

Ohybová tuhost tenkostěnných tvarovaných plastových prvků

Tomáš Tydlačka

Bakalářská práce
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá technologií tvarování a mechanickými vlastnostmi vytvořených profilů při ohybovém zatížení. Pro tyto profily byla teoreticky určena hodnota kvadratického momentu průřezu plochy a v experimentální části pak byla hodnota stanovena z velikosti sil a deformací těchto profilů. Tyto hodnoty se mezi sebou porovnávaly. V závěru práce jsou uvedeny základní poznatky k dané problematice a metody dalšího postupu, vedoucí k hlubšímu studiu a určení tak objektivnějších a přesnějších výsledků.

Klíčová slova:

Ohybová tuhost, kvadratický moment průřezu plochy, těžiště plochy, modul pružnosti v tahu.

ABSTRACT

These Bachelor thesis deals with thermoforming of thermoplastic and mechanical properties of bend loaded profiles. On theoretical base the quadratic moment of cross-section was computed for all formed profiles. In practical part the value of this moment was determined from the load of power and profiles deformation and the found values were compared. At the end of my work both the basic knowledge about this problem and methods for further works are presented to be able to better learn the thermoforming process and properties of thermoformed product.

Keywords:

Flexural rigidity, quadratic moment of cross-section, decision point, Young's modulus.

Chtěl bych poděkovat doc.Ing. Oldřichu Šubovi, CSc., vedoucímu mé bakalářské práce, za metodické vedení, za cenné rady a připomínky, které mi pomohly v řešení dané problematiky. Zároveň děkuji Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., Ing. Vladimírovi Šumberovi, Ing. Jiřímu Šálkovi a dalším pracovníkům UTB ve Zlíně.

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, 23.5.2007

.....

podpis

OBSAH

OBSAH	5
ÚVOD	7
I. TEORETICKÁ ČÁST	8
1 VAKUOVÉ TVAROVÁNÍ	9
1.1 POUŽITÉ TECHNOLOGIE PRO VAKUOVÉ TVÁŘENÍ	10
1.1.1 Formy pro vakuové tváření	10
1.2 MECHANICKÉ TVAROVÁNÍ	11
1.2 PNEUMATICKÉ TVAROVÁNÍ	11
1.2.1 Negativní vakuové tváření	12
1.2.2 Pozitivní vakuové tváření	15
1.2.3 Mechanické předtvarování	16
1.2.4 Pneumatické předtvarování	17
1.2.5 Kombinované předtvarování	18
1.2.6 Přetlakové tvarování	19
1.2.7 Kontinuální tvarování	20
2 OHYBOVÁ TUHOST V LINEÁRNÍ ELASTICKÉ OBLASTI	21
2.1 MODUL PRUŽNOSTI	21
2.1.1 Hookeův zákon	22
2.1.2 Vlastnosti modulu pružnosti	24
2.2 KVADRATICKÝ MOMENT PRŮŘEZU PLOCHY	27
2.2.1 Osově kvadratické momenty průřezu plochy	27
2.2.2 Kvadratický moment průřezu plochy k mimo-těžišťové ose	30
2.2.3 Polární kvadratický moment	31
2.2.4 Deviační moment	31
2.3 KVADRATICKÝ MOMENT PRŮŘEZU PLOCHY K NATOČENÝM OSÁM	32
2.3.1 Kvadratické momenty průřezu plochy k natočeným osám z' , y'	32
2.3.2 Polární kvadratický moment k natočeným osám z' , y'	33
2.3.3 Deviační moment k natočeným osám z' , y'	33
2.3.4 Mohrova kružnice	34
II. PRAKTICKÁ ČÁST	37
1 TENKOSTĚNNÉ PLASTOVÉ PROFILY	38
1.1 VYTVOŘENÍ PROFILŮ VAKUOVÝM TVAROVÁNÍM	38
1.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA NA STROJI ZWICK	39
1.3 OHYBOVÁ ZKOUŠKA NA STROJI ZWICK	42
1.3.1 Měření 1. a 2. série	43
1.3.2 Měření 3. a 4. série	45
1.3.3 Měření 5. a 6. série	47
1.3.4 Měření 7. a 8. série	49
1.4 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE	55
1.5 VÝPOČTOVÉ CHARAKTERISTIKY NOSNÍKŮ	59
1.5.1 Kvadratický moment profilu	59
1.5.2 Výpočet ohybové tuhosti profilu	60

2	PŮLTRUBKOVÉ PLASTOVÉ PROFILY.....	65
2.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	66
2.2	OHYBOVÁ ZKOUŠKA NA STROJI ZWICK	67
2.2.1	Měření půl-trubkového profilu o poloměru 45mm.....	68
2.2.2	Měření půl-trubkového profilu o poloměru 31,5mm.....	70
2.2.3	Měření půl-trubkového profilu o poloměru 31,5mm - PipeLife.....	72
2.2.4	Měření půl-trubkového profilu o poloměru 20mm.....	74
2.3	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE	77
ZÁVĚR	81
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:	82
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	83
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	84
SEZNAM TABULEK	86

ÚVOD

Ve srovnání s tradičními materiály jako jsou kovy jsou plasty obecně mnohem méně pevné a tuhé. Mají výrazný sklon k tečení, vysokou teplotní roztažnost a výraznou závislost mechanických charakteristik na teplotě. Tyto vlastnosti se obvykle jeví jako nevýhodné. Na druhé straně však stojí nesporné přednosti plastů, zejména snadné zpracování, nízká energetická náročnost a vysoká produktivita výroby či široké možnosti nových technologií. Jinou předností je jejich nízká objemová hmotnost, kterou lze navíc snižovat odlehčením.

Každá úspěšná aplikace plastů je podmíněna vedle důkladné technologické přípravy kvalifikovaným stanovením dimenzí a tvaru výrobku. Na prvním místě se nejčastěji klade zjištění požadované tuhosti a pevnosti při minimální hmotnosti výrobku. U plošných elementů je převážně rozhodující tuhost a únosnost v ohybu. Ohybová tuhost a únosnost nevyztuženého tenkostěnného prvku je velmi malá. Je to dáno tím, že všechen materiál je soustředěn poblíž střednice – neutrální plochy nulových ohybových napětí, a je tedy málo využit. Zvyšování ohybové tuhosti a únosnosti stěny zvyšováním její tloušťky je málo účinné, ale především nevhodné. Při jeho návrhu je nutno vycházet z možnosti dané technologie, z vlastností použitého materiálu a představ o pracovní funkci výrobku. Zpravidla výrobci vyžadují určitou tuhost, chemickou odolnost, nízkou hmotnost, estetický vzhled aj.. Základním požadavkem však bývá, aby se výrobek za daných provozních podmínek neporušil, alespoň ne v době kratší než je požadovaná životnost.

Charakter technologie (vstřikování, lisování, laminací atd.) a snaha omezit hmotnost, případně cenu výrobku vedou k tomu, že výrobky z plastů jsou nejčastěji navrhovány jako tenkostěnné. Přitom však poměr tuhosti k pevnosti je u plastů značně nízký, takže v řadě případů je pro návrh výrobku rozhodující stav deformace, nejen únosnost. Deformace se navíc zvětšují s rostoucí dobou zatížení a vyšší teplotou.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VAKUOVÉ TVAROVÁNÍ

Vakuové tvarování (tváření) je technologie tepelného zpracování termoplastu. Výrobní proces spočívá v upnutí předem nařezané plastové desky nebo folie do rámu vakuového lisu, její ohřátí na teplotu tvarování a pak vytvořené vakuum (podtlak) z jedné strany tvarovaného polotovaru umožňuje atmosférickému tlaku na straně druhé přinutit materiál, aby zaujal tvar tvárníku nebo tvárnice. Po vychladnutí se výrobek sejme z formy, uloží se na stabilizující rám a po dokonalém vychladnutí se dokončí úprava ořezáváním.

Mezi přednosti této metody patří nízké náklady na zhotovení výrobních forem i při malých zakázkách a vysoká produktivita při využívání vícenásobných forem. Lze modelovat folie plastu do mnoha různých tvarů. Na ručních strojích je možno zpracovávat materiál tloušťky od 1 do 12 mm a rozměrech i v metrech např.(3 x 1,5)mm. Rozsah materiálů, které mohou být tepelně zpracovány, je velmi široký a různorodý a vyhovuje většině využití. Každý druh materiálu má své specifické vlastnosti a odlišný způsob zpracování. Můžou se vyrábět z nehořlavého nebo tepelně odolného materiálu. Při výběru druhu materiálu musí být přihlédnuto i na další možné zpracování. Dá se zpracovávat mnoho materiálu, např : ABS ,ABS VO, PET G, PS EL, PS SB EL, PVC, PVC EL, Flock PS, PC, PE, PET, PLEXI, PS, PS glanz, PS SP, PS VO, PVC-CAW, PVC TF

Když během ohřevu desek vzniknou malé bubliny, je to důsledek toho, že desky během skladování absorbovaly vlhkost. V tomto případě musí být desky před zpracováním vysušeny. Je to zpravidla možno provést tak, že se desky přes noc vysuší při teplotě 70°- 80°C. Průměrná teplota, potřebná k tváření, je 140°- 190°C (v závislosti na nástrojích, používaných k ohřevu, materiálu, druhu formátu a tloušťce materiálu). Teplota, kterou je nutno dodržet během procesu tváření, je cca. 160°C. Teplota matrice by se měla pohybovat mezi 60°C a 70°C. Po tváření za tepla se musí deska pomalu a rovnoměrně ochladit. Zpravidla se odstraní před ohřevem ochranná fólie.

Tvářením za tepla lze vyrábět svítidla, přístrojové desky, přepravníky, domácí potřeby, hračky a různá průhledná pouzdra apod.

1.1 Použité technologie pro vakuové tváření

Existuje více technologií tváření za tepla, které lze použít, a při kterých se přehřáté desky tvarují podle formy matrice mechanicky, stlačeným vzduchem nebo vakuově. Používají se přitom pozitivní formy (razník) a negativní formy (matrice). Jako nástroje jsou vhodné jak levné sádrové formy, tak i dražší ocelové formy, chlazené vodou, ale běžně se používá litý hliník. Vhodné jsou i jiné materiály, např. dřevo a epoxid.

K technologiím tváření patří: negativní vakuové tváření, pozitivní tváření za tepla, lisování v dvojité formě, lisování stlačeným vzduchem vakuové pozitivní tváření, tváření pod tlakem, vakuové pozitivní tváření, vakuové smršťování ve směru toku, lisování stlačeným vzduchem - vakuové smršťování ve směru toku, kontaktní lisování, volně i mechanicky prováděné postupy.

1.1.1 Formy pro vakuové tváření

Druhy forem:

- dřevěné formy - pro malosériovou výrobu i s povrchovou úpravou, jsou levné ale málo odolné.
- lité formy - sériová výroba - vyšší cena, dobrý povrch a značná trvanlivost
- kovové formy - hromadná výroba

Formy jsou navrženy a vyrobeny přímo ve firmě v daných rozměrech od prototypu do konečné podoby formy, jsou několikanásobně levnější než formy pro tlakové lisování nebo vstřikování plastů. Proto je tato technologie výhodná i pro malosériovou výrobu.

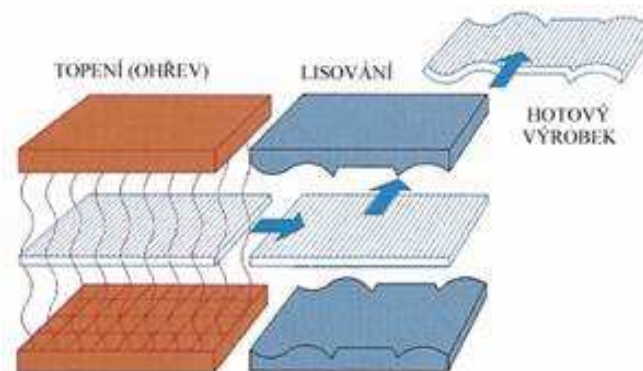
Rozeznáváme dva typy lisovacích forem:

Prvním typem jsou prototypové formy a formy pro malou sérii. Použitý materiál jsou obvykle licí dvousložkové pryskyřice. Na těchto formách se vytvářejí první zkušební vzorky a ty jsou okamžitě odeslány zákazníkovi k posouzení. V této testovací fázi je možnost upravit konečný tvar výrobku. Po schválení vzorků zákazníkem s ohledem na přesnost rozměrů, žádané vlastnosti materiálu a kvality provedení, může být dokončena lisovací forma.

Druhým typem lisovacích forem jsou formy pro velké zakázky obvykle vyrobeny z hliníku. Této konstrukci předchází obvykle forma prvního typu. Konstrukce formy závisí na množství vyráběných kusů, dále zda je forma negativní nebo pozitivní, zda je nutné vkládat pomocné lišty, z jakého materiálu je vyrobena, počet jejich jednotlivých částí a způsobu chlazení. Ve formě je možné provést rytinu jména, loga nebo číslo výrobku a provést zamýšlenou strukturu jeho povrchu. Cena formy je závislá na těch parametrech a svým podílem se započítává do ceny výrobku.

1.2 Mechanické tvarování

U mechanického tvarování se změny tvaru polotovaru dosahuje vzájemným působením jednotlivých částí dvoudílné formy na tvarovaný materiál. Způsob umožňuje používat vyšší tvarovací tlaky, než u ostatních způsobů, případně kombinovat tvarování s přímým oddělením výrobku od zbytku polotovaru.



Obr. 1. Postup mechanického tvarování desky

1.2 Pneumatické tvarování

V praxi je v současné době nerozšířenější podtlakové tvarování, u něhož k dosažení změny tvaru polotovaru postačuje rozdíl atmosférického tlaku a vakua vytvořeného v dutině formy vývěvou. Tvarovací tlak je tedy roven maximálně několika desítkám kPa. U přetlakového způsobu se síla k tvarování vyvozuje působením tlakového média, obvykle stlačeného vzduchu, jehož tlak bývá v rozmezí asi od 0,2 do 1 MPa. Často se přetlakový způsob kombinuje s podtlakovým. Nízké tlaky umožňují používat formy z málo pevných materiálů.

K přednostem podtlakového tvarování patří možnost vyrábět předměty s velkou plochou a přitom s tenkou stěnou. Jednoduché, a tedy i levné tvarovací formy, stejně jako relativně málo nákladná tvarovací zařízení dovolují ekonomickou výrobu předmětů i v malých sériích, např. jen několika desítek kusů. Je možné tvarovat desky předem potisknuté nebo jinak povrchově upravené. Tak se vyrábějí např. plastické mapy. V dnešní době se tvarováním zpracovávají desky s tloušťkou až 10mm a fólie od tloušťky 0,3mm, výjimečně již od 0,1mm. Pro výrobky, získávané tepelným tvarováním desek, je charakteristický vysoký poměr délky k tloušťce stěny výrobku. Ten není z hlediska materiálu omezen a v podstatě je limitován velikostí tvarovacího zařízení a rozměry vyráběných desek. Velkou výhodou tvarování oproti vstřikování jsou podstatně nižší náklady na pořízení tvarovacího stroje i tvarovací formy. Mohou být až desetkrát nižší. Nevýhodami tvarování je vyšší cena desek oproti granulátu, jež může být až dvojnásobná, a dále dosti velký podíl technologického odpadu. V nepříznivých případech může podíl odpadu činit až 50 %. Při navrhování výrobků platí určitá omezení jejich tvaru, např. není možné vyrábět výtažky s kompaktními žebry. Rovněž zalisování kovových vložek do stěny výrobku bývá obtížné.

1.2.1 Negativní vakuové tváření

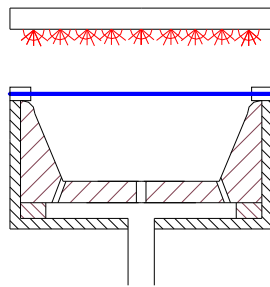
Negativní vakuové tváření je nejrozmanitější a nejvíce používaný způsob tváření. Technické zařízení je levnější a lze je obsluhovat snadněji než většinu tlakových nebo mechanických technologií. Na (Obr. 2.) je znázorněn postup tvarování desky nebo folie při negativním tváření.

V 1. fázi (dle (Obr. 2.) při negativním vakuovém tváření, se deska upevní do rámu a zahřeje se na tvarovací teplotu. V 2. a 3. fázi teplá deska přejde do pružného stavu, vzduch se následně z dutiny formy vakuově odsaje a atmosférický podtlak tlačí zahřátou desku na obložení matrice. V 4. fázi, když je deska dostatečně ochlazená, lze vytvarovanou součástku vyjmout. Po ochlazení výtažku se vakuum zruší a výrobek se z formy vyjme buď ručně, nebo se uvolní stlačeným vzduchem, který se přivádí do formy odsávacími kanálky.

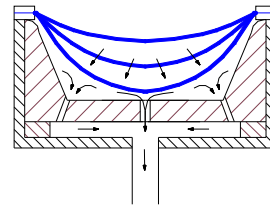
Jednoduché negativní tvarování se hodí jen pro tažení mělkých výtažků, u nichž hloubka $H \leq 0,4 \cdot D$ (horního průměru). Je to proto, že se při tažení deska ztenčuje velmi nerovnoměrně a v tloušťce stěny výtažku jsou velké rozdíly. Stejnou tloušťku stěny

na výlisku nelze dosáhnout. Ztenčení je tím větší, čím je vyšší poměr H / D . Nejtencí je stěna v rozích u dna. Pro mechanismus ztenčování desky platí pravidlo, že tažení se vždy zúčastňuje jen volná část desky, tj. ta, která se nedotýká povrchu formy, neboť jakmile se deska dotkne formy, ihned se ochladí natolik, že se na dalším tažení již nemůže podílet. Kvalitnější je vnější povrch, který se dotýká formy. Negativní vakuové tvarování se omezuje běžně na jednoduché, ploché konstrukce.

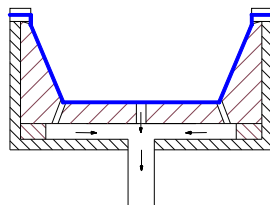
1)



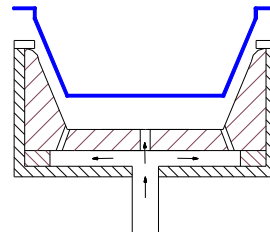
2)



3)

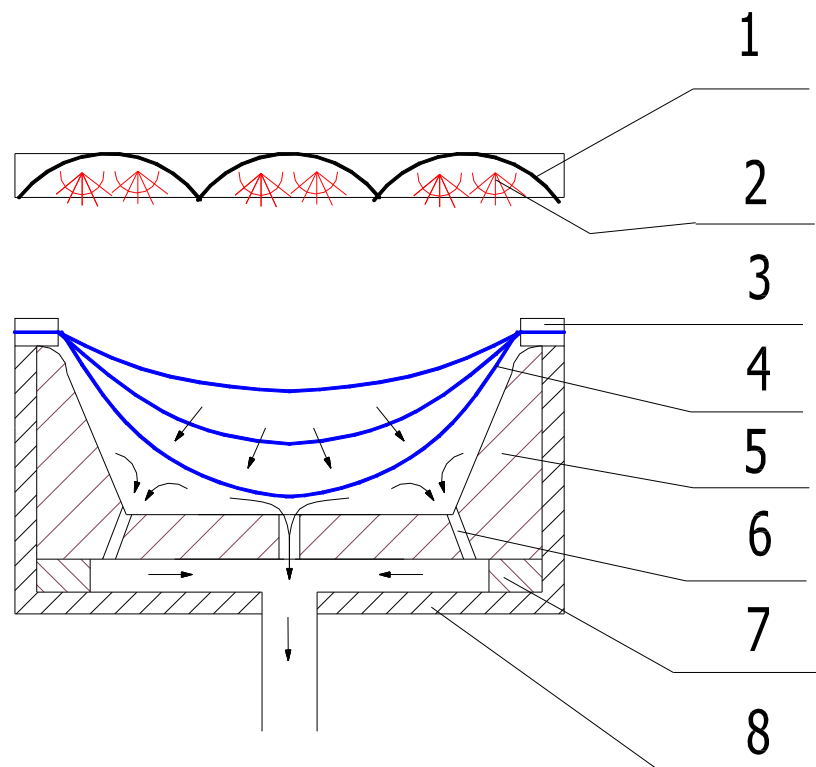


4)



Obr. 2. Postup tvarování desky u negativního tváření

Zjednodušené konstrukční provedení negativního tváření je nakresleno na (Obr. 3.). Pod obrázkem jsou uvedeny jednotlivé části zařízení.



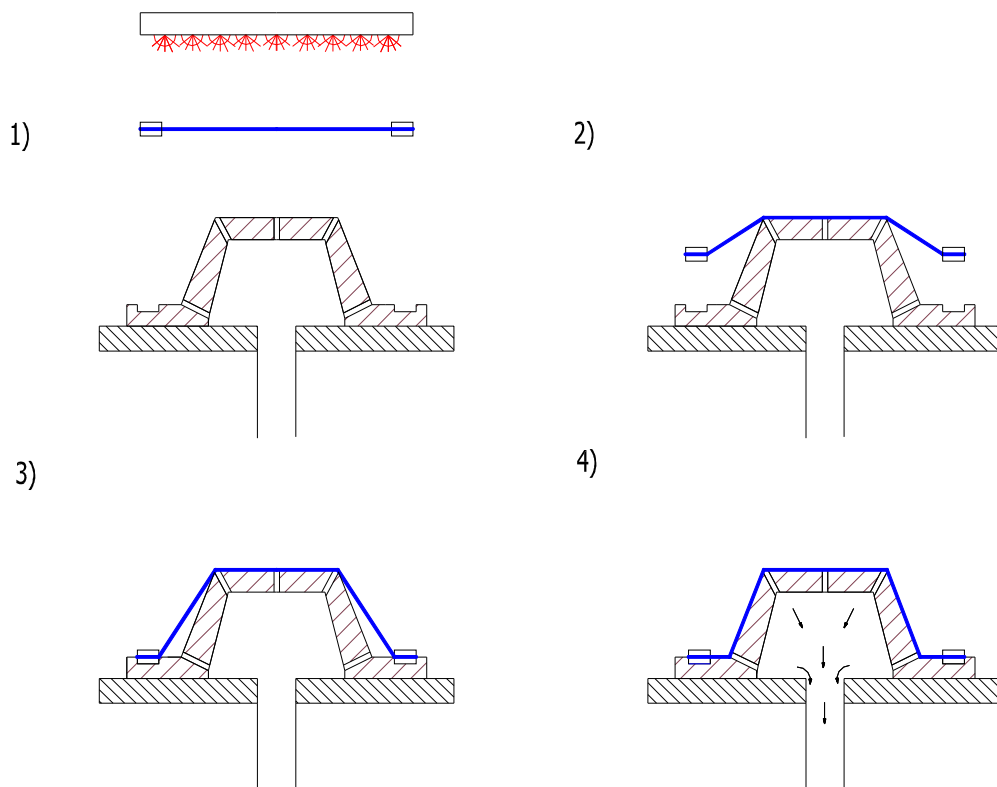
Obr. 3. Konstrukční provedení negativního tváření

1 – zrcadlo, 2 - topné těleso, 3 - upínací rám, 4 – deska,

5 – forma, 6 – kanálky, 7 – těsnění, 8 - upínací deska

1.2.2 Pozitivní vakuové tváření

Pozitivní tváření se podobá negativnímu vakuovému tváření, s tím rozdílem, že deska je po upnutí a ohřevu mechanicky natažena na formu a potom pomocí tlakového rozdílu přesně dotvarována přes razník. Jednotlivé fáze pozitivního tváření jsou zobrazeny na (Obr. 4.). Výhodou tohoto tváření je, že deska, která je formována, si ponechává téměř celou svou původní tloušťku v celém tvářeném profilu při hloubce tažení dané poměrem $H/D = 1$. Pozitivním tvářením je možné tvarovat součásti s poměrem hloubky/průměru max. 4:1. Tato technologie je však složitější než negativní vakuové tváření. Pozitivní formy se vyrábějí snadněji a levněji než negativní formy, ale pozitivní formy se rychleji poškodí. Pozitivní tváření lze provádět i gravitací.

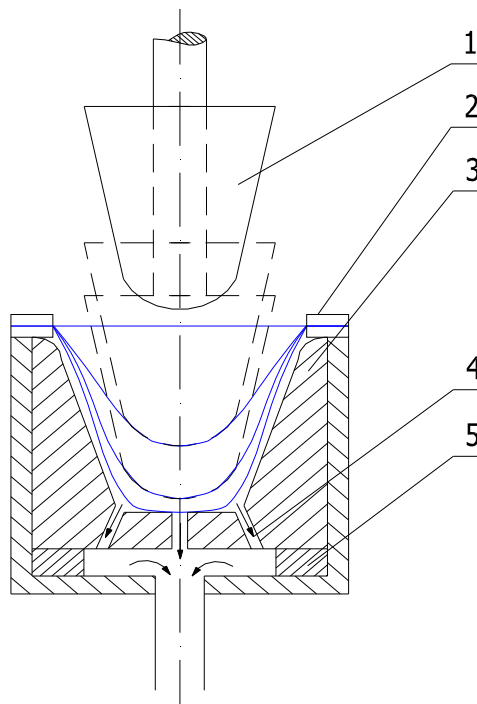


Obr. 4. Postup tvarování desky u pozitivního tváření

1.2.3 Mechanické předtvarování

Snaha dosáhnout co nejrovnoměrnější tloušťky stěny výtažků vedla k vývoji celé řady kombinovaných způsobů tvarování. Modifikací jednoduchého negativního tvarování je negativní tvarování s mechanickým předtvarováním. Ve své podstatě se jedná o kombinaci způsobu negativního a pozitivního. Z postupu je zřejmé, že od jednoduchého tvarování se liší tím, že se deska po skončení ohřevu nejprve předtvaruje pomocným tvárníkem, který desku vtlačuje směrem do dutiny formy, viz (Obr. 5.).

Když tvárník dosáhne stanovené hloubky, zapojí se odsávání vzduchu. Vytvořeným podtlakem deska zaujme konečný tvar a výtažek se ve formě ochladí. Plocha pomocného tvárníku má činit maximálně 70 % celkové tvarované plochy desky a hloubka předtvarování se volí cca 70 % konečné hloubky tahu. Tvárník nesmí plast příliš ochlazovat a proto se vyrábí z materiálu se špatnou tepelnou vodivostí, např. z tvrdého dřeva, vrstvené tkaniny nebo z PA. Musí to být materiál, který snáší tvarovací teplotu. Osvědčují se také duté tvárníky, do nichž se vhání teplý vzduch, který mezi deskou a tvárníkem vytváří vzduchový polštář zabraňující přímému dotyku desky a tvárníku.



Obr. 5. Mechanické předtvarování desky přes tvárník

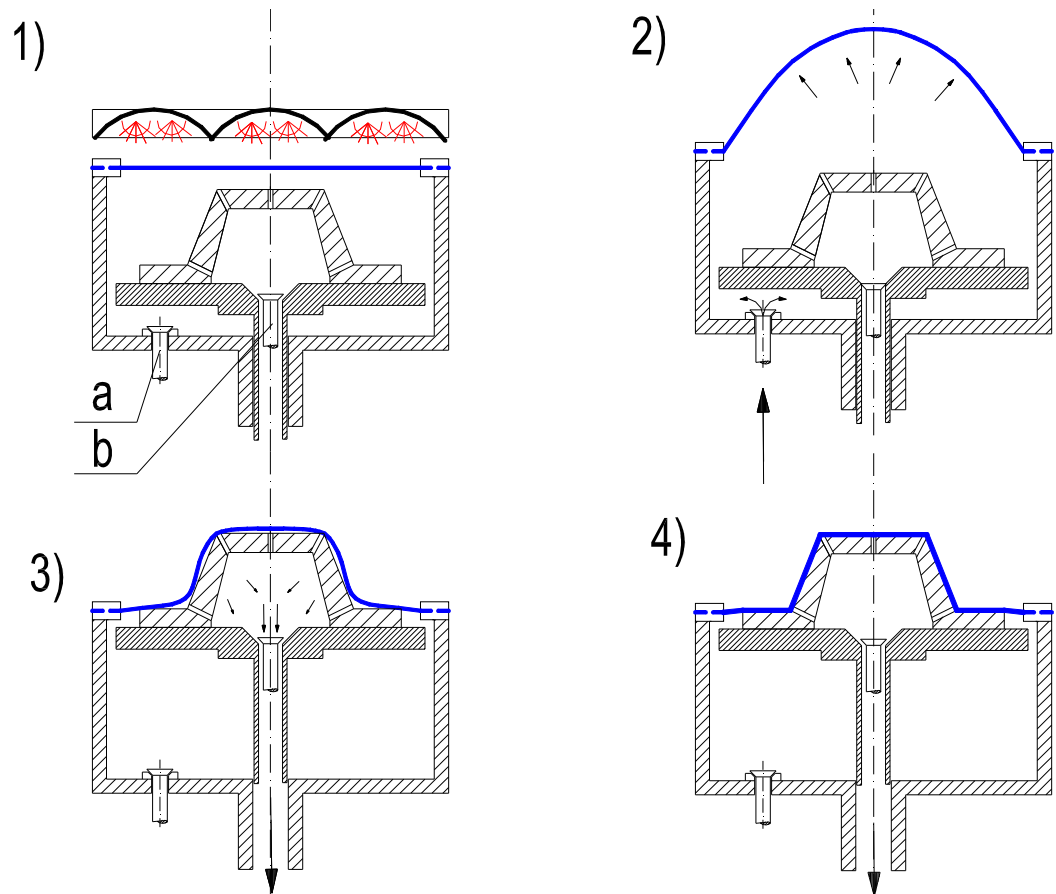
Při zasouvání tvárníku do negativní formy, což musí proběhnout velmi rychle, se ve formě zvyšuje tlak vzduchu. To způsobuje vydouvání volné části desky vzhůru a její nežádoucí ztenčování. Tento způsob tvarování je vhodný i pro desky s větší tloušťkou, a to až 10mm a umožňuje výrobu výlisků s poměrem H/D až 1,5. Výhodou je velmi rovnoměrná tloušťka stěny výrobku a možnost použití vícenásobných forem v hromadné výrobě. Nevýhodou je složitější a dražší zařízení, které vyžaduje přesné dodržení nejen sledu, ale i doby trvání jednotlivých operací.

1.2.4 Pneumatické předtvarování

U pozitivního způsobu s pneumatickým předtvarováním je první operací po zahřátí desky její předtvarování pomocí stlačeného vzduchu. Deska se po zahřátí na tvarovací teplotu nejprve vyfoukne do tvaru „bubliny“ a protože je tvarována na vzduchu, ztenčuje se velmi rovnoměrně. Stupeň předtvarování se řídí množstvím, tlakem a teplotou vzduchu. Ta může dosahovat teploty zahřátého plastu. Do vytvořené bubliny se zespoda vtlačí pozitivní forma a přesný tvar získá výtažek po aplikaci vakua. Při tvarování je možné postupovat třemi způsoby: Ohřátá deska je nejprve předtvarována stlačeným vzduchem a teprve potom je zdvižena forma. Rychlost zvedání formy musí být co největší, aby se předtvarovaná deska neochlazovala. Jakmile forma dosáhne horní koncové polohy, ihned je zapnuto vakuum a výlisek je dotvarován. Nebo forma je zdvižena ještě dříve, než je předtvarování vzduchem zcela skončeno. Tím se dosáhne toho, že na vrchní ploše formy se vytvoří malé vzduchové polštáře, které jednak zabraňují dotyku desky s formou a jednak ještě napomáhají dalšímu předtvarování. To vede k ještě rovnoměrnějšímu rozdělení tloušťky stěny na výlisku. A nebo předtvarování vzduchem i pohyb formy se dějí současně. Jednotlivé pracovní cykly jsou vyobrazeny na (Obr. 6.)

Tímto způsobem se vyrábějí výtažky s poměrem H/D větším, než 2. Přitom tloušťka stěny je velmi rovnoměrná, a to i v rozích. Nevýhodou je dražší zařízení, které musí pracovat automaticky, aby jednotlivé operace na sebe navazovaly podle předem ověřeného programu.

Ke zvláštnostem tohoto způsobu patří, že záměrným nerovnoměrným ohřevem desky je možné dosáhnout nestejněho stupně ztenčení v různých místech předtvarované desky, a tím různě tlusté stěny na výlisku.



Obr. 6. Pneumatické předtvarování desky

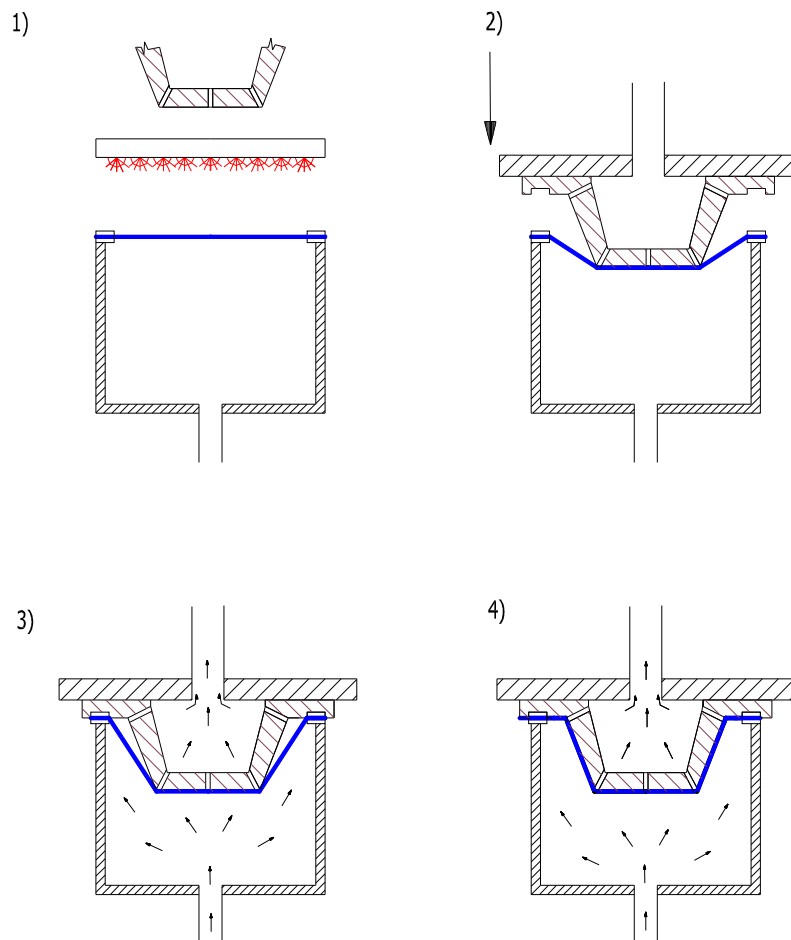
1.2.5 Kombinované předtvarování

Z dalších možných způsobů tvarování je třeba uvést tvarování s pneumatickým a mechanickým předtvarováním. Používá se u zvláště hlubokých výtažků s poměrem H / D větším, než 2. Následuje buď vtlačení formy do předtvarované desky a potom je uveden do pohybu tvárník a pak je zapnuto vakuum, nebo je forma uvedena do pohybu ještě před skončením pneumatického předtvarování a po dosažení konečné pozice formy jsou současně uvedeny v činnost tvárník i vakuum anebo jsou současně uvedeny do pohybu forma i tvárník, a když dosáhnou konečné pozice je zapnuto vakuum. Konečný tvar získá výtažek zapojením vakua. Tento způsob se používá i pro výrobu výtažků se zdvojenými stěnami. Ty se tvarují v pozitivně-negativní formě, jejímiž funkčními částmi je jak vnější povrch tvárníku, tak vnitřní povrch dutiny. Forma se nejdříve pohybem vzhůru vtlačí do vyfouknuté desky, nato se střední část bubliny přetlačí před-tvárníkem do negativní části formy. Tvarování se opět dokončí využitím vakua. Celý proces musí být automatizován, teplota nejen plastu, ale i vzduchu, formy a před-tvárníku musí být přesně regulovány.

Podle tvaru výtažku totiž činí konečná tloušťka stěny vzhledem k původní desce jen 20 %. Použitý plast proto musí vykazovat obzvláště vysokou tažnost. Doba potřebná na předtvarování ohřáté desky stlačeným vzduchem je asi 0,5 až 1 s. Na přetažení desky do negativní formy je třeba také asi 1 s a na dotvarování pomocí vakua rovněž asi 1 s. Vlastní tvarovací proces tedy proběhne asi během 3 s.

1.2.6 Přetlakové tvarování

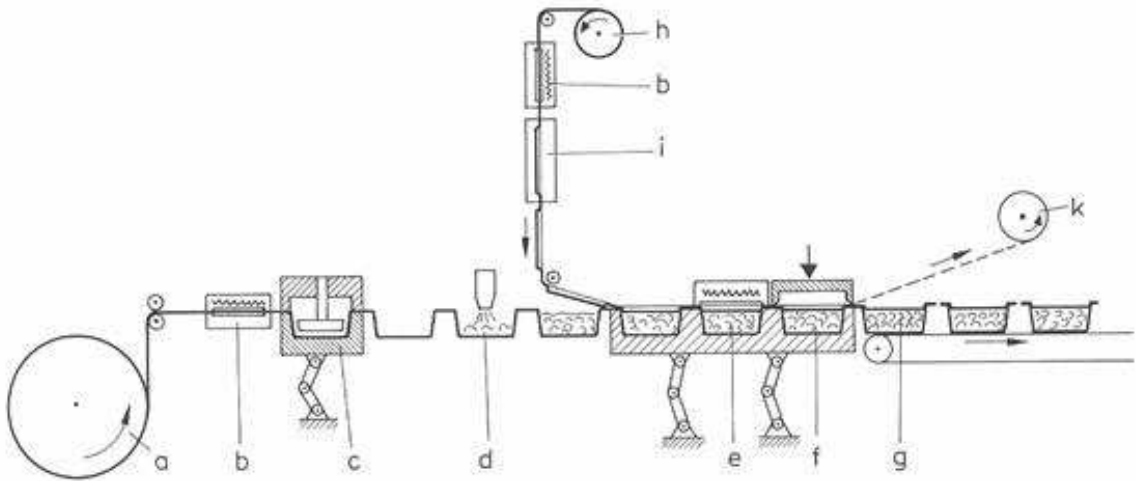
K tvarování zvláště tlustých desek nebo plastů se špatným tvářením, kde nestačí síla vyvozená vakuem, se používá přetlakové tvarování. Rám s plastovou deskou je pevně spojen s uzavřenou komorou. Do zahřáté desky se nejdříve zatlačí pozitivní forma, která dosedne na rám. Do komory se potom přivede stlačený vzduch o tlaku 1 až 2 MPa, který z vnější strany přitlačuje desku k formě. Dokonalé vytvarování je zajištěno současným vytvořením vakua v prostoru mezi deskou a formou (označena 4 fáze na Obr. 7.).



Obr. 7. Kombinací tlaku a podtlaku

1.2.7 Kontinuální tvarování

Výtažky menších rozměrů, které se vyrábějí ve velkém množství, se s výhodou vyrábějí kontinuálním tvarováním. Plastová fólie nebo deska v podobě nekonečného pásu se odvíjí ze zásobníku, zpravidla se přehřívá a přichází do tvarovací formy. Proběhne tvarování, jemuž v případě potřeby předchází předtvarování, potom se výtažek chladí proudem vzduchu a v poslední fázi se výtažek odstříhne od zbytku desky. Mezitím může být v lince zařazeno plnění a spojování s horní fólií včetně vysekávání.



a - plastová fólie, b – ohřev, c – tvarování, d – plnění, e – uzavírání, f – vysekávání, g – hotový výrobek, h – hliníkové fólie, i – předtvarování s potiskem, k – navíjení zbytku

Z přehledu je zřejmé, že tvarování desek z termoplastů je technologie, která nabízí řadu variant, takže pro konkrétní výlisek je možné vybrat technologii jak s ohledem na požadované vlastnosti, tak na ekonomii výroby.

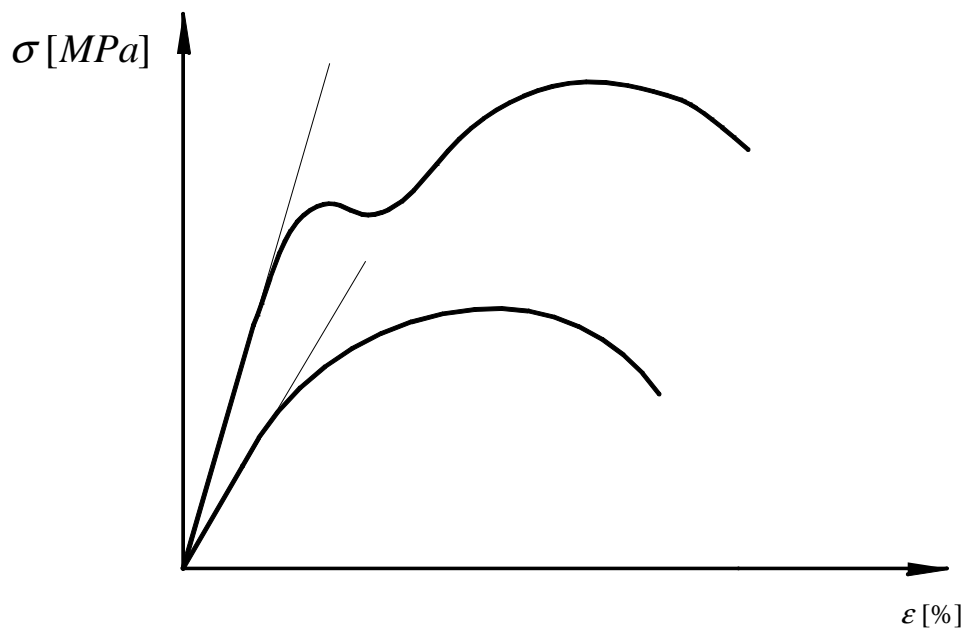
2 OHYBOVÁ TUHOST V LINEÁRNÍ ELASTICKÉ OBLASTI

Ohybová tuhost materiálu je matematicky definována jako součin EJ , kde E je modul pružnosti a J je kvadratický moment plochy průřezu k neutrální ose průřezu. Tato ohybová tuhost může být ovlivněna materiálem výrobku, tj. E a průřezovou geometrií součásti tj. J .

2.1 Modul pružnosti

Moduly pružnosti patří k nejčastěji používaným parametrům popisujícím mechanické chování těles. Zjišťují se buď na základě statických testů, jako poměr mezi mechanickým napětím a poměrné (relativní) deformaci, nebo méně často na základě měření oscilací těles. Modul pružnosti je dán jako poměr působícího namáhání σ k poměrné deformaci ε , které toto namáhání vyvolává tj. $E = \sigma / \varepsilon$. Moduly pružnosti popisují tuhost materiálu, v tom smyslu, že čím větší je modul pružnosti, tím tužší je materiál. Youngův modul pružnosti v tahu E je definován jako směrnice tečny záznamu jednoosé tahové, resp. ohybové zkoušky v počátku souřadnicového systému a v praxi se hodnota modulu pružnosti E právě stanovuje jako hodnota směrnice tečny [1]

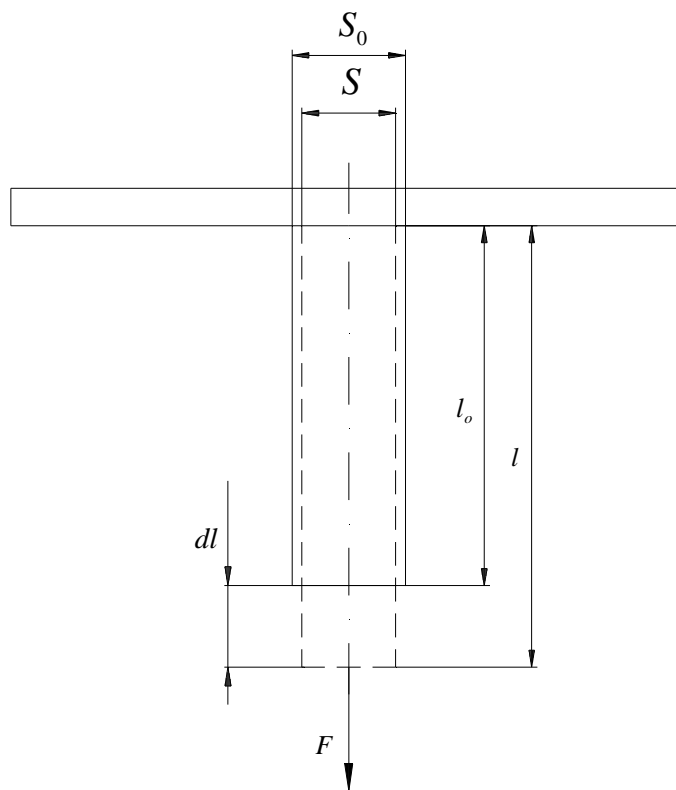
$$\sigma = k \cdot \varepsilon \Rightarrow k = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad a \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \text{ pak } \sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$



Obr. 8. Obecný tvar závislosti funkce $\sigma(\varepsilon)$

2.1.1 Hookeův zákon

Jde o zákon, kdy deformace tělesa je úměrná jeho namáhání. Velikost namáhání je v oblasti malých deformací tělesa a platí jen pro takové namáhání (deformace), kdy po skončení namáhání dojde k vrácení tělesa do původního stavu (rozměru). Jde o tzv. pružnou deformaci. Linearita je typická pro krystalické látky, pokud namáhání nepřekročí mez, kdy dojde k posunu mezi krystalickými rovinami nebo k posunu mezi oblastmi ve struktuře látky. Hookeův zákon platí v jistém rozmezí namáhání i pro amorfnní látky a tělesa visko-elastická.



Obr. 9. Namáhání tělesa tahem

l_0 - původní délka, l - délka po prodloužení, dl – prodloužení, S_0 - původní průřez, S - průřez po zatížení, F - zatěžující síla

- pro poměrné prodloužení ε , platí:

$$\varepsilon = \frac{dl}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad [mm] \quad (2)$$

- pro příčné poměrné zúžení Z platí:

$$Z = \frac{\Delta S}{S} \cdot 100 = \frac{S - S_0}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

- tažnost materiálu A je dán vztahem:

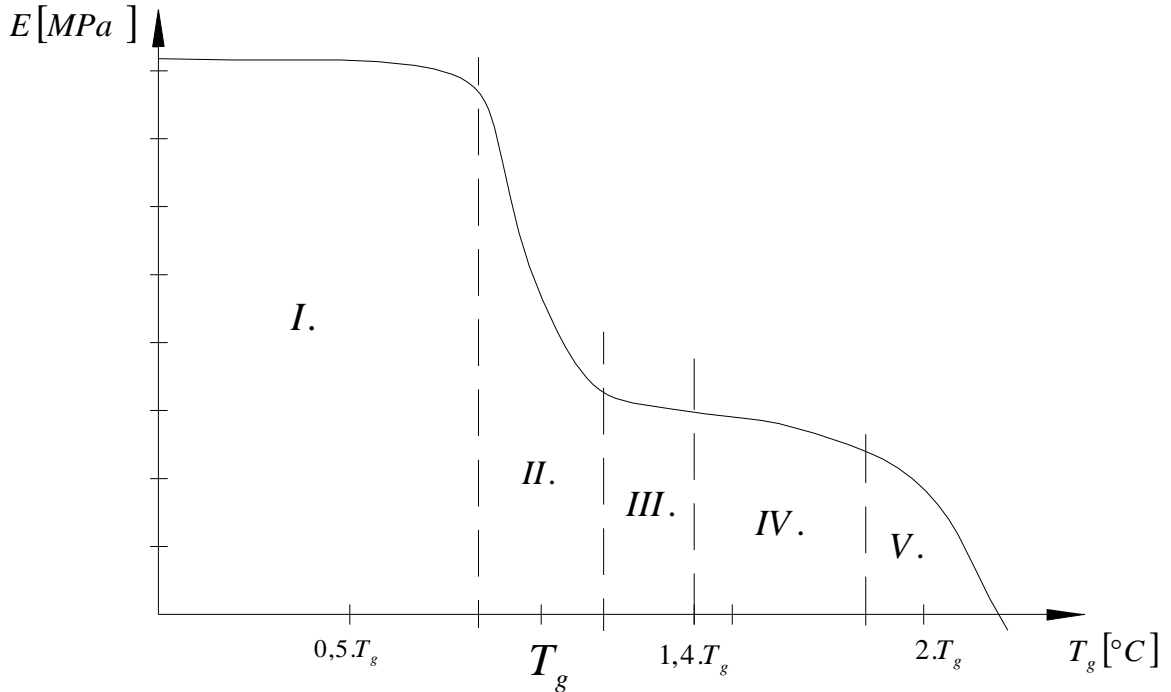
$$A = \frac{l_u - l_o}{l_o} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

Tab. 1. Vybrané mechanické vlastnosti pro některé materiály

	σ [Mpa]	E [Gpa]	ν	T_g [°C]	T_m [°C]
ocel	125-620	210	0,28		1536
sklo	30-42	60	0,23		
PVC	35-55	2,5		80	190
LDPE	9-15	0,2-0,4			105-115
HDPE	20-33	0,7-1,4	0,38		125-136
PP	26-38	1,1-1,5	0,47	-10	160-170
PS	31	3,2		100	
PC	65-70	2,2-2,45		150	
PMMA	67-70	1,4		180	

2.1.2 Vlastnosti modulu pružnosti

Plasty jsou charakteristické svou závislostí mechanických konstant na teplotě. S rostoucí teplotou se obecně modul pružnosti plasty snižuje a naopak. Pro amorfní polymer je typická křivka, viz. (Graf č.1).

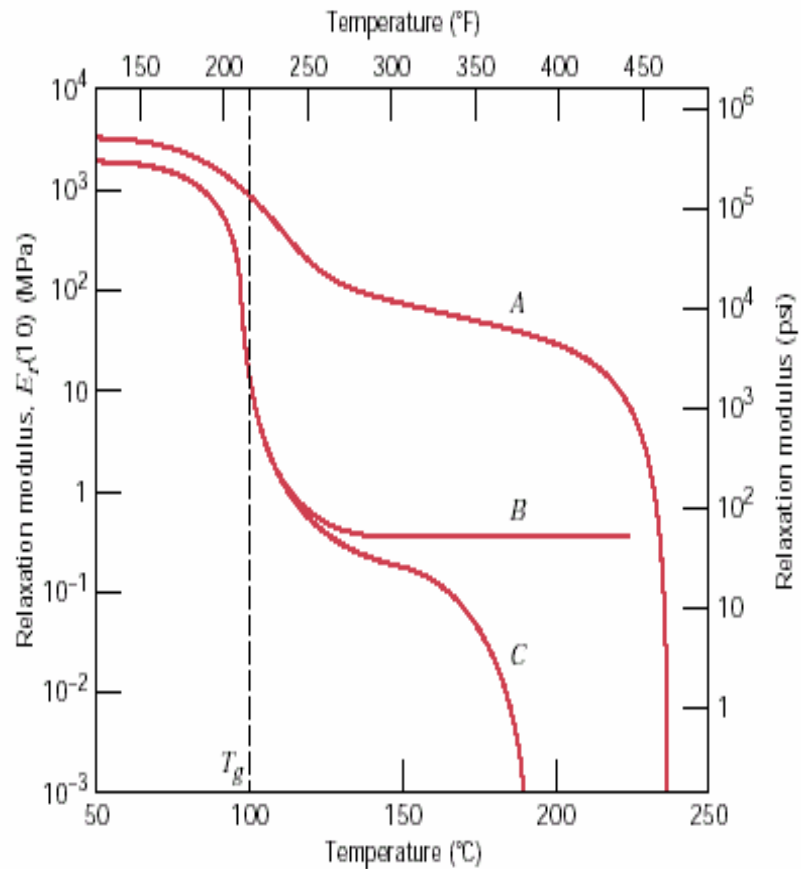


Graf č.1. Závislost modulu pružnosti na teplotě skelného přechodu

Popis teplotních oblastí

- I. Jde o skelnou (sklovitou) oblast, ve které se modul pružnosti téměř nemění. Při zatěžování se polymer poruší křehkým lomem, který vzniká v místech lokálních poruch.
- II. Oblast skelného přechodu. Dochází k velkému poklesu modulu pružnosti. Zde se stanovuje teplota skelného přechodu, která je střední hodnotou mezi začátkem a koncem této oblasti.
- III. Kaučukovitá oblast
- IV. Viskoelastická oblast
- V. Oblast rozkladu polymeru

Tvar křivky, viz.(Graf č.1) je také ovlivněn uspořádáním struktury polymeru. Na (Graf č.2) je patrné, že krystalický (semikrystalický) polymer má větší modul pružnosti při určité teplotě. Tato vlastnost je dána pravidelnějším 3D uspořádáním struktury. U semikrystalických polymerů (kam patří většina vláken) dochází po krátké kaučukovité oblasti k tání polymerů.



Graf č.2. Vliv struktury polymeru na průběh poklesu modulu pružnosti

- A krystalický
- B zesíťovaný
- C amorfní

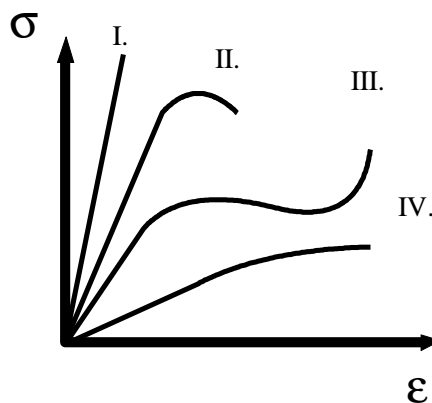
Tahová zkouška pro jednotlivé teplotní oblasti

Pro jednotlivá teplotní pásma (tj. I. – IV.) jsou charakteristické křivky prováděné tahovou zkouškou. Tyto vlastnosti jsou znázorněny, viz.(Graf č.1)

- I. teplotní pásmo: Tvar pracovní křivky (závislosti napětí na deformaci) je lineární. Vlákna jsou ve sklovitém stavu, kdy polymerní segmenty pouze vibrují kolem středních poloh. Pro pevnost při křehkém lomu platí empirický vztah:

$$\sigma_p = 30 \sqrt[3]{E^2} \quad (5)$$

- II. teplotní pásmo: Při teplotě $T = 0,8T_g$ již dochází k počátku plastických deformací a pracovní křivka má konkávní ohyb. Při porušení vláken již dochází ke vzniku trhlin. Vlákna jsou v přechodové oblasti, kde již dochází k difúznímu pohybu polymerních segmentů malého dosahu.
- III. teplotní pásmo: Při teplotě zesklenní T_g již dochází k výrazným plastickým deformacím resp. vzniku krčkového dloužení a pracovní křivka má typický sigmoidální charakter s oblastí kluzu. Tato teplota je typickou pro charakterizaci bodu, kdy již je segmentální pohyblivost polymerních řetězců tak vysoká, že dochází k tvorbě lokálních volných objemů umožňujících např. difúzi penetrantů hmotou vlákna.
- IV. teplotní pásmo: Při teplotách dostatečně nad T_g dochází již ke kvazi viskóznímu toku a charakter porušení odpovídá plastickému porušení. Vlákno se může nacházet v kaučukovité oblasti (kaučukovitá – entropická deformace) nebo v oblasti pružného tečení.



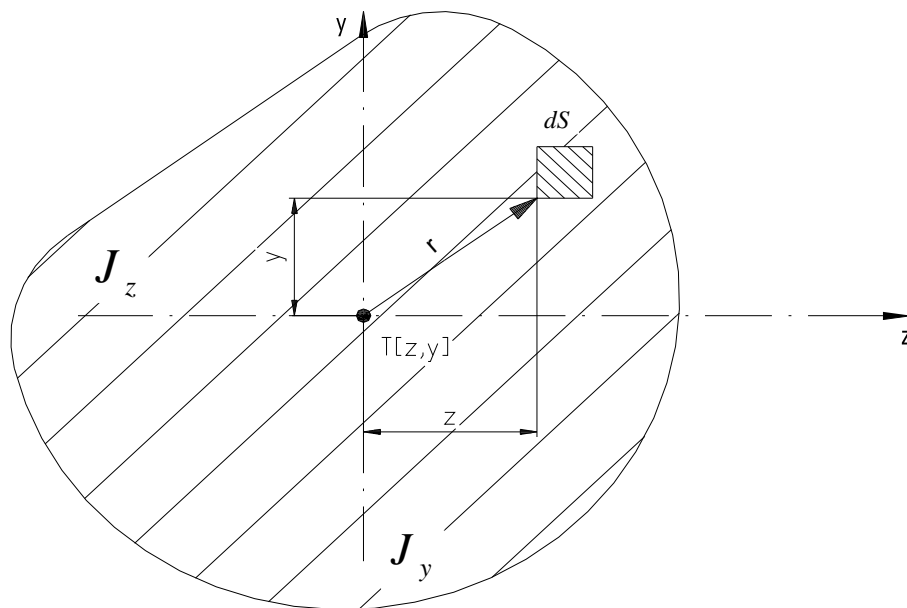
Graf č.3. Tahová křivka pro teplotní oblasti

2.2 Kvadratický moment průřezu plochy

Osa, která prochází těžištěm plochy se nazývá centrální osa a k ní je vztažen centrální kvadratický moment průřezu. Kvadratický moment průřezu v centrální ose je nejmenší ze všech kvadratických momentů průřezu.

Má-li plocha více než dvě osy souměrnosti, např. kruh, jsou všechny osy hlavními centrálními osami a kvadratický moment průřezu je ke všem osám stejný. Jestliže má průřez osu rovnoběžnou, k níž kvadratický moment průřezu hledáme, potom kvadratický moment obou částí po obou stranách jsou osy souměrně stejné. Posuneme-li plochu nebo její části rovnoběžně s osou, ke které počítáme, pak se tento moment nemění.

2.2.1 Osové kvadratické momenty průřezu plochy



Obr. 10. Osové kvadratické momenty

- k ose z

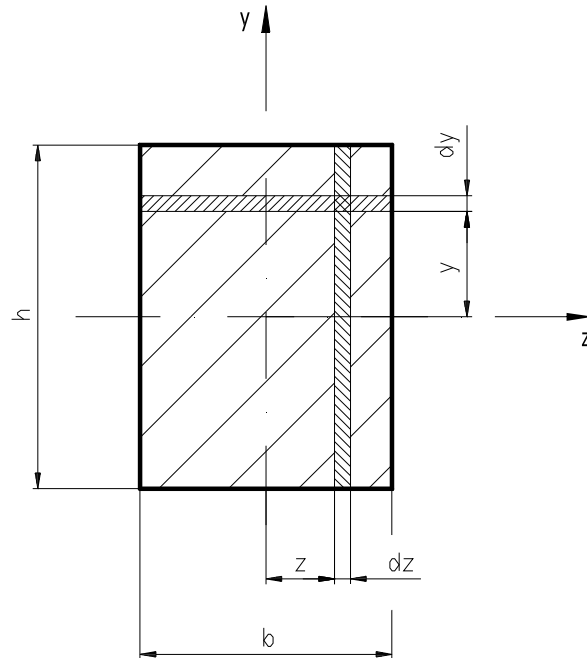
$$J_z = \oint_{(S)} y^2 \cdot dS \quad (6)$$

- k ose y

$$J_y = \oint_{(S)} z^2 \cdot dS \quad (7)$$

Kvadratické momenty průřezů základních tvarů

a) obdélník



Obr. 11. Obdélníkový průřez

- k ose z

$$J_z = \oint_{(S)} y^2 \cdot dS = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 \cdot b dy = b \left[\frac{y^3}{3} \right]_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} = \frac{1}{3} b \left(\frac{h^3}{8} + \frac{h^3}{8} \right) = \frac{1}{12} b h^3 \quad (8)$$

- k ose y

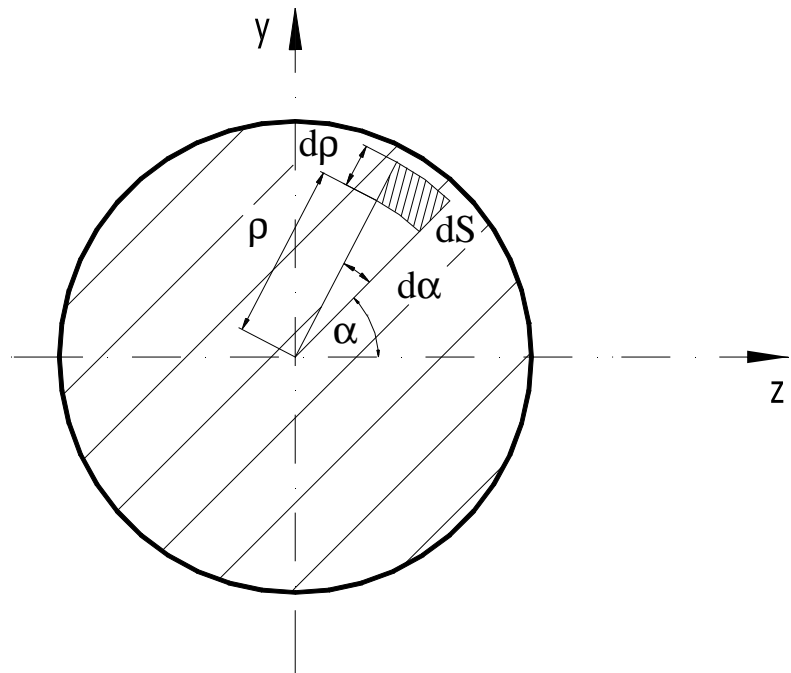
$$J_y = \oint_{(S)} z^2 \cdot dS = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} z^2 \cdot h dz = h \left[\frac{z^3}{3} \right]_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} = \frac{1}{3} h \left(\frac{b^3}{8} + \frac{b^3}{8} \right) = \frac{1}{12} h b^3 \quad (9)$$

b) kruh

$$\sin \alpha = \frac{y}{\rho} \Rightarrow y = \rho \cdot \sin \alpha$$

(10)

$$dS = \rho \cdot d\alpha \cdot d\rho$$



Obr. 12. Kruhový průřez

$$J_z = \oint_{(S)} y^2 \cdot dS = \int_0^{2\pi} \int_0^r \rho^2 \sin^2 \alpha \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\alpha = \frac{r^4}{4} \int_0^{2\pi} \sin^2 \alpha \cdot d\alpha = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi d^4}{32} \quad (11)$$

$$J_z = J_y \Rightarrow J_{z,y} = \frac{\pi d^4}{32} \quad (12)$$

Těžiště plochy

- pro osu z

$$z_T = \frac{\sum z_i \cdot S_i}{S} \quad (13)$$

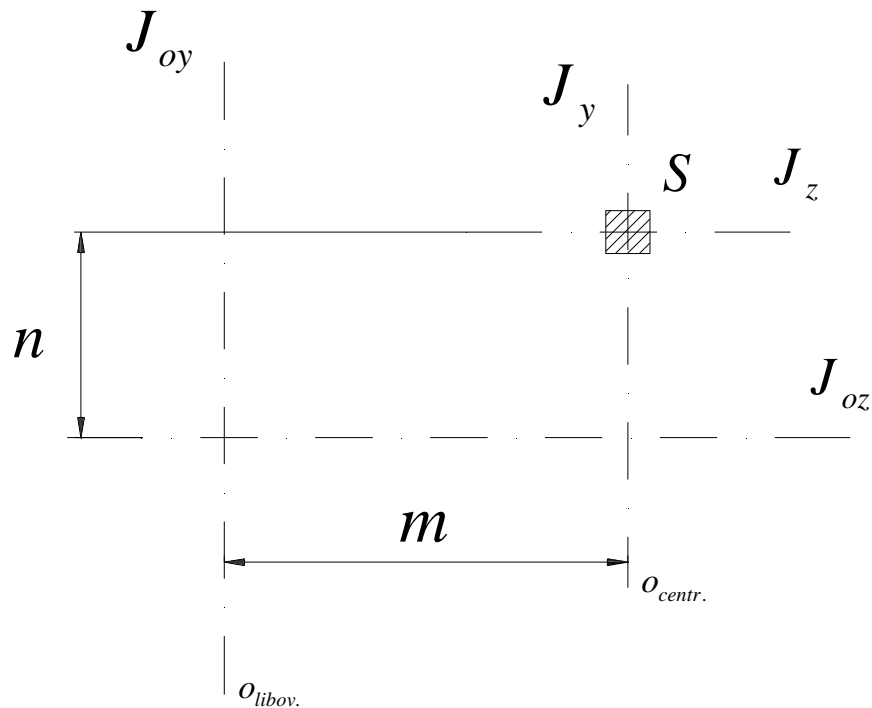
- pro osu y

$$y_T = \frac{\sum y_i \cdot S_i}{S} \quad (14)$$

2.2.2 Kvadratický moment průřezu plochy k mimo-těžišťové ose

Ke zjištění tohoto momentu se používá Steinerova věta.

Steinerova věta: Kvadratický moment průřezu k libovolné ose rovnoběžné s centrální osou se rovná kvadratickému momentu průřezu k centrální ose zvětšenému o součin velikosti průřezu S a druhé mocniny vzdálenosti obou os, tj platí rovnice (15), popř. (16).



Obr. 13. Steinerova věta

- k ose z

$$J_{oz} = J_z + n^2 \cdot S \quad (15)$$

- k ose y

$$J_{oy} = J_y + m^2 \cdot S \quad (16)$$

- deviační moment

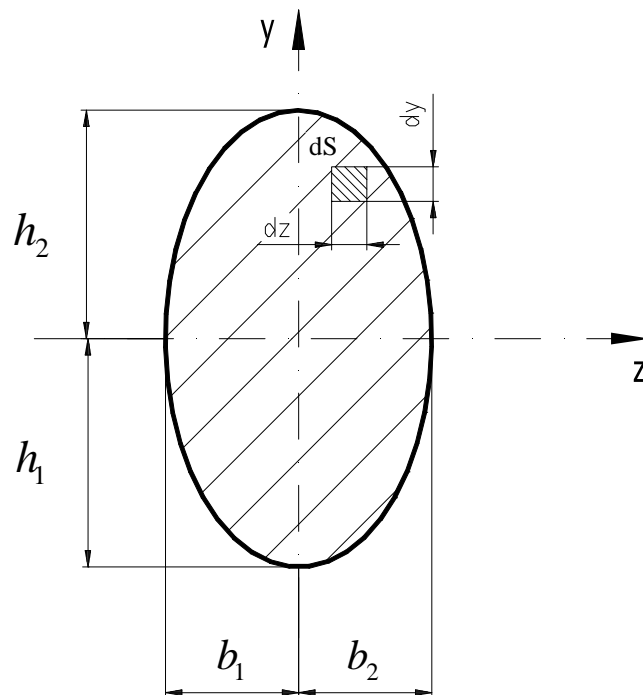
$$D_{z_0, y_0} = D_{zy} + m \cdot n \cdot S \quad (17)$$

3.2.3 Polární kvadratický moment

Polární moment průřezu k počátku pravouhlého souřadného systému je roven součtu osových momentů k souřadnicovým osám systému, viz rovnice (18)

$$J_p = \oint_{(S)} r^2 dS = \oint_{(S)} (y^2 + z^2) dS = \oint_{(S)} y^2 \cdot dS + \oint_{(S)} z^2 \cdot dS \Rightarrow J_p = J_z + J_y \quad (18)$$

2.2.4 Deviační moment



Obr. 14. Deviační moment tělesa

$$D_{zy} = \oint_{(S)} z \cdot y \cdot dS = \int_{-h_1}^{h_2} \int_{-b_1}^{b_2} z \cdot y \cdot dz \cdot dy = \frac{1}{2} \int_{-h_1}^{h_2} y (b_2^2 + b_1^2) dy = \frac{1}{4} (b_2^2 + b_1^2) (h_2^2 + h_1^2) \quad (19)$$

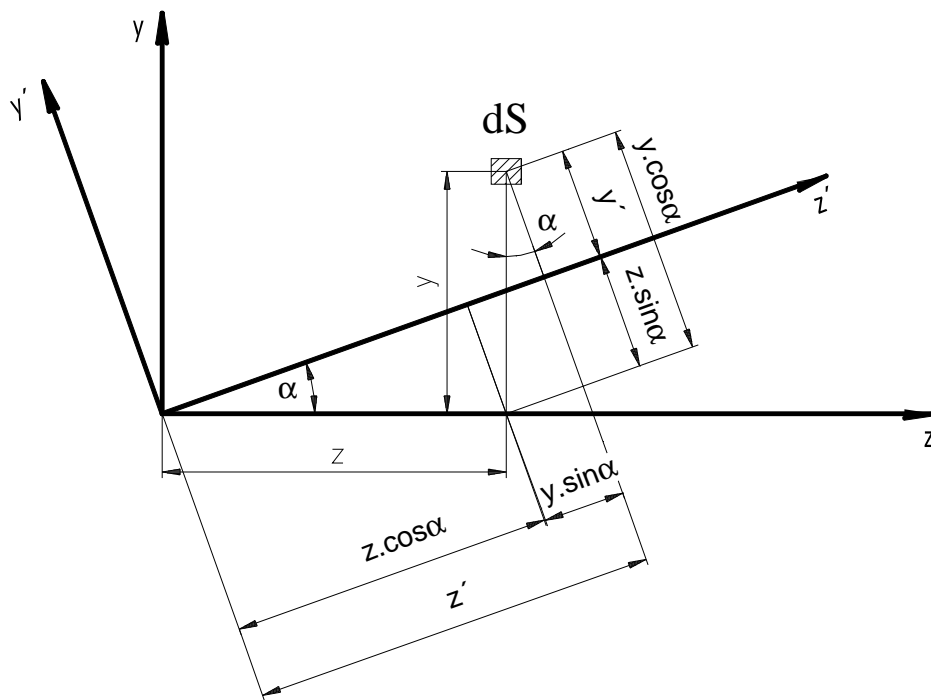
Deviační moment je rovný nule $D_{zy}=0$, pokud je těleso symetrické alespoň dle jedné osy, tato osa zároveň prochází těžištěm.

2.3 Kvadratický moment průřezu plochy k natočeným osám

Známe-li kvadratické momenty průřezu plochy k osám z , y , pak můžeme stanovit kvadratické momenty průřezu plochy k osám z' , y' , které jsou natočeny o úhel α . Mezi osami z , y a natočenými osami z' , y' o úhel α jsou vázány transformační vztahy dle (20,21), platí tedy rovnice (22), (23) :

$$z' = z \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha \quad (20)$$

$$y' = y \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha \quad (21)$$



Obr. 15. Natočení souřadnic

3.3.1 Kvadratické momenty průřezu plochy k natočeným osám z' , y'

- k ose z'

$$J'_{z'} = \int_{(S)} y'^2 dS$$

$$J'_{z'} = \int_{(S)} (y \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha)^2 dS = \cos^2 \alpha \int_{(S)} y^2 dS - 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha \int_{(S)} z \cdot y dS + \sin^2 \alpha \int_{(S)} z^2 dS \quad (22)$$

$$J'_{z'} = \cos^2 \alpha \cdot J_z - 2 \cdot \sin \alpha \cos \alpha \cdot D_{zy} + \sin^2 \alpha \cdot J_y$$

- k ose y'

$$J'_y = \oint_{(S)} z^2 dS$$

$$J'_y = \oint_{(S)} (z \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha)^2 dS = \cos^2 \alpha \oint_{(S)} z^2 dS + 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha \oint_{(S)} z \cdot y dS + \sin^2 \alpha \oint_{(S)} y^2 dS \quad (23)$$

$$J'_y = \cos^2 \alpha \cdot J_y + 2 \cdot \sin \alpha \cos \alpha \cdot D_{zy} + \sin^2 \alpha \cdot J_z$$

3.3.2 Polární kvadratický moment k natočeným osám z' , y'

$$\begin{aligned} J'_p &= J'_z + J'_y = \\ &= (\cos^2 \alpha \cdot J_z - 2 \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot D_{zy} + \sin^2 \alpha \cdot J_y) + (\cos^2 \alpha \cdot J_y + 2 \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot D_{zy} + \sin^2 \alpha \cdot J_z) \end{aligned} \quad (24)$$

$$J'_p = J_z (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) + J_y (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) \Rightarrow J'_p = J_z + J_y$$

- z rovnice (24) vyplývá, že součet osových kvadratických momentů průřezů nezávisí na natočení pravouhlého souřadného systému a je roven polárnímu momentu průřezu k počátku souřadnic.

2.3.3 Deviační moment k natočeným osám z' , y'

- použijeme opět transformační vztahy z ()

$$\begin{aligned} D_{z'y'} &= \oint_{(S)} z' \cdot y' dS \\ D_{z'y'} &= \oint_{(S)} (z \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha) \cdot (y \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha) dS = \\ &= \oint_{(S)} (z \cdot y \cdot \cos^2 \alpha - z^2 \cdot \sin \alpha \cos \alpha + y^2 \cdot \sin \alpha \cos \alpha - z \cdot y \cdot \sin^2 \alpha) dS = \\ &= \sin \alpha \cos \alpha \left(\oint_{(S)} y^2 dS - \oint_{(S)} z^2 dS \right) - \oint_{(S)} z \cdot y (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) dS \end{aligned} \quad (25)$$

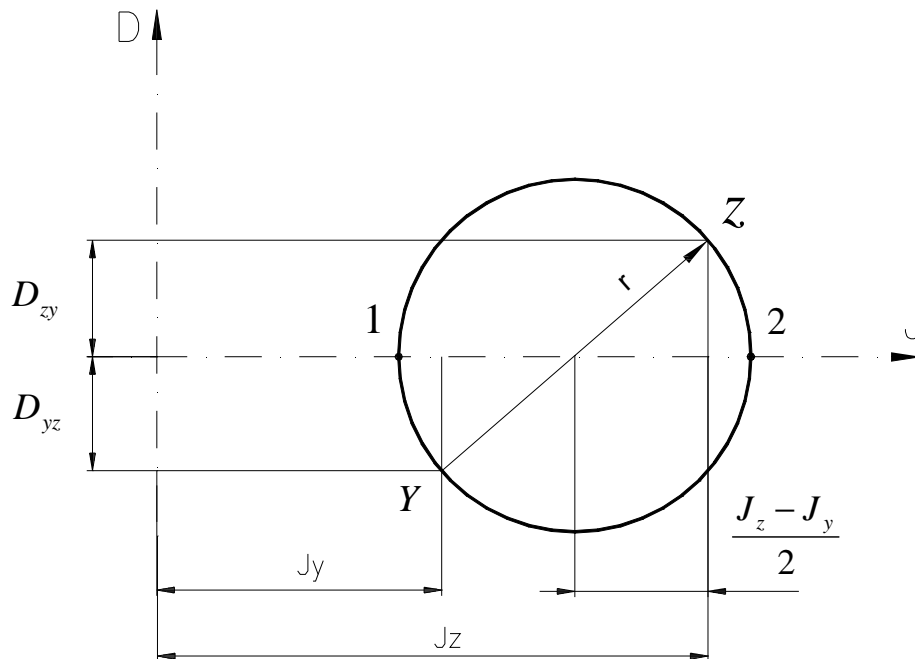
$$D_{z'y'} = (J_z - J_y) \cdot \sin \alpha \cos \alpha - D_{zy} \cdot \cos 2\alpha$$

popř.

$$D_{z'y'} = \frac{(J_z - J_y)}{2} \cdot \sin 2\alpha - D_{zy} \cdot \cos 2\alpha \quad (26)$$

2.3.4 Mohrova kružnice

Mohrova kružnice je geometrickým místem bodů v Mohrově rovině. Na vodorovnou osu vynášíme osově kvadr. momenty, na svislou osu pak deviační momenty. Tuto kružnici nejsnadněji znázorníme pomocí hlavních kvadratických momentů průřezu, tj. hodnoty D_{zy} , popř. $D_{yz} = 0$. Na (Obr. 16.) představují body 1,2. Body $Z[J_z, D_{zy}]$; $Y[J_y, D_{yz}]$ odpovídají kvadratickým momentům průřezu a deviačním momentům k základním osám. Po spojení bodů Z,Y nalezneme průsečík na ose J - vodorovná osa, tento průsečík je středem Mohrovy kružnice. Pootočíme-li souřadný systém o úhel α , pak dle rovnic (19,20), můžeme určit kvadratický moment průřezu plochy pro tento systém, viz. (Obr. 17.).



Obr. 16. Mohrova kružnice

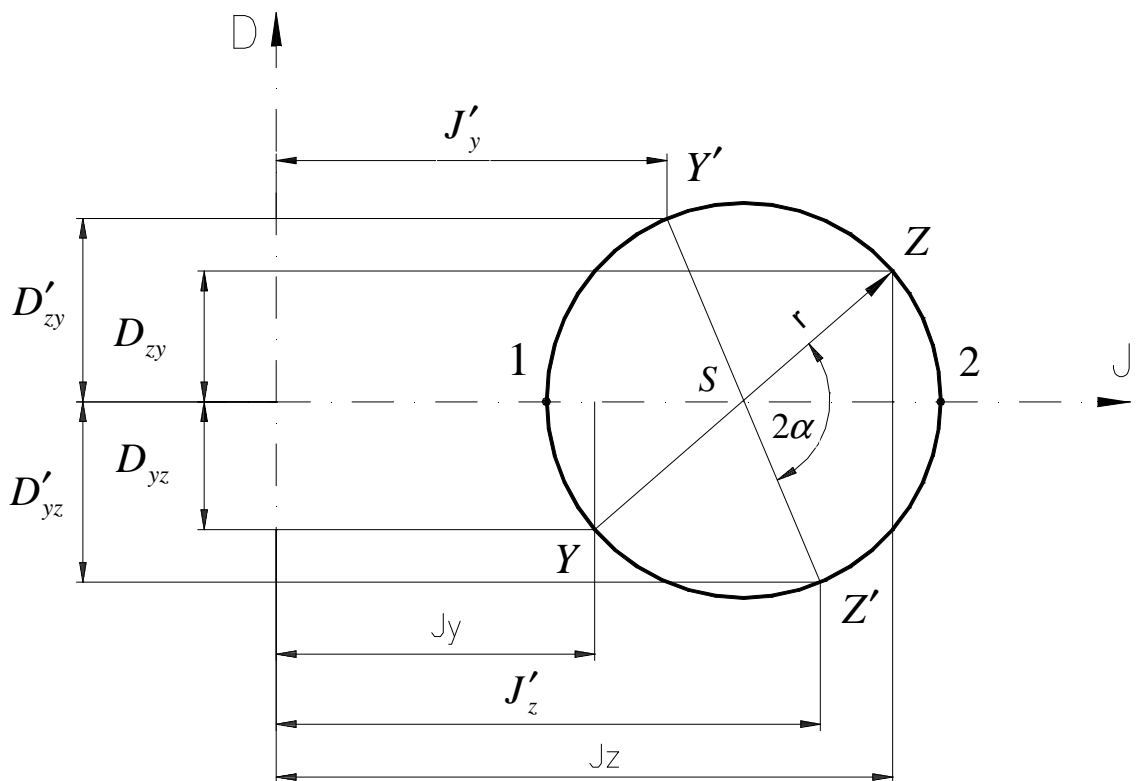
Poloměr Mohrovy kružnice:

$$r = \sqrt{\left(\frac{J_z - J_y}{2}\right)^2 + D_{zy}^2} \quad (27)$$

Transformace Mohrovy kružnice

Budeme-li otáčet kružnicí s průměrem ZY okolo středu S o úhel 2α , pak úhel α je skutečné pootočení elementu.

Natočíme-li body ZY do polohy bodů 1,2 (Obr. 17.), pak kvadratické momenty budou mít extrémní hodnoty, tj. min. a max. U deviačních momentů extrémy vzniknou natočením bodů ZY (vzhledem k základním osám) o úhel $2\alpha = \frac{\pi}{2}$, tj. ($\alpha=45^\circ$).



Obr. 17. Transformace Mohrovy kružnice

Úpravou rovnic (20,21) a zavedení funkcí parametru 2α (rovnice 28,29,30) platí:

$$\cos \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \quad (28)$$

$$\sin \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2} \quad (29)$$

$$\sin 2\alpha = 2 \cdot \sin \alpha \cos \alpha \quad (30)$$

-pak

$$J'_z = \frac{J_z + J_y}{2} + \frac{J_z - J_y}{2} \cos 2\alpha - D_{zy} \sin 2\alpha \quad (31)$$

$$J'_y = \frac{J_z + J_y}{2} + \frac{J_y - J_z}{2} \cos 2\alpha + D_{zy} \sin 2\alpha \quad (32)$$

Úhel pootočení souřadného systému se vypočítá dle (Obr. 17.).

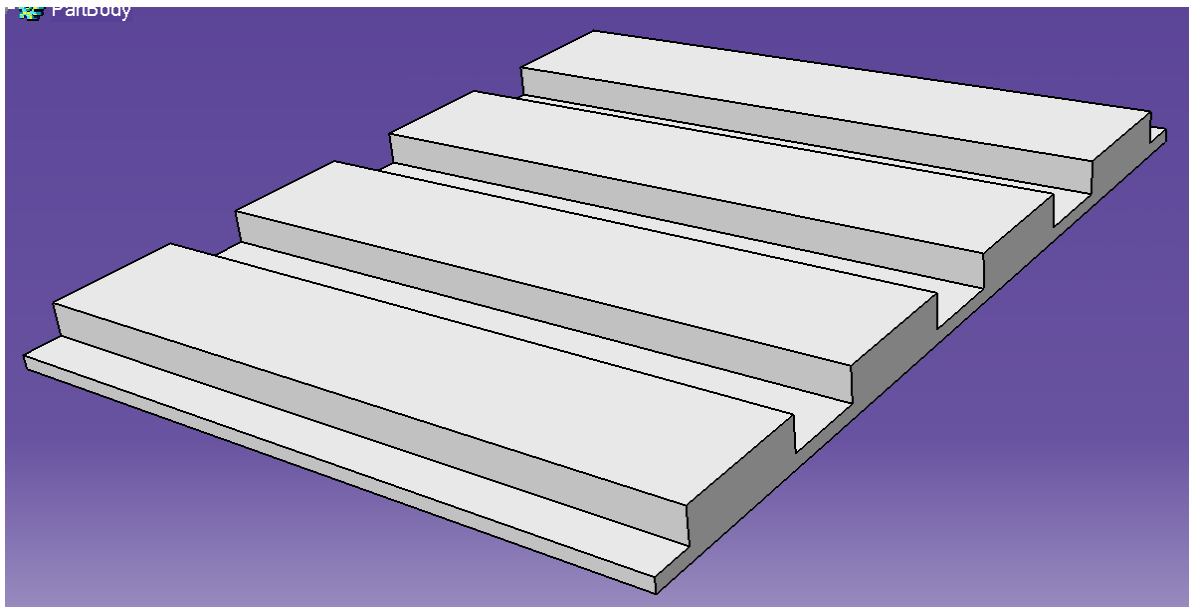
$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2D_{zy}}{J_z - J_y} \Rightarrow \alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{2D_{zy}}{J_z - J_y} \right) \quad (33)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

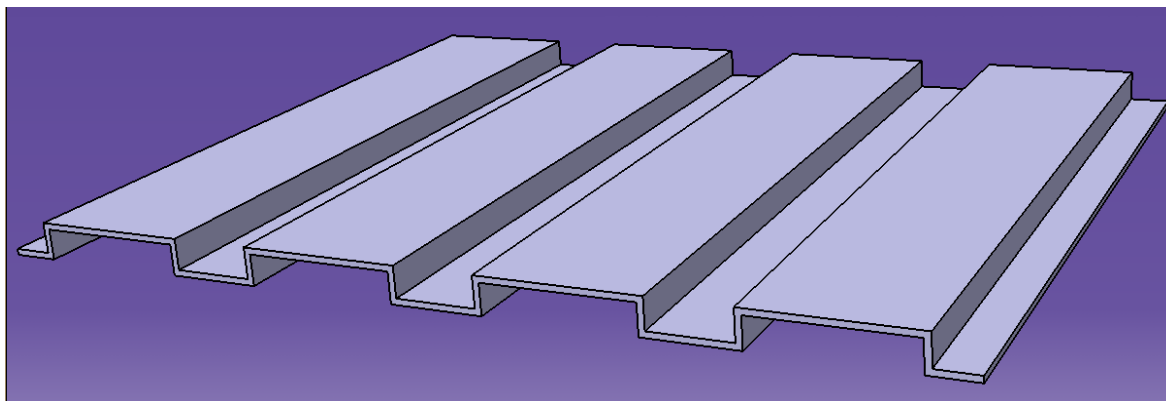
1 TENKOSTĚNNÉ PLASTOVÉ PROFILY

1.1 Vytvoření profilů vakuovým tvarováním

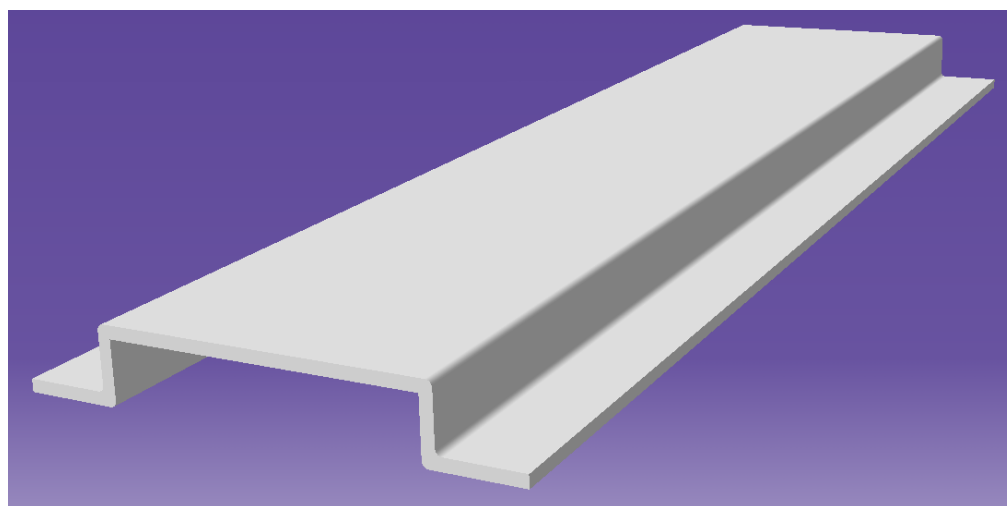
Pro daný typ měření jsme si vyrobili plastový profil z PS desek (Obchodní název Iroplast SB) o tloušťce 1 a 2 mm. K jeho výrobě jsme použili dvě dřevěné vícenásobné formy. viz.(Obr. 18.). Tyto formy jsme vložili do vakuového tvářecího stroje. Dále jsme vložili a upnuli předem připravenou desku (fólii) o rozměrech (35x50)cm do rámu. Deska musí mít správné rozměry, aby při tvářecím procesu nedošlo k deformaci desky na okrajích a následnému přisávanému vzduchu a tím i k znehodnocení procesu výroby profilu. Tvářecí stroj Formtech 300 lze nastavit pro různé materiály a jejich tloušťku. Tj. lze nastavit dobu ohřevu, jeho intenzitu i teplotní rozložení po ploše desky. Doba ohřevu byla nastavena 90s pro tloušťku 2mm a 60s pro tloušťku 1mm a více se ohřívaly vnější části desky. Toto nastavení odpovídá teplotnímu rozsahu zpracování, tj. 130 až 150°C, max. teplota 200°C. Po zahřátí byla mechanicky natažena na formu a pak pomocí tlakového rozdílu přesně dotvarována do u-profilu (Obr. 19.). Po ochlazení a oddělení jednotlivých profilů od sebe nám vznikne profil (Obr. 20.), který je připraven pro ohybovou zkoušku.



Obr. 18. Vícenásobná forma



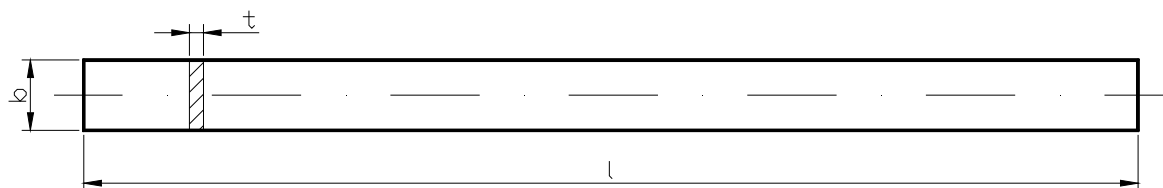
Obr. 19. Vícenásobný profil (výrobek)



Obr. 20. U-profil připravený pro ohybovou zkoušku

1.2 Tahová zkouška na stroji Zwick

Pro přesnější výpočty (v teoretické i experimentální části) je nutné stanovit hodnotu modulu pružnosti v tahu, tzn. E v MPa. Zkoušeným materiálem byl Iroplast SB o rozměrech 10x1mm a 10x2 mm. V (Tab. 2) jsou uvedeny jednotlivé rozměry těchto zkušebních těles. Délka byla 150mm u všech těles a ostatní rozměry dle (Obr. 21.).



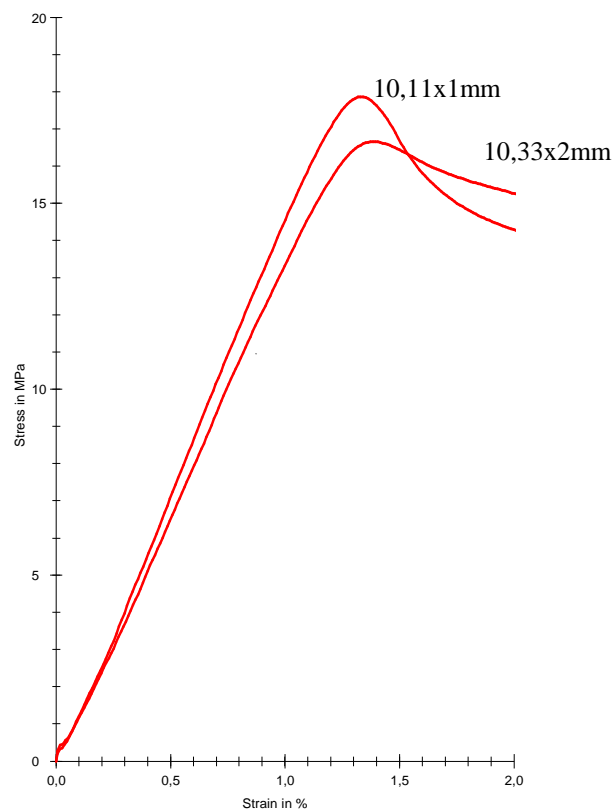
Obr. 21. Zkušební těleso připravené na tahovou zkoušku

Tab. 2. Rozměry zkušebních těles

č. měření	t [mm]	b [mm]	t [mm]	b [mm]
1.	1,00	10,40	1,95	10,40
2.	1,00	10,10	1,95	10,80
3.	1,00	10,20	1,95	10,50
4.	1,00	9,80	1,95	10,30
5.	1,00	9,80	1,95	10,50
6.	1,00	10,10	1,95	10,20
7.	1,00	9,90	1,95	10,10
8.	1,00	10,50	1,95	10,30
9.	1,00	10,00	1,95	10,40
10.	1,00	10,20	1,95	10,40
11.	1,00	10,10	1,95	10,30
12.	1,00	10,10	1,95	10,40
13.	1,00	10,40	1,95	10,30
14.	1,00	10,20	1,95	10,10
15.	1,00	10,10	1,95	10,10
16.	1,00	10,20	1,95	10,20
17.	1,00	9,80	1,95	10,30
18.	1,00	10,00	1,95	10,40
\bar{x}	1,00	10,11	1,95	10,33
σ	0,00	0,20	0,00	0,17
μ	0,00	0,10	0,00	0,09

Dle (Tab. 2) platí:

- pro tloušťku 1mm: $b=(10,11\pm 0,10)$ mm a 1,95mm: $b=(10,33\pm 0,09)$ mm

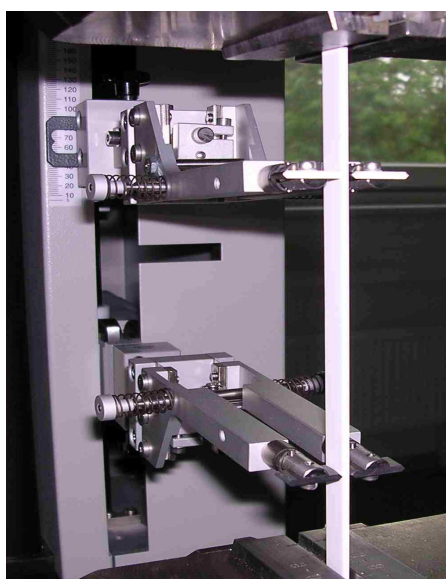


Obr. 22. Tahové křivky

Tab. 3. Moduly pružnosti v tahu a R_m

č. měření	10,11x1mm		10,33x1,95mm	
	R_m [Mpa]	E [Mpa]	R_m [Mpa]	E [Mpa]
1.	18,12	1 569,11	16,59	1 573,14
2.	18,60	1 682,88	17,40	1 523,92
3.	17,30	1 547,04	16,42	1 552,90
4.	18,44	1 592,89	17,71	1 543,53
5.	18,22	1 582,70	15,11	1 538,42
6.	18,17	1 621,72	18,20	1 574,21
7.	17,53	1 523,26	17,80	1 559,72
8.	17,81	1 550,43	17,94	1 588,70
9.	18,37	1 535,15	18,88	1 656,05
10.	18,39	1 626,89	18,25	1 638,15
11.	18,46	1 633,66	18,24	1 589,57
12.	17,68	1 504,60	17,65	1 579,33
13.	16,73	1 474,59	17,93	1 633,03
14.	18,02	1 574,22	17,93	1 605,76
15.	18,21	1 589,51	18,58	1 685,03
16.	18,88	1 643,83	18,03	1 570,82
17.	18,27	1 608,19	17,83	1 650,94
18.	18,52	1 587,80	18,26	1 614,28
\bar{x}	18,10	1 580,47	17,71	1 593,19
σ	0,51	50,95	0,86	43,73
μ	0,26	26,07	0,44	22,38

Modul pružnosti byl vypočítán programem u trhačeho stroje a odpovídal prodloužení $\varepsilon=0,05\%$ a $\varepsilon=0,25\%$ z původní měřené délky $l=100\text{mm}$. Dle (Tab. 3) je hodnota, u vzorku $10 \times 1\text{mm}$, $E=(1580,47 \pm 26,07)\text{MPa}$, $R_m=(18,10 \pm 0,26)\text{MPa}$ a u vzorku $10 \times 2\text{ mm}$ $E=(1593,19 \pm 2,38)\text{MPa}$, $R_m=(17,71 \pm 0,44)\text{MPa}$

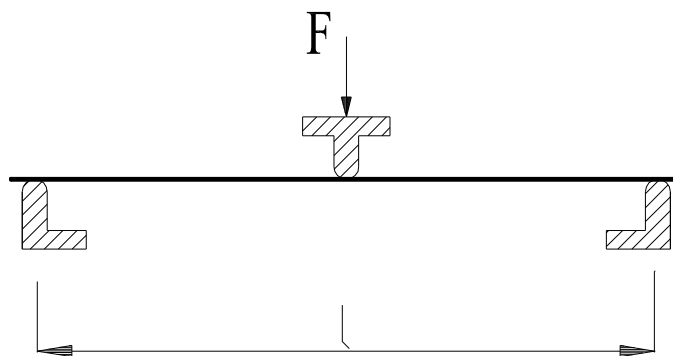


Obr. 23. Tahové zatížení tělesa

Stanovil jsem tak průměrnou hodnotu $E=(1586,83 \pm 14,23)\text{MPa}$

1.3 Ohybová zkouška na stroji Zwick

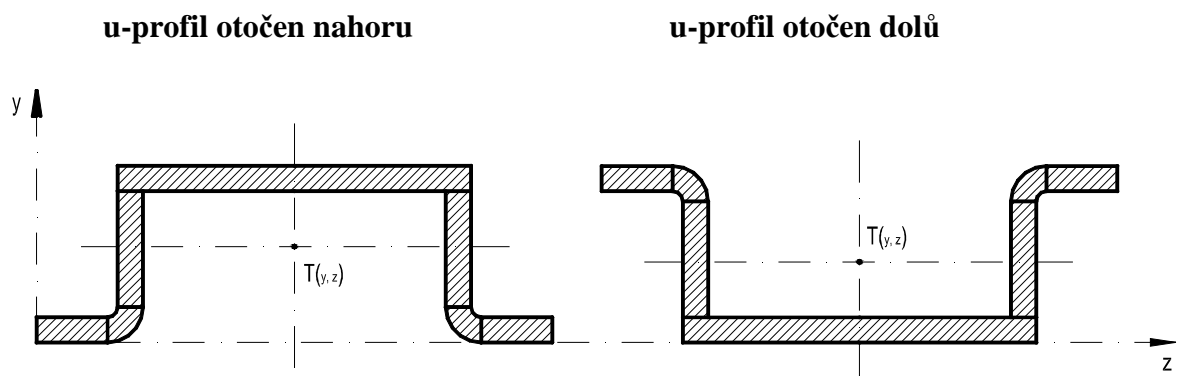
Praktická měření byla prováděna na zkoušecím (trhacím) stroji Zwick 1456. Jde o tříbodovou zkoušku ohybem (Obr. 24.), vzdálenost podpěr nosníku byla 210mm a maximální průhyb byl nastaven na hodnotu 25mm, v některých případech se nastavení průhybu snižovalo, neboť zátěžová křivka nám již klesala. Vytvořené profily jsem oboustranně zatěžoval rychlostí 10mm/min. Modul pružnosti byl vypočítán programem u trhacího stroje a odpovídal různému nastavení pro jednotlivé série. Důvodem je zvýšení přesnosti pro následný výpočet kvadratického momentu průřezu plochy .



Obr. 24. Schéma tříbodového ohybu

Postup zatěžování sérií 1 až 8:

Pro profily otočené směrem nahoru, tj. série (1,3,5,7) a profily otočené dolů, tj. série (2,4,6,8). Schéma orientace jejich otočení je na (Obr. 25.).



Obr. 25. Orientace otočení profilů

1.3.1 Měření 1. a 2. série

Profil byl vytvarován z tloušťky desky 2mm do $h=(17,45\pm 0,23)$ mm. V (Tab. 4) jsou uvedeny rozměry profilu č. 1 dle (Obr. 41.). Grafický průběh zatěžování znázorňuje vztah mezi zatěžující silou a deformací, tj. $(F-y)$, viz. (Obr. 26.). Na (Obr. 26.) u 1. série znázorněn průběh zatěžování z měření č. 1 a u 2. série z měření č. 15.

Tab. 4. Rozměry profilu č. 1

měření č.	h [mm]	b [mm]	a [mm]	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	r ₀ [mm]	R [mm]
1.	16,60	52,20	11,80	1,90	1,40	2,10	3,50
2.	16,70	52,90	11,00	1,90	1,40	2,10	3,50
3.	17,20	52,20	11,20	1,90	1,45	2,05	3,50
4.	17,80	52,30	11,70	1,80	1,40	2,10	3,50
5.	17,70	52,80	11,70	1,80	1,45	2,05	3,50
6.	17,50	52,30	11,50	1,90	1,40	2,10	3,50
7.	17,30	52,20	11,50	1,90	1,40	2,10	3,50
8.	17,50	52,30	11,80	1,90	1,35	2,15	3,50
9.	17,70	52,80	12,20	1,80	1,45	2,05	3,50
10.	17,80	53,00	11,80	1,80	1,45	2,05	3,50
11.	17,60	52,30	11,60	1,90	1,40	2,10	3,50
12.	17,60	52,80	12,20	1,80	1,45	2,05	3,50
13.	17,50	52,90	11,90	1,80	1,40	2,10	3,50
14.	17,60	52,20	11,10	1,80	1,40	2,10	3,50
15.	17,60	52,30	12,10	1,90	1,40	2,10	3,50
\bar{x}	17,45	52,50	11,67	1,85	1,41	2,09	3,50
σ	0,35	0,31	0,36	0,05	0,03	0,03	0,00
μ	0,23	0,20	0,23	0,03	0,02	0,02	0,00

Tab. 5. Naměřené hodnoty 1. série

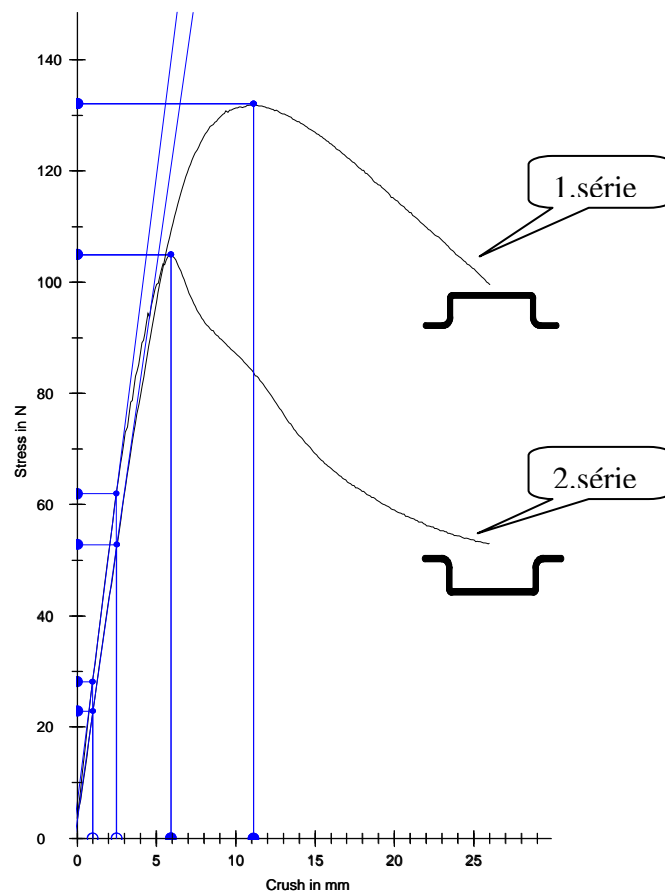
měření č.	E [Mpa]	R _m [N]	F ₁ při y ₁ [N]	F ₂ při y ₂ [N]	ε při R _m [mm]
1.	1 726,04	132,55	22,31	53,15	10,95
2.	2 418,20	154,80	26,59	61,06	10,94
3.	1 871,67	129,97	23,32	53,47	10,57
4.	1 812,41	132,10	22,89	52,77	11,12
5.	2 308,32	152,91	25,8	58,19	11,27
6.	2 084,72	120,27	24,3	54,32	9,58
7.	1 953,47	128,36	23,8	53,19	10,53
\bar{x}	2 040,58	135,85	24,14	55,16	10,71
σ	109,83	12,00	1,44	2,96	0,52
μ	109,71	11,99	1,44	2,96	0,52

Dle (Tab. 5) je hodnota $E = (2\,024,98 \pm 239,29)$ MPa.

Tab. 6. Naměřené hodnoty 2. série

	E	R _m	F ₁ při y ₁	F ₂ při y ₂	ε při R _m
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
8.	1965	97,54	27,69	57,52	5,67
9.	2290,61	131,59	31,77	66,56	7,96
10.	2269,27	132,44	30,96	65,49	7,70
11.	1974,01	95,00	25,36	55,28	5,83
12.	2515,06	141,17	34,62	72,78	7,76
13.	2524,53	136,58	32,58	70,93	7,25
14.	2133,5	108,39	27,87	60,2	6,58
15.	2233,44	104,93	28,11	61,92	5,94
\bar{x}	2 238,18	118,46	29,87	63,84	6,84
σ	199,30	17,62	2,89	5,81	0,89
μ	178,12	15,75	2,58	5,19	0,80

Dle (Tab. 6) je hodnota E = (2 238,18±178,12)MPa.



Obr. 26. Graf F – y pro 1. a 2. sérii

Pro výpočet modulu pružnosti v 1.sérii a 2.sérii byla nastavena hodnota průhybu profilů na 1mm a 2,5mm.

1.3.2 Měření 3. a 4. série

Profil byl vytvarován z tloušťky desky 1mm do $h=(16,52\pm 0,13)$ mm V (Tab. 7) jsou uvedeny rozměry profilu č. 2 dle (Obr. 41.). Grafický průběh zatěžování znázorňuje vztah mezi zatěžující silou a deformací, tj. $(F-y)$, viz. (Obr. 27.). Na (Obr. 27.) u 3. série znázorněn průběh zatěžování z měření č. 20 a u 4. série z měření č. 24.

Tab. 7. Rozměry profilu č. 2

měření č.	h [mm]	b [mm]	a [mm]	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	r ₀ [mm]	R [mm]
1.	16,90	51,10	12,00	1,00	0,70	2,30	3,00
2.	16,60	50,90	11,87	1,00	0,65	2,35	3,00
3.	16,70	50,90	11,60	1,00	0,70	2,30	3,00
4.	16,80	50,80	11,70	1,00	0,70	2,30	3,00
5.	16,60	51,00	12,30	1,00	0,60	2,40	3,00
6.	16,60	51,30	10,20	1,00	0,70	2,30	3,00
7.	16,70	50,80	11,80	1,00	0,70	2,30	3,00
8.	16,40	51,30	11,30	1,00	0,75	2,25	3,00
9.	16,50	50,80	12,10	1,00	0,70	2,30	3,00
10.	16,10	50,80	11,50	1,00	0,70	2,30	3,00
11.	16,40	50,70	11,80	1,00	0,75	2,25	3,00
12.	16,50	50,80	11,90	1,00	0,70	2,30	3,00
13.	16,30	51,30	11,80	1,00	0,70	2,30	3,00
14.	16,40	50,80	11,90	1,00	0,75	2,25	3,00
15.	16,30	51,10	11,70	1,00	0,70	2,30	3,00
\bar{x}	16,52	50,96	11,70	1,00	0,70	2,30	3,00
σ	0,20	0,20	0,46	0,00	0,04	0,04	0,00
μ	0,13	0,13	0,30	0,00	0,03	0,03	0,00

Tab. 8. Naměřené hodnoty 3. série

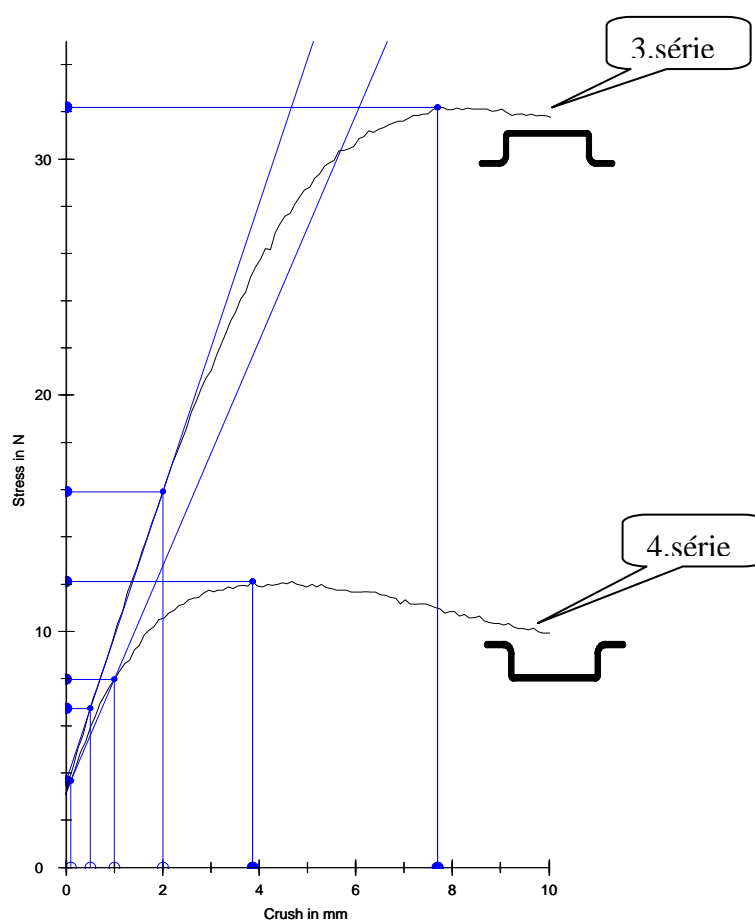
měření č.	E [Mpa]	R _m [N]	F ₁ při y ₁ [N]	F ₂ při y ₂ [N]	ε při R _m [mm]
16.	679,34	43,85	6,89	17,35	11,89
17.	587,97	34,87	6,61	15,7	9,57
18.	564,34	33,71	6,14	14,86	9,39
19.	531,63	33,81	6,15	14,36	9,78
20.	593,58	32,20	6,74	15,91	7,69
21.	734,38	42,51	7,22	18,54	10,05
22.	554,17	31,79	6,32	14,88	9,75
\bar{x}	606,49	36,11	6,58	15,94	9,73
σ	67,92	4,59	0,37	1,39	1,14
μ	62,82	4,25	0,34	1,29	1,05

Dle (Tab. 8) je hodnota $E = (606,49\pm 62,82)$ MPa.

Tab. 9. Naměřené hodnoty 4. série

	E	R _m	F ₁ při y ₁	F ₂ při y ₂	ε při R _m
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
23.	894,56	24,80	4,19	12,43	4,43
24.	467,56	12,09	3,66	7,97	3,96
25.	317,88	8,87	2,95	5,87	4,63
26.	321,49	9,73	3,48	6,45	4,37
27.	377,88	6,58	0,64	4,12	3,86
28.	732,61	19,18	0,77	7,52	4,37
29.	787,69	18,22	0,91	8,16	4,15
30.	730,35	18,67	0,91	7,63	5,21
$\bar{\chi}$	578,75	14,77	2,19	7,52	4,37
σ	217,08	5,93	1,42	2,24	0,40
μ	194,01	5,30	1,27	2,00	0,36

Dle (Tab. 9) je hodnota $E = (579,75 \pm 194,01) \text{MPa}$.

Obr. 27. Graf $F - y$ pro 3. a 4. sérii

Pro výpočet modulu pružnosti byla v 3.sérii nastavena hodnota průhybu profilu na 0,5mm a 2mm a u 4.série na 0,1mm a 1mm.

1.3.3 Měření 5. a 6. série

Profil byl vytvarován z tloušťky desky 2mm do $h=(11,36\pm 0,12)$ mm V (Tab. 10) jsou uvedeny rozměry profilu č. 3 dle (Obr. 41.). Grafický průběh zatěžování znázorňuje vztah mezi zatěžující silou a deformací, tj. ($F-y$), viz.(Obr. 28.). Na (Obr. 28.) u 5. série znázorněn průběh zatěžování z měření č. 35 a u 6. série z měření č. 42.

Tab. 10. Rozměry profilu č. 3

	h	b	a	t₁	t₂	r₀	R
měření č.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1.	11,40	51,20	13,00	1,90	1,60	0,90	2,50
2.	11,30	51,10	13,10	1,90	1,60	0,90	2,50
3.	11,50	51,20	12,80	1,90	1,60	0,90	2,50
4.	11,40	51,30	12,70	1,90	1,60	0,90	2,50
5.	11,30	51,10	12,40	1,90	1,60	0,90	2,50
6.	11,70	51,10	13,20	1,90	1,60	0,90	2,50
7.	11,30	51,00	13,40	1,90	1,60	0,90	2,50
8.	11,10	50,90	12,60	1,90	1,60	0,90	2,50
9.	11,10	51,00	13,10	1,90	1,60	0,90	2,50
10.	11,20	51,10	12,80	1,90	1,60	0,90	2,50
11.	11,60	51,20	12,90	1,90	1,60	0,90	2,50
12.	11,40	51,20	12,70	1,90	1,60	0,90	2,50
\bar{x}	11,36	51,12	12,89	1,90	1,60	0,90	2,50
σ	0,18	0,11	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00
μ	0,12	0,07	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 11. Naměřené hodnoty 5. série

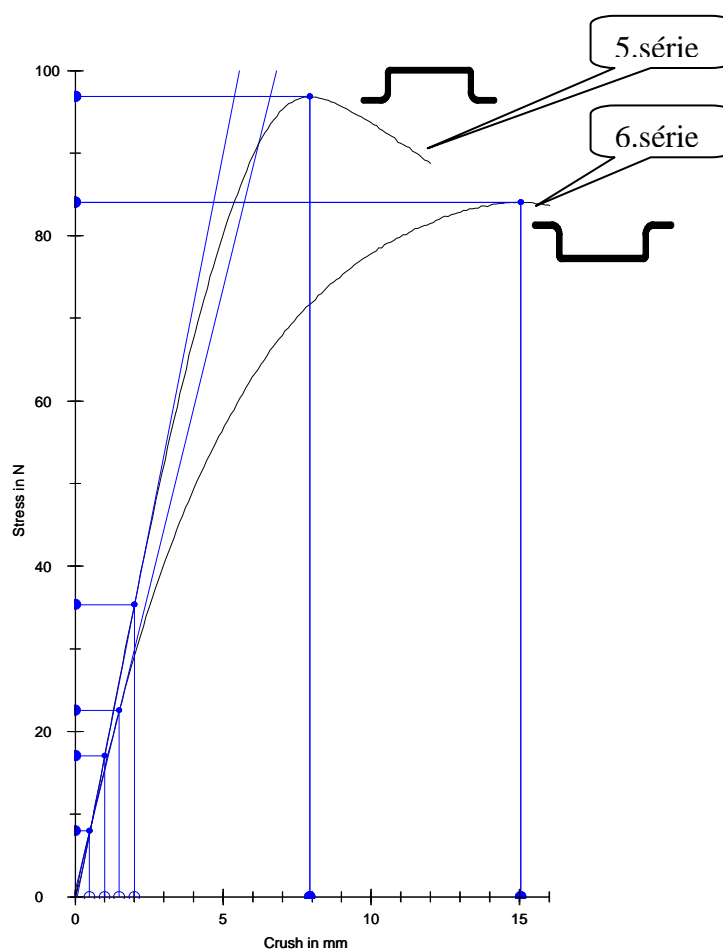
	E	R_m	F₁ při y₁	F₂ při y₂	ε při R_m
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
31.	1839,48	97,77	18,48	36,96	7,78
32.	1690,26	92,66	16,94	33,96	8,05
33.	1825,83	99,65	17,85	36,2	8,04
34.	1825,14	101,33	18,12	36,47	8,00
35.	1813,44	96,81	17,08	35,33	7,98
36.	1859,09	98,52	17,81	36,51	8,03
37.	1713,07	90,81	16,9	34,2	7,93
\bar{x}	1 795,19	96,79	17,60	35,66	7,97
σ	60,91	3,50	0,58	1,10	0,09
μ	60,85	3,50	0,58	1,10	0,09

Dle (Tab. 11) je hodnota $E = (1\,795,19 \pm 60,85)$ MPa.

Tab. 12. Naměřené hodnoty 6. série

	E	R _m	F ₁ při y ₁	F ₂ při y ₂	δ při R _m
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
38.	1424,03	80,47	7,46	21,85	15,11
39.	1436,92	80,88	7,67	22,2	14,80
40.	1432,75	83,17	7,64	22,14	14,80
41.	1535,31	86,50	8,3	23,83	14,47
42.	1440,07	84,06	7,94	22,53	15,26
\bar{x}	1 453,82	83,02	7,80	22,51	14,89
σ	41,10	2,20	0,29	0,69	0,27
μ	57,06	3,05	0,40	0,96	0,37

Dle (Tab. 12) je hodnota $E = (1\,453,82 \pm 57,06) \text{MPa}$.

Obr. 28. Graf $F - \varepsilon$ pro 5. a 6. sérii

Pro výpočet modulu pružnosti byla v 4.sérii nastavena hodnota průhybu profilu na 1mm a 2mm a u 6.série na 0,5mm a 1,5mm.

1.3.4 Měření 7. a 8. série

Profil byl vytvarován z tloušťky desky 1mm do $h=(10,35\pm 0,11)$ mm V (Tab. 13) jsou uvedeny rozměry profilu č. 4 dle (Obr. 41.). Grafický průběh zatěžování znázorňuje vztah mezi zatěžující silou a deformací, tj. $(F-y)$, viz.(Obr. 29.). Na (Obr. 29.) u 5. série znázorněn průběh zatěžování z měření č. 46 a u 6. série z měření č. 58.

Tab. 13. Rozměry profilu č. 4

	h	b	a	t₁	t₂	r₀	R
měření č.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1.	10,80	49,70	13,00	1,00	0,80	1,70	2,50
2.	10,50	49,60	12,60	1,00	0,80	1,70	2,50
3.	10,40	49,50	12,80	1,00	0,75	1,75	2,50
4.	10,30	49,30	13,10	1,00	0,75	1,75	2,50
5.	10,20	49,30	12,80	1,00	0,75	1,75	2,50
6.	10,20	49,40	13,40	1,00	0,70	1,80	2,50
7.	10,30	49,60	13,10	1,00	0,70	1,80	2,50
8.	10,20	49,60	12,90	1,00	0,75	1,75	2,50
9.	10,50	49,60	12,70	1,00	0,80	1,70	2,50
10.	10,30	49,30	13,00	1,00	0,75	1,75	2,50
11.	10,20	49,40	13,30	1,00	0,70	1,80	2,50
12.	10,30	49,60	13,20	1,00	0,70	1,80	2,50
\bar{x}	10,35	49,49	12,99	1,00	0,75	1,75	2,50
σ	0,17	0,14	0,23	0,00	0,04	0,04	0,00
μ	0,11	0,09	0,15	0,00	0,03	0,03	0,00

Tab. 14. Naměřené hodnoty 7. série

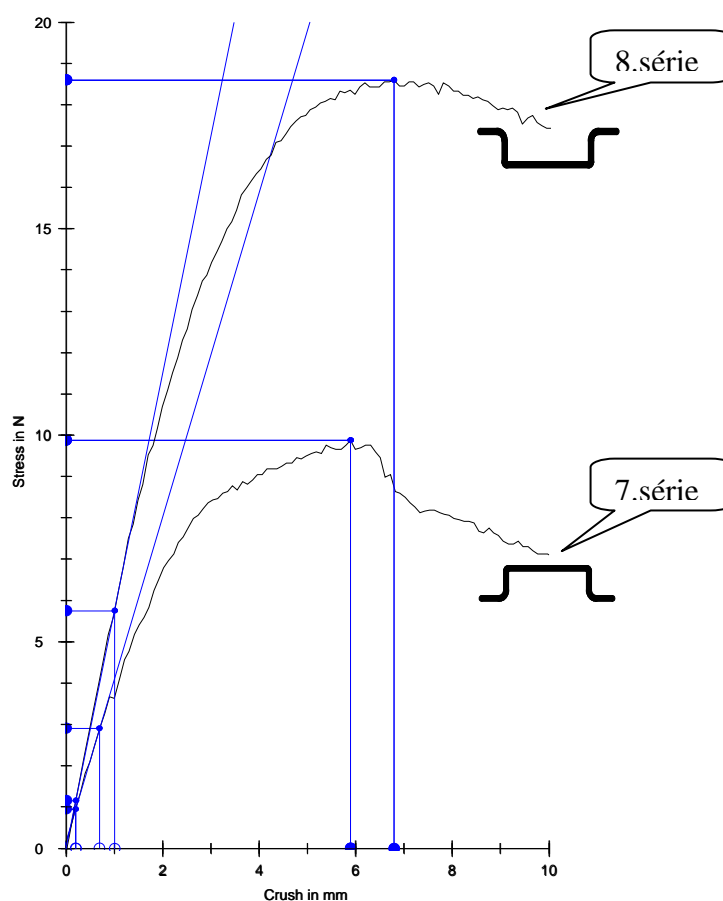
	E	R_m	F₁ při y₁	F₂ při y₂	δ při R_m
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
43.	618,32	6,84	1,14	6,14	6,84
44.	527,81	6,73	1,12	5,41	6,73
45.	599,93	7,95	1,3	6,16	7,95
46.	568,21	6,87	1,15	5,75	6,87
47.	496,27	6,37	1,1	5,14	6,37
48.	532,71	6,07	0,99	5,25	6,07
\bar{x}	555,91	6,81	1,13	5,64	6,81
σ	43,38	0,58	0,09	0,41	0,58
μ	49,87	0,67	0,10	0,47	0,67

Dle (Tab. 14) je hodnota $E = (555,91 \pm 49,87)$ MPa.

Tab. 15. Naměřené hodnoty 8. série

	E	R _m	F ₁ při y ₁	F ₂ při y ₂	δ při R _m
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
49.	410,72	14,18	0,95	3,04	5,78
50.	424,16	15,00	0,78	2,92	6,40
51.	406,19	13,39	1,1	3,16	5,44
52.	386,61	9,87	0,94	2,9	5,99
53.	341,63	8,77	0,83	2,56	3,81
54.	327,03	8,29	0,68	2,34	3,75
\bar{x}	382,72	11,58	0,88	2,82	5,20
σ	36,19	2,69	0,14	0,28	1,04
μ	41,60	3,09	0,16	0,32	1,20

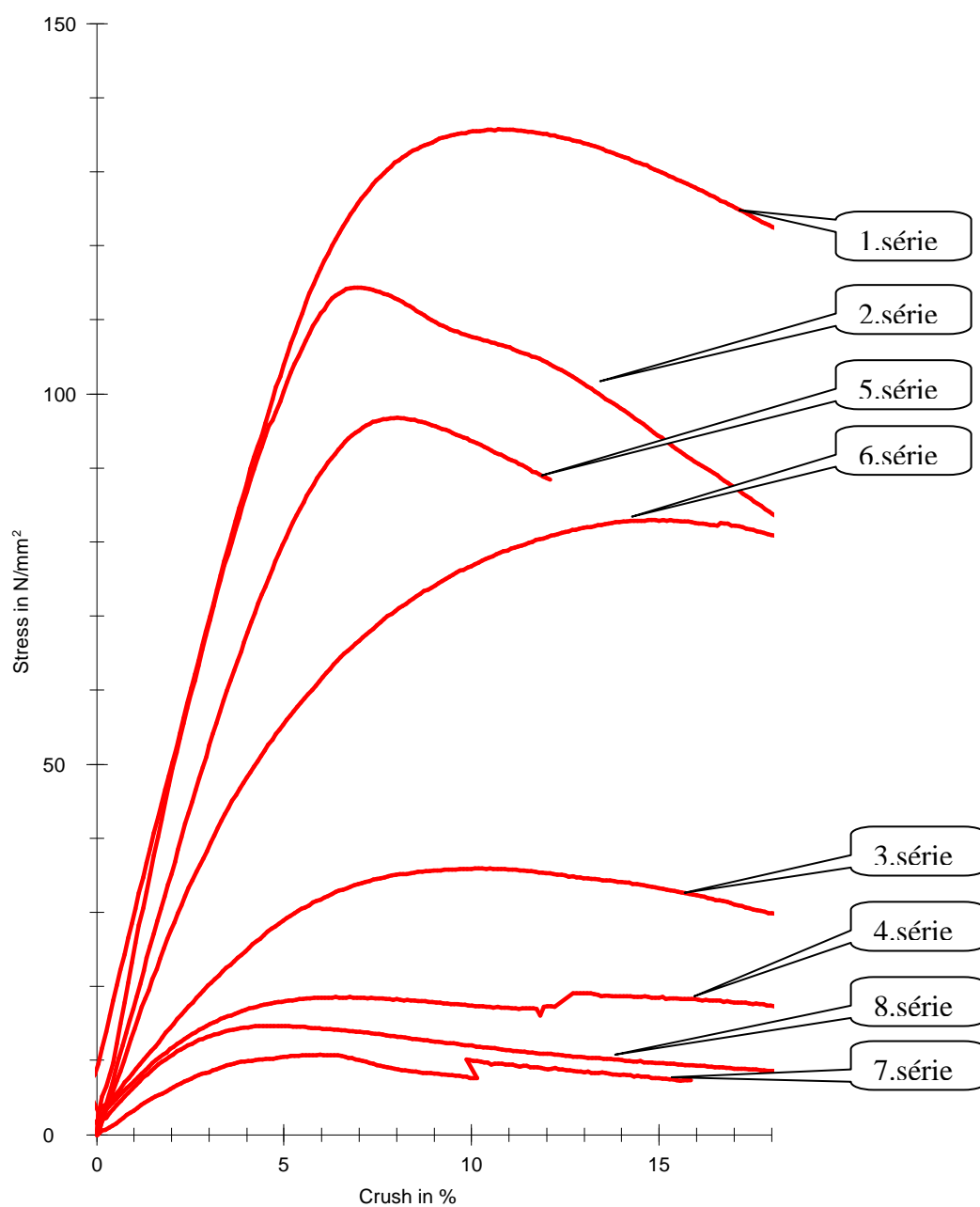
Dle (Tab. 15) je hodnota $E = (382,72 \pm 41,60)$ MPa.

Obr. 29. Graf $F - y$ pro 7. a 8. sérii

Pro výpočet modulu pružnosti byla v 7.sérii nastavena hodnota průhybu profilu na 0,2mm a 1mm a u 6.série na 0,2mm a 0,7mm.

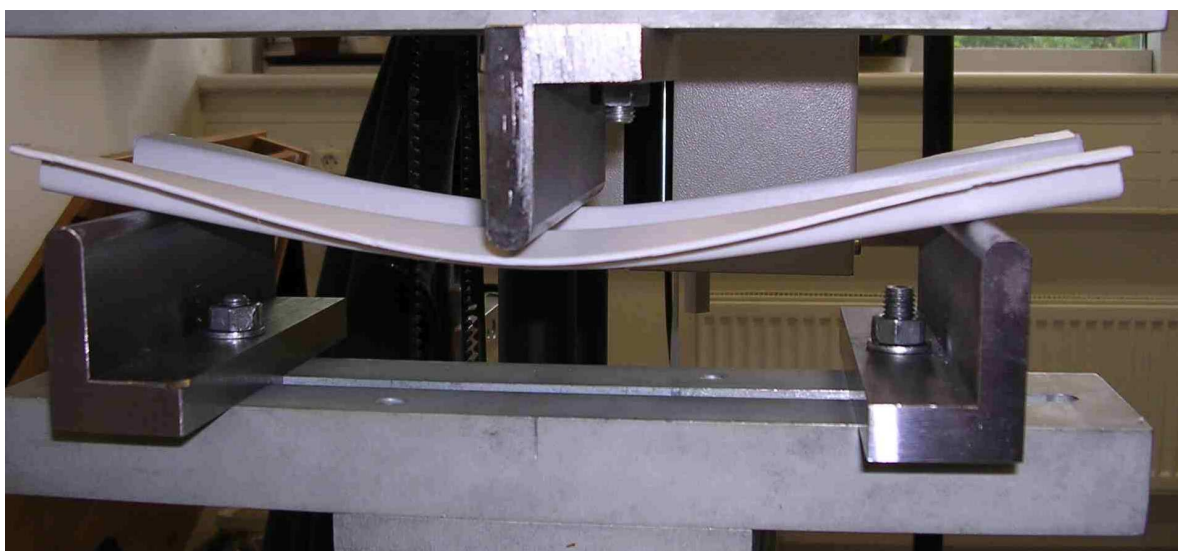
Na (Obr. 30.) jsou graficky porovnány hodnoty R_m pro všechny série.

- | | |
|--|--|
| 1. série $R_m = (135,85 \pm 11,99) \text{MPa}$ | 5. série $R_m = (96,79 \pm 3,50) \text{MPa}$ |
| 2. série $R_m = (118,46 \pm 15,75) \text{MPa}$ | 6. série $R_m = (83,02 \pm 3,05) \text{MPa}$ |
| 3. série $R_m = (36,11 \pm 4,25) \text{MPa}$ | 7. série $R_m = (6,81 \pm 0,67) \text{MPa}$ |
| 4. série $R_m = (14,77 \pm 5,30) \text{MPa}$ | 8. série $R_m = (11,58 \pm 3,09) \text{MPa}$ |



Obr. 30. Graf $R_m - \varepsilon$ pro všechny série

Grafické znázornění na (Obr. 30.) ukazuje, že u-profil, který byl otočen směrem nahoru (Obr. 25.), má vyšší hodnotu R_m . Avšak v případě 7. a 8. série je tomu naopak, protože se zkoušený profil deformoval do tvaru, viz.(Obr. 31.). Takto deformovaný u-profil otočený dolů dosáhl vyšší hodnot R_m a je znázorněn právě v této deformační poloze.



Obr. 31. Deformace u-profilu pro jeho R_m

V případě, kdy pro všechny série platily shodné podmínky, tj. hodnoty deformace profilů byly nastaveny na 0,05% a 0,25% poměrné deformace, byly naměřeny vyšší hodnoty modulu pružnosti u 2. a 4.série, kde byly profily otočeny směrem dolů, než otočených nahoru. U 5. a 7.série byla vyšší hodnota u profilů otočených nahoru, než otočených dolů, viz.(Tab. 16).

Tab. 16. Porovnání hodnot modulu pružnosti pro jednotlivé série

	profil č.1		profil č.2		profil č.3		profil č.4	
série	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
E [Mpa]	2 024,98	2 594,30	669,56	679,88	1 652,38	1 563,89	594,96	406,65

Později se upravovaly hodnoty deformací profilů pro výpočet E u každé série, aby se zvýšila přesnost výpočtu kvadratického momentu průřezu plochy. U 3. série, viz.(Tab. 8) je vyšší hodnota E u profilu otočeného nahoru, než v případě otočeného dolů nebo (Tab. 16).

Na (Obr. 32. ,Obr. 33. ,Obr. 34.) je zachycen průběh deformace tvaru u-profilu č.2 otočeného směrem nahoru, tj. $h=(16,52\pm 0,13)\text{mm}$ a $t=0,85\text{mm}$.



Obr. 32. Deformace u-profilu nahoru při $y=1\text{mm}$

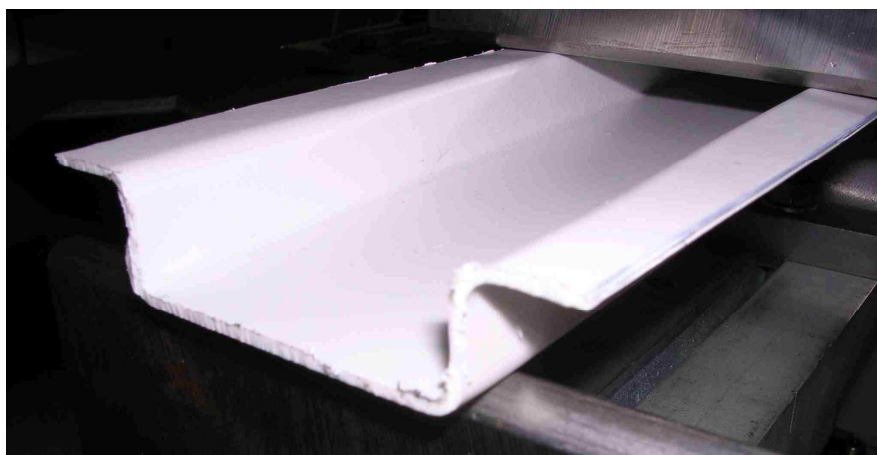


Obr. 33. Deformace u-profilu nahoru při $y=4\text{mm}$



Obr. 34. Deformace u-profilu nahoru při R_m

Na (Obr. 35. ,Obr. 36. ,Obr. 37.) je zachycen průběh deformace tvaru u-profilu č.2 otočeného směrem dolů, tj. $h=(16,52\pm 0,13)\text{mm}$ a $t=0,85\text{mm}$.



Obr. 35. Deformace u-profilu dolů při $y=1\text{mm}$



Obr. 36. Deformace u-profilu dolů při $y=4\text{mm}$



Obr. 37. Deformace u-profilu dolů při R_m

1.4 Srovnání výsledků a jejich diskuze

Teoretický výpočet J_z , viz.(1.5.1)

Tab. 17. Teoretický výpočet J_z

	J_z [mm ⁴]
profil č.1	8 096,53
profil č.2	3 994,77
profil č.3	3 084,60
profil č.4	1 516,69

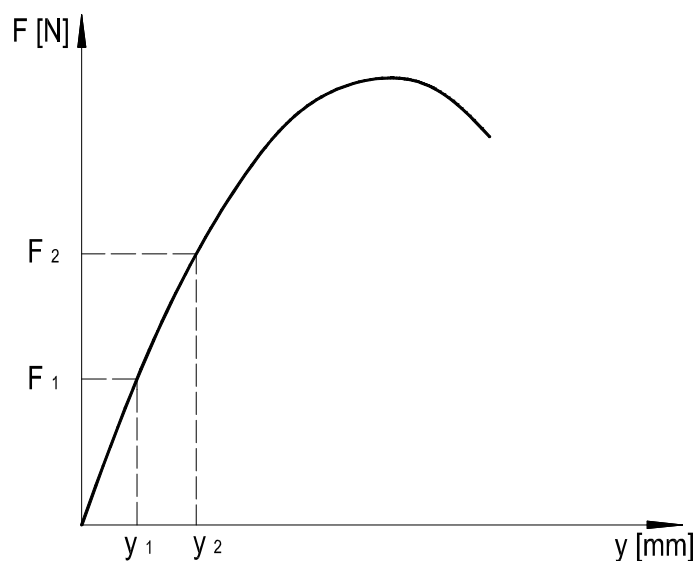
Experimentální měření J_z

Výpočet E v softwaru trhacího stroji Zwick představovaly hodnoty y_1 a y_2 . V (Tab. 18) jsou uvedeny nastavení průhybu profilů (y_1, y_2) pro jednotlivé série. (Obr. 38.) graficky ukazuje schéma pro výpočet modulu pružnosti obecně pro všechny série. V (Tab. 19, Tab. 20) následný výpočet J_z dle rovnice (34).

$$J_z = \frac{F.l^3}{48E.y} \quad (34)$$

Tab. 18. Nastavení průhybu profilů pro výpočet E u jednotlivých sérií

	profil č.1		profil č.2		profil č.3		profil č.4	
série	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
y_1 [mm]	1	1	0,5	0,1	1	0,5	0,2	0,2
y_2 [mm]	2,5	2,5	2	1	2	1,5	1	0,7



Obr. 38. Obecné výpočtové schéma pro E

Tab. 19. výpočet J_z u profilů otočených nahoru

	profil otočen nahoru			
	F_1 [N] při δ_1 [mm]	J_z [mm ⁴]	F_2 [N] při δ_2 [mm]	J_z [mm ⁴]
profil č.1	24,14	2 935,10	55,16	2 682,69
profil č.2	6,58	1 608,08	15,94	969,05
profil č.3	17,6	2 139,93	35,66	2 167,89
profil č.4	1,13	686,97	5,64	685,75

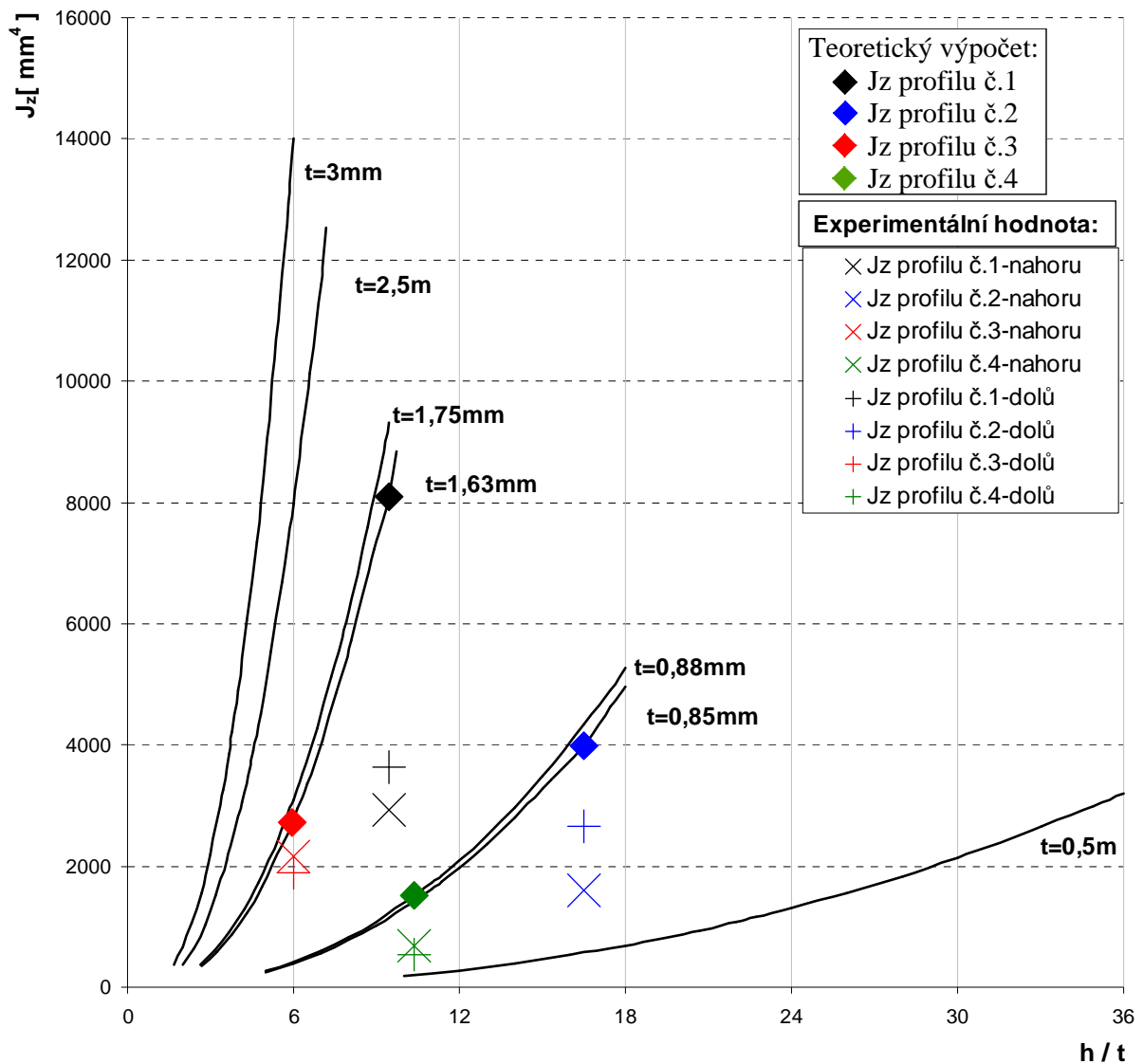
Tab. 20. výpočet J_z u profilů otočených dolů

	profil otočen dolů			
	F_1 [N] při δ_1 [mm]	J_z [mm ⁴]	F_2 [N] při δ_2 [mm]	J_z [mm ⁴]
profil č.1	29,87	3 631,80	63,83	3 104,35
profil č.2	2,19	2 662,75	7,52	914,33
profil č.3	7,8	1 896,75	22,51	1 824,61
profil č.4	0,88	534,98	2,82	489,82

Srovnáním teoretického výpočtu (Tab. 17) s experimentálním měřením (Tab. 19, Tab. 20), je zřejmé, že vypočítané hodnoty J_z , se neshodují. Vypočítané hodnoty, dle rovnice (34) v případě experimentálního měření jsou menší, než v teoretickém výpočtu.

V grafickém znázornění (Graf č.4) závislosti kvadratického momentu (J_z) na poměru výšky profilu k jeho tloušťce (h/t) jsou zakresleny tyto rozdílné hodnoty J_z .

(Graf č.4) je na osách vynášen kvadratický moment průřezu profilu (J_z) jako funkce poměru výšky profilu ke své tloušťce (h/t). Tloušťky 0,85mm, 0,88mm, 1,63mm a 1,75mm jsou vypočítány jako průměrné hodnoty tloušťek profilů (t_1 a t_2 , viz.(Tab. 21)), neboť vytvarované profily měly různou tloušťku ve svém průřezu.



Graf č.4. Grafická závislost kvadratického momentu průřezu plochy (J_z) na poměru výšky profilu k tloušťce stěny (h/t)

Dle (Graf č.4) jsou seřazeny hodnoty teoretického výpočtu a experimentálního zjištění J_z od nejmenší po největší rozdíl:

1. J_z u profilu č. 3 otočeného nahoru při síle F_2 (popř. deformaci y_2)
2. J_z u profilu č. 2 otočeného dolů při síle F_1 (popř. deformaci y_1)
3. J_z u profilu č. 4 otočeného nahoru při síle F_1 (popř. deformaci y_1)
4. J_z u profilu č. 1 otočeného dolů při síle F_1 (popř. deformaci y_1)

Dle (Graf č.4) je vidět, že vyšší hodnoty J_z byly naměřeny u profilů při síle F_1 , kromě profilu č.3 otočeného dolů. Avšak tento rozdíl J_z mezi silou F_1 (deformaci y_1) a F_2 (deformaci y_2) není velký.

Rozdílné hodnoty J_z jsou ovlivněny:

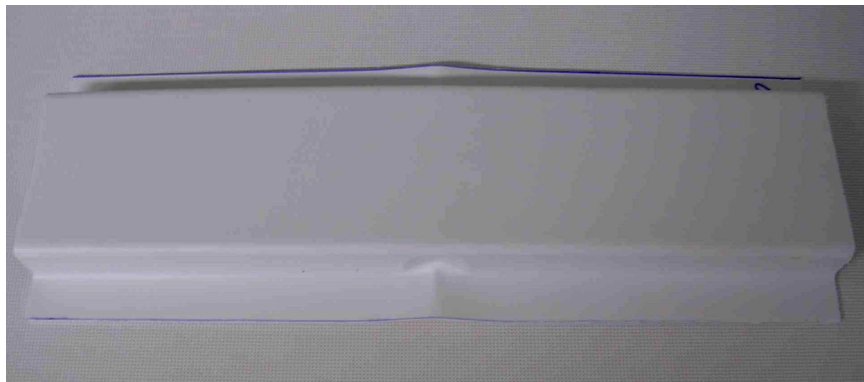
1. Nelze předpokládat lineárně- elastické chování materiálu. Neplatí přesně rovnice (34) a je nutné použít jiný výpočtový model, zahrnující v sobě např. plastické chování materiálu nebo změnu průřezových charakteristik profilu při deformaci atd..

2. Při nadměrném zatěžování dochází ke ztrátě stability (zborcení). Průřez profilu se deformoval do tvaru průřezu. viz.(Obr. 39.). Při tomto tvaru se změnila průřezové a rozměrové charakteristiky profilu.

3. Mezi další vlivy patří: v místě působení síly a v jiných částech profilu byly deformace viskoelastické - částečně vratné (Obr. 40.). U profilu č. 2 otočeného dolů byly největší trvalé deformace.



Obr. 39. Ztráta stability profilu

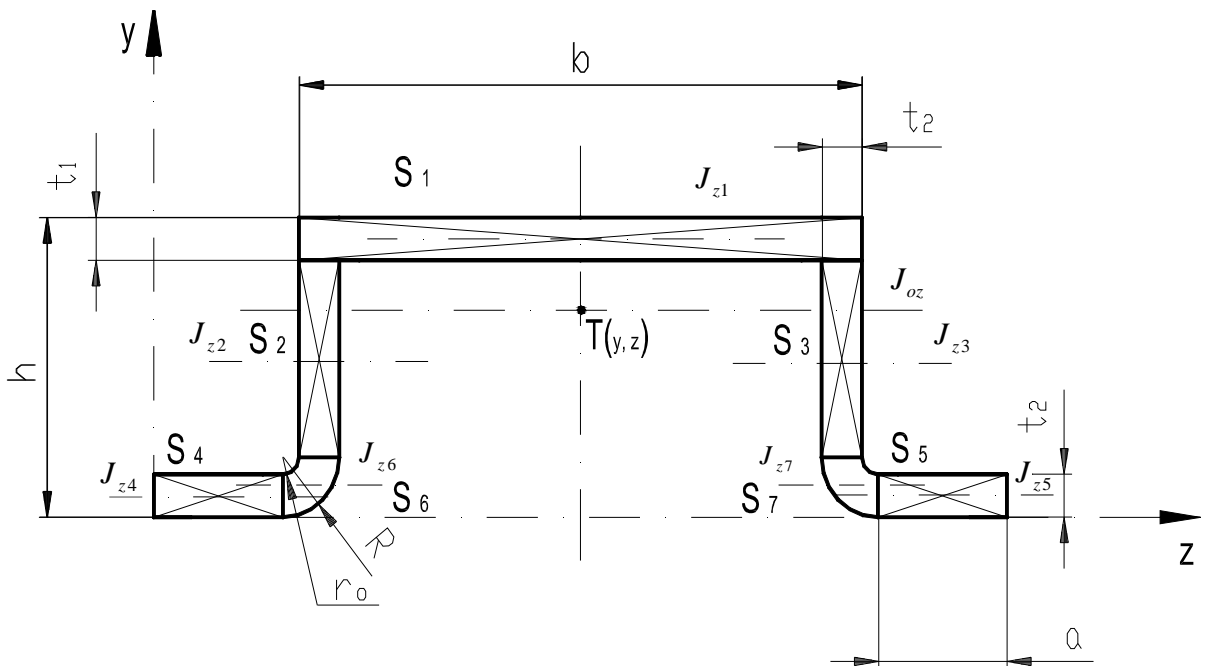


Obr. 40. Trvalá deformace u profilu č. 2 otočeného dolů po zatěžování

1.5 Výpočtové charakteristiky nosníků

1.5.1 Kvadratický moment profilu

- V programu Microsoft Office Excel jsem vytvořil program na výpočet kvadratického momentu průřezu plochy, tj. v našem případě J_z . Dle (Obr. 41.) se zadávají rozměry v mm do tabulky a program vypočte hodnotu J_z , popř. souřadnice těžiště.



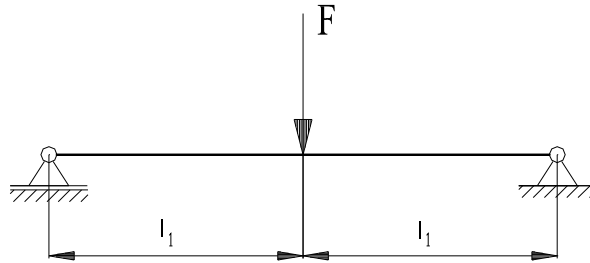
Obr. 41. Rozměrové značení profilů

Tab. 21. Rozměry profilů

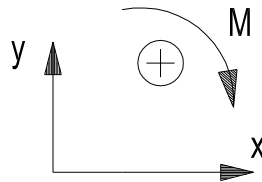
	Rozměr						
	h	b	a	t ₁	t ₂	r ₀	R
u-profil	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
č. 1	10,35	49,49	12,99	1,00	0,75	1,75	2,50
č. 2	11,36	51,12	12,89	1,90	1,60	0,90	2,50
č. 3	16,52	50,96	11,70	1,00	0,70	2,30	3,00
č. 4	17,45	52,50	11,67	1,85	1,41	2,09	3,50

1.5.2 Výpočet ohybové tuhosti profilu

Nejdříve určíme vzorec pro deformaci nosníku, abychom z něj následně určili ohybovou tuhost.



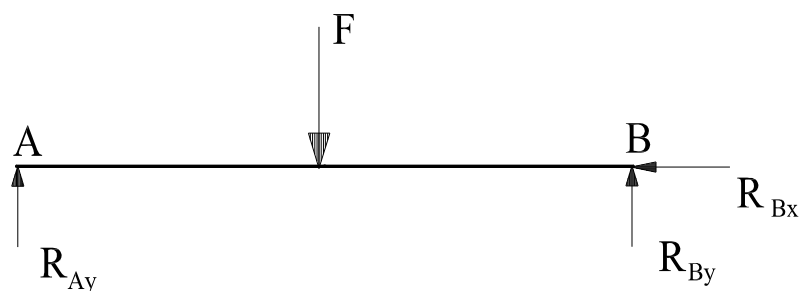
Obr. 42. Schéma zatěžování nosníku



Obr. 43. Orientace souřadného systému

Řešení:

1. Provedeme úplné uvolnění:



Obr. 44. Úplné uvolnění nosníku

2. Určení reakcí z podmínek statické rovnováhy:

$$\sum \mathbf{F}_{ix} = 0$$

$$\sum \mathbf{F}_{iy} = 0$$

$$R_{Bx} = 0$$

$$R_{Ay} - F + R_{By} = 0$$

(35)

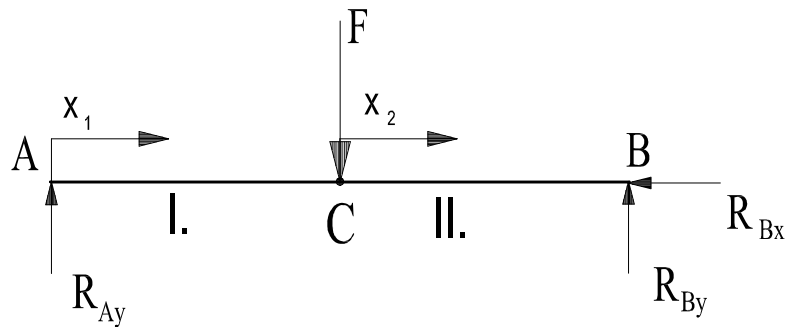
$$R_{By} = F - R_{Ay}$$

$$\sum M_{iB} = 0$$

$$R_{Ay} (l_1 + l_1) - F \cdot l_1 = 0$$

$$R_{Ay} = \frac{F \cdot l_1}{2 \cdot l_1} \Rightarrow R_{Ay} = \frac{1}{2} F \quad (36)$$

3. Metodou řezu určíme průběh ohyb. momentu v části I, tj. M_{oI} a v části II, tj. M_{oII} .



Obr. 45. Metoda řezu

$$I. \text{ část} \quad x_1 \in \langle 0, l_1 \rangle$$

$$M_I(x_1) = R_{Ay} \cdot x_1 = \frac{1}{2} F \cdot x_1 \quad (37)$$

$$\text{pro } x_1 = 0 \Rightarrow M_I(0) = 0 \text{ N.mm} \quad (38)$$

$$\text{pro } x_1 = l_1 \Rightarrow M_I(l_1) = \frac{1}{2} F \cdot l_1 \Rightarrow |M_o|_{\max}$$

(39)

$$II. \text{ část} \quad x_2 \in \langle 0, l_1 \rangle$$

$$M_{II}(x_2) = R_{Ay} \cdot (l_1 + x_2) - F \cdot x_2 = \frac{1}{2} F \cdot (l_1 + x_2) - F \cdot x_2 \quad (40)$$

$$\text{pro } x_2 = 0 \Rightarrow M_{II}(0) = \frac{1}{2} F \cdot l_1 \Rightarrow |M_o|_{\max} \quad (41)$$

$$\text{pro } x_2 = l_1 \Rightarrow M_{II}(l_1) = \frac{1}{2} F \cdot 2l_1 - F \cdot l_1 = 0 \text{ N.mm} \quad (42)$$

4. Výpočet deformační práce A

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2 \cdot E \cdot J} \left(\int_0^{l_1} M^2_{II}(x_1) dx_1 + \int_0^{l_1} M^2_{II}(x_2) dx_2 \right) = \\ &= \frac{1}{2 \cdot E \cdot J} \left(\int_0^{l_1} \left(\frac{1}{2} F \cdot x_1 \right)^2 dx_1 + \int_0^{l_1} \left(\frac{1}{2} F \cdot (l_1 + x_2) - F \cdot x_2 \right)^2 dx_2 \right) = \\ &= \frac{1}{2 \cdot E \cdot J} \left(\frac{1}{4} \int_0^{l_1} F^2 \cdot x_1^2 dx_1 + \frac{1}{4} \int_0^{l_1} (F \cdot l_1 - F \cdot x_2)^2 dx_2 \right) = \\ &= \frac{1}{8 \cdot E \cdot J} \left(\frac{1}{3} F^2 \cdot l_1^3 + F^2 \cdot l_1^3 - F^2 \cdot l_1^3 + \frac{1}{3} F^2 \cdot l_1^3 \right) = \frac{F^2 \cdot l_1^3}{12 \cdot E \cdot J} \quad (43) \end{aligned}$$

Deformace bodu C v ose y, tedy δ_{Cy} :

$$\delta_{Cy} = \frac{\partial A}{\partial F} = \frac{\partial}{\partial F} \cdot \frac{F^2 \cdot l_1^3}{12 \cdot E \cdot J} \quad (44)$$

$$\delta_{Cy} = \frac{F \cdot l_1^3}{6 \cdot E \cdot J} \quad (45)$$

popř. platí rovnice (46), kterou najdeme i v strojírenských tabulkách, kde l je celková délka vzdálenosti podpěr a y deformace nosníku v ose y.

$$y = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot J} \quad (46)$$

Výpočet ohybové tuhosti

Známe-li hodnotu průhybu nosníku, tj. y_1 nebo y_2 a sílu, tj. F_1 nebo F_2 působící v této deformaci, pak můžeme vypočítat hodnotu ohybové tuhosti nosníku, platí tedy:

$$E.J = \frac{F.l^3}{48.y} \quad (47)$$

např. u profilu č.1 pro 1.sérii pro sílu F_1 :

$$E.J = \frac{F.l^3}{48.y} = \frac{24,14.210^3}{48.1} = 4\,657,5 \text{ kNmm}^2 \quad (48)$$

Tab. 22. Nastavení průhybu profilů pro výpočet E u jednotlivých sérií

série	profil č.1		profil č.2		profil č.3		profil č.4	
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
y_1 [mm]	1	1	0,5	0,1	1	0,5	0,2	0,2
y_2 [mm]	2,5	2,5	2	1	2	1,5	1	0,7

Tab. 23. Ohybová tuhost pro profil otočen směrem nahoru

		profil otočen nahoru			
		F_1 [N] při y_1 [mm]	$E.J_z$ [kNmm ²]	F_2 [N] při y_2 [mm]	$E.J_z$ [kNmm ²]
1.série	profil č.1	24,14	4 657,5	55,16	4 257,0
3.série	profil č.2	6,58	2 539,1	15,94	1 537,7
5.série	profil č.3	17,6	3 395,7	35,66	3 440,1
7.série	profil č.4	1,13	1 090,1	5,64	1 088,2

Tab. 24. Ohybová tuhost pro profil otočen směrem dolů

		profil otočen dolů			
		F_1 [N] při y_1 [mm]	$E.J_z$ [kNmm ²]	F_2 [N] při y_2 [mm]	$E.J_z$ [kNmm ²]
2.série	profil č.1	29,87	5 763,0	63,83	4 926,1
4.série	profil č.2	2,19	4 225,3	7,52	1 450,9
6.série	profil č.3	7,8	3 009,8	22,51	2 895,4
8.série	profil č.4	0,88	848,9	2,82	777,3

Dle (Tab. 23, Tab. 24) jsou v (Tab. 25) seřazeny hodnoty ohybové tuhosti od nejvyšší po nejmenší. Sestupné hodnoty ohyb. tuhosti jsou seřazeny u síly F_1 při y_1 .

Tab. 25. Seřazení ohybové tuhosti profilů

profil č.	č. série	směr otočení profilu
1	2	dolů
1	1	nahoru
2	4	dolů
3	5	nahoru
3	6	dolů
2	3	nahoru
4	7	nahoru
4	8	dolů

Dle (Tab. 25) je vidět, že největší ohybovou tuhost má profil č. 1, tj. profil vyroben z tloušťky materiálu 2mm do $h=(17,45\pm 0,23)$ mm. Dále bylo zjištěno, že profily, které byly vyrobeny do vyšší výšky, mají vyšší ohybovou tuhost, když jsou otočeny směrem dolů. U nižších profilů naopak při otočení směrem nahoru.

2 PŮLTRUBKOVÉ PLASTOVÉ PROFILY

Byly vybrány plastové trubky PE-HD firmy LUNA PLAST a.s., viz (Obr. 46.) o rozměrech 90x8,2mm, 63x5,8mm a 40x3,8mm. Rozměr 63x5,8mm byl i od výrobce Pipelife Czech, s.r.o. V (Tab. 26) jsou uvedeny změřené hodnoty průměru a tloušťky trubek včetně tolerancí rozměrů. Tyto trubky slouží pro rozvod pitné tlakové vody.



Obr. 46. PE-HD trubka

Tab. 26. Rozměry trubek

	$\phi 90 \times 8,2 \text{ mm}$	$\phi 63 \times 5,8 \text{ mm}$	$\phi 63 \times 5,8 \text{ mm}$ PipeLife	$\phi 40 \times 3,7 \text{ mm}$
měření č.				
1	90,1	62,6	62,6	40,0
2	89,6	62,8	62,9	39,9
3	90,0	62,8	62,7	40,1
4	89,6	63,0	62,8	40,0
5	89,7	62,9	62,7	39,9
6	90,1	62,7	62,8	40,0
7	89,8	62,8	62,8	40,0
8	89,7	63,0	62,8	39,9
\bar{x}	89,83	62,83	62,76	39,98
σ	0,20	0,13	0,09	0,07
μ	0,23	0,15	0,10	0,08

Dle (Tab. 26) platí tyto toleranční rozměry trubek:

- pro $\phi D = 90 \text{ mm} \Rightarrow \phi D = (89,83 \pm 0,23) \text{ mm}$

pro $\phi D = 63 \text{ mm} \Rightarrow \phi D = (62,83 \pm 0,15) \text{ mm}$

pro $\phi D = 63 \text{ mm} \Rightarrow \phi D = (62,76 \pm 0,10) \text{ mm}$ PipeLife

pro $\phi D = 40 \text{ mm} \Rightarrow \phi D = (39,98 \pm 0,08) \text{ mm}$

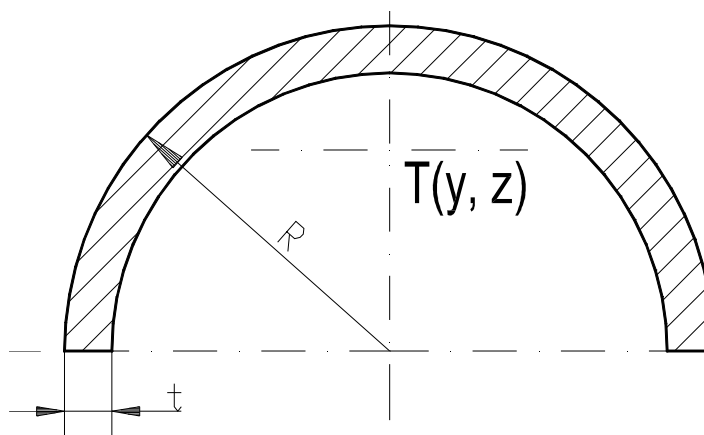
2.1 Příprava zkušebních těles

Trubky byly rozřezány na 25cm dlouhé kusy a následně symetricky podélně na pásové pile. V (Tab. 27) jsou uvedeny rozměry půl-trubek po rozřezání. Vznikly tak půl-trubkové profily, viz.(Obr. 47.) vhodné pro ohybovou zkoušku.

Tab. 27. Naměřené hodnoty půl-trubkových profilů

měření č.	I.		II.		III.		IV.	
	R	t	R	t	R	t	R	t
1	44,0	8,5	19,9	3,8	30,0	6,1	28,7	6,15
2	44,5	8,5	18,4	3,8	30,0	6,25	29,5	6,10
3	43,0	8,5	20,1	3,8	30,9	6,2	28,9	6,10
4	44,5	8,7	18,5	3,8	30,1	6,1	29,3	6,05
5	42,7	8,5	18,3	3,8	30,2	6,2	28,3	6,10
6	43,2	8,8	18,1	3,8	30,4	6,2	28,8	6,00
7	42,5	8,6	19,7	3,8	30,2	6,15	29,2	6,10
8	44,3	8,6	18,5	3,8	30,1	6,15	29,5	6,10
\bar{x}	43,59	8,58	18,94	3,80	30,24	6,17	29,03	6,09
σ	0,78	0,09	0,76	0,00	0,28	0,05	0,40	0,04
μ	0,90	0,10	0,88	0,00	0,32	0,06	0,46	0,05

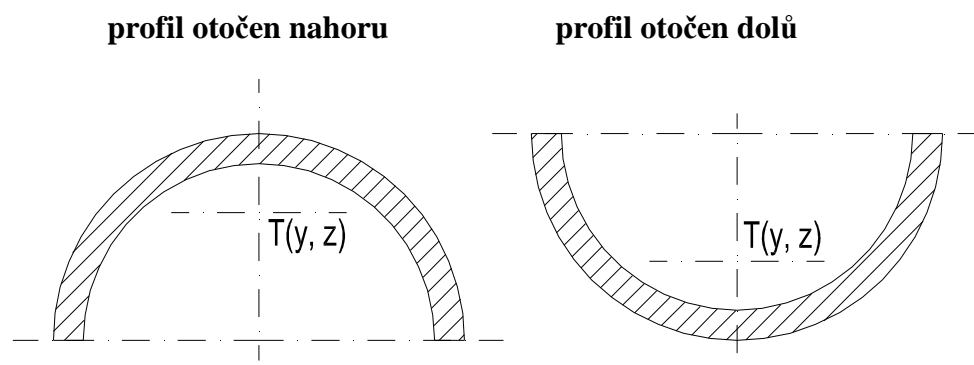
Všechny profily byly vytvořeny z trubek: I. – 90x8,2mm, II. – 63x5,8mm, III. – 63x5,8mm PipeLife, IV – 40x3,7mm,



Obr. 47. Půl-trubka a její značení

2.2 Ohybová zkouška na stroji Zwick

Vzdálenost podpěr nosníku byla 210mm a maximální průhyb byl nastaven na hodnotu 26mm. Zkoušeným materiálem byl plast PE-HD. Tyto půl-trubkové profily jsem oboustranně zatěžoval rychlostí 10mm/min. Hodnota modulu pružnosti byla vypočítána softwarem trhacího stroje Zwick. Vstupní hodnoty pro tento výpočet představovaly nastavení deformací nosníků na hodnotu 1 a 5mm. Grafický průběh zatěžování pro jednotlivé profily a série jsem vybral z měření, které se nejvíce blížilo průměrné hodnotě modulu pružnosti pro daný profil a sérii.

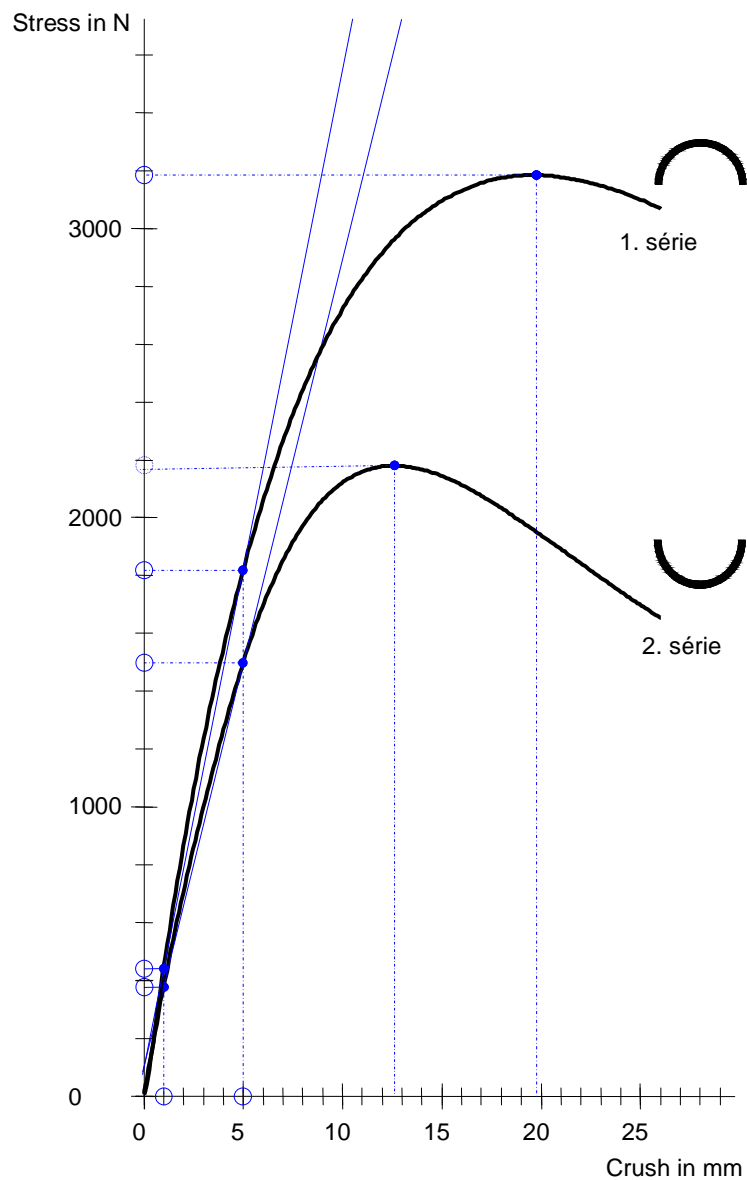


Obr. 48. Schéma orientace otočení profilu

U všech profilů otočených nahoru, tj. série (1,3,5,7), byly naměřeny vyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu, než u profilu otočeného směrem dolů, tj. série (2,4,6,8). Schéma orientace otočení profilu je na (Obr. 48.)

2.2.1 Měření půl-trubkového profilu o poloměru 45mm

Jde o největší měřený půl-trubkový profil o $R=(43,59 \pm 0,90)\text{mm}$. Na (Obr. 49.) je u 1. série znázorněn průběh zatěžování z měření č.5 a u 2. série z měření č.3.



Obr. 49. Zátěžové křivky pro $R=45\text{mm}$

Tab. 28. Naměřené hodnoty pro 1. sérii

měření č.	E [Mpa]	R _m [N]	F ₁ při y ₁ [N]	F ₂ při y ₂ [N]	y při R _m max [mm]
1	29 736,95	3 182,73	417,01	2 211,02	19,77
2	34 381,59	3 184,65	440,57	1 819,15	19,75
3	32 221,00	3 062,03	438,47	1 743,53	19,29
4	35 132,63	3 275,91	492,00	1 901,61	19,68
5	33 473,16	3 162,35	426,57	1 926,84	19,34
\bar{x}	32 989,07	3 173,53	442,92	1 920,43	19,57
σ	1 893,91	68,19	25,97	158,99	0,21
μ	2 629,22	94,66	36,05	220,72	0,29

Dle (Tab. 28) je hodnota $E = (32\,989,07 \pm 2629,22)$ MPa , $R_m = (3\,173,53 \pm 94,66)$ MPa

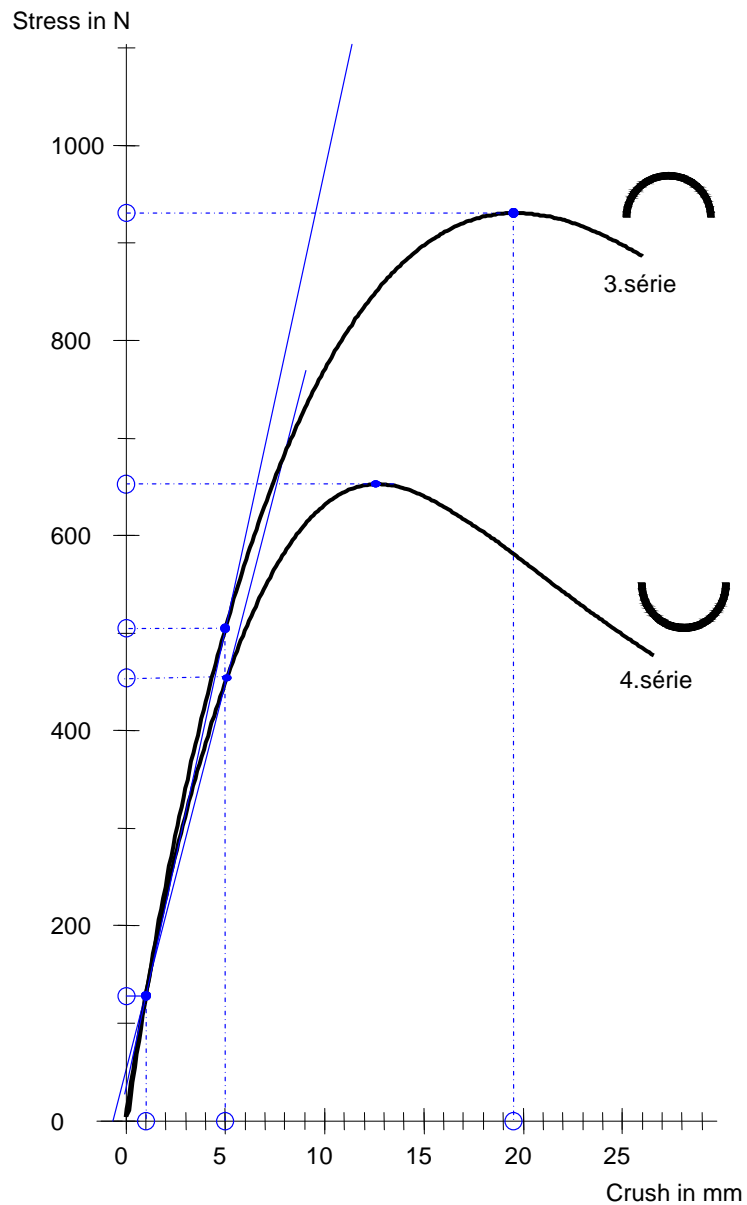
Tab. 29. Naměřené hodnoty pro 2. sérii

měření č.	E [Mpa]	R _m [N]	F ₁ při y ₁ [N]	F ₂ při y ₂ [N]	y při R _m max [mm]
6	27 370,97	2 179,49	376,50	1 497,98	12,59
7	27 871,06	2 261,49	393,24	1 529,97	13,01
8	28 152,57	2 273,11	393,77	1 546,33	12,86
9	31 080,21	2 451,24	462,34	1 713,35	12,45
10	27 783,24	2 315,18	401,23	1 546,35	13,43
\bar{x}	28 451,61	2 296,10	405,42	1 566,80	12,87
σ	1 337,95	89,17	29,59	75,37	0,34
μ	1 857,41	123,79	41,08	104,63	0,47

Dle (Tab. 29) je hodnota $E = (28\,451,61 \pm 1857,41)$ MPa, $R_m = (2\,296,10 \pm 123,79)$ MPa

2.2.2 Měření půl-trubkového profilu o poloměru 31,5mm

Jde o středně velký měřený půl-trubkový profil o $R = (29,03 \pm 0,46)$ mm. Na (Obr. 50.) je u 3.série znázorněn průběh zatěžování z měření č.14 a u 4.série z měření č.20.



Obr. 50. Ohybové namáhání pro $R=31,5$ mm

Tab. 30. Naměřené hodnoty pro 3. sérii

měření č.	E [Mpa]	Rm [N]	F ₁ při y ₁ [N]	F ₂ při y ₂ [N]	y při Rm _{max} [mm]
11	9 518,83	961,14	139,57	524,55	19,64
12	9 941,87	988,84	146,71	548,83	18,92
13	9 013,50	908,90	138,34	505,30	19,02
14	9 402,77	918,32	127,67	508,32	18,84
15	9 220,10	930,90	127,57	504,89	19,51
\bar{x}	9 419,41	941,62	135,97	518,38	19,19
σ	312,29	29,46	7,39	16,85	0,33
μ	433,54	40,90	10,26	23,39	0,46

Dle (Tab. 30) je hodnota $E = (9\,419,41 \pm 433,54)$ MPa, $R_m = (941,62 \pm 40,90)$ MPa

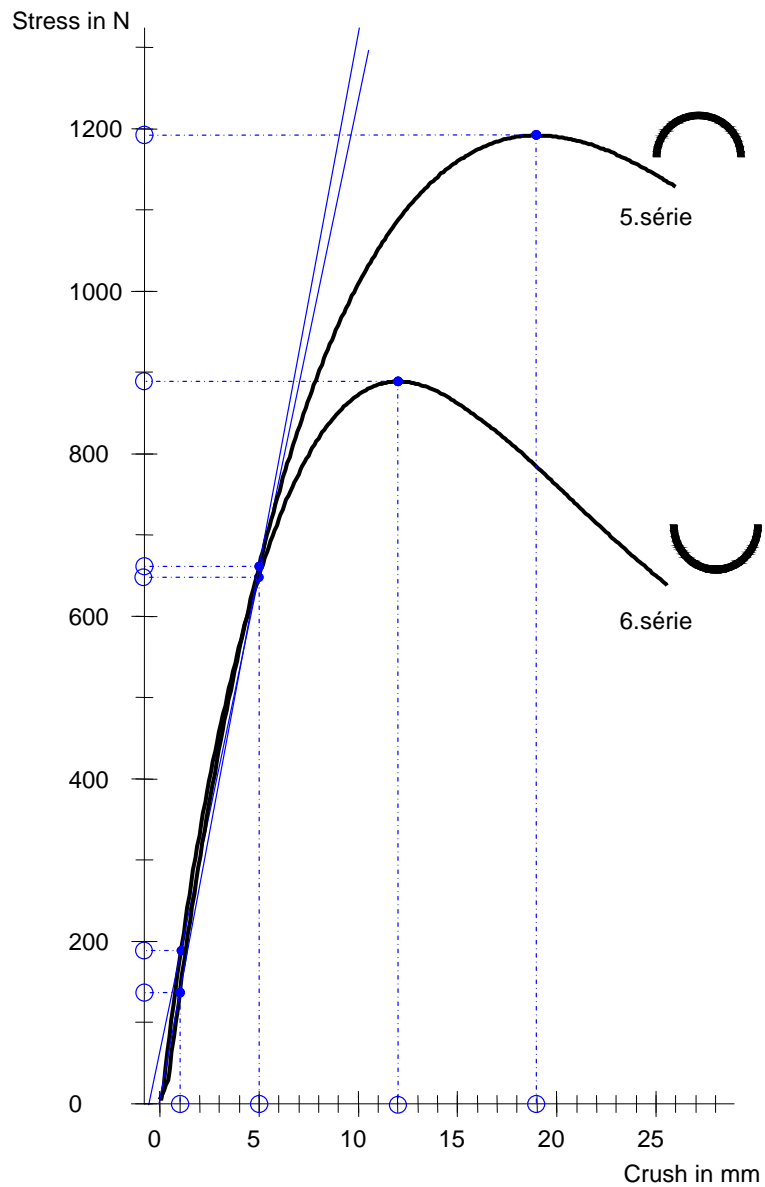
Tab. 31. Naměřené hodnoty pro 4. sérii

měření č.	E [Mpa]	Rm [N]	F ₁ při y ₁ [N]	F ₂ při y ₂ [N]	y při Rm _{max} [mm]
16	7 605,66	626,93	128,21	439,12	12,20
17	8 429,64	679,11	138,99	481,38	12,19
18	7 758,40	637,84	131,32	448,66	12,24
19	8 569,83	700,78	142,84	490,90	12,28
20	7 936,41	650,48	129,00	452,63	12,32
\bar{x}	8 059,99	659,03	134,07	462,54	12,25
σ	376,62	27,20	5,81	19,99	0,05
μ	522,84	37,76	8,07	27,75	0,07

Dle (Tab. 31) je hodnota $E = (8\,059,99 \pm 522,84)$ MPa, $R_m = (659,03 \pm 37,76)$ MPa

2.2.3 Měření půl-trubkového profilu o poloměru 31,5mm - PipeLife

Jde o středně velký měřený půl-trubkový profil o $R = (30,24 \pm 0,32)\text{mm}$ - PipeLife. Na (Obr. 51.) je u 5.série znázorněn průběh zatěžování z měření č.24 a u 6.série z měření č.30.



Obr. 51. Ohybové namáhání pro $R=31,5\text{mm}$ - PipeLife

Tab. 32. Naměřené hodnoty pro 5. sérii

měření č.	E [Mpa]	Rm [N]	F ₁ při y ₁ [N]	F ₂ při y ₂ [N]	y při Rm _{max} [mm]
21	11 692,11	1 138,96	179,66	659,18	18,92
22	12 837,13	1 192,09	136,37	661,95	18,97
23	12 652,12	1 214,48	192,64	705,75	18,87
24	12 447,74	1 181,57	171,89	680,77	18,61
25	12 645,32	1 224,38	187,64	704,62	18,63
\bar{x}	12 454,88	1 190,30	173,64	682,45	18,80
σ	400,79	29,87	19,93	19,99	0,15
μ	556,40	41,47	27,67	27,75	0,21

Dle (Tab. 32) je hodnota $E = (12\,454,88 \pm 556,40)$ MPa, $R_m = (1\,190,30 \pm 41,47)$ MPa

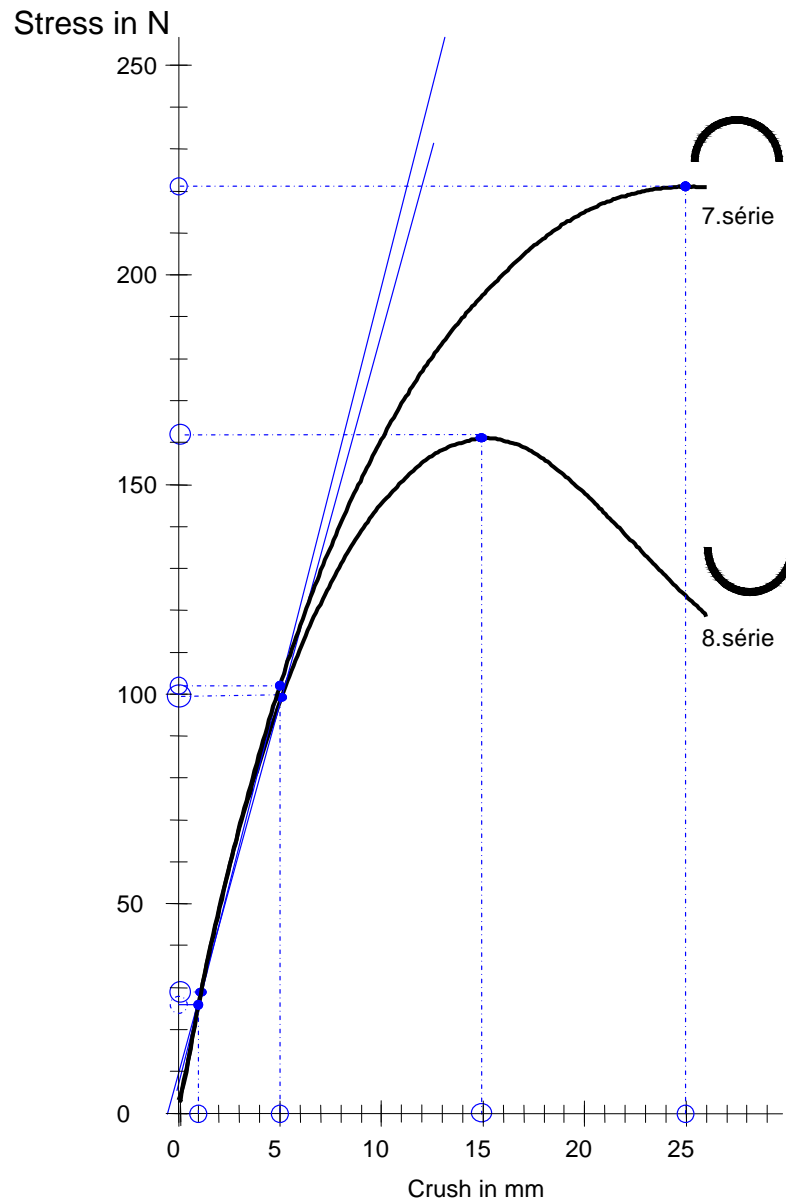
Tab. 33. Naměřené hodnoty pro 6. sérii

měření č.	E [Mpa]	Rm [N]	F ₁ při y ₁ [N]	F ₂ při y ₂ [N]	y při Rm _{max} [mm]
26	10 826,11	857,44	170,78	614,72	12,32
27	11 299,72	893,09	189,82	651,42	12,14
28	12 161,40	937,83	194,47	686,19	11,91
29	10 668,32	856,72	175,05	611,67	12,39
30	11 321,54	887,62	179,45	648,37	12,16
\bar{x}	11 255,42	886,54	181,91	642,47	12,18
σ	520,79	29,70	8,91	27,37	0,17
μ	722,99	41,23	12,37	38,00	0,24

Dle (Tab. 33) je hodnota $E = (11\,255,42 \pm 722,99)$ MPa, $R_m = (886,54 \pm 41,23)$ MPa

2.2.4 Měření půl-trubkového profilu o poloměru 20mm

Jde o nejmenší měřený půl-trubkový profil o $R = (18,94 \pm 0,88)\text{mm}$. Na (Obr. 52.) je u 7.série znázorněn průběh zatěžování z měření č.35 a u 8.série z měření č.40.



Obr. 52. Ohybové namáhání pro $R=20\text{mm}$

Tab. 34. Naměřené hodnoty pro 7. sérii

měření č.	E [Mpa]	Rm [N]	F ₁ při y ₁ [N]	F ₂ při y ₂ [N]	y při Rm _{max} [mm]
31	1 883,09	221,15	25,85	101,98	24,98
32	2 340,90	258,89	33,20	127,16	23,01
33	2 302,40	255,50	34,82	127,19	22,79
34	1 744,53	215,73	27,06	98,48	25,76
35	2 284,35	247,18	33,74	126,84	22,94
\bar{x}	2 111,05	239,69	30,93	116,33	23,90
σ	247,30	17,85	3,71	13,19	1,23
μ	343,31	24,78	5,15	18,31	1,71

Dle (Tab. 34) je hodnota $E = (2\,111,05 \pm 343,31)$ MPa, $R_m = (239,69 \pm 24,78)$ MPa

Tab. 35. Naměřené hodnoty pro 8. sérii

měření č.	E [Mpa]	Rm [N]	F ₁ při y ₁ [N]	F ₂ při y ₂ [N]	y při Rm _{max} [mm]
36	1 642,14	161,94	15,76	29,13	96,82
37	1 563,18	157,66	16,06	28,09	92,79
38	2 177,37	200,41	14,28	37,10	125,12
39	1 920,65	178,64	14,87	32,24	110,22
40	1 746,34	162,54	16,06	27,47	98,25
\bar{x}	1 809,94	172,24	15,41	30,81	104,64
σ	219,25	15,79	0,71	3,55	11,77
μ	304,37	21,92	0,99	4,93	16,34

Dle (Tab. 35) je hodnota $E = (1809,94 \pm 304,37)$ MPa, $R_m = (172,24 \pm 21,92)$ MPa

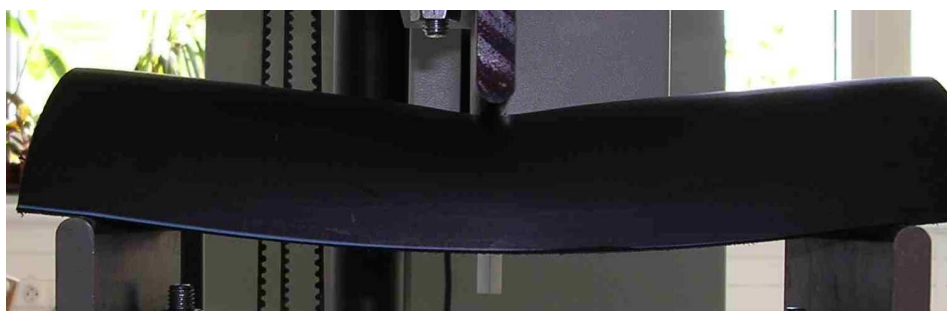
Na (Obr. 53. ,Obr. 54. ,Obr. 55.) je zachycen průběh deformace tvaru půl-trubkových profilů o $R=(43,59\pm 0,90)$ mm otočeného směrem nahoru.



Obr. 53. Deformace profilu nahoru při $y=1$ mm



Obr. 54. Deformace profilu nahoru při $y=5$ mm



Obr. 55. Deformace profilu nahoru při R_m

2.3 Srovnání výsledků a jejich diskuze

Teoretický výpočet J_z

Tab. 36. Teoretický výpočet J_z

	J_z [mm ⁴]
TR 40x3,8mm	6 787,04
TR 63x5,8mm	42 361,69
TR 90x8,2mm	173 281,61

Experimentální měření J_z

Pro zjištění J_z použijeme rovnici (46) a upravíme ji na tvar rovnice (49)

$$J_z = \frac{F l^3}{48 E \cdot y} \quad (49)$$

např. pro profil TR 40x3,8mm otočený směrem nahoru:

$$J_z = \frac{F_1 \cdot l^3}{48 E \cdot y_1} = \frac{30,93 \cdot 210^3}{48 \cdot 800 \cdot 1} = 7459,45 \text{ mm}^4 \quad (50)$$

Tab. 37. výpočet J_z u půl-trubkových profilů otočených nahoru

	F_1 [N] při y_1 [mm]	J_z [mm ⁴]	F_2 [N] při y_2 [mm]	J_z [mm ⁴]
TR 40x3,8mm	30,93	7 459,45	116,33	5 611,10
TR 63x5,8mm	135,97	32 792,14	518,38	25 003,74
TR 90x8,2mm	442,92	106 819,85	1 920,43	92 630,74

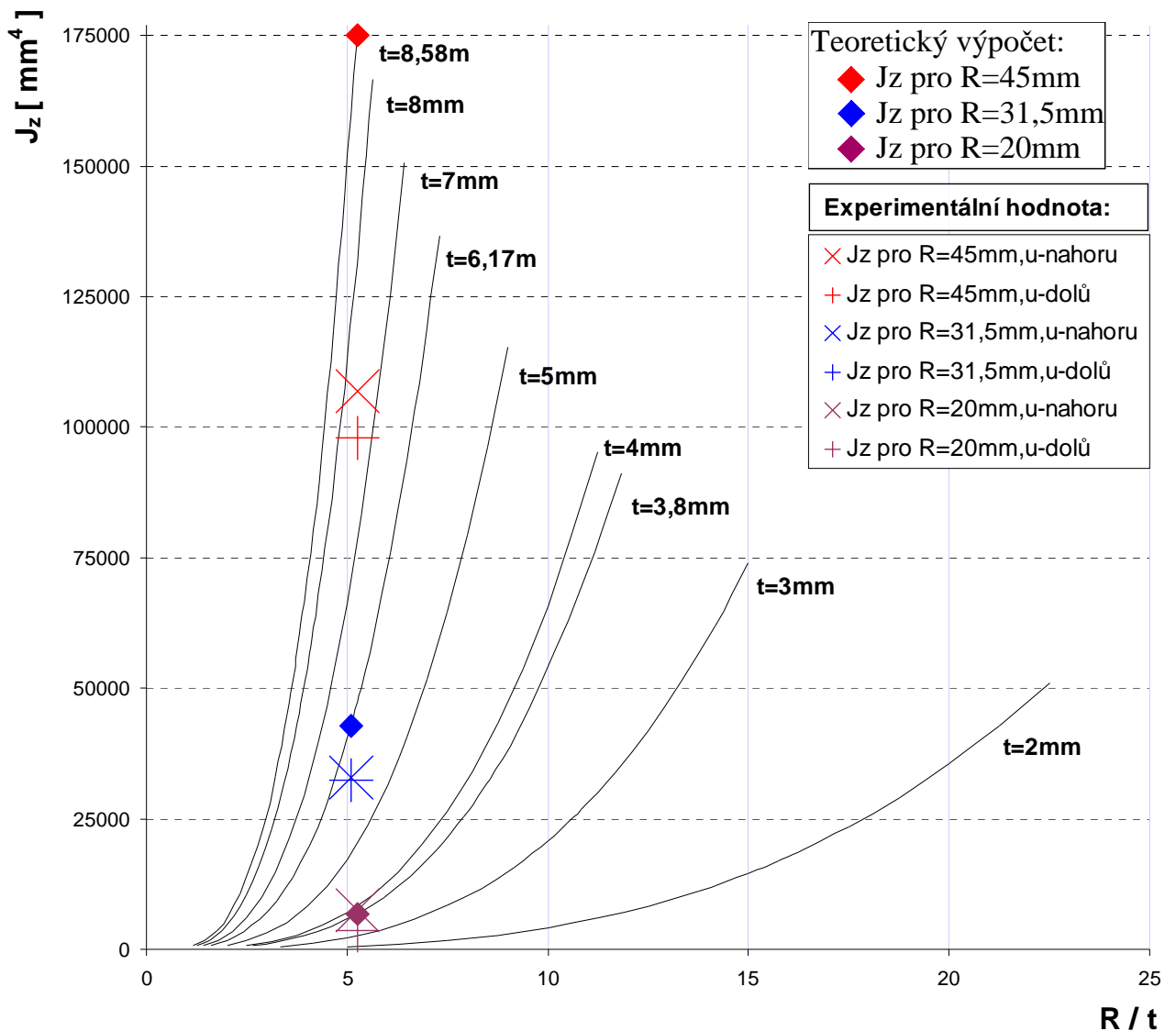
Tab. 38. výpočet J_z u půl-trubkových profilů otočených dolů

	F_1 [N] při y_1 [mm]	J_z [mm ⁴]	F_2 [N] při y_2 [mm]	J_z [mm ⁴]
TR 40x3,8mm	15,41	3 716,46	30,81	1 486,10
TR 63x5,8mm	134,07	32 333,91	462,54	22 310,33
TR 90x8,2mm	405,92	97 896,49	1 566,80	75 573,62

y_1 – deformace nosníku při průhybu 1mm, y_2 - deformace nosníku při průhybu 5mm

Srovnáním teoretického výpočtu (Tab. 36) s experimentálním měřením (Tab. 37, Tab. 38), je zřejmé, že vypočítané hodnoty J_z , se neshodují. Vypočítané hodnoty, dle rovnice (49) v případě experimentálního měření jsou menší, než v teoretickém výpočtu.

V grafickém znázornění závislosti kvadratického momentu (J_z) na poměru poloměru k tloušťce (R/t) jsou zakresleny tyto rozdílné hodnoty J_z , viz (Graf č.5). V tomto grafu jsou vyznačeny teoretické hodnoty J_z , pro tloušťky $t=3,8\text{mm}$, $t=6,17\text{mm}$ a $t=8,58\text{mm}$, které představují tři půl-trubkové profily.



Graf č.5. Grafická závislost kvadratického momentu průřezu plochy (J_z) na poměru poloměru (R) profilu k tloušťce stěny (R/t)

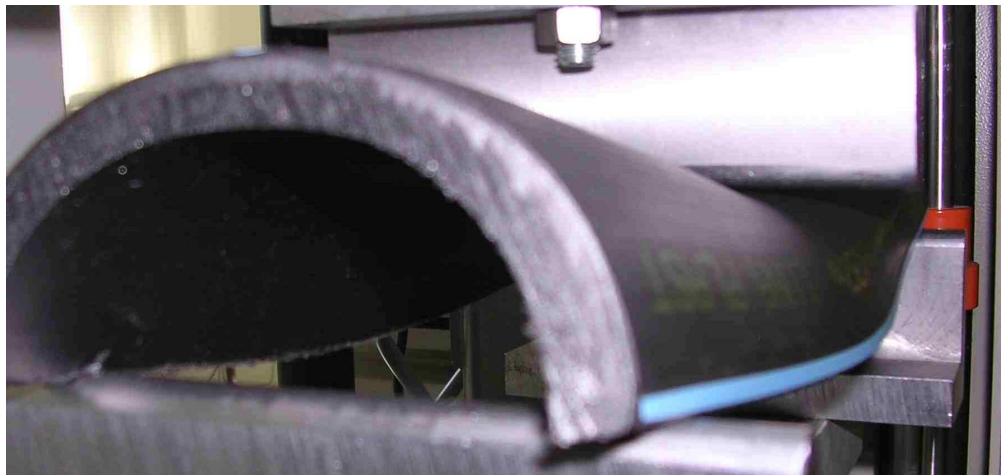
Z (Tab. 37, Tab. 38) je vidět, že pokud jsou tyto profily otočené směrem nahoru, tak mají vyšší hodnoty modulu pružnosti a mez pevnosti v ohybu. Také rozdíl mezi teoretickou a experimentální hodnotou J_z je nižší, než u otočení směrem dolů.

Rozdílné hodnoty J_z jsou ovlivněny:

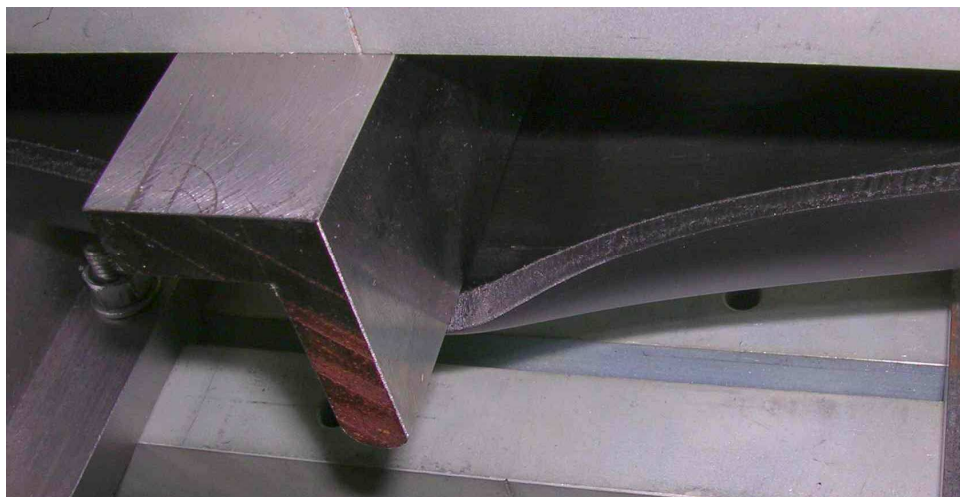
1. Nelze předpokládat lineárně- elastické chování materiálu.

2. Při nadměrném zatěžování dochází ke ztrátě stability (zborcení). Průřez profilu se nerovnoměrně deformoval po své délce (Obr. 56.) a tyto deformace způsobily ztrátu stability, tzn. změnu tvaru průřezu. Největší zborcení je právě pod působící silou, kde je největší ohybový moment, viz.(Obr. 57.).

3. Mezi další vlivy patří: v místě působení síly byly deformace částečně viskoelastické. Tyto částečně trvalé deformace byly větší u všech půl-trubkových profilů, které byly otočeny směrem dolů (Obr. 58.).



Obr. 56. Změna průřezových charakteristik po délce profilu



Obr. 57. Nerovnoměrná deformace průřezu po délce profilu



Obr. 58. Trvalá deformace půl-trubkového profilu

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala mechanickými vlastnostmi otevřených tenkostěnných tvarovaných plastových profilů. Byly vyrobeny dva druhy profilů, přičemž jeden byl vyroben technologií tvarování a druhý byl vyroben z plastové trubky PE-HD. Plastové profily vyrobené technologií tvarování byly z materiálu PS a vyráběly se z desek o tloušťce 1mm a 2mm a byly tvarovány na dvou formách. Vznikly tak čtyři druhy profilů, které byly oboustranně zatěžovány ohybem. V případě plastových trubek jsme vyrobili tři druhy půl-trubkových profilů a ty byly rovněž zatěžoval oboustranně ohybem.

V teoretické části jsme si připravili program pro teoretický výpočet kvadratického momentu pro tyto profily. V experimentální části pak grafickou závislost mezi kvadratickým momentem průřezu profilu a poměrem výšky (poloměrem u půl-trubkových profilů) k tloušťce materiálu. Byly zjištěny rozdíly mezi teoretickými a experimentálními hodnotami ohybové tuhosti. U profilů vyrobených technologií tvarování je nejmenší rozdíl cca 30% mezi hodnotami J_z u profilu č. 3 (tento profil má menší výšku a je z tloušťky materiálu 2mm). Naopak největší rozdíly, až cca 77%, byly zjištěny u profilů, které měly vyšší poměr výšky k tloušťky, tj. profily č. 1 a č. 2. U těchto profilů se objevily větší problémy se stabilitou a nerovnoměrnou deformací po délce a v jednotlivých částech průřezu profilů. U půl-trubkových profilů se srovnávací hodnoty J_z již tak nelišily a byly v rozmezí cca 18% až 57%. U těchto půl-trubkových profilů se během zatěžování neprojevovaly tak výrazné změny tvaru průřezu jako v případě u-profilů.

Téma zpracované v této bakalářské práci není úplně uzavřené a pro navazující studium bych navrhol:

- vypracovat teorii pro oblast větších deformací profilů, tj. použít jiný výpočtový model, který by v sobě zahrnoval jak pružnou tak i plastickou deformaci.
- dále do výpočtu zahrnout změnu průřezových charakteristik profilů jako funkce deformace, popř. síly.
- provést ohybové zkoušky pro více druhů profilů a tloušťek materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] Šuba, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2005. 4 s. ISBN 80-7318-287-4.
- [2] Šuba, O.: Mechanické chování těles, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2002 ISBN 80-7318-101-0
- [3] Lukovics, I.: Konstrukční materiály a technologie, VUT Brno, Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1992 ISBN 80-214-0399-3
- [4] Oliva, J.: Pružnost a pevnost, VUT Brno, Rektorát Vysokého učení technického v Brně
- [5] Janíček, P., Ondrášek, E., Vrbka, J.: Mechanika těles - Pružnost a pevnost 1, VUT Brno, Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1992. s. 68-72.
- [6] Horníková, J., Burša, J., Šandera, P.: Pružnost a pevnost, fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2002
- [7] Valendin, M.: Mechanika I - statika, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2002. 71-74 s. ISBN 80-7318-088-X
- [8] Turčan, M., Hradecký P., Madryová A., Harbichová I., Holčapek M.: Statistika, VŠ Báňská – Technická univerzita Ostrava, 2002, ISBN 80-248-0311-0
- [9] Dvořák, M., Gajdoš, F., Novotný, K.: Technologie tváření, plošné a objemové tváření, Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno 2003, ISBN 80-214-2340-4
- [10] Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní - Katedra tváření kovů a plastů
Dostupný z WWW:
http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/08.htm

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E	modul pružnosti v tahu [Mpa]
σ	směrodatná odchylka
μ	intervalový odhad střední hodnoty pro 95% stupeň spolehlivosti
\bar{x}	aritmetický průměr
J	kvadratický moment průřezu profilu [mm ⁴]
σ	napětí[Mpa]
l	původní délka[m]
l_0	délka po prodloužení[m]
Z	poměrné zúžení
S	plocha průřezu po prodloužení[m ²]
S_0	původní plocha průřezu[m ²]
A	tažnost
ν	poissonův poměr
T_g	teplota skelného přechodu[°]
T_m	teplota tání[°]
y_T	těžiště v ose y[m]
z_T	těžiště v ose z[m]
$D_{z,y}$	deviační moment[mm ⁴]
J_p	polární moment[mm ⁴]
F	síla[N]
y	deformace[m]
R_m	mez pevnosti v ohybu[Mpa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. <i>Postup mechanického tvarování desky</i>	11
Obr. 2. <i>Postup tvarování desky u negativního tváření</i>	13
Obr. 3. <i>Konstrukční provedení negativního tváření</i>	14
Obr. 4. <i>Postup tvarování desky u pozitivního tváření</i>	15
Obr. 5. <i>Mechanické předtvarování</i>	16
Obr. 6. <i>Pneumatické předtvarování desky</i>	18
Obr. 7. <i>Kombinací tlaku a podtlaku</i>	19
Obr. 8. <i>Obecný tvar závislosti funkce $\sigma(\varepsilon)$</i>	21
Obr. 9. <i>Namáhání tělesa tahem</i>	22
Obr. 10. <i>Osové kvadratické momenty</i>	27
Obr. 11. <i>Obdélníkový průřez</i>	28
Obr. 12. <i>Kruhový průřez</i>	29
Obr. 13. <i>Steinerova věta</i>	30
Obr. 14. <i>Deviační moment tělesa</i>	31
Obr. 15. <i>Natočení souřadnic</i>	32
Obr. 16. <i>Mohrova kružnice</i>	34
Obr. 17. <i>Transformace Mohrovy kružnice</i>	35
Obr. 18. <i>Vícenásobná forma</i>	38
Obr. 19. <i>Vícenásobný profil (výrobek)</i>	39
Obr. 20. <i>U-profil připravený pro ohybovou zkoušku</i>	39
Obr. 21. <i>Zkušební těleso připravené na tahovou zkoušku</i>	39
Obr. 22. <i>Tahové křivky</i>	39
Obr. 23. <i>Tahové zatížení tělesa</i>	40
Obr. 24. <i>Schéma tříbodového ohybu</i>	41
Obr. 25. <i>Orientace otočení profilů</i>	42
Obr. 26. <i>Graf $F - y$ pro 1. a 2. sérii</i>	44
Obr. 27. <i>Graf $F - y$ pro 3. a 4. sérii</i>	46
Obr. 28. <i>Graf $F - \varepsilon$ pro 5. a 6. sérii</i>	48
Obr. 29. <i>Graf $F - y$ pro 7. a 8. sérii</i>	50
Obr. 30. <i>Graf $R_m - \varepsilon$ pro všechny série</i>	51
Obr. 31. <i>Deformace u-profilu pro jeho R_m</i>	52
Obr. 32. <i>Deformace u-profilu nahoru při $y=1\text{mm}$</i>	53
Obr. 33. <i>Deformace u-profilu nahoru při $y=4\text{mm}$</i>	53

Obr. 34. Deformace u-profilu nahoru při R_m	53
Obr. 35. Deformace u-profilu dolů při $y=1\text{mm}$	54
Obr. 36. Deformace u-profilu dolů při $y=4\text{mm}$	54
Obr. 37. Deformace u-profilu dolů při R_m	54
Obr. 38. Obecné výpočtové schéma pro E	55
Obr. 39. Ztráta stability profilu.....	58
Obr. 40. Trvalá deformace u profilu č. 2 otočeného dolů po zatěžování.....	58
Obr. 41. Rozměrové značení profilů.....	59
Obr. 42. Schéma zatěžování nosníku.....	60
Obr. 43. Orientace souřadného.....	60
Obr. 44. Úplné uvolnění nosníku.....	60
Obr. 45. Metoda řezu.....	61
Obr. 46. PE-HD trubka.....	65
Obr. 47. Půl-trubka a její značení	66
Obr. 48. Schéma orientace otočení profilu.....	67
Obr. 49. Zátěžové křivky pro $R=45\text{mm}$	68
Obr. 50. Ohybové namáhání pro $R=31,5\text{mm}$	70
Obr. 51. Ohybové namáhání pro $R=31,5\text{mm}$ - PipeLife.....	72
Obr. 52. Ohybové namáhání pro $R=20\text{mm}$	74
Obr. 53. Deformace profilu nahoru při $y=1\text{mm}$	76
Obr. 54. Deformace profilu nahoru při $y=5\text{mm}$	76
Obr. 55. Deformace profilu nahoru při R_m	76
Obr. 56. Změna průřezových charakteristik po délce profilu.....	79
Obr. 57. Nerovnoměrná deformace průřezu po délce	80
Obr. 58. Trvalá deformace půl-trubkového profilu.....	80

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	<i>Vybrané mechanické vlastnosti pro některé materiály</i>	23
Tab. 2	<i>Rozměry zkušebních těles</i>	40
Tab. 3	<i>Moduly pružnosti v tahu a R_m</i>	41
Tab. 4	<i>Rozměry profilu č. 1</i>	43
Tab. 5	<i>Naměřené hodnoty 1. série</i>	43
Tab. 6	<i>Naměřené hodnoty 2. série</i>	44
Tab. 7	<i>Rozměry profilu č. 2</i>	45
Tab. 8	<i>Naměřené hodnoty 3. série</i>	45
Tab. 9	<i>Naměřené hodnoty 4. série</i>	46
Tab. 10	<i>Rozměry profilu č. 3</i>	47
Tab. 11	<i>Naměřené hodnoty 5. série</i>	47
Tab. 12	<i>Naměřené hodnoty 6. série</i>	48
Tab. 13	<i>Rozměry profilu č. 4</i>	49
Tab. 14	<i>Naměřené hodnoty 7. série</i>	49
Tab. 15	<i>Naměřené hodnoty 8. série</i>	50
Tab. 16	<i>Porovnání hodnot modulu pružnosti pro jednotlivé série</i>	52
Tab. 17	<i>Teoretický výpočet J_z</i>	55
Tab. 18	<i>Nastavení průhybu profilů pro výpočet E u jednotlivých sérií</i>	55
Tab. 19	<i>výpočet J_z u profilů otočených nahoru</i>	56
Tab. 20	<i>výpočet J_z u profilů otočených dolů</i>	56
Tab. 21	<i>Rozměry profilů</i>	59
Tab. 22	<i>Nastavení průhybu profilů pro výpočet E u jednotlivých sérií</i>	63
Tab. 23	<i>Ohybová tuhost pro profil otočen směrem nahoru</i>	63
Tab. 24	<i>Ohybová tuhost pro profil otočen směrem dolů</i>	63
Tab. 25	<i>Seřazení ohybové tuhosti profilů</i>	64
Tab. 26	<i>Rozměry trubek</i>	65
Tab. 27	<i>Naměřené hodnoty půl-trubkových profilů</i>	66
Tab. 28	<i>Naměřené hodnoty pro 1. sérii</i>	69
Tab. 29	<i>Naměřené hodnoty pro 2. sérii</i>	69
Tab. 30	<i>Naměřené hodnoty pro 3. sérii</i>	71
Tab. 31	<i>Naměřené hodnoty pro 4. sérii</i>	71
Tab. 32	<i>Naměřené hodnoty pro 5. sérii</i>	73
Tab. 33	<i>Naměřené hodnoty pro 6. sérii</i>	73

Tab. 34	Naměřené hodnoty pro 7. sérii.....	75
Tab. 35	Naměřené hodnoty pro 8. sérii.....	75
Tab. 36	Teoretický výpočet J_z	77
Tab. 37	výpočet J_z u půl-trubkových profilů otočených nahoru.....	77
Tab. 38	výpočet J_z u půl-trubkových profilů otočených dolů.....	77