



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

VYHODNOCENÍ VLIVU GEOMETRIE NA STABILITU PANELU KŘÍDLA POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

EVALUATION OF GEOMETRY EFFECT ON STRUCTURAL PANEL STABILITY WITH THE USE
OF FINITE ELEMENT METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Klepiš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Katrňák

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Daniel Klepiš
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Katrňák
Akademický rok:	2022/23

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:

Vyhodnocení vlivu geometrie na stabilitu panelu křídla pomocí metody konečných prvků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Strukturální analýza pomocí Metody konečných prvků (MKP) je moderní způsob simulace ztráty stability tenkostěnných konstrukcí. Tento přístup je s výhodou používán pro určení ztráty stability vyztužených panelů zatížených tlakem. Práce je zaměřena na úpravy MKP modelů specificky vyztuženého panelu, který je složen z potahových polí, vyztužných podélníků a zastavovačů růstu trhliny. Dále je zaměřena na provedení série výpočtů a následné grafické vyhodnocení výsledků.

Cíle bakalářské práce:

1. Stručný úvod do problematiky ztráty stability vyztužených panelů v tlaku.
2. Úprava modelů a vyhodnocení výsledků z výpočtů pomocí metody konečných prvků.
3. Zpracování grafů závislosti stability na změně vybraných rozměrových parametrů panelu křídla.

Seznam doporučené literatury:

NIU, Michael Chun-Yung. Airframe Structural Design – 2nd edition, Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 2004. ISBN 962-7128-09-0.

BRUHN, E.F. Analysis and design of flight vehicle structures. Carmel: Jacobs Publishing, 1973.

PÍŠTĚK, Antonín, Oldřich GRÉGR, Václav KAHÁNEK a Rudolf BÖHM. Pevnost a životnost letadel 1. VUT Brno, 1988, 266 s.

MEGSON, T. H. G. Aircraft Structures for Engineering Students. 4th ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-75066-7395.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou ztráty stability vyztuženého panelu křídla. V rámci rešeršní části práce je vytvořen přehled typů nestabilit, díky němuž je možné verifikovat jevy nastávající v celé oblasti postupného zatěžování panelu. Klasický koncept vyztužení podélnými profily je obohacen o neobvyklý druh tzv. stromečkové výztuže inspirované bionickou strukturou listu. U takto modifikovaného panelu jsou vytvořeny dva modely, ve kterých jsou měněny vybrané rozměrové parametry. Všechny varianty jsou numericky vypočteny za pomoci nelineární analýzy v programech MSC Patran/Nastran. Pro porovnání vypočtených panelů je vytvořena řada grafů zobrazujících průběh přenášené síly a procentuální navýšení maximálních přenesených sil při ztrátě stability. Vybraná varianta parametrického modelu je porovnána i z pohledu hmotnostního nárůstu. Díky tomu je možná lepší verifikace vhodného panelu pro další podrobnější analýzu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Panel křídla, vzpěr, ztráta stability, nelineární analýza, MKP, bionická struktura.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the problem of loss of stability of a reinforced wing panel. Within the research part of the thesis, an overview of the types of instabilities is created, thanks to which it is possible to verify the phenomena occurring in the whole area of progressive loading of the panel. The classical concept of longitudinal section reinforcement is enriched by an unusual type of so-called tree reinforcement inspired by the bionic structure of the leaf. For the panel modified in this way, two models are created in which selected dimensional parameters are changed. All the variations are numerically calculated using nonlinear analysis in MSC Patran/Nastran. For comparison of the calculated panels, a series of graphs are produced showing the force transfer and the percentage increase in the maximum force transfer with loss of stability. The selected variant of the parametric model is also compared in terms of mass increase. This allows a better verification of the appropriate panel for further detailed analysis.

KEYWORDS

Skin-stringer panel, buckling, stability, nonlinear analysis, FEM, bionic structure.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KLEPIŠ, Daniel. *Vyhodnocení vlivu geometrie na stabilitu panelu křídla pomocí metody konečných prvků*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149267>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Tomáš Katrňák.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáše Katrňáka a s použitím zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....
Daniel Klepiš

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Katrňákovi za jeho rady, poskytnuté podklady a čas, který mi věnoval při konzultacích. V neposlední řadě také děkuji své rodině a přátelům za podporu během celého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	PANEL KŘÍDLA VYZTUŽENÝ PODÉLNÍKY	12
2.1	PODÉLNÉ VÝZTUŽNÉ PROFILY – PODÉLNÍKY	12
2.2	NOSNÝ POTAH A ŽEBRA.....	13
2.3	SPOJENÍ HLAVNÍCH ČÁSTÍ PANELU KŘÍDLA.....	14
2.3.1	NÝTOVÉ A LEPENÉ SPOJE	14
3	ZTRÁTA STABILITY VYZTUŽENÝCH PANELŮ	15
3.1	SPOLUČINNÁ ŠÍŘKA POTAHU.....	15
3.2	TYPY NESTABILIT PANELU.....	18
3.2.1	POČÁTEČNÍ NESTABILITA	18
3.2.2	LOKÁLNÍ NESTABILITA.....	19
3.2.3	GLOBÁLNÍ ZTRÁTA STABILITY.....	19
3.2.4	TORZNÍ NESTABILITA	20
3.2.5	ZTRÁTA STABILITY POTAHU MEZI NÝTY	20
3.2.6	VRÁSNĚNÍ POTAHU	21
4	INTEGRÁLNÍ PANELY	22
4.1	NÁVRHOVÝ DIAGRAM	23
4.2	VYZTUŽENÍ INTEGRÁLNÍHO PANELU BIONICKOU STRUKTUROU	24
4.2.1	BIONICKÉ PARAMETRY.....	25
5	ÚVOD DO ANALÝZY POMOCÍ MKP	26
6	ZÁKLADNÍ VÝPOČTOVÝ MODEL.....	28
6.1	GEOMETRIE	28
6.2	MATERIÁL.....	29
6.3	OKRAJOVÉ PODMÍNKY.....	30
6.4	MKP VÝPOČET ZÁKLADNÍHO PANELU.....	30
7	APLIKACE BIONICKÉ STRUKTURY NA MKP MODEL.....	34
7.1	PANEL BEZ STROMEČKU.....	35
7.2	ZMĚNA VYBRANÝCH GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ.....	38
7.3	ZMĚNA CELKOVÉ TLOUŠŤKY STROMEČKU.....	38
7.3.1	GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI PRVNÍ VARIANTY.....	41
7.4	ZMĚNA TLOUŠŤKY KMENE.....	45
7.4.1	GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI DRUHÉ VARIANTY	46
8	VYHODNOCENÍ VLIVU GEOMETRIE NA STABILITU	49

9	ZÁVĚR	51
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	52
11	SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK	53
11.1	SEZNAM OBRÁZKŮ	53
11.2	SEZNAM GRAFŮ	55
11.3	SEZNAM TABULEK	55

1 ÚVOD

Na letadlo při letu působí síly a momenty, které jsou přenášeny do jednotlivých částí draku letadla. Tato zatížení jsou obvykle časově proměnná. Jejich proměnlivost je způsobena například poryvy větru nebo rázem způsobeným při přistání. S ohledem na tato zatížení a požadavky na co nejnižší hmotnost je v letectví využíváno tenkostěnných konstrukcí. Příkladem je právě poloskořepinová konstrukce křídla skládající se z nosného potahu a podélných výztužných profilů. Tyto dva zmíněné prvky vytváří celek nazývaný se panel křídla. Zatížení panelu se odvíjí od místa, které na křídle zaujímá. Jedná-li se o dolní panel, jeho primární zatížení je tahové. Avšak namáhání může být při poryvu okamžitě změno na tlakové, které s sebou nese problémy se ztrátou stability.

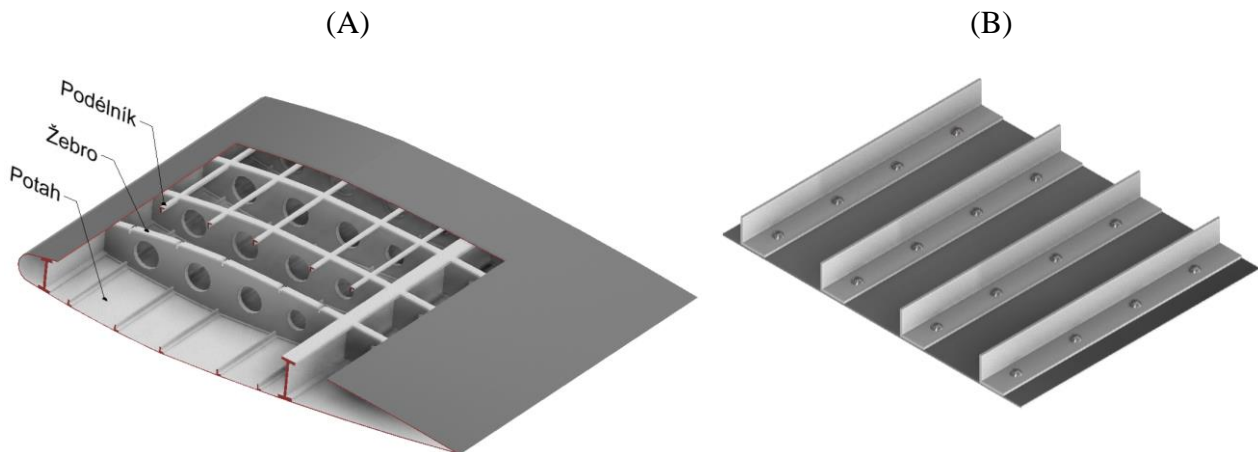
Ztráta stability je běžně nastávajícím jevem u konstrukcí namáhaných tlakovými silami. Ztrátou stability se rozumí vychýlení z původní rovnovážné konfigurace, ke kterému dojde po dosažení kritické (maximální) vnější síly. Tento mechanismus platí nejen pro dlouhé a štíhlé pruty, ale i pro případ tenkostěnných konstrukcí, mezi které spadá právě panel křídla. Obvykle dochází ke ztrátě stability dříve, než je dosaženo napětí meze kluzu či meze pevnosti – tj. materiálových limitů. Z tohoto důvodu je důležité identifikovat kdy tento mezní stav nastane, tudíž je mu možné předcházet.

Tato závěrečná práce pojednává o možnosti neobvyklého vyztužení dolního integrálního panelu křídla v místech potahových polí. Jde se o specifickou výztuž, která je inspirována bionickou strukturou listu stromu. Její primární funkce je zpomalení růstu trhliny při tahovém zatížení dolního panelu. Jak už bylo řečeno, dolní panel může být zatížen také tlakovými silami. Cílem je tedy zjistit chování panelu zatíženého tlakem. V tomto případě je předpokládáno navýšení přenesené kritické síly v řádu 10 % vůči panelu bez těchto výztuh.

Pro splnění cíle této práce je zvolena strukturální analýza ztráty stability pomocí metody konečných prvků (MKP). Je využíváno simulací s viditelným rozložením napětí a také možnosti určit velikost reakční síly. Celá analýza je postavená na principu měření velikosti kritické (maximální) síly přenesené panelem, která odpovídá právě reakční síle. Panel je zatížen deformační podmínkou, a to tak, že je osově stlačován o 3 mm. Dílčím cílem je úprava modelů poskytnutých vedoucím práce a následné hledání optimálních parametrických rozměrů stromečkových výztuží. Pro možnost kritičtějšího vyhodnocení bude jedna z variant vyhodnocena i z hlediska hmotnostního přírůstku.

2 PANEL KŘÍDLA VYZTUŽENÝ PODÉLNÍKY

Toto konstrukční uspořádání křídla vychází z požadavků na co nejnižší hmotnost a zároveň vysokou odolnost draku letadla. V dnešní době je tato konfigurace běžně používaným prvkem leteckých konstrukcí, ačkoli ji předcházela dlouhodobý vývoj. Panel křídla se skládá z několika částí, jak lze vidět na obrázku 2-1 (B). Hlavními komponenty panelu jsou podélníky a potah. Panel je dále podepřen žebry, která jsou vidět ze zjednodušeného řezu křídla na obrázku 2-1 (A). Tyto části panelu interakcí mezi sebou tvoří funkční celek, jelikož by osamocený potah nedokázal efektivně přenášet velká zatížení. V následujících podkapitolách budou stručně popsány prvky této konstrukce. [1]

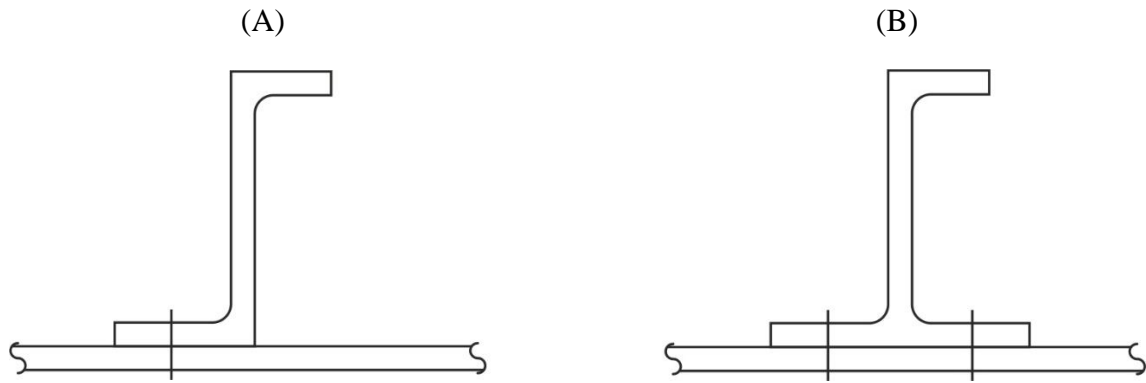


Obrázek 2-1: (A) Zjednodušený řez křídlem, (B) Detail panelu křídla

2.1 PODÉLNÉ VÝZTUŽNÉ PROFILY – PODÉLNÍKY

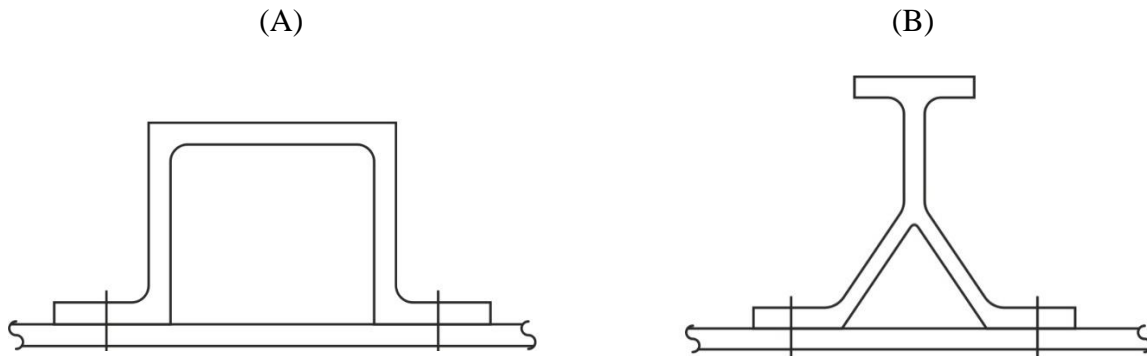
Jedná se o podélné profily různých průřezů sloužící jako podpora potahového plechu křídla. Tyto výztužné profily jsou dimenzovány zejména na přenos tahových a tlakových napětí vznikajících provozním zatížením křídla. Dále mohou přenášet malá ohybová zatížení, ale jejich tuhost v ohybu je zanedbatelná ve srovnání s ohybovou tuhostí celé konstrukce křídla. Protože se jedná o dlouhé a štíhlé pruty jsou při tlakovém zatížení náchylné ke ztrátě stability, která se rozlišuje na lokální a globální. Jejich odolnost vůči ztrátě stability je výrazně zvýšena, jsou-li podepřeny, tj. pevně spojeny s potahem. Dalším faktorem ovlivňujícím ztrátu stability je tvar a orientace příčného průřezu. [1]

Prakticky lze použít několik typických druhů podélníků. Jde zejména o tvary příčných průřezů podélníků, ale také jejich technologické zpracování. Nejčastěji je využíváno extrudovaných profilů. Ekonomičtější variantou mohou být profily tvářené za studena, ty ovšem obvykle vykazují nižší tuhost a větší náchylnost k lokálním ztrátám stability. Podélníky mohou obsahovat určitá konstrukční řešení (zejména na volné straně pásnice), zamezující například lokálnímu vybočení. Mezi nejpoužívanější varianty příčných průřezů patří extrudovaný Z – profil a J – profil. Tyto příčné průřezy profilů jsou znázorněny na obrázku 2-2. Vykazují příznivé chování při ztrátě stability v poměru k jejich hmotnosti. [1]



Obrázek 2-2: (A) Z – profil, (B) J – profil [1]

Další variantou je použití Y – profilu a U – profilu, které jsou zobrazeny na obrázku 2-3. Tyto profily vykazují velice příznivé vlastnosti, ale v praxi nejsou akceptovány, kvůli problému s korozí ve vnitřní části profilu. Inspekce tohoto místa je v mnoha případech nemožná. Teoreticky by bylo možné tyto profily s výhodou využít pro vedení odvodu palivových nádrží v křídlech, ale pouze za podmínky použití dodatečné antikorozi ochrany. [1]



Obrázek 2-3: (A) U – profil, (B) Y – profil [1]

2.2 NOSNÝ POTAH A ŽEBRA

Nosný potah je nejčastěji tenký plech ze slitin hliníku tvořící vnější tvar letounu. Jde o skořepinu, která je vhodná pro přenos membránových napětí – tj. síly působící v rovině skořepiny, které vyvolají rovnoměrně rozložená napětí po tloušťce skořepiny [2]. Potah tedy přenáší výhradně tahová nebo tlaková zatížení vyvolaná provozem letounu. Při zatížení tlakem je nutné vyztužení podélným výstužným prvkem – podélníkem, neboť by mohlo nastat náhlé zborcení potahu vlivem ztráty stability. Potahový plech je schopen přenosu menších ohybových a smykových zatížení, která za provozu běžně vznikají. Zde je taktéž nutné použití výstužných podélníků, jelikož tenké potahové plechy přenáší ohybová zatížení jen na velmi malé vzdálenosti. [1]

Vyztužený potah vyžaduje na celkové délce křídla mnoho mezilehlých podpěr v podobě žebel. Jsou to tvarové prvky konstrukce křídla, které udávají výsledný tvar nosnému potahu. Žebra, stejně tak jako potah, jsou schopna přenášet zejména zatížení v jejich rovině. Vniká v nich tedy také membránové napětí. Nepočítá se u nich s přenosem velkého bočního zatížení (například přenos ohybového momentu nebo působení lokální síly kolmo k jejich rovině). [1]

2.3 SPOJENÍ HLAVNÍCH ČÁSTÍ PANELU KŘÍDLA

Výše zmíněné komponenty je nutné vhodným způsobem spojit v jeden celek. K tomuto propojení se nejčastěji používá nýtování, případně nýtování s podlepením. Dalším způsobem je použití integrálního panelu, který je vyroben z jednoho celku a bude popsán v dalších kapitolách. Integrální panely vytváří obvykle větší samostatné plochy, které jsou poté spojeny jednou z metod – nejčastěji nýtováním.

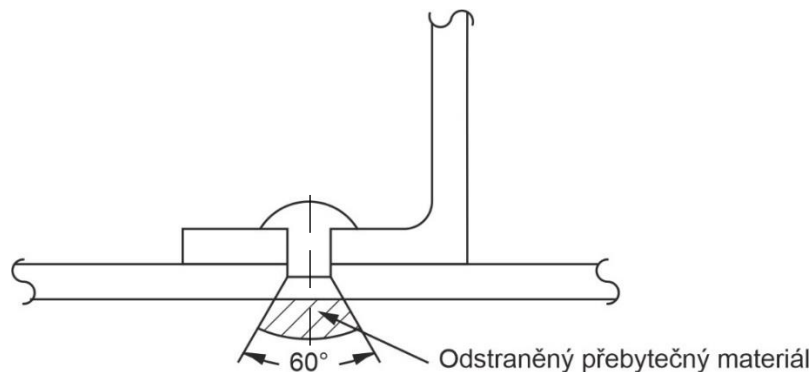
Primární funkcí těchto spojů je přenos zatížení z výtuzných prvků na nosný potah a naopak. Děje se tak za pomoci smykových sil, které vznikají vlivem osového zatížení podélníků a nosného potahu. Proto jsou tyto spoje dimenzovány zejména pro přenos smykových napětí po celé své délce. [1]

2.3.1 NÝTOVÉ A LEPENÉ SPOJE

Nýtování je jednou z nejrozšířenějších metod spojování součástí v letectví. Předností je možnost spojení špatně svařitelných vysokopevnostních slitin hliníku, které jsou v letectví hojně používány. Nevýhodou je velké množství děr v potahu i pásnicích podélníků, které působí jako výrazné koncentrátoři napětí a je nutné s nimi při návrhu počítat. [3]

Dále je nutné dbát na vhodné rozmístění nýtů. Jedná se výhradně o rozteč a také počet jejich řad. Špatnou volbou rozteče může při zatížení panelu tlakem nastat zvlnění potahu mezi jednotlivými nýty. Tento jev má negativní vliv na výpočet společné šířky potahu, který bude zmíněn v následující kapitole. [1]

Na obrázku 2-4 je znázorněn speciální nýt nazývaný NACA. Hlava nýtu se umísťuje na vnitřní stranu panelu k přilehlé pásnici podélníku. Závěrná strana nýtu se nachází na jeho vnější straně a přebytečný materiál je odstraněn za pomoci obrábění. Tím je dosaženo hladšího povrchu křídla. Samotné snýtování je prováděno na lisu a vede tak k lepší tuhosti spoje. Tento postup má pozitivní dopad na zmírnění náchylnosti k vrásnění potahu v oblasti nýtů. [1]



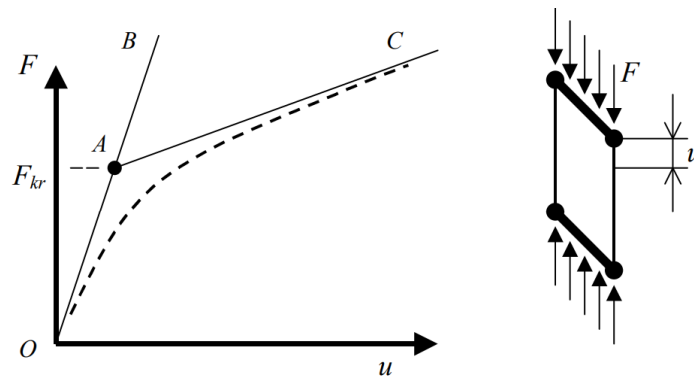
Obrázek 2-4: Nýtový spoj potahu s podélníkem technologií NACA [1]

Při nýtování podélníků k potahu je také možné použití lepidla. Podlepením podélníku dojde ke zlepšení některých pevnostních vlastností a také k utěsnění této části. Adhezivní a kohezivní vlastnosti jsou významně ovlivněny vnějšími vlivy, jako je například vlhkost, teplota a další. S tímto se váže degradace lepidla, které postupem času ztrácí své vlastnosti. [4]

3 ZTRÁTA STABILITY VYZTUŽENÝCH PANELŮ

Obecně lze říct, že tlakové hodnoty osových a membránových složek napětí mohou vést u skořepinových konstrukcí ke ztrátě stability. V určitém bodě náhle nastává přechod z předešlé, již nestabilní konfigurace do nové stabilní konfigurace. Tento přechod se nazývá bifurkace¹ a je spojen s přerozdělením napětí. Protože membránová (tlaková) a ohybová tuhost jsou u tenkostěnných konstrukcí řádově rozdílné, dochází k výrazné deformaci převážně vyboulením. [5]

Jakmile je v zatěžovacím diagramu na obrázku 3-1 dosaženo bifurkačního bodu A, stabilní větev může pokračovat nestabilním směrem AB, nicméně jakýkoli minimální rušivý impuls donutí soustavu přejít do nové stabilní větve AC. Tato větev má takzvané pozitivní směrnicí. To znamená, že rovinná stěna je schopna přenášet další zatížení i po vybočení střednicové plochy, aniž by došlo ke zborcení. Negativní směrnicí větve AC je velice nebezpečná, jelikož při dosažení kritického zatížení dojde k náhlé ztrátě stability a následnému zborcení, proto je snaha se tomuto případu vyhýbat. Reálné konstrukce vykazují imperfekce², které vylučují bifurkační chování. Jejich zatěžovací diagram je na obrázku 3-1 vyznačen přerušovanou křivkou. Ta vypovídá o nelinearitě tohoto problému. Vzdálenost křivky od bifurkačního diagramu ideální stěny je závislá na velikosti imperfekcí a může se v různých případech lišit. [5]



Obrázek 3-1: Zatěžovací diagram tlačené stěny [5]

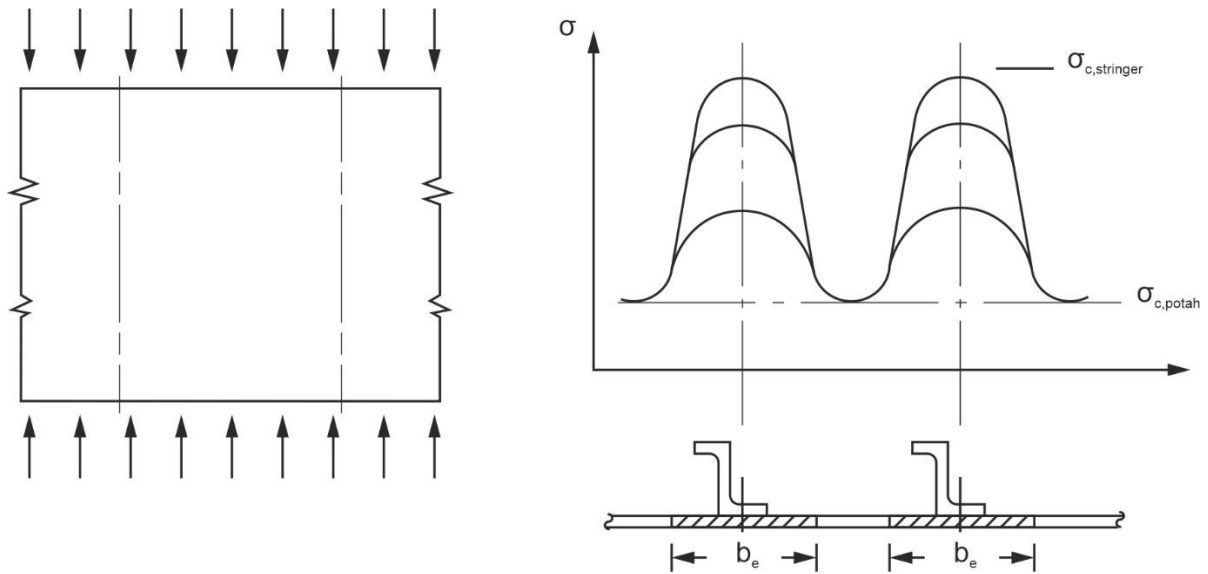
Vyztužené panely křídla zatížené tlakem vykazují podobné chování jak již zmíněné rovinné stěny. Jsou náchylné na ztrátu stability, která může být v určitých případech špatně předvídatelná. V této kapitole bude okrajově naznačen výpočet zejména potahu a jeho tzv. společinné šířky. Detailní analýza a výpočty týkající se podélníku jsou dobře popsány v bakalářské práci Aleše Hály zabývající se přímo tímto tématem viz. zdroj [6].

3.1 SPOLUČINNÁ ŠÍŘKA POTAHU

Vyztužený panel zatížený tlakovými silami je, jak už bylo výše zmíněno náchylný ke ztrátě stability a následnému zborcení panelu jako celku. Odolnost vůči ztrátě stability potahu je podpořena výtuhami (podélníky), které stabilizují potah proti zvlnění nebo vyboulení. Obrázek 3-2 znázorňuje rozložení napětí v panelu při postupném navyšování zatížení. Jakmile se napětí dostane nad hodnotu kritického napětí potahu $\sigma_{c,potah}$, nedojde ke kolizi, jelikož potah přiléhající k podélníkům dokáže toto napětí dále přenést. Děje se tak díky podpoře, kterou poskytují podélníky potahu. Určitá šířka potahu působí jako součást podélníků a nazývá se společinná šířka potahu b_e . [1]

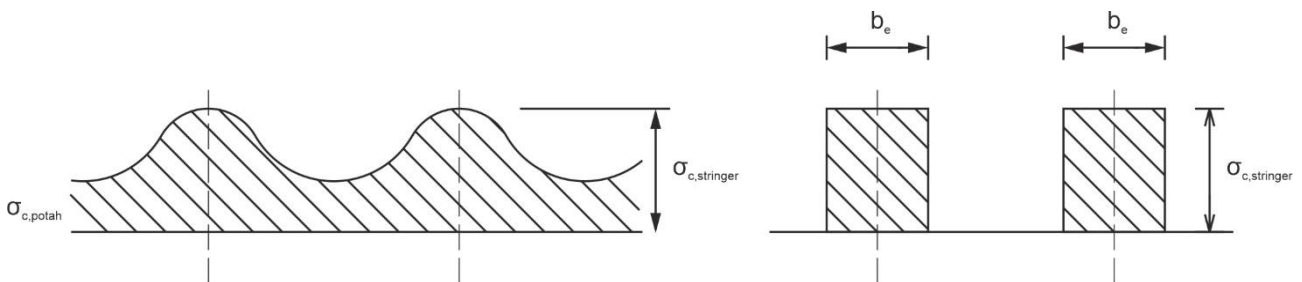
¹ Bifurkace neboli rozdělení rovnováhy.

² Imperfekce – nedokonalost, odchylka od ideálního stavu (geometrického, materiálového).



Obrázek 3-2: Rozložení napětí mezi podélníky [1]

Napětí ve střední části rozteče mezi podélníky nepřekročí hodnotu kritického napětí potahu $\sigma_{c,potah}$, bez ohledu na velikost napětí v podélnících. Maximální možné přenesené zatížení se odvíjí od velikosti vzpěrného napětí v podélníku $\sigma_{c,stringer}$. Reálné rozložení napětí v panelu je znázorněno na obr. 3-3 vlevo, vpravo je potom znázorněno zjednodušení pro výpočty pomocí efektivní šířky b_e .



Obrázek 3-3: Zjednodušení pomocí společinné šířky potahu [1]

Efektivní šířka potahu lze vypočítat následujícím vztahem:

$$\sigma_{c,stringer} = K_C E \left(\frac{t}{b_e} \right)^2 \rightarrow b_e = t \cdot \sqrt{\frac{K_C E}{\sigma_{c,stringer}}}$$

Kde:

- $\sigma_{c,stringer}$ = Tlakové napětí při vzpěru podélníku
- K_C = Koeficient vzpěrné stability
- E = Youngův modul pružnosti
- t = Tloušťka potahu
- b_e = Společinná šířka potahu

Hodnota koeficientu vzpěrné stability K_C může nabývat následujících hodnot:

$$K_C = 3,6 \quad \text{pro } \frac{b}{t} = 40$$

$$K_C = 6,3 \quad \text{pro } \frac{b}{t} = 110$$

Kde:

b = Rozteč podélníků

t = Tloušťka potahu

Mezi těmito hodnotami dochází k postupnému přechodu, jak je znázorněno v diagramu na obrázku 3-4. Hodnota koeficientu vzpěrné stability K_C je závislá zejména na druhu okrajových podmínek. Pro jednořadé nýtování se předpokládají okrajové podmínky podobné spíše kloubové vazbě, proto je K_C rovno 3,6. Při použití dvouřadého nýtování jsou okrajové podmínky lépe aproximovány vetknutím a hodnota K_C je rovna 6,3.

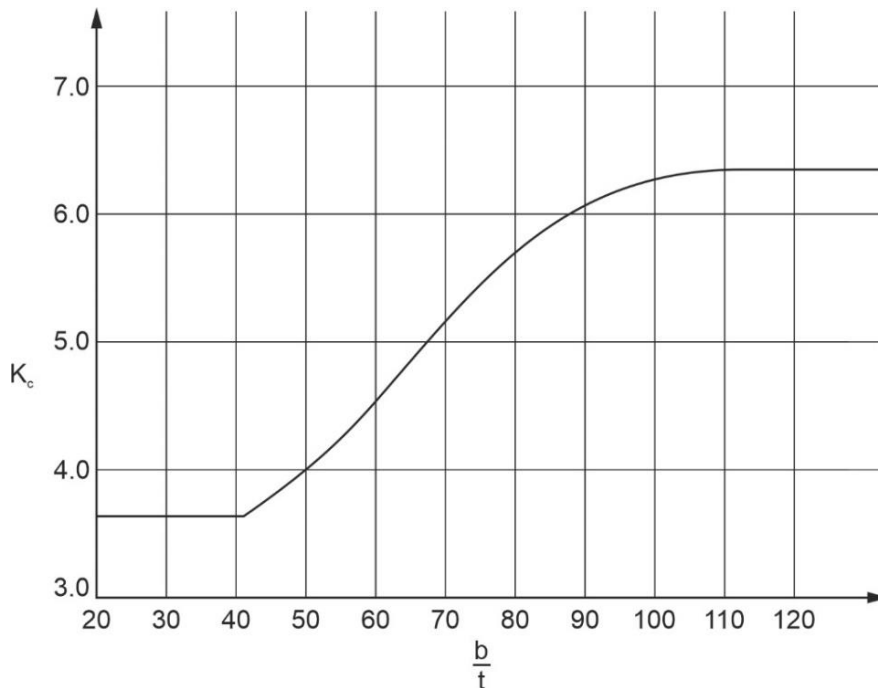
Pokud budeme uvažovat, že je součinitel $K_C = 3,6$ a Youngův modul duralu $E = 72000 \text{ MPa}$, pak můžeme pro různá dovolená napětí podélníku získat tyto vztahy [7]:

Pro dovolené napětí $\sigma_{c,stringer} = 275 \text{ MPa}$

$$b_e = t \sqrt{\frac{K_C E}{\sigma_{c,stringer}}} \approx 30 \cdot t$$

Pro dovolené napětí $\sigma_{c,stringer} = 160 \text{ MPa}$

$$b_e = t \sqrt{\frac{K_C E}{\sigma_{c,stringer}}} \approx 40 \cdot t$$

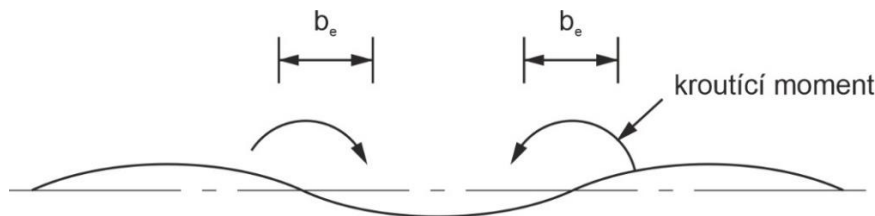


Obrázek 3-4: Hodnota koeficientu vzpěrné stability K_C [1]

3.2 TYPY NESTABILIT PANELU

Vyztužený panel může v závislosti na své geometrii, tuhosti a okrajových podmínkách vykazovat různé režimy nestabilit, které lze obecně rozdělit na lokální, globální a smíšené. Jedná se o komplexní problém, u kterého není jednoznačné, jaký typ nestability bude nejvýznamnější. Zpravidla nastává kombinace zmíněných typů. Obvykle nastane jako první globální vybočení podélníku. Toto vybočení se následně začíná zvětšovat, až do doby, kdy podélník začíná ztrácet svou únosnost. V tomto okamžiku je podélník zdeformovaný natolik, že dojde k jeho poddajné deformaci. Panel tedy přejde do režimu globální ztráty stability a následuje jeho postupné zborcení. [8]

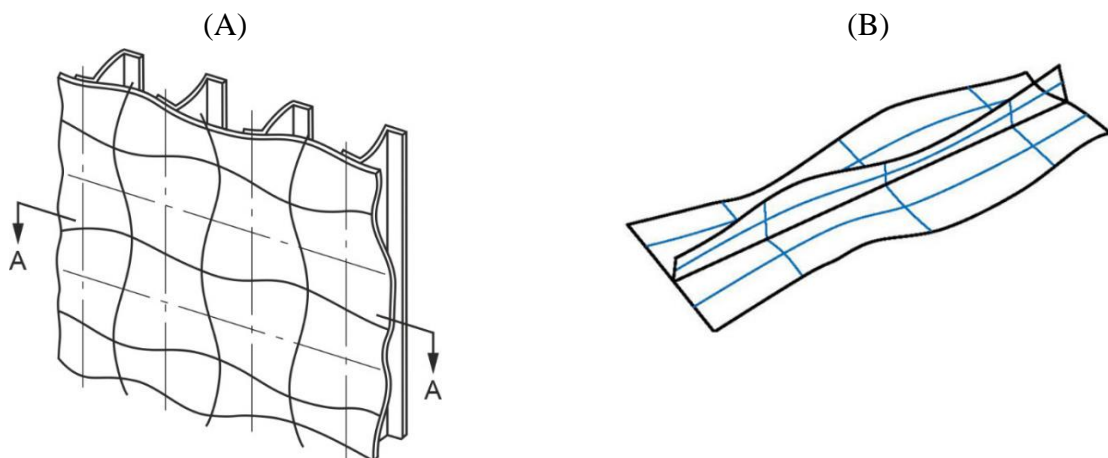
Podélník se pod vlivem zatížení může začít deformovat jak ohybově, tak torzně. Také mohou nastat lokální deformace vzniklé zejména imperfekcemi. Tyto zmíněné typy deformací podélníku jsou přenášeny do potahu a určují jakým způsobem bude potah dále namáhán. Nejvýznamnější zátěžnou složkou potahu je vliv krouticího momentu vzniklého torzní deformací podélníku. Tento princip může platit i ze strany potahu, a to tak, že deformovanou částí je podélník důsledkem zvlnění potahu. Je tak znázorněno na obrázku 3-5. Jaký stav nastane závisí primárně na tuhosti jednotlivých komponent panelu křídla. [1]



Obrázek 3-5: Kroutící moment působící na podélníky.

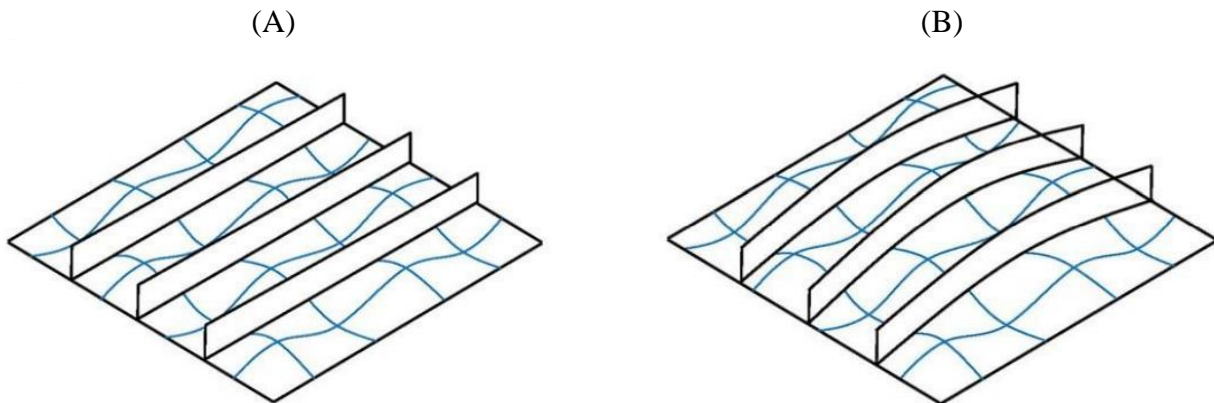
3.2.1 POČÁTEČNÍ NESTABILITA

Je to počáteční fáze vzpěru, která může nastat již při nižším prvotním zatížení. Projevuje se zejména zvlněním potahu, lokální nestabilitou a malou torzní deformací podélníku, která je na obrázku 3-6 (A) přehnaná (kvůli zřetelnému zobrazení). Ve skutečnosti jde o mnohem menší deformace. Na obrázku 3-6 (B) je znázorněna klopná deformace podélníku způsobená kroutícím momentem ze strany potahu, která vede k přechodu do režimu globálního vzpěru [8]. Obvykle dojde ke zvlnění potahu s poloviční vlnovou délkou mezi roztečí podélníků. [1]



Obrázek 3-6: (A) Počáteční vzpěr panelu [1], (B) Klopná deformace podélníku [8]

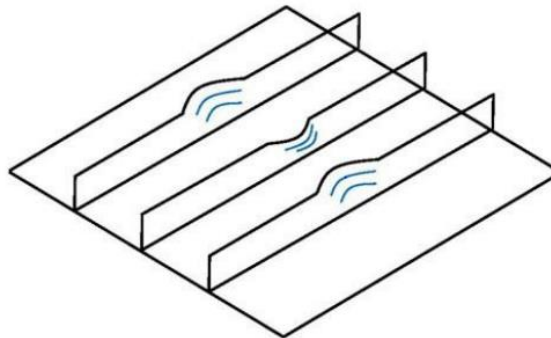
Na obrázku 3-7 (A) je znázorněno lokální zvlnění potahu (bez torzní deformace podélníků, jak bylo uvedeno výše), které může taktéž nastat téměř od začátku zatěžování. Tento režim může vést ke ztrátě stability panelu v důsledku následné poddajné deformace potahového pole mezi podélníky. Obrázek 3-7 (B) zobrazuje kombinaci případu (A) a globálního vzpěru podélníků. K porušení tedy dochází kombinací obou zmíněných režimů. [8]



Obrázek 3-7: Další režimy počátečního vzpěru panelu křídla [8]

3.2.2 LOKÁLNÍ NESTABILITA

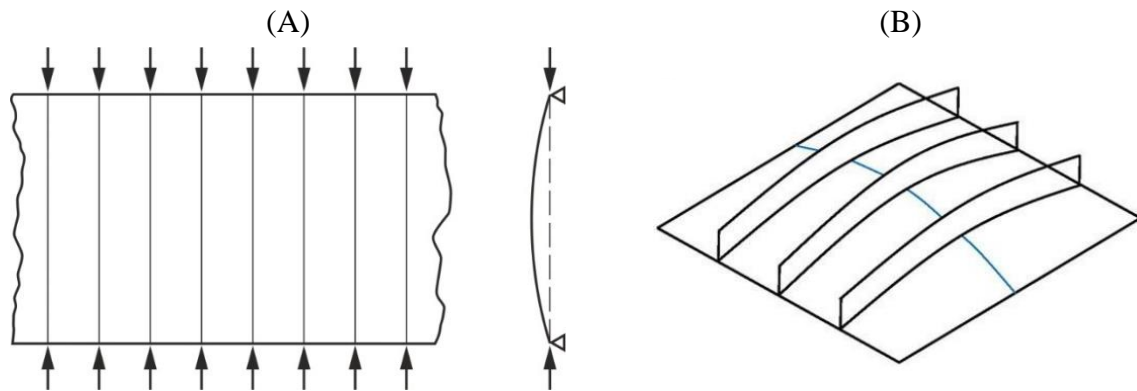
Lokální nestabilita může nastat jak na potahu, tak na podélníku (viz. obrázek 3-8). Tento režim nestability je obvykle vyvolán určitou imperfekcí. Příčinou imperfekce může být například výrobní nepřesnost. Tloušťka a přímota podélníku ani potahu není konstantní a obě tyto části mají určité odchylky od jmenovitého rozměru, které v tomto případě nemusí být zanedbatelné. [1]



Obrázek 3-8: Lokální nestabilita podélníku [8]

3.2.3 GLOBÁLNÍ ZTRÁTA STABILITY

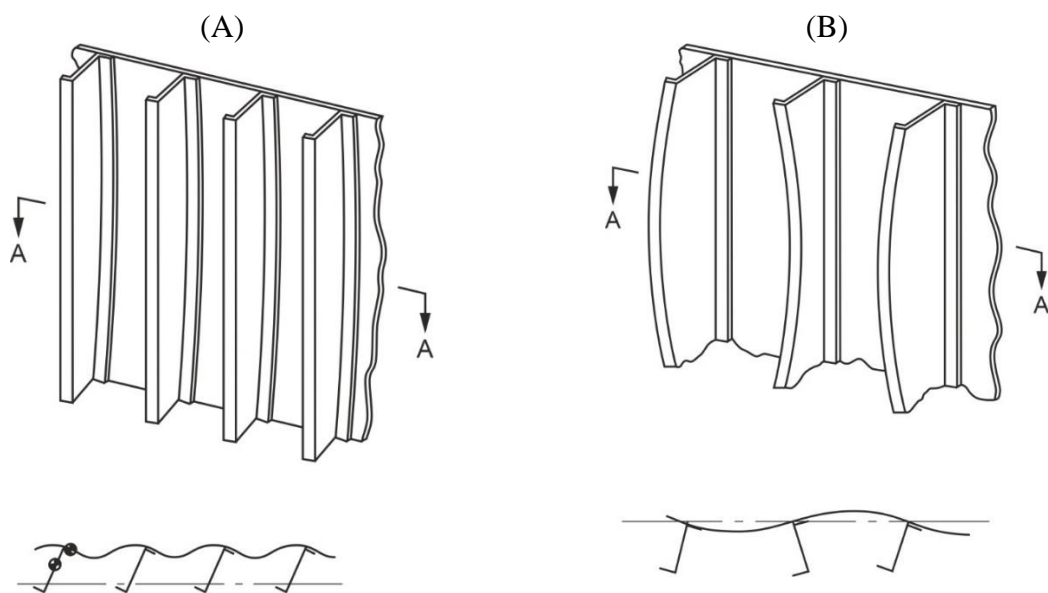
Jedná se o podobnou situaci, jako je vzpěr přímého prutu popsán Eulerem. U globální ztráty stability dochází k vybočení celého panelu ve směru normály k jeho ploše, jak je znázorněno na obrázku 3-9 (A), (B). Dochází k průhybu panelu s poloviční vlnovou délkou mezi roztečí žeber nebo rámu. Deformace tímto způsobem obvykle nastává sekundárně po režimu počáteční ztráty stability. V případě, kdy je tuhost podélníků menší, než tuhost potahu nastává tento režim bezprostředně bez počátečních nebo lokálních ztrát stability [8]. I v tomto případě nedochází ke ztrátě stability pouze globálním vzpěrem, ale také k určitému zkroucení podélníků. Tato situace je velice složitá na analýzu, proto je cílem zkonstruovat konfiguraci s co největší tuhostí podélníků v ohybu a zároveň v krutu. [1]



Obrázek 3-9: Globální vzpěr panelu (A) [1], (B) [8]

3.2.4 TORZNÍ NESTABILITA

Tento druh nestability se týká zejména podélníků, které se jako celek otáčí okolo podélné osy ležící v rovině potahových polí. Nedochozí tak k deformaci jejich průřezu, ale pouze k jeho rotaci a globálnímu průhybu ve směru normály k ploše potahu, jak je patrné z obrázku 3-10 (A). Vlnová délka při deformaci potahu může být až trojnásobkem rozteče podélníků. Na obrázku 3-10 (B) je znázorněn další režim torzní nestability, při které se potah zvlní s poloviční vlnovou délkou mezi roztečí podélníků. U podélníků nastane průhyb ve směru normály k jejich stojině. S tím souvisí také menší průhyb panelu ve směru normály k jeho ploše. Torzní nestabilita je velice obtížná na predikci a výše popsané režimy jsou pouze jedny z mnoha možností této nestability. [1]

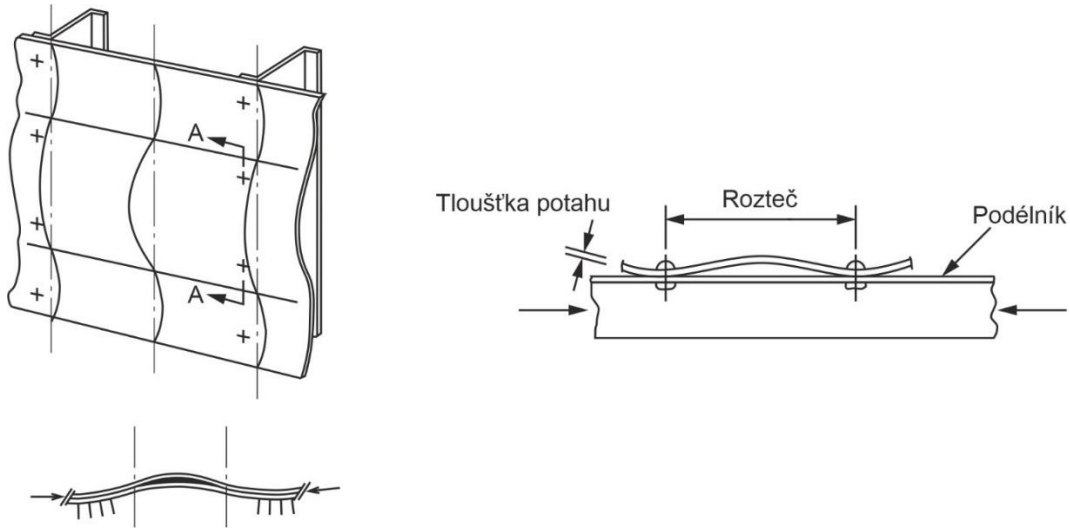


Obrázek 3-10: (A) Torzní nestabilita v kombinaci s globálním vzpěrem [1], (B) Torzní nestabilita [1]

3.2.5 ZTRÁTA STABILITY POTAHU MEZI NÝTY

Vlivem rozdílné tuhosti potahu a podélníku může nastat vzpěr potahu mezi nýty, který je znázorněn na obrázku 3-11. Dalším výrazným činitelem je tuhost samotných nýtových spojů, která se odvíjí od způsobu jejich výroby. Tento typ ztráty stability má významný vliv na správnost výpočtu již zmíněné společné šířky potahu b_e . Pokud dojde ke zvlnění potahu v okolí nýtů, potah v těchto místech nedokáže přenést předpokládané zatížení a není tak dostatečnou oporou pro podélník. V tomto

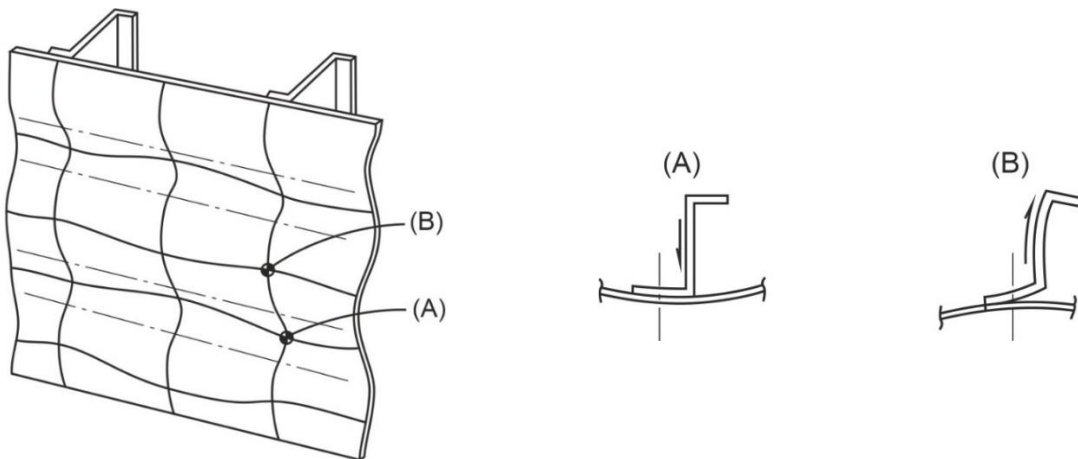
případě by byl výpočet společné šířky potahu nesprávný. Tomuto jevu lze zabránit dostatečně těsnou roztečí jednotlivých nýtů, případně použitím dvou řad nýtů vedle sebe. U integrálních panelů tento podlém odpadá. [1]



Obrázek 3-11: Ztráta stability potahu mezi nýty [1]

3.2.6 VRÁSNĚNÍ POTAHU

Jedná se o režim nestability podobný ztrátě stability mezi nýty. Tato nestabilita spočívá v odklonění potahu od ležaté pásnice podélníku (viz. obrázek 3-12 vpravo) vlivem pružné vazby realizované pomocí nýtů. Tomuto jevu se lze vyhnout umístěním nýtů co nejtěsněji ke stojině podélníku, případně použitím dvouřadého nýtování. [1]

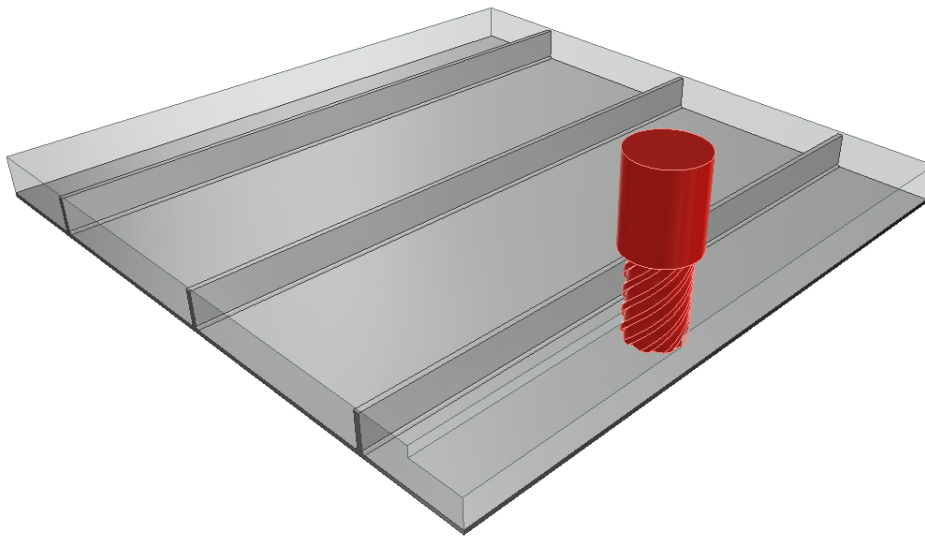


Obrázek 3-12: Vrásnění potahového plechu křídla. [1]

4 INTEGRÁLNÍ PANELEY

Některé aplikace v letectví požadují vyšší nároky na odolnost jednotlivých částí draku letadla. Jedna z nich je i panel křídla, který bývá mnohdy vystaven extrémnímu zatížení. Proto je za určitých okolností vhodné použití integrálního panelu. U tohoto typu panelu odpadají stabilitní problémy spojené s nýtováním, proto už z principu nemůže docházet ke ztrátě stability mezi nýty a k vrásnění potahu.

Jedná se o jednolitou a lehkou konstrukci s vysokou pevností, jelikož výztužné profily nemusí být spojeny s potahem nýtováním, které v dírách vytváří výraznou koncentraci napětí. Nejčastěji jde o panelové profily vyrobené frézováním z jednoho kusu materiálu (slitiny hliníku), jak je znázorněno na obrázku 4-1. V některých případech jde o výlisky, které mohou být dále obráběny. Tato varianta výroby je ekonomičtější, vše ale záleží na konkrétní aplikaci. [1]



Obrázek 4-1: Integrální panel vyráběný frézováním

Mezi přednosti integrální konstrukce panelu ve srovnání s nýtovaným panelem patří:

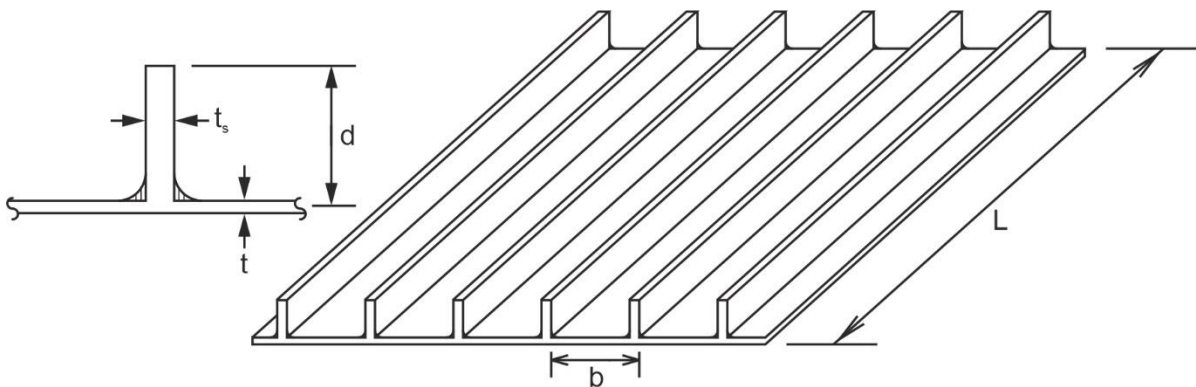
- Vyšší odolnost vůči vzpěrnému zatížení. Při návrhu příčného průřezu podélného výztužného prvku dochází k efektivnějšímu využití materiálu pro přenos zatížení. Tyto prvky nemusí mít pouze jednoduchý obdélníkový průřez. Využívá se toho, že podélník nemusí mít přípojnou plochu (pásnici) pro realizaci spoje s potahem pomocí nýtů. Z toho vyplývá, že se tato hmota může využít pro vhodnější tvar příčného průřezu podélníků, a tím pádem dojde k výraznému zlepšení vlastností panelu při zachování hmotnosti. [1]
- Zlepšení aerodynamických vlastností křídla, jelikož je dosaženo hladšího povrchu díky použití menšího počtu spojovacích elementů (nýtů). Při zatížení také dochází k menšímu průhybu a vyboulení nosného potahu způsobeného větší tuhostí integrálního panelu. [1].
- Jednodušší řešení utěsnění palivových nádrží přímo integrovaných v křídle díky menšímu počtu děr vzniklých nýtováním (částečné odstranění problematického těsnění nýtovaných panelů). [1].

4.1 NÁVRHOVÝ DIAGRAM

Pro snadnější počáteční návrh je výhodné použití návrhového diagramu (viz. obrázek 4-3), díky němuž je možné rychle stanovit optimální prvotní rozměry příčného průřezu.

Pro další úvahy je stanoven integrální panel o rozměrech, které jsou patrné z obrázku 4-2, kde:

- t_s = Tloušťka výztuhy
- t = Tloušťka potahu
- b = Rozteč mezi výztuhami
- d = Výška výztuhy vůči střednici potahu
- L = Délka panelu

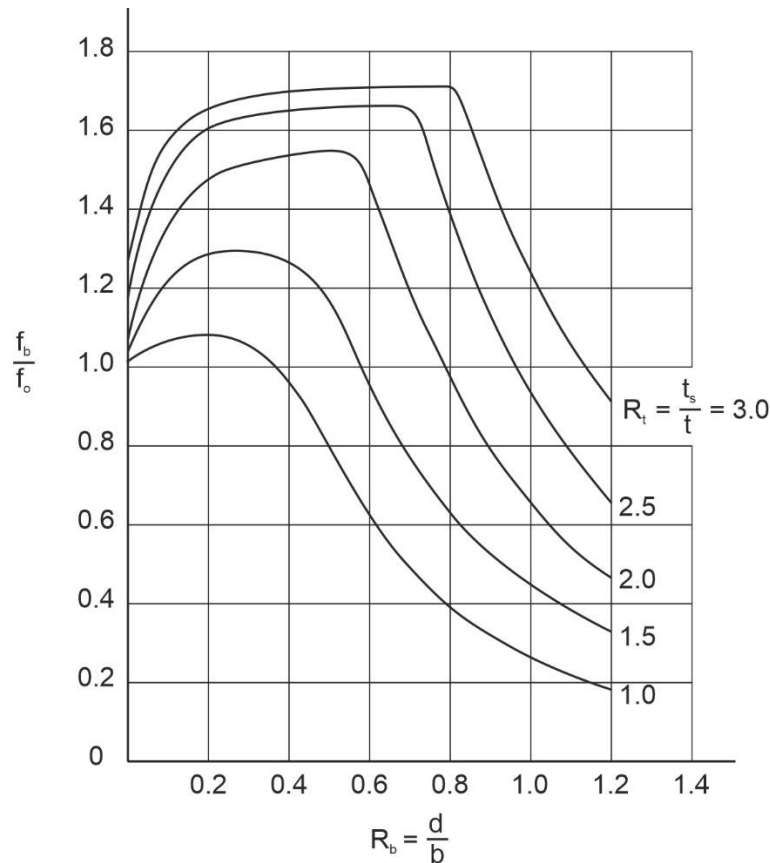


Obrázek 4-2: Základní rozměry integrálního panelu [1]

Předpoklady:

- Pro následující diagram je nutné uvažovat panel s jednoduchými podélníky obdélníkového průřezu o tloušťce t_s a výšce d vztažené ke střednicové ploše (viz. obrázek 4-2). [1]
- Dále předpokládáme pouze osové zatížení. V reálné situaci je panel namáhán excentrickým zatížením, které způsobí výskyt ohybového momentu už od začátku zatěžování panelu. Nicméně Niu ve své knize uvádí, že dimenzování panelu závisí z 80-90 % pouze na osové síle. Takový panel se považuje za ideální stěnu³. [1]
- Panel je dostatečně široký, abychom k němu mohli přistupovat jako k ideální stěně. Na podélné hrany, které nejsou uchyceny nesmí působit žádné zatížení, aby nedocházelo k nežádoucímu ohybu. [1]
- Uložení je realizováno pomocí rotační vazby. Lze však použít vetknutí, pokud považujeme délku L za menší, než je celková délka panelu [1]. V takovém případě se pracuje jen s určitou výsečí panelu.
- Výška výztuh je v porovnání s celkovou výškou křídla výrazně menší [1].
- Poměry $\frac{t_s}{d}$ a $\frac{t}{b}$ se předpokládají dostatečně malé [1].

³ Ideální stěna nemůže být zatížena ohybem narozdíl od desky.



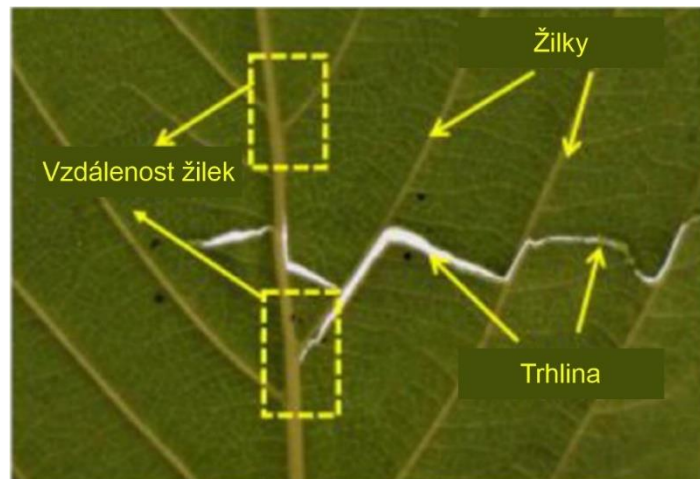
Obrázek 4-3: Návrhový diagram [1]

Návrhový diagram na obrázku 4-3 znázorňuje procentuální změnu počátečního vzpěrného napětí panelu f_b vůči počátečnímu vzpěrnému napětí samotného potahu f_0 . Na vodorovné ose se nachází poměry výšky výztuhy ku rozteči jednotlivých výztuh, které jsou označeny jako R_b . Jednotlivé křivky vyjadřují poměr tloušťky výztuhy t_s ku tloušťce potahu t a jsou označeny jako R_t . Pomocí těchto poměrů lze v diagramu vyhledat bod a k němu na svislé ose odečíst příslušnou hodnotu. Tato hodnota vypovídá o správnosti geometrické konfigurace panelu. Například hodnota 1,2 odpovídá 20 % zvýšení počátečního vzpěrného napětí f_b vyztuženého integrálního panelu. Tento způsob poskytuje rychlé prvotní přiblížení efektivity geometrických rozměrů panelu křídla. [1]

4.2 VYZTUŽENÍ INTEGRÁLNÍHO PANELU BIONICKOU STRUKTUROU

Tento druh výztuže je inspirován listy stromů v přírodě, konkrétně jejich žilkami. List rostliny je dlouhodobě vystaven dosti podobným podmínkám, jako křídlo letadla, ale v menším měřítku. Musí odolávat vlhkosti, poryvům větru a dešti. Žilky mají za úkol nejen vyztužit list, ale také fungují jako zastavovače trhlin. Jedná se o mechanismus, který při průchodu trhliny žilkou odvrátí trhlinu z jednoho směru do druhého (viz, obrázek 4-4), tím pádem se prodlužuje dráha trhliny. Toto má pozitivní dopad na šíření potenciální trhliny, vzniklé cyklickým namáháním. [9]

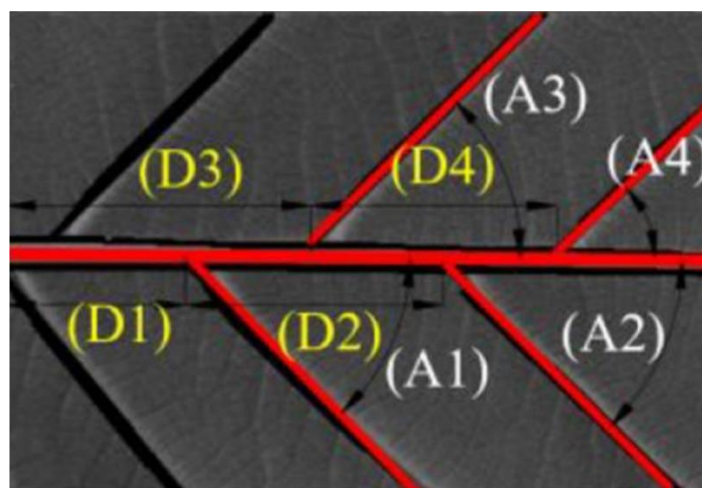
Pokud by se podařilo tyto vlastnosti naimplementovat na křídlo letadla, mohlo by být dosaženo velice dobrých výsledků. Jednak by došlo, k již zmíněnému odklonění dráhy trhliny. Tím pádem by se zvětšila bezpečnost, pokud by při inspekci křídla letadla nebyla odhalena trhлина. Další pozitivní vlastností je stabilizace potahu vůči jeho vyboulení a zvlnění při dosažení mezního stavu vzpěrné stability. Tato vlastnost je v této práci brána jako klíčová a v další analýze bude dále vyhodnocena.



Obrázek 4-4: Odklonění trhliny v listu rostliny [9]

4.2.1 BIONICKÉ PARAMETRY

Aby bylo možné získat převážně rozměrové parametry bionické struktury (listu stromu) je v článku [9] použito několika algoritmů pro digitální zpracování snímků žilek listu. Po této digitální úpravě jsou do snímku na obrázku 4-5 zavedeny rozměry, které budou následně upravovány. Těmito parametry jsou vzdálenosti žil (D1 – D4) a úhly žil (A1 – A4). [9]



Obrázek 4-5: Rozměrové parametry bionické struktury [9]

V článku (viz. zdroj [9]) zabývajícím se výzkumem vlivu bionické struktury bylo analyzováno cca 210 listů a byly stanoveny následující čtyři experimentální vzorky:

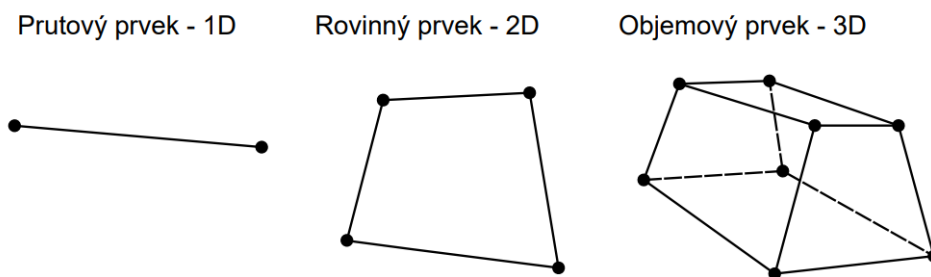
- BCU-1: D1=7 mm, D2=10 mm, D3=12 mm, D4=10 mm, Úhel=47°
- BCU-2: D1=9,4 mm, D2=10 mm, D3=12 mm, D4=10 mm, Úhel=47°
- BCU-3: D1=9,4 mm, D2=10 mm, D3=12 mm, D4=10 mm, Úhel=33°
- BCU-4: D1=7,9 mm, D2=8,7 mm, D3=9,3 mm, D4=12,5 mm, Úhel=38°

Tyto CT vzorky byly měřeny z hlediska zastavení šíření trhliny. Z měření vyšlo, že nejlepší konfigurací je vzorek BCU-3. Ve výpočtové části budou rozměrové parametry inspirovány tímto vzorkem použity k analýze vzpěrné stability panelu.

5 ÚVOD DO ANALÝZY POMOCÍ MKP

Metoda konečných prvků (dále už jen MKP) vznikla na základě požadavku pro výpočty obtížně analyticky řešitelných konstrukcí v leteckém, kosmickém, jaderném a vojenském průmyslu. V posledních letech je čím dál více rozvíjející se metodou pro řešení úloh pružnosti, dynamiky, ale i vedení tepla atd. Řešení je vždy, zejména u složitých úloh, přibližné. Proto je nutné výsledky hodnotit kriticky, případně použít další ověření například porovnáním s analytickým řešením nebo s experimentálním měřením. Odchylka od reálného stavu závisí na mnoha faktorech, nicméně pokud se výpočet neliší o více jak 15 % od experimentu, můžeme považovat tento výpočet za relevantní.

Princip výpočtu spočívá v rozdělení spojitých funkcí na konečný počet neznámých parametrů. Toto rozdělení se nazývá diskretizace. Diskretizace přibližně aproximuje spojitý problém, proto má největší vliv na přesnost řešení. V praxi to znamená, že na správnost výsledků má vliv zejména kvalita a velikost sítě konečných prvků, která reprezentuje původní tvar tělesa. Základní druhy konečných prvků jsou znázorněny na obrázku 5-1 a jejich použití závisí na druhu řešené úlohy. Vždy je snaha problém zjednodušit natolik, aby výpočet proběhl co nejrychleji a zároveň s co nejmenší, nebo pokud možno přijatelně velkou odchylkou. K této transformaci reálného problému na matematický model napomáhají právě zmíněné druhy prvků. Značnou výhodou MKP je, že řešení diskrétního problému lze snadno provádět na počítači za použití algebraických rovnic. [5]



Obrázek 5-1: Druhy konečných prvků [5]

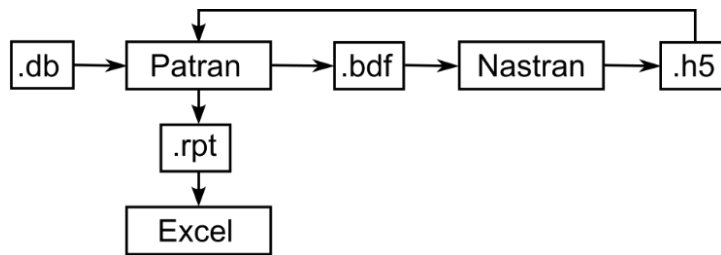
Z hlediska matematického se pro řešení využívá variační metody, pomocí níž se hledá minimum funkcionálu celkové potenciální energie tělesa Π . Tato potenciální energie je rovna rozdílu celkové energie napjatosti tělesa W a potenciálu vnějšího zatížení P . [5]

$$\Pi = W - P$$

Dalšími úpravami lze vyjádřit základní rovnici MKP v maticovém tvaru. Tato rovnice udává závislost síly \mathbf{F} , tuhosti \mathbf{K} a posuvu \mathbf{U} . Aby byla rovnice jednoznačně řešitelná, je třeba předepsat dostatečný počet okrajových podmínek. Platí obecná zásada, která říká, že musí být předepsány takové okrajové podmínky, aby bylo zamezeno pohybu tělesa v prostoru v závislosti na typu a dimenzi úlohy. Matice tuhosti \mathbf{K} je určena materiálovými charakteristikami, matice silového působení \mathbf{F} je taktéž známá. Jediným neznámým parametrem je matice posuvů \mathbf{U} , ze které lze vypočítat přetvoření a následně určit velikost napětí v libovolném bodě na tělese. [5]

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}$$

Pro výpočty existuje nespočet různých softwarů, nicméně v této práci bude použit MSC Patran a MSC Nastran. Celé řešení úlohy v tomto balíčku programů je schematicky zobrazeno na obrázku 5-2 a lze rozdělit do následujících čtyř sekcí: preprocesing, numerický výpočet, postprocesing a grafický výstup. V preprocesingovém programu Patran je nadefinována vstupní geometrie, materiálový model, síť konečných prvků a okrajové podmínky. Výstupní textový soubor s koncovkou *.bdf* slouží jako vstup pro řešič Nastran. Značnou výhodou textového souboru je možnost změny určitých dat (např. tloušťky skořepinového prvku) bez nutnosti tvorby nového databázového souboru *.db*. V řešiči proběhne numerický výpočet s výstupní koncovkou *.h5*, který je nutné zpětně nahrát do postprocesingového programu Nastran. Zde je možné vykreslit napětí a deformace, nebo vytvořit simulaci pro přehlednější verifikaci výsledků. Zkoumané výsledky je poté možné pomocí *.rpt* souboru naimportovat do Excelu pro snadnější zpracování grafů.



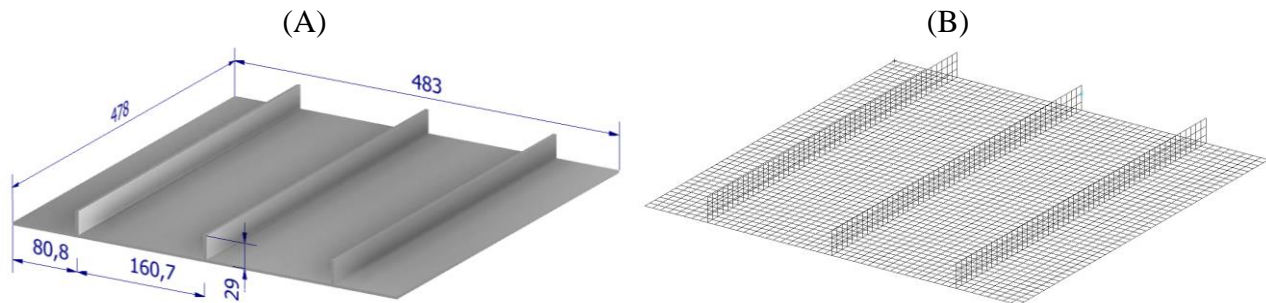
Obrázek 5-2: Schéma řešení

6 ZÁKLADNÍ VÝPOČTOVÝ MODEL

V následujících podkapitolách bude provedena numerická analýza základního panelu, který bude sloužit jako výchozí konfigurace pro další výpočty. Z tohoto důvodu je panel označen jako základní.

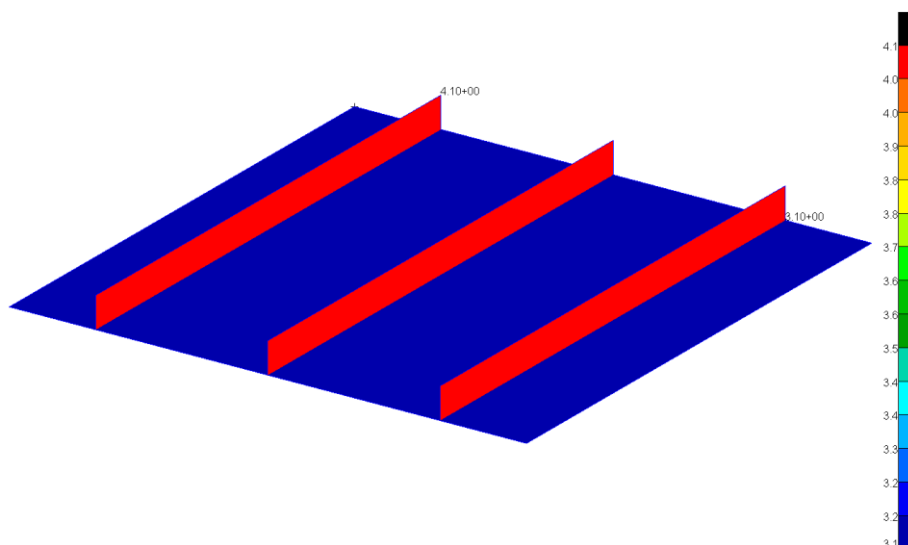
6.1 GEOMETRIE

Prvním krokem je vytvoření vstupní geometrie, která je určena rozměry z obrázku 6-1 (A). Geometrii je možno vymodelovat přímo v preprocesingovém programu Patran, nicméně složitější typy modelů lze naimportovat z libovolného CAD softwaru. Jelikož je využito 2D prvků, je výhodnější geometrii vymodelovat v Patranu formou střednicových ploch, kterým je následně přiřazena zadaná tloušťka. Pro výpočet skořepiny jsou rovinné prvky vhodnější než objemové prvky, ať už z hlediska celkového počtu prvků, výpočetního času a přesnosti řešení. Síť konečných prvků je v tomto případě tvořena prvky *CQUAD4*. Jde výhradně o čtvercové rovinné plochy spojující čtyři krajní uzly, jak lze vidět z obrázku 6-1 (B). Celkový počet prvků je 2891 a počet uzlů činí 3004.



Obrázek 6-1: (A) Rozměry panelu, (B) Ukázka sítě konečných prvků

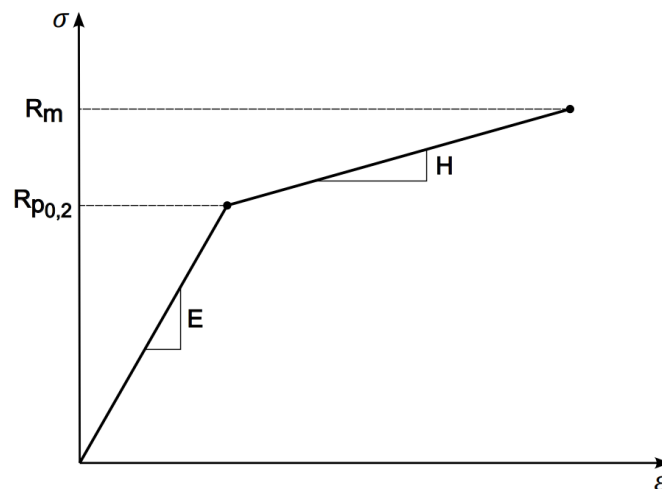
Jak už bylo zmíněno, rovinné prvky jsou tvořeny střednicovými plochami a následně je každé ploše přiřazena tloušťka. Jedná se o tloušťku potahu, která je 3,1 mm a tloušťku výztužného profilu, která činí 4,1 mm, jak je patrné z obrázku 6-2. Program Patran tuto tloušťku skořepiny rovnoměrně rozdělí, a to tak, že na každou stranu od střednice je přičtena polovina celkové tloušťky.



Obrázek 6-2: Tloušťka potahu a podélných výztužných prvků

6.2 MATERIÁL

Dalším nezbytným krokem je nadefinování materiálu. Po konzultaci s vedoucím práce je použit Dural 7050 – T741. Jelikož jsou předpokládány velké deformace, je nutné uvažovat elastoplastické deformace – tzn. dojde k překročení smluvní meze kluzu materiálu $R_{p0,2}$, která je rovna 427 MPa . Tento model materiálu je nazýván jako bilineární (nebo také nelineární), protože je určen dvěma lineárními přímkami, jak je patrné z obrázku 6-3. Oblast do meze kluzu je nazývána jako elastická. Sklon přímky je určen Youngovým modulem pružnosti E , který je roven $71\,016 \text{ MPa}$. Přetvoření určuje Poissonův poměr $\mu = 0,33$. Po dosažení meze kluzu následuje oblast plastických deformací. Zde je materiál popsán další přímkou, jejíž sklon je určen modulem deformačního zpevnění⁴ H , který je roven 740 MPa .



Obrázek 6-3: Model bilineárního materiálu

V programu Patran je materiál nadefinován v kartě *materials* pomocí dvou materiálových modelů. Na obrázku 6-4 vlevo lze vidět zadané vstupní hodnoty. Je zvolen elastoplastický a izotropní model, určený výše zmíněným modulem deformačního zpevnění. Mez kluzu je počítána z podmínky Von Mises. Na totožném obrázku vpravo je ukázán zápis materiálu ve výstupním *.bdf* souboru. *MAT1* popisuje počáteční elastickou oblast, *MATS1* definuje oblast s plastickými deformacemi.

Constitutive Model:	Elastoplastic
Nonlinear Data Input:	Hardening Slope
Yield Function:	Von Mises
Hardening Rule:	Isotropic
Strain Rate Method:	None

Property Name	Value
Hardening Slope =	740.
Yield Point =	427.

Current Constitutive Models:

- Linear Elastic - [,,,] - [Active]
- Elastoplastic - [Hardening Slope, Von Mises, Isotropic,] - [Active]


```

CQUAD4 438 2 591 592 596 595]
CQUAD4 439 2 593 594 598 597
CQUAD4 440 2 594 595 599 598
CQUAD4 441 2 595 596 600 599
$ Referenced Material Records
$ Material Record : Dural 7050 - T741
$ Description of Material : Date: 22-Jul-19 Time: 13:29:30
MATS1 1 PLASTIC740. 1 1 427.
MAT1 1 71016. .33
$ Multipoint Constraints of the Entire Model
$ ID conflict : the PATRAN MPC ID was 1
RBE2 2892 399 123456 197 198 199 200 397
398 400 597 598 599 600 1043 1044
1045 1046 1047 1048 1049 1050 1934 1935
1936 1937 1938 1939 1940 1941 1942 1943
1944 1945 1946 1947 1948 1949 2021 2022

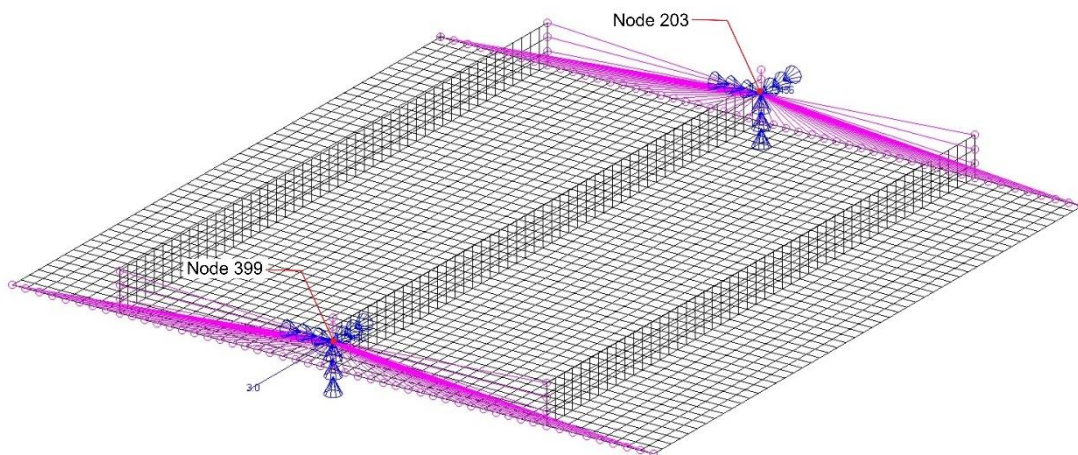
```

Obrázek 6-4: Nadefinování materiálu v Patranu a ve výstupním *.bdf* souboru

⁴ V programu Patran označen jako Hardening Slope.

6.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajovými podmínkami jsou definována všechna zatížení a uložení tělesa v prostoru. Panel je v prostoru nepohyblivě uchycen pomocí vetknutí. Tato okrajová podmínka je aplikována na řídicí body *Node 203* a *Node 399* a pomocí *MPC*⁵ je rovnoměrně rozdělena do všech uzlů. Do uzlu *Node 399* je navíc předepsáno deformační zatížení posuvem o 3 mm v podélném směru, jak lze vidět na obrázku 5-7. Zde je z vetknutí odebrán jeden stupeň volnosti v tomto směru, aby mohlo dojít ke stlačení. Pro další, zejména grafické výstupy, je měřena reakční síla ve vetknutí (*Node 203*), jako odezva na zmíněné deformační zatížení – stlačení. V rámci zjednodušení výpočtového modelu se volné konce panelu ponechávají bez jakékoli vazby. Pro reálnější simulaci by bylo možné je pružně podepřít, ovšem tento zásah by model udělal výrazně složitějším. V této situaci je splněn předpoklad dostatečně širokého panelu, proto může být toto zjednodušení provedeno.



Obrázek 6-5: Okrajové podmínky

6.4 MKP VÝPOČET ZÁKLADNÍHO PANELU

Pro správné výsledky numerických výpočtů je klíčová správná volba výpočetní analýzy. Jelikož se panel křídla v průběhu zatěžování chová nelineárně, jak bylo popsáno v kapitole 3, je na místě použití nelineární analýzy. Nelineární přístup MKP úlohy spočívá v rozdělení zatížení na předem určený počet kroků. Zatížení je aplikováno s postupnými přírůstky právě v těchto krocích. Těleso po prvním kroku vykazuje určitou deformaci a v následujícím kroku je zatížení aplikováno na již zdeformovaný tvar z předešlého kroku. Tímto způsobem je umožněno sledovat odezvu panelu na postupně vzrůstající zatížení. [5]

Ve výpočetním softwaru Nastran je nelineární analýza označena jako *SOL 106* (Nonlinear Static Analysis) a umožňuje nastavení zatížení do již zmíněných jednotlivých přírůstků. Počet kroků byl z počátku nastaven na hodnotu 100, nicméně tato hodnota se může výrazně lišit v závislosti na průběhu daného výpočtu. V průběhu analýzy byla tato hodnota výrazně upravována i za pomoci rad vedoucího práce. Při celkovém posuvu o 3 mm se aktuální stlačení Δl , potřebné pro vykreslení grafů, vypočte následovně:

$$\Delta l = \frac{3 \cdot x}{k}$$

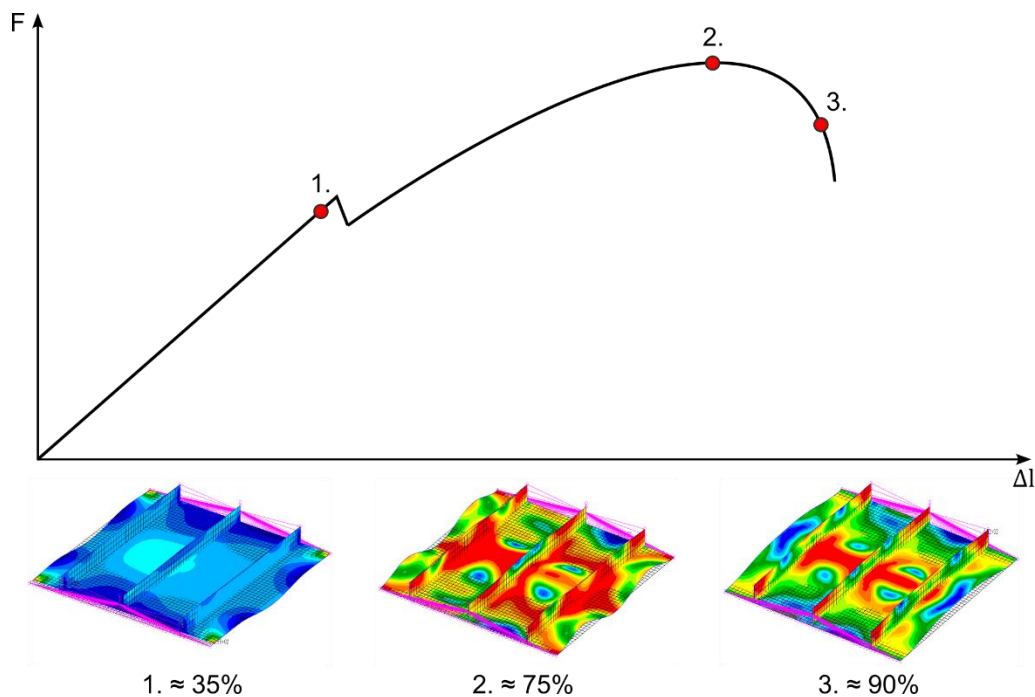
⁵ Zkratka pro Multi-Point Constraints.

Kde:

x = Aktuální krok

k = Celkový počet kroků (při výpočtech v rozmezí od 100 až přibližně do 180)

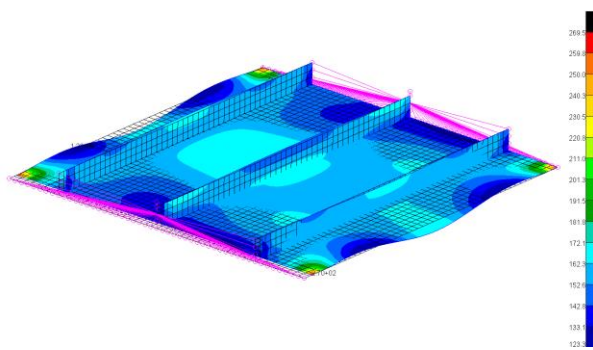
Pro zjednodušení představy o průběhu napětí a deformací integrálního panelu, které budou dále podrobně popsány, byl vytvořen ilustrativní obrázek 6-6 znázorňující závislost síly na deformaci. Ta je zobrazena ve třech významných bodech. Je patrné mírné počáteční zvlnění potahu v lineární oblasti až do přibližně 35 % stlačení. Tato konfigurace se stává nestabilní a nastane náhlý překmit do nové stabilní konfigurace, kde je patrné výraznější zvlnění potahu s větší vlnovou délkou. Tato konfigurace pokračuje až do místa označeného číslem 2, kde panel dosáhne své maximální únosnosti. Poté se deformace panelu začne blížit konfiguraci podobné globálnímu vzpěru a panel přenáší stále menší zatížení až do jeho úplného selhání.



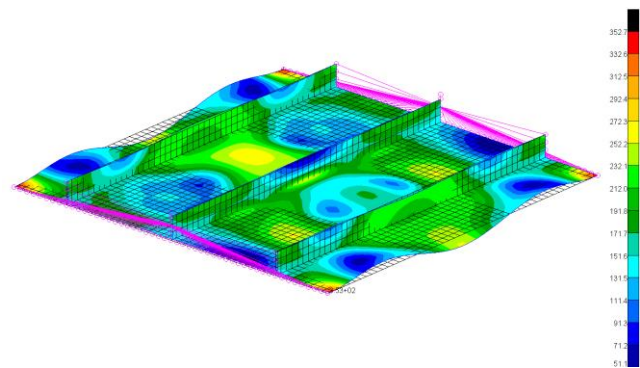
Obrázek 6-6: Ilustrativní průběh reakční síly v závislosti na stlačení panelu

Nyní bude podrobně popsáno chování panelu v kritických úsecích postupného zatěžování. Jak bylo v předchozím odstavci naznačeno, panel z počátku vykazuje mírné zvlnění až do okamžiku 35 % a 36 % stlačení, kdy dojde k překmitu do nové stabilní polohy se třemi výraznými půlvlnami. Konkrétně se jedná o překmit mezi stlačím o 1,03 mm a 1,06 mm, který je zobrazen na obrázku 6-7. Je také patrná skoková změna napětí ze 172,1 MPa na 272,3 MPa. Jedná se o děj související s přerozdělením napětí po dosažení bifurkačního bodu, o kterém bylo hovořeno v kapitole 3. Maximální napětí jsou sice znázorněna v rozích, jedná se ale o singularitu způsobenou při výpočtu. Proto tato napětí nejsou brána jako směrodatná. Dále jde vidět určitá symetrie rozložení napjatosti okolo středové osy kolmé na směr zatěžování.

Stlačení 35 % - 1,03 mm

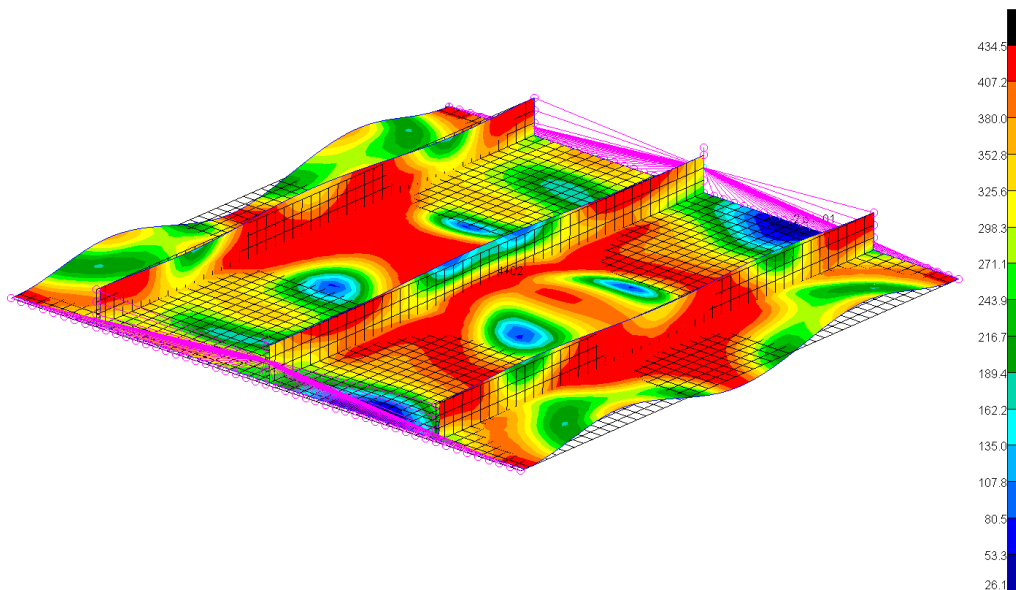


Stlačení 36 % - 1,06 mm



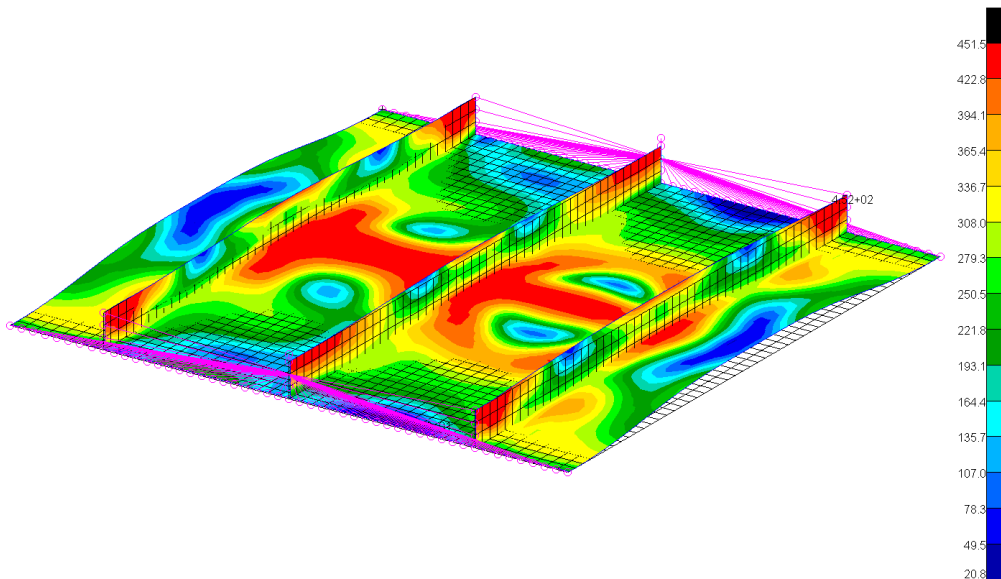
Obrázek 6-7: Redukované napětí při počáteční ztrátě stability základního panelu (35 % - 36 %)

Další obrázek 6-8 znázorňuje rozložení napjatosti a deformace při 76 % stlačení, které odpovídá hodnotě 2,24 mm. Při této hodnotě osového stlačení dosahuje panel své maximální únosnosti. Opět je možné si povšimnout určité symetrie deformace a napjatosti, která dosahuje maximální hodnoty 434,5 MPa. Jsou zde také místa v oblastech potahových polí mezi výztužnými profily, kde redukované napětí v potahu dosahuje minimální hodnoty 26,1 MPa. Osová reakční síla dosáhla svého maxima a má velikost 434 408 N. Jedná se tedy o kritickou sílu, se kterou bude nadále pracováno.



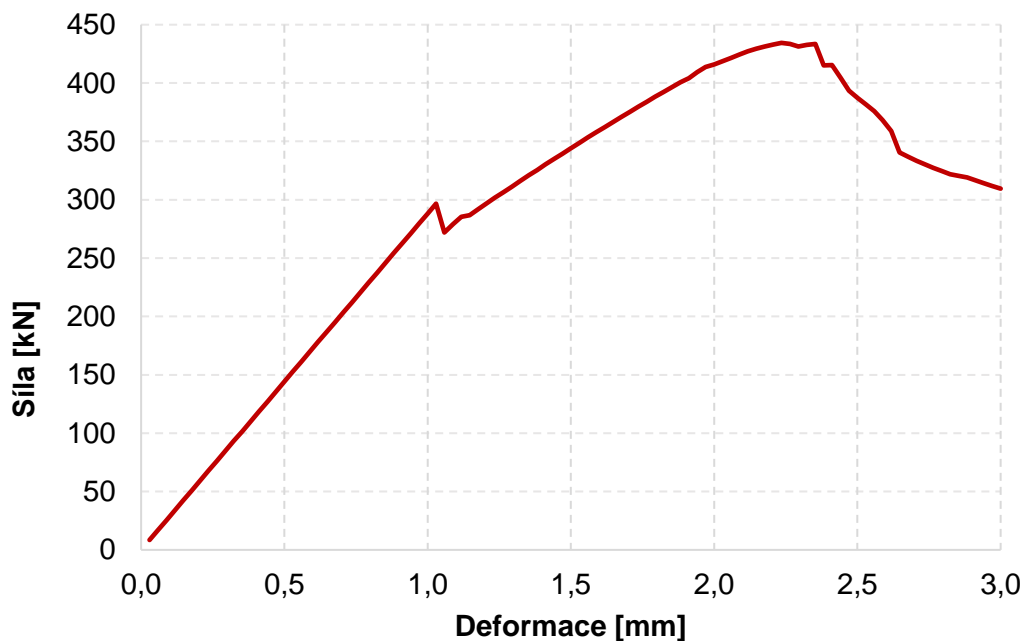
Obrázek 6-8: Okamžik maximální únosnosti panelu (76 %) – zobrazení redukovaného napětí

Obrázek 6-9 zobrazuje stav po ztrátě stability. Nyní je panel stlačen o 90 % a hodnota stlačení odpovídá 2,65 mm. Panel pozvolna přešel ze stavu lokálních nestabilit do stavu blízkému globální nestabilitě neboli vzpěru podle Eulera. Je zde patrná jedna půlvlna deformace potahu i podélných výztužných profilů mezi podporami. Osová reakční síla přenášená panelem poklesla na hodnotu 340 389 N.



Obrázek 6-9: Redukované napětí v okamžiku blízkému selhání panelu (90 %)

Následující graf 6-1 zobrazuje vypočtený průběh měřené reakční síly ve vetknutí v závislosti na velikosti osového stlačení panelu. V grafu si lze všimnout z počátku lineární oblasti, která je zakončena prudkým poklesem hodnoty reakční síly. Tento jev nastane při stlačení 1,03 až 1,06 mm a jde tedy o výše popsanou počáteční ztrátu stability. Při této náhlé transformaci na novou stabilní konfiguraci dojde k prudké změně tuhosti panelu a reakční síla poklesne z 296 485 N na 271 934 N. V této konfiguraci panel dále přenáší zatížení, ovšem zatěžovací přímka má mnohem menší směrnici než přímka v oblasti před počáteční nestabilitou. Při celkovém pohledu na průběh síly lze vidět souvislost s bilineárním materiálovým modelem viz. obrázek 6-3, který má po dosažení hodnoty smluvní meze kluzu také sklon s menší směrnicí. Následně panel dosáhne svého maxima při hodnotě osového stlačení 2,24 mm. V tomto místě panel přenáší kritickou sílu (neboli maximální sílu), která je rovna 434 408 N. V další oblasti grafu je zřejmý pokles reakční síly a celkové tuhosti panelu. Dochází ke kolapsu panelu – panel dosáhl své maximální únosnosti a podléhá čím dál větší deformaci.

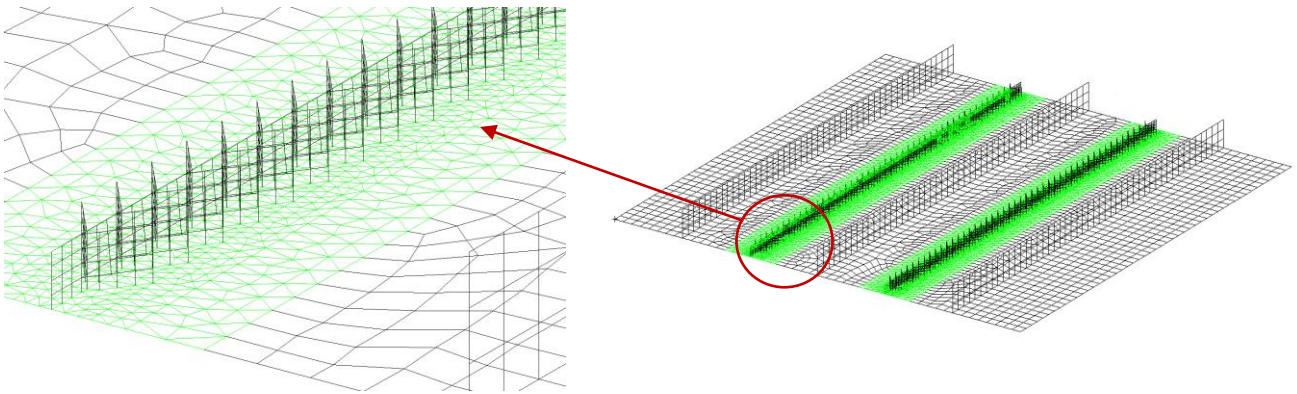


Graf 6-1: Průběh reakční síly v závislosti na stlačení v základním panelu

7 APLIKACE BIONICKÉ STRUKTURY NA MKP MODEL

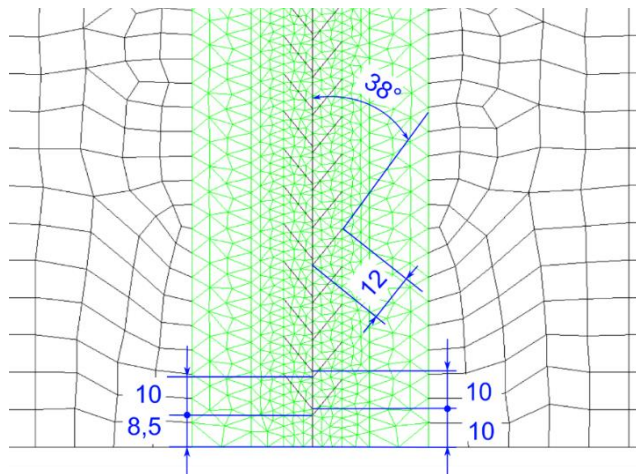
V kapitole 4.2 byla zmíněna možnost vyztužení CT vzorku bionickou strukturou zejména pro únavové zkoušky jako tzv. zpomalovač trhlin. Tato struktura bude dále nazývána jako stromečková struktura skládající se z kmene a bočních větví. V následujících podkapitolách bude ověřena vhodnost vyztužení panelu křídla stromečkem nejen jako zmíněný zpomalovač trhliny, ale zejména pro zlepšení stabilitních charakteristik panelu křídla. Pro srovnání různých variant stromečku bude vytvořena parametrická analýza spočívající ve změně vybraných geometrických parametrů stromečku. V první variantě bude porovnán vliv celkové tloušťky elementů stromečku na ztrátu stability. V druhé variantě bude změněna pouze tloušťka kmene stromečku. Tabulka s podrobnými informacemi bude ukázaná až v kapitole 7.2.

Materiál i okrajové podmínky zůstávají stejné jako u referenčního základního panelu, kde byly tyto parametry podrobně popsány. Geometrie panelu zůstává taktéž stejná až na přidání stromečku do středové části potahu mezi podélné výztužné profily, jak je zobrazeno na obrázku 7-1. Síť konečných prvků musela být vlivem přidání stromečku zjemněna a byly tak přidány kromě prvků CQUAD4 i trojúhelníkové prvky CTRIA3.



Obrázek 7-1: Síť konečných prvků panelu vyztuženého stromečkem.

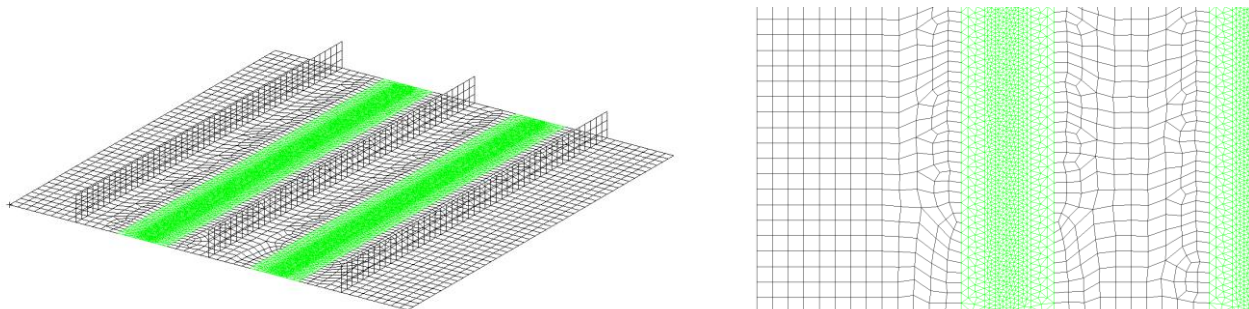
Parametry sítě jsou následující – počet elementů je 17 661 a počet uzlů činí 12 410. Z tohoto je jasné, že větší počet elementů oproti základnímu panelu bude mít výrazný vliv na prodloužení výpočtového času. Výška stromečku je 10 mm a je rozdělena na 4 elementy. Ostatní rozměry stromečku jsou inspirovány vzorkem BCU 3 (viz. kapitola 4.2) a jsou zakresleny v obrázku 7-2.



Obrázek 7-2: Rozměry stromečku

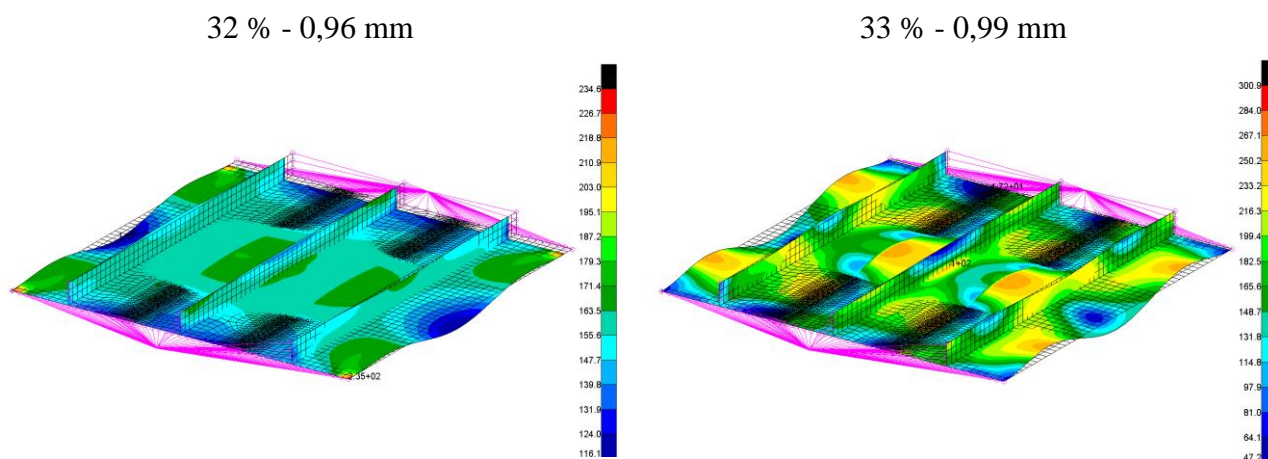
7.1 PANEL BEZ STROMEČKU

Ze všeho nejdříve je nutné ověřit, zdali se panel bez stromečku chová stejně nebo podobně jako referenční základní panel. Důvodem je zjemněná síť konečných prvků v oblasti stromečku, která by mohla ovlivnit průběh napětí a zejména hodnoty kritické osové síly přenášené panelem. Z původní geometrie byl odstraněn stromeček a v těchto oblastech zůstala jemná síť (na obrázku zeleně) tvořená trojúhelníkovými prvky typu *CTRIA3* jak je patrné z obrázku 7-3.



Obrázek 7-3: Síť konečných prvků panelu bez stromečku

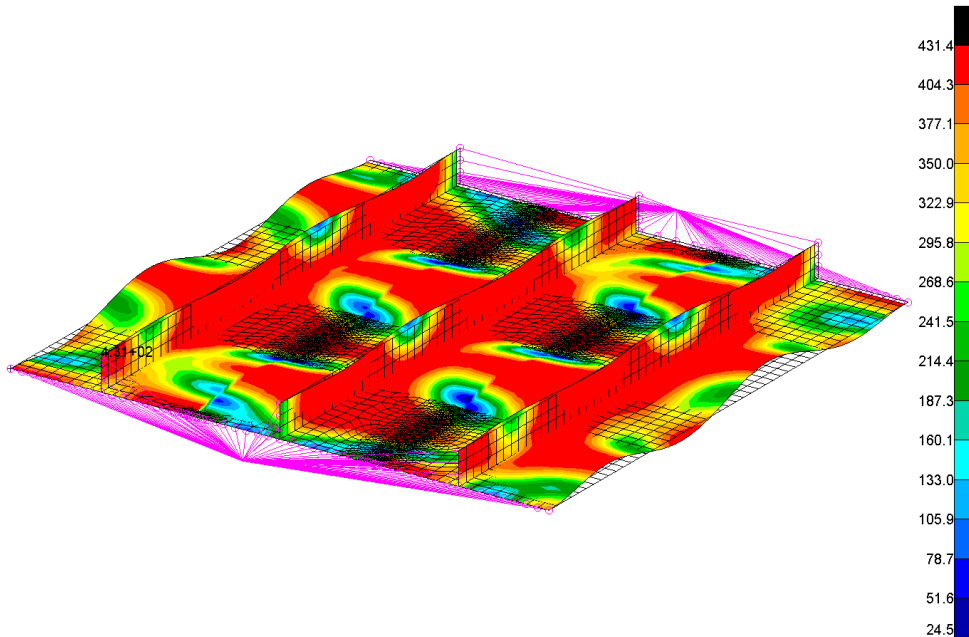
Chování panelu při počáteční ztrátě stability je podobné jako u základního panelu. Skok do nové stabilní konfigurace nastane dřív, a to při hodnotě osového stlačení o 0,96 mm a 0,99 mm. Deformace panelu je také stejná a odpovídá třem půlvlnám, jak je vidět z obrázku 7-4. Dále tento obrázek znázorňuje skokovou změnu rozložení a velikosti napětí. Maximální napětí v panelu při stlačení 32 % je 179,3 MPa, následně při stlačení 33 % se napětí zvětší na maximální hodnotu 267,1 MPa. Je zde patrná změna řádově o 100 MPa stejně jako v předchozím případě základního panelu. Jako maximální napětí se neuvvažují špičková napětí v rozích panelu, jelikož tyto rohy podléhají již zmíněné chybě – singularitě.



Obrázek 7-4: Redukované napětí při počáteční ztrátě stability panelu bez stromečku (32 % - 33 %)

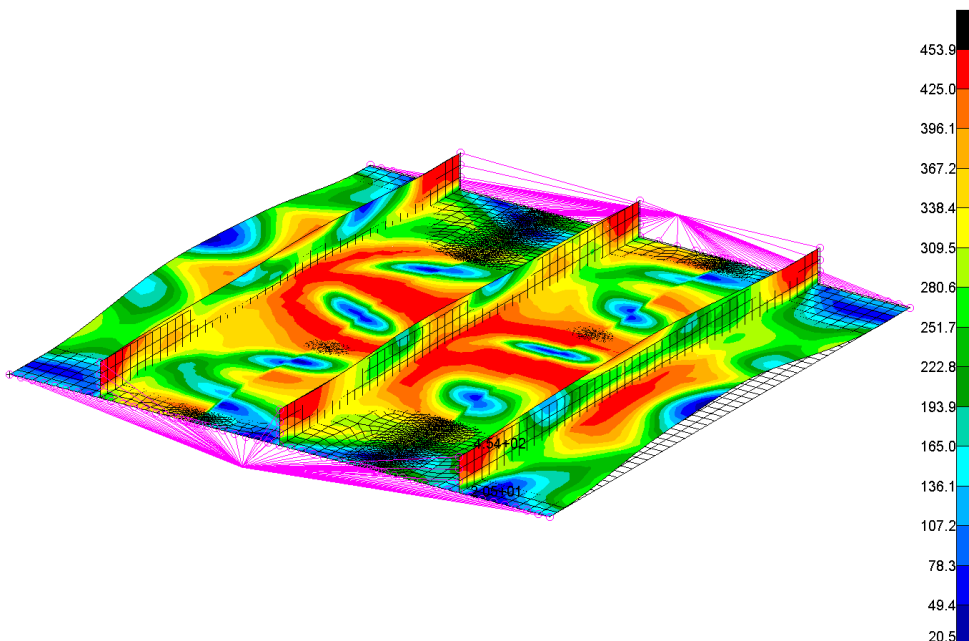
Obrázek 7-5 znázorňuje rozložení napjatosti a deformace při 89 % stlačení panelu bez stromečku, které odpovídá hodnotě 2,67 mm. Při této hodnotě osového stlačení dosahuje panel své maximální únosnosti. Opět je možné si povšimnout určité symetrie deformace a napjatosti, která dosahuje maximální hodnoty 431,4 MPa. Jsou zde také místa, v oblastech mezi výztužnými profily, kde redukované napětí v potahu dosahuje minimální hodnoty 24,5 MPa. V této oblasti je vidět určitá linie podél které není napjatost úplně spojitá. Toto rozdělení je způsobeno právě jemnou sítí v oblasti

budoucích stromečků, kvůli které se tento kontrolní výpočet provádí. Velikost kritické osové reakční síly dosáhla svého maxima a má velikost 449 839 N.



Obrázek 7-5: Redukované napětí v oblasti maximální únosnosti panelu bez stromečku (89 %)

Obrázek 7-6 zobrazuje stav v oblasti po ztrátě stability. Nyní je panel stlačen o 97 % a hodnota stlačení odpovídá 2,92 mm. Panel bez stromečku stejně jako základní panel pozvolna přešel ze stavu lokálních nestabilit do stavu blízkému globální nestabilitě. Je zde patrná jedna půlvlna deformace potahu. Středový výztužný profil je na rozdíl od základního panelu zdeformován ve více místech. Ve střední části tohoto profilu je patrná lokální nestabilita profilu, ve které se nachází oblast s nižším napětím, konkrétně 107,2 MPa. Maximální napětí oproti panelu se stlačením 89 % narostlo ještě o přibližně 23 MPa na 453,9 MPa. Osová kritická reakční síla přenášená panelem poklesla na hodnotu 360 343 N.

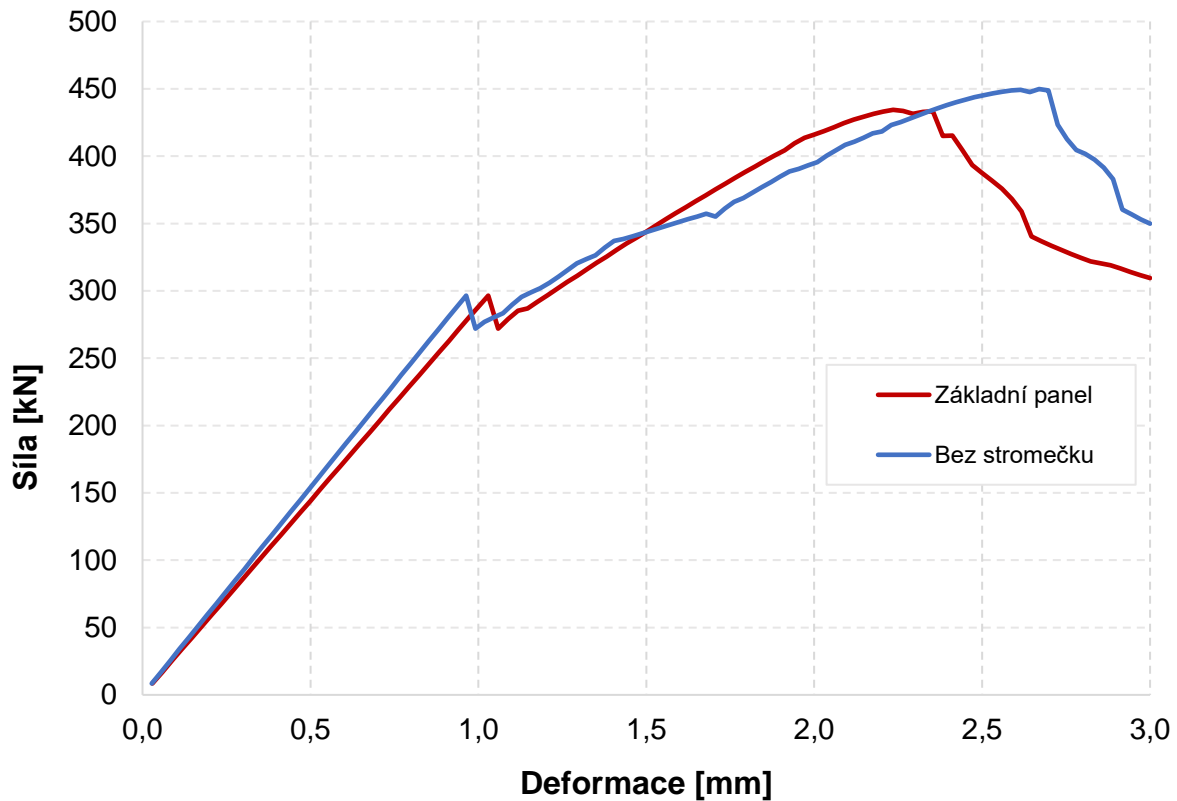


Obrázek 7-6: Redukované napětí v okamžiku blízkému selhání panelu bez stromečku (97 %)

V grafu 7-1 je zobrazeno porovnání základního panelu a panelu bez stromečku. Graf ukazuje závislost vypočteného průběhu reakční síly ve vetknutí na osovém stlačení panelu. Obě křivky začínají lineární oblastí, nicméně u panelu bez stromečku nastane počáteční ztráta stability o něco dříve (konkrétně o 0,07 mm) než u panelu základního, nicméně velikost měřené reakční síly se liší pouze o cca 49 N. Při globálním pohledu na velikosti deformací a reakčních sil přenášených panelem jsou tyto odchylky zanedbatelné. Ovšem větší odchylky je dosaženo v místě maximální únosnosti panelu. Zde je velikost stlačení panelu bez stromečku o 0,43 mm větší vůči základnímu panelu. Při celkovém pohledu na průběh síly jde vidět určitá podobnost obou křivek, až na závěrečný úsek. Z pohledu odlišnosti maximálních sil se při tomto zjemnění síť dosahuje maximální odchylky pouze 3,55 %, což je uspokojivý výsledek. Tato odchylka spolu s kritickými silami jsou vypsány v následující tabulce 7-1.

Tab. 7-1: Odchylka panelu bez stromečku vůči základnímu panelu

Druh panelu	Maximální síla [N]	Odchylka [%]
Základní	434 408	3,55
Bez stromečku	449 839	



Graf 7-1: Průběh reakční síly v závislosti na stlačení – panel bez stromečku vůči panelu základnímu

7.2 ZMĚNA VYBRANÝCH GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ

Po ověření, zdali nebude mít zjemněná síť zásadní vliv na změnu tuhosti výpočtového modelu, bude provedena další série výpočtů. V následujících kapitolách budou vybrány dva rozměrové parametry stromečkové struktury, které budou postupně analyzovány a vypočítány.

Stromečková struktura se skládá z centrálního kmene a větví. Prvním vybraným parametrem je změna celkové tloušťky stromečku. Druhým vybraným parametrem je ponechání konstantní tloušťky větví 2 mm při změně tloušťky kmene stromečku. Tyto parametry jsou uvedeny v následující tabulce 7-2.

Tab. 7-2: Vyšetřované rozměrové parametry

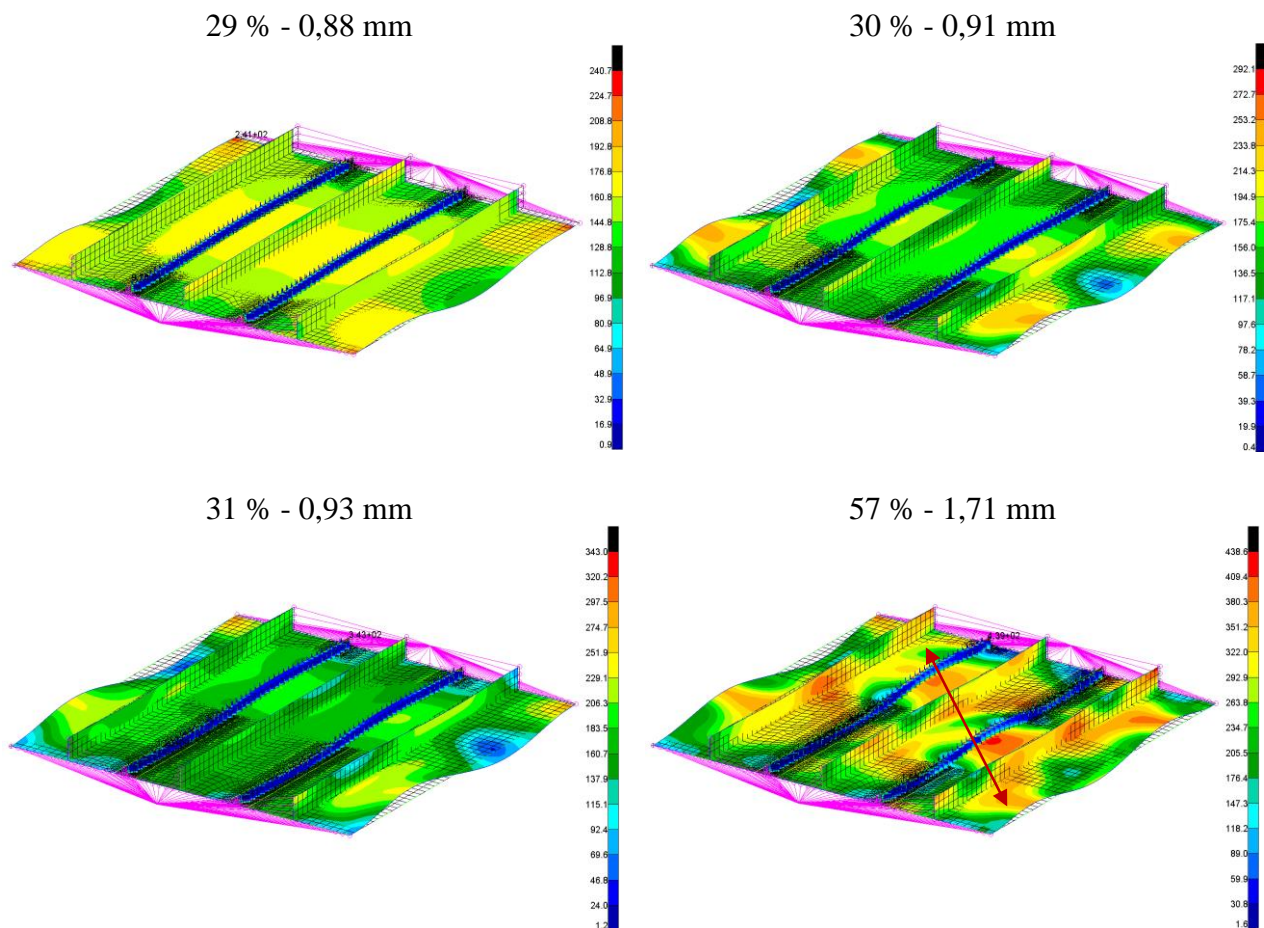
Vybrané rozměrové parametry	
Změna celkové tloušťky stromečku [mm]	Změna tloušťky kmene při tloušťce větví 2 mm [mm]
1,0	1,5
1,8	1,8
2,0	2,0
2,5	2,5

7.3 ZMĚNA CELKOVÉ TLOUŠŤKY STROMEČKU

V této kapitole budou vypočítány celkem čtyři varianty celkových tlouštěk stromečku, které jsou vypsány v tabulce 7-2 v levém sloupci. Odstupňování těchto hodnot vzniklo z postupných výpočtů a následné analýzy výsledků. Okrajové podmínky jsou stále stejné a geometrie panelu zejména stromečku byla popsána v kapitole 7.

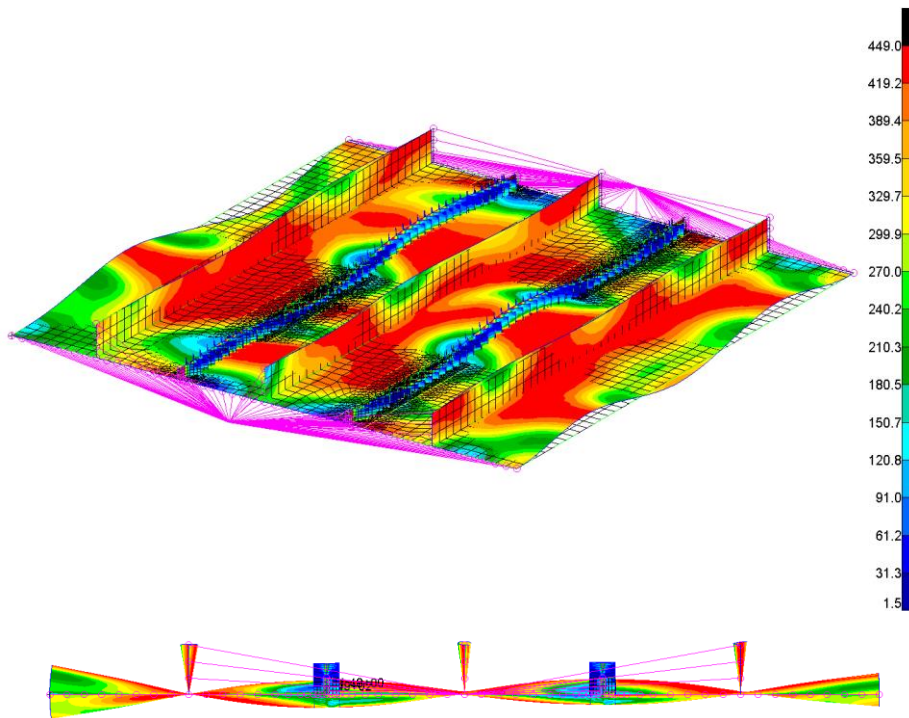
Podrobně bude popsána pouze varianta s tloušťkou stromečku 2,5 mm, jelikož by byl podrobný popis každé varianty příliš rozsáhlý a stále podobný. Měnily by se pouze hodnoty redukovaného napětí v panelu. Proto budou další varianty panelů porovnány pomocí grafů zejména z hlediska průběhu kritické reakční síly a její odchylky od základního panelu, který je považován jako referenční.

Analogicky jako u předchozích panelů i zde bude podrobně popsáno chování panelu v kritických nebo jinak významných úsecích postupného zatěžování. Z počátku se panel se stromečkem chová velice podobně jako předešlé dva panely. Počáteční ztráta stability už není tak razantní, což je patrné z obrázku 7-7. Jde vidět, že už při 29 % stlačení, které odpovídá hodnotě 0,88 mm, je potah více zvlněn než u základního panelu v předešlých výpočtech. V této fázi je maximální redukované napětí v panelu 176,8 MPa. Při stlačení 30 %, které odpovídá 0,91 mm dojde k přerozdělení napětí a nyní maximální hodnota redukovaného napětí činí 253,2 MPa. Napětí tedy naroste o 76,4 MPa, což je méně než u základního panelu, kde byl nárůst o přibližně 100 MPa. Při dalším nárůstu stlačení, tedy na 31 %, které odpovídá 0,93 mm zůstává hodnota maximálního redukovaného napětí na podobné velikosti, konkrétně 251,9 MPa, nicméně je zde dobře zřetelná změna deformace. Potah změní své zvlnění ze tří půlvln na pouze dvě půlvlny. Do této chvíle bylo rozložení napětí i deformací téměř symetrické. Při dalším zatěžování se pravá strana panelu dostane zpět na konfiguraci se třemi půlvlnami a levá strana zůstává stejná. Na obrázku 7-7 vpravo dole je tato nesymetrie znázorněna červenou šipkou. Jde o tři diagonální vyboulení potahu, které se začínají postupně zvětšovat. Na tomto snímku je už plně rozvinuté vyboulení při stlačení 57 %, tedy 1,71 mm. V tomto okamžiku je v panelu maximální redukované napětí 438,6 MPa.



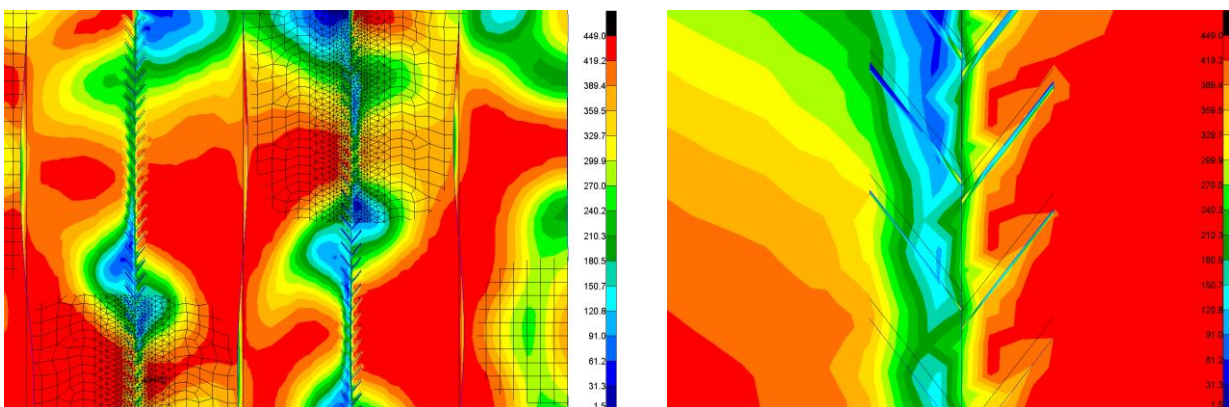
Obrázek 7-7: Redukované napětí při počáteční ztrátě stability panelu se stromečkem

Při dalším nárůstu stlačení na hodnotu 87 %, která odpovídá 2,6 mm osového stlačení opět panel dosáhne svého maxima únosnosti. Potah zůstává v nesymetrické konfiguraci z předešlého obrázku a panel dosahuje maximální hodnoty redukovaného napětí 449 MPa, jak lze vidět na obrázku 7-8. Minimální hodnota redukovaného napětí se nachází převážně v oblasti stromečků a má velikost 31,3 MPa. Osová reakční síla přenášená panelem má velikost 497 335 N. Na obrázku 7-8 dole je zobrazená deformace v čelním pohledu na panel. Potah se otáčí kolem podélných výztuh, kdy ve střední části mezi výztuhami dojde k největšímu vyboulení. V této oblasti se také nachází výztužný stromeček, který je zvlněn společně s potahem. Tento rozdíl je způsoben mnohem větší ohybovou tuhostí podélné výztuhy ve vertikálním směru, která u stromečku není tak výrazná.



Obrázek 7-8: Redukované napětí panelu se stromečkem při stlačení 87 %

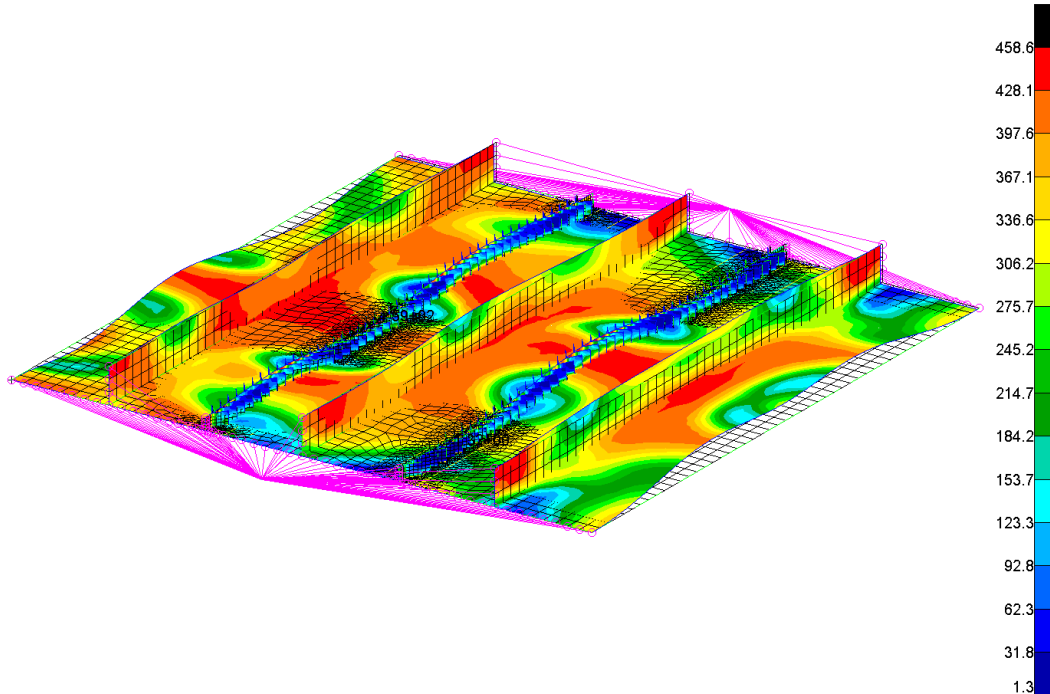
Na obrázku 7-9 vlevo je detailněji znázorněn pohled na rozložení napětí v panelu. Výrazně červené úseky s napětím o velikosti 449 MPa prochází skrze výztužné profily, aniž by došlo k jakékoli změně velikosti napětí. Ve střední části potahu mezi výztužnými profily u základního panelu nedocházelo taktéž k žádné změně napětí. U panelu vyztuženého stromečkem v této oblasti redukované napětí výrazně poklesne. Detailní snímek je na obrázku 7-9 vpravo. Lze si zde povšimnout míst (světle modrá barva), kde se redukované napětí pohybuje okolo hodnoty 120 MPa. V dalších místech okolo stromečku jsou například světle žluté oblasti, ve kterých je redukované napětí přibližně 330 MPa. Pokles napětí je řádově o velikosti 100 MPa. Tento jev se váže s již zmíněným šířením trhliny v kapitole 4.2. Pokles napětí by v případě šíření trhliny výrazně prospěl ke zpomalení jejího růstu.



Obrázek 7-9: Rozložení napjatosti v oblasti stromečku

Analogicky jako u předešlých panelů je na obrázku 7-10 zobrazen panel za oblastí ztráty stability. V tomto případě se výrazná globální ztráta stability projevila až při aplikaci maximální hodnoty stlačení, tzn. 3 mm. Pravá část panelu se více podobá stavu globální nestability – je patrná jedna půlvlna při deformaci potahu i výztužného profilu. Levá část panelu je zdeformována podobně jako

u předchozí fáze – 2,6 mm. Zde je potah i podélný výztužný profil zvlněn v podobě tří půlvln. Je zde tedy výrazná nesymetrie deformací a napětí. Maximální redukované napětí vzrostlo oproti předešlému stlačení přibližně o 10 MPa na hodnotu 458,6 MPa a nachází se na mnohem menší ploše. Osová síla přenášená panelem poklesla na 444 408 N. Je zde tedy rozdíl 52 927 N vůči kritické maximální síle, kterou panel dokázal přenést.



Obrázek 7-10: Redukované napětí panelu se stromečkem při stlačení 100 %

7.3.1 GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI PRVNÍ VARIANTY

V následující podkapitole budou vytvořeny grafické závislosti a tabulky určené ke zřetelnějšímu porovnání výsledků vypočtených čtyř variant panelů vyztužených stromečkovou strukturou. Srovnání bude provedeno výhradně se základním panelem, sloužícím jako referenční model.

Počet kroků může do jisté míry ovlivnit výsledky, stejně jako například kvalita sítě konečných prvků. Proto je v tabulce 7-3 v prostředním sloupci vypsáno, jaký byl zvolen počet kroků pro jednotlivé varianty stromečků. V pravém sloupci je pak počet kroků, který byl potřebný pro úplné dopočítání modelu. Je zde vidět, že se zmenšující se tloušťkou roste počet potřebných kroků pro výpočet. Mezi oběma zmíněnými sloupci je rozdíl v počtu kroků – výpočtový počet kroků je vždy větší. Tento rozdíl je způsoben tím, že při výpočtu nemusí výsledky v daném kroku konvergovat, proto program zjemní dělení (které je předem nadefinováno) a tím pádem dojde k tomuto nárůstu.

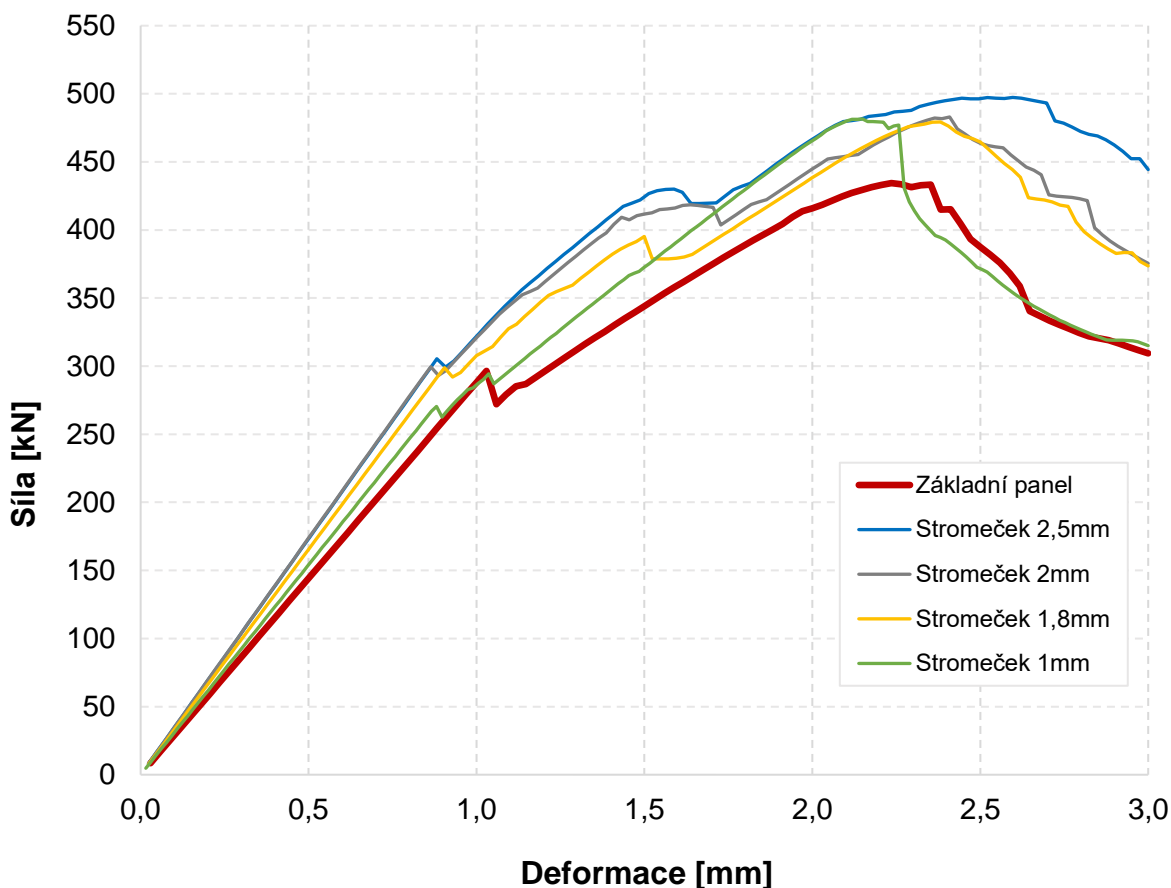
Tab. 7-3: Počet kroků v nelineární analýze první varianty panelů

Tloušťka stromečku [mm]	Zvolený počet kroků	Výpočtový počet kroků
1,0	180	194
1,8	110	126
2,0	100	132
2,5	100	119

V grafu 7-2 je analogicky jako v podkapitole 7.1 zobrazeno porovnání základního panelu a panelů se všemi variantami dosud vypočtených stromečků. Graf zobrazuje závislost vypočteného průběhu reakční síly ve vetknutí na osovém stlačení panelu.

Červená křivka byla již ukázána výše v podkapitole 7.1 a je zde vykreslena právě z důvodu možnosti porovnání s ostatními panely. Všechny čtyři panely vyztužené stromečkem vykazují větší tuhost v lineární oblasti, jelikož se s rostoucí tloušťkou zvětšuje směrnice těchto přímk. Počáteční ztráta stability nastane ještě před dosažením 1 mm stlačení – tj. dříve než u základního panelu. Velikost reakční síly je zde vesměs podobná a pohybuje se v okolí 300 kN. Jedinou výjimkou je panel s tloušťkou stromečku 1 mm. Zde jsou patrné dva poklesy reakční síly. Jeden pokles nastane při osovém stlačení 0,88 mm, druhý pak při 1,04 mm. Toto chování je nejspíše způsobeno vysokým počtem kroků, proto je výpočet citlivější na počáteční ztrátu stability.

Při dalším stlačování panelu nastane u variant 1,8 mm, 2 mm a 2,5 mm ještě k jednomu poklesu reakční síly. Tento děj nastane v intervalu od 1,5 do 1,8 mm osového stlačení. U podrobně popisovaného panelu s tloušťkou stromečku 2,5 mm tento pokles nastal konkrétně při 1,71 mm stlačení. Výjimkou je zase panel o tloušťce stromečku 1 mm, který této změně nepodléhá a blíží se zde svým průběhem síly právě základnímu panelu, ovšem s větší směrnicí. Ta vypovídá o mnohem větší tuhosti tohoto panelu.



Graf 7-2: Srovnání průběhu reakčních sil první varianty panelů

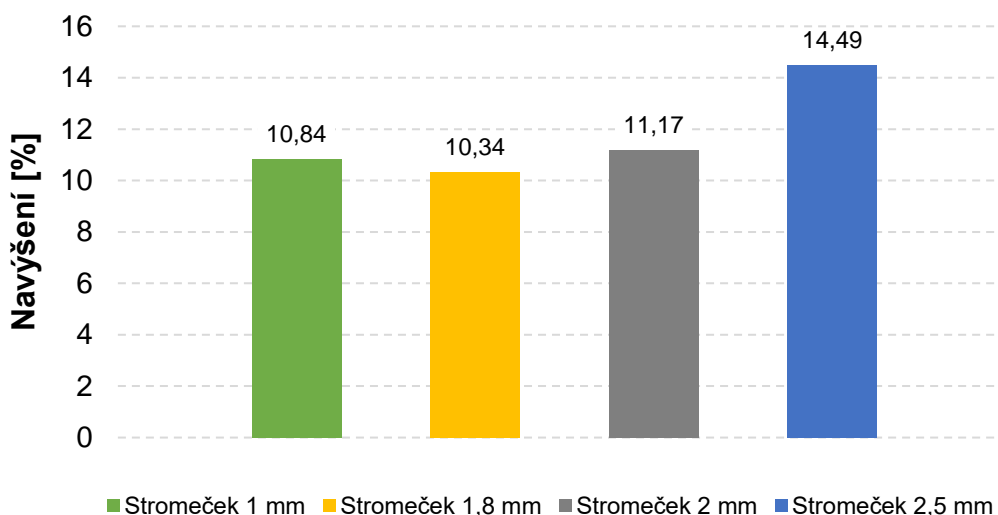
V tabulce 7-4 jsou podrobně vypsány hodnoty maximálních sil, redukovaného napětí a stlačení, které jsou spjaty také s grafem 7-2. Všechny hodnoty platí pro bod, kdy panel dosáhne své maximální únosnosti a přenáší maximální kritickou sílu. Graf i tabulka potvrzují předpoklad, že ke ztrátě stability

dojde dříve u panelu s tenčím stromečkem než u nejtlustšího stromečku. Dále jde vidět, že panel se stromečkem o tloušťce 2,5 mm přenesne největší zatížení ze všech vypočtených variant.

Tab. 7-4: Hodnoty maximálních sil, napětí a stlačení první varianty panelů

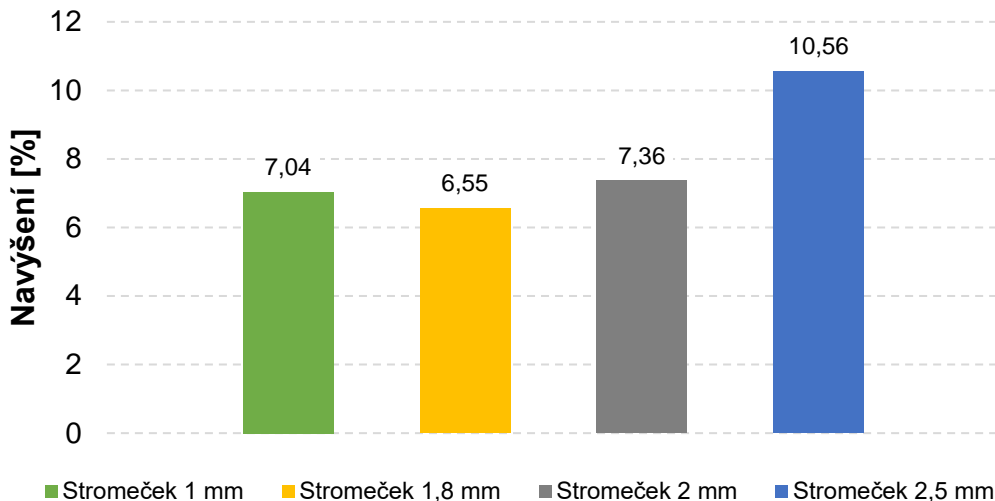
Tloušťka stromečku [mm]	Maximální síla [N]	Redukované napětí [MPa]	Stlačení [mm]
1,0	481 495	445,9	2,15
1,8	479 314	453,4	2,38
2,0	482 951	451,9	2,41
2,5	497 335	449,0	2,60

Následující sloupcový graf 7-3 zobrazuje procentuální navýšení přenášené maximální síly vůči základnímu panelu. Velikosti jednotlivých sil jsou brány z tabulky výše. Kritická síla přenášená základním panelem je 434 408 N. Největší navýšení 14,49 % vykazuje panel se stromečkem o tloušťce 2,5 mm.



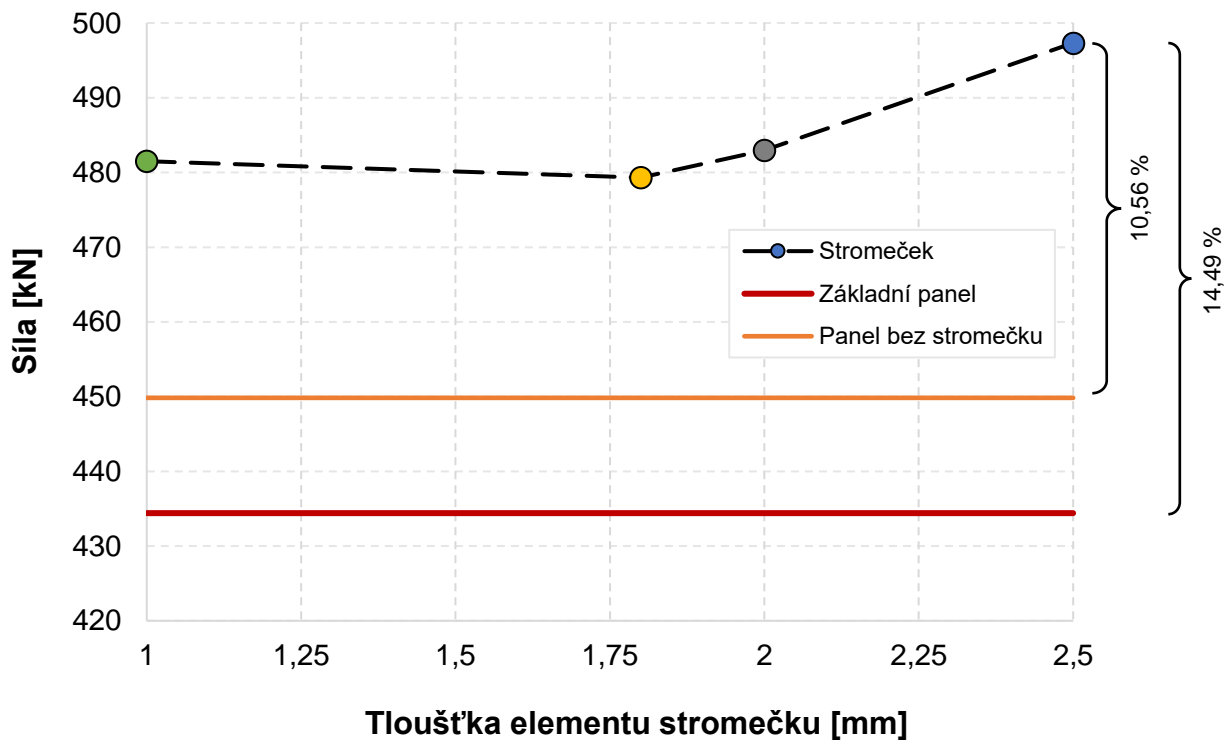
Graf 7-3: Procentuální navýšení rakční síly první varianty vůči základnímu panelu

Sloupcový graf 7-4 analogicky jako předchozí zobrazuje procentuální navýšení síly vůči panelu bez stromečku (se zjemněnou sítí). Velikost maximální síly přenášené panelem bez stromečku je 449 839 N. V tomto grafu nejsou procentuální navýšení tak výrazná. Všechna jsou nižší přibližně o 3,8 %. Této hodnotě přibližně odpovídá odchylka mezi základním panelem a panelem bez stromečku, která byla 3,55 %.



Graf 7-4: Procentuální navýšení reakční síly první varianty vůči panelu bez stromečku

Pro lepší interpretaci výsledků byl vytvořen graf 7-5, ze kterého jsou zřetelnější rozestupy mezi jednotlivými variantami. Tento graf (stejně jako předešlé dva sloupcové grafy) porovnává pouze navýšení kritické reakční síly, nikoli její průběh, či počáteční ztrátu stability. Jedná se o závislost kritické síly na tloušťce stromečkové výztuhy. Mezi stromečkem o tloušťce 1 mm a 1,8 mm je minimální pokles, který je způsoben větším počtem kroků při výpočtu. Mezi těmito tloušťkami nebyl vypočítán další panel, jelikož by zde nejspíše nebyla nijak velká odchylka od trendu naznačeného přerušovanou čarou. Od tloušťky 1,8 mm, přes 2 mm až do 2,5 mm nabírá křivka stoupající trend. Tento průběh splňuje předpoklad, že při větší tloušťce stromečku bude mít potah, respektive celý panel větší tuhost. Dále je v grafu zaznačena i procentuální odchylka pro panel se stromečkem o tloušťce 2,5 mm.



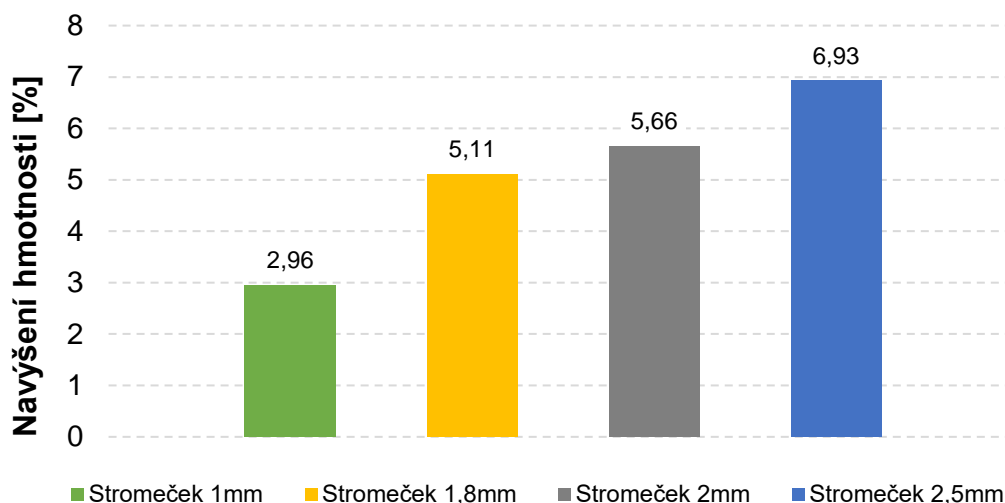
Graf 7-5: Trend maximální přenesené síly v závislosti na tloušťce stromečku

Kvůli možnosti kritičtějšího vyhodnocení byly všechny varianty panelů vymodelovány v CAD softwaru Autodesk Inventor, z důvodu změření hmotnosti. Hustota duralové slitiny byla nastavena na 2700 kg/m^3 . V tabulce 7-5 jsou vypsané jednotlivé hmotnosti.

Tab. 7-5: Hmotnost jednotlivých panelů

Tloušťka stromečku [mm]	Hmotnost [kg]
1,0	2,438
1,8	2,489
2,0	2,502
2,5	2,532
Základní panel	2,368

Sloupcový graf 7-6 zobrazuje procentuální navýšení hmotnosti při přidání výztužných stromečků na základní panel. Panel se stromečkem o tloušťce 1 mm má nárůst hmotnosti pouze o necelé 3 % vůči porovnávanému základnímu panelu. Naproti tomu, panel se stromečkem o tloušťce 2,5 mm vykazující největší tuhost a odolnost vůči ztrátě stability má největší přírůstek hmotnosti.



Graf 7-6: Procentuální navýšení hmotnosti vůči základnímu panelu

7.4 ZMĚNA TLOUŠŤKY KMENE

V této kapitole byly analogicky vypočítány celkem čtyři varianty tlouštěk kmene stromečku, které jsou vypsané ve výše ukázané tabulce 7-2 v pravém sloupci. Tloušťka větví zůstává pro všechny varianty konstantní o hodnotě 2 mm. Změny budou prováděny pouze na tloušťce kmene stromečku. Odstupňování těchto tlouštěk vzniklo z postupných výpočtů, analýzy výsledků a konzultací s vedoucím práce. Okrajové podmínky jsou analogicky stále stejné a geometrie panelu, zejména stromečku byla popsána v kapitole 7.

7.4.1 GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI DRUHÉ VARIANTY

Z důvodu stále podobných průběhů deformací a napětí budou rovnou vytvořeny grafické závislosti a tabulky. Analogicky jako u předešlé varianty panelu se stromečkem bude provedeno srovnání s referenčním modelem.

V tabulce 7-6 je v prostředním sloupci vypsán zvolený počet kroků, v pravém sloupci je pak počet kroků po provedení výpočtu. Tyto počty kroků jsou stanoveny z několika předešlých výpočtů, kdy bylo zjištěno, že při menším počtu kroků výsledky nekonvergovaly. U výpočtu stromečku s tloušťkou kmene 1 mm, který se v tabulce nenachází, výpočet nekonvergoval ani při 220 krocích, proto byla tloušťka kmene upravena na 1,5 mm. Z toho je tedy zřejmé, že čím více se liší tloušťka kmene od tloušťky větví, tím více se navyšuje počet potřebných kroků a výsledky nemusí konvergovat.

Tab. 7-6: Počet kroků v nelineární analýze druhé varianty panelů

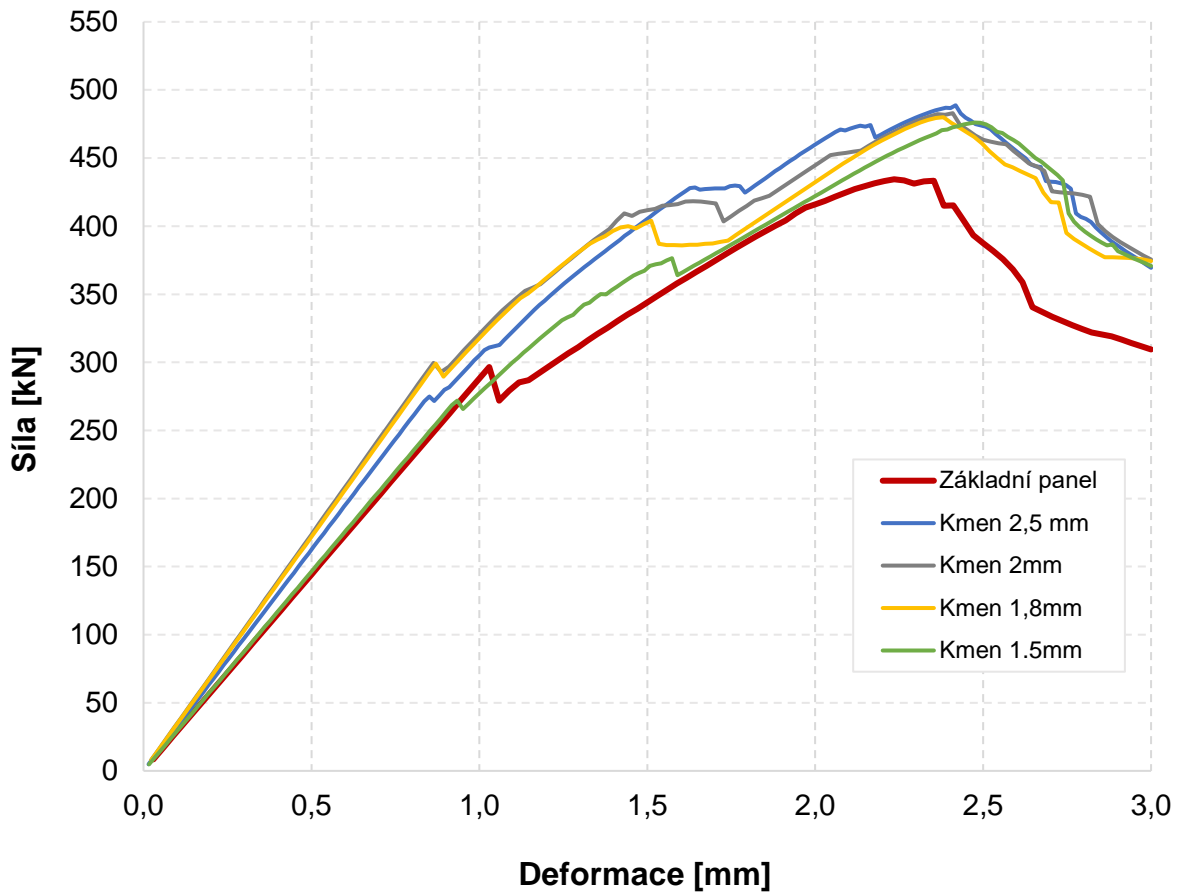
Tloušťka kmene [mm]	Zvolený počet kroků	Výpočtový počet kroků
1,5	180	183
1,8	110	131
2,0	110	132
2,5	180	201

Tabulka 7-7 obsahuje podrobný výpis hodnot maximálních přenesených reakčních sil panelem. Další sloupce v tabulce udávají hodnoty maximálních redukovaných napětí a stlačení, právě v okamžiku, kdy panel přenáší maximální kritickou sílu. Tato tabulka se váže k následujícímu grafu 7-7, kde jsou podrobně ukázány průběhy sil jednotlivých variant.

Tab. 7-7: Hodnoty maximálních sil, napětí a stlačení druhé varianty panelu

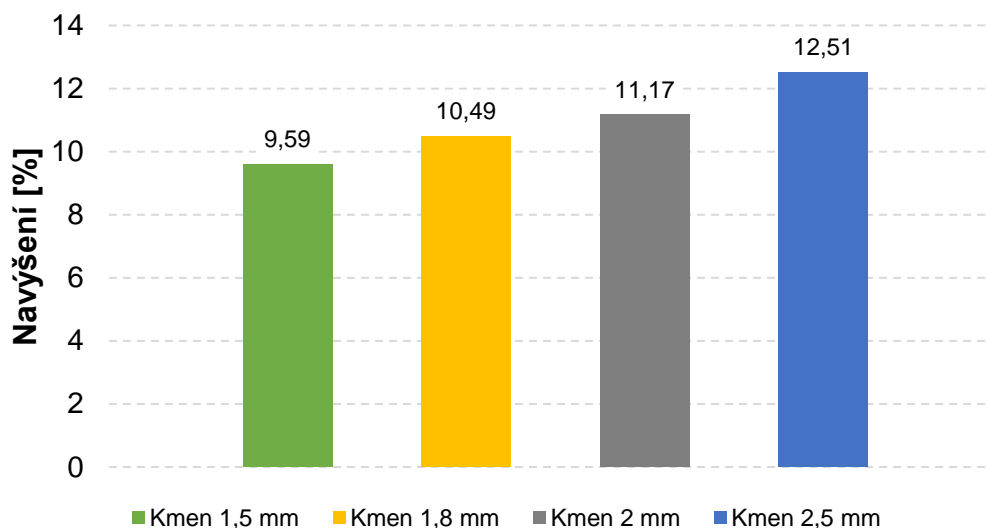
Tloušťka kmene [mm]	Maximální síla [N]	Redukované napětí [MPa]	Stlačení [mm]
1,5	476 078	449,3	2,48
1,8	479 991	453,8	2,38
2,0	482 951	451,9	2,41
2,5	488 760	454,4	2,42

V grafu 7-7 je analogicky jako v podkapitole 7.3.1 zobrazeno porovnání panelů s parametricky měněnými tloušťkami kmene se základním panelem. Na vodorovné ose se nachází osové stlačení a na svislé ose hodnota přenesené reakční síly. Panel s kmenem stromečku o tloušťce 2,5 mm má neobvyklý průběh v oblasti počáteční ztráty stability (do hodnoty stlačení ≈ 1 mm). Sklon přímky je menší a z toho vyplývá, že vykazuje nižší tuhost. Při dalším nárůstu stlačení ale přeneše maximální sílu. V oblasti po ztrátě stability (od vrcholu křivek do maximálního stlačení 3 mm) se všechny čtyři průběhy sil poněkud sjednotí a mají velice podobnou tuhost. Tento jev nebyl možný pozorovat u předešlé varianty výpočtů, kde se křivky výrazně rozbíhaly.



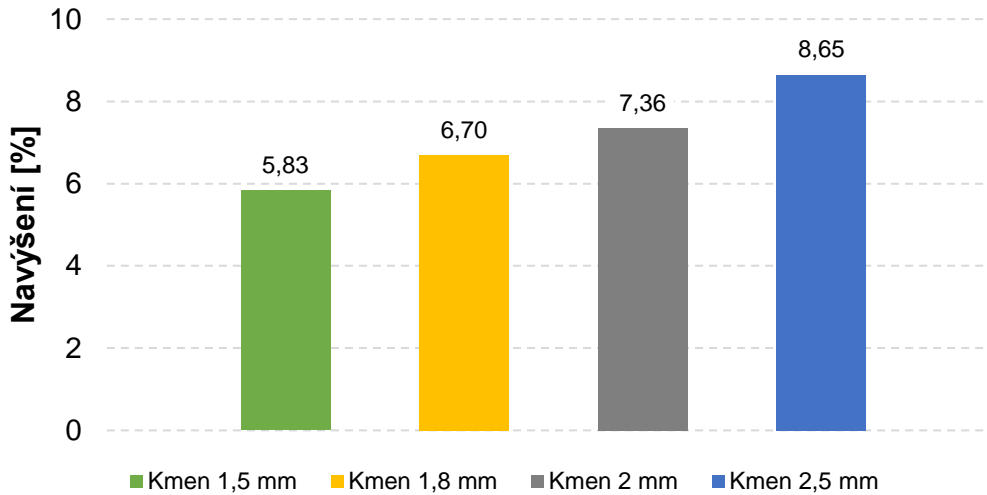
Graf 7-7: Srovnání průběhů reakčních sil druhé varianty panelů

Stejně jako u předešlé varianty panelu je na grafu 7-8 vyobrazeno procentuální navýšení přenesené reakční síly vůči panelu základnímu. Je patrné, že největší navýšení nastává u panelu o tloušťce kmene 2,5 mm a tato odchylka činí 12,51 %



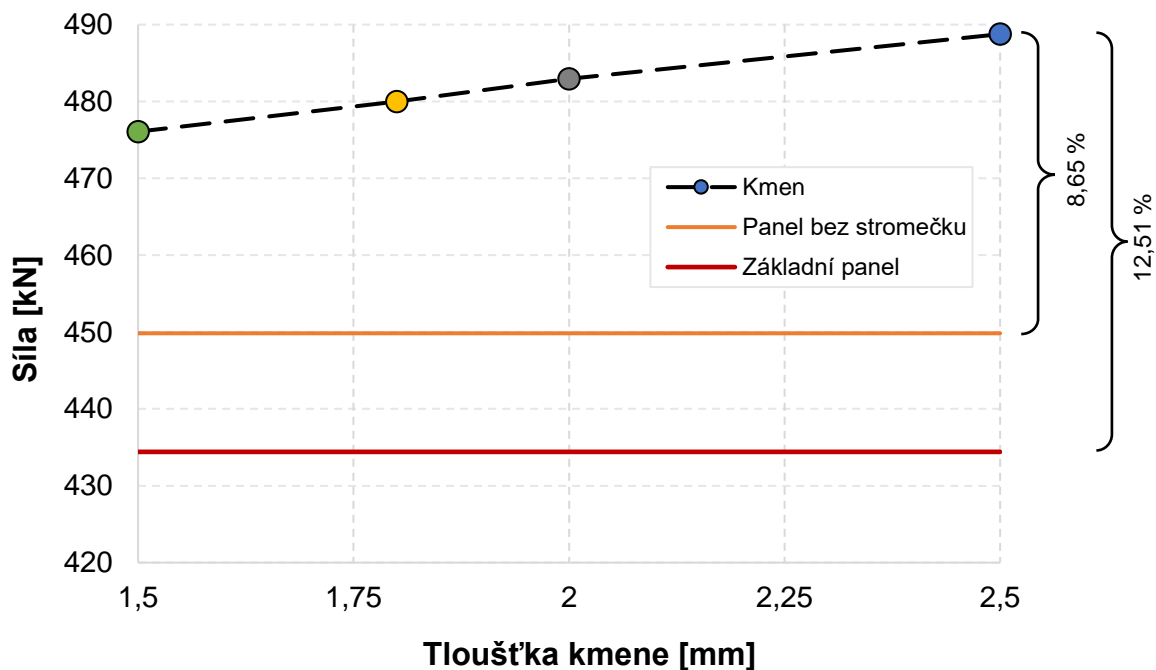
Graf 7-8: Procentuální navýšení reakční síly druhé varianty vůči základnímu panelu

Ve sloupcovém grafu 7-9 lze analogicky jako v předchozím vidět procentuální navýšení síly vůči panelu bez stromečku (se zjemněnou sítí). Procentuální navýšení jsou vůči zmíněnému grafu výše zmenšena o přibližně 3,8 %. Jedná se o již zmíněnou odchylku základního panelu a panelu bez stromečku, která je přesně 3,55 %.



Graf 7-9: Procentuální navýšení reakční síly druhé varianty vůči panelu bez stromečku

Z následujícího grafu 7-10 lze usoudit, že se zvětšující se tloušťkou kmene stromečku roste i velikost přenesené kritické síly. Přerušovanou čarou je znázorněn trend růstu síly, který má lineární průběh. Pro přehlednost je graf doplněn i o procentuální navýšení z předešlých grafů.

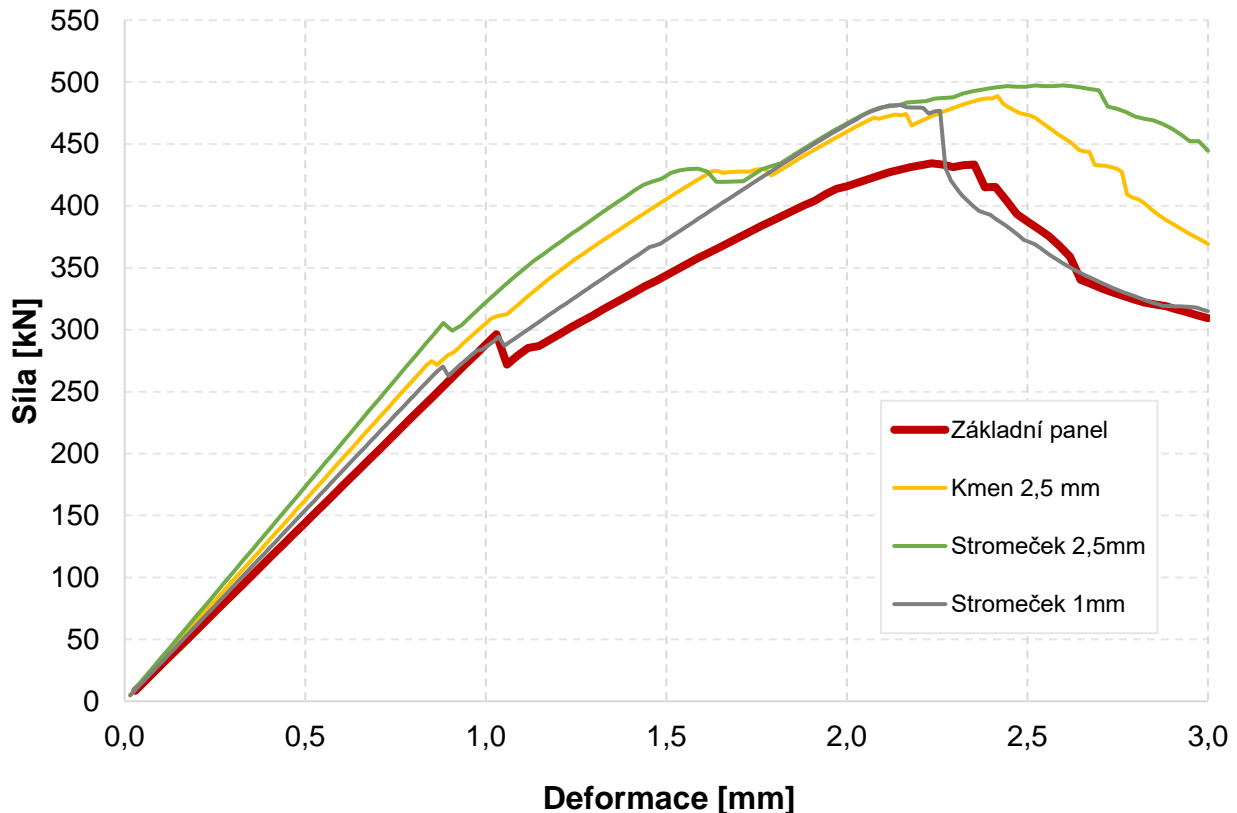


Graf 7-10: Trend maximální přenesené síly v závislosti na tloušťce kmene

8 VYHODNOCENÍ VLIVU GEOMETRIE NA STABILITU

Po provedení série výpočtů se zdá, že vyztužení panelu stromečkovou strukturou přináší několik výhod. Prvním pozitivem je, že stromeček plní funkci zastavovače trhlin. Při výpočtech bylo dokázáno, že v oblasti stromečku dochází k výraznému poklesu napětí. Jedná se sice o zatížení tlakem, při kterém dochází k zavírání trhlin. Nicméně s ohledem na symetrii tahové a tlakové křivky lze toto prohlásit i u tahového zatížení. Kdyby nebyla při inspekci odhalena trhlina, která by se dostala až do oblasti stromečků, zpomalil by se její růst a její dráha by byla odkloněna. Za normálních okolností je v panelu bez této výztuhy maximální napětí a trhlinu v této oblasti nemá co zpomalit nebo odklonit z její dráhy. Ostatně tato vlastnost byla potvrzena i článkem [9] v kapitole 4.2. Další klíčovou výhodou je navýšení únosnosti panelu a tím pádem zvýšení odolnosti vůči ztrátě stability panelu. Tato vlastnost bude podrobněji vyhodnocena v následujících odstavcích.

Pro shrnutí jsou ukázány v grafu 8-1 tři vybrané panely. Z předešlých procentuálních odchylek síly a hmotnosti vychází nejlépe panel s tloušťkou stromečkové struktury 1 mm. Průběh síly je z počátku obdobný jako u základního panelu a nevykazuje o moc větší tuhost, jelikož jejich směrnice jsou velice podobné. Počáteční ztráta stability nastane dokonce ve dvou místech (0,88 mm a 1,04 mm). Maximum této křivky je výrazně výše a po ztrátě stability se panel velice rychle dostane zpět k průběhu síly základního panelu. Možnou nevýhodou by mohl být právě tento prudký pokles, který by nastal velice rychle po ztrátě stability oproti například panelu se stromečkem o tloušťce 2,5 mm, který nemá tak prudký sklon v závěrečné části průběhu. Je nutné zmínit, že se jedná o modely bez imperfekcí, tudíž všechny křivky mají ostrý přechod v oblasti počáteční ztráty stability. Jedná se o bifurkační chování zmíněné v kapitole 3, které je typické právě pro ideálně osově zatížené přímé modely. V reálné situaci by byl tvar křivky poněkud pozvolnější.



Graf 8-1: Srovnání průběhu kritické síly vybraných panelů

VLIV ZMĚNY CELKOVÉ TLOUŠŤKY STROMEČKU NA STABILITU PANELU

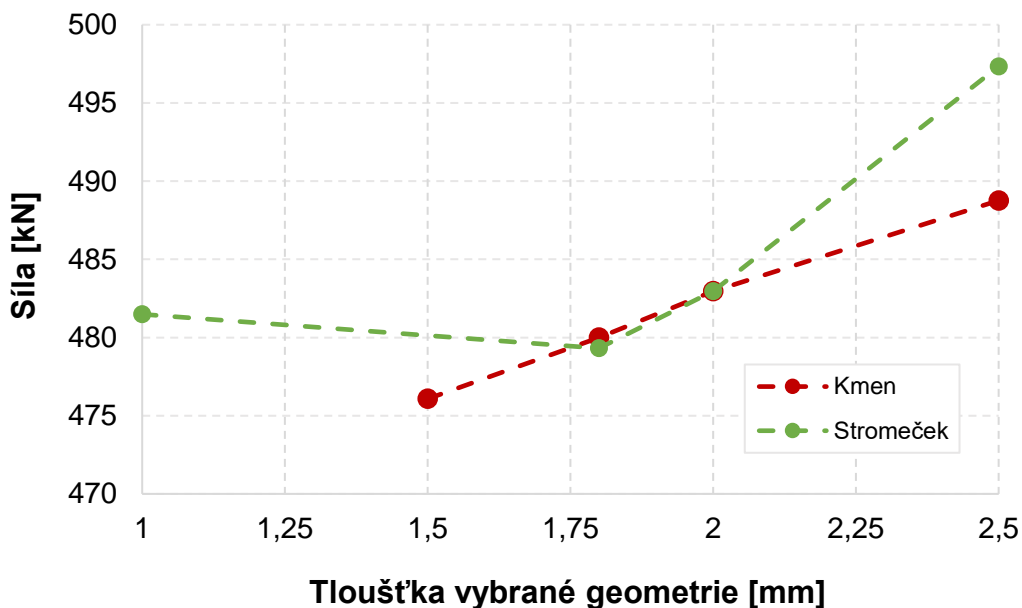
Z výše představené první varianty výpočtů se z pohledu maximální přenesené síly (a tím i větší odolnosti vůči ztrátě stability) jeví jako nejlepší panel se stromečkem o tloušťce elementu 2,5 mm. Zde je dosaženo až necelých 15 % navýšení síly vůči základnímu panelu. Ovšem po provedení hmotnostní analýzy bylo zjištěno skoro 7 % navýšení hmotnosti.

Alternativní variantou může být panel se stromečkem o tloušťce 1 mm. Zmíněný panel dosahuje skoro 11 % navýšení přenesené síly. Navíc tento panel vykazuje velice zajímavý průběh síly, který je zobrazen v grafu 8-1. Co se hmotnosti týče, tento panel vykazuje pouze asi 3 % navýšení vůči panelu základnímu. Tato hodnota je mnohem přívětivější, než zmíněných 7 % u panelu s tloušťkou stromečku 2,5 mm.

VLIV ZMĚNY TLOUŠŤKY KMENE NA STABILITU PANELU

Z druhé varianty výpočtů byl vybrán stromeček s kmenem tloušťky 2,5 mm. U tohoto panelu dochází ke zvětšení kritické síly o 12,51 %. Pro tyto varianty nebyl vytvořen přehled hmotnostního nárůstu, ale je jasné, že oproti předem vybranému panelu (stromeček 1 mm) bude toto navýšení razantnější.

Pro závěrečné vyhodnocení jsou pro přehlednost v grafu 8-2 zobrazeny všechny vypočtené varianty. Graf znázorňuje velikosti kritických sil při ztrátě stability v závislosti na vybraných parametrech geometrie.



Graf 8-2: Srovnání kritických reakčních sil

Dále je nutné zmínit, že všechny výpočty jsou platné pouze za použití stejných podmínek, které odpovídají výše popsané geometrii, okrajovým podmínkám, materiálovému modelu atd. Další nutnou poznámkou je, že se jedná pouze o zjednodušený model stromečkových výztuh, který neuvažuje poloměry zaoblení od obráběcího nástroje. Dále nejsou uvažovány imperfekce, které by zajisté měly také velký vliv na výpočet. Jde tedy pouze o první přiblížení, které má za úkol prověřit, zda se vyplatí další tvorba složitějších modelů a provedení podrobnější analýzy.

9 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce vzešla z vize naimplementování speciální struktury inspirované bionickou strukturou listu na integrální panel křídla, který podléhá ztrátě stability. Základ této myšlenky byl analyzován v článku [9] pojednávajícím o únavové životnosti takto vyztužených vzorků. Cílem této práce bylo ověření, zdali má tato tzv. stromečková výztuž pozitivní dopad na zlepšení stabilitních charakteristik dolního panelu křídla zatíženého tlakem.

Zvolenou metodou pro tuto analýzu bylo zejména srovnání velikostí kritických sil přenesených panelem se stromečky vůči panelu bez těchto výztuh. Dalším kritériem pro srovnání bylo sledování průběhů těchto sil v celé oblasti deformačního zatížení panelu. Toto osově stlačení bylo předem určeno jako 3 mm. Prvním krokem byl výpočet odchylky kritických sil mezi tzv. základním panelem a panelem bez stromečku. Vlivem zjemněné sítě v oblasti stromečků byla vypočtena odchylka 3,55 %, která je přijatelně malá.

V dalším kroku tak mohla být provedena parametrická analýza, jejímž cílem bylo najít optimální rozměrové parametry stromečku, které by navýšily kritickou sílu při ztrátě stability. Byly vybrány dva parametry. Změna celkové tloušťky stromečku a změna tloušťky kmene stromečku při konstantní tloušťce větví nastavené na hodnotu 2 mm. Z první varianty (tj. celková tloušťka stromečku) byl vybrán jako nejvhodnější model panel se stromečkem 1 mm. Bylo tak vyhodnoceno i po provedení hmotnostní analýzy. Ta vypovídá o přibližně 3% přírůstku hmotnosti při zvětšení kritické síly o necelých 11 %. Druhá varianta, kde byl zvolen jako nejvhodnější parametr kmen stromečku o tloušťce 2,5 mm vykazuje navýšení kritické síly přibližně 12,5 %. Zde už nebyl proveden výpočet hmotností, jelikož z předešlých zkušeností vyplývá, že hmotnostní nárůst bude zaručeně větší než 3 %. Výpočty se také potvrdilo, že v oblasti stromečků dochází k výraznému poklesu napětí, řádově až o 100 MPa. Toto snížení napětí by zmírnilo růst případné šířící se trhliny.

Lze tedy říct, že tato výztuž splnila očekávané předpoklady. Je nutné zmínit, že jde o prvotní analýzu, jejímž účelem bylo ověření, zda je účelné se tímto tématem nadále zaobírat. Dalším krokem by mohlo být vytvoření a následný výpočet těchto výztuží obsahujících poloměry zaoblení od obráběcího nástroje. V neposlední řadě by byla klíčová také ekonomická stránka.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe structural design*. 2nd ed. Hong Kong: Hong Kong Conmlit Press Ltd., 2004, 612 s. ISBN 96-271-2809-0.
- [2] BURŠA, Jiří. *Přednášky z pružnosti a pevnosti II* [online]. VUT FSI Brno. Dostupné také z: http://www.old.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud_opory/10-prednaska.pdf
- [3] FLAŠKA, Miroslav a Bedřich ŠTEKNER. *Speciální letecké technologie*. 4. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996, 308 s. ISBN 80-01-01419-3.
- [4] NIU, Michael Chun-Yung. *Aireframe stress analysis and sizing*. 2 nd ed. Hong Kong: Hong Kong Conmlit Press, 1997, 795 s. ISBN 96-271-2808-2.
- [5] PETRUŠKA, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech* [online]. Brno: VUT Brno, 112 s. Dostupné také z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/images/opory/MKP%20v%20inzenyrskych%20vypoctech/RIV.pdf>
- [6] HÁLA, Aleš. *Analýza kovových výztužných profilů při tlakovém zatížení pomocí metody konečných prvků*. Brno, 2017, 85 s. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149327. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Tomáš Katrňák.
- [7] PÍŠTĚK, Antonín, Oldřich GRÉGR a Václav KAHÁNEK. *Pevnost a životnost letadel*. Brno: VUT Brno, 1988, 266 s.
- [8] STAMATELOS, D.G., G.N. LABEAS a K.I. TSERPES. Analytical calculation of local buckling and post-buckling behavior of isotropic and orthotropic stiffened panels. *Thin-Walled Structures*. 2011, **49**(3), 422-430. ISSN 02638231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2010.11.008
- [9] LIU, Jiaming, Lushen WU, Minjie SONG, Yun HU, Min LEI a Filippo BERTO. *Crack resistance behaviour of aluminium alloy for aircraft skin with bionic coupling units processed by laser cladding*. 2020, **43**(11), 2756-2760. ISSN 8756-758X. Dostupné z: doi:10.1111/ffe.13315

11 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

11.1 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2-1: (A) Zjednodušený řez křídlem, (B) Detail panelu křídla.....	12
Obrázek 2-2: (A) Z – profil, (B) J – profil [1].....	13
Obrázek 2-3: (A) U – profil, (B) Y – profil [1].....	13
Obrázek 2-4: Nýtový spoj potahu s podélníkem technologií NACA [4]	14
Obrázek 3-1: Zatěžovací diagram tlačené stěny [5].....	15
Obrázek 3-2: Rozložení napětí mezi podélníky [1].....	16
Obrázek 3-3: Zjednodušení pomocí společné šířky potahu [1].....	16
Obrázek 3-4: Hodnota koeficientu vzpěrné stability KC [1].....	17
Obrázek 3-5: Kroutící moment působící na podélníky.....	18
Obrázek 3-6: (A)Počáteční vzpěr panelu [1], (B) Klopná deformace podélníku [8]	18
Obrázek 3-7: Další režimy počátečního vzpěru panelu křídla [8].....	19
Obrázek 3-8: Lokální nestabilita podélníku [8].....	19
Obrázek 3-9: Globální vzpěr panelu (A) [1], (B) [8].....	20
Obrázek 3-10: (A)Torzní nestabilita v kombinaci s globálním vzpěrem [1], (B) Torzní nestabilita [1].....	20
Obrázek 3-11: Ztráta stability potahu mezi nýty [1]	21
Obrázek 3-12: Vrásnění potahového plechu křídla. [1].....	21
Obrázek 4-1: Integrální panel vyráběný frézováním	22
Obrázek 4-2: Základní rozměry integrálního panelu [1]	23
Obrázek 4-3: Návrhový diagram [1]	24
Obrázek 4-4: Odklonění trhliny v listu rostliny [9].....	25
Obrázek 4-5: Rozměrové parametry bionické struktury [9].....	25
Obrázek 5-1: Druhy konečných prvků [5].....	26
Obrázek 5-2: Schéma řešení.....	27
Obrázek 6-1: (A) Rozměry panelu, (B) Ukázka sítě konečných prvků.....	28
Obrázek 6-2: Tloušťka potahu a podélných výztužných prvků.....	28
Obrázek 6-3: Model bilineárního materiálu	29

Obrázek 6-4: Nadeřinování materiálu v Patranu a ve výstupním <i>.bdf</i> souboru	29
Obrázek 6-5: Okrajové podmínky	30
Obrázek 6-6: Ilustrativní průběh reakční síly v závislosti na stlačení panelu	31
Obrázek 6-7: Redukované napětí při počáteční ztrátě stability základního panelu (35 % - 36 %)	32
Obrázek 6-8: Okamžik maximální únosnosti panelu (76 %) – zobrazení redukovaného napětí	32
Obrázek 6-9: Redukované napětí v okamžiku blízkému selhání panelu (90 %)	33
Obrázek 7-1: Síť konečných prvků panelu vyztuženého stromečkem.	34
Obrázek 7-2: Rozměry stromečku	34
Obrázek 7-3: Síť konečných prvků panelu bez stromečku	35
Obrázek 7-4: Redukované napětí při počáteční ztrátě stability panelu bez stromečku (32 % - 33 %)	35
Obrázek 7-5: Redukované napětí v oblasti maximální únosnosti panelu bez stromečku (89 %)	36
Obrázek 7-6: Redukované napětí v okamžiku blízkému selhání panelu bez stromečku (97 %)	36
Obrázek 7-7: Redukované napětí při počáteční ztrátě stability panelu se stromečkem	39
Obrázek 7-8: Redukované napětí panelu se stromečkem při stlačení 87 %	40
Obrázek 7-9: Rozložení napjatosti v oblasti stromečku	40
Obrázek 7-10: Redukované napětí panelu se stromečkem při stlačení 100 %	41

11.2 SEZNAM GRAFŮ

Graf 6-1: Průběh reakční síly v závislosti na stlačení v základním panelu	33
Graf 7-1: Průběh reakční síly v závislosti na stlačení – panel bez stromečku vůči panelu základnímu.....	37
Graf 7-2: Srovnání průběhu reakčních sil první varianty panelů	42
Graf 7-3: Procentuální navýšení reakční síly první varianty vůči základnímu panelu.....	43
Graf 7-4: Procentuální navýšení reakční síly první varianty vůči panelu bez stromečku	44
Graf 7-5: Trend maximální přenesené síly v závislosti na tloušťce stromečku.....	44
Graf 7-6: Procentuální navýšení hmotnosti vůči základnímu panelu	45
Graf 7-7: Srovnání průběhů reakčních sil druhé varianty panelů.....	47
Graf 7-8: Procentuální navýšení reakční síly druhé varianty vůči základnímu panelu	47
Graf 7-9: Procentuální navýšení reakční síly druhé varianty vůči panelu bez stromečku.....	48
Graf 7-10: Trend maximální přenesené síly v závislosti na tloušťce kmene.....	48
Graf 8-1: Srovnání průběhu kritické síly vybraných panelů	49
Graf 8-2: Srovnání kritických reakčních sil	50

11.3 SEZNAM TABULEK

Tab. 7-1: Odchylka panelu bez stromečku vůči základnímu panelu	37
Tab. 7-2: Vyšetřované rozměrové parametry	38
Tab. 7-3: Počet kroků v nelineární analýze první varianty panelů	41
Tab. 7-4: Hodnoty maximálních sil, napětí a stlačení první varianty panelů	43
Tab. 7-5: Hmotnost jednotlivých panelů	45
Tab. 7-6: Počet kroků v nelineární analýze druhé varianty panelů	46
Tab. 7-7: Hodnoty maximálních sil, napětí a stlačení druhé varianty panelu	46