

TUHOST A PEVNOST TENKOSTĚNNÝCH PROFILŮ Z TERMOPLASTŮ

Roman Michna

Bakalářská práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Roman MICHNA

Studijní program: B 3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Téma práce: Tuhost a pevnost tenkostěnných profilů
z termoplastů

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Navrhněte a zhotovte zkušební tělesa (profily)
3. Proveďte experimentální zkoušky v laboratorních podmínkách
4. Proveďte vyhodnocení experimentálních zkoušek

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Rulík, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství


Datum zadání bakalářské práce: **19. února 2008**

Termín odevzdání bakalářské práce: **6. června 2008**

Ve Zlíně dne 30. ledna 2008



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá přípravou, výrobou a zkouškou ohybem různých tenkostěnných profilů z termoplastu, jejich mechanickými vlastnostmi a deformací. Profily byly vyrobeny ze stejného materiálu, lišily se však tloušťkou materiálu. V experimentální části byly mezi sebou porovnávány hodnoty kvadratického momentu průřezu plochy, které byly stanoveny z velikosti sil a deformací profilů. V závěru byly tyto údaje vyhodnoceny.

Klíčová slova:

Tuhost, pevnost, kvadratický moment průřezu plochy, tenkostěnný profil, termoplasty.

ABSTRACT

The Bachelor thesis deals with prepares, production and trial bend of different thermoplastic profiles and its mechanical properties and deformation. Profiles were made from the same material, but different in material size. In experimental part were comparing results between quadratic moment of surface cross section, which were recognized from force size and deformations of profiles. In conclusion data were evaluated.

Keywords:

Flexuralrigidity, strenght, quadratic moment of surface cross section, thin-walled profile, thermoplastics.

Chci poděkovat Ing. Františku Rulíkovi, CSc., vedoucímu mé bakalářské práce, za metodické vedení, za cenné rady a připomínky, které mi pomohly v řešení dané problematiky. Zároveň děkuji i dalším pracovníkům UTB ve Zlíně, kteří mi pomohli s přípravou a uskutečněním této bakalářské práce.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 15.8.2008

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 PRUŽNOST A PEVNOST	10
1.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY A VLASTNOSTI.....	10
1.2 PEVNOST.....	10
1.3 TUHOST	12
1.4 PRUŽNOST	12
2 GEOMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY PRŮŘEZU	15
2.1 KVADRATICKÝ MOMENT PRŮŘEZU PLOCHY	15
2.2 KVADRATICKÉ MOMENTY PRŮŘEZŮ ZÁKLADNÍCH TVARŮ	16
2.3 POLÁRNÍ MOMENT PRŮŘEZU	18
2.4 DEVIACNÍ MOMENT PRŮŘEZU	18
3 PLASTY	20
3.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE.....	20
3.2 TERMOPLASTY	22
3.3 TENKOSTĚNNÉ PROFILY	23
4 TVAROVÁNÍ	25
4.1 TVAROVÁNÍ TERMOPLASTŮ	25
4.2 TVAROVACÍ FORMY A STROJE.....	28
5 STANOVENÍ CÍLŮ PRO PRAKTICKOU ČÁST	31
II PRAKTICKÁ ČÁST	32
6 VÝROBA ZKUŠEBNÍHO TĚLESA	33
6.1 PŘÍPRAVA PŘED SAMOTNÝM TVAROVÁNÍM.....	33
6.2 VYTVAROVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH PROFILŮ	34
6.3 MĚŘENÍ NA TRHACÍM STROJI ZWICK	36

7	NAMĚŘENÉ HODNOTY A JEDNOTLIVÉ GRAFY	38
7.1	PROFIL 2 MM, 25 MM VYSOKÝ, ZATÍŽENÝ Z VRCHNÍ STRANY	38
7.2	PROFIL 1 MM, 25 MM VYSOKÝ, ZATÍŽENÝ Z VRCHNÍ STRANY	39
7.3	PROFIL 2 MM, 17 MM VYSOKÝ, ZATÍŽENÝ Z VRCHNÍ STRANY	40
7.4	PROFIL 1 MM, 17 MM VYSOKÝ, ZATÍŽENÝ Z VRCHNÍ STRANY	41
7.5	PROFIL 2 MM, 25 MM VYSOKÝ, ZATÍŽENÝ ZE SPODNÍ STRANY	42
7.6	PROFIL 1 MM, 25 MM VYSOKÝ, ZATÍŽENÝ ZE SPODNÍ STRANY	43
7.7	PROFIL 2 MM, 17 MM VYSOKÝ, ZATÍŽENÝ ZE SPODNÍ STRANY	44
7.8	PROFIL 1 MM, 17 MM VYSOKÝ, ZATÍŽENÝ ZE SPODNÍ STRANY	45
8	VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ DAT Z MĚŘENÍ	46
8.1	POROVNÁNÍ DAT Z MĚŘENÍ	46
8.2	POROVNÁNÍ VELIKOSTI OHYBOVÉ TUHOSTI NA ZÁKLADĚ RŮZNÉ TLOUŠŤKY MATERIÁLU	47
8.3	POROVNÁNÍ VELIKOSTI OHYBOVÉ TUHOSTI NA ZÁKLADĚ RŮZNÉ VÝŠKY PROFILŮ	48
	ZÁVĚR.....	49
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	50
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	51
	SEZNAM OBRÁZKŮ	53
	SEZNAM TABULEK.....	54

ÚVOD

Polymerní materiály, mezi něž patří plasty a kaučuky, představují nejvýznamnější segment výroby a spotřeby podle objemu mezi všemi technickými materiály. V porovnání s materiály klasickými, především kovy, se polymery prosadily snadnou zpracovatelností a výhodným poměrem mezi užitnými vlastnostmi a cenou.

Vývoj polymerních materiálů neustále pokračuje a je neobyčejně zajímavý a poučný. Objevují se netušené možnosti modifikace polymerních materiálů a jejich nečekané aplikace. Pokrok nastává ve dvou směrech: Na jedné straně se neobyčejně rozšiřují aplikace takzvaných komoditních polymerů. Tyto ovšem souvisejí s vývojem a výzkumem jejich modifikací. Na straně druhé pokračuje intenzivní výzkum polymerů pro speciální aplikace, jako je záznam informací, elektronika, analytika a medicína.

Dlouhodobá prognóza je obtížná. Je zřejmé, že výzkum a vývoj budou pokračovat i nadále v obou zmíněných směrech. Úspěch materiálů vyvinutých základním a průmyslovým výzkumem bude v rozhodující míře ovlivněn cenou, přesněji řečeno poměrem mezi cenou a užitnou hodnotou materiálu.

Z tohoto hlediska pozorujeme zvýšený zájem o tenkostěnné výrobky. Tenkostěnné profily jsou charakteristické tím, že jejich jednotlivé rozměry mají řádově různé velikosti. Tloušťka stěny profilu je malá ve srovnání s jeho šířkou a výškou. Tyto profily jsou pro svoji nízkou hmotnost a úsporu materiálu velmi vhodné pro velké množství výrobků v širokém spektru technologických procesů mnoha oborů výroby. [1]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PRUŽNOST A PEVNOST

1.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY A VLASTNOSTI

Pružnost a pevnost jsou součástí širšího vědního oboru mechaniky, která je odvětvím fyziky. Proti teoretické mechanice, v níž předpokládáme, že tělesa jsou dokonale tuhá, zabývají se pružnost a pevnost tělesy, ve kterých je poddajnost jednou z jejich základních vlastností. Proto jsou pružnost a pevnost taky považovány za součást mechaniky poddajných těles nebo prostředí. Uvažování poddajnosti těles umožňuje řešit úlohy staticky neurčité.

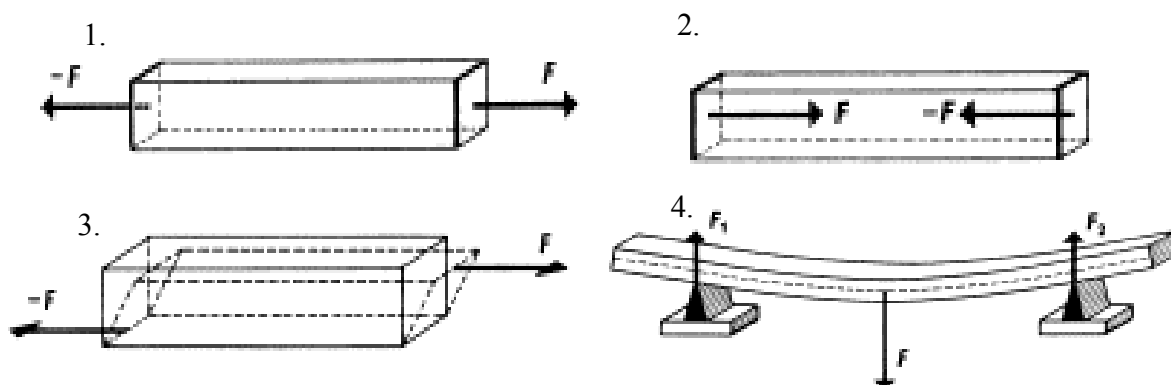
Pružnost a pevnost mají za úkol vytvářet prakticky použitelné jednoduché výpočtové metody vyskytující se součástí a konstrukcí jednoduchých, ale i složitých tvarů v různých provozních podmínkách. Znalosti metod pružnosti a pevnosti a jejich správné uplatňování podstatně ovlivňují hospodárnost, účelnost a spolehlivost, s jakou jsou strojní součásti konstruovány z pevnostního hlediska. [2]

1.2 PEVNOST

Pevnost je fyzikální vlastnost pevných látek, vyjadřující jejich odolnost vůči vnějším silám.

Rozeznáváme tyto základní druhy pevnosti:

- 1) Pevnost v tlaku
- 2) Pevnost v tahu
- 3) Pevnost ve stříhu (nebo také pevnost ve smyku)
- 4) Pevnost v ohybu



Obr. 1: Základní druhy namáhání vnějšími silami

Pro zjišťování pevnosti (respektive meze pevnosti) jsou užívány specializované přístroje a metodiky. S pevností souvisí mez pevnosti σ_p (může být značena i jinak), jednotkou je Pa (Pascal). Mez pevnosti je maximální hodnota normálového napětí σ_n , při které ještě není porušena celistvost materiálu. Vypočítá se jako podíl deformující síly F a průřezu kolmého řezu S , na který tato síla působí:

$$\sigma_n = F/S \quad (1)$$

nebo jako součin relativní deformace ε a materiálové konstanty E :

$$\sigma_n = E\varepsilon \quad (2)$$

[3]

1.3 TUHOST

Tuhost je vedle pevnosti základní technickou charakteristikou každého konstrukčního materiálu. V širším smyslu ji chápeme jako poměr působícího namáhání k deformaci, kterou toto namáhání vyvolává. Čím vyšší je tento poměr, tím je materiál tužší a naopak.

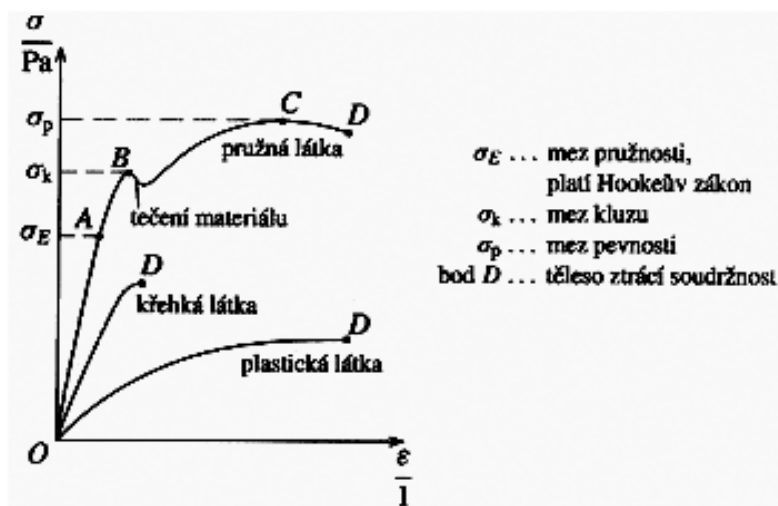
1.4 PRUŽNOST

Pružnost (též elasticita) je část fyziky, která studuje vztahy mezi deformacemi těles a vnějšími silami, která na těleso působí. Pružné těleso je takové těleso, které se působením vnější síly deformuje, ale po odstranění této síly se vrací do původního tvaru. Tělesa, která se po odstranění vnější síly nevrátí do původního tvaru, se označují jako nepružná.

Působení vnějších sil na těleso může být různé. Hovoříme pak o namáhání tělesa v tahu, v tlaku, v ohybu, ve smyku, v krutu apod. Při působení malých sil platí (přibližně) lineární vztah mezi působícím napětím a relativní deformací. Tento vztah je označován jako Hookův zákon. Při platnosti Hookova zákona je důležitou charakteristikou tzv. modul pružnosti (Youngův modul)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

kde ε je relativní deformace, σ je napětí.



Obr. 2: Závislost napětí-prodloužení u různých látek

Lineární závislost mezi napětím a prodloužením obvykle pro daný materiál platí pouze v určitém rozsahu napětí. Hranice, za níž přestává být vztah mezi napětím a prodloužením lineární, se nazývá mez úměrnosti. Za mezí úměrnosti již sice závislost mezi napětím a prodloužením není lineární, avšak materiál je stále elastický. Existuje však další hranice, tzv. mez pružnosti (elasticity), po jejímž překročení se již předmět nevrátí do původního stavu, tzn. přestává být elastickým a stává se plastickým. U některých látek je závislost mezi napětím a prodloužením vždy nelineární. Tyto jevy lze dobře demonstrovat na závislosti mezi napětím σ a prodloužením ε .

Z obrázku 2. lze popsat Hookův zákon. Hookův zákon platí v tzv. mezi úměrnosti (σ_U). Po odstranění zatížení deformace zmizí a materiál se vrátí na původní délku (na obrázku 2. není vyznačena). Hodnota σ_E označuje mez pružnosti. Mez pružnosti se obvykle od meze úměrnosti příliš neliší. Při zvýšení zatížení nad mez pružnosti dochází po odstranění zatížení k tomu, že deformace nezmizí úplně, ale zůstává jistá trvalá (plastická) deformace. Napětím σ_K je určena tzv. mez kluzu nebo mez průtažnosti. Materiál se v tomto bodě prodlužuje, aniž by se zvětšovalo zatížení. Dochází ke změně fyzikálních vlastností a v důsledku přetvoření také ke zpevnění. Při dalším zvyšování zatížení dosáhneme meze pevnosti σ_P . V bodě D dochází k přetržení materiálu. Za mezí pevnosti dochází k zužování průřezu, proto křivka klesá.



Obr. 3: Hysterezní křivka při opakovaném namáhání tlakem a tahem.

U některých materiálů nezmizí po odstranění zatížení deformace ihned, ale pouze její část. Zbytek deformace pak mizí po určitou dobu. Tento jev se nazývá dopružování (elastická hystereze). Dopružování a odchylky od Hookova zákona se objevují při opakovaném namáhání materiálu tahem a tlakem. Křivky napínání a stlačování pak vytváří tzv. hysterezní křivku. Toto vidíme na obrázku 3. (pro ocelovou tyč). [3]

2 GEOMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY PRŮŘEZU

Při zjišťování průběhu napětí u základních způsobů namáhání (prostý tah-tlak, prostý ohyb, prostý krut) se vychází z předpokladu rovinnosti příčných řezů. Ve vztazích pro výpočet napětí a deformace vystupují veličiny, které nám příčný průřez při způsobu namáhání charakterizují. [2]

2.1 KVADRATICKÝ MOMENT PRŮŘEZU PLOCHY

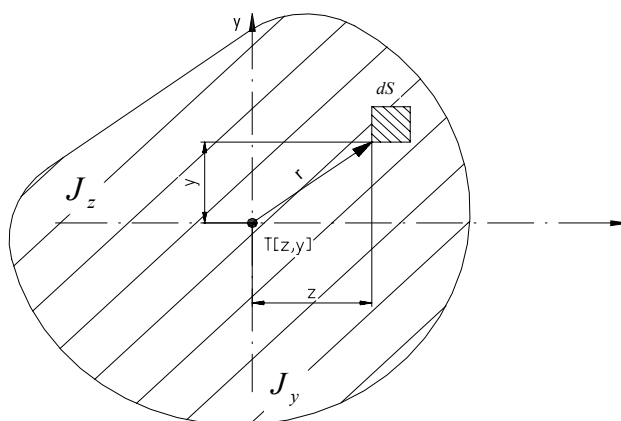
Kvadratický moment celého průřezu prutu, o obsahu S , k ose z (J_z), popř. k ose y (J_y), která leží v rovině průřezu obr. 4, určíme jako součet kvadratických momentů jeho elementárních částí dS

$$J_z = \oint_{(S)} y^2 \cdot dS \quad (4)$$

resp.

$$J_y = \oint_{(S)} z^2 \cdot dS \quad (5)$$

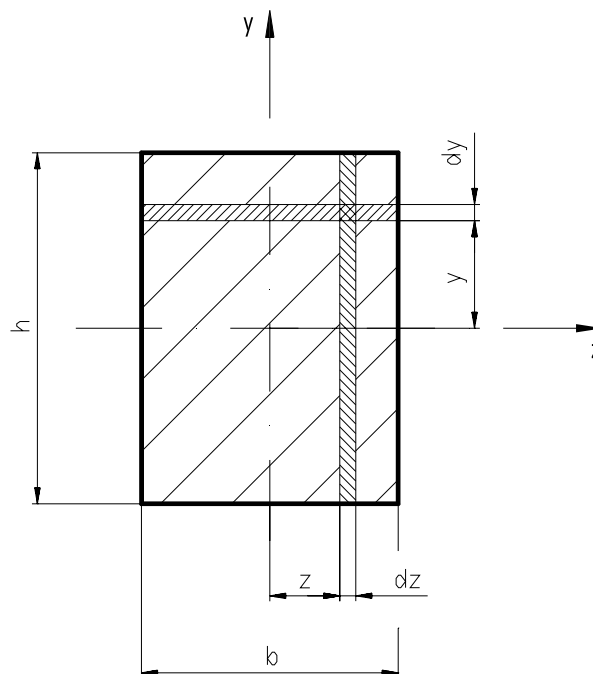
Rozměr kvadratického momentu (nebo taky momentu setrvačnosti) průřezu je J (m^4)



Obr. 4: Osové kvadratické momenty

2.2 KVADRATICKÉ MOMENTY PRŮŘEZŮ ZÁKLADNÍCH TVARŮ

a) obdélník



Obr. 5: Obdélníkový průřez

- k ose z

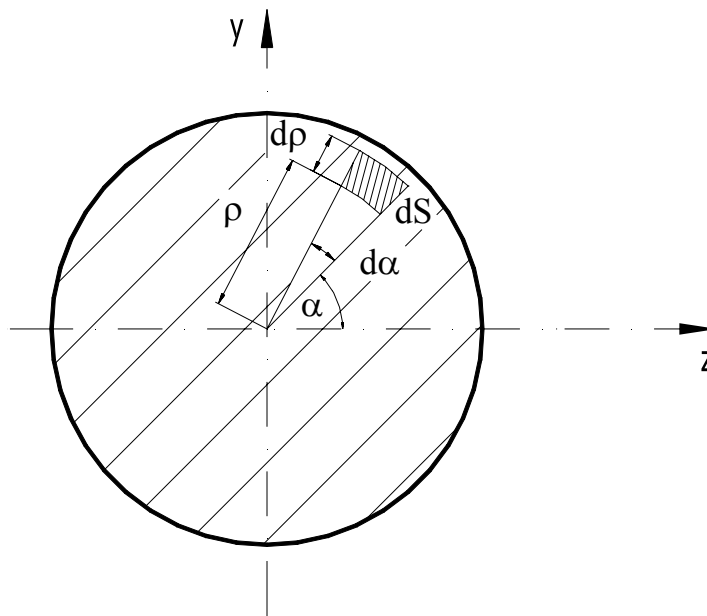
$$J_z = \oint_{(S)} y^2 \cdot dS = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 \cdot b dy = \frac{1}{12} b h^3 \quad (6)$$

- k ose y

$$J_y = \oint_{(S)} z^2 \cdot dS = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} z^2 \cdot h dz = \frac{1}{12} b^3 h \quad (7)$$

b) kruh

$$dS = \rho \cdot d\alpha \cdot d\rho \quad (8)$$



Obr. 6: Kruhový průřez

$$J_{zT} = \oint_{(S)} y^2 \cdot dS = \int_0^{\frac{d}{2}} \int_0^{\frac{2\pi}{2}} (\rho \sin \alpha)^2 \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\alpha = \frac{\pi d^4}{64} \quad (9)$$

$$J_{yT} = \oint_{(S)} z^2 \cdot dS = \int_0^{\frac{d}{2}} \int_0^{\frac{2\pi}{2}} (\rho \cos \alpha)^2 \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\alpha = \frac{\pi d^4}{64} \quad (10)$$

$$J_P = J_{zT} + J_{yT} = \frac{\pi d^4}{32} \quad (11)$$

[2]

2.3 POLÁRNÍ MOMENT PRŮŘEZU

Definici této geometrické charakteristiky průřezu vyjádříme dle obr. 4 integrálem

$$J_p = \oint_{(S)} dJ_p = \oint_{(S)} r^2 dS \quad (12)$$

Rozměr polárního momentu průřezu je J_p (m^4). Zavedeme-li do rovnice vztah $r^2 = y^2 + z^2$, dostaneme

$$J_p = \oint_{(S)} (y^2 + z^2) dS = \oint_{(S)} y^2 \cdot dS + \oint_{(S)} z^2 \cdot dS = J_z + J_y \quad (13)$$

jak vyplývá z rovnic 4 a 5.

Z obr. 4 a rovnice 13 plyne, že polární moment definovaný rovnicí 12 lze nahradit součtem kvadratických momentů ke dvěma kolmým osám procházejícím bodem 0, přičemž natočení os y a z může být libovolné. [2]

2.4 DEVIAČNÍ MOMENT PRŮŘEZU

Deviační moment průřezu S k osám obr. 4 je definován vztahem

$$D_{yz} = \oint_S dD_{yz} = \oint_{(S)} y \cdot z \cdot dS \quad (14)$$

Rozměr deviačního momentu je D_{xy} (m^4).

Výsledný deviační moment celého průřezu (ke shodným osám), stejně jako výsledný kvadratický moment průřezu, je určen součtem deviačních (kvadratických) momentů jednotlivých částí průřezu.

Zásadní rozdíl mezi deviačním a kvadratickými momenty průřezu spočívá v tom, že vzhledem k definicím (rovnice 4,5,12) jsou kvadratické momenty vždy kladné, zatímco

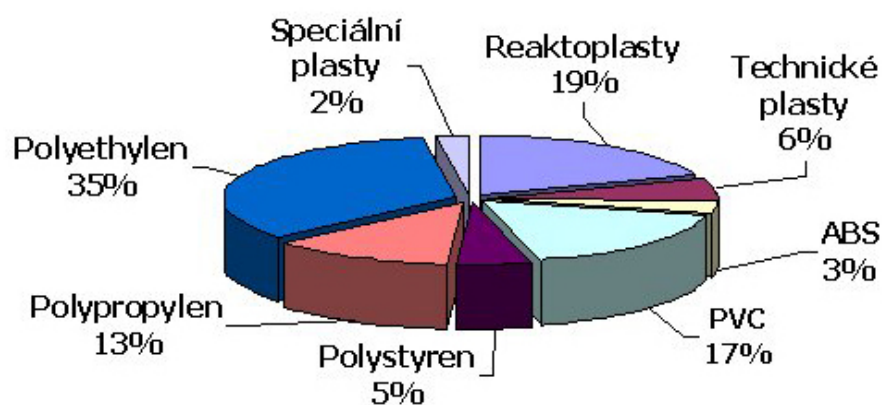
pro deformační moment na základě jeho definice (rovnice 14) plyne, že D_{yz} může být kladný, záporný nebo roven 0. [2]

3 PLASTY

3.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE

Při výběru materiálu je vedle vlastností a ceny suroviny nutno vzít v úvahu i jeho zpracovatelnost, která výrazně ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti konečného výrobku, ale i technologické podmínky, konstrukční řešení nástroje a volbu stroje. Vlastnosti a odolnost polymerů jsou dány jejich chemickou a fyzikální strukturou, mohou být ovšem do značné míry ovlivněny i zpracovatelským procesem.

Nyní existuje na trhu několik tisíc druhů plastů. V technické praxi však výrazné uplatnění má jen několik desítek druhů. Z celkového objemu světové produkce plastů představuje skoro 80 % jen šest druhů plastů a 70 % výroby jen tři druhy, a to polyolefiny, styrenové hmoty a polyvinylchlorid. Sortiment termoplastů se neustále zvětšuje, a to dvěma směry, kdy jednou cestou je výroba stále nových polymerů a druhou cestou je modifikace dosavadních polymerů. Zvyšování počtu materiálů má své výhody pro konstrukci a výrobu dílů z plastů, aniž by došlo k výrazné změně ceny, na druhé straně to klade zvýšené nároky na znalosti konstruktérů.



Světová produkce plastů v roce 1999

Obr. 7: Světová produkce plastů v roce 1999

Výhody a nevýhody plastů lze shrnout do následujících bodů:

- **VÝHODY:** nízká měrná hmotnost, výborné zpracovatelské vlastnosti, plasty jsou elektrické izolanty, mají výbornou korozní odolnost, tlumí rázy a chvění, atd.
- **NEVÝHODY:** nízké mechanické a časově závislé vlastnosti, kříp (tečení), ekologická zatížitelnost, apod. [5]

3.2 TERMOPLASTY

Polymerní materiály rozdělujeme na dvě základní skupiny:

- tvrdé a pevné plasty
- měkké a elastické kaučuky.

Toto rozlišení je ovšem vázáno na pokojovou teplotu.



Obr. 8: Ukázka některých výrobků z plastů

Plasty všeobecně rozlišuje na dvě velké skupiny:

- termoplasty
- reaktoplasty.

Molekuly první skupiny jsou vzájemně poutány fyzikálními vazbami, při zvýšené teplotě postupně měknou a přecházejí do taveniny. Přechod je pozvolný, jak to vyplývá z amorfnní fáze, která je rozhodující částí struktury všech termoplastů. Tímto se termoplasty liší od krystalických kovů. Viskózní konzistence taveniny běžných termoplastů vlastně umožňuje všechny běžné zpracovatelské technologie jako je vstřikování, vytlačování a vyfukování. Makromolekuly reaktoplastů jsou propojeny do husté souvislé sítě. Při zvýšení teploty se nemohou roztavit a obvykle svoji tuhost ještě zvyšují. [5]

3.3 TENKOSTĚNNÉ PROFILY

Tenkostěnné profily jsou charakteristické tím, že jejich jednotlivé rozměry mají řádově různé velikosti. Tloušťka stěny profilu je malá ve srovnání s jeho šířkou a výškou. Při výpočtu průřezových charakteristik tak lze zanedbat kvadratické momenty částí průřezu ke středové čáře profilu. Kvadratický moment plochy průřezu je pak roven

$$J = s \cdot j \quad (15)$$

kde j (mm^3) je kvadratický moment střednice k dané ose. Při praktickém výpočtu vztahujeme momenty jednotlivých částí průřezu ke vhodně zvolené ose \underline{z} , např. k ose jdoucí jedním z okrajů průřezu.

V důsledku malé tloušťky stěny a tím její malé tuhosti vznikají při namáhání tenkostěnných profilů efekty, se kterými se u plných průřezů nesetkáme. Smyková napětí od příčných sil dosahují značných hodnot. Příslušné smykové deformace pak způsobují tzv. deplanaci, tj. zborcení roviny příčného řezu, a tím porušení Bernoulliho-Navierova předpokladu o zachování rovinnosti průřezů při ohybu.

Rozvádění místních vnějších sil, příp. vazebných reakcí je při malých tloušťkách stěn méně progresivní – oblast ovlivněná místním vnějším zatížením se rozprostírá na podstatně větší délce, než je tomu u plnostěnných prutů. Často je nutná konstrukční úprava – vyztužení, zesílení – v působišti vnější síly. Ta má za úkol zamezit velkým deformacím průřezu, které by jinak vznikly vlivem malé tloušťky stěny a tedy i její malé tuhosti.

Tenkostěnné průřezy dále na rozdíl od plných průřezů nezachovávají při namáhání svůj původní tvar – snadno se deformují. Napětí vypočítaná za předpokladu zachování tvaru průřezu se pak obecně liší od skutečných napětí v profilu.

V oblasti tlakových napětí – např. v tlačené části ohýbaných průřezů – vzniká nebezpečí ztráty stability tenkostěnných prvků. Mezní stav ztráty stability je pak většinou určujícím pro únosnost tenkostěnných výrobků z plastů. Je to dáno jak samotnou povahou tenkostěnných prvků, tak nízkým modulem pružnosti plastů.

Mezi další zvláštnosti mechanického chování tenkostěnných profilů patří vlastnosti při namáhání kroucením, kdy vznikají za určitých okolností (stíněný krut) kromě smykových i napětí normálová.

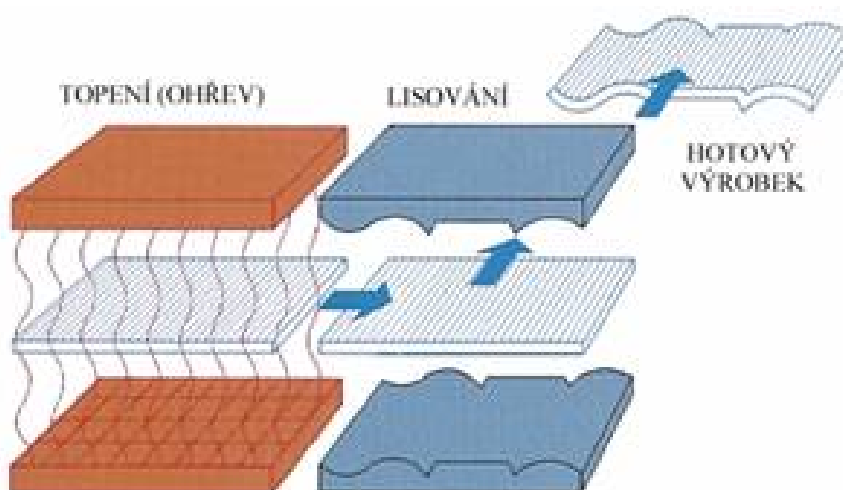
Vysoké jednostěnné profily větších štíhlostních poměrů, namáhané ohybem v rovině větší tuhosti, mohou ztratit stabilitu (sklopit se) v důsledku vybočení tlačené pásnice. Tlačenou pásnici lze přibližně kontrolovat jako prut namáhaný na vzpěr, zanedbáme-li m.j. tuhost v kroucení, která je u otevřených tenkostěnných průřezů velmi malá.

Únosnost tenkostěnných profilů o malé štíhlosti je též omezena ztrátou místní stability tenkých stěn, z nichž se profil skládá. Tato forma ztráty stability se projevuje vyboulením (zvlněním) tlačené stěny, takže dochází k výrazným místním změnám tvaru příčného průřezu. [4]

4 TVAROVÁNÍ

4.1 TVAROVÁNÍ TERMOPLASTŮ

Tvarováním za tepla lze zpracovávat pouze termoplasty. Tvarováním zpracováváme desky téměř ze všech termoplastů, nejčastější jsou však ze styrenových plastů, např. hPS a ABS, dále z PVC a jeho kopolymerů, PMMA, PC, PET, PE a PP. Tvarování je výrobní postup, u kterého polotovar ve tvaru desky nebo fólie mění svůj tvar bez většího přemísťování částic hmoty. Obvykle se používají jednovrstvé desky vyrobené z jednoho druhu plastu vytlačováním na šnekových vytlačovacích strojích. Při stejných nebo velmi blízkých podmínkách se tvarují i desky vícevrstvé. Z hlediska tvarovacího procesu jsou jednovrstvé desky příhodnější, neboť desky z více druhů plastů kladou na technologii větší nároky.



Obr. 9: Základní princip tvarování termoplastů za tepla

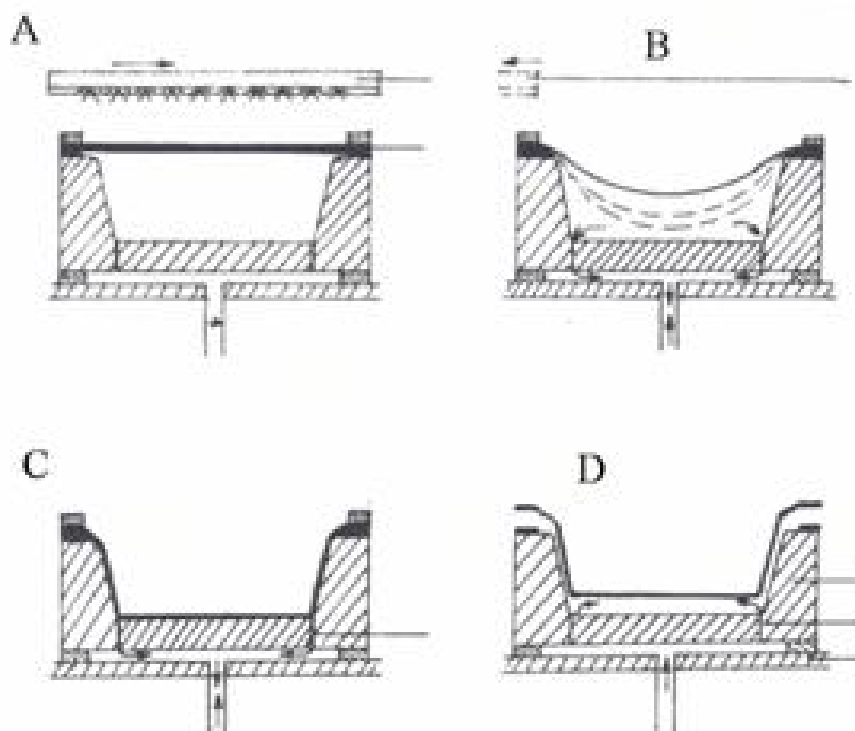
Tvarování se většinou provádí za tepla, jen ve výjimečných případech je možné některé plasty tvarovat bez ohřevu. Jedná o výrobky jednoduchých tvarů a bez velkých nároků zejména na rozměrovou přesnost. Tvarováním desek za tepla se vyrábějí různé kryty, nádoby, kufry, apod. Velký význam má tato technologie v obalové technice.

Podle velikosti síly se tvarování dělí na:

- mechanické
- pneumatické - podtlakové
- pneumatické - přetlakové

Podle tvaru výrobku se dělí na:

- negativní (tvarování do dutiny)
- pozitivní (tvarování na tvárník)
- kombinované



Obr. 10: Tvarování termoplastů ve formě působením vakua

Podle způsobu předtvarování se dělí na:

- tvarování s mechanickým předtvarováním
- tvarování s pneumatickým předtvarováním.

Při tvarování se musí plast v podobě desky rovnoměrně zahřát na teplotu, při níž hmota vykazuje dobrou tvarovatelnost. Pro tloušťky desek pod 3 mm se ohřívá z jedné strany, nad 3 mm z obou stran (vliv špatné tepelné vodivosti plastů). Důležité je stejnoměrné prohřátí desky ve všech místech, které se zúčastní tvarování.

Tažnost hmoty dosahuje maxima v určité oblasti teplot, která závisí na druhu plastu. Tato teplota leží u amorfních termoplastů těsně pod teplotou viskózního toku T_f , kdy se hmota nachází v kaučukovitě elastickém stavu, u krystalických plastů těsně nad teplotou tání T_m . Amorfní plasty se ohřívají kratší dobu, než semikrystalické.

Jsou-li teploty tvarování nižší, než optimální, je nutno na tvarování vynaložit větší sílu. Pevnost hmoty se totiž zvyšuje a ve výrobku zůstávají poměrně velká vnitřní pnutí. Po překročení optima plast rychle ztrácí soudržnost a při tvarování se trhá. Tvarování probíhá v chladné formě. Musí proběhnout v co nejkratší době, aby teplota plastu byla během fáze tvarování konstantní. Volí se co nejvyšší rychlost tvarování, kterou daný plast dovolí.

Konečný tvar výrobku, musí být dosažen po jediném zplastikování hmoty v jednom tvarovacím cyklu. Nelze používat postupného tažení, protože vnitřní pnutí, způsobené hlavně orientací makromolekul, by při opětovném zahřátí hmoty vyvolalo deformace předtvarovaného dílu. Tento by potom měl snahu vrátit se do původního tvaru desky. To je důsledek tzv. tvarové paměti. [5]

4.2 TVAROVACÍ FORMY A STROJE

Tvarovací stroje jsou konstrukčně velmi jednoduché, většinou stolové konstrukce. Pohyb je ovládán hydraulicky, pneumaticky nebo mechanicky. Rám pro uchycení desky je opatřen pryží a upínání je mechanické nebo pneumatické. K ohřevu se většinou používají sálavé zdroje tepla, infrazářiče nebo pece. Tvarovací stroje jsou součástí linek, které na začátku dělí desky (stříháním, řezáním) a na konci opět oddělují díly a nebo třeba plní výrobky.



Tvarovací stroje

Obr. 11: Tvarovací stroje

K přednostem tvarování termoplastických desek patří možnost používat jednoduché a zpravidla jednodílné tvarovací formy, protože funkci druhého dílu zastává okolní přetlak vzduchu. Tvarovací síly jsou malé, a proto formy mohou být z málo pevných materiálů. Materiál forem musí snést alespoň krátkodobě teplotu v rozmezí od 20 do cca 200 °C.

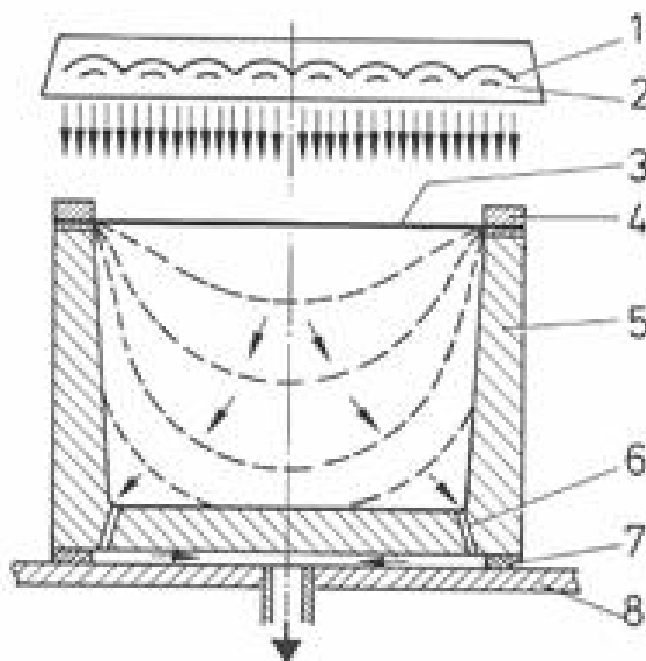
Sádrové formy se hodí jen pro zhotovení několika kusů výtažků, např. při ověřovacích zkouškách, protože sádra vlivem teplotních změn snadno praská. Dřevěné

formy jsou trvanlivější, ale kvalita jejich povrchu se postupně zhoršuje se střídající se teplotou. Naproti tomu formy z tvrzené tkaniny mají životnost až 20 000 pracovních cyklů, ovšem podobně jako u dřeva je obtížné leštěním dosáhnout hladkého povrchu. Z tohoto hlediska je lepší tvrzené dřevo.

Formy vyrobené odléváním epoxidových pryskyřic mají kvalitní povrch i dobrou rozměrovou stabilitu. Špatná tepelná vodivost samotných epoxidů se zlepší přidávkem litinového nebo hliníkového prášku nebo se do formy zalijí měděné trubky, kterými protéká chladicí kapalina. Pro velké série jsou nejvhodnější formy z lehkých slitin. Vyrábějí se většinou odléváním a dodatečným obrobením funkčních ploch. Ocelové formy jsou nejtrvanlivější, ale používají se málo.

Podle velikosti výtažků se formy navrhují jako jednonásobné nebo vícenásobné. Jestliže se používají negativní formy, je možno tvarové dutiny umístit vedle sebe velmi těsně, což u pozitivních forem nejde. To se zlepšuje použitím speciální mříže, která desku přidržuje v místech mezi jednotlivými výtažky při pohybu vícenásobných tvárníků.

Formy musí být opatřeny odsávacími otvory, které spojují prostor dutiny formy pod tvarovanou deskou se zásobníkem a s odsávacím zařízením. Otvory jsou rozmístěny rovnoměrně po celém funkčním povrchu formy, aby nedošlo k uzavření zbytku vzduchu v některém místě dutiny. Otvorů musí být dostatečný počet a musí mít i správný průměr. Ten závisí na druhu plastu a na tloušťce tvarované desky. Mají-li otvory příliš velký průměr, zůstanou na výtažku jejich otisky, které zhoršují vzhled výtažku. Udává se, že průměr kanálku nemá být větší, než polovina tloušťky tvarované desky, avšak i u tenkých fólií se většinou používají kanálky s průměrem asi 1 mm, a to s ohledem na jejich výrobu. U polyolefinů, které se vyznačují velmi dobrou tvarovatelností, se volí kanálky co nejmenšího průměru, např. 0,4 až 0,5 mm, a to i u tlustších desek. U desek z PVC mohou mít průměr větší. Vzájemná vzdálenost otvorů bývá na rovných plochách 75 až 150 mm, na hranách však jen 20 mm. Vždy je výhodnější použít větší množství malých kanálků, než malého počtu velkých.



Obr. 12: Tvarování termoplastů

Tvarovací síla musí působit na výtažek po celou dobu chladnutí hmoty, aby nedocházelo k jeho deformacím. Doba chlazení se zkracuje chlazením formy vodou protékající soustavou chladicích kanálků a případně foukáním ochlazeného vzduchu na výtažek. Většího efektu se však dosáhne rozprašováním vodní mlhy. [5]

5 STANOVENÍ CÍLŮ PRO PRAKTICKOU ČÁST

V praktické části bakalářské práce využiji technologii tvarování a vyrobím zkušební tělesa (profily) pro laboratorní zkoušky. Pomocí tvarovacího stroje Formech 300X vyrobím dostatečný počet zkušebních profilů. Předpokládám, že pro každou z 8 sérií měření provedu pět měření. U každého zkušebního profilu provedu kontrolu kvality, rozměrů

a vhodnosti pro další práci. Nevyhovující profily by negativně ovlivnili výsledné hodnoty. Pro úpravu vytvarovaných desek použiji pásovou pilu.

Výchozím materiálem jsou polystyrenové pláty zakoupené pod obchodní značkou IROPLAST SB. Jedná se o houževnatý polystyren. Pro mou práci použiji dvě tloušťky s označením SB 1x1000x2000 a SB 2x1000x2000. Základní vlastnosti tohoto termoplastu jsou malá odolnost proti povětrnosti a použitelnost do cca +70°C. Neplave a je mléčné barvy. Zpracovává se vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním nebo vakuovým tvarováním. A právě vakuového tvarování použiji pro následnou úpravu do požadovaného tvaru.

Na trhacím stroji ZWICK provedu na těchto profilech zkoušky při namáhání ohybem. Získané hodnoty zpracuji do grafů a tabulek. Cílem práce bude stanovit závislost tuhosti a pevnosti na výšce profilu a tloušťce základního materiálu.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 VÝROBA ZKUŠEBNÍHO TĚLESA

6.1 PŘÍPRAVA PŘED SAMOTNÝM TVAROVÁNÍM

Před samotným tvarováním materiálu do profilu bylo nutné udělat mnoho důležitých činností bez kterých by nebylo možno výsledné profily vytvořit.

Vytvoření šablony pro tvarování jsem přenechal odborné stolařské dílně, která má potřebné vybavení a zkušenosti s výrobou ze dřeva. Byly vytvořeny dvě formy stejného tvaru, ale různé výšky. Bylo rozhodnuto o profilu ve tvaru U, o výškách profilu 25 a 17 mm. Délka i šířka je jednotná pro oba profily a to délka profilu 230 mm a šířka 45 mm.

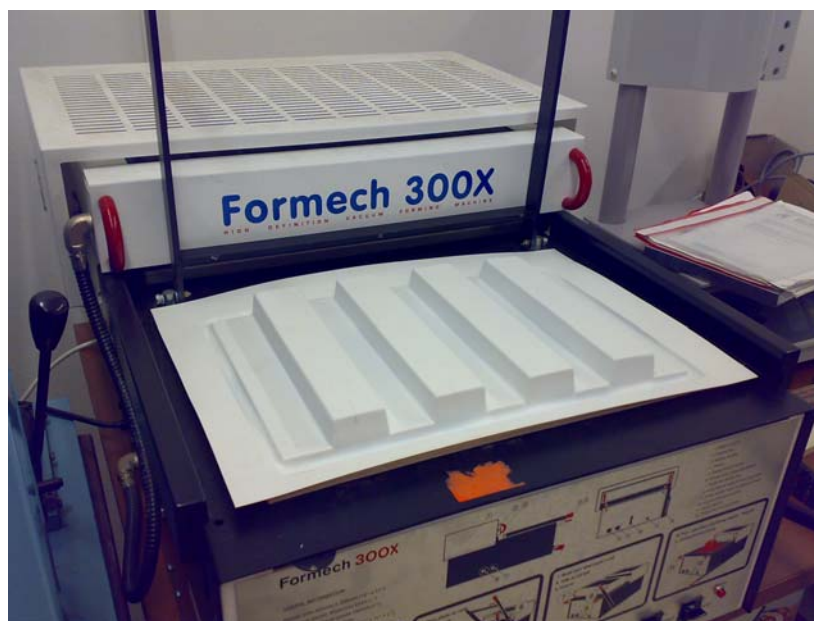


Obr. 13: Dřevěná forma vložená v tvarovacím stroji

6.2 VYTVAROVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH PROFILŮ

Výchozím materiálem jsou polystyrenové pláty zakoupené pod obchodní značkou IROPLAST SB. Jedná se o houževnatý polystyren. Pro mou práci potřebuji dvě tloušťky s označením SB 1x1000x2000 a SB 2x1000x2000. Tyto jsem si rozřezal na pláty pro další zpracování o rozměru 400 x 260 mm. Bylo vyrobeno i několik rezervních plátů pro zkoušky nastavení teploty a délky předehřevu před samotným vakuovým tvarováním.

Pro výrobu potřebného profilu jsem využil technologii tvarování. Tvarovací stroj Formech 300X je na obsluhu jednoduchý tvarovací stroj. Po poradě s Ing. Šumberou byla během krátké chvíle nastavena vhodná teplota i čas ohřevu a vakuování pro dokonalé vytvarování profilů. Vytvořil jsem tedy potřebný počet profilů o vysoké kvalitě a přesnosti pro následující laboratorní zkoušky na trhacím stroji.



Obr. 14: Vytvarované profily

U každého zkušebního profilu jsem provedl kontrolu kvality, rozměrů a vhodnosti pro další práci. Nevyhovující profily by negativně ovlivnili výsledné hodnoty. Pro úpravu vytvarovaných desek byla použita pásová pila.



Obr. 15: Pásová pila

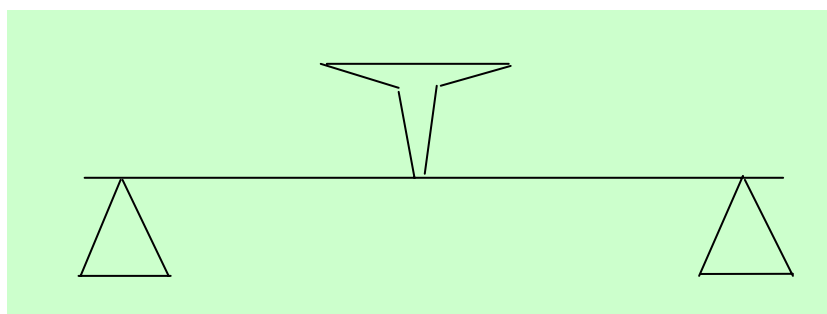
6.3 MĚŘENÍ NA TRHACÍM STROJI ZWICK

Po zaškolení na obsluhu a nastavení stroje byla na trhacím stroji Zwick provedena zkouška při namáhání ohybem na všech profilech. Získané hodnoty byly zpracovány do grafů a tabulek pomocí programu TESTEXPERT, který byl součástí trhacího stroje.



Obr. 16: Trhací stroj ZWICK

Měření probíhalo jako třibodová zkouška ohybem. Vzdálenost podpěr byla 180 mm. Ohýbacím tělesem byl kovový profil do tvaru T, který zatěžoval profily přesně uprostřed mezi podpěrami.



Obr. 17: Schéma ohybové zkoušky

Každý profil byl zatěžován oboustranně. Cílem první zkoušky je zjistit jestli dvojnásobná tloušťka materiálu znamená i dvojnásobnou velikost ohybové tuhosti. Dalším výsledkem bude, jak ovlivní výška profilu ohybovou tuhost. Zajímá mě, zda-li o 47 % vyšší profil bude mít i o 47 % vyšší ohybovou tuhost.



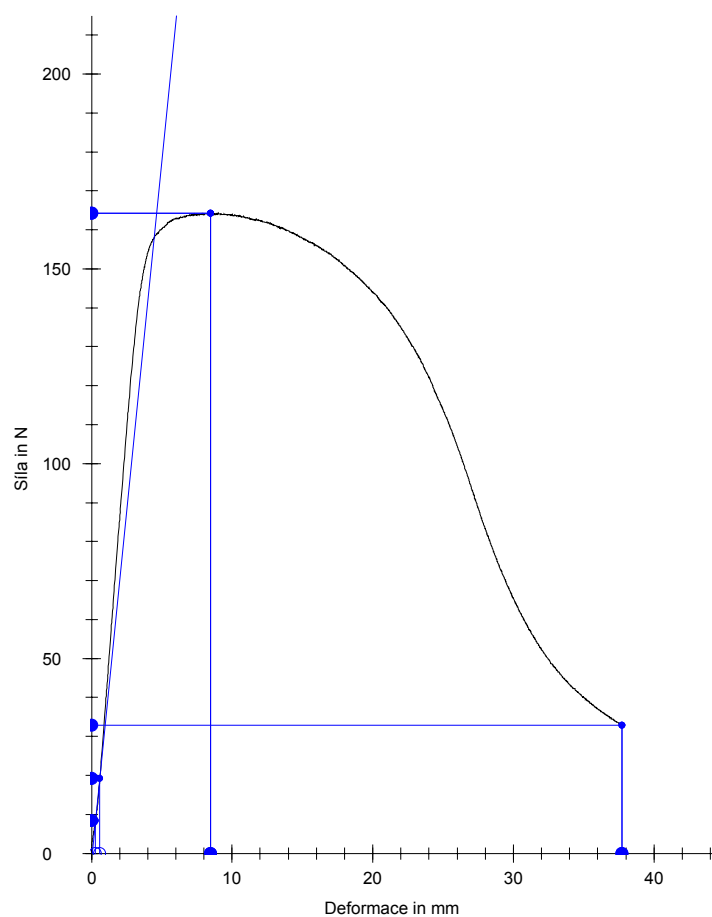
Obr. 18: Zatěžování profilu z vrchní strany



Obr. 19: Zatěžování profilu ze spodní strany

7 NAMĚŘENÉ HODNOTY A JEDNOTLIVÉ GRAFY

7.1 Profil 2 mm, 25 mm vysoký, zatížený z vrchní strany

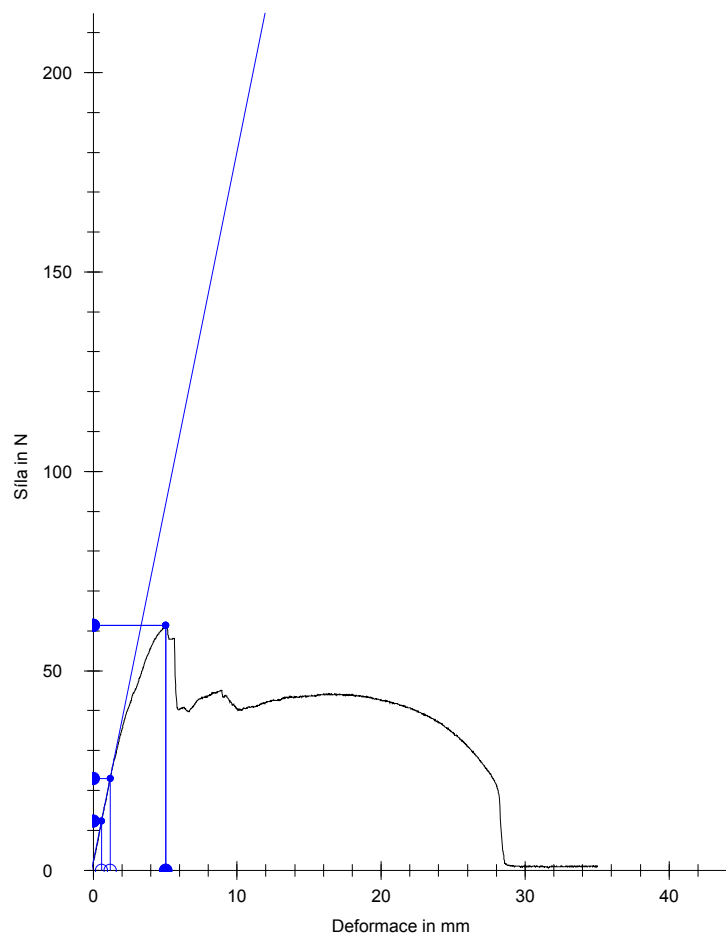


Graf č.1. 1. série

Pořadové číslo měření	F max [N]	Průhyb y při F max [mm]	F při y1 [N]	F při y2 [N]	E.Jz [N/mm ²]
1	152,87	11,92	54,88	150,28	1 558 196,73
2	180,40	9,06	60,83	178,96	2 419 271,52
3	167,85	7,69	62,21	167,63	2 651 986,35
4	164,25	8,45	61,83	163,80	2 361 701,18
5	168,02	9,06	43,06	166,72	2 253 248,34
Průměr	166,68	9,24	56,56	165,48	2 248 880,83

Tab. 1. Tabulka k 1. sérii měření

7.2 Profil 1 mm, 25 mm vysoký, zatížený z vrchní strany

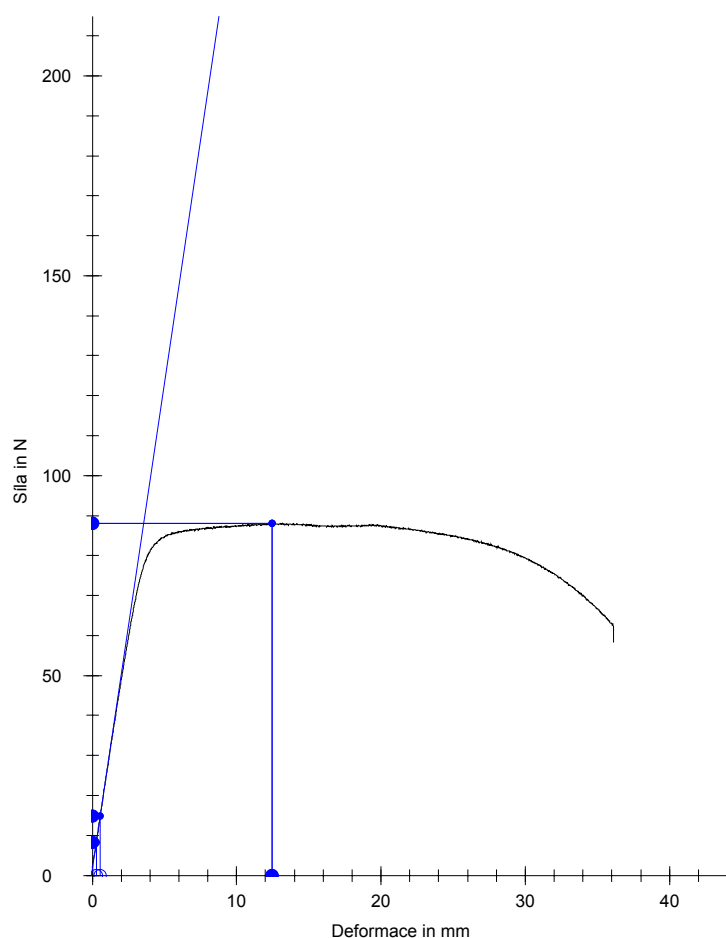


Graf č.2. 2. série

Pořadové číslo měření	F max [N]	Průhyb y při F max [mm]	F při y1 [N]	F při y2 [N]	E.Jz [N/mm ²]
11	46,49	15,37	31,15	46,05	367 503,90
12	51,84	11,46	39,39	51,37	549 612,57
13	53,07	12,95	29,08	51,97	497 915,44
14	61,37	5,06	45,47	43,59	1 473 607,71
15	55,37	5,32	48,78	45,29	1 264 559,21
Průměr	53,63	10,03	38,77	47,65	830 639,77

Tab. 2. Tabulka k 2. sérii měření

7.3 Profil 2 mm, 17 mm vysoký, zatížený z vrchní strany

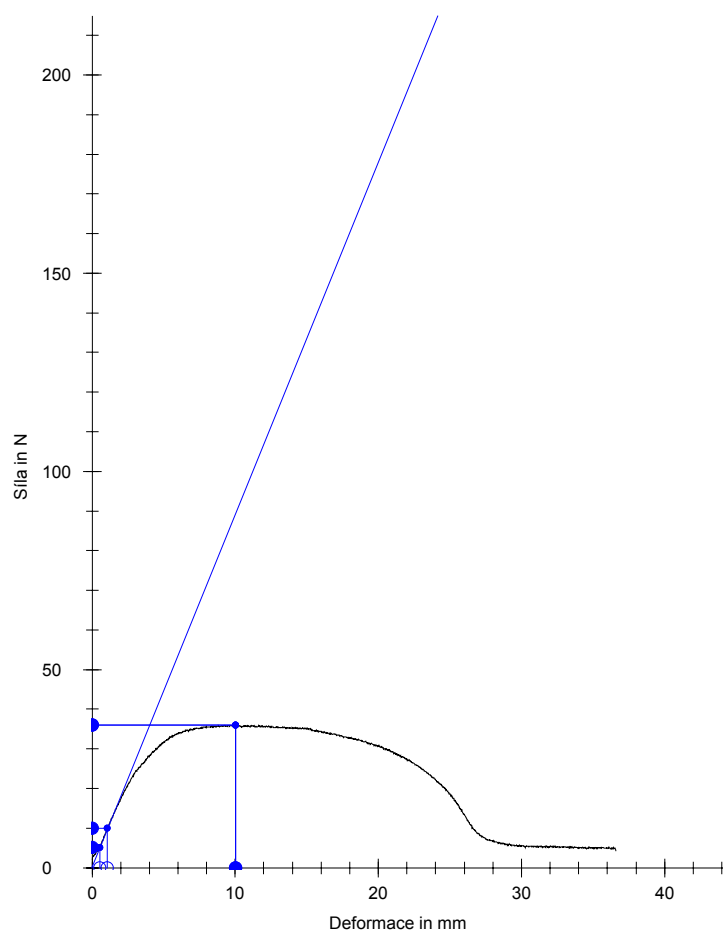


Graf č.3. 3. série

Pořadové číslo měření	F max [N]	Průhyb y při F max [mm]	F při y1 [N]	F při y2 [N]		E.Jz [N/mm ²]
41	98,26	19,76	7,89	14,81		604 179,66
42	88,04	12,45	8,24	14,81		859 185,54
43	88,39	12,07	6,53	10,51		889 758,49
44	93,43	12,15	7,83	14,08		934 300,00
45	92,33	18,77	7,62	14,59		597 660,90
Průměr	92,09	15,04	7,62	13,76		777 016,92

Tab. 3. Tabulka k 3. sérii měření

7.4 Profil 1 mm, 17 mm vysoký, zatížený z vrchní strany

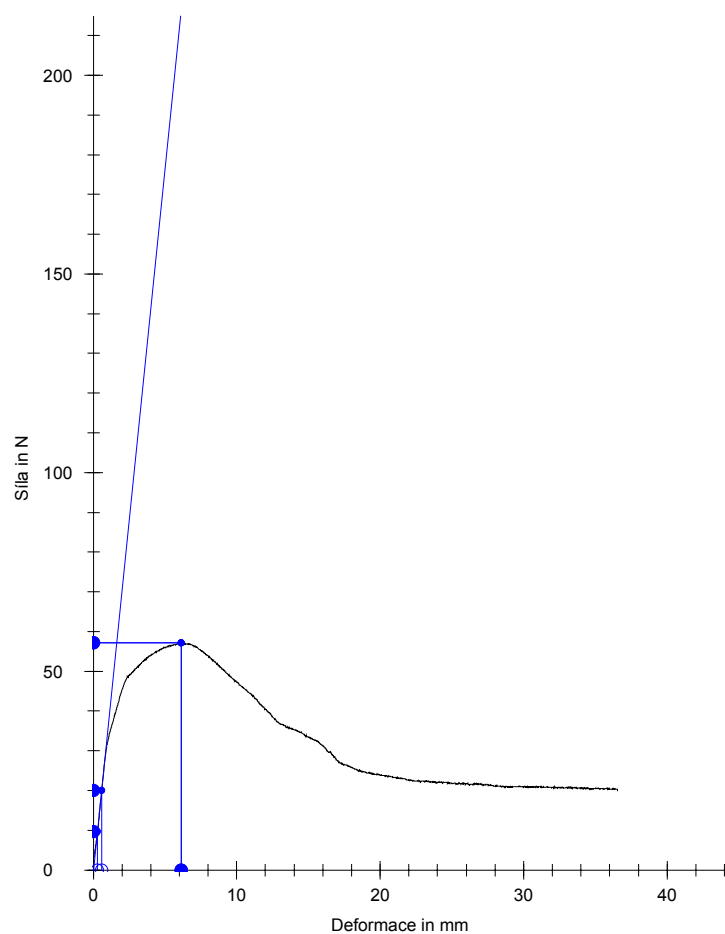


Graf č.4. 4. série

Pořadové číslo měření	F max [N]	Průhyb y při F max [mm]	F při y1 [N]	F při y2 [N]		E.Jz [N/mm ²]
51	31,06	8,87	6,89	11,46		425 455,47
52	33,70	9,86	7,55	12,12		415 268,76
53	35,97	10,01	5,17	9,97		436 598,90
54	35,62	11,58	5,11	10,06		373 733,16
55	37,10	8,85	8,23	13,89		509 338,98
Průměr	34,69	9,83	6,59	11,50		432 079,06

Tab. 4. Tabulka k 4. sérii měření

7.5 Profil 2 mm, 25 mm vysoký, zatížený ze spodní strany

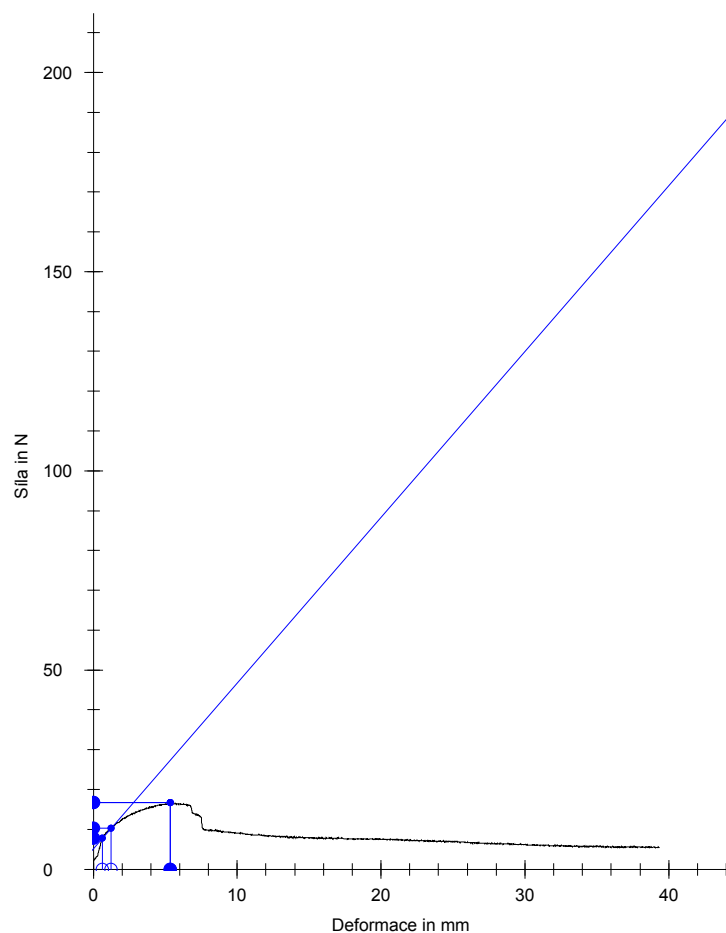


Graf č.5. 5. série

Pořadové číslo měření	F max [N]	Průhyb y při F max [mm]	F při y1 [N]	F při y2 [N]	E.Jz [N/mm ²]
6	59,48	5,44	40,27	56,58	1 328 459,56
7	57,22	6,14	38,58	55,78	1 132 285,02
8	56,91	4,86	39,98	51,46	1 422 750,00
9	60,65	5,53	43,16	57,38	1 332 545,21
10	63,05	5,96	41,97	60,94	1 285 331,38
Průměr	59,46	5,59	40,79	56,43	1 300 274,23

Tab. 5. Tabulka k 5. sérii měření

7.6 Profil 1 mm, 25 mm vysoký, zatížený ze spodní strany

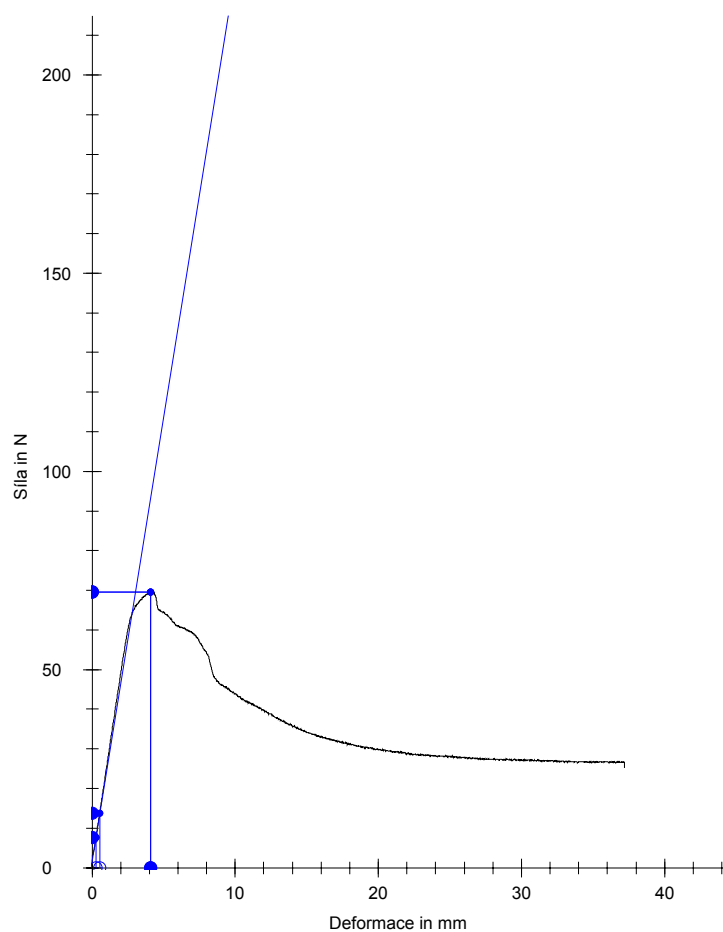


Graf č.6. 6. série

Pořadové číslo měření	F max [N]	Průhyb y při F max [mm]	F při y1 [N]	F při y2 [N]		E.Jz [N/mm ²]
16	14,50	4,52	13,39	6,65		389 767,70
17	16,70	5,33	14,53	7,82		380 684,80
18	12,62	5,47	10,95	7,54		280 316,27
19	10,97	4,82	10,11	5,36		276 525,93
20	17,66	5,57	16,11	7,65		385 222,62
Průměr	14,49	5,14	13,02	7,00		342 503,47

Tab. 6. Tabulka k 6. sérii měření

7.7 Profil 2 mm, 17 mm vysoký, zatížený ze spodní strany

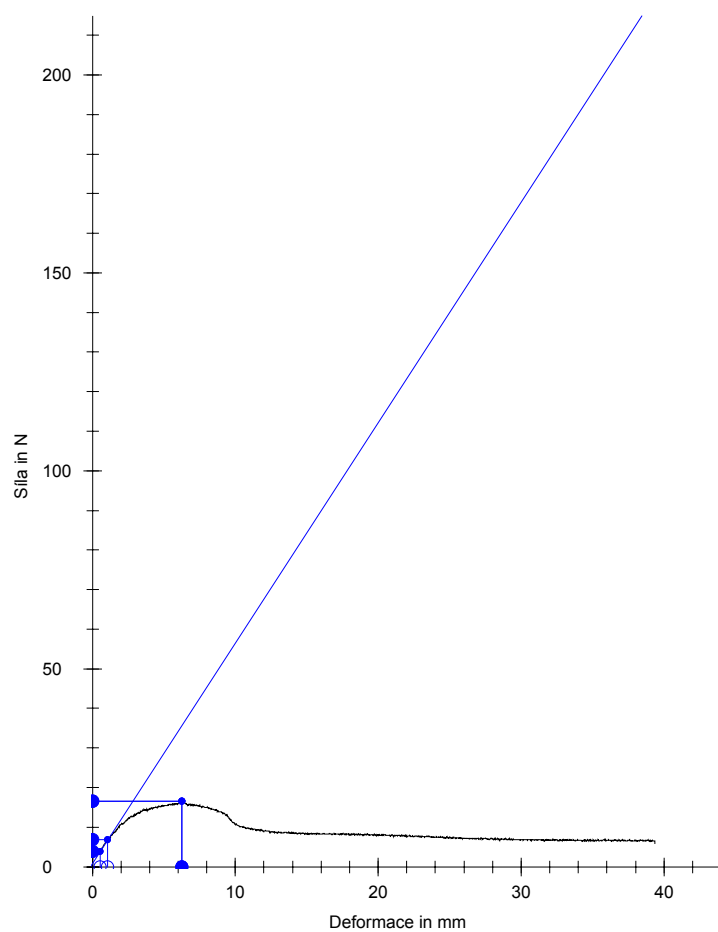


Graf č.7. 7. série

Pořadové číslo měření	F max [N]	Průhyb y při F max [mm]	F při y1 [N]	F při y2 [N]	E.Jz [N/mm ²]
46	69,50	4,09	7,59	13,66	2 064 608,80
47	62,36	2,92	7,30	12,64	2 594 773,97
48	91,34	4,26	9,31	16,52	2 605 119,72
49	69,29	5,36	6,09	9,34	1 570 659,51
50	66,68	4,54	7,98	14,63	1 784 497,80
Průměr	71,83	4,23	7,65	13,36	2 123 931,96

Tab. 7. Tabulka k 7. sérii měření

7.8 Profil 1 mm, 17 mm vysoký, zatížený ze spodní strany

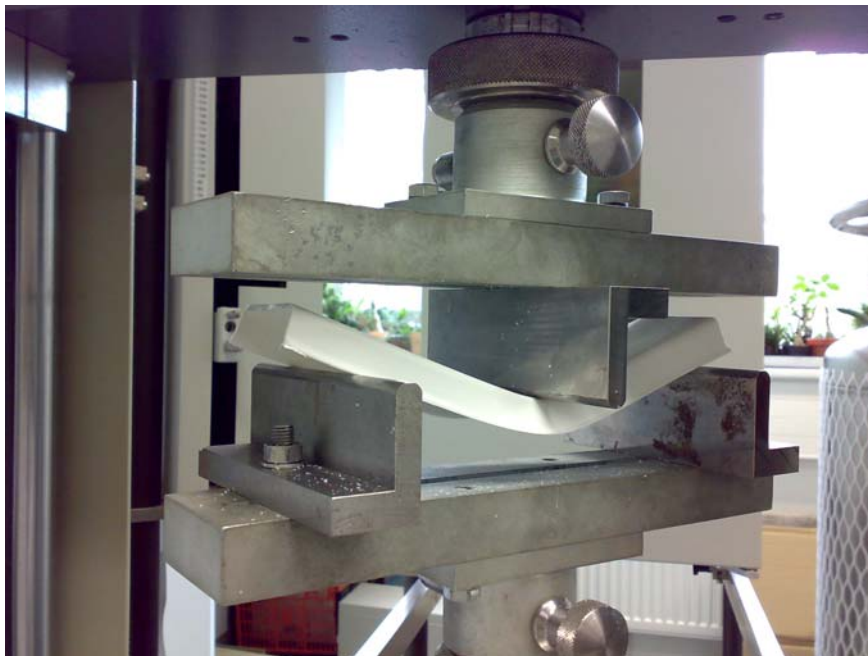


Graf č.8. 8. série

Pořadové číslo měření	F max [N]	Průhyb y při F max [mm]	F při y1 [N]	F při y2 [N]	E.Jz [N/mm ²]
56	16,32	5,78	7,93	11,81	343 058,82
57	14,71	4,58	8,33	12,01	390 232,53
58	16,49	6,26	3,81	6,82	320 053,51
59	15,36	3,98	6,23	9,57	468 904,52
60	12,07	2,19	6,29	9,93	669 636,99
Průměr	14,99	4,56	6,52	10,03	438 377,28

Tab. 8. Tabulka k 8. sérii měření

8 VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ DAT Z MĚŘENÍ



Obr. 20: Průběh ohybové zkoušky

8.1 POROVNÁNÍ DAT Z MĚŘENÍ

Pro objektivní porovnání výsledků budu mezi sebou porovnávat průměry jednotlivých sérií měření. Tento způsob se mi zdá jako nejobjektivnější a pro vyhodnocení původních předpokladů jako nejvhodnější.

Velikost ohybové tuhosti $E.J_z$ byla vypočtena podle vzorce:

$$E.J_z = \frac{F.L^3}{y.48} \quad ()$$

kde: F maximální síla
L rozteč podpěr (v našem případě 180 mm)
y průhyb při maximální síle

8.2 POROVNÁNÍ VELIKOSTI OHYBOVÉ TUHOSTI NA ZÁKLADĚ RŮZNÉ TLOUŠŤKY MATERIÁLU

Nejprve porovnam a urcim zda-li dvojnásobná tloušťka materiálu znamená i dvojnásobnou velikost ohybové tuhosti (E.Jz).

PROFIL, SMĚR ZATÍŽENÍ	E.Jz [N/mm²]
Profil 2mm, 25 mm vysoký, zatížený z vrchní strany	2 248 880,83
Profil 1mm, 25 mm vysoký, zatížený z vrchní strany	830 639,77
Navýšení ohybové tuhosti v procentech	170,74 %
Profil 2mm, 17 mm vysoký, zatížený z vrchní strany	777 016,92
Profil 1mm, 17 mm vysoký, zatížený z vrchní strany	432 079,06
Navýšení ohybové tuhosti v procentech	79,83 %
Profil 2mm, 25 mm vysoký, zatížený ze spodní strany	1 300 274,23
Profil 1mm, 25 mm vysoký, zatížený ze spodní strany	342 503,47
Navýšení ohybové tuhosti v procentech	279,64 %
Profil 2mm, 17 mm vysoký, zatížený ze spodní strany	2 123 981,96
Profil 1mm, 17 mm vysoký, zatížený ze spodní strany	438 377,28
Navýšení ohybové tuhosti v procentech	384,51 %

Tab. 9. Procentní navýšení podle tloušťky materiálu

Z uvedeného porovnání vyplívá, že profily o tloušťce 2 mm sice mají vyšší ohybovou tuhost než profily s tloušťkou 1 mm, ale neplatí zde přímá úměra. Velikost ohybové tuhosti je silně ovlivněna výškou profilu i směrem zatížení.

Například u vysokých profilů zatížených z vrchní strany je tuhost 2 mm profilu o 170,74 % vyšší než u 1 mm, ale u nízkých profilů je tato tuhost vyšší jen o 79,83 %. Při zatížení ze spodní strany je rozdíl ještě výraznější. U vysokého profilu je navýšení 279,64 % a u nízkého je dokonce 384,51 %.

8.3 POROVNÁNÍ VELIKOSTI OHYBOVÉ TUHOSTI NA ZÁKLADĚ RŮZNÉ VÝŠKY PROFILŮ

Jelikož mám profily vytvořeny o dvou různých výškách, z nichž vyšší profil je o 47 procent vyšší než nižší profil, porovnám o kolik se zvýší nebo sníží tuhost na základě tohoto kritéria.

PROFIL, SMĚR ZATÍŽENÍ	E.Jz [N/mm²]
Profil 2mm, 25 mm vysoký, zatížený z vrchní strany	2 248 880,83
Profil 2mm, 17 mm vysoký, zatížený z vrchní strany	777 016,92
Navýšení ohybové tuhosti v procentech	189,42 %
Profil 1mm, 25 mm vysoký, zatížený z vrchní strany	830 639,77
Profil 1mm, 17 mm vysoký, zatížený z vrchní strany	432 079,06
Navýšení ohybové tuhosti v procentech	92,24 %
Profil 2mm, 25 mm vysoký, zatížený ze spodní strany	1 300 274,23
Profil 2mm, 17 mm vysoký, zatížený ze spodní strany	2 123 981,96
Navýšení ohybové tuhosti v procentech	-38,78 %
Profil 1mm, 25 mm vysoký, zatížený ze spodní strany	342 503,47
Profil 1mm, 17 mm vysoký, zatížený ze spodní strany	438 377,28
Navýšení ohybové tuhosti v procentech	-21,87 %

Tab. 10. Procentní navýšení podle výšky profilu

Předpoklad navýšení tuhosti s vyšší výškou profilu se taktéž nepotvrdil podle původního odhadu. U profilů zatížených z vrchní strany došlo k navýšení tuhosti o 189,42 % u 2 mm tloušťky a o 92,24 % u 1 mm tloušťky. Na druhou stranu, ale došlo ke snížení tuhosti při zatěžování ze spodní strany o 38,78 % (2 mm tloušťka) respektive o 21,87 % (1 mm tloušťka).

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala tuhostí tenkostěnných profilů při ohybu. Byly navrženy a vyrobeny, v dostatečném počtu, zkušební tělesa potřebných tvarů a rozměrů. Tyto následně byly podrobeny zkoušce na trhacím stroji ZWICK a výsledky byly zpracovány a porovnávány mezi sebou.

S určitostí můžeme prohlásit, že samotné zvětšení tloušťky nebo výšky nám automaticky nenavýší ohybovou tuhost. Je zde mnoho jiných faktorů, které působí ve stejnou chvíli a které taktéž ovlivňují vlastnosti vyrobené součástky či v našem případě tenkostěnného profilu.

Náš předpoklad, že dvojnásobná tloušťka zvýší dvojnásobně tuhost se nepotvrdil (tab. 9). Ani druhá část zkoušky nedopadla podle předpokladu, když se potvrdilo, že ani s vyšší výškou (o 47 %) automaticky nevzroste ohybová tuhost stejnou měrou (tab. 10). Velmi důležitým faktorem se u obou zkoušek potvrdila orientace profilu, zda-li je zatěžován dnem vzhůru nebo dnem dolů.

Věřím, že tyto informace a zkušenosti využiji i v budoucím životě nebo při následujícím studiu. Práce pro mě byla poučná a nápaditá s překvapujícím závěrem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Raab, M., Polymery a lidé, Ústav makromolekulární chemie, Akademie věd ČR
- [2] Volek, F., Základy pružnosti a pevnosti, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2007
- [3] <http://encyklopedie.seznam.cz/>
- [4] Šuba, O., Dimenzování a navrhování výrobků z plastu, VUT Brno, 1988
- [5] Lenfeld, P., Technologie II, Technická Univerzita Liberec, skripta dostupná na internetu, http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ε	poměrná deformace [-], prodloužení
σ	napětí [Mpa], σ_n normálové, σ_p mez pevnosti, σ_K mez kluzu, $\sigma_{\dot{\varepsilon}}$ mez úměrnosti, σ_E mez pružnosti
E	modul pružnosti v tahu [Mpa], materiálová konstanta
J	kvadratický moment průřezu plochy [mm^4], J_z kvadratický moment, J_p polární moment
F	síla [N]
S	plocha
D_{zy}	deviační moment [mm^4]
Pa	pascal
PP	polypropylen
PET	polyetylentereftalat
PE	polyetylen
PC	polykarbonát
PMMA	polymetylmetakrylát
ABS	ABS
PVC	polyvinylchlorid
mm	milimetr
T_m	teplota tání
T_f	teplota viskózního toku
N	newton

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Základní druhy namáhání vnějšími silami	11
Obr. 2	Závislost napětí prodloužení u různých látek	13
Obr. 3	Hysterezní křivka při opakovaném namáhání tlakem a tahem	14
Obr. 4	Osové kvadratické momenty	15
Obr. 5	Obdelníkový průřez	16
Obr. 6	Kruhový průřez	17
Obr. 7	Světová produkce plastů v roce 1999	21
Obr. 8	Ukázka některých výrobků z plastů	22
Obr. 9	Základní princip tvarování termoplastů za tepla	25
Obr. 10	Tvarování termoplastů ve formě působením vakua	26
Obr. 11	Tvarovací stroje	28
Obr. 12	Tvarování termoplastů	30
Obr. 13	Dřevěná forma vložená v tvarovacím stroji	33
Obr. 14	Vytvarované profily	34
Obr. 15	Pásová pila	35
Obr. 16	Trhací stroj ZWICK	36
Obr. 17	Schéma ohybové zkoušky	36
Obr. 18	Zatěžování profilu z vrchní strany	37
Obr. 19	Zatěžování profilu ze spodní strany	37
Obr. 20	Průběh ohybové zkoušky	46

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Tabulka k 1. sérii měření	38
Tab. 2	Tabulka k 2. sérii měření	39
Tab. 3	Tabulka k 3. sérii měření	40
Tab. 4	Tabulka k 4. sérii měření	41
Tab. 5	Tabulka k 5. sérii měření	42
Tab. 6	Tabulka k 6. sérii měření	43
Tab. 7	Tabulka k 7. sérii měření	44
Tab. 8	Tabulka k 8. sérii měření	45
Tab. 9	Procentní navýšení podle tloušťky materiálu	47
Tab. 10	Procentní navýšení podle výšky profilu	48