a moduly pružnosti bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty modulů v rámci sérií mají vzorky s nejnižší hustotou. V tomto případě to byly vzorky 1820 a 2130. Teprve potom byly v pořadí vzorky 3535 a 5015, které měly nejlepší výsledky s ohledem na akustiku a pevnost.

Tažnosti byly pro všechny vzorky daného typu přibližně stejné bez ohledu na hustotu a tloušťku. Pro dva stejné vzorky se stejnou hustotou ale rozdílnou tloušťkou vychází řádově tažnost v mm a procentech podobně.

Na závěr lze konstatovat, že hustota daného polyuretanu má vliv na výsledné chování polymeru v oblasti akustiky a mechaniky. Pro porovnání v oblasti mechaniky jsou ale výsledky rozdílné s ohledem na hustotu a to zejména na maximální pevnost a moduly pružnosti. Tažnosti jsou v mechanické oblasti přibližně řádově stejné. Proto můžeme konstatovat, že mechanické zkoušky nemají vždy lineární (úměrný) vztah k hustotě, zatímco u akustiky tento jev sledovat můžeme.

Takto zjištěné výsledky mají vliv zejména na technické aplikace u nichž se používá polyuretan jako akustická izolace, ale slouží jako součást konstrukce, u které se musí přihlížet na mechanické chování jako celku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 8085920727.
2. LAPČÍK, Lubomír a Miroslav RAAB. Nauka o materiálech II. Vyd. 2. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2004, 133 s. ISBN 80-7318-229-7.
3. KLEMPNER D., FRISCH K.C. Polymeric foams, Oxford 1991, ISBN 3-446-15097-8.
4. NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02246-3
5. MIŠUN, V. *Vibrace a hluk*. Brno: PC-DIR Real, spol. s r.o., 1998. ISBN 80-214-1262-3
6. BRŮHA, O. *Aeromechanika, výkony letadel – letecký průvodce 3*. Praha: SNTL, 1957. DT 629.135 533.6 Bez ISBN
7. SMETANA, C. *Měření hluku a chvění*. Praha: Sděl. technika, 1974. Bez ISBN
8. SMETANA, C. *Hluk a vibrace – měření a hodnocení*. Praha: Sděl. technika, 1998
9. BERANEK, L. L. *Noise reduction*. London: Mc Graw – Hill Book Company London, 1960. Bez ISBN
10. *Brüel and Kjaer*. [online]. [cit. 2012-01-18] Dostupné z <<http://www.bksv.com/pdf/Bp1039.pdf>>
11. *Brüel and Kjaer*. [online]. [cit. 2012-01-18] Dostupné z <http://www.bksv.com/pdf/Structural_Testing_1.pdf>
12. Izolace vs. Pohltivost. *Technická univerzita v Liberci.* [online]. [cit.2012-01-18]Dostupné z www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/tpa/TPA.ppt
13. Ústav fyziky a materiálového inženýrství – vybavení ústavu, Fakulta technologická [online], Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, [online], dostupné z <http://www.ft.utb.cz/czech/ufmi/vybaveni.html>>

14. EVEREST, F. A. *The Master Handbook of Acoustics*. New York – McGraw - Hill Company 2001, ISBN 0-07-136097-2.
15. JUŘIČKA M. *Materiály pro tlumení hluku a vibrací v leteckém průmyslu na bázi polyuretanů*. Disertační práce, UTB Zlín, Zlín 2008

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

M - molární hmotnost

E - modul pružnosti v tahu

G - smykový modul

σ_y - napětí na mezi kluzu

ε_y - deformaci na mezi kluzu

σ_b - pevnost v tahu

ε_b - tažnost (deformaci při přetržení)

η - viskozita

σ_t - mezného napětí

T_B - teplota křehnutí

T_G - teplotou skelného přechodu

T_1 - je typická elastická deformace

T_2 - převládá plasticita

T_3 - viskoelastické a kaučukové chování

ρ - hustota

ρ_p - je opravdová hustota fáze polymeru

ρ_g - je hustota plynu v buňkách

G - je vyplnění plynem tzv. poréznost pěnové hmoty

V_0 - geometrický objemu

d - průměr

b - tloušťku stěny

(m_c) – hmotnost polymeru na jednu buňku

(N_b) – počet buněk v kubickém prostoru

δ - tloušťka stěny

δ_{cr} - je kritická (minimální) tloušťka stěny, která je ještě schopna podporovat buněčnou strukturu

d_{cr} - minimální průměr buněk

d_{max} - maximální průměr buněk

α - součinitelem pohltivosti

R - součinitel odrazu

Z_1 - akustická impedance

Z_0 - charakteristická impedance vzduchu

ρ_0 - je hustota vzduchu

c_0 - je rychlost zvuku ve vzduchu

I_1 - intenzita zvuku vlny odražené,

I_2 - intenzita zvuku vlny pohlcené,

I_3 - intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem,

I_4 - intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry,

I_5 - intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru,

I_6 - intenzita zvuku vlny, která je vedena ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí,

I_7 - intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo.

B - činitele zvukové odrazivosti

T - činitele průzvučnosti

ε - podíl mezi energií přeměněnou ve stěně na teplo a energií na stěnu dopadající

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Průřez integrální polyuretanovou pěnou [1]

Obr. 2. Vztah mezi středním průměrem, d , makro buněk a hustoty pěnového polystyrenu ρ . [3]

Obr. 3. Rozdělení hustoty v pěnách [3]

Obr. 4. Buněčné struktury tuhé fenolické pěny pod rastrovacím elektronovým mikroskopem [3]

Obr. 5. Změna tvaru buňky v pružných polyuretanových pěnách [3]

Obr. 6. Koeficient zvukové pohltivosti [15]

Obr. 7. Rozdělení akustického výkonu na jednotlivé složky [15]

Obr. 8. Znázornění základních režimů tahové zkoušky [2]

Obr. 9. Co lze vyčíst z tahové zkoušky [2]

Obr. 10. Ideální Hookeovská pružina [2]

Obr. 11. Ideální kapalinový tlumič [2]

Obr. 12. Mechanické (coulombické) tření dvou plošek [2]

Obr. 13. Znázornění vlivu teploty na průběh křivek napětí deformace [2]

Obr. 14. Multianalýzátor PULSE a Kundtova trubice se vzorky [13]

Obr. 15. Měřicí schéma Kundtovy impedanční trubice a příslušenství [13]

Obr. 16. Prostředí LabShop [13]

Obr. 17. Vzorky vytvořené dle normy (tvar lopatky) [Vlastní zpracování]

Obr. 18. Vysekávací hydraulický lis [Vlastní zpracování]

Obr. 19. Trhací stroj AG-X Shimadzu s použitým PC a detail vzorku v čelistech [Vlastní zpracování]

Obr. 20. Koeficient zvukové pohltivosti - 1820 (4,34mm)

Obr. 21. Koeficient zvukové pohltivosti - 1820 (18,80mm)

- Obr. 22. Koeficient zvukové pohltivosti - RE 80 (14,60mm)
- Obr. 23. Koeficient zvukové pohltivosti - RE 80 (19,62mm)
- Obr. 24. Koeficient zvukové pohltivosti - S3535F (9,97mm)
- Obr. 25. Koeficient zvukové pohltivosti - S3535F (28,96 mm)
- Obr. 26. Koeficient zvukové pohltivosti - 3535 (7,63mm)
- Obr. 27. Koeficient zvukové pohltivosti 3535 (17,78mm)
- Obr. 28. Koeficient zvukové pohltivosti - 5015 (5,83mm)
- Obr. 29. Koeficient zvukové pohltivosti - 5015 (20,65mm)
- Obr. 30. Koeficient zvukové pohltivosti - 2130 (9,98mm)
- Obr. 31. Koeficient zvukové pohltivosti vzorků: 1820 (4,34mm), 1820 (18,80), RE 80 (14,60), RE 80 (19,62), S3535F (9,97mm), S3535F (28,96mm)
- Obr. 32. Koeficient zvukové pohltivosti vzorků: 3535 (7,63mm), 3535 (17,78mm), 5015 (5,83mm), 5015 (20,65mm), 2130 (9,98mm)
- Obr. 33. Závislost síly na prodloužení - 1820 (4,34mm)
- Obr. 34. Závislost síly na prodloužení - 1820 (18,80mm)
- Obr. 35. Závislost síly na prodloužení - RE 80 (14,60mm)
- Obr. 36. Závislost síly na prodloužení - RE 80 (19,62mm)
- Obr. 37. Závislost síly na prodloužení - S3535F (9,97mm)
- Obr. 38. Závislost síly na prodloužení - S3535F (28,96mm)
- Obr. 39. Závislost síly na prodloužení - 3535 (7,63mm)
- Obr. 40. Závislost síly na prodloužení - 3535 (17,78mm)
- Obr. 41. Závislost síly na prodloužení - 5015 (5,83mm)
- Obr. 42. Závislost síly na prodloužení - 5015 (20,65mm)
- Obr. 43. Závislost síly na prodloužení - 2130 (9,98mm)
- Obr. 44. Závislost napětí na deformaci - 1820 (4,34mm)

- Obr. 45. Závislost napětí na deformaci - 1820 (18,80mm)
- Obr. 46. Závislost napětí na deformaci - RE 80 (14,60mm)
- Obr. 47. Závislost napětí na deformaci - RE 80 (19,62mm)
- Obr. 48. Závislost napětí na deformaci – S3535F (9,97mm)
- Obr. 49. Závislost napětí na deformaci – S3535F (28,96mm)
- Obr. 50. Závislost napětí na deformaci - 3535 (7,63mm)
- Obr. 51. Závislost napětí na deformaci - 3535 (17,78mm)
- Obr. 52. Závislost napětí na deformaci - 3535 (5,83mm)
- Obr. 53. Závislost napětí na deformaci - 5015 (20,65mm)
- Obr. 54. Závislost napětí na deformaci - 2130 (9,98mm)
- Obr. 55. Modul pružnosti - 1820 (4,34mm)
- Obr. 56. Modul pružnosti - 1820 (18,80mm)
- Obr. 57. Modul pružnosti - RE - 80 (14,60mm)
- Obr. 58. Modul pružnosti - RE 80 (19,62mm)
- Obr. 59. Modul pružnosti - S3535F (9,97mm)
- Obr. 60. Modul pružnosti - S3535F (28,96mm)
- Obr. 61. Modul pružnosti - 3535 (7,63mm)
- Obr. 62. Modul pružnosti - 3535 (17,78mm)
- Obr. 63. Modul pružnosti - 5015 (5,83mm)
- Obr. 64. Modul pružnosti - 5015 (20,65mm)
- Obr. 65. Modul pružnosti - 2130 (9,98mm)

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Výroba jednotlivých polymerů ve světě v roce 1997 [1]

Tab. 2. Dělení kritických parametrů buněčných struktur [3]

Tab. 3. Makro strukturní parametry pěn [3]

Tab. 4. Firemní označení, pracovní označení a tloušťka testovaných materiálů

Tab. 5. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pevnosti - 1820 (4,34mm)

Tab. 6. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pevnosti - 1820 (18,80mm)

Tab. 7. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pevnosti - RE 80 (14,60mm)

Tab. 8. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pevnosti - RE 80 (19,62mm)

Tab. 9. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - S3535F (9,97mm)

Tab. 10. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - S3535F (28,96mm) Tab. 11. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - 3535 (7,63mm)

Tab. 12. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - 3535 (17,78mm)

Tab. 13. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - 5015 (5,83mm)

Tab. 14. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - 5015 (20,65mm)

Tab. 15. Maximální síla, prodloužení v (mm) a v (%) a modul pružnosti - 2130 (9,98mm)