



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO MĚŘENÍ KRITICKÉHO NAPĚTÍ ZTRÁTY STABILITY TENKOSTĚNNÝCH L- PROFILŮ

CONSTRUCTION OF EQUIPMENT FOR THIN WALLED L-PROFILES INSTABILITY TESTING

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Polčák

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Horák, Ph.D.

BRNO 2019



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Marek Polčák**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Marek Horák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh přípravku pro měření kritického napětí ztráty stability tenkostěnných L–profilů

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Navrhněte univerzální upínací přípravek vhodný pro měření kritických napětí ztráty stability osovým tlakem zatížených duralových L–profilů o rozměrech, které jsou běžně používané při výrobě letounů kategorie všeobecného letectví.

### **Cíle bakalářské práce:**

- teoretický rozbor úlohy
- specifikace požadavků na výsledný návrh
- vlastní konstrukční návrh přípravku
- výkresová dokumentace k vybraným dílům přípravku včetně výkresu sestavy

### **Seznam doporučené literatury:**

SLAVÍK, S.: Stavba letadel. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01671-4.

PÍŠTĚK, A.: Pevnost a životnost letadel. Brno: Vysoké učení technické, 1988.

NIU, M. Ch.Y.: Airframe structural design. 2nd ed. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press Ltd. ISBN 962-7128-09-0.

BRUHN, E. F.: Analysis and design of flight vehicle structures. Cincinnati: Tri-State Offset Co, 1965.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se věnuje ztrátě stability tlakem namáhaných tenkostěnných hliníkových profilů, které tvoří významnou součást leteckých konstrukcí. Tyto profily se testují zkouškou tlakem, pomocí které se zjišťuje kritická síla. Zkouška tlakem může být ovlivněna vícero faktory, které zpravidla souvisí s uchycením vzorku do stroje. Cílem práce je navrhnout přípravek, který bude sloužit k upnutí vzorku do testovacího stroje a zlepšení výsledků zkoušky.

## **ABSTRACT**

Bachelor's thesis deals with the loss of stability of axially loaded thin-walled aluminium profiles, which make up an important part in the aircraft structures. The loss of their stability is tested by the compression test, which is used to determine the buckling load. Compression test may be influenced by many factors, which are related to the fixing to the testing machine. The aim of the thesis is to design a fixture, which would fix a specimen to the testing machine and improve the results of the test.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

stabilita, vzpěr, stringer, návrh, přípravek

## **KEY WORDS**

stability, buckling, stringer, design, fixture



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

POLČÁK, Marek. *Návrh přípravku pro měření kritického napětí ztráty stability tenkostěnných L-profilů* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116455>.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.  
Vedoucí práce Ing. Marek Horák Ph.D..





## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem. Zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Marka Horáka Ph.D. s použitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne .....

.....

Polčák Marek



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu, panu Ing. Marku Horákovi Ph.D., za jeho čas, trpělivost a cenné rady, které mi pomohly zpracovat tuto bakalářskou práci.



# OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	VÝZNAM TENKOSTĚNNÝCH PROFILŮ V LETECKÝCH KONSTRUKCÍCH.....	17
2.1	Požadavky na letecké konstrukce .....	17
2.2	Části leteckých konstrukcí.....	17
2.2.1	Potah .....	17
2.2.2	Stringery.....	18
2.2.3	Vyztužené panely.....	18
2.2.4	Integrální panely .....	19
2.3	Zatížení částí leteckých konstrukcí.....	20
3	ZTRÁTA STABILITY TENKOSTĚNNÝCH PROFILŮ .....	21
3.1	Ztráta vzpěrné stability .....	22
3.1.1	Vliv koncového uchycení na kritickou sílu .....	22
3.1.2	Vliv nepružného oboru .....	23
a)	Johnson-Eulerovo řešení.....	25
3.2	Lokální ztráta stability .....	26
3.2.1	Definice lokální ztráty stability.....	27
3.2.2	Analytické řešení stanovení lokálního kritického napětí.....	27
I)	Testovací křivky.....	28
II)	Obecné řešení dle Niu .....	29
III)	Řešení pomocí Timoshenkova diagramu .....	30
4	METODY UCHYCENÍ VZORKU.....	31
4.1	Nedokonalosti ovlivňující výsledky zkoušek .....	31
4.1.1	Vliv materiálových a tvarových nedokonalostí .....	31
4.1.2	Vliv excentricity zatížení .....	32
4.1.3	Vliv okrajových podmínek .....	34
4.2	Současné uchycení vzorku.....	34
4.3	Vetknutí .....	35
4.3.1	Zalévání profilů do forem .....	35
4.3.2	Mechanické upnutí profilů.....	36
4.4	Kloubové uložení.....	37
4.5	Uložení mezi pevné stěny .....	38
4.6	Southwellovo vykreslení .....	40
5	KONSTRUKČNÍ NÁVRH .....	43
5.1	Požadavky na výsledný návrh .....	43
5.2	Problematika uchycení profilu.....	44

5.2.1	Dosedání klínu do rohu profilu .....	44
5.2.2	Vliv excentricity zatěžování .....	45
5.2.3	Návrhové koncepty .....	45
5.2.4	Vliv zpracování kontaktní plochy mezi klínem a profilem .....	47
5.2.5	Rovnoměrné rozložení sil na profil.....	47
5.2.6	Návrh řešení upínání U a C profilů.....	48
5.3	Výsledný návrh konstrukce přípravku.....	49
5.4	Výpočty.....	51
5.4.1	Výpočet kritické síly vybraných profilů .....	51
5.4.2	Výpočet upínací síly .....	53
5.4.3	Utahovací moment pohybového šroubu .....	54
5.4.4	Samosvornost šroubu .....	54
5.4.5	Pevnostní kontrola pohybového šroubu.....	54
5.4.6	Pevnostní kontrola lícovaných šroubů.....	56
5.4.7	Pevnostní kontrola klínů a profilu na otláčení .....	56
6	ZÁVĚR.....	57
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	58
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK ....	60
8.1	Seznam zkratk a symbolů .....	60
8.2	Seznam obrázků.....	62
8.3	Seznam tabulek.....	63
9	PŘÍLOHY .....	64

# 1 ÚVOD

Ztráta stability představuje nebezpečnou poruchu, se kterou je důležité již při navrhování počítat a snažit se jí předem zabránit. Po překročení kritické síly dochází k trvalým plastickým deformacím, které mohou vést až ke kolapsu profilu a oslabení konstrukce. Teoretickému rozboru ztráty stability se věnuje první část práce, a to jak vzpěrné, tak lokální. Tenkostěnné profily zpravidla slouží jako výztužné prvky křídel a trupu letadel. V letecké terminologii se nazývají stringery. Spektrum tvarů profilů a materiálů, které se využívají pro výrobu výztuh, je velmi široké.

Stanovení kritického napětí ztráty stability je klíčové pro předvídaní chování profilu při jeho zatížení. Pro jeho určení se využívají analytické metody nebo experimenty realizované pomocí zkoušky tlakem. Přesné výsledky experimentů jsou vysoce závislé na okrajových podmínkách, které jsou určeny druhem uchycení profilu do testovacího stroje. Současné řešení uchycení vzorku je závislé na přesném obrobení koncových styčných ploch profilu. Tyto nedokonalé plochy mají za následek nerovnoměrné rozložení zatížení profilu a koncentraci napětí na konci profilu a tím i zkreslení výsledků tlakové zkoušky.

Cílem práce bylo navrhnout univerzální přípravek pro zkoušku tlakem určený především pro duralové profily tvaru L a Z, který zajistí stabilní uchycení profilu do testovacího stroje a umožní tak dosáhnout přesnějších výsledků. Realizovaný návrh doprovází také komentář s porovnáním s ostatními možnostmi uchycení, které se využívají pro tuto zkoušku. Konstrukční návrh je podložen pevnostními výpočty namáhaných součástí a také výkresovou dokumentací sestavy a jednotlivých dílů.





## 2 VÝZNAM TENKOSTĚNNÝCH PROFILŮ V LETECKÝCH KONSTRUKCÍCH

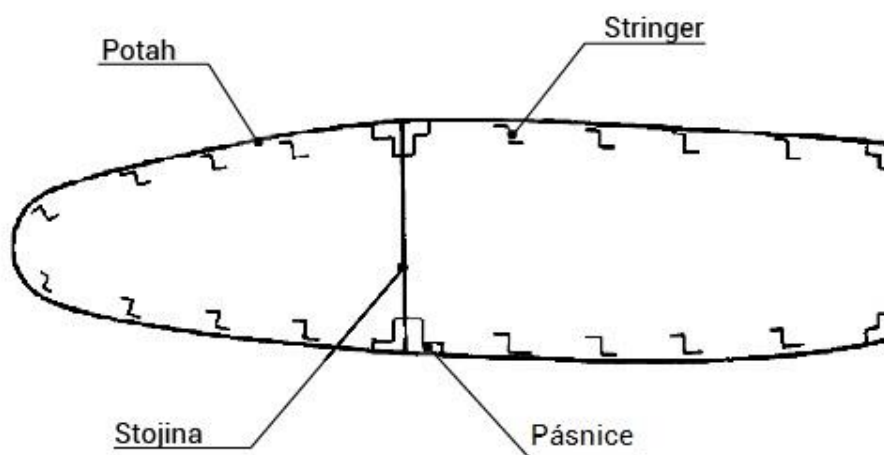
### 2.1 Požadavky na letecké konstrukce

Na letecké konstrukce jsou kladeny vysoké nároky a musí splňovat mnoho požadavků. Konstrukteři proto musí hledat kompromisy a využívají optimalizační postupy. Snaží se minimalizovat hmotnost konstrukce, ale s ohledem na zachování její dostatečné pevnosti, tuhosti, životnosti a spolehlivosti. Celková technologičnost výroby i samotná složitost konstrukce musí také respektovat ekonomické hledisko [1].

### 2.2 Části leteckých konstrukcí

Letadla jsou vystavována v letu náročným podmínkám, a to jak z hlediska tepelného namáhání, tak mechanického zatížení. Při návrhu trupu a křídel se konstruktéři snaží minimalizovat hmotnost a zároveň zachovat dostatečnou pevnost a tuhost konstrukce. Letecké konstrukce jsou navrhovány jako tenkostěnné, kde průřez tvoří nosníky, žebra, podélníky a potah se stringery.

Typy konstrukce se v historii měnily. U prvních konstrukcí plnil hlavní nosnou funkci nosník, jehož význam se časem začal vytrácet. Stále se ale využívají u menších nesériových letadel. Konstrukce, které využívají jako nosné prvky potah, stringery a pásnice se nazývají poloskořepinové. Konstrukce obsahující vyšší počet stringerů, u kterých každý její prvek přenáší veškeré druhy napětí, se nazývají skořepinové [2].



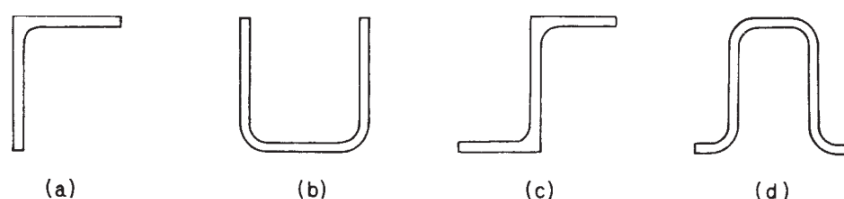
Obr. 2.1 Řez nosníkového poloskořepinového křídla [2]

#### 2.2.1 Potah

Funkce potahu se v průběhu času měnila. Zpočátku se nepodílel na přenosu ohybových a krouticích momentů, které tak plně zatěžovaly nosníky, které tvořily stavební kámen tenkostěnných nosníkových konstrukcí. Později se začal potah využívat k přenosu ohybových a krouticích momentů. Potah dokáže dobře odolávat smykovým a tahovým zatížením. Minimalizace hmotnosti konstrukce ztenčením potahu přináší nevýhodu ve formě možné ztráty stability, která by ovlivnila aerodynamické vlastnosti konstrukce. Proto bylo nutné zapojit do konstrukce stringery, které zabraňují ztrátě stability tenkostěnných potahů.

### 2.2.2 Stringery

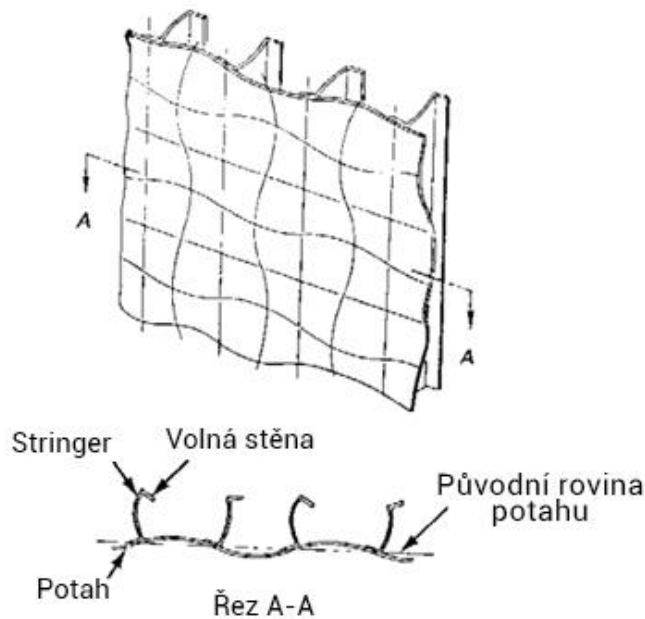
Stringery jsou tenkostěnné profily, nejčastěji vyrobeny z hliníkových slitin, a to buď ohýbáním nebo protlačováním. Tvar jejich průřezu může být velmi komplikovaný, protože mohou být poskládány z vícero profilů, avšak mezi nejčastěji používanými patří tvary L, U, C a Z, které jsou zobrazeny na obr. 2.2. Slouží jako výztuhy potahu a omezují jeho deformace způsobené aerodynamickými silami. Mohou být také použity jako pásnice nosníků. Kromě ohybu jsou stringery namáhány na tlak a tah, a proto i u nich může nastat ztráta stability. Ohýbáním tenkých plechů do různých pravoúhlých tvarů se zvyšuje jejich celková tuhost a únosnost, ale nedosahují takových mechanických vlastností, jako profily protlačované. Stringery vyrobené ohýbáním se využívají spíše v místech nižšího tlakového zatížení, a to například na trupu letadla [3].



Obr. 2.2 Protlačované (a), (c) a ohýbané (b), (d) profily [4]

### 2.2.3 Vyztužené panely

Zpravidla jsou stringery přinýtovány k potahu a rámu, protože hliníkové slitiny, ze kterých jsou stringery vyrobeny, se obtížně svařují. Nýtované spoje mají ale za následek koncentraci napětí v místě díry. Vzdálenost mezi stringery připevněnými k potahu ovlivňuje kritické napětí ztráty stability celého panelu. Nejvíce náchylná část panelu ke ztrátě stability je část potahu mezi stringery, ve které může ke ztrátě stability dojít již při malém zatížení. Pevné spojení stringerů a potahu má poté za následek vzájemné silové ovlivňování. Pokud je tloušťka potahu dostatečně velká, tak se její kritické napětí ztráty vzpěrné stability blíží kritickému napětí ztráty stability stringerů a poté je třeba brát v úvahu také ohybové, torzní a lokální deformace stringerů [3]. Na obr. 2.3 je znázorněna ztráta vzpěrné stability vyztuženého panelu.



Obr. 2.3 Ztráta vzpěrné stability vyztuženého panelu [5]

#### 2.2.4 Integrální panely

Požadavky na letecké konstrukce stále rostou a jedním z možných zlepšení mechanických vlastností konstrukcí a snížení jejich hmotností je využití integrálních panelů, které tvoří jednotlivý celek potahů a stringerů. Jsou vyrobeny z jednoho kusu materiálu (nejčastěji slitiny hliníku) tvářením za tepla i za studena, popřípadě mechanickým či chemickým obráběním. Delší doba výroby, větší spotřeba materiálu a pokročilejší výrobní technologie způsobují to, že jsou dražší než nýtované vyztužené panely. Díky tomu, že není potřeba nýtovat stringery k potahu, se sníží počet nýtů, a to zaručí lepší hladkost povrchu letadla [3]

Konstrukce složené z integrálních panelů mohou být až o 10% lehčí než konstrukce složené spojením potahů a stringerů. Integrální panely dokážou snášet větší axiální zatížení a tím jsou více odolné vůči možné ztrátě stability. Ne vždy může být volba integrálních panelů vhodná z důvodu lamelární koroze, která způsobuje odleptávání materiálu, a vznik trhlin. Z tohoto důvodu se využívají spíše ve vojenském letectví než v komerčním [3].

Z hlediska únavy materiálu je bezpečnější klasicky vyztužený panel, protože se trhlinka může postupně rozšířit po celém panelu, tzn. do dalších stringerů a potahu [6].

## 2.3 Zatížení částí leteckých konstrukcí

Při letu na drak letadla působí aerodynamické síly spojitě rozložené na jeho povrchu a setrvačné síly. Při rychlostech, které letouny dosahují, jsou odporové síly vzduchu velké a způsobují tlakové a ohybové napětí. Již na zemi se musí konstrukce potýkat se zatížením od gravitační síly a tahu motoru. Velikost a rozložení zatížení jsou určeny vnějším tvarem konstrukce letounu. Aerodynamické síly působící na letoun nejvíce zatěžují křídlo, které je navrhováno tak, aby bylo aerodynamicky efektivní. Tedy aby poskytovalo dostatečný vztlak a kladlo co nejmenší odpor. Křídlo je ohýbáno jak vztlakem, tak i gravitací a velikost ohybového napětí je závislé na délce křídla a jeho průřezu. Trup letadla tolik netrpí přímým působením aerodynamických sil, ale je značně zatěžován reakčními silami od ostatních částí letadla, které jsou k trupu připojeny. Kromě vlastní hmotnosti letounu musí letecká konstrukce unést hmotnost pasažérů, nákladu a paliva, které vyvolají nemalé setrvačné síly. Relativní pohyb rotace motoru a unášivý pohyb manévru způsobují vznik gyroskopických momentů [4].

Síly působící na drak musí být v rovnováze. Při manévrování dochází ke změnám zatížení a konstrukce musí být dimenzovány tak, aby byly schopny v daných situacích vydržet. Při jednotlivých manévrech se mění poměr celkového vztlaku letadla a jeho tíhy. Tento poměr se nazývá násobek zatížení a jeho maximální povolené provozní hodnoty jsou předepsány pro daný typ letounu [7].

K nebezpečnému zatížení dochází při přistání, kdy při nedokonalém přistání vzniká přistávací ráz. Letecké konstrukce se musí kromě běžných provozních podmínek potýkat s méně častými nahodilými zatíženími, jako například průlet turbulencí, nebo v extrémních případech přistání na vodě [1].

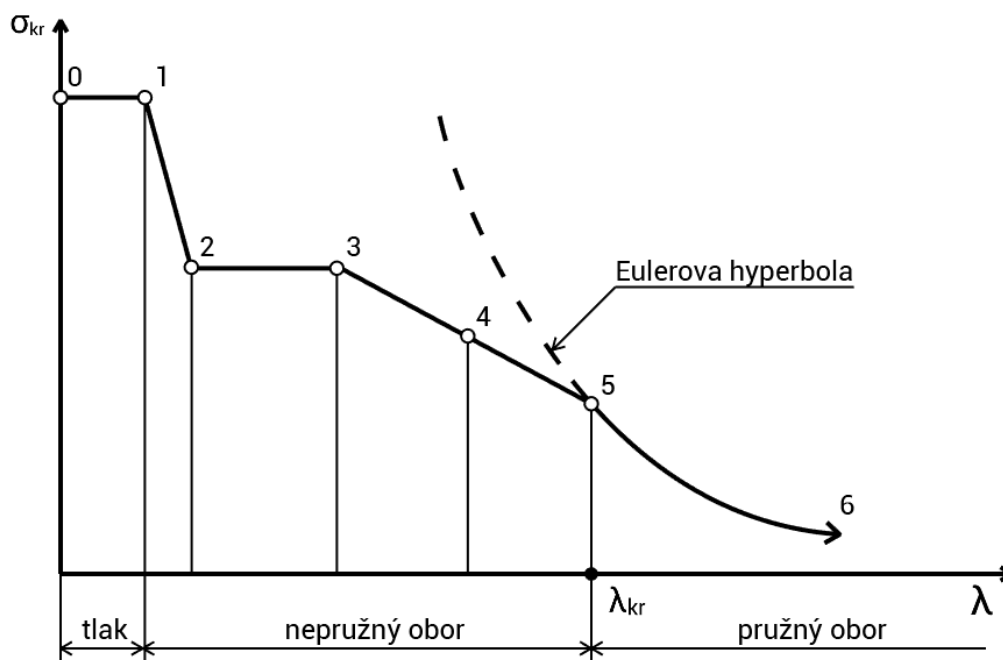
### 3 ZTRÁTA STABILITY TENKOSTĚNNÝCH PROFILŮ

Při zatěžování tlakem kolmo na průřez dokonalého prutu, který je dokonale rovný a nezkroucený, nevzniká ohybový moment a nedochází k vychýlení až do okamžiku dosažení kritického zatížení. Po dosažení tohoto kritického zatížení se i dokonalý prut vychýlí. Jde o ideální případ, se kterým se praxi nepotkáme. V reálných případech neexistuje dokonalý prut, který by byl natolik geometricky dokonalý, proto musíme brát v potaz také ohybové momenty, které při zatížení vzniknou.

Jak se uvádí v [5], může při zatěžování prutu tlakem z hlediska ztráty stability dojít ke čtyřem druhům poruch:

- ztráta vzpěrné stability (ang. buckling)
- lokální ztráta stability (ang. crippling)
- kombinace ztráty vzpěrné stability a lokální ztráty stability
- krutová ztráta stability.

K jakému druhu poruchy dojde určuje kritická štíhlost. Jak lze vyčíst z obr.3.1, kritická štíhlost určuje hranici pružného a nepružného chování. Při nižší štíhlosti než kritická, může dojít k lokální ztrátě stability nebo také k porušení tlakem. Při vyšší štíhlosti, než je kritická, dochází ke ztrátě vzpěrné stability, která se někdy označuje jako ohybová ztráta stability.



0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
Porušení tlakem. Rozdrcení křehkého prutu	Lokální ztráta stability, ovlivněna okr. podmínkami	Lokální ztráta stability	Přechodové pásmo od ohybové ke krutové ztrátě stability	Ztráta vzpěrné stability v nepružném oboru	Ztráta vzpěrné stability v pružném oboru

Obr. 3.1 Úplný diagram stability [2]

### 3.1 Ztráta vzpěrné stability

Ztráta vzpěrné stability je jev, který se týká především štíhlých prutů a nastává při osovém zatěžování prutu tlakem a projevuje se vychýlením prutu při dosažení kritického napětí. Silné pruty, které mají velmi malou štíhlost, jsou natolik stabilní, že při zatěžování tlakem nedojde ke ztrátě stability, ale k porušení tlakem a popřípadě k meznímu stavu pevnosti. Štíhlé pruty se při malém osovém zatížení mohou také považovat za stabilní. Dokud zatěžovací síla nedosáhne kritické hodnoty, prut je pouze stlačován. Při vyosení tlakové síly, nebo pokud je prut tvarově nedokonalý, vzniká ohybový moment, který má za následek průhyb prutu. Po překročení kritického napětí se prut nedostane po odstranění zatížení do svého původního tvaru [2],[5]. Síla určující přechod ze stavu stabilního na nestabilní se nazývá kritická síla  $F_{kr}$  a řídí se podle Eulerovy rovnice:

$$F_{kr} = \frac{(\pi^2 EJ)}{(L_{red})^2}. \quad (3.1)$$

Eulerova rovnice je závislá na Youngově modulu pružnosti  $E$ , kvadratickém momentu setrvačnosti prutu  $J$  a redukované délce prutu  $L_{red}$ , která je ovlivněna uchycením prutu.

Kritické napětí je poté určeno pomocí rovnice (3.2), kde figuruje tzv. redukovaná štíhlost prutu  $\lambda_{red}$  (3.6). Obecně je štíhlost definována podle rovnice (3.3), která vyjadřuje poměr redukované délky prutu  $L$  ku poloměru setrvačnosti průřezu  $i$ .

$$\sigma_{kr} = \left( \frac{\pi}{\lambda_{red}} \right)^2 \cdot E \quad (3.2)$$

$$\lambda = \frac{L}{i} \quad (3.3)$$

Poloměr setrvačnosti průřezu je určen pomocí rovnice (3.4), ve které  $J$  vyznačuje kvadratický moment průřezu a  $A$  plochu průřezu.

$$i = \sqrt{\frac{J}{A}} \quad (3.4)$$

#### 3.1.1 Vliv koncového uchycení na kritickou sílu

Koncové uchycení je určující okrajovou podmínkou, která značně ovlivňuje velikost kritické síly a kritického napětí. Z tabulky uvedené níže lze určit, že nejvyšší kritická síla vznikne v situaci, kdy je prut pevně vetknut na obou koncích.





Redukovaná délka, která figuruje v Eulerově rovnici, se vypočítá pomocí vztahu (3.5).

$$L_{red} = \frac{L}{\sqrt{c}} \quad (3.5)$$

V této rovnici je  $c$  tzv. koeficient koncového uchycení. Koncové uchycení ovlivňuje i štíhlost, která se poté nazývá redukovaná. Vypočítá se ze vztahu (3.6) dosazením redukované délky:

$$\lambda_{red} = \frac{L_{red}}{i}. \quad (3.6)$$

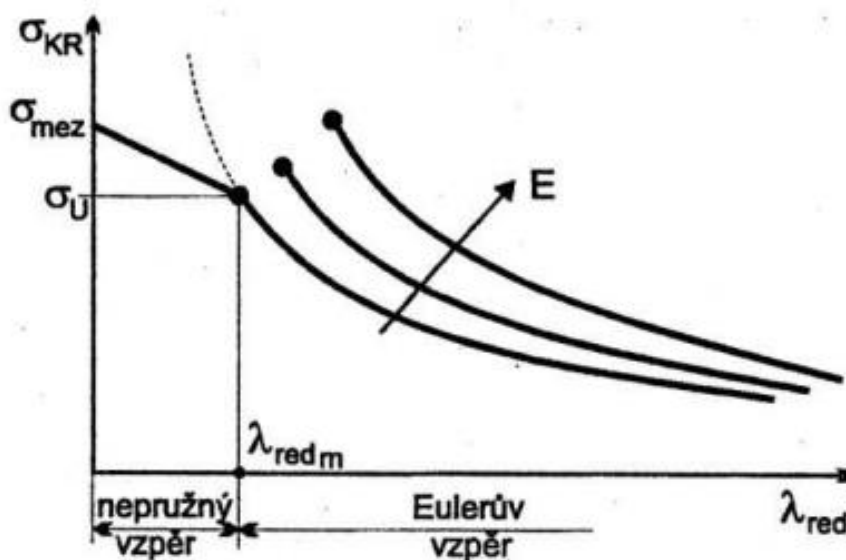
Tab. 3.1 Hodnoty koeficientu c pro různé druhy uložení [5]

Druh uložení			
Volný konec- vetknutí	Kloubové	Kloubové - vetknutí	Vetknutí
			
Koeficient uložení c			
0,25	1	2,05	4

### 3.1.2 Vliv nepružného oboru

Eulerova teorie stability platí pouze v pružném oboru. Pokud kritické normálové napětí překročí mez kluzu materiálu, tak hovoříme o ztrátě vzpěrné stability v nepružném oboru. Tuto hranici určuje mezní redukovaná štíhlost prutu, kterou lze určit z rovnice pro kritické napětí (3.2) vyjádřením štíhlosti a dosazením kritického napětí [1]. Výsledná podoba rovnice vypadá takto:

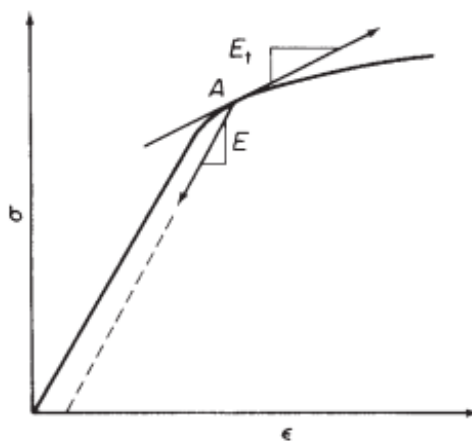
$$\lambda_{red_m} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{kr}}} \quad (3.7)$$



Obr. 3.2 Závislost kritického napětí pružného i nepružného vzpěru [1]

Po překročení meze kluzu, v nepružném oboru, již neplatí řešení pomocí Eulerovy hyperboly a využívá se řešení podle Tetmajerovy přímky nebo Johnsonovy paraboly. Johnsonova parabola navazuje na Eulerovu hyperbolu jako tečna v místě kritické redukované štíhlosti [1].

Tyto metody řešení již nepracují s Youngovým modulem pružnosti  $E$ . Modul pružnosti se v nepružné oblasti nelineárně mění v závislosti na napětí  $\sigma$  a na poměrném prodloužení  $\varepsilon$  a nazývá se tangenciální. Na obr. 3.3 si můžeme povšimnout, že v pružné oblasti je tangenciální modul pružnosti shodný s Youngovým modulem pružnosti. Pro zjištění tangenciálních modulů pružnosti proběhlo nemálo experimentů, na základě kterých vznikly tabulky a diagramy, ze kterých se dá určit na základě znalosti velikosti napětí a přetvoření [8].



Obr. 3.3 Modul pružnosti pro napětí nad mezi kluzu [4]

Tangenciální modul je určován z diagramu napětí-přetvoření metodou pokus-omyl, protože je sám funkcí zatížení. Tento problém je eliminován pomocí rovnice Ramberga-Osgooda, která popisuje tangenciální modul pružnosti pomocí materiálových charakteristik  $E$  a  $n$ , které jsou experimentálně určeny [8]. Rovnice pro tangenciální modul pružnosti, poté vypadá takto:

$$E_t = \frac{E}{1 + \frac{3}{7}nf^{(n-1)}}. \quad (3.8)$$

Po dosazení tangenciálního modulu pružnosti  $E_t$ , vypočítaného pomocí rovnice (3.8), za modul pružnosti  $E$  do rovnice pro výpočet kritického napětí (3.2) a dostaneme následující vztah:

$$\sigma_{kr} = \frac{(\pi^2 E)}{(\lambda_{red}^2)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{3}{7}nf^{(n-1)}\right)}. \quad (3.9)$$

Pro zpřesnění výsledků výpočtu kritického napětí se využívá tzv. redukovaného modulu pružnosti, jehož hodnoty leží mezi Youngovým modulem a tangenciálním modulem pružnosti, a je vypočítán pomocí rovnice uvedené v [8]:

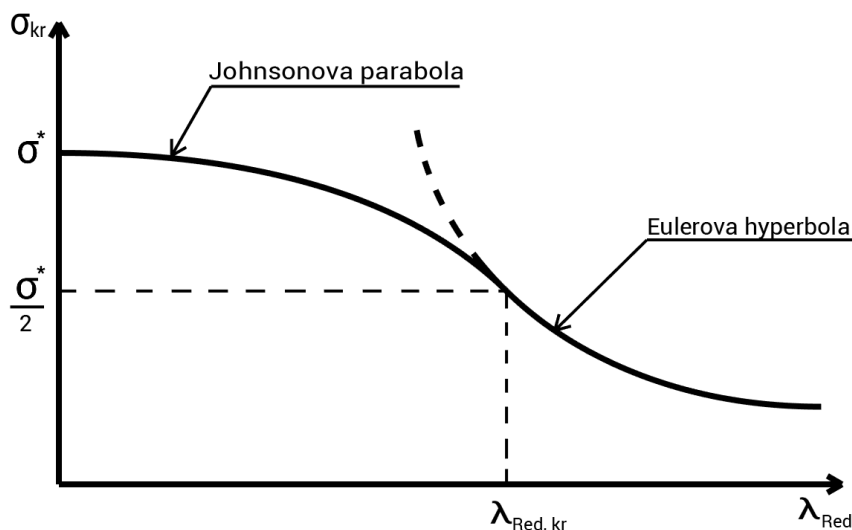
$$E_{red} = \frac{(4EE_t)}{\left(\sqrt{E} + \sqrt{E_t}\right)^2}. \quad (3.10)$$

Ne vždy je však vhodné použít pro výpočet kritického napětí redukovaný modul pružnosti, protože jeho hodnoty platí jen pro dobře obrobené pruty. Pro zjednodušení se proto pracuje obvykle i s tangenciálním modulem pružnosti [8].



### a) Johnson-Eulerovo řešení

Pro výpočet kritického napětí se využívá velmi často Johnson-Eulerovy křivky, která vznikne tečným spojením Johnsonovy paraboly v nepružném oboru s Eulerovou parabolou v pružném oboru. Výsledná křivka pokrývající širokou škálu štíhlostí je znázorněna na diagramu níže.



Obr. 3.4 Johnson-Eulerova křivka [8]

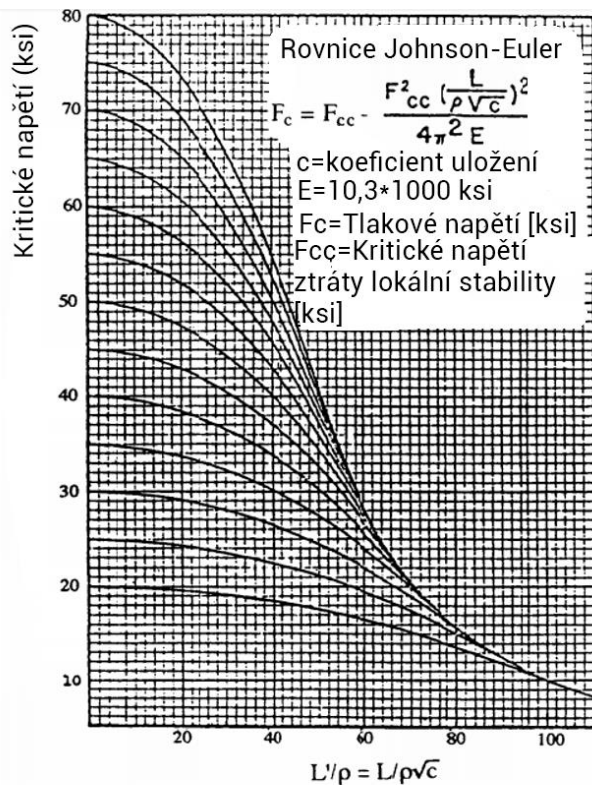
Johnsonova parabola je vyjádřena pomocí vztahu:

$$\sigma_{kr} = \sigma^* - K \lambda_{red}^2, \quad (3.11)$$

kde  $\sigma^*$  a  $K$  jsou konstanty vybrané tak, aby odpovídaly hodnotám vzniklých na základě experimentu. Konstanta  $\sigma^*$  se nazývá limitní napětí a její hodnota se liší v závislosti na příčném průřezu prutu a jeho štíhlosti [9]. Kritické napětí se vypočítá pomocí rovnice (3.12).

$$\sigma_{kr} = \sigma^* \cdot \left[ 1 - \frac{(\sigma^* \cdot \lambda_{red}^2)}{4\pi E} \right] \quad (3.12)$$

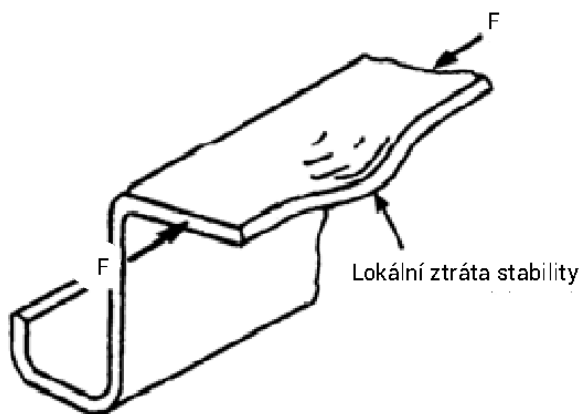
Výhodou Johnson-Eulerova řešení je jeho využití pro lokální ztrátu stability bez znalosti kritického napětí ztráty vzpěrné stability, ale pouze se znalostí kritického napětí lokální ztráty stability. Toto řešení také zahrnuje vzájemné interakce mezi lokální ztrátou stability a vzpěrnou ztrátou stability [8].



Obr. 3.5 Johnson-Eulerovy křivky<sup>1</sup> [8]

### 3.2 Lokální ztráta stability

Snaha o minimalizaci hmotnosti konstrukcí má za následek využívání co nejtenčích součástí. Tenké plechy potahu a tenkostěnné stringery nejsou schopny odolávat vysokým zatížením, to znamená, že kritické napětí ztráty vzpěrné stability je velmi malé. K poruše ale může dojít již při menším zatížení, než je kritická síla vzpěrné stability, kdy dojde ke zvlnění stěny. Tato porucha stability se nazývá lokální ztráta stability a je ukázána na obr. 3.6.



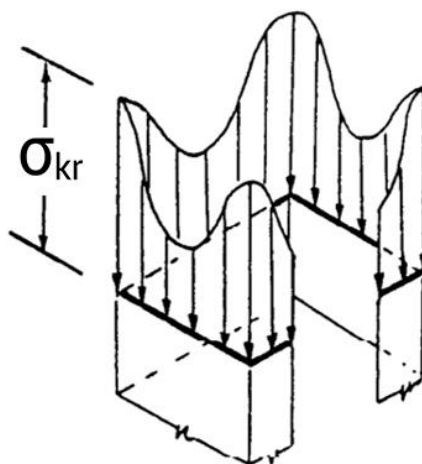
Obr. 3.6 Lokální ztráta stability [5]

<sup>1</sup> Hodnoty kritického napětí jsou v jednotkách ksi. Pro další výpočet v metrickém systému jednotek je nutné je převést, když platí, že 1 ksi=6,895 MPa.

### 3.2.1 Definice lokální ztráty stability

Lokální ztráta stability je definována jako deformace v rámci příčného průřezu profilu, aniž by se prut deformoval podél podélné osy [5]. Projevuje se místním zakřivením stěny profilu a koncentrací napětí v tomto místě, které nezávisí na délce profilu, nýbrž na geometrii průřezu.

Mezní hodnota, která určuje, kdy dojde k lokální ztrátě stability, se nazývá kritické napětí lokální ztráty stability a závisí podobně jako u vzpěrné ztráty stability na štíhlosti jednotlivých stěn profilu a tuhosti jejich vzájemného spojení. Při výpočtu lokálního kritického napětí se počítá s tím, že je rovnoměrně rozloženo po celém průřezu. Skutečné rozložení napětí, které je ukázáno na obr 3.7, však není konstantní. Stěny profilu nedokážou unést stanovené kritické napětí a ztrácí stabilitu již při nižším napětí, než je tomu u rohů profilu, které unesou vyšší zatížení [5].



Obr. 3.7 Skutečné rozložení napětí v profilu [5]

### 3.2.2 Analytické řešení stanovení lokálního kritického napětí

Tenkostěnné profily jsou složeny z několika stěn a pokud uvažujeme i vzájemné interakce mezi nimi, můžeme předpokládat, že se budou jednotlivé stěny chovat jako tenkostěnné desky. Analytických metod je vícero a liší se způsobem určení kritického napětí ale také výsledky. Nejčastějším principem řešení kritického napětí je rozdělení profilu na jednotlivé stěny, pro které se určí místní kritické napětí. Pro názornost jsou zde zvedeny 3 metody určení kritického napětí a nastíněn postup řešení.

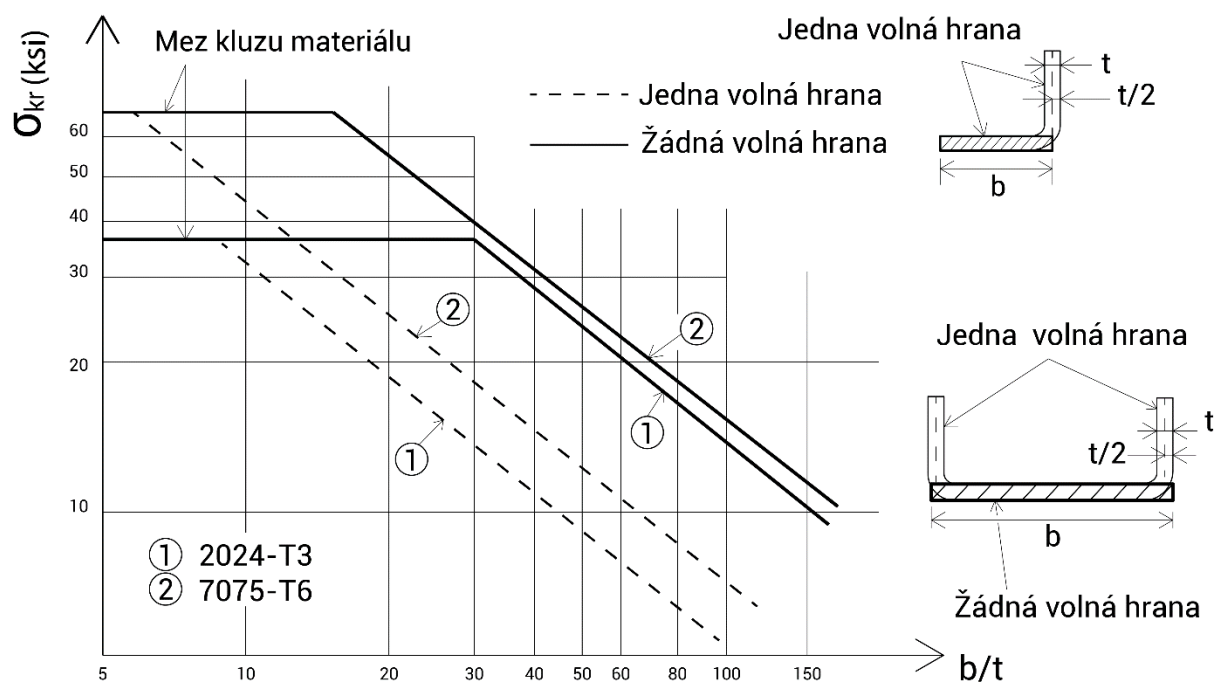
## D) Testovací křivky

Při návrhu profilů se konstruktéři mohou řídit testovacími semi-empirickými křivkami, které vznikly na základě experimentálních dat. Tyto křivky jsou konstruovány speciálně pro daný druh profilu a jeho materiál. Rozlišují také, zda jde o ohýbaný nebo vytlačovaný profil [5].

Pro určení kritického napětí je nutné profil rozdělit a vypočítat štíhlost jednotlivých stěn. Také musíme stanovit, která stěna je volná a která ne. Odečtení z testovacích křivek nám poté na základě štíhlosti určí kritické napětí pro daný materiál a druh profilu. Výsledné kritické napětí je určení pomocí rovnice uvedené v [5]:

$$\sigma_{kr} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i \cdot t_i \cdot \sigma_{kr_i}}{\sum_{i=1}^n b_i \cdot t_i}, \quad (3.13)$$

kde  $b$  délka segmentu,  $t$  je tloušťka a  $\sigma_{kr}$  je kritické napětí segmentu, které určíme z následujícího diagramu, který platí pro ohýbané profily:



Obr. 3.8 Testovací křivka pro ohýbané hliníkové profily<sup>2</sup> [5]

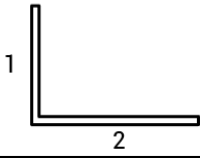
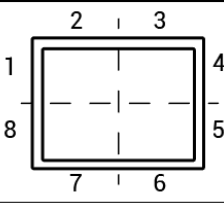
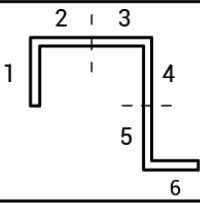
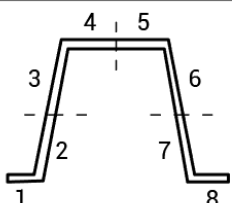
<sup>2</sup> Hodnoty kritického napětí jsou v jednotkách ksi. Pro další výpočet v metrickém systému jednotek je nutné je převést, když platí, že 1 ksi=6,895 MPa.

## II) Obecné řešení dle Niu

Pro ostatní profily, ke kterým nenajdeme testovací křivky, se užívá obecné řešení. Jedna z obecných metod je založena na empirických rovnicích, které jsou uvedeny v knize [5]. I zde je ale třeba rozlišovat, zda je profil ohýbaný nebo protlačovaný.

Pro výpočet kritického napětí ohýbaného profilu potřebujeme znát Youngův modul pružnosti  $E$  a smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ . Profily se rozdělují řezy pro zjištění parametru  $g$ , který určuje počet desek a řezů, kterými profil rozdělíme na jednotlivé části tvaru L. Z následující tabulky lze snadno pochopit princip řezů:

Tab. 3.2 Parametr  $g$  pro vybrané profily [5]

Typ profilu	Počet desek	Počet řezů	$g$
	2	0	2
	8	4	12
	6	2	8
	8	3	11

Rovnice pro výpočet kritického napětí Z a C profilů vypadá takto:

$$\sigma_{kr} = 4,05 \cdot \left( \frac{t^2}{A} \right)^{0,82} \cdot \sqrt[3]{E^{0,82} R_{p0,2}^{2,18}}. \quad (3.14)$$

Pro ostatní typy ohýbaných profilů je rovnice pozměněna a vypadá následovně:

$$\sigma_{kr} = 0,58 \cdot \left( \frac{gt^2}{A} \right)^{0,8} \cdot \sqrt[3]{E^{0,8} R_{p0,2}^{1,2}}. \quad (3.15)$$

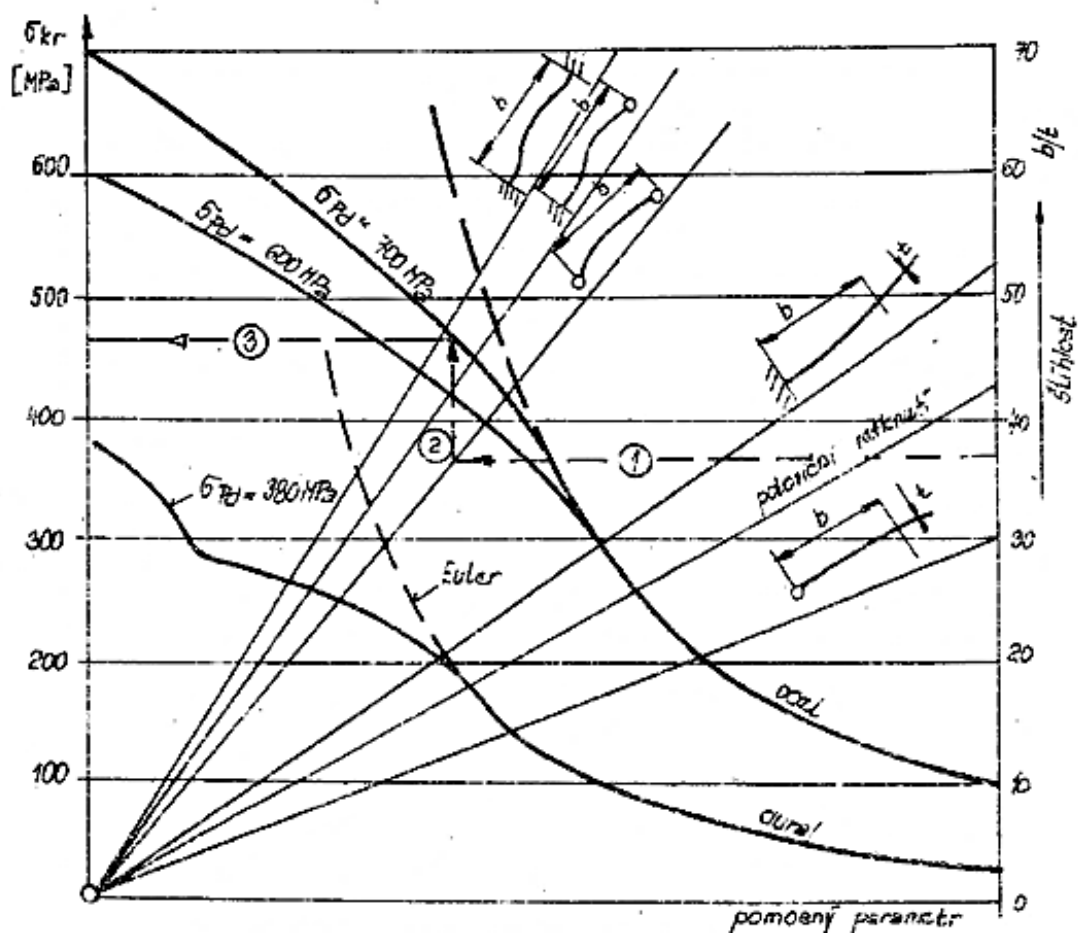
Protlačované profily svou různorodostí a nekonstantní tloušťkou stěn neumožňují určení kritického napětí lokální ztráty stability pomocí konzervativních metod. Pro jeho určení je nutné protlačovaný profil rozdělit podobně jako v metodě I, a využít diagram, ze kterého zjistíme jednotlivá kritická napětí ztráty lokální stability stěn [5]. Výsledné napětí je poté určeno pomocí rovnice (3.13).

### III) Řešení pomocí Timoshenkova diagramu

Třetím možným obecným řešením je pomocí Timoshenkova diagramu, které představuje rychlejší a univerzálnější určení lokálního kritického napětí. Diagram totiž nezávisí na druhu profilu ani na jeho délce. Zahrnuje také vzájemnou tuhost stěn profilu, která je ovlivněna technologií výroby profilu.

Postup řešení je uveden v učebnici [2] a vypadá následovně:

1. Profil rozložíme na rovné jednotlivé rovné stěny.
2. Určíme druh uložení konců stěn vůči sobě. U protlačovaných profilů se uvažuje vetknutí a u ohýbaných profilů kloubové uložení.
3. Vypočteme štíhlost  $b/t$  pro jednotlivé úseky, kde  $b$  je šířka stěny a  $t$  její tloušťka.
4. Z Timoshenkova diagramu určíme  $\sigma_{kr}$ .
5. Vybereme nejmenší  $\sigma_{kr}$ , které je hledané kritické napětí lokální ztráty stability profilu.



Obr. 3.9 Diagram pro stanovení kritického napětí lokální ztráty stability dle Timoshenka [2]

## 4 METODY UCHYCENÍ VZORKU

Mezi nejzákladnějších materiálové zkoušky patří zkouška tlakem, jejíž cílem je určit maximální kritické zatížení pro ztrátu vzpěrné či lokální stability. První zkoušky tohoto typu proběhly již v 18. století z důvodu experimentálního potvrzení Eulerovy teorie, ale k hlubšímu zkoumání a optimalizaci testovacích zařízení došlo až v průběhu 19. století. Dodnes je ztráta stability předmětem zkoumání a jakýkoli nově použitý materiál nebo tvar profilu musí být i dnes experimentálně testován [10].

Článek [11] uvádí 5 faktorů, které ovlivňují výsledky experimentů:

- okrajové podmínky uchycení
- připravena vzorku
- přesně definovaná velikost zatížení
- testovací stroj musí pracovat přesně
- dostupnost přesných metod pro určení parametrů

V praxi nelze dosáhnout ideálního naplnění těchto podmínek. V průběhu experimentu může dojít k nepředvídatelným nepřesnostem, kterým nelze vždy předejít. Pro zpřesnění výsledků je ale třeba věnovat zvýšenou pozornost správné přípravě vzorku a vhodnému uchycení vzorku do testovacího stroje.

S ohledem na okrajové podmínky uchycení konce profilu lze brát v úvahu 3 druhy uchycení, které určují velikost redukované délky, a tím i velikost kritického napětí:

- vetknutí
- kloubové uložení
- uložení mezi pevné stěny

### 4.1 Nedokonalosti ovlivňující výsledky zkoušek

Na základě teorie ztráty stability a velkém množství proběhlých experimentů se dá částečně predikovat chování prutu při zatížení tlakem, ale nikdy ne naprosto přesně, protože pruty a profily obsahují nedokonalosti makroskopické, ale i mikroskopické, které mohou ovlivnit výsledky. Zvýšenou pozornost při přípravě zkoušky tlakem je nutné dbát na uchycení vzorku a samotné zatěžování, které při špatném provedení může také zkreslit výsledky.

#### 4.1.1 Vliv materiálových a tvarových nedokonalostí

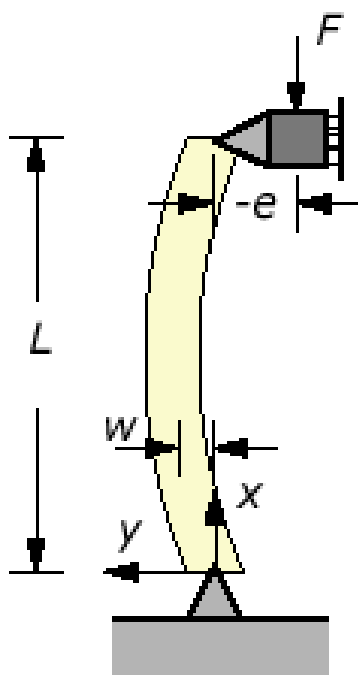
Materiál prutů nelze v praxi považovat za homogenní. Při samotné výrobě se v materiálu mohou vyskytnout mikrotrhliny, které jsou při zatížení koncentrátory napětí. Tvářením za studena vzniká v materiálu vnitřní napětí, které ovlivňuje mez kluzu a mez pevnosti. Značný vliv na mez pevnosti materiálu má také jeho zatěžovací historie. Předchozí tahové zatížení snižuje odolnost materiálu vůči tlakovému zatížení [10].

Pruty a profily se při výrobě i při tvářením za studena mohou zkroutit nebo ohnout, a to jak při protlačování, tak i při ohýbání. S vyšší štíhlostí prutů se vliv zakřivení původní střednice zvyšuje. Rovnání za studena ale také ovlivňuje pevnost materiálu, a to až o 10 %. Žiháním se snižuje mez kluzu, mez pevnosti materiálu a také kritické napětí ztráty lokální stability [10].

### 4.1.2 Vliv excentricity zatížení

Excentricita představuje vzdálenost tlakové síly působící na prut od osy, procházející těžištěm průřezu, tak jako je zobrazeno na obr. 4.1. Zatížení mimo těžiště průřezu způsobuje vznik ohybového momentu, který vytváří ohybové napětí v prutu a ovlivňuje tak výsledky tlakové zkoušky. Ohybový moment může způsobit naklonění prutu, a poté dochází k působení tlakového zatížení pouze na jedné hraně konce prutu. Maximální napětí je rovno součtu normálových a ohybových napětí a vypočítá se podle rovnice (4.1), ve které  $e$  je excentricita a  $r$  je maximální vzdálenost od neutrální osy [10].

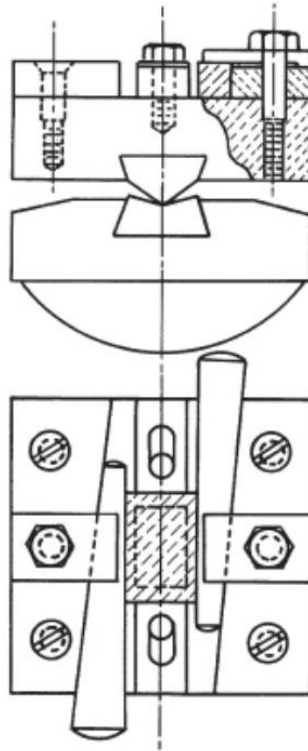
$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} \cdot \left[ 1 + \frac{er}{i^2} \cdot \sec \left( \frac{L}{2i} \sqrt{\frac{F}{EA}} \right) \right] \quad (4.1)$$



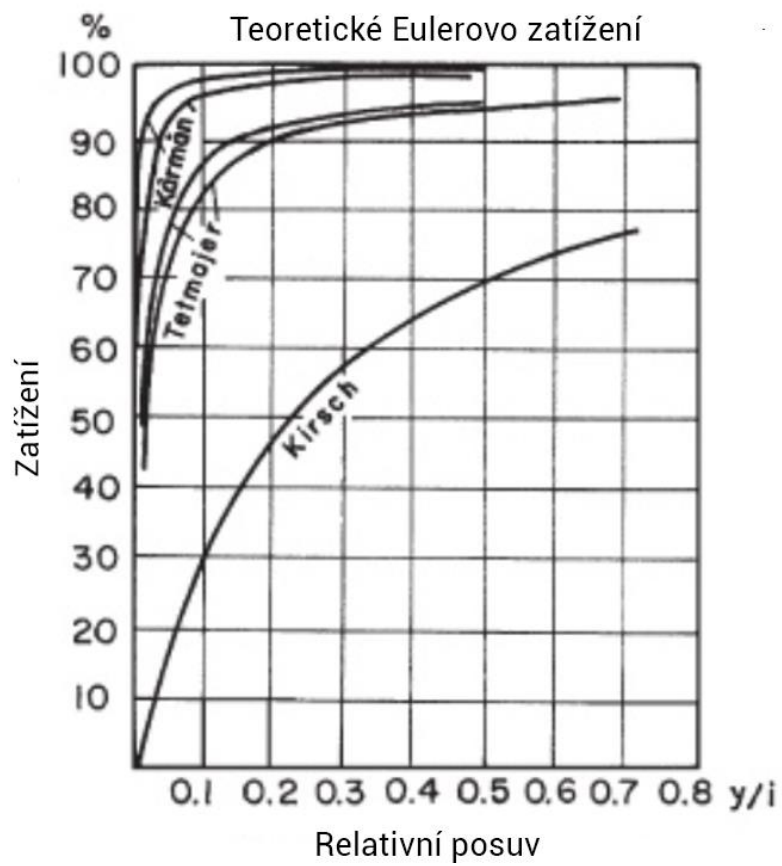
Obr. 4.1 Excentricky zatížený prut [12]

Vlivu excentricity na kritické napětí se věnoval americký fyzik Von Kármán, který věnoval při svých experimentech zvýšenou pozornost právě centrickému zatížení prutu a své výsledky porovnal s ostatními, té době dostupnými daty. Jím navrhnutý přípravek na obr. 4.2, sloužící pro uchycení konce prutu, měl výhodu v tom, že se prut dal vycentrovat i v průběhu zatěžování [13].





Obr. 4.2 Přípravek Von Kármána [13]



Obr. 4.3 Závislost excentricity na zatížení a výchylce [13]

Z obr 4.3 lze usoudit, že při malé excentricitě, řádově desetitisícinách milimetru, se začne prut vychylovat až při dosažení zatížení, které se velice blíží teoretickému Eulerovu zatížení. Při větších excentricitách, v řádech setin dochází díky vzniklému ohybovému momentu vychýlení dříve, než se dosáhne teoretického zatížení.

Tenkostěnné L-profily mají své těžiště mimo svůj průřez, takže je obtížné naprosto zamezit excentricitě. Von Kármán též upozornil na chybu, která vzniká zahrnutím koncových uchycení do celkové délky prutu, tato chyba se však pohybuje v řádu desetin procent [13].

#### 4.1.3 Vliv okrajových podmínek

Pro správné provedení experimentu nebo i analytického výpočtu je důležité definovat okrajové podmínky. Teoretické okrajové podmínky, kterými se řídí Eulerova teorie stability, se bohužel značně liší od těch reálných při experimentu. Okrajové podmínky jsou ovlivněny tím, zda je konci prutu umožněn pohyb nebo je fixovaný. V praxi lze považovat všechny pruty za nedokonale fixované, protože jsou vždy připojeny k přípravku nebo přímo k testovacímu stroji, které nemusí být dostatečně tuhé [10].

Kritické napětí ztráty stability na obou koncích mechanicky upnutých prutů je 8-krát větší než u prutů upnutých pouze na jedné straně. U desek je tento rozdíl dokonce 17,5-krát větší [13].

V praxi je vliv okrajových podmínek těžko definovatelný a lze jej určit na základě většího počtu experimentů a zpracováním získaných dat.

## 4.2 Současné uchycení vzorku

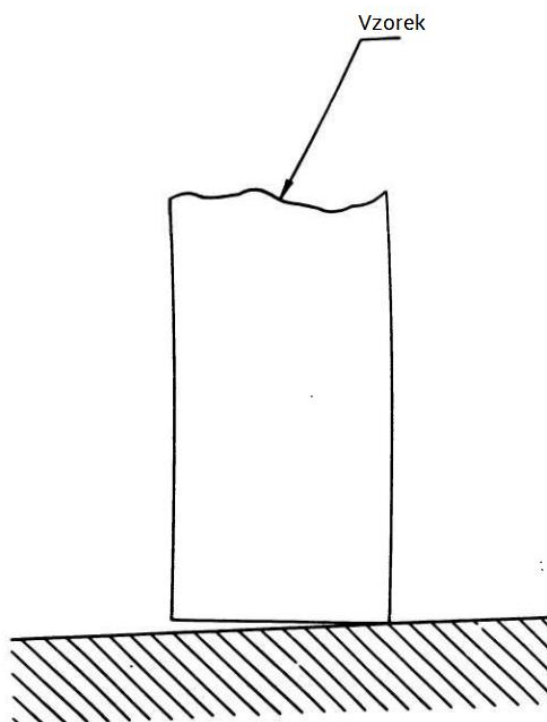
V současné době se zkoušky tlakem provádí na zkušebním stroji Labtest 6.500, který slouží k tahovým a tlakovým zkouškám. Při tlakové zkoušce je vzorek umístěn mezi desky. Horní deska je uložena pevně a spodní deska je uložena v kulovém lůžku, které umožňuje natočení desky a díky tomu částečné vyrovná styk mezi profilem a deskou.



Obr. 4.4 Současné provedení uložení

Problémem tohoto uložení je negativní vliv nerovnoběžnosti koncových ploch vzorku na výsledek zkoušky. Nedostatečná rovnoběžnost a rovinnost těchto ploch zapříčiní nerovnoměrné rozložení zatížení profilu a tím dojde k ovlivnění výsledků. K dosažení dokonalého

povrchu je zapotřebí přesné frézování, které je náročné na čas, technologie i finance. Na nesprávně rozloženém zatížení se může také podílet naklonění desek. Na obr. 4.5 je reprezentován právě tento nedostatek při uložení mezi desky. Z tohoto důvodu se budu snažit nalézt řešení uchycení vzorku, které tento negativní vliv eliminuje.



Obr. 4.5 Skutečné chování vzorku v testovacím stroji [11]

### 4.3 Vetknutí

Vetknutí představuje zřejmě nejvhodnější uchycení profilů do trhacího stroje, protože při něm nevzniká problém s nerovnými koncovými plochami profilu. Vetknutí odebírá 3 stupně volnosti, takže je zamezen jakýkoliv relativní pohyb vzorku vůči testovacímu stroji.

U pevně vetknutých vzorků se obtížně definuje jejich efektivní délka, která rozhoduje o jejich stabilním chování, a výsledky poté mohou být méně spolehlivé [13].

#### 4.3.1 Zalévání profilů do forem

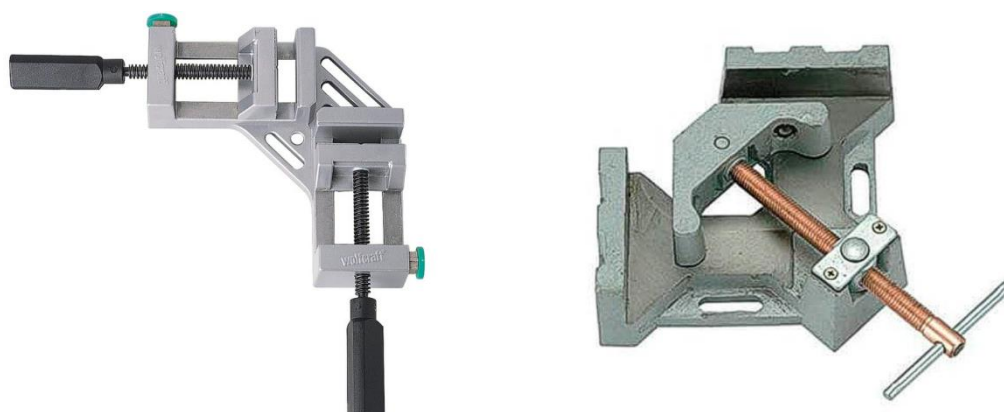
Vetknutí lze simulovat zalitím profilů do speciálních forem, které musí být vyrobeny přesně pro daný druh profilu. Pro zalévání se nejčastěji využívá epoxidová pryskyřice s příměsí kovového prášku, který se používá pro zvýšení tuhosti E.

Epoxidová pryskyřice je polymerní materiál syntetického původu, který slouží v praxi k lepení a zalévání do forem. Epoxidová pryskyřice vyniká svými adhezivními schopnostmi a tvarovou stálostí i po vytvrzení, které proběhne pomocí přidání tvrdidla, a získá tím dostatečnou tvrdost [14].

Výhodou tohoto uložení konce profilu je eliminace negativních vlivů nepřesných koncových ploch a tím zaručení správného rozložení zatížení v průběhu zkoušky. Za nevýhodu lze považovat neuniverzálnost forem a dlouhou dobu přípravy. Formy jsou vyráběny na přesně daný typ profilu, a proto je tato vhodná pro speciální skládané typy profilů nebo se také využívá k testování integrálních panelů. Pro běžné tvary profilů, které nejsou tvarově složité, je vhodnější využít mechanického upnutí, nebo i volného uložení.

### 4.3.2 Mechanické upnutí profilů

Praktičtějším způsobem simulace vetknutí je pomocí mechanického upnutí profilu. Uchycení je provedeno pomocí svěráků, který obepne stěny prutu a tím zabrání axiálnímu pohybu. Styčné plochy svěráku by měly být dostatečně velké, aby došlo ke lepšímu rozložení tlaku na stěny profilu. Drážkování styčných ploch by mělo zamezit axiálnímu pohybu profilu, který by měl za následek kontakt konce profilu s přípravkem.



Obr. 4.6 Rohové dílenské svěráky [15][16]

Mechanické upnutí L-profilu lze realizovat pomocí rohového svěráku, který vyniká svou jednoduchou konstrukcí. Šrouby spojené se stykovými plochami by ale musely být dostatečně tuhé, aby nedocházelo k jejich ohybu, což by ovlivnilo výsledky zkoušky. Nevýhodou rohových svěráků je jejich omezenost na L-profilu. Princip rohového svěráku by po úpravě šel použít i pro Z-profilu.

K upnutí jiných druhů profilů jsou zapotřebí speciální svěráky, které odpovídají daným rozměrům. Uchycení U a C profilů je problematické, protože jejich delší stěna se s rozměry profilu také mění, a proto by musel být svěrák konstruován buď na rozměry konkrétního profilu, nebo by musel být upravovatelný. Musely by být využity tři takové svěráky.

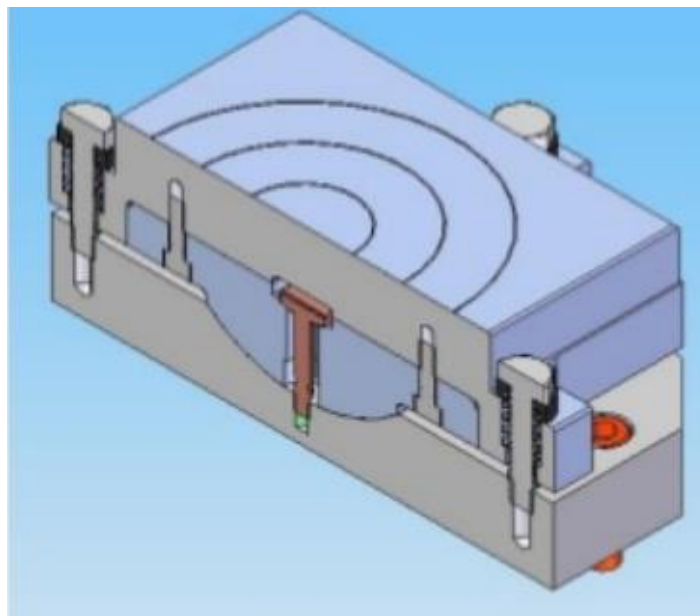
K lepšímu zamezení pohybu vzorku v přípravku a snížení smykového zatížení se využívá teflonových pásek, které jsou nalepeny na stěnách přípravku a zvyšují tak tření mezi vzorkem a přípravkem. Nedochází tak ke vzniku sekundárních smykových napětí ve vzorku, které by ovlivnily výsledky [13].

Velkou výhodou mechanického uchycení je rychlá a jednoduchá obsluha. Tato varianta je také levnější, protože mechanický svěrák je trvanlivější a nemusí se využívat drahých lepidel a forem, tak jako předchozí metody vetknutí. Nevýhodou je nedokonalá tuhost svěráku, která může způsobit vznik ohybových momentů na konci profilu, které by zkreslily výsledky.

Tenkostěnné profily se svými rozdílnými tvary a rozměry jsou pro mechanické svěráky obtížně uchopitelné. Realizování univerzálního svěráku, který by dokázal uchopit více typů profilů, by mohlo představovat zhoršení jeho celkové tuhosti.

## 4.4 Kloubové uložení

Dalším možným uložením je kloubové, které je simulováno pomocí spojení desky přípravku a stroje kulovou či válcovou plochou. Toto uložení je obtížně realizovatelné, protože při velkých zatíženích, které zkušební stroj dokáže vyvinout v průběhu zkoušky tlakem, vzniká velké kontaktní napětí a tření, které prakticky zamezí jakékoli rotaci a ve výsledku lze toto uložení považovat za uložení mezi pevné stěny. Výsledky testování s kloubovým uložením se mohou velmi různit [13].

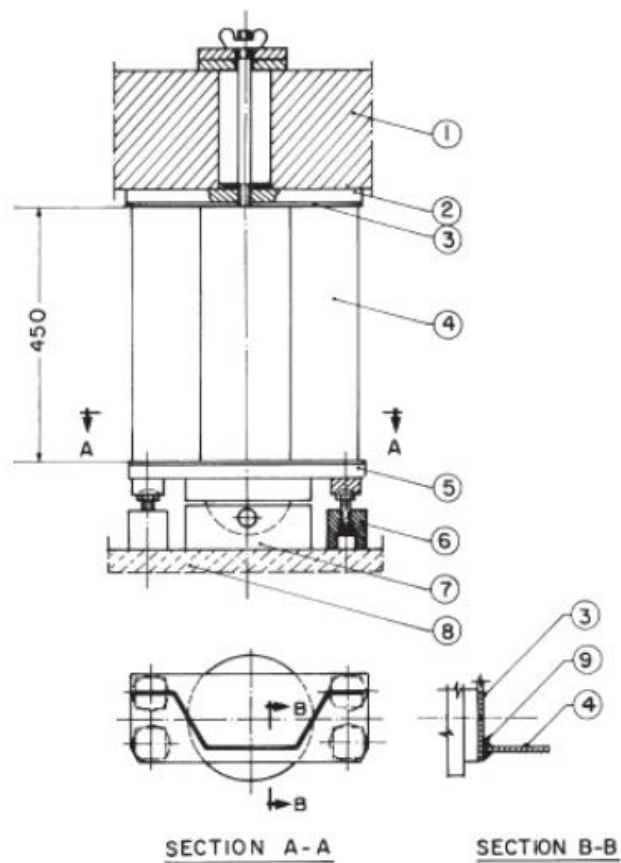


Obr. 4.7 Kloubové uložení pomocí kulové plochy [17]

Ne vždy se využívá pro kloubové uložení válcová nebo kulová plocha. Kloubové uložení lze také realizovat pomocí kónické plochy nebo ostrou hranou (ang. knife edge). Tato uložení vynikají především tím, že se nebezpečný průřez vyskytuje blízko střední výšky prutu a není tak ovlivněn koncovým uchycením. Koncové uchycení takto uložených prutů by ale nesmělo zabraňovat rotaci vzorku na jeho konci [13].

Kloubové uložení tedy nepředstavuje ideální způsob uložení. Je vysoce závislé na kvalitě kulových nebo válcových ploch a jejich mazání. Kontaktní napětí styčných ploch se řídí podle Hertzovy teorie [11].

Hlavní předností kloubových uložení je možnost natočení ploch a tím částečné eliminování problému nerovných konců profilu. Z hlediska konstrukce je toto uložení nejsložitější a jeho správné fungování je ovlivněno mnoha faktory, které jsou často těžko definovatelné a nepředvídatelné. Často se využívají „kulová lůžka“, tak jako v konstrukci přípravku na Strathclydské univerzitě, která je zobrazena na obr. 4.8. Kulové lůžko umožňuje před začátkem zatěžování srovnat kontaktní plochy profilu. Tato poloha je poté zaaretována pomocí šroubů, které zamezí dalšímu natáčení profilu a desky, takže ve výsledku jde o uložení mezi pevné stěny s částečně zlepšeným kontaktem konce profilu s deskou [13].



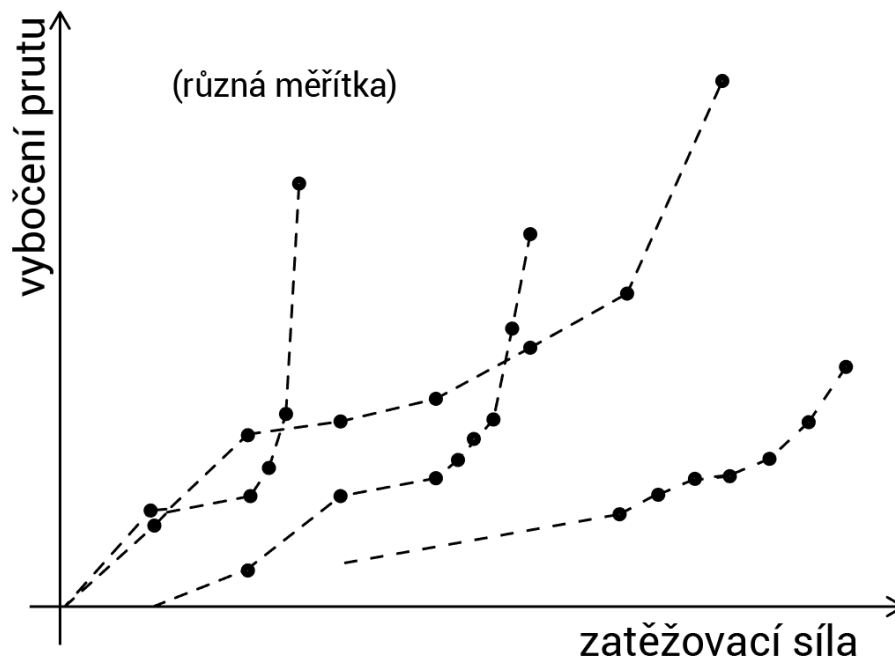
Obr. 4.8 Přípravek na Strathclydské univerzitě [13]

## 4.5 Uložení mezi pevné stěny

Rovnoměrné zatížení plochy konce profilu je nejlépe realizováno uložením profilu mezi 2 rovnoběžné desky, u kterých není zamezen „horizontální“ pohyb vůči stroji. Toto uložení nelze považovat za vetknutí, protože je zatížena pouze koncová plocha profilu a stěny přiléhající konci profilu jsou neuchycené.

Průběh zatěžování takto uložených profilů lze rozdělit do 3 fází, jak uvádí [10]:

- Od začátku zatěžování až do okamžiku, kdy je zatížení rozloženo po obou koncích, se profil chová jako pevně uchycený excentricky zatěžovaný profil.
- Od úplného kontaktu mezi konci prutu a testovacího zařízení až po dosažení maximálního zatížení, se profil prohýbá a chová se jako pevně uchycený.
- Po překročení maximálního zatížení roste vybočení profilu až do stavu, kdy dojde k deformaci příčného průřezu na konci průřezu a k jeho natočení podél jeho hrany. Tento stav nastává při dosažení zatížení odpovídající mezi pevnosti.



Obr. 4.9 Křivky výchylek pro uložení mezi pevné stěny [10]

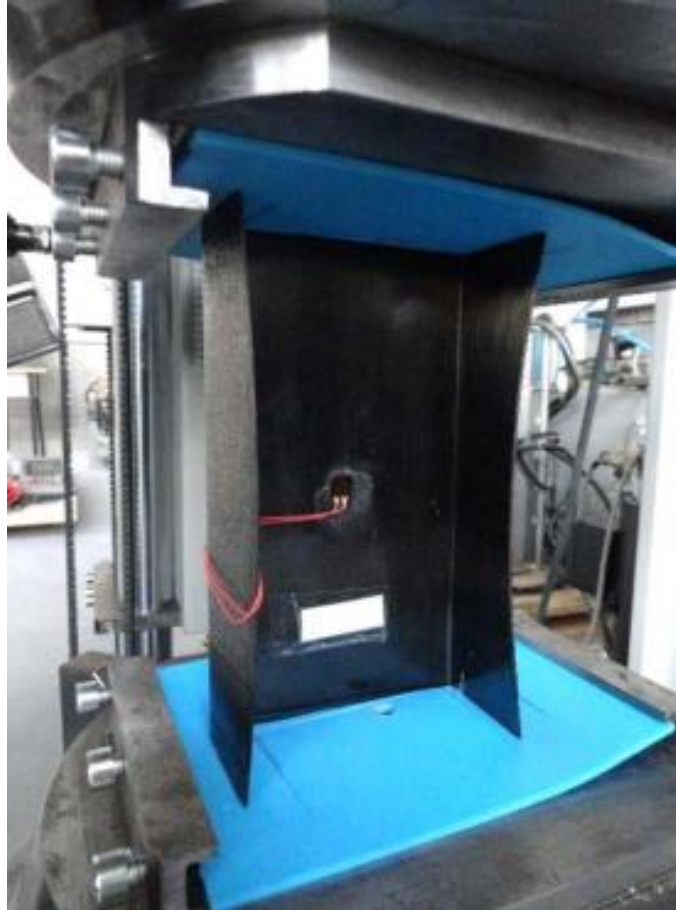
Tento průběh chování se dá rozpoznat ze zatěžovacích křivek volně uložených prutů mezi pevné desky. Lze si povšimnout, že křivky nejsou spojitě, tak jako u zatěžovacích křivek pevně uložených fixovaných prutů. Z počátku zatěžování se chovají jako pevně uložené fixované pruty, ale poté dojde k natočení prutu, které způsobí zlom křivky, a v natočené poloze opět dochází k zatěžování jako u fixovaného prutu [10].

Z takto nelineárního chování prutu lze vinit jeho nedokonalý kontakt s deskami testovacího zařízení. V praxi ale těžko tuto dokonalou rovinnost konce profilu zaručíme. Vlivu nepřesně obrobených konců profilu lze částečně zabránit podložním prutu měkkými podložkami, tak jako na obr. 4.10. Tyto podložky by musely být vyrobeny z materiálu, který by profil nemohl při zatížení prořezat. Podložky dokážou eliminovat malé nerovnosti konců profilu. Pokud by ale byl konec profilu velmi šikmý, tak by rovnoměrnému zatížení nepomohly ani tyto podložky.

Měkké podložky by mohly nahradit malé formy, do kterých by byl zalit konec profilu epoxidovou pryskyřicí a zamezilo by se tak přímému kontaktu s deskou stroje. Takto upravený profil by se vložil mezi desky a byl zatěžován. Nevýhodou by byla neuniverzálnost a delší příprava.

Velkou výhodou tohoto uložení je jeho naprostá univerzálnost. Tímto uložním lze testovat profil jakékoli geometrie průřezu a to např. tvaru Z, U, C nebo také složitější skládané profily.





Obr. 4.10 Tlaková zkouška U-profilu uloženého mezi pevné stěny [18]

#### 4.6 Southwellovo vykreslení

Reálné chování prutů při jejich zatížení se liší od teoretické predikce. Jelikož experimenty mají potvrzovat teorii, tak vznikla metoda, která umožnila korelaci výsledků získaných experimentem a výsledky z teoretické predikce. Tuto metodu prezentoval R.V. Southwell pro jednoduše uchycený prut, ale dá se aplikovat i na desky a stringery a v této metodě je vykreslena výchylka  $\delta$  je vykreslena proti závislosti výchylky na zatížení  $\delta/F$ . Výchylky jsou změřeny pomocí měřidel přetvoření a průběh zatížení od stroje je také známý. Southwellovo vykreslení se řídí podle rovnice (4.2), kde  $a$  je původní výchylka. Směrnice výsledné přímky, která vznikne proložením naměřených dat, určuje kritické zatížení ztráty stability dokonalého prutu. Hlavním cílem je umožnění lepší predikce a potvrzení teorie. Výsledné kritické zatížení určené pomocí Southwellova vykreslení se lišilo od teoreticky vypočítané hodnoty pomocí Eulerovy teorie o 2,2% [13].

$$F_{kr} \cdot \frac{\delta}{F} - \delta - a = 0 \quad (4.2)$$

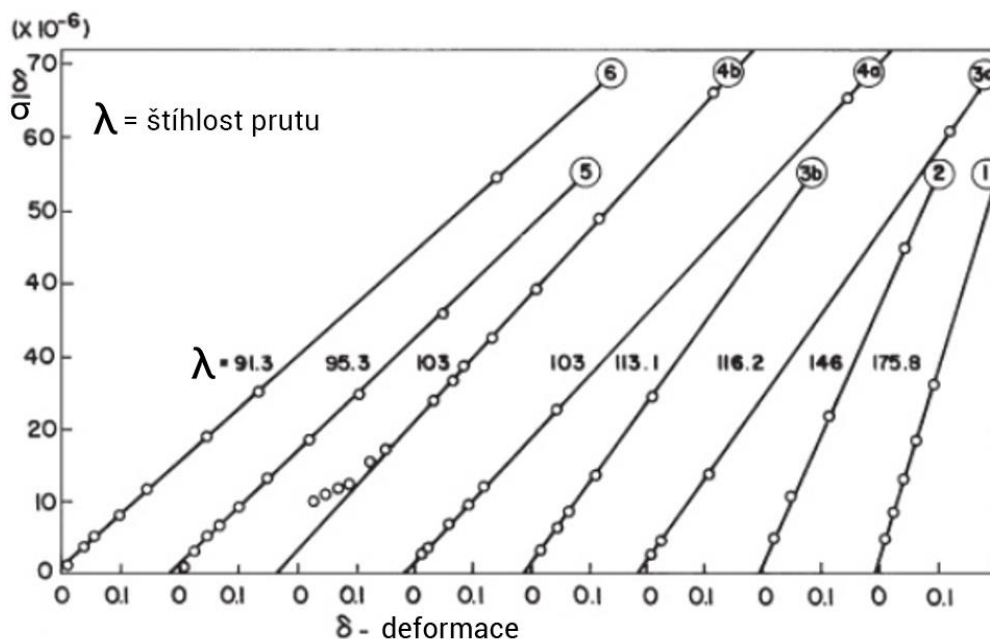
Přesnějším výsledkům se dosáhne využitím Lundquistovy úpravy Southwellovy teorie (4.3), která zahrnuje závislost výchylky  $\delta'$  na původním zatížení  $F'$ . Směrnice je tedy rovna rozdílu  $F_{kr} - F'$  [19].

$$\delta - \delta' = \frac{\delta - \delta'}{F - F'} \cdot (F_{kr} - F') - (\delta' - a) \quad (4.3)$$



Southwellovo vykreslení se využívá jako nedestruktivní testovací metoda, protože pro zjištění kritického zatížení stačí body získané v elastické oblasti, pod mezí kluzu, kdy nedojde k trvalé deformaci prutu [13].

Tato metoda není bezchybná a přináší s sebou další faktory, na které se musí brát ohled. Pro správné popsání přímky je vhodné získat co nejvíce dat, protože s malým počtem experimentů může vzniknout přímka s jinou, nesprávnou směrnici, která neodpovídá reálnému kritickému zatížení. Taková chyba může být až 20 %. Na výsledky získané pomocí Southwellova vykreslení je tedy třeba nahlížet obezřetně [19].



Obr. 4.11 Southwellovo vykreslení tlakem zatěžovaných prutů [13]



## 5 KONSTRUKČNÍ NÁVRH

Na základě informací, které byly shrnuty v předchozí kapitole, vychází jako nejuhodnější metoda uložení pomocí mechanického upnutí konce profilu. Konstrukční návrh bude tedy směřovat tímto směrem a mechanické upnutí bude realizováno na principu rohového svěráku.

### 5.1 Požadavky na výsledný návrh

Při návrhu přípravku se mělo docílit:

- zamezení otáčení a pohybu profilu
- eliminaci negativního vlivu nerovných konců profilů
- rovnoměrného rozložení zatížení od stěn svěráku
- stěny svěráku nesmí deformovat stěny profilu

Přípravek, který byl navrhnout, je uzpůsoben pro testování L a Z profilů při zatěžování tlakem. Testované L-profilu, využívané v leteckém průmyslu, jsou vyráběny podle normy ONL 2371 a ONL 2372 (Příloha č.1 a č.2) a Z-profilu podle normy ONL 2376 (Příloha č.3). Jsou vyráběny v různých rozměrech, a to od poměrně tenkých o tloušťce 1 mm až po tloušťku 6 mm. Profily takto malých rozměrů jsou obtížně mechanicky uchopitelné, protože styčné plochy profilu a desek svěráku jsou velmi malé.

Profily největších rozměrů, např. 60x6 mm dle normy ONL 2371, jsou v letectví méně často využívané a pro testování ztráty stability obtížné, protože kritická síla ztráty stability se blíží limitům testovacího stroje. Tyto profily by při testování musely být dostatečně dlouhé, aby byla kritická síla menší a bylo možné takový profil ve zkušební stroji zatížit. Přípravek bude tedy dimenzován na profily o obsahu příčného průřezu okolo 300 mm<sup>2</sup>. To odpovídá např. symetrickému L-profilu 35x4, nesymetrickému L-profilu 30x40x3x4 a Z-profilu 40x25x1,5x2. V laboratoři Leteckého ústavu se testují vzorky takových rozměrů nebo menších. Pro tyto rozměry odpovídají výsledné upínací síly šroubů již dosažitelným hodnotám.

Navrhnutý přípravek je konstruován na testování profilů rozměrů uvedených v tabulce níže. V tabulce jsou uvedeny pouze protlačované profily, protože ohýbané profily mají širokou škálu používaných rozměrů. Přípravek půjde samozřejmě použít i pro ohýbané profily, ale limitované podobnými rozměry jako jsou ty vybraných protlačovaných. Byly vynechány profily o tloušťkách 5 a 6 mm, protože na Leteckém ústavu se tyto profily testují jen zřídka. Také byl vynechán nesymetrický L-profil o délce stěny 63 mm, protože vybočuje ostatním rozměrům v normě ONL 2372.

V případě profilů, u kterých je kritická síla příliš velká a přípravek nedokáže vyvinout dostatečnou upínací sílu pro zabránění kontaktu s deskou, mohou být zkoušky také prováděny, profil se však musí opřít o desku. Klíny v tomto případě slouží jako zábrany proti natočení a posunutí a zajistí pevné uložení.

Přípravky se obvykle dimenzují na vyšší požadavky, než jsou ty provozní, a to z hlediska bezpečnosti. Navrhnutý přípravek by měl být dimenzován na zatížení 1,5krát až 2krát větší, než které je maximální dovolená síla [20].

Přípravek bude dimenzován pro maximální kritickou sílu **55 kN** což je síla, kterou dokáže přípravek díky tření udržet bez opření profilu o desku přípravku. Na základě této hodnoty kritické síly budou počítány pevnostní výpočty s bezpečností 1,5. Profily, u kterých je

kritická síla ztráty stability vyšší než ta, kterou dokáže přípravek vyvinout, je nutné opřít o desku. To sice přináší negativní vliv neobrobených konců profilu, ale sevření profilu klíny napomůže tomu, že nedojde k jeho natočení a nebude opřen pouze jeho podstavou.

Tab. 5.1 Doporučené profily pro přípravek

<b>Vybrané protlačované profily</b>		
L-profily symetrické ONL 2371	L-profily nesymetrické ONL 2372	Z-profily ONL 2376
12x1	10x16x1.5x1.5	20x15x1.2x1.2
12x1.5	13x16x1.6x1.6	20x15x1.5x1.5
15x1	15x20x1.2x1.5	25x18x1.5x2
15x1.2	15x20x1.5x1.5	25x18x2x2.5
15x1.5	15x20x1.5x2	30x25x2x2.5
15x2	15x20x2x1.5	40x25x1.5x2
18x1	15x25x1x1.5	
18x1.5	15x30x2x2	
18x2	18x20x1x1	
20x1	18x25x1.5x2	
20x1.2	18x25x2x2.5	
20x1.5	18x25x2.5x3	
20x2	18x30x1.5x2	
20x2.5	18x30x2.5x3	
25x1.5	19x32x1.5x1.5	
25x2	19x32x2.4x2.4	
25x2.5	20x25x1.2x1.2	
25x3	20x25x2.5x1.5	
30x1.5	20x30x2x1.5	
30x2	20x30x2x2.2	
30x2.5	20x40x3x2	
30x3	25x30x1.5x1.5	
30x4	25x30x2.5x3	
35x2	25x40x3x4	
35x2.5	25x40x4x3	
35x3	28x45x2x2	
35x4	30x40x3x3	
	30x40x3x4	

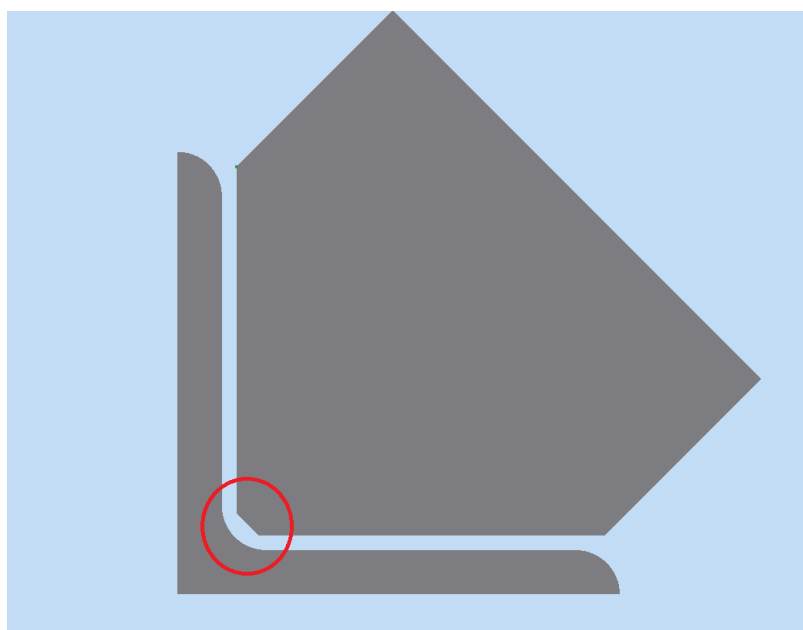
## 5.2 Problematika uchycení profilu

Navrhnutý přípravek musí vyvinout dostatečnou upínací sílu na stěny profilu, aby bylo zamezeno kontaktu mezi profilem a deskou přípravku a profil byl pevně upnut.

### 5.2.1 Dosedání klínu do rohu profilu

Uchycení L-profilů lze považovat za nejjednodušší v porovnání s uchycením ostatních tvarů profilů, ale také zde se vyskytují komplikace. Protlačované, ale i ohýbané profily,

mají v rohu nebo ohybu zaoblení, jehož poloměr je závislý na tloušťce profilu. Tento problém je vyobrazen na obr. 5.1. Rohová hrana přípravku by tedy musela být buď zkosená, nebo zaoblená, avšak u obou variant by mohlo docházet k tomu, že by byl daný profil zatěžován pouze v tomto místě a koncentrovalo by se zde napětí. Zároveň by mohlo dojít k natočení profilu v průběhu zatěžování, pokud by byl profil upevněn pouze v tomto rohu profilu. Z tohoto důvodu by bylo nejvhodnější navrhnout více druhů klínů, které by odpovídaly zaoblením rohové hrany danému zaoblení profilu, nebo vytvořit zaoblení či zkosení dostatečně velké, aby k tomuto kontaktu vůbec nedošlo a síly se rozložily na stěny profilu.



Obr. 5.1 Detail hrozícího špatného kontaktu klínu a profilu v jeho rohu

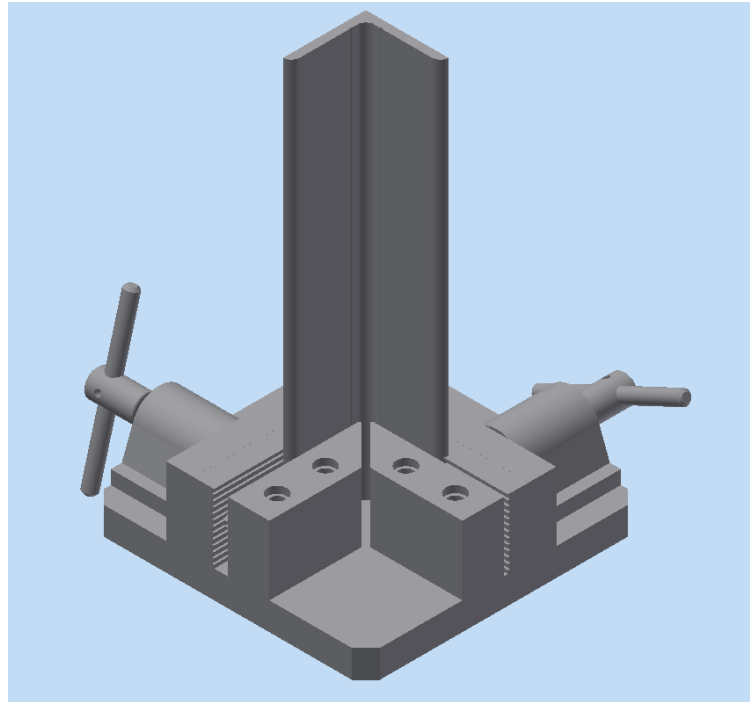
### 5.2.2 Vliv excentricity zatěžování

Dalším problémem, který při návrhu konstrukce nastává, je změna polohy těžiště v závislosti na průřezu profilu. Především u asymetrických profilů by tato změna polohy těžiště mohla způsobit excentricitu zatížení a tím by byly ovlivněny hodnoty kritického napětí. Symetrické profily mají těžiště uloženo na ose symetrie, tudíž není vliv excentricity tak výrazný. Za předpokladu dostatečné tuhosti přípravku a jeho spojení se zkušebním strojem, je však vliv excentricity zanedbatelný.

### 5.2.3 Návrhové koncepty

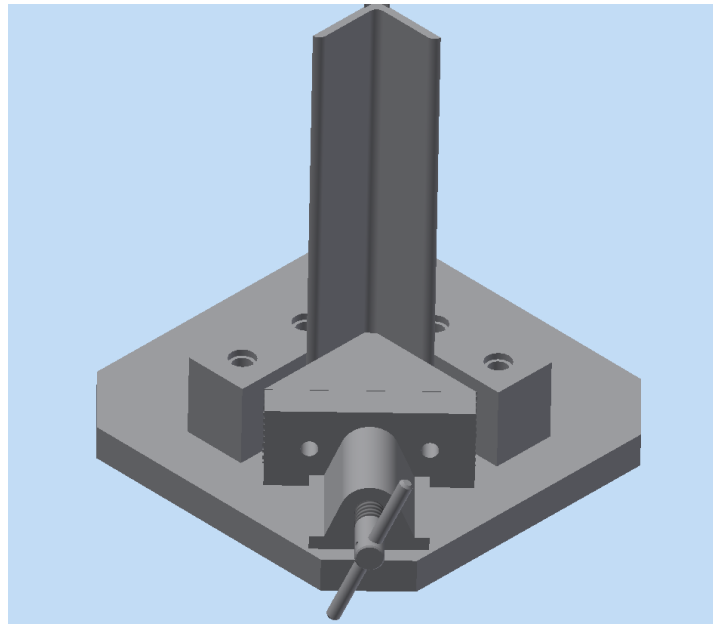
Uchycení L-profilů lze realizovat více způsoby. Byly uvažovány dva základní koncepty:

- Prvním je uložení vnitřních stěn profilu na pevné stěny přípravku a na vnější stěny působí tlakem dvě pohyblivé desky svěráku. Výhodou je možnost uchycení profilů s nesymetrickými tloušťkami stěn. Problém nastává při upínání profilů nejmenšího průřezu, kdy na stěny profilů působí pouze krajní část svěráku a dochází tak k nedokonalému zatížení. Z tohoto hlediska je tento návrh nevhodný.



Obr. 5.2 První koncept řešení konstrukce přípravku

- Ve druhém konceptu jsou vnější stěny v kontaktu s pevnými stěnami přípravku a pohyblivý klín tlačí na vnitřní stěny. Toto uložení je konstrukčně jednodušší, protože je konec profilu upnut pouze jedním šroubem, avšak na tento šroub jsou kladeny vyšší pevnostní nároky. Předností tohoto způsobu uchycení je snadnější uchycení profilů malých rozměrů. Upínání profilů nesymetrických tlouštěk je však v tomto konceptu problematictější.







Obr. 5.3 Druhý koncept řešení konstrukce přípravku

### 5.2.4 Vliv zpracování kontaktní plochy mezi klínem a profilem

Na správné upnutí má nemalý vliv drážkování desek svěráku, protože tyto kontaktní plochy určují výsledné rozložení tlaku na profilu. Lze uvažovat obdélníkové rýhování nebo také jemné kosoúhlé vroubkování. Drážky neovlivňují statické Coulombovo tření mezi profilem a čelistí, ale tvoří tvarové spojení. Ostré hrany kosoúhlého vroubkování se mohou do nedostatečně tvrdého vzorku zařezávat, což způsobí deformaci vzorku. Drážky se tak mohou častým používáním otupit. Pro čelisti je v návrhu zvoleno jemné kosoúhlé vroubkování, které zvýší součinitel tření [20]. Součinitel tření při ocelové součásti z literatury [20] je pro jemné vroubkování s ostrými hroty 0,8 a více. Reálný součinitel při styku oceli a hliníku bude menší. Toto drážkování je využito také v konstrukci přípravku pro tahovou zkoušku na Leteckém ústavu.

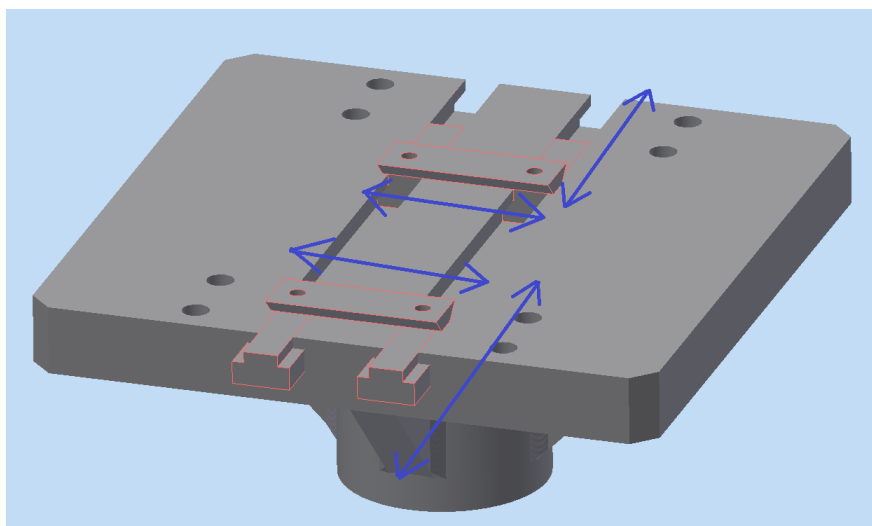
Tab. 5.2 Druhy čelistových ploch a jejich třecí součinitelé [20]

přípravku	Dotykové plochy		Součinitel tření při součásti	
		součásti	ocelové	litinové
s ostrým hrotem		neobrobené	0,80 i více	—
s malými ploškami		hrubě obrobené nad 3,2 μm	0,40 až 0,50	—
hladké rýhované		hrubě obrobené nad 3,2 μm	0,20 až 0,24	0,18 až 0,22
hladké rýhované		hrubě obrobené nad 3,2 μm	0,18 až 0,24	0,16 až 0,21
hladké	suché	neobrobené	0,27 až 0,32	0,24 až 0,27
hladké	suché	hrubě obrobené nad 3,2 μm	0,18 až 0,23	0,15 až 0,19
hladké	mazané	hrubě obrobené nad 3,2 μm	0,16 až 0,18	0,14 až 0,18
hladké	suché	jemně obrobené pod 3,2 μm	0,18 až 0,20	0,16 až 0,18
hladké	mazané	jemně obrobené pod 3,2 μm	0,16 až 0,20	0,14 až 0,16

\*) Směr působení řezné síly.

### 5.2.5 Rovnoměrné rozložení sil na profil

Síly na profil se rozkládají na jednotlivé stěny profilu, a ne vždy je toto rozložení na obou stěnách stejné. Tomuto by částečně mohl zabránit posuvný klín, který by také pomohl lepšímu ustavení vůči profilu. Klín by byl uložen na vodítku, které by bylo uloženo ve vedení v základové desce a umožnilo by pohyb ve dvou osách z důvodu lepšího rozložení síly na nesymetrický profil. Klíny nemohou být pouze položeny na desce přípravku, protože by z přípravku uloženého na horní straně stroje spadly. Tomu také zabrání drážky tvaru T nebo rybinové drážky.

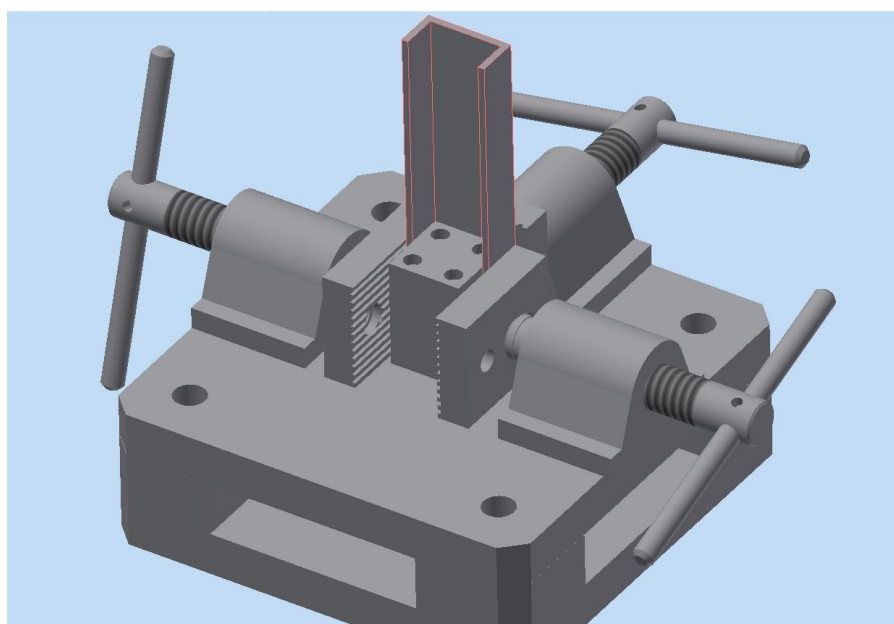


Obr. 5.4 Původní provedení vodítek

Posun vodítka v jedné ose by byl umožněn pohybem v drážce tvaru T a posun klínů na vodítku by zajistila rybinová drážka, která je však na výrobu složitější než drážka tvaru T. Pro klíny uchycující Z-profil by drážky na jejich podstavě nebyly vhodné kvůli jejich tvaru. Z tohoto důvodu byla T-drážka dle DIN 650 umístěna na zadní stěnu klínu a systém vodítek v desce přípravku může být vyloučen. Při konstrukci drážek v klínech bylo třeba přidat materiál, což rozšířilo celkovou šířku klínu.

#### 5.2.6 Návrh řešení upínání U a C profilů

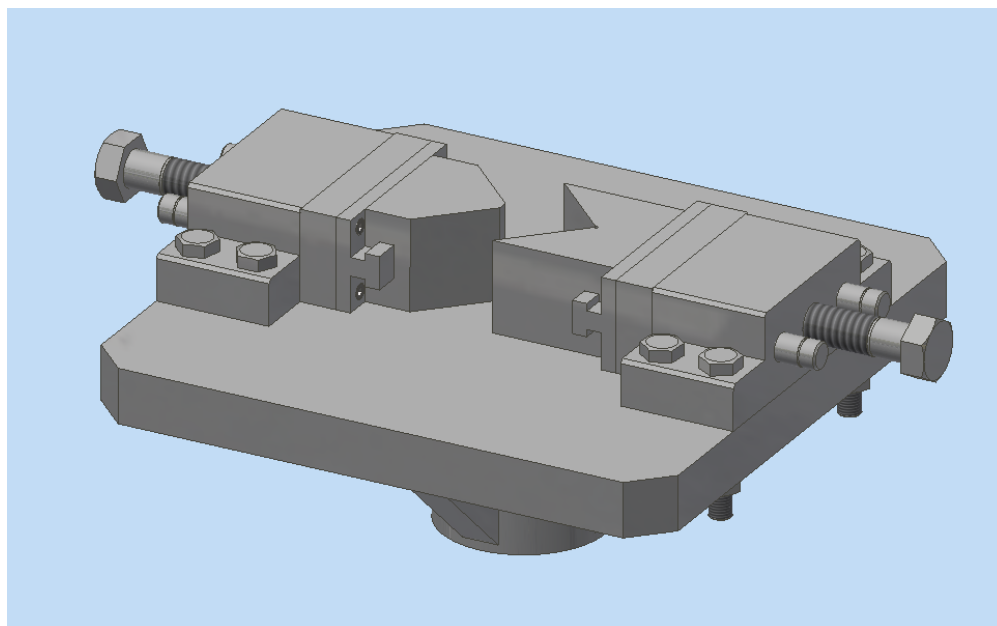
Mechanické upnutí pomocí sevření by bylo realizovatelné i u tvarů U a C, a to pomocí vložky, která by byla pevná a musela odpovídat rozměrům vnitřního obvodu daného profilu, a tří svěrek, které by profil přitlačily k vložce. Pevnou vložku by mohla nahradit soustava klínů, ale toto uložení by bylo velmi neefektivní z hlediska tuhosti. Nevýhodou tohoto uložení je nutnost výroby více desek a vložek pro konkrétní rozměry profilu. Pro profily těchto tvarů je vhodnější uložení mezi pevné stěny než mechanické upnutí.



Obr. 5.5 Koncept řešení konstrukce přípravku pro uchycení U-profilu



### 5.3 Výsledný návrh konstrukce přípravku



Obr. 5.6 Výsledný návrh přípravku pro uchycení L-profilů

Konstrukční návrh, který byl zpracován a je zobrazen na obr. 5.6, vycházel ze druhého konceptu, který je založen na tlačném klínu. Toto řešení je výhodnější, protože dokáže upnout širší spektrum profilů a také lze takový přípravek rozšířit o upínání Z-profilů. Maximální rozměry přípravku jsou **462x320x180 mm** a jeho hmotnost je **42,1 kg**.

V návrhu byly využity dva protichůdné svěráky, které upnou profil mezi tlačné klíny. Jeden klín, opřen o desku jednoho šroubu, bude sloužit jako pevná stěna, do které bude tlačít klín, který je veden druhým šroubem. Toto řešení umožní nastavení polohy těžiště profilu přesně nad osu zkušebního stroje. Tím se eliminuje vliv excentricity. Pro přesnější upínání bude vhodné přidat na desku pravítko, které částečně pomůže předejít nepřesnému uložení v rámci dvou přípravků na obou stěnách trhačího stroje. Svěráky jsou k desce přípravku připojeny lícovanými šrouby.

Pro správné vedení šroubu svěráku byly do konstrukce přidány dvě vodící tyče, které zamezují natočení tlačné desky nebo klínu. Také přispívají ke zpevnění svěráku a částečně zmírňují smykové zatížení, které by na šroubu mohlo vzniknout.

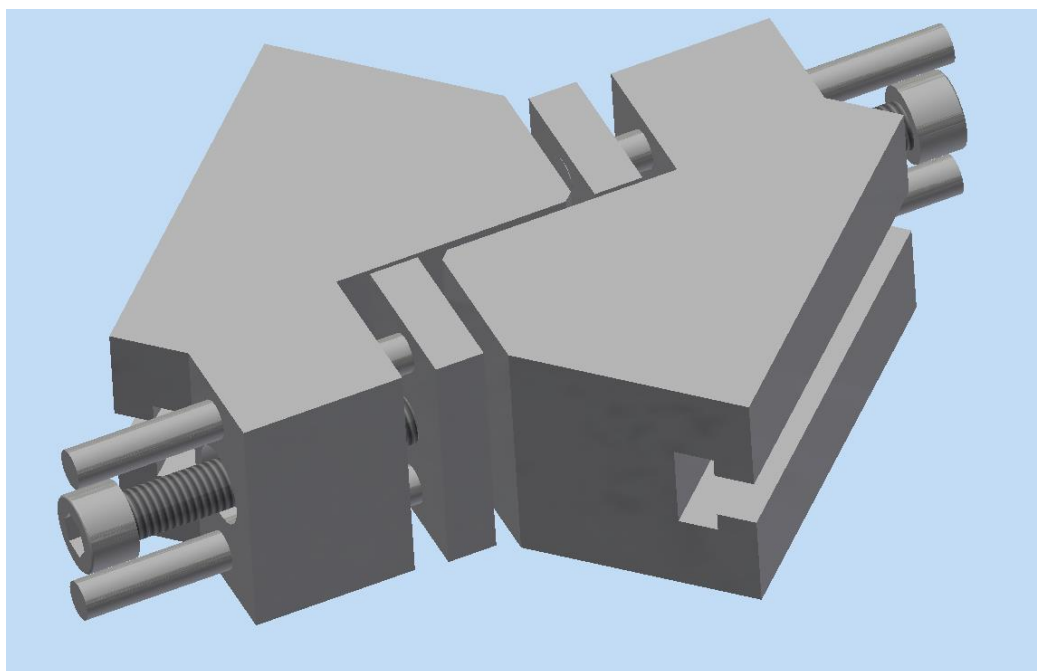
Šroub, který bude vyvíjet upínací sílu, tlačí přímo na tlačnou desku a je zajištěn pojistným kroužkem, který umožní povolení šroubu. Síly pro povolení již nejsou tak velké. Pro šroub, který bude tlačít na desky, které budou svírat profil, byl zvolen lichoběžníkový rovnoramenný závit Tr 20x2, který se často používá u pohybových šroubů. Lichoběžníkový závit je z hlediska namáhání na ohyb a stříh výhodnější než čtvercový [21]. Hlava tohoto šroubu bude odpovídat šestihranné hlavě metrických šroubů M20, aby šly použít obvyklé hlavice momentových klíčů. Pro jednodušší ustavení momentového klíče je hlava tlačného šroubu opatřena límcem dle normy DIN 6921.

Po nainstalování přípravku a všech jeho součástí, bude možné měnit pouze klíny, které se nasunou na vodítka. To ušetří čas, protože nebude nutné demontovat svěráky.

Pro uchycení vzorku do zkušebního stroje jsou nutné dva přípravky, které jsou naprosto identické, a jsou k němu připojeny závitem M52x2. Toto spojení přípravku a stroje musí být tuhé a nehybné, protože jinak by mohl vznikat ohyb již v rámci desky přípravku, což by způsobilo vznik ohybových momentů, které by mohly narušit pevné upnutí profilu či vyvolat excentricitu. Na zkušebním stroji je použita kontramatice, aby bylo zamezeno odtočení závitu. Pro zlepšení celkové tuhosti přípravku je základová deska přípravku vyztužena žebry, které zamezí jejímu ohýbání.

Navrhnutým přípravkem bude možné upínat i ohýbané profily tvaru L a Z. Spektrum ohýbaných profilů je však velmi široké a bylo by značně obtížné vytvořit tabulku, která by pokryla všechny rozměry ohýbaných profilů, které se dají vyrobit.

Pro profily tvaru Z bylo třeba navrhnout komplexnější řešení klínů. Tyto klíny jsou také dva a jsou aplikovatelné na přípravek, který byl navržen pro L-profilu. Klíny jsou opatřeny samostatnými tlačnými deskami, které napomůžou uzpůsobit klíny daným rozměrům Z-profilu. Klíny jsou poměrně objemná, proto kvůli tomu musely být zvětšeny celkové rozměry přípravku. Kvůli nedostatku místa v okolí klínů byl zvolen šroub s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem, který zabezpečí právě funkci sevření stěny. Také zde bylo využito vodicích tyčí. Maximální uvažovaný profil je dle ONL 2376 40x25x1,5x2.



Obr. 5.7 Speciální klíny pro uchycení Z-profilu

## 5.4 Výpočty

Pro vytvoření bezpečného a efektivního návrhu konstrukce byly provedeny základní výpočty, které byly zaměřeny především na výpočet upínacích sil, ohybových momentů a také pevnost šroubu.

### 5.4.1 Výpočet kritické síly vybraných profilů

Kritická síla vzpěrné stability je určující pro správné dimenzování konstrukce přípravku pro testování vzorků. Rozhodujícím ukazatelem je především kritická síla lokální ztráty stability, která už i u profilů menšího příčného průřezu dosahuje hodnot desítek kN.

Pro vybrané profily byly určeny hodnoty kritického napětí lokální ztráty stability z Timoshenkova diagramu (Obr. 3.9) a poté byly vypočteny kritické síly vynásobením plochou příčného průřezu. Tyto kritické síly jsou uvedeny v Tab. 5.3, která se týká symetrických L-profilů. V Příloze č. 6 a Příloze č. 7 jsou určeny hodnoty pro kritické síly lokální ztráty stability nesymetrických L-profilů a Z-profilů.

Tab. 5.3 Kritická napětí lokální ztráty stability symetrických L-profilů

<b>Kritická napětí lokální ztráty stability symetrických L-profilů</b>				
<i>Určeno pomocí Timoshenkova diagramu pro profily ONL 2371</i>				
Rozměry profilu [mm]	b/t [-]	A[mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{kr}$ [MPa]	F <sub>kr</sub> [N]
12x1	12	23.4	<b>260</b>	<b>6084</b>
12x1.5	8	34	<b>278</b>	<b>9452</b>
15x1	15	29.4	<b>240</b>	<b>7056</b>
15x1.2	12.5	35.3	<b>247</b>	<b>8719.1</b>
15x1.5	10	43.4	<b>270</b>	<b>11718</b>
15x2	7.5	56.4	<b>279</b>	<b>15735.6</b>
18x1	18	35.7	<b>212</b>	<b>7568.4</b>
18x1.5	12	52.4	<b>260</b>	<b>13624</b>
18x2	9	68	<b>272</b>	<b>18496</b>
20x1	20	39.7	<b>196</b>	<b>7781.2</b>
20x1.2	16.67	47.3	<b>222</b>	<b>10500.6</b>
20x1.5	13.33	58.4	<b>255</b>	<b>14892</b>
20x2	10	76.4	<b>270</b>	<b>20628</b>
20x2.5	8	94	<b>278</b>	<b>26132</b>
25x1.5	13.33	73.4	<b>255</b>	<b>18717</b>
25x2	12.5	96.4	<b>247</b>	<b>23810.8</b>
25x2.5	10	118.9	<b>270</b>	<b>32103</b>
25x3	8.33	142	<b>275</b>	<b>39050</b>
30x1.5	20	88.4	<b>196</b>	<b>17326.4</b>
30x2	15	116.4	<b>240</b>	<b>27936</b>
30x2.5	12	144.1	<b>260</b>	<b>37466</b>

30x3	10	172	<b>270</b>	<b>46440</b>
30x4	7.5	226	<b>279</b>	<b>63054</b>
35x2	17.5	136.4	<b>218</b>	<b>29735.2</b>
35x2.5	14	170	<b>245</b>	<b>41650</b>
35x3	11.67	202	<b>260</b>	<b>52520</b>
35x4	8.75	265	<b>271</b>	<b>71815</b>

Kritická síla vzpěrné stability závisí na délce profilu, a tudíž se její hodnoty pro jednotlivé profily liší. Byla proto vytvořena tabulka, ve které jsou uvedeny hodnoty kritických sil pro vybrané profily o délkách od 100 mm do 1000 mm po 100 mm krocích. Předpokládá se, že profil je v navrhnutém přípravku vetknut, tudíž je  $c=4$ .

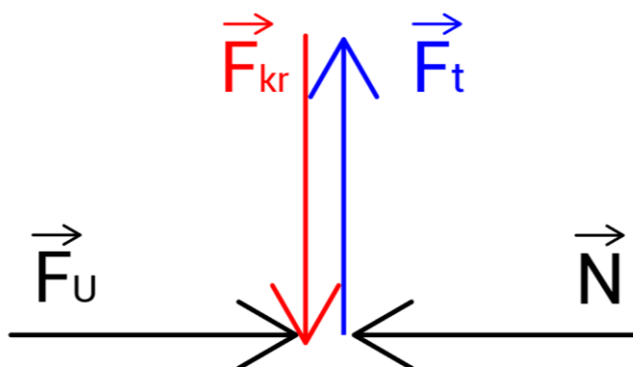
Níže uvedená tabulka tab 5.4 reprezentuje únosnost vybraných profilů a kombinuje výsledky kritických sil lokální a vzpěrné stability. Při určitých délkách totiž nastane dříve lokální ztráta stability, protože je její kritická síla menší než kritická síla vzpěrné stability pro danou délku. Modrá políčka představují právě tento případ. Šedá políčka vyznačují hodnoty kritických sil, které nejsou pro přípravek doporučeny, tudíž je testování profilů těchto rozměrů pro tento přípravek nevhodné. Podobná tabulka kritických sil ztráty stability nesymetrických L-profilů je k dispozici v Příloze č. 4.

Tab. 5.4 Tabulka kritických sil ztráty stability symetrických L-profilů pro různé délky

Tabulka kritický sil ztráty stability symetrických L profilů										
Profily dle normy ONL 2371, ČSN 424201.61										
Délka [mm]	Kritická síla [N]									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Rozměry profilu [mm]										
12x1	6084.0	6084.0	4145.3	2331.8	1492.3	1036.3	761.4	582.9	460.6	373.1
12x1.5	9452.0	9452.0	5965.7	3355.7	2147.6	1491.4	1095.7	838.9	662.9	536.9
15x1	7056.0	7056.0	7056.0	4635.9	2966.9	2060.4	1513.7	1159.0	915.7	741.7
15x1.2	8719.1	8719.1	8719.1	5484.3	3509.9	2437.4	1790.8	1371.1	1083.3	877.5
15x1.5	11718.0	11718.0	11718.0	6715.2	4297.7	2984.5	2192.7	1678.8	1326.4	1074.4
15x2	15735.6	15735.6	15735.6	8672.3	5550.3	3854.4	2831.8	2168.1	1713.0	1387.6
18x1	7568.4	7568.4	7568.4	8108.5	5189.5	3603.8	2647.7	2027.1	1601.7	1297.4
18x1.5	13624.0	13624.0	13624.0	11804.5	7554.9	5246.4	3854.5	2951.1	2331.8	1888.7
18x2	18496.0	18496.0	18496.0	15302.1	9793.3	6800.9	4996.6	3825.5	3022.6	2448.3
20x1	7781.2	7781.2	7781.2	7781.2	7162.4	4973.9	3654.3	2797.8	2210.6	1790.6
20x1.2	10500.6	10500.6	10500.6	10500.6	8500.8	5903.3	4337.1	3320.6	2623.7	2125.2
20x1.5	14892.0	14892.0	14892.0	14892.0	10455.1	7260.5	5334.2	4084.0	3226.9	2613.8
20x2	20628.0	20628.0	20628.0	20628.0	13582.8	9432.5	6930.0	5305.8	4192.2	3395.7
20x2.5	26132.0	26132.0	26132.0	26132.0	16571.3	11507.9	8454.8	6473.2	5114.6	4142.8
25x1.5	18717.0	18717.0	18717.0	18717.0	18717.0	14412.4	10588.7	8107.0	6405.5	5188.5
25x2	23810.8	23810.8	23810.8	23810.8	23810.8	18685.7	13728.3	10510.7	8304.7	6726.8
25x2.5	32103.0	32103.0	32103.0	32103.0	32103.0	23028.6	16919.0	12953.6	10235.0	8290.3
25x3	39050.0	39050.0	39050.0	39050.0	39050.0	27098.6	19909.2	15243.0	12043.8	9755.5
30x1.5	17326.4	17326.4	17326.4	17326.4	17326.4	17326.4	17326.4	14164.0	11191.3	9064.9
30x2	27936.0	27936.0	27936.0	27936.0	27936.0	27936.0	24220.0	18543.4	14651.6	11867.8
30x2.5	37466.0	37466.0	37466.0	37466.0	37466.0	37466.0	29741.8	22771.0	17991.9	14573.5
30x3	46440.0	46440.0	46440.0	46440.0	46440.0	46440.0	35083.2	26860.6	21223.2	17190.8
30x4	63054.0	63054.0	63054.0	63054.0	63054.0	63054.0	45308.4	34689.2	27408.8	22201.1
35x2	29735.2	29735.2	29735.2	29735.2	29735.2	29735.2	29735.2	29735.2	23509.1	19042.4
35x2.5	41650.0	41650.0	41650.0	41650.0	41650.0	41650.0	41650.0	36619.4	28933.9	23436.4
35x3	52520.0	52520.0	52520.0	52520.0	52520.0	52520.0	52520.0	43283.5	34199.3	27701.5
35x4	71815.0	71815.0	71815.0	71815.0	71815.0	71815.0	71815.0	56074.8	44306.0	35887.9

### 5.4.2 Výpočet upínací síly

Z důvodu zamezení kontaktu vzorku se základovou deskou přípravku, musí svěráky vyvinout dostatečnou přítláčnou sílu, kterou vzorek upnou tak pevně, že se při zatěžování dosáhne kritické síly ztráty stability. Pohybu vzorku v testovacím stroji při zatěžování zabráňuje upínací síla  $F_u$ , která způsobuje vznik třecí síly  $F_t$ . Síla  $N$  je reakce na sílu  $F_u$ . Vypočítaná upínací síla  $F_u$  je celková síla nutná pro správné upnutí profilu. Pro pevné upnutí musí však platit nerovnost (5.2). Maximální kritická síla, kterou přípravek bezpečně uchytí, byla stanovena na **55 kN**. Součinitel statického tření mezi materiály ocel-hliník je za sucha 0,61. Tření mezi klínem a profilem je však větší díky jemnému drážkování, které dle Tab. 5.2 zvyšuje součinitel tření na **0,8**. V praxi se třecí součinitel může lišit od toho tabulkového, protože nečistoty nebo mastnota mohou tento součinitel změnit [21].



$$F_u = \frac{F_t}{f_s} \quad (5.1)$$

$$F_u = \frac{55000}{0,8} = 68750 \text{ N} \quad (5.2)$$

$$F_t \geq F_{kr} \quad (5.3)$$

Pro maximální hodnotu  $F_{kr}=55 \text{ kN}$  je  $F_u=68,75 \text{ kN}$ .

### 5.4.3 Utahovací moment pohybového šroubu

Utahovací moment je moment, kterým se musí šroub utáhnout, aby dosáhl určeného předpětí. Vypočítá se podle rovnice (5.4), která je uvedena v [21].

$$M_u = \frac{F_u d_2}{2} \cdot \left( \frac{P_h \cos(\alpha / 2) + \pi f d_2}{\pi d_2 \cos(\alpha / 2) - f P_h} \right) \quad (5.4)$$

$$M_u = \frac{68750 \cdot 18}{2} \cdot \left( \frac{2 \cdot \cos(30 / 2) + \pi \cdot 0,11 \cdot 19}{\pi \cdot 19 \cdot \cos(30 / 2) - 0,11 \cdot 2} \right) = 96631 \text{ Nmm} = 96,631 \text{ Nm} \quad (5.5)$$

V rovnici (5.4) je  $d_2$  střední průměr závitu,  $\alpha$  je úhel stoupání,  $f$  je součinitel tření v závitu. Součinitel tření v závitu výrazně ovlivňuje velikost utahovacího momentu [21].

Utahovací moment je z hlediska návrhu konstrukce přípravku omezující. Šroub přípravku bude dotahovat obsluha pomocí momentového klíče. Délka klíče a síla, kterou dokáže obsluha vyvinout, je omezena. Experimentálně bylo zjištěno, že na momentový klíč obsluha dokáže bez větších problémů vyvinout moment síly o hodnotě okolo **100 Nm**. Pro dosažení vyšší hodnoty momentu síly je vhodné prodloužit rameno klíče.

### 5.4.4 Samosvornost šroubu

Samosvornost šroubu je pro přípravky, a obecně pohybové šrouby, velice důležitá. Zabraňuje povolení šroubu, které by mohlo způsobit zmaření experimentu nebo poškození přípravku a testovacího stroje. Je způsobena třením v závitu a pro její naplnění musí platit nerovnost (5.6) uvedená v [21].

$$\pi f d_2 > P_h \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (5.6)$$

V této nerovnosti je  $d_2$  je střední průměr závitu,  $P_h$  je jeho stoupání závitu a  $\alpha$  je úhel profilu závitu.

$$\pi \cdot 0,11 \cdot 19 > 2 \cdot \cos\left(\frac{15}{2}\right) \quad (5.7)$$

$$6,566 > 1,932 \quad (5.8)$$

Tato podmínka samosvornosti je za vybraných parametrů návrhu splněna.

### 5.4.5 Pevnostní kontrola pohybového šroubu

Zatěžovací síla stroje působí kolmo na osu šroubu, avšak konstrukce zamezuje přímému zatížení šroubu na ohyb a stříh, protože veškerá síla se přenáší přes klíny do desky přípravku. Šroub bude kontrolován především z hlediska tlakového zatížení. Materiál šroubu byl zvolen 14140, který má hodnotu  $R_e=660$  MPa a  $R_m=900$  MPa, z důvodu vysoké hodnoty meze kluzu. Styková plocha mezikruží je velmi malá a musí přenést vysoký tlak.

#### Ohyb a stříh pohybového šroubu

Kontrolu na ohyb není nutné provádět, protože je přípravek navržen tak, aby se klíny a tlačné desky opřely o desku přípravku a zamezili tak jakémukoli ohybu, který by mohl vzniknout ve šroubu. Šroub je tedy zatěžován pouze na tah a tlak.

### Otlačení stykové plochy

Mezikruží na pohybovém šroubu o ploše  $A_m$  je kromě závitu nejvíce zatěžované místo šroubu. Přes toto mezikruží se přenáší tlakové zatížení  $p_m$ , které je způsobené vyvinutím upínací síly.

$$p_m = \frac{F_u}{A_m} = \frac{4 \cdot 68750}{\pi(18^2 - 7^2)} = 318,3 \text{ MPa} \quad (5.9)$$

Dovolený tlak  $p_{dm}$  je určen dle vztahu (5.10):

$$p_{dm} = \frac{R_e}{k} = \frac{660}{1,5} = 440 \text{ MPa}, \quad (5.10)$$

kde  $k$  je zvolená bezpečnost a  $R_e$  je mez kluzu materiálu šroubu 14140. Po překročení této hodnoty dochází k plastické deformaci. Vypočítaný tlak je menší než dovolený, tudíž nedojde k plastické deformaci.

### Otlačení v závitu

Pohybový šroub se závitem Tr20x2 je nutné zkontrolovat i z hlediska hrozícího otlačení závitu. Otlačení hrozí také v pouzdru se stejným závitem, ale jiným materiálem. Otlačení závitu nastává po překročení dovoleného tlaku v závitu. Tlak v závitu  $p_z$  je vypočítán pomocí rovnice (5.13). Pro další výpočet je třeba vypočítat počet závitů  $n_z$  pomocí vztahu:

$$n_z = \frac{l_z}{P} = \frac{62,5}{2} = 31,25, \quad (5.11)$$

kde  $l_z$  je délka závitu a  $P$  je rozteč závitu.

Dalším důležitým parametrem je plocha  $S_p$ , což je styková plocha a je vypočítána ze vztahu (5.12):

$$S_p = \pi d_2 n_z \cdot \frac{d - D_1}{2} = \pi \cdot 19 \cdot 31,25 \cdot \frac{20 - 18}{2} = 1865 \text{ mm}^2, \quad (5.12)$$

kde  $d_2$  je střední průměr závitu šroubu,  $d$  velký průměr závitu šroubu a  $D_1$  je velký průměr závitu v pouzdru.

$$p_z = \frac{F_u}{S_p} = \frac{68750}{1865} = 36,86 \text{ MPa} \quad (5.13)$$

Pouzdro, ve kterém je pohybový šroub uložen, je vyrobeno z oceli 11600, který nemá tak dobré mechanické vlastnosti jako pohybový šroub, u něj hrozí otlačení více než u šroubu. Smluvní mez kluzu materiálu 11600 je  $R_{p0,2} = 347 \text{ MPa}$ .

Dovolený tlak závitu  $p_{dz}$  je určen podle vztahu (5.14):

$$p_{dz} = 0,15 \cdot R_{p0,2} = 0,15 \cdot 347 = 52,05 \text{ MPa} \quad (5.14)$$

Tlak v závitu je menší než dovolený, tudíž nedojde k otlačení závitu v pouzdře. Nedojde tím pádem ani k otlačení závitu šroubu, protože má ještě vyšší smluvní mez kluzu.



#### 5.4.6 Pevnostní kontrola lícovaných šroubů

Smykové napětí působící na lícovaný šroub M16 třídy 8.8 se vypočítá podle rovnice (5.16). Síla  $F_{lš}$ , která působí na jeden lícovaný šroub svěráku je rovna vztahu (5.15), protože je svěrák připevněn čtyřmi lícovanými šrouby o průměru dřívku  $d_{lš}$ .

$$F_{lš} = \frac{F}{4} \quad (5.15)$$

$$\tau = \frac{4F_{lš}}{\pi d_{lš}^2} = \frac{4 \cdot 17190}{\pi \cdot 12^2} = 152 \text{ MPa} \quad (5.16)$$

Smykové napětí  $\tau$  musí být menší než dovolené smykové napětí, které se určí pomocí vztahu (5.18). Lícované šrouby pevnostní třídy 8.8 mají mez pevnosti  $R_m=800$  MPa a mez kluzu  $R_e=640$  MPa. Mez kluzu ve smyku  $R_{es}$  se liší a je určena vztahem (5.17).

$$R_{es} = 0,65 \cdot R_e = 416 \text{ MPa} \quad (5.17)$$

$$\tau_d = \frac{R_{es}}{k} = \frac{416}{1,5} = 277 \text{ MPa} \quad (5.18)$$

Při bezpečnosti  $k=1,5$  je dovolené smykové napětí  $\tau_d=277$  MPa. Smykové napětí v lícovaném šroubu je menší než dovolené smykové napětí. Lícovaný šroub, který připojuje svěrák k desce přípravku, je tedy bezpečný z hlediska hrozícího stříhu.

#### 5.4.7 Pevnostní kontrola klínů a profilu na otláčení

Při vyvinutí velkého momentu na menší profil by mohlo dojít k otláčení profilu. Byla proto provedena kontrola na otláčení profilu a klínů. Upínací síla je rozložena mezi dvě stěny klínu. Pro výpočet byly vybrány parametry vztažené na maximální sílu  $F_u=68750$  N a profil nejmenších rozměrů 12x1. Materiál profilu 42 4203.61 má smluvní mez kluzu rovnou  $R_{p0,2p}=255$  MPa. Síla  $F_{pk}$ , která působí na stěnu klínu a profil se vypočítá pomocí rovnice:

$$F_{pk} = \frac{F_u}{2 \sin(\alpha_k)}, \quad (5.19)$$

kde  $\alpha_k$  je vrcholový úhel klínu.

Tlak  $p_{pk}$  na stykové ploše profilu a klínu se vypočítá pomocí rovnice (5.21).  $S_{pk}$  je plocha styku stěny nejmenšího vybraného profilu, který je uložen 1 mm od desky přípravku. Výška klínu je 50 mm.

$$S_{pk} = 8 \cdot 49 = 392 \text{ mm}^2 \quad (5.20)$$

$$p_{pk} = \frac{F_u}{\sqrt{2} \cdot S_{pk} \cdot \sin(\alpha_k)} = \frac{68750}{3,94 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{2}} = 124,01 \text{ MPa} \quad (5.21)$$

Nejmenší dovolené tlakové napětí materiálu 12060 určené z tabulek [23] je 175 MPa a dovolený tlak na profil  $p_{pd}$  je vypočítán ze vztahu (5.22).

$$p_{pd} = \frac{R_{p0,2p}}{k} = \frac{255}{1,5} = 170 \text{ MPa} \quad (5.22)$$

K otláčení stykových ploch klínu a profilu nedojde.



## 6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se věnuje problematice ztráty stability tenkostěnných profilů, kterou rozebírá z teoretické i praktické roviny. Teoretická část, naplňující první část práce, obsahuje rešerši využití tenkostěnných profilů v leteckých konstrukcích a jim hrozící ztráty stability. Jsou v ní také uvedeny analytické metody řešení výpočtu kritických napětí ztráty stability a teoretický pohled na problematiku uchycení vzorků, který popisuje výhody a nevýhody jednotlivých druhů uložení.

V návrhové části práce je komentován nejen výsledný návrh, ale i proces, jež návrh podstoupil. Je také upozorněno na problémy, které při uchycení vzorku mohou vzniknout. Na základě dvou konceptů byla vybrána jedna z variant, která byla poté rozpracována do finální podoby. Návrh přípravku je založen na systému tlačných klínů, které jsou šrouby tlačeny proti sobě, a vzorek je mezi ně pevně sevřen.

Přípravek je dimenzován na vybrané symetrické L-profilů, nesymetrické L-profilů a symetrické Z-profilů. Snahou bylo, aby se vzorek nedotýkal svou podstavou o desku přípravku. Tomuto kontaktu je zamezeno u profilů menšího průřezu. Maximální doporučená kritická síla, kterou přípravek bezpečně a efektivně upne, je 55 kN. Pro větší kritické síly je nutné vzorek opřít o desku přípravku. Návrh podkládají pevnostní výpočty, jejichž výsledky vycházejí pro tuto maximální hodnotu příznivě a navržený přípravek lze považovat za bezpečný.

Součástí práce je také návrh řešení uchycení Z-profilů pomocí speciálních tlačných klínů, které se dají aplikovat na navržený přípravek pro L-profilů a také tabulky, které shrnují analyticky získané hodnoty kritických sil vzpěrné i lokální ztráty stability vybraných protlačovaných profilů a mohou posloužit k predikci výsledků před provedením experimentu.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SLAVÍK, Svatomír. *Stavba letadel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01671-4.
- [2] PÍŠTĚK, Antonín, Oldřich GRÉGR, Václav KAHÁNEK a Rudolf BÖHM. *Pevnost a životnost letadel*. Brno: Vysoké učení technické, 1988.
- [3] NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe structural design*. 2nd ed. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press Ltd., 1988. ISBN 962-7128-09-0.
- [4] MEGSON, T. H. G. *Aircraft structures for engineering students*. 4th edition. London: Edward Arnold, 2007. ISBN 0713132760.
- [5] NIU, Michael C. Y. *Airframe Stress Analysis and Sizing*. 2nd edition. Hong Kong: Hong Kong Conlimit Press, 1999. ISBN 9627128120.
- [6] ADEEL, M. Study on Damage Tolerance Behavior of Integrally Stiffened Panel and Conventional Stiffened Panel. *Open Science Index, Mechanical and Mechatronics Engineering*. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 2008, **Vol.2**(No.9), 5.
- [7] ČALKOVSKÝ, Antonín, Josef PÁVEK a Vladimír DANĚK. *Konstrukce a pevnost letadel: 1. díl*. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1984.
- [8] MADDUX, Genne E., *Stress Analysis Manual*, U.S. Department of Commerce, Springfield, 1969, 580 s.
- [9] BRUHN, E.F. *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*. Carmel, Indiana, U.S.A.: Jacobs Publishing, 1973. ISBN 0961523409.
- [10] SALMON, Ernest Hinkly. *Columns: A Treatise on the Strength and Design of Compression Members*. London: Oxford technical publications, 1921. ISBN 9781144916068.
- [11] HORTON, W.H. a D. STRUBLE. *End fixity of columns*. Fort Eustis, Virginia: U. S. Army Aviation Materiel Laboratories, 1970.
- [12] Buckling: Eccentric Loads. In: *Dredging Engineering* [online]. Dr.ir. S.A. Miedema [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.dredgingengineering.com/science/buckling/0806%20-%20eccentric%20loads.htm>
- [13] SINGER, J., J. ARBOCZ a T. WELLER. *Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures*. New York: JOHN WILEY, 1997. ISBN 0-471-95661-9.
- [14] Epoxidová pryskyřice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Epoxidov%C3%A1\\_prysky%C5%99ice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Epoxidov%C3%A1_prysky%C5%99ice)
- [15] Clamping mobile: Corner clamp. In: *Wolfcraft* [online]. Kempenich, Německo: Wolfcraft, 2006 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [http://www.wolfcraft.com/en/products/p/corner\\_clamps/1\\_clamping\\_mobile/s/p/index.html](http://www.wolfcraft.com/en/products/p/corner_clamps/1_clamping_mobile/s/p/index.html)
- [16] Welders Angle Clamp, Medium. In: *Trick-Tools* [online]. Pella, USA: Van Sant Enterprises [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [https://www.trick-tools.com/Welders\\_Angle\\_Clamp\\_Medium\\_WAC34\\_1322](https://www.trick-tools.com/Welders_Angle_Clamp_Medium_WAC34_1322)
- [17] Composites Testing: Challenges & Solutions: JEC Europe-March 2015. In: *SlideShare* [online]. LinkedIn, 24.3.2015 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/Instron/composites-testing-challengessolutions-march2015>
- [18] WYSMULSKI, Pawel a Hubert DEBSKI. The effect of eccentricity of load on the behavior of compressed composite columns in critical state. *Polymer Composites*.

- 2019, **40**(1), 70-77. DOI: 10.1002/pc.24601. ISSN 02728397. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.24601>
- [19] Ramberg, W., McPherson, A.E. and Levy, S., Experimental Study of Deformation and of Effective Width in Axially Loaded Sheet-Stringer Panels, NACA TN 684,1939.[https://archive.org/details/nasa\\_techdoc\\_19930081483/page/n16](https://archive.org/details/nasa_techdoc_19930081483/page/n16)
- [20] CHVÁLA, Břetislav a Josef VOTAVA. *Přípravky*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1980, 352 s.
- [21] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard Gordon BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [22] Čtverák, J., Mertl, V., Píštěk, A.: *Soubor podkladů pro pevnostní výpočty leteckých konstrukcí*, LÚ FSI VUT Brno, Brno, 1997
- [23] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

### 8.1 Seznam zkratk a symbolů

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
$a$	[mm]	Počáteční výchylka
$A$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha plošného průřezu
$A_m$	[mm <sup>2</sup> ]	Obsah plochy mezikruží
$b$	[mm]	Délka segmentu
$c$	[-]	Koeficient uložení
$d, D$	[mm]	Velký průměr závitu
$d_2, D_2$	[mm]	Střední průměr závitu
$d_3, D_1$	[mm]	Malý průměr závitu
$d_{lš}$	[mm]	Průměr díku lícovaného šroubu
$e$	[mm]	Excentricita
$E$	[MPa]	Youngův modul pružnosti
$E_t$	[MPa]	Tangenciální modul pružnosti
$E_r$	[MPa]	Redukovaný modul pružnosti
$f$	[-]	Součinitel tření závitu
$f_s$	[-]	Součinitel tření stykových ploch
$F'$	[N]	Původní zatěžovací síla
$F_{kr}$	[N]	Kritická síla ztráty stability
$F_{lš}$	[N]	Síla působící na jeden lícovaný šroub
$F_{pk}$	[N]	Síla působící na stěnu klínu a profilu
$g$	[-]	Počet desek a řezů průřezu profilu
$i$	[mm]	Poloměr setrvačnosti
$J$	[mm <sup>4</sup> ]	Kvadratický moment průřezu
$k$	[-]	Součinitel bezpečnosti
$K$	[-]	Konstanta hyperboly
$L$	[mm]	Délka prutu nebo profilu
$n$	[-]	Konstanta materiálu

$n_z$	[-]	Počet závitů
$p_{sp}$	[MPa]	Tlak na styčné ploše
$p_{dz}$	[MPa]	Dovolený tlak v závitě
$p_m$	[MPa]	Dovolený tlak na mezikruží
$p_m$	[MPa]	Tlak na stykovou plochu mezikruží
$p_z$	[MPa]	Tlak v závitě
$P$	[mm]	Rozteč závitů
$P_h$	[mm]	Stoupání závitů
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
$R_e$	[MPa]	Mez kluzu
$R_{es}$	[MPa]	Mez kluzu ve smyku
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
$R_{p0,2p}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu profilu
$S_{pk}$	[MPa]	Obsah stykové plochy klínu a profilu
$t$	[mm]	Tloušťka segmentu
$w$	[mm]	Průhyb
$\alpha$	[°]	Úhel profilu závitů
$\alpha_k$	[°]	Vrcholový úhel klínu
$\delta$	[mm]	Výchylka
$\delta'$	[mm]	Původní výchylka
$\varepsilon$	[-]	Přetvoření
$\lambda$	[-]	Štíhlost
$\lambda_{kr}$	[-]	Kritická štíhlost
$\lambda_{red}$	[-]	Redukovaná štíhlost
$\sigma$	[MPa]	Napětí
$\sigma_{kr}$	[MPa]	Kritické napětí
$\sigma_N$	[MPa]	Normálové napětí
$\sigma^*$	[MPa]	Limitní napětí
$\tau$	[MPa]	Smykové napětí
$\tau_d$	[MPa]	Dovolené smykové napětí

## 8.2 Seznam obrázků

Obr. 2.1 Řez nosníkového poloskořepinového křídla [2] .....	17
Obr. 2.2 Protlačované (a), (c) a ohýbané (b), (d) profily [4] .....	18
Obr. 2.3 Ztráta vzpěrné stability vyztuženého panelu [5].....	19
Obr. 3.1 Úplný diagram stability [2].....	21
Obr. 3.2 Závislost kritického napětí pružného i nepružného vzpěru [1] .....	23
Obr. 3.3 Modul pružnosti pro napětí nad mezí kluzu [4].....	24
Obr. 3.4 Johnson-Eulerova křivka [8].....	25
Obr. 3.5 Johnson-Eulerovy křivky [8] .....	26
Obr. 3.6 Lokální ztráta stability [5] .....	26
Obr. 3.7 Skutečné rozložení napětí v profilu [5] .....	27
Obr. 3.8 Testovací křivka pro ohýbané hliníkové profily [5].....	28
Obr. 3.9 Diagram pro stanovení kritického napětí lokální ztráty stability dle Timoshenka [2].....	30
Obr. 4.1 Excentricky zatížený prut [12].....	32
Obr. 4.2 Přípravek Von Kármána [13].....	33
Obr. 4.3 Závislost excentricity na zatížení a výchylce [13].....	33
Obr. 4.4 Současné provedení uložení .....	34
Obr. 4.5 Skutečné chování vzorku v testovacím stroji [11].....	35
Obr. 4.6 Rohové dílenské svěráky [15][16].....	36
Obr. 4.7 Kloubové uložení pomocí kulové plochy [17] .....	37
Obr. 4.8 Přípravek na Strathclydské univerzitě [13].....	38
Obr. 4.9 Křivky výchylek pro uložení mezi pevné stěny [10].....	39
Obr. 4.10 Tlaková zkouška U-profilu uloženého mezi pevné stěny [18] .....	40
Obr. 4.11 Southwellovo vykreslení tlakem zatěžovaných prutů [13].....	41
Obr. 5.1 Detail hrozícího špatného kontaktu klínu a profilu v jeho rohu .....	45
Obr. 5.2 První koncept řešení konstrukce přípravku .....	46
Obr. 5.3 Druhý koncept řešení konstrukce přípravku.....	46
Obr. 5.4 Původní provedení vodítek .....	48
Obr. 5.5 Koncept řešení konstrukce přípravku pro uchycení U-profilu .....	48
Obr. 5.6 Výsledný návrh přípravku pro uchycení L-profilů.....	49
Obr. 5.7 Speciální klíny pro uchycení Z-profilu.....	50

### 8.3 Seznam tabulek


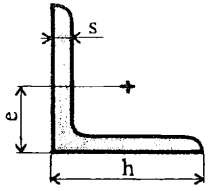
Tab. 3.1	Hodnoty koeficientu $c$ pro různé druhy uložení [5].....	23
Tab. 3.2	Parametr $g$ pro vybrané profily [5] .....	29
Tab. 5.1	Doporučené profily pro přípravek .....	44
Tab. 5.2	Druhy čelist'ových ploch a jejich třecí součinitelé [20].....	47
Tab. 5.3	Kritická napětí lokální ztráty stability symetrických L-profilů .....	51
Tab. 5.4	Tabulka kritických sil ztráty stability symetrických L-profilů pro různé délky.	52

## 9 PŘÍLOHY


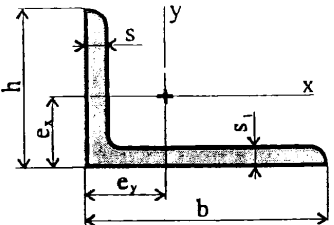
<b>Příloha č. 1:</b> Charakteristiky rovnoramenných L-profilů ONL 2371 [22] .....	65
<b>Příloha č. 2:</b> Charakteristiky nerovnoramenných L-profilů ONL 2372 [22].....	66
<b>Příloha č. 3:</b> Charakteristiky hliníkových Z-profilů ONL 2376 .....	67
<b>Příloha č. 4:</b> Tabulka kritických sil ztráty stability nesymetrických L-profilů.....	68
<b>Příloha č. 5:</b> Minimální kvadratické momenty průřezů L-profilů .....	69
<b>Příloha č. 6:</b> Kritická síla lokální ztráty stability nesymetrických L-profilů.....	70
<b>Příloha č. 7:</b> Kritická napětí lokální ztráty stability symetrických Z-profilů.....	71



**Příloha č. 1: Charakteristiky rovnoramenných L-profilů ONL 2371 [22]**

		Charakteristiky rovnoramenných L profilů	1.6		
		F - plocha průřezu J - kvadratický moment průřezu G - hmotnost 1 m délky duralového profilu ( 2,85 g/cm <sup>3</sup> )			
h mm	s mm	e mm	F mm <sup>2</sup>	J mm <sup>4</sup>	G kg/m
12	1	3,31	23,4	320	0,067
	1,5	3,55	34	450	0,097
15	1	4,06	29,4	630	0,084
	1,2	4,11	35,3	750	0,101
	1,5	4,23	43,4	910	0,124
18	2	4,42	56,4	1140	0,161
	1	4,87	35,7	1120	0,102
	1,5	4,98	52,4	1600	0,149
20	2	5,24	68	2080	0,194
	1	5,27	39,7	1550	0,113
	1,2	5,36	47,3	1820	0,135
25	1,5	5,48	58,4	2220	0,166
	2	5,67	76,4	2840	0,218
	2,5	5,92	94	3440	0,268
	1,5	6,73	73,4	4440	0,209
	2	6,92	96,4	5730	0,275
30	2,5	7,11	118,9	6930	0,339
	3	7,35	142	11510	0,405
	1,5	7,98	88,4	7800	0,25
	2	8,17	116,4	10110	0,332
35	2,5	8,32	144,1	12240	0,411
	3	8,51	172	14390	0,49
	4	8,96	226	18480	0,645
	2	9,49	136,4	16420	0,389
40	2,5	9,68	170	20030	0,485
	3	9,86	202	23620	0,572
	4	10,22	265	30250	0,756
	2	10,67	156,4	24620	0,446
50	3	11	232	35490	0,661
	4	11,34	305,7	45490	0,871
	4	13,84	385,7	91710	1,099
60	5	14,18	477,7	111070	1,361
	5	16,68	577,7	197040	1,646
	6	17,05	685,5	230110	1,954

Výchozí pramen : ONL 2371

		Charakteristiky nerovnoramenných L profilů	1.7					
								
<p>F - plocha průřezu  <math>J_x, J_y</math> - kvadratické momenty průřezu k uvedeným osám                      G - hmotnost 1 m délky duralového profilu ( 2,85 g/cm<sup>3</sup> )</p>								
h x b mm	s mm	s <sub>1</sub> mm	e <sub>x</sub> mm	e <sub>y</sub> mm	F mm <sup>2</sup>	J <sub>x</sub> mm <sup>4</sup>	J <sub>y</sub> mm <sup>4</sup>	G kg/m
10x16	1,5	1,5	2,48	5,48	37	300	950	0,106
13x16	1,6	1,6	3,46	4,94	44,1	640	1090	0,126
15x20	1,2	1,5	3,34	6,58	46,8	830	1930	0,133
15x20	1,5	1,5	3,77	6,3	52,5	980	2020	0,15
15x20	1,5	2	3,43	6,86	60	1010	2440	0,171
15x20	2	1,5	4,23	5,67	57,5	1190	2140	0,164
15x25	1	1,5	2,71	9,16	51,7	760	3400	0,147
15x30	2	2	3,27	10,8	87	1400	7950	0,248
18x20	1	1	4,55	5,53	37,7	1150	1500	0,107
18x25	1,5	2	3,88	8,58	74,5	1820	4820	0,212
18x25	2	2,5	4,19	8,56	94,3	2290	5960	0,269
18x25	2,5	3	4,45	8,61	113,6	2720	7010	0,324
18x30	1,5	2	3,54	10,8	84,5	1900	7970	0,241
18x30	2,5	3	4,11	10,79	128,6	2850	11690	0,366
19x32	1,5	1,5	4,07	10,53	74,5	2180	8020	0,212
19x32	2,4	2,4	4,39	10,82	117,3	3260	12240	0,334
20x25	1,2	1,2	4,63	7,29	53,3	1950	3140	0,152
20x25	2,5	1,5	6,16	6,23	84,6	3350	4560	0,241
20x30	2	1,5	5,19	8,6	82,5	3060	7330	0,235
20x30	2	2,2	4,37	10,35	111,1	3240	10230	0,317
20x40	3	2	4,98	12,33	137,4	4720	21990	0,391
25x30	1,5	1,5	6,12	8,56	81,9	4700	7410	0,233
25x30	2,5	3	6,18	9,65	146,1	7510	13100	0,416
25x40	3	4	5,49	14,54	225,1	9410	36650	0,641
25x40	4	3	6,68	12,23	210,1	11320	32330	0,599
25x63	3,5	3,5	4,89	23,54	299,8	11640	123350	0,854
28x45	2	2	6,07	14,49	142,9	9330	30400	0,407
30x40	3	3	7,54	12,54	201	15890	32610	0,574
30x40	3	4	6,85	13,72	240,1	16160	39050	0,684
30x50	3	3	6,8	16,8	231	16800	59700	0,66
30x50	3	4	6,16	18,16	280,1	17020	72470	0,798
30x50	4	3	7,66	15,21	260,1	20430	64290	0,743
30x50	3	5	5,94	19,23	328,5	17140	83910	0,936

Výchozí pramen : ONL 2372

Příloha č. 3: Charakteristiky hliníkových Z-profilů ONL 2376

DT 669.71-423

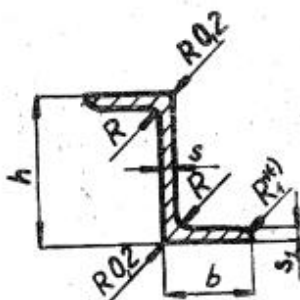
OBOROVÁ NORMA

Schválena: 14.5.1968

Aero Československé letecké podniky Letnany	Hliník a slitiny hliníku tvářené PROFILY Z HLINÍKOVÝCH SLITIN-PRŮŘEZU Z lisevané za tepla Rozměrová norma	ONL 2376
		JK 194 319

Rozměry v mm

Tato norma platí pro rozměry a statické hodnoty profilů průřezu Z-lisované za tepla ze slitin hliníku uvedených v ONZ 42 1426



Označení profilu se jmenovitými rozměry 20 x 15 x 1,5 x 1,5 z hliníkové slitiny Z 42 4203.61:

Prefil 20 x 15 x 1,5 x 1,5 ONL 2376.26

Tab.1

Jmenovitý rozměr h x b x s x s <sub>1</sub>	Mezní úchytky rozměrů				R ±0,5	*) R <sub>1</sub>	Plocha průřezu mm <sup>2</sup>	Hmotnost ≈ kg/m	Dřívější označení	Číslo profilu výrobce
	h	b	s	s <sub>1</sub>						
20 x 15 x 1,2 x 1,2	±0,51	±0,51	+0,2	+0,2	2	0,5	58,7	0,167	PR105-15	3670
20 x 15 x 1,5 x 1,5			-0,1	-0,1			72,1	0,205	PR105-16	3502
25 x 18 x 1,5 x 2	±0,51	±0,51	±0,2	±0,2	2,5	1,25	104,8	0,299	PR105-1	2914
25 x 18 x 2 x 2,5							132,0	0,376	PR105-2	2749
30 x 25 x 2 x 2,5	±0,64	±0,64	±0,2	±0,2	2	1	177,0	0,504	PR105-9	-
40 x 25 x 1,5 x 2							155,3	0,443	PR105-3	3042

Účinnost od:  
1.1.1969

Index	Změna	Datum	Provedl	c
a				d
b				e

Vydává: Výzkumný a zkušební letecký ústav Letnany

Příloha č. 4: Tabulka kritických sil ztráty stability nesymetrických L-profilů

Tabulka kritických sil ztráty stability nesymetrických L profilů Profily dle normy ONL 2372, ČSN 424201.61											
Kritická síla [N]											
Délka [mm]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
<b>Rozměry profilů [mm]</b>											
10x16	1.5x1.5	9620.0	9620.0	5647.3	3176.6	1983.5	1377.4	1012.0	774.8	612.2	495.9
13x16	1.6x1.6	11907.0	11907.0	10875.8	6117.6	3819.8	2652.6	1948.9	1492.1	1178.9	954.9
15x20	1.2x1.5	11559.6	11559.6	11559.6	8616.3	5379.9	3736.1	2744.9	2101.5	1660.5	1345.0
15x20	1.5x1.5	13387.5	13387.5	13387.5	9745.7	6085.1	4225.8	3104.6	2377.0	1878.1	1521.3
15x20	1.5x2	16200.0	16200.0	16200.0	10764.8	6721.4	4667.7	3429.3	2625.6	2074.5	1680.4
15x20	2x1.5	14662.5	14662.5	14662.5	11444.1	7145.6	4962.2	3645.7	2791.2	2205.4	1786.4
15x25	1x1.5	11447.4	11447.4	11447.4	9069.9	5663.2	3932.8	2889.4	2212.2	1747.9	1415.8
15x30	2x2	20880.0	20880.0	20880.0	16534.1	10323.7	7169.2	5267.2	4032.7	3186.3	2580.9
18x20	1x1	7540.0	7540.0	7540.0	7540.0	6016.4	4178.1	3069.6	2350.2	1856.9	1504.1
18x25	1.5x2	18401.5	18401.5	18401.5	18401.5	12246.8	8504.7	6248.4	4783.9	3779.9	3061.7
18x25	2x2.5	25461.0	25461.0	25461.0	24776.9	15470.5	10743.4	7893.1	6043.2	4774.8	3867.6
18x25	2.5x3	31240.0	31240.0	31240.0	29626.2	18498.3	12846.0	9437.9	7225.9	5709.4	4624.6
18x30	1.5x2	20280.0	20280.0	20280.0	20280.0	13850.4	9618.4	7066.5	5410.3	4274.8	3462.6
18x30	2.5x3	32793.0	32793.0	32793.0	32793.0	21037.0	14609.0	10733.2	8217.6	6492.9	5259.3
19x32	1.5x1.5	13410.0	13410.0	13410.0	13410.0	13410.0	10475.0	7695.9	5892.2	4655.5	3771.0
19x32	2.4x2.4	29911.5	29911.5	29911.5	29911.5	23001.9	15973.5	11735.7	8985.1	7099.4	5750.5
20x25	1.2x1.2	10446.8	10446.8	10446.8	10446.8	10446.8	7839.9	5759.9	4409.9	3484.4	2822.4
20x25	2.5x1.5	18781.2	18781.2	18781.2	18781.2	18409.1	12784.1	9392.4	7191.0	5681.8	4602.3
20x30	2x1.5	16170.0	16170.0	16170.0	16170.0	16170.0	13411.5	9853.3	7544.0	5960.7	4828.1
20x30	2x2.2	28330.5	28330.5	28330.5	28330.5	21853.7	15176.2	11149.9	8536.6	6745.0	5463.4
20x40	3x2	27480.0	27480.0	27480.0	27480.0	27480.0	22616.7	16616.3	12721.9	10051.9	8142.0
25x30	1.5x1.5	16380.0	16380.0	16380.0	16380.0	16380.0	18321.0	13460.3	10305.5	8142.6	6595.5
25x30	2.5x3	39447.0	39447.0	39447.0	39447.0	39447.0	31424.7	23087.5	17676.4	13966.5	11312.9
25x40	3x4	60777.0	60777.0	60777.0	60777.0	60777.0	48123.0	35355.7	27069.2	21388.0	17324.3
25x40	4x3	53575.5	53575.5	53575.5	53575.5	53575.5	52505.1	38575.2	29534.1	23335.6	18901.8
28x45	2x2	22864.0	22864.0	22864.0	22864.0	22864.0	22864.0	22864.0	22864.0	19422.0	15731.8
30x40	3x3	51255.0	51255.0	51255.0	51255.0	51255.0	51255.0	49674.2	38031.8	30049.8	24340.4
30x40	3x4	64827.0	64827.0	64827.0	64827.0	64827.0	64827.0	54869.0	42009.1	33192.3	26885.8

**Příloha č. 5:** Minimální kvadratické momenty průřezů L-profilů

<b>Minimální kvadratické momenty průřezů L-profilů-<math>J_{min}</math></b>				
Symetrické		Nesymetrické		
Rozměry profilu [mm]	$J_{min}$ [mm <sup>4</sup> ]	Rozměry profilu [mm]		$J_{min}$ [mm <sup>4</sup> ]
12x1	<b>131.25</b>	10x16	1.5x1.5	<b>174.45</b>
12x1.5	<b>188.89</b>	13x16	1.6x1.6	<b>335.96</b>
15x1	<b>260.95</b>	15x20	1.2x1.5	<b>473.18</b>
15x1.2	<b>308.71</b>	15x20	1.5x1.5	<b>535.20</b>
15x1.5	<b>377.99</b>	15x20	1.5x2	<b>591.17</b>
15x2	<b>488.16</b>	15x20	2x1.5	<b>628.47</b>
18x1	<b>456.43</b>	15x25	1x1.5	<b>498.09</b>
18x1.5	<b>664.47</b>	15x30	2x2	<b>908.00</b>
18x2	<b>861.35</b>	18x20	1x1	<b>529.16</b>
20x1	<b>629.95</b>	18x25	1.5x2	<b>1077.14</b>
20x1.2	<b>747.66</b>	18x25	2x2.5	<b>1360.67</b>
20x1.5	<b>919.55</b>	18x25	2.5x3	<b>1626.97</b>
20x2	<b>1194.64</b>	18x30	1.5x2	<b>1218.18</b>
20x2.5	<b>1457.49</b>	18x30	2.5x3	<b>1850.26</b>
25x1.5	<b>1825.35</b>	19x32	1.5x1.5	<b>1326.67</b>
25x2	<b>2366.57</b>	19x32	2.4x2.4	<b>2023.07</b>
25x2.5	<b>2916.61</b>	20x25	1.2x1.2	<b>992.93</b>
25x3	<b>3432.08</b>	20x25	2.5x1.5	<b>1619.12</b>
30x1.5	<b>3189.13</b>	20x30	2x1.5	<b>1698.58</b>
30x2	<b>4175.21</b>	20x30	2x2.2	<b>1922.09</b>
30x2.5	<b>5127.09</b>	20x40	3x2	<b>2864.44</b>
30x3	<b>6047.89</b>	25x30	1.5x1.5	<b>2320.38</b>
30x4	<b>7810.57</b>	25x30	2.5x3	<b>3979.99</b>
35x2	<b>6699.29</b>	25x40	3x4	<b>6094.86</b>
35x2.5	<b>8245.16</b>	25x40	4x3	<b>6649.85</b>
35x3	<b>9745.64</b>	28x45	2x2	<b>5534.61</b>
35x4	<b>12625.70</b>	30x40	3x3	<b>8563.18</b>
		30x40	3x4	<b>9458.69</b>

**Příloha č. 6: Kritická síla lokální ztráty stability nesymetrických L-profilů**

<b>Kritická napětí lokální ztráty stability nesymetrických L-profilů</b>							
<i>Určeno pomocí Timoshenkova diagramu pro profily ONL 2372</i>							
Rozměry profilu [mm]	b1/t1 [-]	b2/t2	A[mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{kr1}$ [MPa]	$\sigma_{kr2}$ [MPa]	$\sigma_{kr}$ [MPa]	$F_{kr}$ [N]
10x16x1.5x1.5	6.7	10.7	37.0	260	268	<b>260</b>	<b>9620.0</b>
13x16x1.6x1.6	8.1	10.0	44.1	274	270	<b>270</b>	<b>11907.0</b>
15x20x1.2x1.5	12.5	13.3	46.8	247	255	<b>247</b>	<b>11559.6</b>
15x20x1.5x1.5	10.0	13.3	52.5	270	255	<b>255</b>	<b>13387.5</b>
15x20x1.5x2	10.0	10.0	60.0	270	270	<b>270</b>	<b>16200.0</b>
15x20x2x1.5	7.5	13.3	57.5	279	255	<b>255</b>	<b>14662.5</b>
15x25x1x1.5	15.0	16.7	51.7	240	222	<b>222</b>	<b>11477.4</b>
15x30x2x2	7.5	15.0	87.0	279	240	<b>240</b>	<b>20880.0</b>
18x20x1x1	18.0	20.0	37.7	212	200	<b>200</b>	<b>7540.0</b>
18x25x1.5x2	12.0	12.5	74.5	260	247	<b>247</b>	<b>18401.5</b>
18x25x2x2.5	9.0	10.0	94.3	272	270	<b>270</b>	<b>25461.0</b>
18x25x2.5x3	7.2	8.3	113.6	380	275	<b>275</b>	<b>31240.0</b>
18x30x1.5x2	12.0	15.0	84.5	313	240	<b>240</b>	<b>20280.0</b>
18x30x2.5x3	7.2	10.0	128.6	255	270	<b>255</b>	<b>32793.0</b>
19x32x1.5x1.5	12.7	21.3	74.5	249	180	<b>180</b>	<b>13410.0</b>
19x32x2.4x2.4	7.9	13.3	117.3	279	255	<b>255</b>	<b>29911.5</b>
20x25x1.2x1.2	16.7	20.8	53.3	222	196	<b>196</b>	<b>10446.8</b>
20x25x2.5x1.5	8.0	16.7	84.6	278	222	<b>222</b>	<b>18781.2</b>
20x30x2x1.5	10.0	20.0	82.5	270	196	<b>196</b>	<b>16170.0</b>
20x30x2x2.2	10.0	13.6	111.1	270	255	<b>255</b>	<b>28330.5</b>
20x40x3x2	6.7	20.0	137.4	278	200	<b>200</b>	<b>27480.0</b>
25x30x1.5x1.5	16.7	20.0	81.9	222	200	<b>200</b>	<b>16380.0</b>
25x30x2.5x3	10.0	10.0	146.1	270	270	<b>270</b>	<b>39447.0</b>
25x40x3x4	8.3	10.0	225.1	275	270	<b>270</b>	<b>60777.0</b>
25x40x4x3	6.3	13.3	210.1	285	255	<b>255</b>	<b>53575.5</b>
28x45x2x2	14.0	22.5	142.9	245	160	<b>160</b>	<b>22864.0</b>
30x40x3x3	10.0	13.3	201.0	270	255	<b>255</b>	<b>51255.0</b>
30x40x3x4	10.0	10.0	240.1	270	270	<b>270</b>	<b>64827.0</b>

**Příloha č. 7: Kritická napětí lokální ztráty stability symetrických Z-profilů**

<b>Kritická napětí lokální ztráty stability symetrických Z-profilů</b>							
<i>Určeno pomocí Timoshenkova diagramu pro profily ONL 2376</i>							
Rozměry profilu [mm]	b1/t1 [-]	b2/t2	A[mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{kr1}$ [MPa]	$\sigma_{kr2}$ [MPa]	$\sigma_{kr}$ [MPa]	F <sub>kr</sub> [N]
20x15x1.2x1.2	16.7	12.5	58.7	280	247	<b>247</b>	<b>14498.9</b>
20x15x1.5x1.5	13.3	10	72.1	296	270	<b>270</b>	<b>19467</b>
25x18x1.5x2	16.7	9	104.8	280	272	<b>272</b>	<b>28505.6</b>
25x18x2x2.5	12.5	7.2	132	300	279	<b>279</b>	<b>36828</b>
30x25x2x2.5	15.0	10	177	284	270	<b>270</b>	<b>47790</b>
40x25x1.5x2	26.7	12.5	155.3	260	247	<b>247</b>	<b>38359.1</b>