



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

STUDIE VLIVU GEOMETRIE ZASTAVOVAČŮ RŮSTU TRHLINY NA STABILITU INTEGRÁLNÍHO PANELU KŘÍDLA POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

STUDY OF CRACK RETARDERS GEOMETRY MODIFICATION EFFECT ON INTEGRAL STRUCTURAL PANEL
STABILITY WITH THE USE OF FINITE ELEMENT METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Moštěk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Katrňák

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Daniel Moštěk**
Studijní program: Letecká a kosmická technika
Studijní obor: Stavba letadel
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Katrňák**
Akademický rok: 2023/24

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 diplomové práce:

Studie vlivu geometrie zastavovačů růstu trhliny na stabilitu integrálního 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 analýzy specificky vyztuženého dolního integrálního panelu křídla, který je složen z potahových polí, výztužných podélníků a zastavovačů růstu trhliny. Dále je zaměřena na úpravy MKP modelů, provedení série výpočtů a následné vyhodnocení vlivu změny geometrie na ztrátu stability panelu.

Cíle diplomové práce:

1. Úvod do problematiky ztráty stability vyztužených panelů v tlaku.
2. Přehled způsobů zpomalení a zastavení růstu trhliny a konstrukčních řešení.
3. Tvorba modelů vyztuženého integrálního panelu se zastavovači růstu trhliny.
4. Vyhodnocení výsledků z výpočtů pomocí metody konečných prvků.
5. Zpracování grafů závislostí 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.

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

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.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se věnuje posouzení vlivu čtyř rozměrových parametrů specifického typu zastavovače růstu trhliny na zlepšení únosnosti integrálního panelu křídla v tlaku metodou konečných prvků. Zlepšení únosnosti bylo zejména posuzováno z hlediska přidané hmotnosti zastavovačů růstu trhliny. Zastavovače růstu trhliny se skládají z tzv. terminálu a tzv. postranních větví. Součástí práce je rešerše problematiky ztráty stability vyztužených panelů v tlaku a přehled typů zastavovačů růstu trhliny. V praktické části práce popisuje vytvořené MKP modely zkoumaných variant a dosažené výsledky, které následně zhodnocuje. Bylo dosaženo závěru, že zkoumané parametry související s terminálem mají významný vliv na zvýšení únosnosti a jsou efektivní z hlediska přidané hmotnosti. Zkoumané parametry ovlivňující postranní větve se naopak ukázaly jako relativně málo významné a hmotnostně neefektivní.

Klíčová slova

zastavovače růstu trhliny, únosnost v tlaku, metoda konečných prvků, ztráta stability, integrální panel křídla

ABSTRACT

The master's thesis concerns itself with evaluating the impact of four dimensional parameters of a specific type of crack retarder on improving the compressional buckling strength of an integral wing panel, using the finite element method. The improvements in buckling strength were particularly assessed with concerns to the added mass of the crack retarders. The crack retarders are composed of a so-called terminal section and so-called side branches. The thesis includes a literature review on the buckling of skin-stringer panels and an overview of crack retarder types. In the practical part of the thesis created FEM models of the examined variants are described along with the achieved results, which are subsequently evaluated. It was concluded that the examined parameters related to the terminal section significantly influence the increase of buckling strength of a given variant and are efficient concerning added mass. On the other hand, the examined parameters related to the side branches were deemed less significant and their alteration was inefficient in terms of added mass.

Key words

crack retarders, buckling strength, finite element method, buckling, integral wing panel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MOŠTĚK, Daniel. *Studie vlivu geometrie zastavovačů růstu trhliny na stabilitu integrálního panelu křídla pomocí metody konečných prvků*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/153961>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Tomáš Katrňák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Studie vlivu geometrie zastavovačů růstu trhliny na stabilitu integrálního panelu křídla pomocí metody konečných prvků** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Daniel Moštěk

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Tomáši Katrňákovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji své snoubence, rodině a svým přátelům za podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

Seznam zkratk a symbolů	4
1. Úvod	7
2. Úvod do problematiky ztráty stability vyztužených panelů v tlaku	8
2.1 Primární ztráta stability nosníku zatíženého tlakem	8
2.1.1 Rozdělení typů ztráty stability tlakem zatíženého nosníku	8
2.1.2 Eulerův model ztráty vzpěrné stability	8
2.1.3 Ztráta vzpěrné stability při elasto-plastickém zatížení	10
2.1.4 Torzní a torzně-ohybová ztráta stability nosníku v tlaku	13
2.2 Ztráta stability tenké tlakem zatížené stěny	13
2.3 Lokální ztráta stability nosníku složeného z tenkých panelů zatěžovaného tlakem	16
2.3.1 Kritické napětí lokální ztráty stability	17
2.3.2 Crippling u tenkostěnného nosníku	18
2.4 Ztráta stability vyztuženého panelu v tlaku	19
2.4.1 Spolučinná šířka potahu	20
2.4.2 Počáteční zvlnění	25
2.4.3 Lokální nestabilita	27
2.4.4 Ztráta vzpěrné stability celého panelu	27
2.4.5 Torzní ztráta stability	28
2.4.6 Ztráta stability potahu mezi nýtovými spoji (<i>inter-rivet buckling</i>)	29
2.4.7 Wrinkling	30
2.4.8 Mode Jumping	31
3. Přehled zastavovačů růstu trhliny	33
3.1 Únava v letectví – Základní konstrukční filozofie	33
3.2 Zastavovače růstu trhliny	35
3.2.1 Pásové zastavovače růstu trhliny	39
3.2.2 Vliv výztuh („stringerů“) panelu na zpomalení růstu trhliny	51
3.2.3 Zastavovače růstu trhliny vytvořené variací tloušťky panelu	54
3.2.4 Bionické zastavovače růstu trhliny	55
4. Tvorba MKP modelů vyztužených panelů se zastavovači růstu trhliny	59
4.1 Základní model	59
4.1.1 Geometrie	60
4.1.2 Použité zastavovače růstu trhliny	61
4.1.3 MKP síť	63
4.1.4 Okrajové podmínky a zatížení	66
4.1.5 Materiál	67

4.1.6	Nastavení analýzy	68
4.1.7	Typický výsledek	69
4.2	Vliv počtu elementů a materiálového modelu na přesnost výpočtu	73
4.2.1	Vliv počtu elementů na přesnost výpočtu	73
4.2.2	Vliv materiálového modelu na přesnost výpočtu.....	76
4.3	Únosnost prostého vyztuženého panelu s úpravou sítě pro zastavovače	79
5.	Zkoušení různých variant rozměrů zastavovačů růstu trhliny	84
5.1	Změna tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny (parametr w_T)	84
5.1.1	Popis (změna w_T)	84
5.1.2	Výsledky (změna w_T)	85
5.2	Změna tloušťky postranních větví zastavovačů růstu trhliny (parametr w_B).....	89
5.2.1	Popis (změna w_B)	89
5.2.2	Výsledky (změna w_B).....	90
5.3	Změna délky postranních větví zastavovačů růstu trhliny (parametr L_B).....	92
5.3.1	Popis (změna L_B).....	93
5.3.2	Výsledky (změna L_B)	95
5.4	Změna výšky zastavovačů růstu trhliny (parametr h).....	97
5.4.1	Popis (změna h).....	97
5.4.2	Výsledky (změna h)	99
5.5	Varianta s polovičním množstvím postranních větví.....	102
5.5.1	Popis (poloviční množství postranních větví).....	102
5.5.2	Výsledky (poloviční množství postranních větví)	103
5.6	Varianta se zkrácenými zastavovači růstu trhliny.....	105
5.6.1	Popis (zkrácené zastavovače růstu trhliny).....	105
5.6.2	Výsledky (zkrácené zastavovače růstu trhliny)	106
6.	Zhodnocení výsledků	109
6.1	Srovnání základního a prostého panelu	109
6.2	Změna tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny (parametr w_T)	112
6.3	Změna tloušťky postranních větví zastavovačů růstu trhliny (parametr w_B).....	112
6.4	Změna délky postranních větví (parametr L_B)	113
6.5	Změna výšky zastavovačů růstu trhliny (parametr h).....	114
6.6	Varianta s polovičním množstvím postranních větví.....	114
6.7	Varianta se zkrácenými zastavovači růstu trhliny.....	114
6.8	Celkové zhodnocení	115
7.	Závěr	117
	Seznam použitých zdrojů.....	119
	Seznam obrázků	123

Příloha 1 – Napětí a deformace typického výsledku	137
Příloha 2 – Deformace prostého panelu dle typu sítě.....	144

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[mm ²]	plocha průřezu nosníku
A_s	[mm ²]	plocha průřezu výztuhy
<i>ARALL</i>		Aramid aluminium laminate
a	[mm]	délka stěny/potahu/panelu
a	[mm]	délka trhliny
a_d	[mm]	minimální detekovatelná délka trhliny
a_p	[mm]	kritická délka trhliny
<i>BCR</i>		Bonded Crack Retarders
b	[mm]	šířka stěny/potahu/panelu
b_e	[mm]	spolučinná šířka potahu
<i>CFRP</i>		Carbon fiber reinforced polymer
<i>CP</i>		Cross-Ply
C_R	[-]	redukční součinitel faktoru intenzity napětí
<i>CSCR</i>		Cold Spray Crack Retarders
c	[-]	součinitel uložení nosníku
D	[mm]	rozměrový parametr bionických zastavovačů růstu trhliny
d	[mm]	výška výztuh integrálního panelu
d	[mm]	celková deformace elementu panelu
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
E_r	[MPa]	redukovaný modul deformace
E_s	[MPa]	sečný modul deformace
E_t	[MPa]	tečný modul deformace
e	[1/g]	faktor prodloužení životnosti vztažený na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny
F	[N]	síla
$F_{c,st}$	[MPa]	kritické napětí ztráty stability výztuh
$F_{cr,sk}$	[MPa]	kritické napětí ztráty stability potahu
F_{kr}	[N]	kritická hodnota vzpěrné stability
F_{max}	[N]	únosnost – maximální dosažená tlaková síla
F_{maxbi}	[N]	únosnost varianty s bilineárním materiálovým modelem
F_{max10}	[N]	únosnost varianty s deseti elementy na výšku výztuhy
$F_{maxtest}$	[N]	únosnost při experimentu
F_n	[N]	normálová síla
f_b	[MPa]	kritické napětí počátečního zvlnění
f_o	[MPa]	kritické napětí zvlnění nevyztuženého panelu
<i>GLARE</i>		Glass Laminated Aluminium Reinforced Epoxy
H	[-]	část doby života součástí v zatěžovacích cyklech
H	[-]	hardening slope
<i>HMH</i>		Huber, von Mises, Hencky
h	[mm]	výška zastavovačů růstu trhliny
I	[mm ⁴]	kvadratický moment průřezu
K	[-]	součinitel pro určení kritického napětí ztráty stability
K	[MPa · mm ^{0,5}]	faktor intenzity napětí
K_c	[-]	součinitel pro určení kritického napětí ztráty stability potahu
k	[-]	součinitel uložení hran stěny
k	[-]	lineární směrnice spojnice trendu

k_c	[-]	součinitel uložení s vlivem zakřivení
L	[mm]	délka nosníku
L'	[mm]	efektivní délka nosníku
L_B	[mm]	délka postranních větví zastavovačů růstu trhliny
LEF	[-]	Life Extension Factor (faktor prodloužení životnosti)
LOV		Limit of Validity
L_S	[-]	součinitel koncentrace napětí výztuh
MKP		Metoda Konečných Prvků
m	[-]	počet půlvln v podélném směru tlačného panelu
m	[kg]	hmotnost
N	[-]	životnost v zátěžových cyklech
n	[-]	parametr tvaru křivky u tahového diagramu dle Ramberga-Osgooda
n	[-]	počet zátěžových cyklů
q	[-]	absolutní člen směrnice spojnice trendu
R	[-]	poměr minimálního a maximálního napětí v zátěžovém cyklu
R_{p02}	[MPa]	smluvní mez kluzu
r	[mm]	poloměr zakřivení zakřiveného panelu
SS		Simply Supported (kloubové uložení)
S_{OL}	[MPa]	napěťové zatížení při přetížení
s	[mm]	rozteč mezi sousedními nýty
t	[mm]	tloušťka stěny/potahu/panelu
t_p	[mm]	tloušťka potahu
t_s	[mm]	tloušťka výztuh
UD		Uni-Directional
u	[mm]	normálová deformace
WFD		Widespread Fatigue Damage
w_B	[mm]	šířka postranních větví zastavovačů růstu trhliny w_T
	[mm]	šířka terminálu zastavovačů růstu trhliny
ZI		zastavovač růstu trhliny 1
β	[-]	součinitel faktoru intenzity napětí dle geometrie
$\Delta F_{maxBare}$	[%]	navýšení únosnosti panelu v procentech únosnosti prostého panelu
$\Delta F_{maxBare}/\Delta m$	[%/kg]	navýšení únosnosti panelu v procentech únosnosti prostého panelu vztažená na hmotnost zastavovačů růstu trhliny
Δm	[kg]	hmotnost zastavovačů růstu trhliny
Δx	[mm]	deformace panelu ve směru osy x
η	[-]	součinitel korekce na plasticitu u tlačné stěny
λ	[-]	štíhlost nosníku
μ	[-]	Poissonův poměr
μ_e	[-]	Poissonův poměr pro elastickou část tahové křivky
μ_p	[-]	Poissonův poměr pro elasto-plastickou část tahové křivky
ρ	[mm]	poloměr setrvačnosti (anglicky radius of gyration)
ρ	[kg/m ³]	hustota
σ	[MPa]	napětí
σ_{kr}	[MPa]	kritické tlakové napětí ztráty stability
σ_{krc}	[MPa]	kritické tlakové napětí pro <i>crippling</i>

σ_{kir}	[MPa]	kritické tlakové napětí ztráty stability potahu mezi nýtovými spoji
σ_{krl}	[MPa]	kritické tlakové napětí lokální ztráty stability
$\sigma_{0,7}; \sigma_{0,85}$	[MPa]	napětí na průsečíku tahového diagramu a přímky o směrnici $0,7 \cdot E$; $0,85 \cdot E$

1. ÚVOD

U leteckých konstrukcí je žádoucí dosahovat vysoké únavové životnosti. Obzvláště v oblasti křídla lze pozorovat rozmanitá spektra zatížení způsobená letovým cyklem, poryvy větru, manévry či přistáním [22]. Spodní panel křídla, který je po většinu letu zatěžován tahově, tedy musí být schopný odolávat i tlakovému zatížení.

Ke zvýšení životnosti konstrukce je možné aplikovat určité konstrukční prvky, které povedou ke zpomalení, či zastavení růstu únavové trhliny. Tyhle prvky lze nazývat jako zastavovače růstu trhliny.

Při zatěžování části konstrukce v tlaku může docházet k meznímu stavu ztráty stability při menších zatížení, než při kterých dochází v případě zatěžování tahem k meznímu stavu pružnosti. Mezní zatížení části konstrukce v tlaku lze nazvat její únosností v tlaku.

Letecké konstrukce je rovněž důležité optimalizovat z hlediska hmotnosti. V této diplomové práci je pomocí metody konečných prvků prováděna studie vlivu několika rozměrových parametrů specifického druhu zastavovače růstu trhliny na zvýšení únosnosti integrálního panelu křídla v tlaku. Zvýšení únosnosti je zároveň hodnoceno z hlediska hmotnosti zastavovačů růstu trhliny, o kterou jejich aplikací narůstá hmotnost konstrukce.

Motivací této práce je, že pokud by zpracovávaný typ zastavovače růstu trhliny vedl k významnému zlepšení životnosti integrálního panelu, pak by bylo žádoucí, aby volbou vhodných konstrukčních parametrů dokázal i významně přispívat k zvýšení únosnosti panelu v tlaku. Jeho aplikace by pak mohla vést k hmotnostně efektivní konstrukci.

V prvních dvou následujících kapitolách této diplomové práce je provedena rešerše s cílem poskytnout úvod do problematiky ztráty stability vyztužených panelů a přehled zastavovačů růstu trhliny. V následné kapitole je přiblížena tvorba MKP modelů vyztužených panelů se zastavovači růstu trhliny. Poté je prezentováno zkoušení různých variant rozměrů zastavovačů růstu trhliny včetně dosažených výsledků, které jsou v další kapitole posléze zhodnoceny.

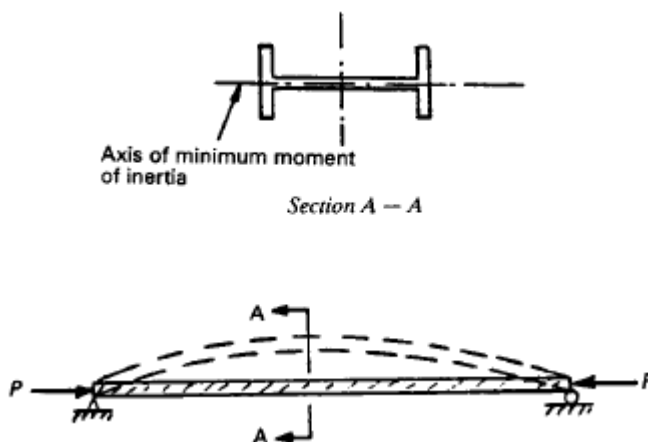
2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY ZTRÁTY STABILITY VYZTUŽENÝCH PANELŮ V TLAKU

Hlavními prvky vyztuženého panelu jsou potah a podélné výztuhy. Potah lze popsat jako tenkou stěnu a podélné výztuhy jako nosník [15]. První částí této kapitoly se proto budou věnovat nejdříve stručnému popisu ztráty stability nosníků zatěžených tlakově v podélném směru a ztrátě stability tenkých stěn a následně budou popisovány celé vyztužené panely.

2.1 Primární ztráta stability nosníku zatíženého tlakem

2.1.1 Rozdělení typů ztráty stability tlakem zatíženého nosníku

Způsoby ztráty stability tlakově zatížených nosníků můžeme rozdělit na dvě kategorie. První, *primární*, spočívá v celkové ztrátě stability nosníku, kdy nedochází ke deformaci průřezu. Dochází k celkové deformaci kolmo na zatížení, přičemž se nosník vychyluje kolem osy, ke které má průřez nejmenší kvadratický moment [15, 14]. Délka půlvlny deformace odpovídá řádově délce nosníku [14]. Obrázek 1 zobrazuje ilustraci primární ztráty stability nosníku. Druhým způsobem je *sekundární* ztráta stability, kdy se jedná o *lokální* ztrátu stability, k deformacím průřezu dochází a délka půlvlny odpovídá řádově rozměrům průřezu [14]. Ilustraci lokální ztráty stability ukazuje Obrázek 2. Tahle podkapitola bude věnována *primární* ztrátě stability nosníku, převážně *Eulerovu* modelu ztráty vzpěrné stability.

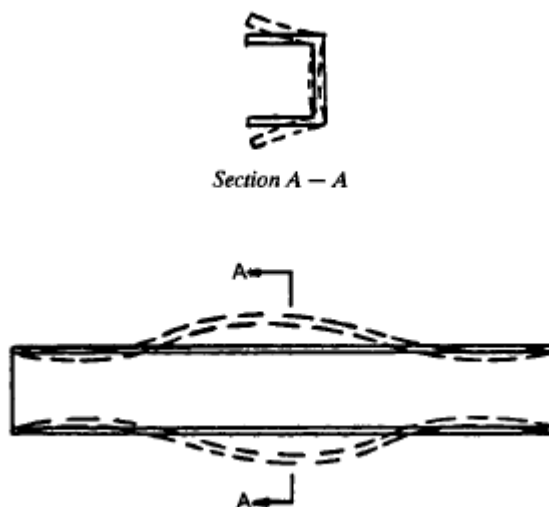


Obrázek 1 Celková ztráta stability nosníku zatíženého tlakem

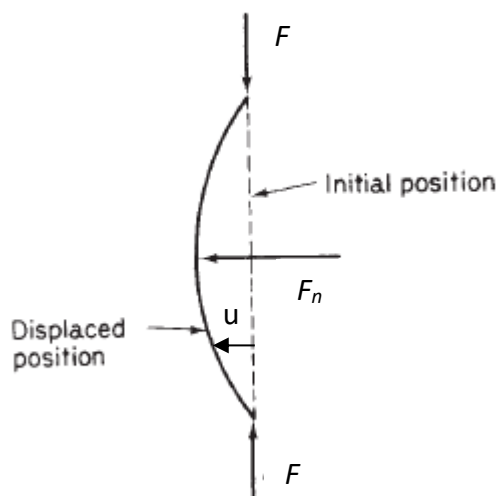
2.1.2 Eulerův model ztráty vzpěrné stability

Při zatěžování přímého nosníku tlakovou silou F menší, než je kritická hodnota vzpěrné stability F_{kr} , je nosník ve stabilní konfiguraci [14, 6]. Zatíží-li se malou normálovou silou F_n vzniká v nosníku ohyb (viz Obrázek 3). Kromě vlastního ohybu způsobeného silou F_n dochází rovněž k tomu, že i tlaková síla F vyvolává v nosníku ohybový moment působením na rameni normálové deformace u . V případě stabilní situace při následném odtížení síly F_n dojde v tlaceném nosníku k návratu do původní konfigurace [14, 6]. Dosáhne-li ovšem síla F kritické hodnoty vzpěrné stability F_{kr} , tak nosník dosáhne meze vzpěrné stability a je ve stavu labilní rovnováhy, případná ohybová deformace vyvolaná normálovou silou F_n zůstane po jejím odtížení přítomná [14, 6]. V případě překročení hodnoty F_{kr} silou F se původní přímá

konfigurace stává nestabilní a dochází k prudkému nárůstu ohybové deformace a nosník není schopný nadále vykonávat svou funkci [14, 6].



Obrázek 2 Lokální ztráta stability u nosníku zatíženého tlakem



Obrázek 3 Zatížení tlačového nosníku kolmou silou

V případě ideálního tlakového zatěžování v ose ideálního přímého homogenního nosníku bez působení síly F_n by teoreticky docházelo pouze k deformaci nosníku zkracováním ve směru zatěžování bez přítomnosti ohybu i po překročení kritické hodnoty vzpěrné stability F_{kr} silou F [14, 6]. Nicméně v praxi je nemožné dosáhnout takové ideální situace a v důsledku výrobních tolerancí a nemožnosti dosáhnout zatížení přesně v ose bude u reálného nosníku vždy přítomna určitá míra ohybu [14, 6].

Kritická hodnota tlakové síly F_{kr} lze vypočítat jako [15]:

$$F_{kr} = c \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (1)$$

Kdy E je Youngův modul pružnosti, I je menší z kvadratických momentů průřezu, L je délka nosníku a c je součinitel daný okrajovým uložením nosníku.

Alternativním vyjádřením F_{kr} je [15, 14, 6]:

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{L'^2} \quad (2)$$

Kdy L' je efektivní délka nosníku, která daný nosník přirovnává na nosník s oběma konci s rotačními vazbami o ekvivalentní kritické tlakové síle F_{kr} , přičemž při spojení obou vyjádření platí pro L' [15]:

$$L' = \frac{L}{\sqrt{c}} \quad (3)$$

Kritické tlakové napětí σ_{kr} lze vyjádřit obdobně jako [15]:

$$\sigma_{kr} = c \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{\rho}\right)^2} \quad (3)$$

Nebo:

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L'}{\rho}\right)^2} \quad (4)$$

Přičemž ρ je poloměr setrvačnosti průřezu (anglicky radius of gyration), který je definován jako [15]:

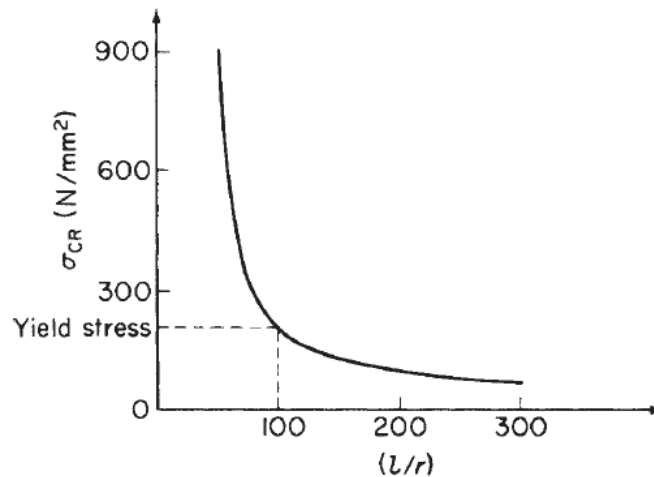
$$\rho = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (5)$$

Kdy A je plocha průřezu nosníku. Lze definovat štíhlost nosníku λ :

$$\lambda = \frac{L}{\rho} \quad (6)$$

2.1.3 Ztráta vzpěrné stability při elasto-plastickém zatížení

Obrázek 4 ukazuje příklad závislosti kritického napětí ztráty vzpěrné stability na štíhlosti ocelového nosníku s využitím výše uvedených vzorců. Pro štíhlosti, pro které je kritické napětí větší nebo rovno mezi kluzu, lze vidět dramatický nárůst hodnoty kritického napětí. Je nutné tedy zdůraznit, že výše uvedené vztahy jsou platné pouze pro hodnoty napětí v elastické oblasti [15, 14, 6].



Obrázek 4 Závislost kritického napětí ztráty vzpěrné stability na štíhlosti nosníku dle Eulerovy metody

Pro výpočet kritického napětí ztráty vzpěrné stability v elasto-plastické oblasti deformace se jeví jako nejjednodušší použít tzv. metodu *tečného modulu deformace* (*tangent modulus*) [14, 6]. Spočívá v zavedení předpokladu, že při navýšení napětí nad mez kluzu další deformace neprobíhá již podle Youngova modulu pružnosti E , platného pro elastickou oblast, ale podle tečného modulu deformace E_t [14, 6], jež zobrazuje Obrázek 5 na tahovém diagramu.

Kritickou sílu ztráty vzpěrné stability F_{kr} a kritické napětí ztráty vzpěrné stability σ_{kr} pak lze vyjádřit jako [15, 14, 6]:

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 E_t}{\left(\frac{L'}{\rho}\right)^2} \quad (7)$$

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 E_t I}{L'^2} \quad (8)$$

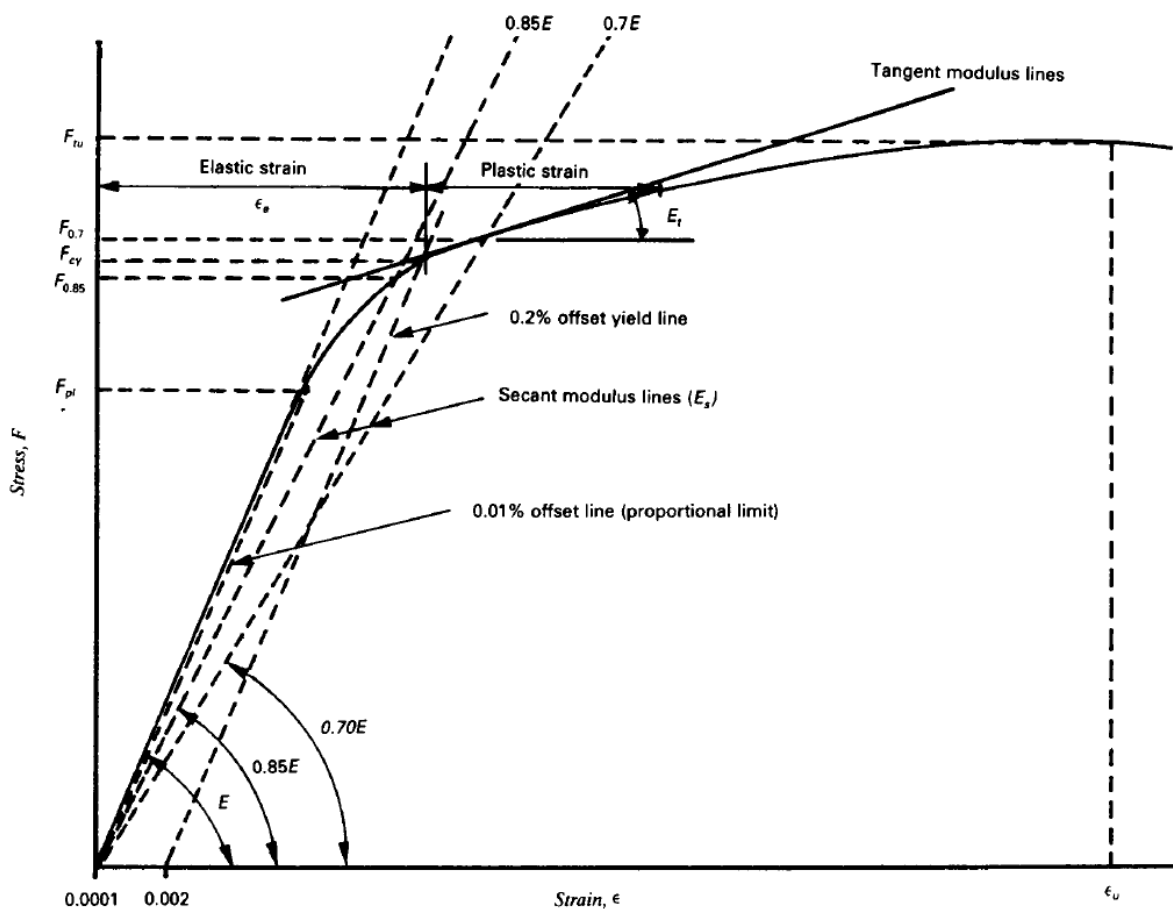
Pro vyjádření *tečného modulu deformace* E_t lze využít například vztahu Ramberga-Osgooda sloužící k popisu nelineárních tahových diagramů materiálu [15, 6]. Kdy tečný modul deformace E_t pro dané napětí σ a materiál lze vyjádřit pomocí [15]:

$$E_t = \frac{E}{1 + \frac{3}{7}n \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,7}}\right)^{n-1}} \quad (9)$$

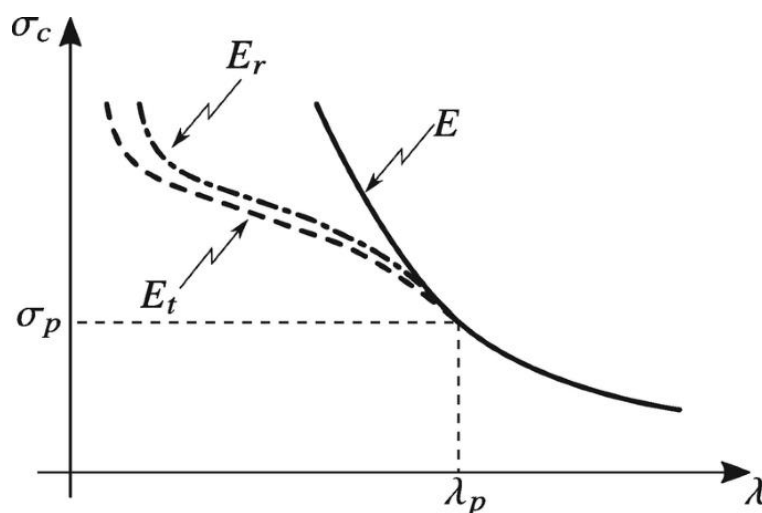
Kdy n je parametr tvaru křivky daný jako [15]:

$$n = 1 + \frac{\log\left(\frac{17}{7}\right)}{\log\left(\frac{\sigma_{0,7}}{\sigma_{0,85}}\right)} \quad (10)$$

Napětí $\sigma_{0,7}$ a $\sigma_{0,85}$ jsou napětí na průsečíku tahového diagramu a přímky o směrnici $0,7 \cdot E$ respektive $0,85 \cdot E$, viz Obrázek 5, kde napětí $\sigma_{0,7}$ a $\sigma_{0,85}$ jsou značena jako $F_{0,7}$ a $F_{0,85}$ [15]:



Obrázek 5 Tahový diagram s definovaným tečným modulem deformace



Obrázek 6 Závislost kritického napětí na štíhlosti nosníku pro metodu tečného modulu deformace a redukovaného modulu deformace

Přímou alternativou k metodě *tečného modulu deformace* je tzv. metoda *redukovaného modulu deformace (reduced modulus)*, která předpokládá, že při dalším zatěžování v části průřezu

dochází vlivem ohybu ke snižování napětí (a ve zbytku průřezu k navýšení). Změna deformace v oblasti snížení napětí se chová dle Youngova modulu pružnosti E a v oblasti navýšení napětí dle tečného modulu deformace E_t a zavádí redukovaný modul deformace E_r [14, 6]. Metoda *tečného modulu deformace* poskytuje nicméně výsledky více odpovídající experimentům [14, 6]. Obrázek 6 zobrazuje příklad vztahu kritického napětí vzpěrné stability nosníku na štíhlosti nosníku při uvážení klasické Eulerovy metody (křivka vykreslená plnou čarou), metody *tečného modulu deformace* (křivka vykreslená přerušovanou čarou) i metody *redukovaného modulu deformace* (křivka vykreslená čerchovanou čarou).

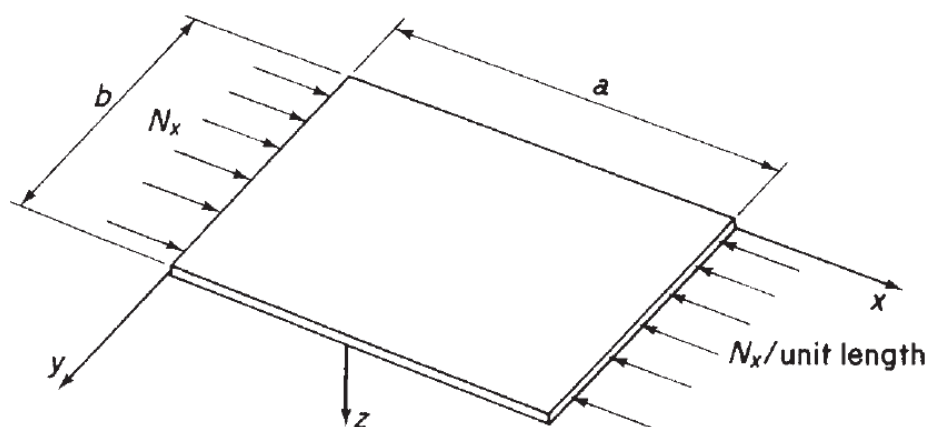
2.1.4 Torzní a torzně-ohybová ztráta stability nosníku v tlaku

Mimo Eulerovský model ohybové ztráty vzpěrné stability je možné se setkat s dalšími dvěma druhy *primární* ztráty stability u tlakem zatíženého nosníku. Jedná se o *torzně-ohybovou* ztrátu stability a *torzní* ztrátu stability [14, 31]. U *torzně-ohybové* ztráty stability, jak napovídá název, dochází zároveň ke kroucení i ohýbání nosníku, přičemž ji lze pozorovat u nosníků s průřezem s pouze jednou či žádnou osou symetrie [31]. Nosníky s průřezem o dvou osách symetrie, případně s průřezem, které mají těžiště i střed smyku ve stejném bodě (například Z nosník) *torzně-ohybovou* ztrátou stability v tlaku netrpí [31]. V případě *torzní* ztráty stability v tlaku se jedná o ztrátu stability kroucením [31]. V některých případech u nosníků s otevřenými průřezem je možné, že *torzně-ohybová* či *torzní* ztráta stability nastane při napětích nižších, než je kritické napětí ztráty stability dané *Eulerovským* modelem [15, 31].

Vzhledem k tomu, že popis *torzní* a *torzně-ohybové* ztráty stability nosníků není cílem této diplomové práce a vzhledem ke komplexnosti problematiky, nebude tohle téma dále rozváděno, jako možný zdroj detailního popisu může sloužit [31] nebo [14].

2.2 Ztráta stability tenké tlakem zatížené stěny

Tlakem zatíženou stěnou (či panelem) je myšlena stěna, která je zatížena tlakem na protějších hranách, viz Obrázek 7. V nejjednodušší variantě mají zatížené hrany kloubové uložení a další hrany jsou volné, stěna se v takové konfiguraci chová obdobně jako nosník dle *Eulerova* modelu, jak bylo popsáno na předchozích stranách [14].



Obrázek 7 Schematický náčrt tlakem zatížené stěny

V případě zamezení deformace na nezátížených hranách v normálovém směru dochází ke ztrátě stability panelu formou vyboulení ve středových částech, přičemž části blízké hranám zůstávají rovné a panel se tak ohýbá oproti předchozí variantě ve dvou směrech, vyžadujíc větší zatížení [15, 14].

Kritické napětí ztráty stability pro tenký panel lze určit jako [15, 14, 6]:

$$\sigma_{kr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (11)$$

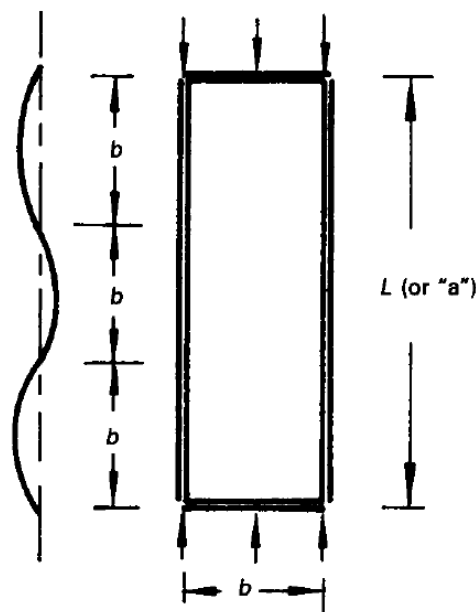
Kde k je součinitel daný uložením hran stěny, E je Youngův modul pružnosti, t je tloušťka stěny, b je šířka panelu ve směru kolmém na zatěžování (délku ve směru zatěžování označujeme a , viz Obrázek 7) a μ je *Poissonův* poměr.

Alternativně lze výše uvedený vztah zapsat jako [15]:

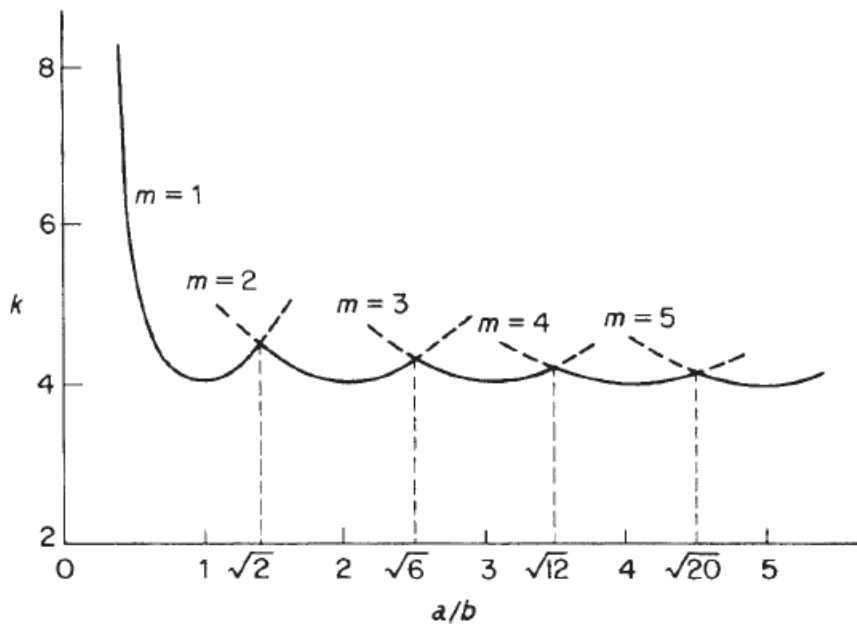
$$\sigma_{kr} = KE \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (12)$$

Kde součinitel K je složen z několika součinitelů z Rovnice 11.

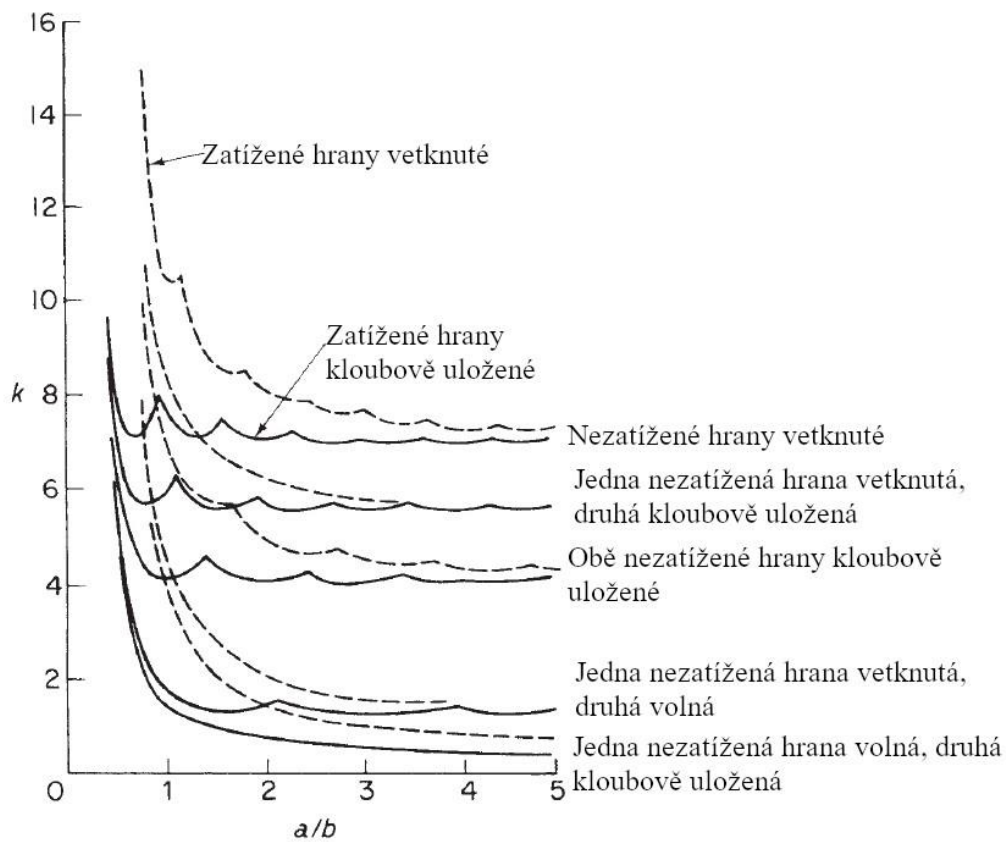
Stěna ve směru kolmém na zatížení ztrácí stabilitu s jednou půlvlnou na šířku b , v podélném směru k zatížení má tendenci ztrácet stabilitu ve formě série čtverců [15, 14], jako ilustrace může sloužit Obrázek 8. Obrázek 9 ukazuje závislost součinitele k vůči poměru délky panelu a ku šířce b v závislosti na počtu půlvln m v podélném směru u tlačeného panelu se všemi hranami uloženými kloubově [14].



Obrázek 8 ztráta stability panelu o čtvercových půlvlnách



Obrázek 9 Součinitel uložení k dle počtu půlvln m a poměru délky a ku šířce b – kloubové uložení



Obrázek 10 Součinitel uložení hran k dle typu uložení a poměru délky a ku šířce b

Obrázek 10 zobrazuje vztah součinitele uložení hran panelu k v závislosti na poměru délky panelu a ku šířce b pro různé varianty uložení hran.

Dříve uvedené vztahy pro výpočet kritického napětí ztráty stability σ_{kr} platí pro situaci, kdy napětí nepřesahuje mez kluzu materiálu, pro kritická napětí přesahující mez kluzu platí vztah [14, 6]:

$$\sigma_{kr} = \frac{\eta k \pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (13)$$

Případně:

$$\sigma_{kr} = \eta K E \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (14)$$

Kdy součinitel η je součinitel korekce na plasticitu. Jedním z možných vztahů, kterým lze vyjádřit je [14]:

$$\eta = \frac{1 - \mu_e^2}{1 - \mu_p^2} \frac{E_s}{E} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{4} + \frac{3 E_t}{4 E_s} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (15)$$

Kdy μ_e je Poissonův poměr pro elastickou část tahové křivky, μ_p je Poissonův poměr pro elasto-plastickou část tahové křivky. Dále E_t je tečný modul deformace a E_s je sečný modul deformace, viz Obrázek 5.

Pro zakřivené panely s poloměrem zakřivení r lze v elastické oblasti určit kritické napětí ztráty stability podobně jako pro panel bez zakřivení jako [15, 6]:

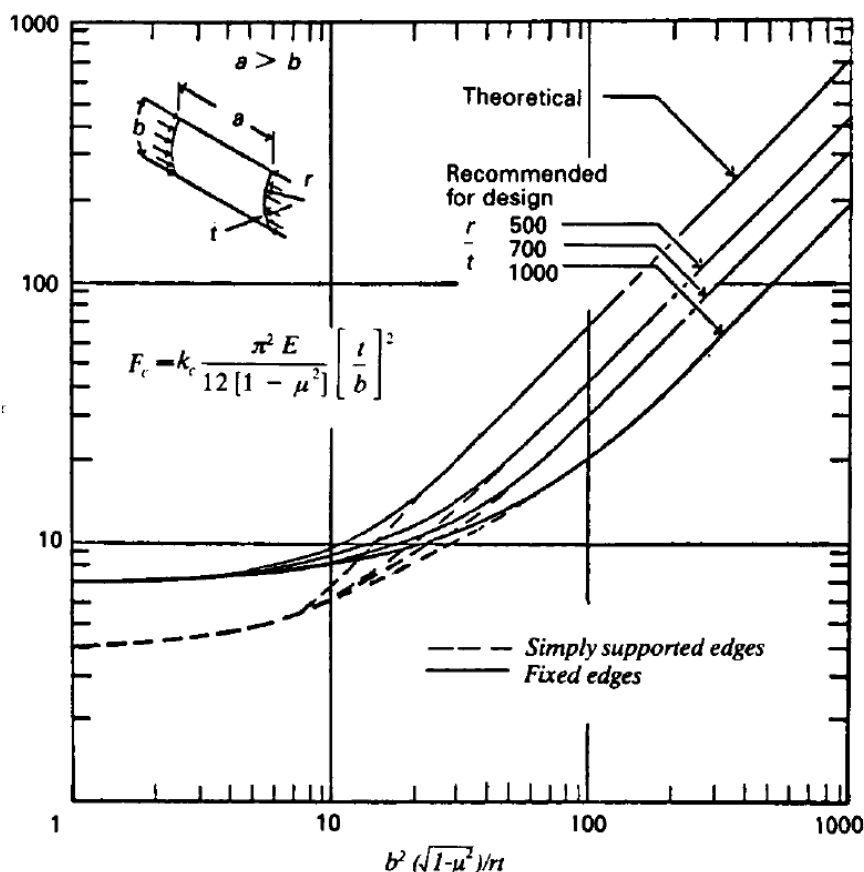
$$\sigma_{kr} = \frac{k_c \pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (16)$$

Kdy k_c je součinitel uložení s vlivem zakřivení, který lze určit například z grafů, které ukazuje Obrázek 11.

2.3 Lokální ztráta stability nosníku složeného z tenkých panelů zatěžovaného tlakem

Jak bylo zmíněno v 2.1.1 u tlakem zatížených nosníků se rozlišuje *primární* a *sekundární* či *lokální* ztráta stability. Lokální ztráta stability u stojin a pásnic nosníků s tenkostěnnými průřezy lze nejčastěji sledovat pro nosníky se štíhlostí $\lambda < 20$, *primární* ztráta stability bývá zase běžná pro štíhlosti $\lambda > 80$ [14]. Pro tenkostěnné nosníky o štíhlostech mezi těmito hodnotami lze očekávat možnost kombinace *primární* a *sekundární* ztráty stability [14].

Tyhle tenkostěnné nosníky bývají nejčastěji zhotoveny pomocí tažení za studena, případně skrze ohýbání plechů [14, 6].



Obrázek 11 Součinitele uložení k_c pro zakřivené panely zatížené tlakem

2.3.1 Kritické napětí lokální ztráty stability

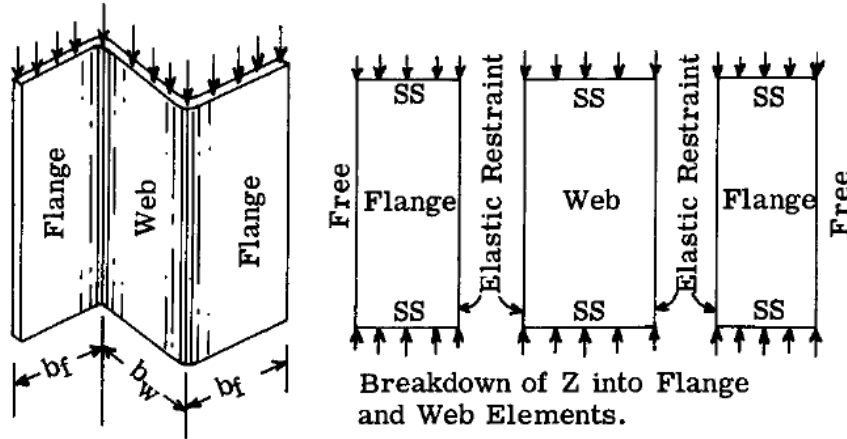
Na pásnice a stojiny tenkostěnných tažených či ohybem vyrobených nosníků lze pohlížet jako na tlakem zatížené tenké stěny, které i stejným způsobem ztrácí stabilitu [14, 6]. Ztráta stability stojiny či pásnice vede ke změně průřezu nosníku a mívá délku půlvlny v řádu šířky daného prvku a kritické napětí lokální ztráty stability obecně bývá nezávislé na délce nosíku, je-li délka nosníku alespoň třikrát větší, než je šířka nejširšího prvku průřezu (pásnice, stojina) [14].

Proces určení kritického napětí pro *lokální* ztrátu stability spočívá tedy v rozložení průřezu na jednotlivé dlouhé tenké stěny. Dále jsou určena uložení na jejich hranách, k ilustraci takového rozložení může sloužit Obrázek 12 (přičemž zkratka *SS* znamená Simply Supported, tedy kloubové uložení) [6]. Následně lze využít vztah pro ztrátu stability tlakem zatížené stěny pro všechny pásnice a stojiny v průřezu [6]:

$$\sigma_{krl} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (17)$$

Šířka pásnice b se může lišit pro nosníky tažené za studena a pro nosníky vyrobené ohybem, pro nosníky vyrobené ohybem sahá šířka b od volného okraje po střednici navazující stojiny, zatímco pro nosníky tažené sahá šířka b od volného okraje po vnitřní hranu navazující stojiny (šířka b bude pro tažený nosník tedy menší než pro nosník vyrobený ohybem, mají-li oba stejné rozměry) [6].

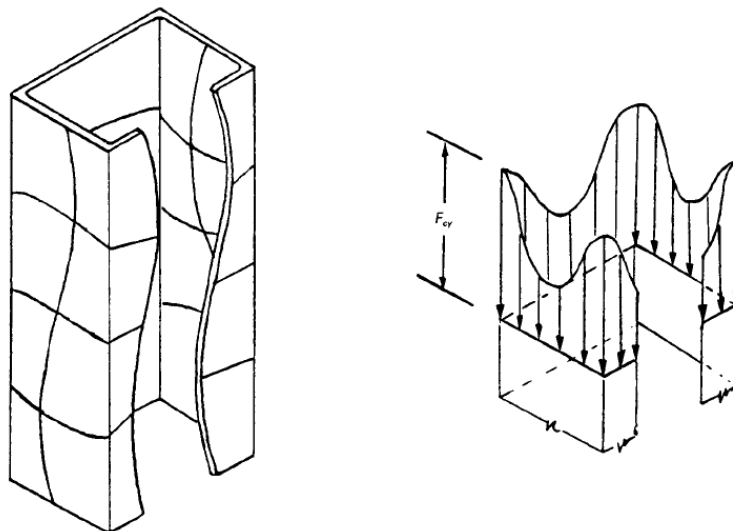
Po vypočtení kritických napětí pro jednotlivé prvky průřezu nosníku je nejmenší z těchto napětí zároveň kritickým napětím *lokální* ztráty stability σ_{krl} pro celý nosník [6]. Nicméně fakt, že u nosníku došlo k *lokální* ztrátě stability (i všech prvků) neznamena ještě selhání nosníku, čemuž bude věnována část 2.3.2 [6].



Obrázek 12 Okrajové podmínky u Z nosníku

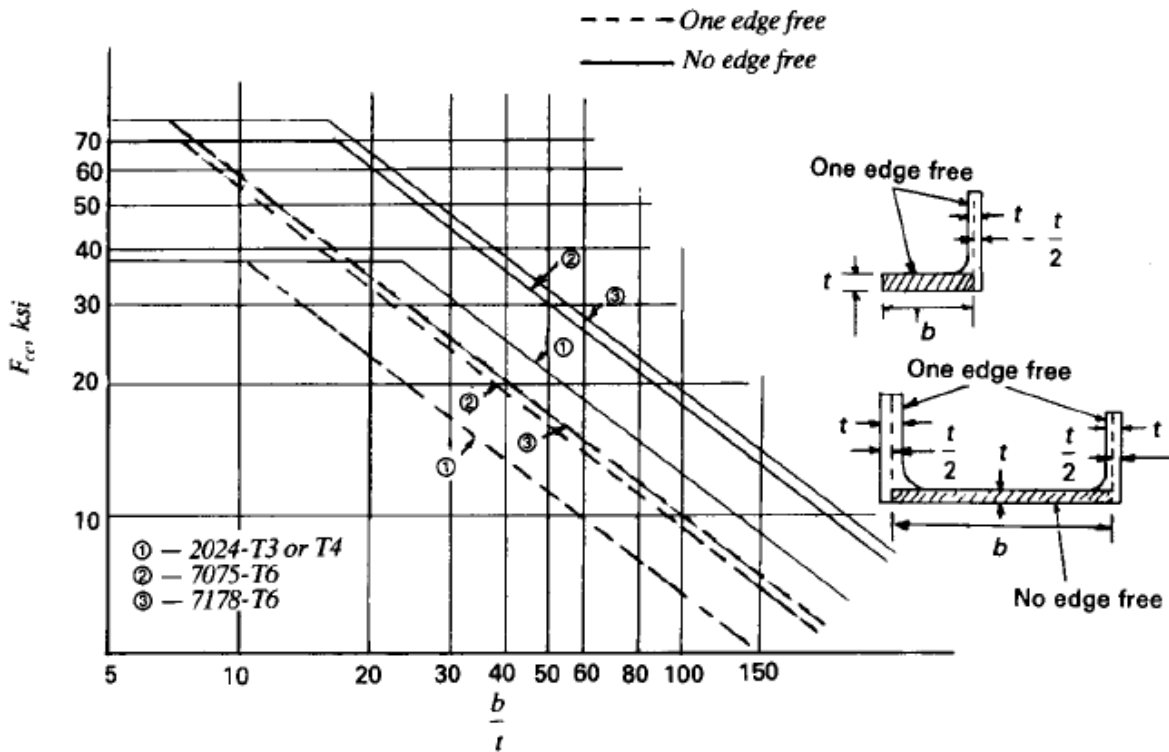
2.3.2 Crippling u tenkostěnného nosníku

Při *lokální* ztrátě stability všech prvků průřezu u tenkostěnného nosníku je nosník potenciálně stále schopný nést určitou mírou další vyšší zatížení [15, 6]. Konkrétně je to způsobeno rohovými oblastmi průřezu, které jsou tužší a zachovávají si vlastnost přejímat další zatížení i v situaci, kdy zbytek průřezu ztratil stabilitu [6]. Oblasti, které ztratily stabilitu zůstávají zatížené svým kritickým napětím, které ztrátu stability způsobilo a další zatěžování způsobuje nárůst napětí v těchto stabilnějších rohových oblastech, viz Obrázek 13 [15, 6]. Napětí v rohových oblastech narůstá, dokud nepřesáhne mez kluzu materiálu, kdy dochází ke ztrátě schopnosti nosníku přenášet další zatížení a brzy následuje selhání nosníku [15]. Tento druh selhání se nazývá *crippling* [15, 6].



Obrázek 13 Rozložení napětí v nosníku po *lokální* ztrátě stability před tím, než nastane *crippling*

Kritické napětí, kdy nastane *crippling* nosníku je možné udávat formou průměrného napětí průřezu, kdy *crippling* nastává. Je nutné nejdřív průřez rozložit na jednotlivé prvky (podobně jako v 2.3.1) a určit kritické napětí pro *crippling* pro každý z nich [15]. Toho se dosahuje s použitím empirických metod a praktickým příkladem může být pak Obrázek 14 ukazující graf kritického napětí pro *crippling* jednotlivých částí průřezu nosníku pro nosník vytvořený tažením za studena z vybraných hliníkových slitin dle okrajových podmínek dané části [15, 6].



Obrázek 14 Kritické napětí pro *crippling* taženého nosníku z hliníkové slitiny

Po získání kritického napětí pro *crippling* jednotlivých částí průřezu nosníku je pak možné vyjádřit průměrné kritické napětí pro *crippling* celého nosníku jako [15, 6]:

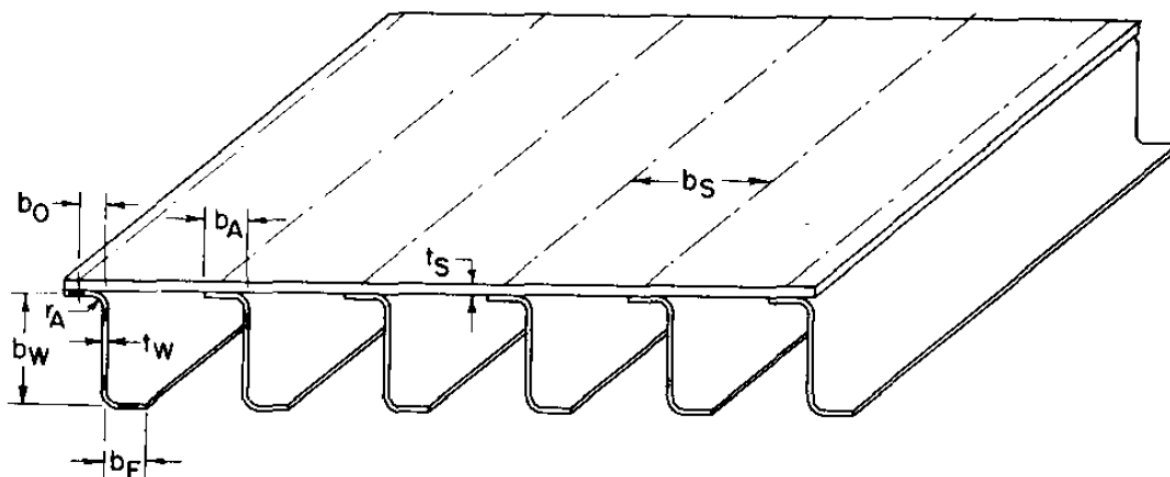
$$\sigma_{krc} = \frac{b_1 t_1 \sigma_{krc1} + b_2 t_2 \sigma_{krc2} + \dots}{b_1 t_1 + b_2 t_2 + \dots} = \frac{\sum b_n t_n \sigma_{krcn}}{\sum b_n t_n} \quad (18)$$

Kde b_n je šířka daného prvku (pásnice, stojina) průřezu nosníku, t_n je jeho tloušťka a σ_{krcn} je kritickým napětím pro *crippling* daného prvku.

2.4 Ztráta stability vyztuženého panelu v tlaku

Vyztužením tenké tlačené stěny/panelu pomocí podélných výztuh („stringer“) dojde de facto k rozdělení panelu na řadu užších panelů. Zvětší se poměr tloušťky panelu ku šířce daného „dílčího panelu“ t/b , což, jak lze vidět z Rovnice 11 nebo Rovnice 12, povede ke zvýšení kritického napětí ztráty stability daného dílčího panelu ve srovnání s kritickým napětím ztráty stability celého nevyztuženého panelu [14]. Alternativně je možné panel vyztuzit i příčnými výztuhami, které panel rozdělí na řadu širokých, ale krátkých panelů, což z výpočetního

hlediska může vést k významnému snížení poměru délky panelu ku jeho šířce a/b a může dojít k významnému zvýšení součinitele k , viz Obrázek 10, rovněž vedoucí k zvýšení hodnoty kritického napětí ztráty stability pro daný dílčí panel [14]. Případně je možné vyztužit panel oběma typy výztuh [14]. Tato diplomová práce se bude dále zabývat ztrátou stability prvního uvedeného typu vyztužení, tedy panelu vyztuženého podélnými výztuhami. Jako příklad takového panelu může sloužit Obrázek 15 ukazující ilustraci panelu vyztuženého podélnými Z nosníky sloužící coby podélné výztuhy („stringer“).



Obrázek 15 Podélně vyztužený panel Z nosníky

2.4.1 Společinná šířka potahu

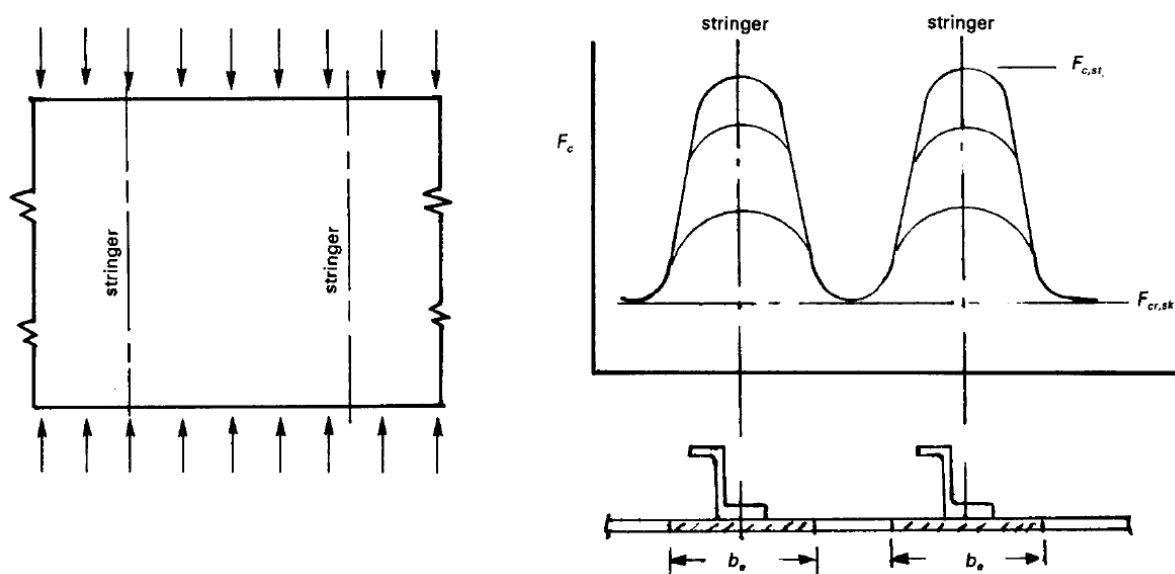
Kritické napětí ztráty stability jednotlivých sekcí panelu (dále nazýván jako potah) lze vypočítat s pomocí Rovnice 11 nebo Rovnice 12. Je běžné, že pro potah dojde ke ztrátě stability dříve než u výztuh, taková situace ovšem není selháním vyztuženého panelu, jelikož jsou výztuhy schopné nést další zatížení, kterému je vyztužený panel vystavován [15, 6]. Zároveň dochází k tomu, že výztuhy potah ve svém okolí stabilizují a umožňují jemu nést další napětí nad rámeček kritického napětí ztráty stability [15, 6]. Obrázek 16 ilustruje rozložení napětí v tomto společinném potahu pro tři různá zatížení přesahující kritické napětí ztráty stability potahu (v obrázku označené jako $F_{cr,sk}$). Nejvyšší z těchto zatížení vede ke vzniku kritického napětí ztráty stability výztuh (v obrázku označené jako $F_{c,st}$), jehož překročení vede k selhání výztuh i celého panelu. Napětí v potahu v polovině vzdálenosti mezi výztuhami nepřesahuje kritické napětí ztráty stability potahu [15]. Pro zjednodušení situace se zavádí efektivní společinná šířka potahu b_e , ve které je napětí rovnoměrné a která poskytuje pevnost ekvivalentní skutečnému rozložení napětí ve společinném potahu, tato efektivní společinná šířka potahu je pro účely výpočtu považována jako součást výztuhy (stringer) [15, 6]. Příklad takové společinné šířky potahu a příslušného rozložení napětí poskytuje Obrázek 17. Napětí v efektivní společinné šířce potahu je shodné s napětím ve výztuhách [15, 6]. Při následném pohledu na Obrázek 16 je rovněž zřejmé, že při zvyšování napětí nad rámeček kritického napětí ztráty stability potahu se bude efektivní společinná šířka b_e zmenšovat [2].

Spolučinnou šířku b_e pro kritické napětí podélné výztuhy σ_{krst} lze vyjádřit pomocí vztahu podobného Rovnici 12 pro kritické napětí ztráty stability tlačného panelu [15, 6]:

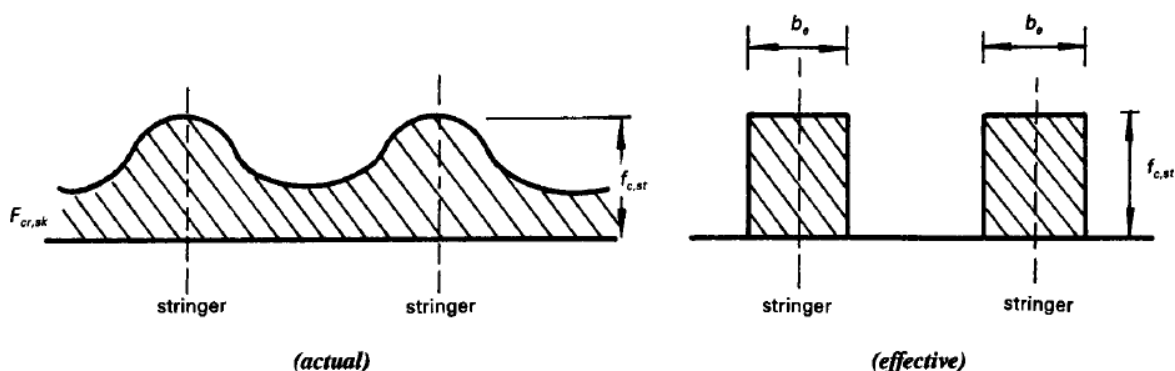
$$\sigma_{krst} = K_c E \left(\frac{t}{b_e} \right)^2 \quad (19)$$

Kde K_c je součinitel daný uložením potahu. Spolučinná šířka b_e pro kritické napětí podélné výztuhy lze pak vyjádřit jako:

$$b_e = t \left(\sqrt{\frac{K_c E}{\sigma_{krst}}} \right) \quad (20)$$



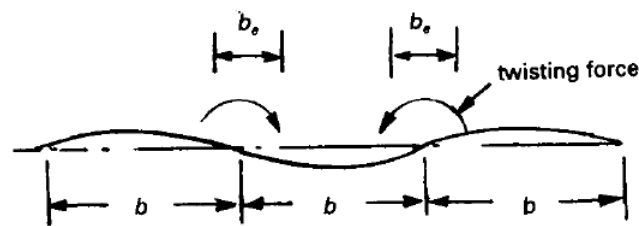
Obrázek 16 Rozložení zatížení u podélně vyztuženého panelu



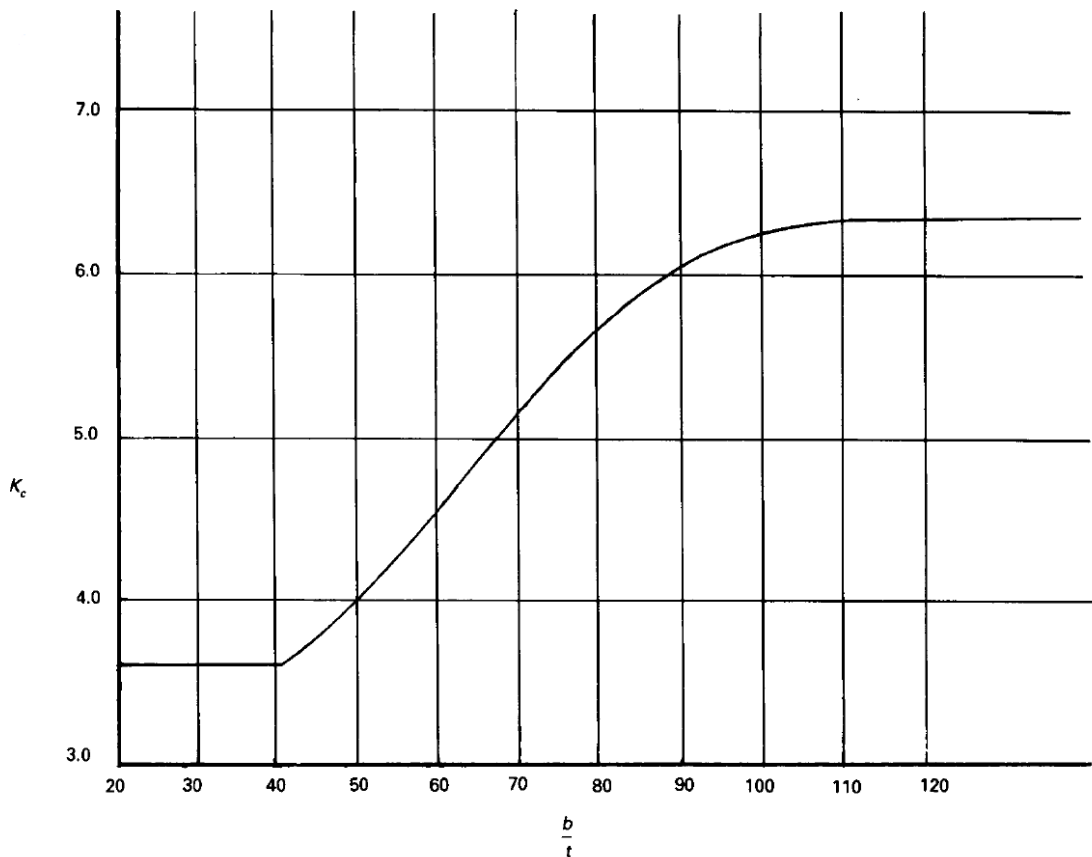
Obrázek 17 Efektivní spolučinná šířka potahu z hlediska rozložení napětí

Pro určení součinitele K_c je nejdříve nutné poznamenat, že při ztrátě stability potahu působí zvlněný potah na podélnou výztuhu kroutícím momentem, viz Obrázek 18 [15]. Přičemž směr

tohoto kroutícího momentu se v pravidelných intervalech podél výztuhy otáčí při změně směru vyboulení potahu a z hlediska pohledu na podélnou výztuhu jako celek se tyto momenty vzájemně vykompenzují [15]. Pro široký tenký panel je tuhost výztuh v krutu v poměru vůči těmto kroutícím momentům velká a uložení potahu mezi výztuhami můžeme považovat za vetknutí a volíme odpovídající součinitel K_c [15]. Pro úzkou část potahu s větší tloušťkou bude docházet při ztrátě stability k vyvolání větších kroutících momentů v poměru ku tuhosti v krutu výztuh a bude docházet k významnějšímu krutu výztuh. Za takové situace se na uložení dané sekce potahu pohlíží jako na kloubové s odpovídajícím součinitelem K_c . Niu v [15] připisuje první situaci uložení vetknutím pro sekce potahu s poměrem šířky ku tloušťce alespoň $b/t = 110$ a udává součinitel $K_c = 6,32$. Kloubové uložení udává pro sekce potahu s poměrem šířky ku tloušťce do $b/t = 40$ a udává součinitel $K_c = 3,62$. Pro poměry šířky ku tloušťce mezi těmito hodnotami udává pozvolný přechod, který ukazuje Obrázek 19.

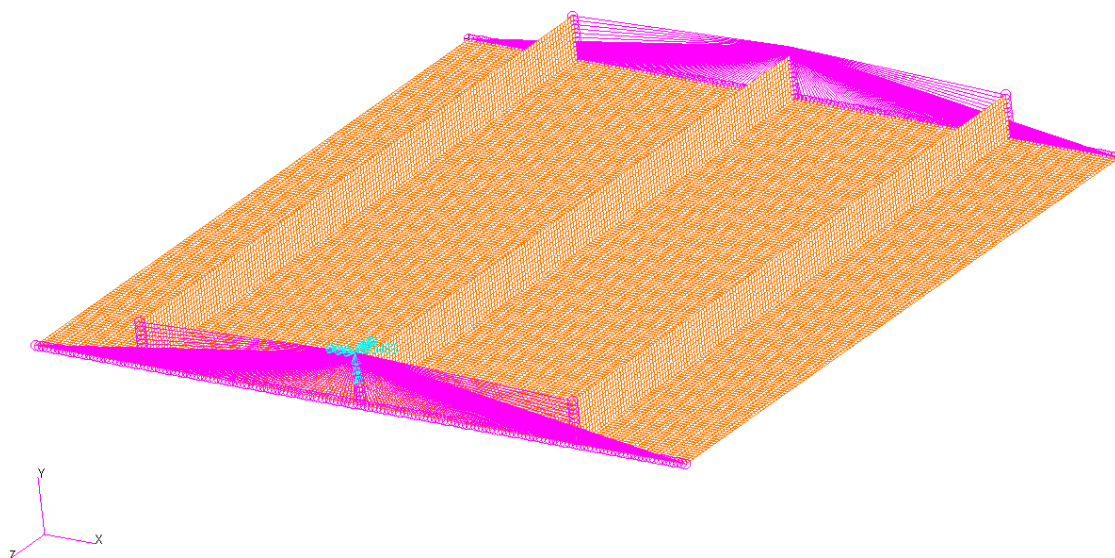


Obrázek 18 Krut podélných výztuh v důsledku ztráty stability potahu



Obrázek 19 Hodnota součinitele K_c v závislosti na poměru šířky sekce potahu b vůči tloušťce t

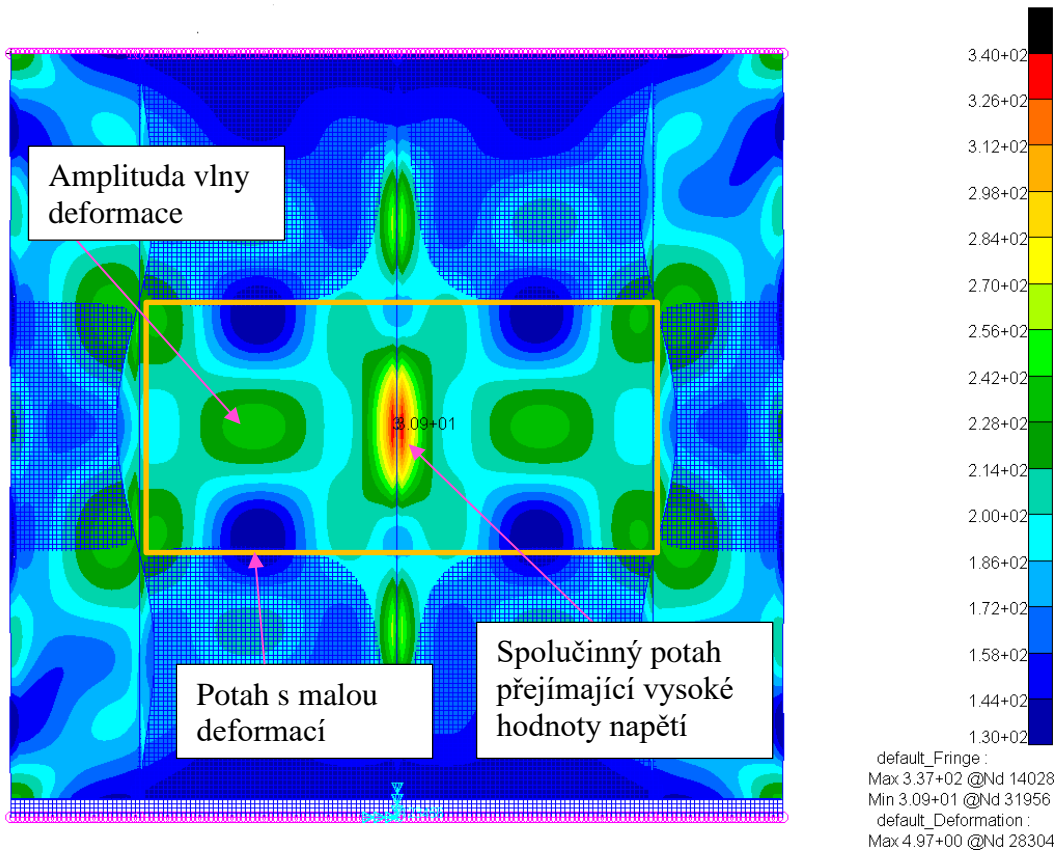
Obrázek 20 ukazuje MKP model integrálního panelu z hliníkové slitiny tvořený 2D elementy typu PSHELL o velikosti hrany cca 2,9 mm, model je jednostranně zatěžovaný deformačně tlakem, přičemž na straně zatížení a protější straně je vetknutý s použitím MPC RBE2 prvků (na obrázku růžově, zatěžování probíhá ze strany s tyrkysovými symboly). Výpočet je prováděn pomocí nelineární sekvence řešení SOL 106 o standardních 100 krocích, kdy je zatížení aplikováno. Detailnější popis podobných MKP modelů panelu dále používaných ve výpočetní části této diplomové práce je uveden v 4.1 a 4.2.



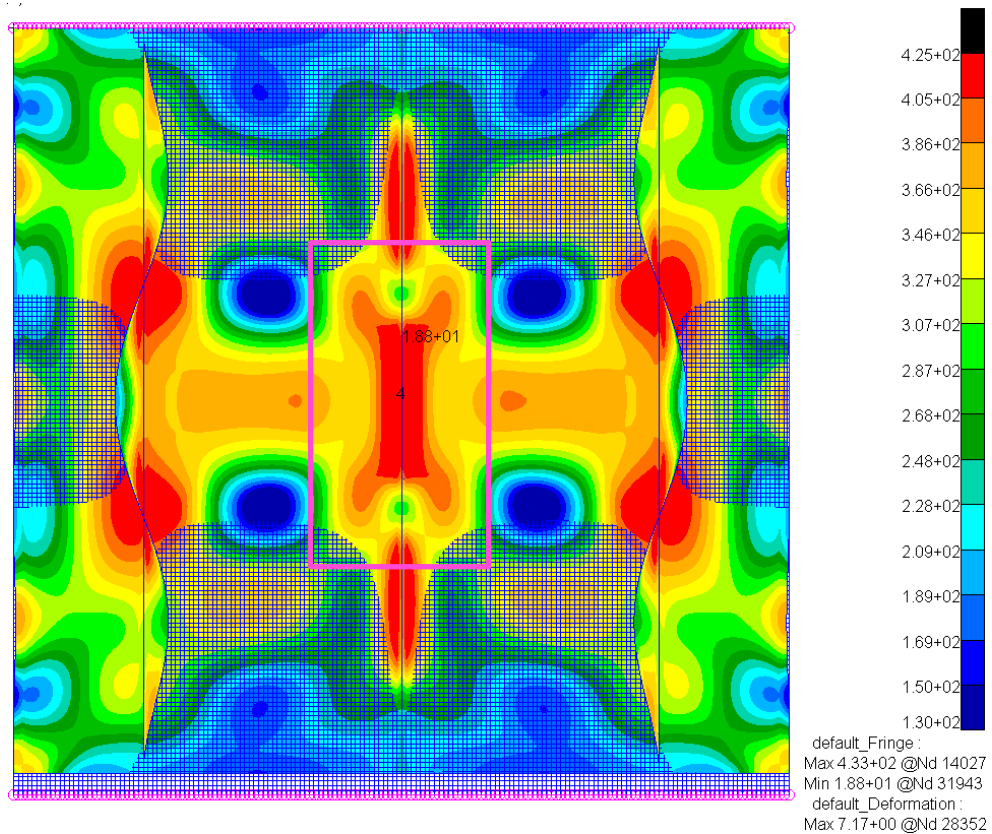
Obrázek 20 MKP model panelu zatěžovaného tlakem

Obrázek 21 a Obrázek 22 zobrazují pohled na panel v rovině XZ s vykreslením redukovaného napětí dle teorie HMH. Obrázek 21 zobrazuje situace krátce po ztrátě stability potahu a Obrázek 22 zobrazuje situaci po deformačním zatížení o 174 % deformačního zatížení, kdy došlo ke ztrátě stability potahu. Pro ilustraci spolučinné šířky potahu je dobré se zaměřit na oblast zvýrazněnou oranžovým rámečkem (Obrázek 21), přesněji na potah v blízkosti integrální výztuhy nacházející se uprostřed panelu. Lze pozorovat vysoké hodnoty napětí v potahu v blízkosti centrální výztuhy (Obrázek 22 nejvýznamnější oblast zvýrazňuje růžovým rámečkem). Je důležité dodat, že oba obrázky mají různou horní hodnotu stupnice, spodní hodnota je stejná a odpovídá hodnotě blízké hodnotě zatížení při ztrátě stability potahu.

Z obrázků lze pak dále vidět, že mezi centrální výztuhou a vedlejšími výztuhami je v oblasti, kde se nachází amplituda deformace zvlnění, napětí přesahující hodnoty blízké původní ztrátě stability potahu. To je zřejmě způsobeno faktem, že v této oblasti je významná deformace a s tím spjatý ohybový moment vyvolaný tlakem. Lze naopak vidět, že v částech, kde vlnění potahu vyvolává pouze malé deformace, je napětí blízké tomu, kdy došlo ke ztrátě stability potahu. Přičemž při pohledu na Obrázek 22 je vidět, že se napětí v téhle oblasti příliš nezvyšuje. Zvlněný potah mezi výztuhami tedy není schopný přejímat další významné tlakové zatížení, v souladu s očekáváním dle poznatků uvedených na předešlých stranách.



Obrázek 21 Napětí v integrálním MKP panelu krátce po ztrátě stability potahu

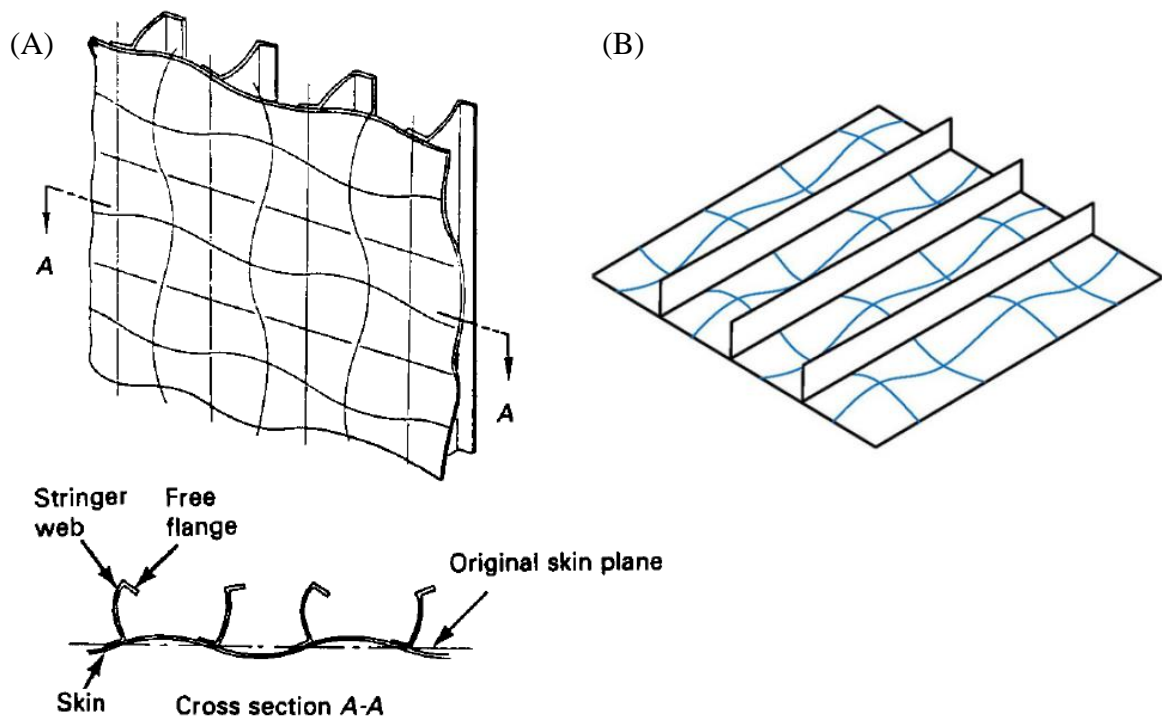


Obrázek 22 Napětí v integrálním MKP panelu po dalším zatěžování

2.4.2 Počáteční zvlnění

Od této části budou uvedeny hlavní druhy ztráty stability, se kterými je možné se setkat u tlakem zatíženého vyztuženého panelu.

Prvním druhem je počáteční zvlnění (initial buckling / skin buckling), kdy dochází k prvotní ztrátě stability zpravidla potahu mezi výztuhami, kdy dojde k jeho zvlnění podobné Eulerovské ztrátě vzpěrné stability daných sekcí potahu [15]. Délky půlvlny odpovídá vzdálenosti mezi výztuhami. Zároveň dochází k určité míře vlnění stojin výztuh a vychylování volných pásnic vlivem vznikajících kroutících momentů [15]. V případě některých konfigurací vyztužených panelů je možné, že zvlnění výztuh bude vyvolávat větší deformaci, než zvlněný potah a počáteční zvlnění panelu pak bude mít více charakter torzní ztráty stability, případně lokální ztráty stability [15]. Obrázek 23 ukazuje ilustraci počátečního zvlnění panelu, v případě (B) bez významného vlnění výztuh.

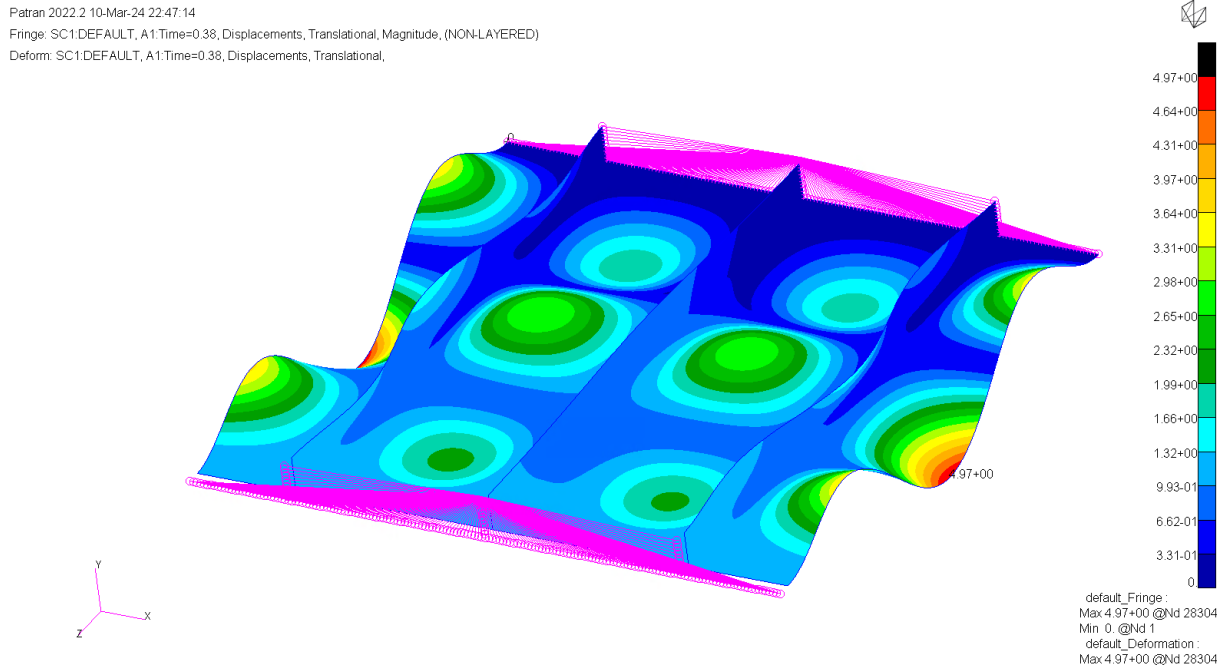


Obrázek 23 Počáteční zvlnění (Initial buckling) vyztuženého panelu

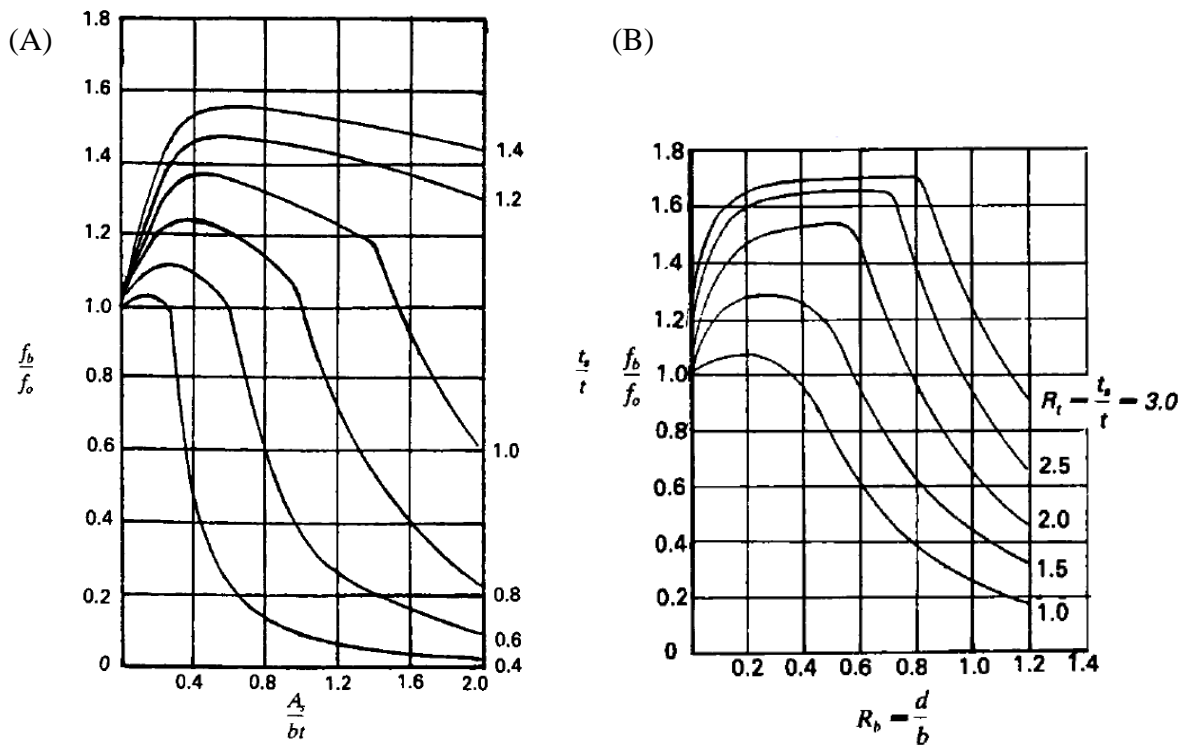
Obrázek 24 ukazuje deformaci MKP modelu integrálního panelu, kterému se věnovaly předešlé dvě strany, krátce po počátečním zvlnění potahu, přičemž pro snadnější viditelnost jsou deformace zobrazeny s měřítkem 10:1 vůči jejich skutečné velikosti. Při pohledu na krajní výztuhy lze vidět jejich drobné vlnění v důsledku kroutících momentů způsobených zvlněným potahem.

Obrázek 25 (A) ukazuje příklad toho, jak může vypadat vývoj kritického napětí počátečního zvlnění u rovného panelu vyztuženého připevněnými Z nosníky pro změny některých parametrů panelu [15]. Kritické napětí počátečního zvlnění je v grafu označované jako f_b a udávané na svislé ose grafu v poměru ku kritickému napětí počátečního zvlnění stejné sekce nevyztuženého potahu f_0 . Na vodorovné ose je pak poměr plochy průřezu výztuhy A_s ku součinu

tloušťky potahu t a rozestupu mezi výztuhami b . V grafu je poté vykresleno několik křivek pro různé poměry tloušťky výztuhy t_s ku tloušťce potahu t .



Obrázek 24 Deformace integrálního MKP panelu zatíženého tlakem krátce po počátečním zvlnění

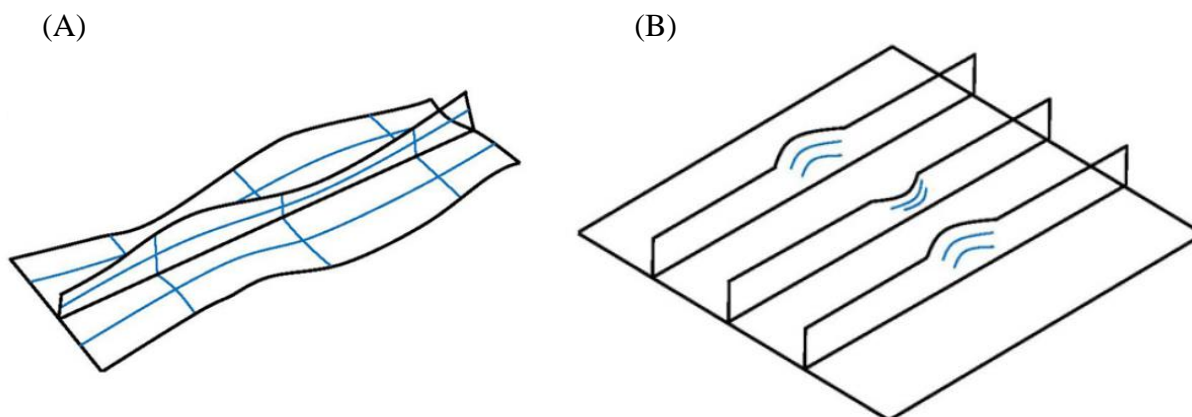


Obrázek 25 Počáteční zvlnění vyztuženého panelu (A) se Z nosníky, (B) s integrálními výztuhami

Obrázek 25 (B) ukazuje příklad toho, jak může vypadat vývoj kritického napětí počátečního zvlnění u rovného integrálního panelu s výztuhami bez pásnic (podobný příkladu, který ukazuje Obrázek 20) při změně některých parametrů panelu [15]. Svislá osa udává opět poměr kritického napětí počátečního zvlnění vyztuženého panelu f_b a nevyztuženého potahu f_o . Na vodorovné ose je poměr výšky výztuh d a rozestupu mezi výztuhami b . Opět je vykresleno několik křivek pro různé poměry tloušťky výztuh t_s a tloušťky potahu t . Lze pozorovat, že pro danou konfiguraci vede zvyšování tloušťky výztuh t_s při zachování ostatních parametrů i k vyššímu kritickému napětí počátečního zvlnění. Zároveň v případě zachování ostatních parametrů a zvyšování výšky výztuh d dochází po určitém zvýšení postupně i k poklesu kritického napětí počátečního zvlnění.

2.4.3 Lokální nestabilita

Dalším možným druhem ztráty stability je lokální nestabilita, která může mít například formu, kterou ukazuje Obrázek 26 (A), kdy dochází k výraznému zvlnění stojiny výztuhy, vedoucí k následnému kolapsu panelu [16]. Obrázek 26 (B) zobrazuje variantu, kdy dochází k lokální torzní ztrátě stability stojiny potahu, tzv. *tripping* [24, 16]. Tento druh ztráty stability je možné též považovat za druh torzní ztráty stability.

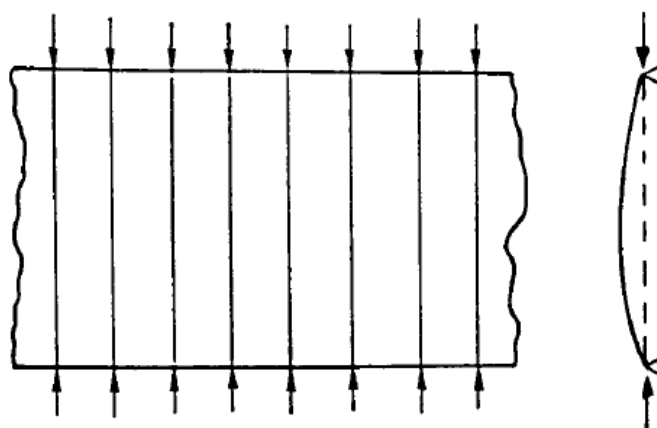


Obrázek 26 (A) Lokální ztráta stability stojiny výztuhy (B) Torzní lokální ztráta stability stojiny výztuhy

2.4.4 Ztráta vzpěrné stability celého panelu

Jedna z variant ztráty stability vyztuženého panelu je jeho celková (Eulerovská) ztráta stability, kdy se celý vyztužený panel chová podobně, jako tlakem zatížený nosník při celkové ztrátě stability, s půlvlnou o velikosti odpovídající délce panelu [15]. Ilustraci poskytuje Obrázek 27. Součástí tohoto typu ztráty stabilit bývá i určitá míra kroucení výztuh [15].

Obrázek 28 ukazuje deformaci MKP panelu, zmíněného již na předchozích stranách, při situaci, kdy navyšování deformačního zatěžování po počátečním zvlnění vedlo k jeho celkové ztrátě stability.

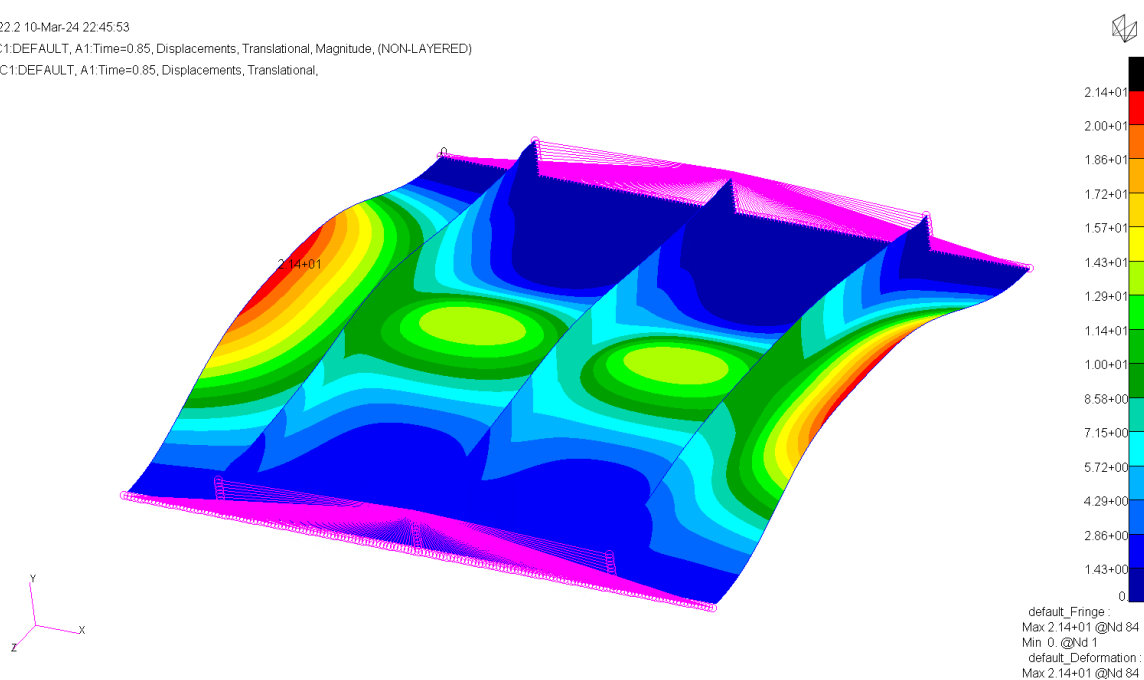


Obrázek 27 Ztráta vzpěrné stability celého panelu

Patran 2022.2 10-Mar-24 22:45:53

Fringe: SC1.DEFAULT, A1:Time=0.85, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

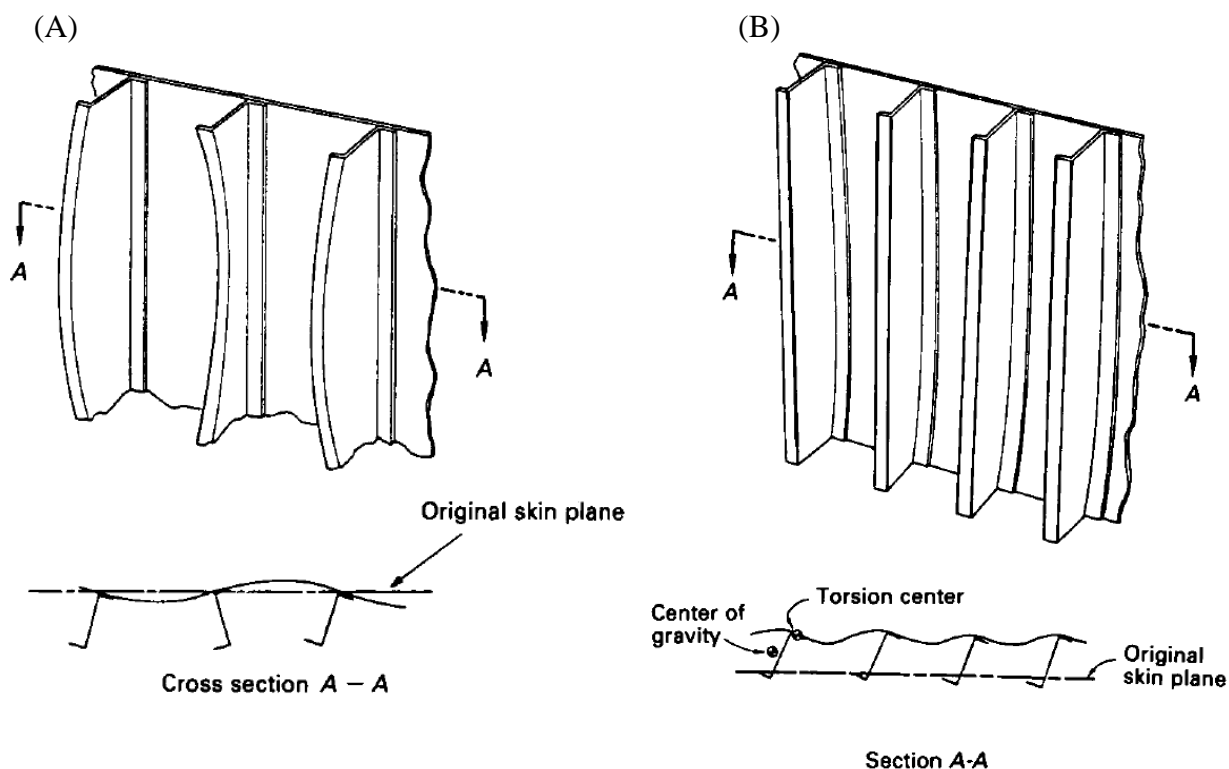
Deform: SC1.DEFAULT, A1:Time=0.85, Displacements, Translational,



Obrázek 28 Deformace integrálního MKP panelu zatíženého tlakem po ztrátě vzpěrné stability

2.4.5 Torzní ztráta stability

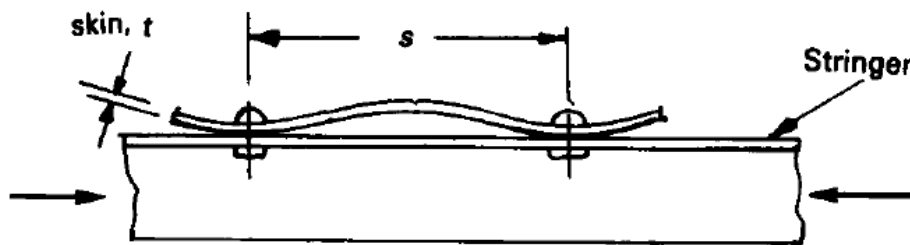
Při torzní ztrátě stability dochází k rotaci výztuhy kolem podélné osy v rovině potahu, zároveň dochází k menším deformacím okolního potahu a k určitým deformacím profilu výztuhy [15]. Deformace výztuh má většinou délku půlvlny o rozměru řádově odpovídajícím trojnásobku rozteče výztuh [15]. Příkladem torzní ztráty stability vyztuženého panelu může být Obrázek 29 (A). Obrázek 29 (B) poté ukazuje kombinaci torzní a celkové ztráty stability vyztuženého panelu.



Obrázek 29 (A) Torzční ztráta stability vyztuženého panelu (B) Kombinace torzní a celkové ztráty stability vyztuženého panelu

2.4.6 Ztráta stability potahu mezi nýtovými spoji (*inter-rivet buckling*)

V případě vyztužených panelů, jejichž výztuhy jsou připevněny nýtováním, případně bodovým svařováním, existuje riziko ztráty stability potahu mezi těmito spoji (anglicky *inter-rivet buckling*) ve formě podobné širokému nosníku či stěně [15, 6]. Dojde-li ke ztrátě stability potahu mezi nýty, není tento dále schopný se podílet na přejímání dalšího zatížení v rámci normální spolupráce funkce potahu v blízkosti výztuhy a případné uvažované efektivní šířky spolupráce potahu nebudou odpovídat realitě [15]. Obrázek 30 ilustruje příklad tohoto typu nestability.



Obrázek 30 Ztráta stability potahu mezi nýtovými spoji (*inter-rivet buckling*)

V souladu s Rovnicí 12 lze kritické napětí σ_{krii} pro ztrátu stability potahu mezi nýtovými spoji v elastické oblasti při uvažování panelu s volnými nezátíženými hranami určit jako:

$$\sigma_{krir} = 0,9 \cdot c \cdot E \left(\frac{t}{s} \right)^2 \quad (21)$$

Kdy s je rozteč mezi sousedními nýty, kterými je výztuha (*stringer*) připevněna k panelu a c je součinitel daný typem nýtu, hodnoty udává Tabulka 1.

Tabulka 1 Hodnoty součinitele typu nýtu c pro různé druhy nýtů (hodnoty převzaté z [15, 6])

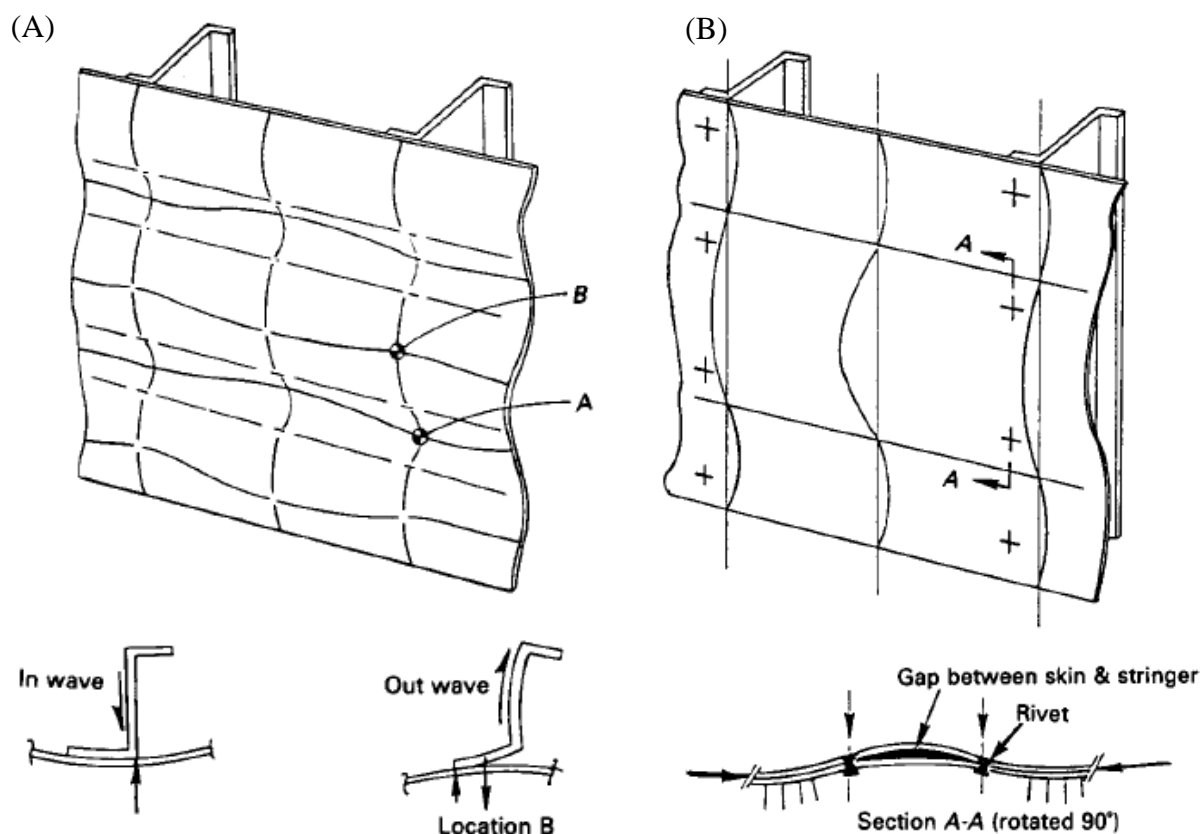
Typ spoje	c [-]
Nýty se zapuštěnou hlavou	1,0
Nýty s plochou kulovou hlavou	3,0
Bodové svařování	3,5
Nýty s půlkulovou hlavou	4,0

Snížením rozteče s mezi nýty (a tedy použitím více nýtů) lze zvýšit kritické napětí σ_{krir} pro ztrátu stability potahu mezi nýtovými spoji, přičemž rozteč lze prakticky volit tak, aby následné kritické napětí σ_{krir} bylo větší nebo rovno kritickému napětí σ_{kre} , kdy nastane ve výztuze *crippling* [15]. Nastane-li ztráta stability potahu mezi nýtovými spoji před selháním výztuh, lze očekávat, že během následného dalšího zatěžování výztuha je daná část potahu schopna „držet“ zatížení odpovídající jejímu kritickému napětí σ_{krir} [15].

2.4.7 Wrinkling

Wrinkling je typ ztráty stability podobný ztrátě stability potahu mezi nýtovými spoji (*inter-rivet buckling*), kde rovněž dochází ke ztrátě stability potahu, nicméně v předchozím případě docházelo k vlnění pouze potahu a nedocházelo k významným deformacím výztuh [15, 6]. V případě, kdy nastává *wrinkling* může docházet i k významné deformaci pásnice výztuha, která je k potahu připevněná, jejíž deformace poté působí napětím i na stojinu výztuha [6]. Vzniku tomuto druhu ztráty stability je možné zamezit umístěním nýtových spojů co nejbližší stojině výztuh [15].

Obrázek 31 (A) ukazuje příklad panelu, kde nastal *wrinkling* a Obrázek 31 (B) ukazuje příklad panelu, kde nastala ztráta stability potahu mezi nýtovými spoji (*inter-rivet buckling*) a zároveň *wrinkling*.

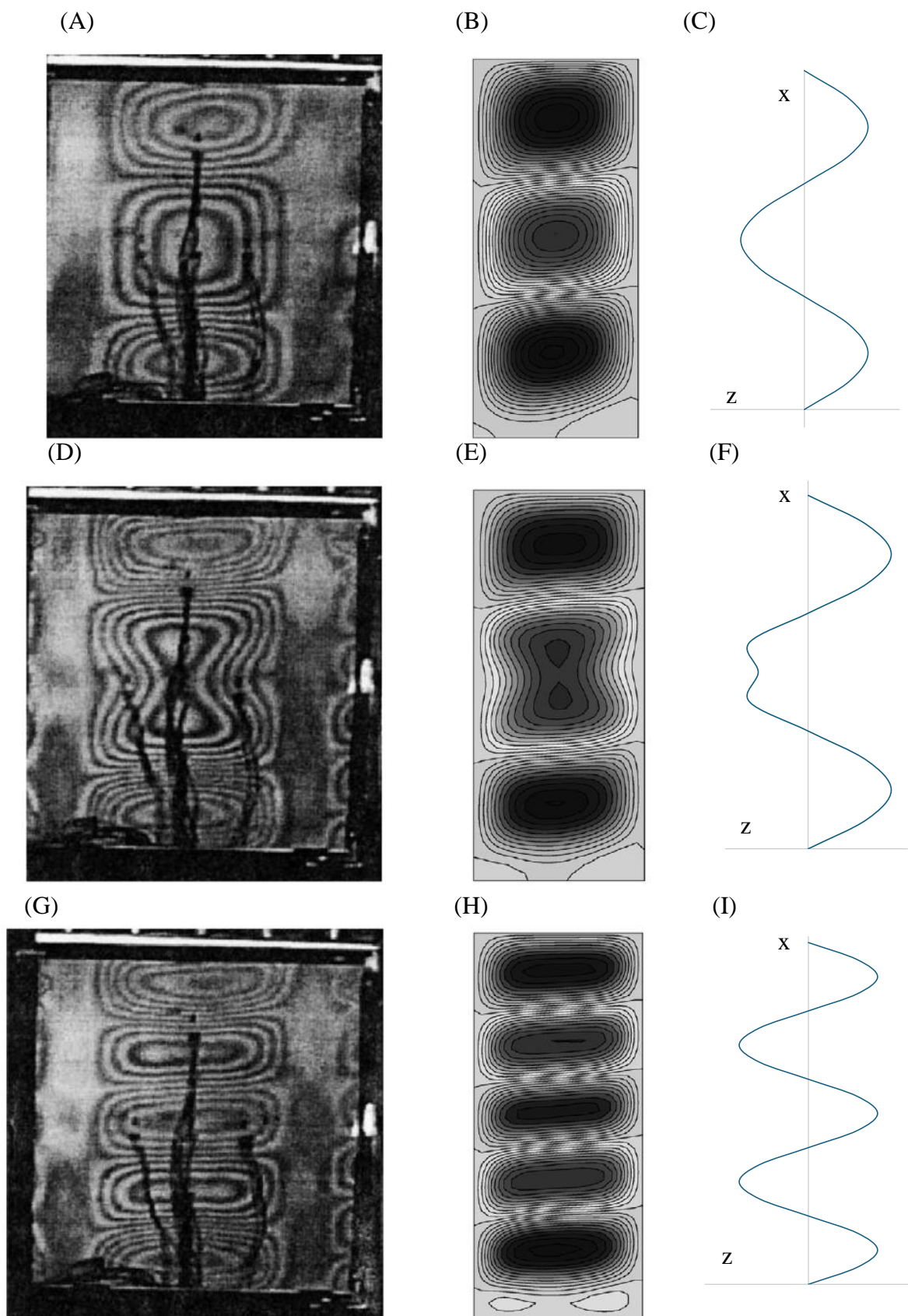


Obrázek 31 (A) *Wrinkling* u vyztuženého panelu (B) *Wrinkling* a *inter-rivet buckling* u vyztuženého panelu

2.4.8 Mode Jumping

V této podkapitole bude krátce pojednáno o tzv. *Mode Jumping*. V 2.2 bylo zmíněno, že součinitel vystupující ve vztahu pro určení kritického napětí tlakem zatížené stěny σ_{kr} dle Rovnice 11 je různý dle uvažovaného počtu půl vln zvlnění panelu. Může se stát, že po úvodním zvlnění panelu a dalším zatěžování dojde ke změně původního módu zvlnění (počtu půl vln) na jiný (s jiným počtem půl vln) [30].

Obrázek 32 ukazuje příklad tohoto jevu. (A), (D) a (G) zobrazují vyztužený panel podrobený experimentu zmíněném v [30]. (B), (E) a (H) ukazují MKP simulaci daného panelu provedenou v [30]. (C), (F) a (I) ukazují autorem této diplomové práce vytvořené hrubé ilustrativní nákresy tvaru příslušných deformací v normálovém směru k zmíněným panelům. (A), (B) a (C) zobrazují panel, kde mód zvlnění odpovídá třem půl vlnám. (G), (H) a (I) zobrazují panel za vyššího zatížení, kdy se mód zvlnění změnil na odpovídající pěti půl vlnám. (D), (E), (F) ukazují situaci mezi oběma předchozími stavy, kdy zvyšování zatížení za módu s třemi půl vlnami nutí panel přecházet na skok do módu s pěti půl vlnami.



Obrázek 32 Mode Jumping (A); (D); (G) Panel podroben experimentu, (B); (E); (H) Panel v MKP výpočtu, (C); (F); (I) Hrubá ilustrace deformace v normálovém směru panelu

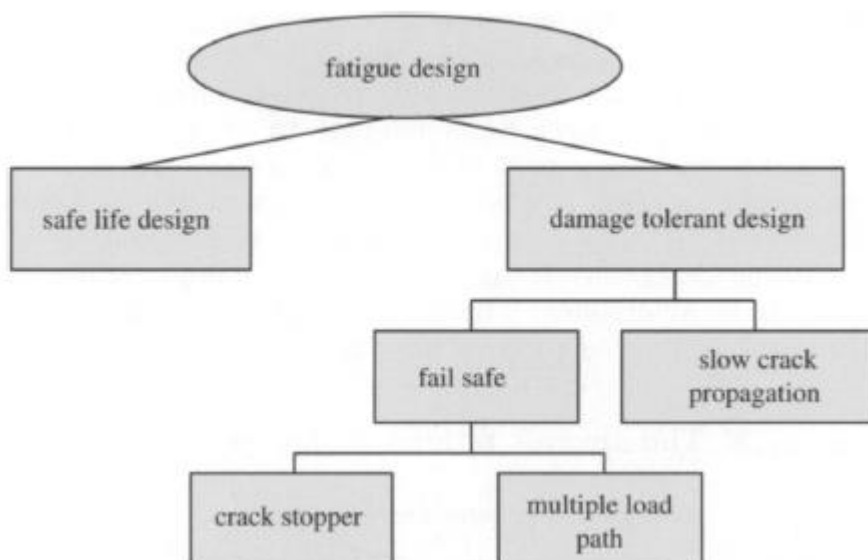
3. PŘEHLED ZASTAVOVAČŮ RŮSTU TRHLINY

3.1 Únava v letectví – Základní konstrukční filozofie

Při zatěžování součásti cyklickým zatížením dochází ke vzniku únavové trhliny. Tahle trhlina je nejdříve iniciována na mikroskopické úrovni a při dalším cyklickém zatěžování roste a dosahuje makroskopické úrovně. Dalším cyklickým zatěžováním a dalším růstem trhliny pak dochází v posledním cyklu únavového života součásti k jejímu selhání [22].

Pro vyrovnání se s fenoménem únavy se v letectví uchytily dvě hlavní konstrukční filozofie komponent (Obrázek 33):

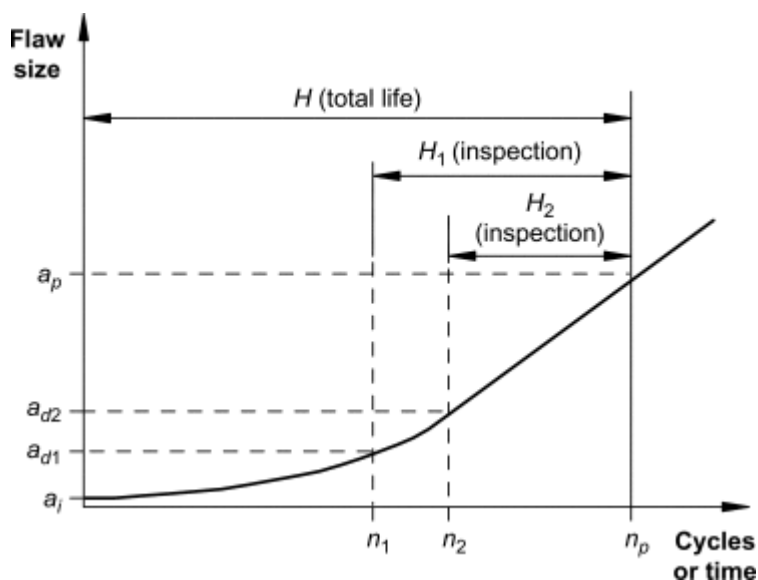
- *Safe Life (Konstrukce s bezpečnou životností)*: Je udána životnost komponentu, nejčastěji v letových hodinách, kdy pravděpodobnost toho, že by v důsledku vzniku a šíření únavového poškození došlo k neschopnosti konstrukce přenášet požadované zatížení, je velice nízká [3, 9]. Při udané životnosti není počítáno s nutností provádět inspekce součásti a součást musí být vyměněna při dosažení předepsané životnosti, bez ohledu na skutečnou přítomnost únavového poškození. [3] V dnešní době se použití této filozofie nedoporučuje, nachází nicméně stále využití u některých komponent, například u podvozků [9, 29].
- *Damage Tolerance (Konstrukce s přípustným poškozením)*: Je připouštěna přítomnost a růst únavové trhliny v konstrukci, nicméně pravidelnými prohlídkami je dosaženo toho, že nedojde ke katastrofickému selhání součásti [22, 12, 29]. Lze také říct, že i při dosažení určité úrovně únavového poškození si konstrukce vydrží dostatečnou zbytkovou pevnost, aby nedošlo ke kritické deformaci [7].



Obrázek 33 Rozdělení konstrukčních přístupů z hlediska únavy v letectví

S ohledem na omezení detekčních schopností trhliny se pro malé délky trhliny zavádí doba do první prohlídky, jelikož prohlídky do této chvíle by pravděpodobně trhlinu neodhalily a byly by jen zbytečným výdajem [29, 19].

Obrázek 34 ukazuje růstovou křivku trhliny, která demonstruje výše napsané. Tedy ukazuje minimální detekovatelnou délku trhliny a_d a kritickou délku trhliny a_p , přičemž dva příklady minimální detekovatelné trhliny a_{d1} a a_{d2} dávají korespondující počet cyklů n_1 a n_2 , od kterých se konají prohlídky po zbytek života součásti (dávající dobu života $H_{1,2}$ (inspection), kdy prohlídky probíhají) [19].



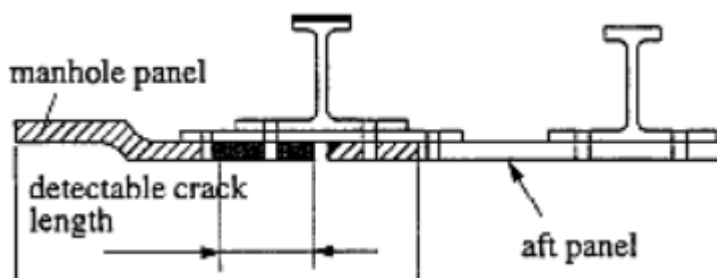
Obrázek 34 Růstová křivka trhliny ukazující časový interval dostupný pro kontrolu trhliny

Při použití metody *Damage Tolerance* není pevně daná doba používání jako u *Safe Life*, nicméně je nutné experimentálně stanovit a prokázat tzv. *Limit of Validity (LOV)*, udávající dobu, kdy je prokázáno, že v konstrukci nedojde k tzv. *vícečetnému poškození (Widespread Fatigue Damage, WFD)*, což je současná přítomnost vícero únavových trhlin v konstrukci o takové velikosti a hustotě, že konstrukce dále nedisponuje požadovanou zbytkovou pevností [7, 19]. Oproti pevně dané době bezpečného provozu u metody *Safe Life* není *LOV* fixní hodnotou, ale může být dalším zkoušením a přesvědčivými důkazy prodloužen [19]. Což je výhodou této metody.

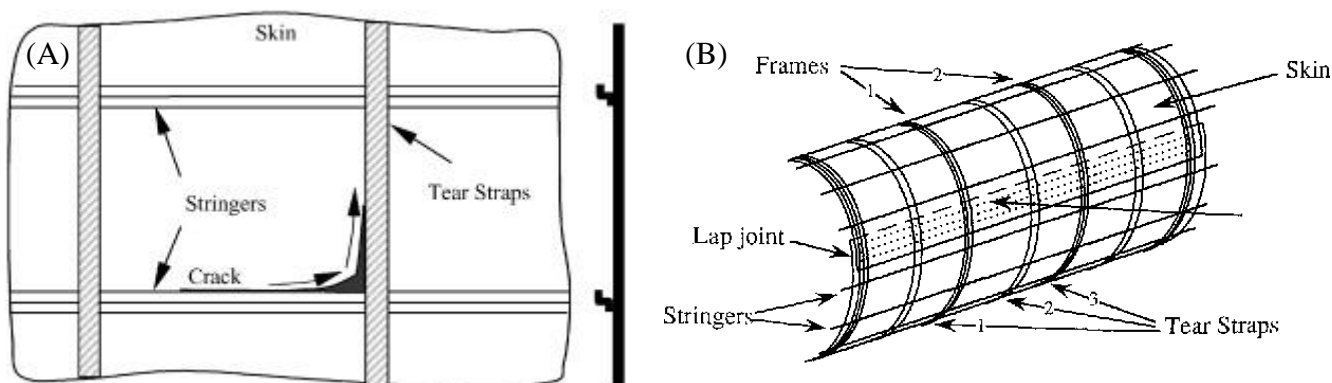
Jak ukazuje i Obrázek 33 metoda *Damage Tolerance* se dále dělí na dva další přístupy v rámci své filozofie:

- *Slow Crack Propagation (Konstrukce s pomalým šířením trhliny)*: Materiál a hladiny zatížení komponentu jsou voleny tak, že nedojde k selhání konstrukce vlivem růstu trhliny během provozu, nikdy tedy nedojde k dosažení kritické délky trhliny a konstrukce (a trhlina) je podrobena prohlídkám [9].
- *Fail Safe (Konstrukce bezpečná i při poruše)*: Jedná se o konstrukci, která si zachovává vyžadovanou zbytkovou pevnost po určitý čas v neopraveném stavu i po selhání, či částečném selhání nějakého stěžejního prvku konstrukce [7]. První varianta, jak toho může být dosaženo, je pomocí přítomnosti více cest pro přenos zatížení (*Multiple load paths*) v dané komponentě, kdy při únavovém selhání jedné cesty je zbytek zatížení přenesen jinými cestami [9]. Příkladem může být Obrázek 35, kde lze vidět konstrukce vyztuženého panelu složená z vícero sekcí. Nebo je možné aplikovat metodu se zastavením trhliny (crack arrest / crack stopper), kdy dojde ke kritickému růstu trhliny, jejíž růst je nicméně při určité délce zastaven

okolní konstrukcí, než dojde k celkovému porušení [A2]. Příklady konstrukcí s přítomnými pásovými konstrukčními prvky pro zastavení rychlého růstu trhliny přezdívanými „Tear Straps“ (rovněž „Crack Stopper“ či „Crack Arrestor“) viz Obrázek 36. V obou případech aplikace *Fail Safe* přístupu je nicméně důležité, aby dané selhání bylo následně při kontrole objeveno a opraveno [9].



Obrázek 35 Příklad konstrukce s násobnou cestou přenosu zatížení (*multiple load path*)



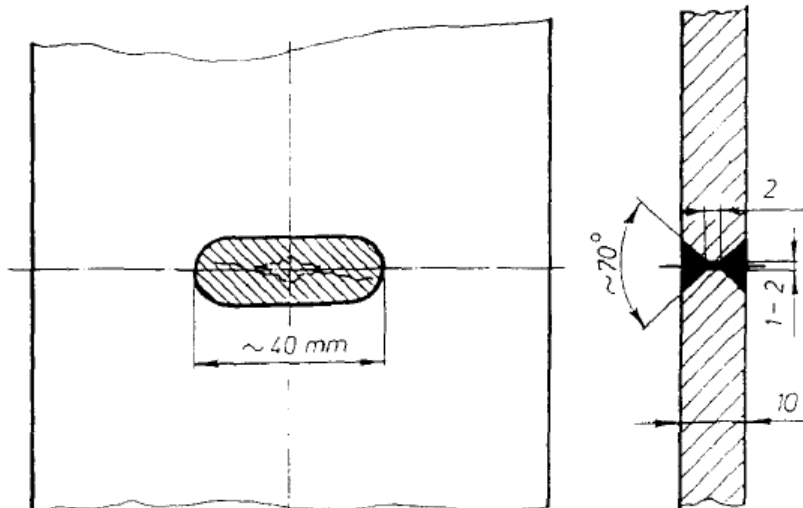
Obrázek 36 (A) Panel vybavený konstrukcí („Tear Straps“) pro aplikaci metody *crack arrest / crack stopper*, (B) Příklad trupu letadla vybavený dodatečnou konstrukcí („Tear Straps“) pro aplikaci metody *crack arrest / crack stopper*

3.2 Zastavovače růstu trhliny

V rámci aplikace filozofie *Damage Tolerance* je žádoucí na konstrukci aplikovat konstrukční prvky, či metody, které povedou ke zpomalení, či zastavení únavové trhliny. Rozlišujeme metody, kdy dochází k opravě konstrukce s přítomnou únavovou trhlinou a metody, kdy se aplikují prvky zlepšující životnost konstrukce ještě před tím, než zahájí provoz.

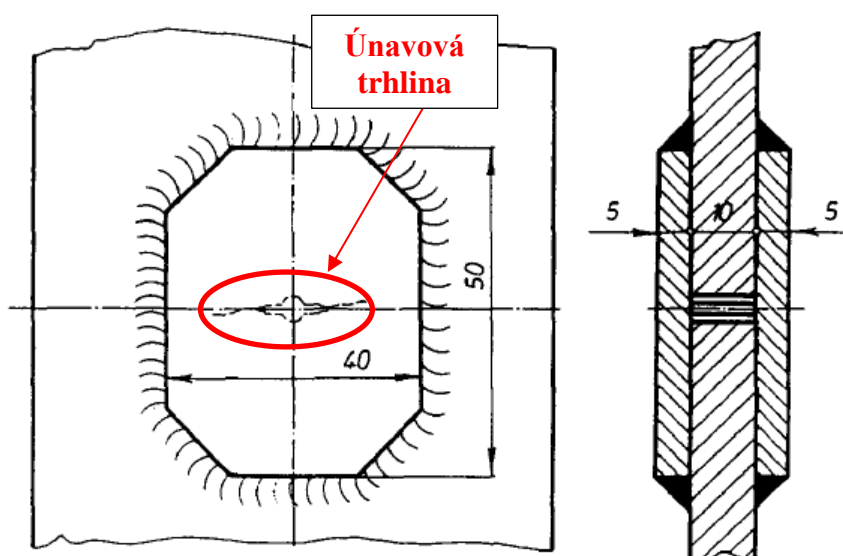
Oprava únavou postižených částí konstrukce spočívá ve zpomalení, či zastavení růstu únavové trhliny. Lze je rozdělit na opravy pomocí snižování *faktoru intenzity napětí* na čele trhliny, opravy zavádějící tlaková zbytková napětí do konstrukce či opravy sloužící ke snížení koncentrace napětí na čele trhliny [23].

Jednou z opravných metod snížení *faktoru intenzity napětí* je opravné svařování (anglicky *Repair welding*) [23, 8], kdy dochází k vybroušení místa s trhlinou a následnému vytvoření svaru pro zaplnění postiženého místa, příklad tohoto schematicky ukazuje Obrázek 37 [8]. Rizikem této metody je, že v závislosti na kvalitě svaru hrozí zavedení svarových vad, jejichž přítomnost může mít negativní vliv na další únavový život konstrukce [8].

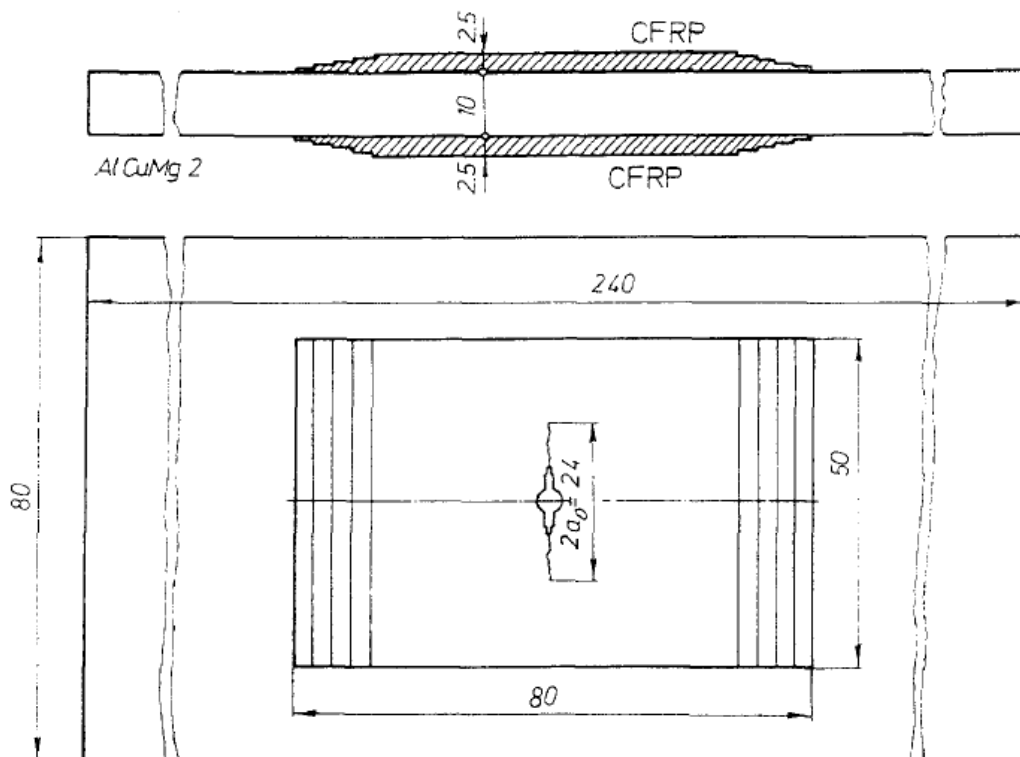


Obrázek 37 Oprava únavové trhliny metodou opravného svařování

Další možnou opravou snižující faktor intenzity napětí je připevnění záplaty na oblast kolem únavové trhliny, ať už se jedná o záplaty kovové (například svařované, připevněné svorníky, nebo přinýtované) či adhezivně připojené kompozitní záplaty [8, 23]. Záplata přebírá část zatížení v místě trhliny, čímž se snižuje i *faktor koncentrace napětí* v místě trhliny (více rozebíráno na str. 42 a 43) [8]. Výhodou adhezivního připojování záplat je, že nejsou zaváděny do konstrukce koncentrátoři napětí v podobě otvorů pro svorníky či nýty a nejsou ani zaváděny potenciální defekty ve formě svarových vad [8, 1]. Nicméně v případě kompozitních záplat s významnými rozdíly v součiniteli teplotní roztažnosti s materiálem opravované konstrukce může docházet při procesu výroby k zavádění tahových zbytkových napětí, která mají z hlediska zpomalování růstu únavové trhliny negativní efekt [1]. Obrázek 38 a Obrázek 43 zobrazují schematické příklady výše uvedené metody oprav.

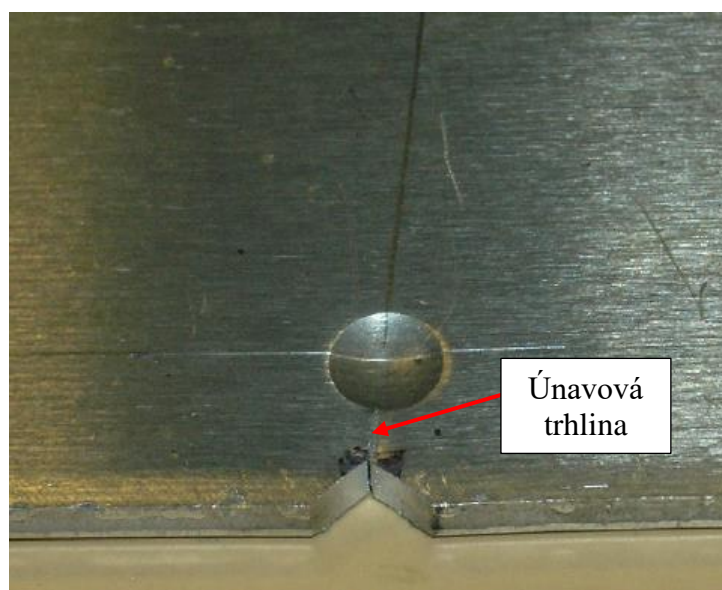


Obrázek 38 Oprava únavové trhliny pomocí oboustranné navařené kovové záplaty (zvýraznění trhliny přidáno autorem diplomové práce)



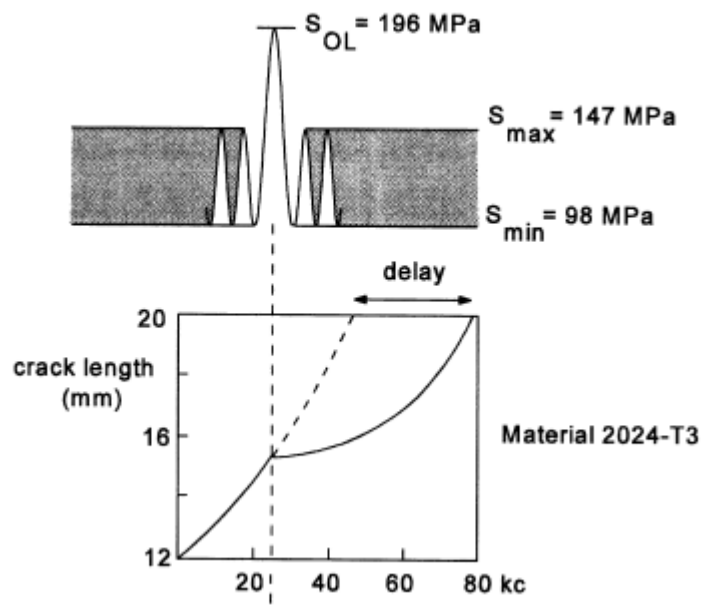
Obrázek 39 Oprava únavové trhliny pomocí oboustranné adhezivně připojené kompozitní záplaty

Příkladem zavedení tlakových zbytkových napětí do konstrukce pro zpomalení růstu trhliny může být metoda indentace, kdy dochází k vytvoření plastické deformace před čelem únavové trhliny pomocí indentoru a vzniklá tlaková zbytková napětí další růst trhliny zpomalují, případně za určitých podmínek další růst mohou i zastavit [20]. Příklad takové indentace ukazuje Obrázek 40.

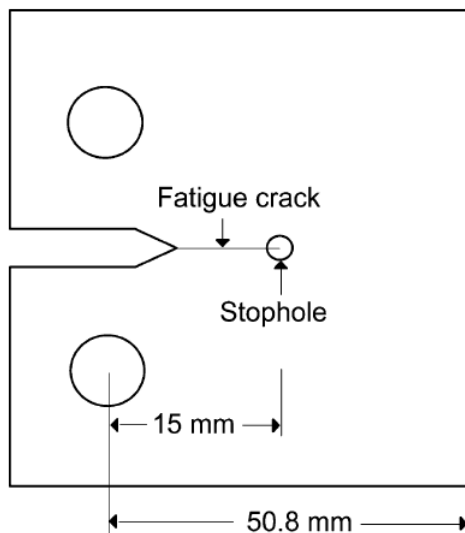


Obrázek 40 Příklad zamezení šíření únavové trhliny metodou indentace (popisek trhliny přidán autorem diplomové práce)

Dalším možným způsobem zavádění tlakových zbytkových napětí do konstrukce je vystavení konstrukce jednomu tahovému zátěžovému půl cyklu se zatížením přesahující běžně uvažované provozní zatížení (jednorázové tahové přetížení), které způsobí sice větší nárůst trhliny než běžný zátěžový cyklus, nicméně zároveň dojde k vytvoření velké plastické zóny na čele trhliny, která na trhlínu působí tlakovým zbytkovým napětím [8, 22]. Obrázek 41 zobrazuje příklad toho, jak může vypadat vliv jednorázové tahové přetížení na rychlost šíření trhliny, kdy S_{OL} je napětíové zatížení při přetížení (*OverLoad*) [22].



Obrázek 41 Vliv jednorázového tahového přetížení na růst trhliny



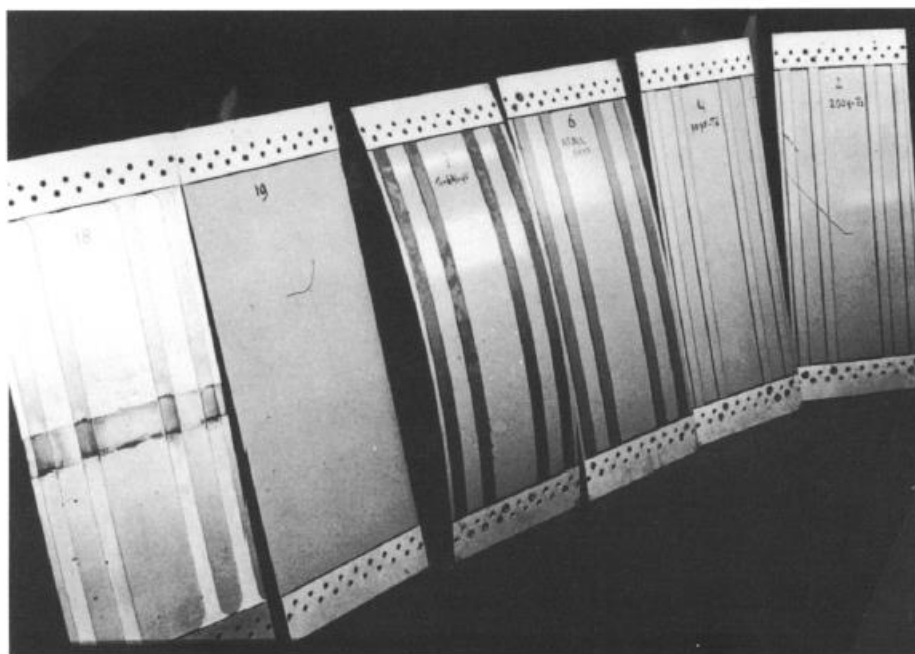
Obrázek 42 Zkušební vzorek s aplikací vyvrtání únavové trhliny

Metodou opravy, kdy dochází k snížení koncentrace napětí na čele trhliny je metoda vyvrtání čela únavové trhliny (stophole / crack arrest hole) [8, 23]. Vyvrtání otvoru na čele trhliny vede k snížení koncentrace napětí, což způsobí zastavení jejího šíření, dokud nedojde k další iniciaci a jejímu opětovnému růstu [23]. Účinnost této metody lze ještě zvýšit při rozšíření otvorů tvářením za studena nebo umístěním čepu s uložením s přesahem, což zavede do konstrukce tlaková zbytková napětí, která oddálí vznik nových trhlin a u vzniklé trhliny zpomalí její růst [8]. Obrázek 42 zobrazuje nákres zkušební vzorku s aplikací metody vyvrtání čela trhliny.

Mimo výše krátce popsané metody opravy konstrukce s únavovou trhlinou je možnost využití speciálních prvků pro zpomalení růstu únavových trhlin, jež jsou přítomny již před uvedením konstrukce do provozu. Využití takových dodatečných prvků se nabízí obzvláště v případě integrálních panelů, které oproti klasičtějším spojovaným konstrukcím postrádají prvky, jež by samy o sobě napomáhaly zpomalování šíření únavových trhlin a rovněž mají omezenější schopnosti *Fail Safe* fungování při šíření trhliny [32, 26, 27]. Vzhledem k větší relevanci s ohledem na téma diplomové práce bude následně po zbytek kapitoly blíže představeno několik typů tohoto přístupu zpomalování únavových trhlin.

3.2.1 Pásové zastavovače růstu trhliny

Jednou z možností zpomalení šíření trhliny prvky v konstrukci je aplikace pásových zastavovačů růstu trhlin (crack stopper bands). Schijve ve svém článku v roce 1990 [21] zkoumal vliv různých materiálů pásových zastavovačů na zpomalení růstu trhliny a taky rozdílnost účinnosti integrálních pásů a pásů k původnímu panelu adhezivně připojených. Dále byla srovnávána účinnost zastavovače adhezivně připojeného a připojeného nýtováním a vliv použitého materiálu zastavovače na jeho účinnost, kdy byla zkoumána hliníková slitina, hybridní laminát *ARALL* a titanová slitina. Obrázek 43 ukazuje fotku Schijveho zkušebních vzorků pásových zastavovačů růstu trhlin a Obrázek 44 je zobrazuje schematicky včetně rozdílu integrálních a připojených pásů.



Obrázek 43 Pásové zastavovače růstu trhlin na zkušebních vzorcích Schijveho

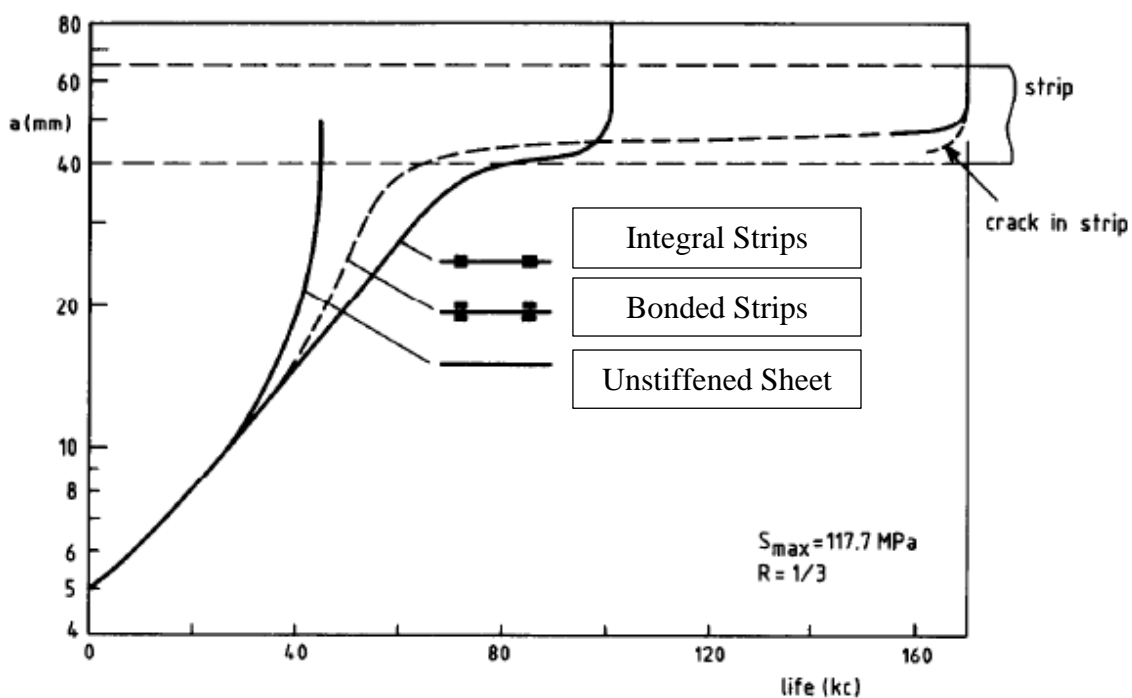
test series	Cross sections of specimens Dimensions in mm , Not to scale	Stiffness ratio (μ)
1		0.286
2		0.555
3		0.25

Obrázek 44 Schéma integrálních i připojených pásových zastavovačů růstu trhlin u Schijveho

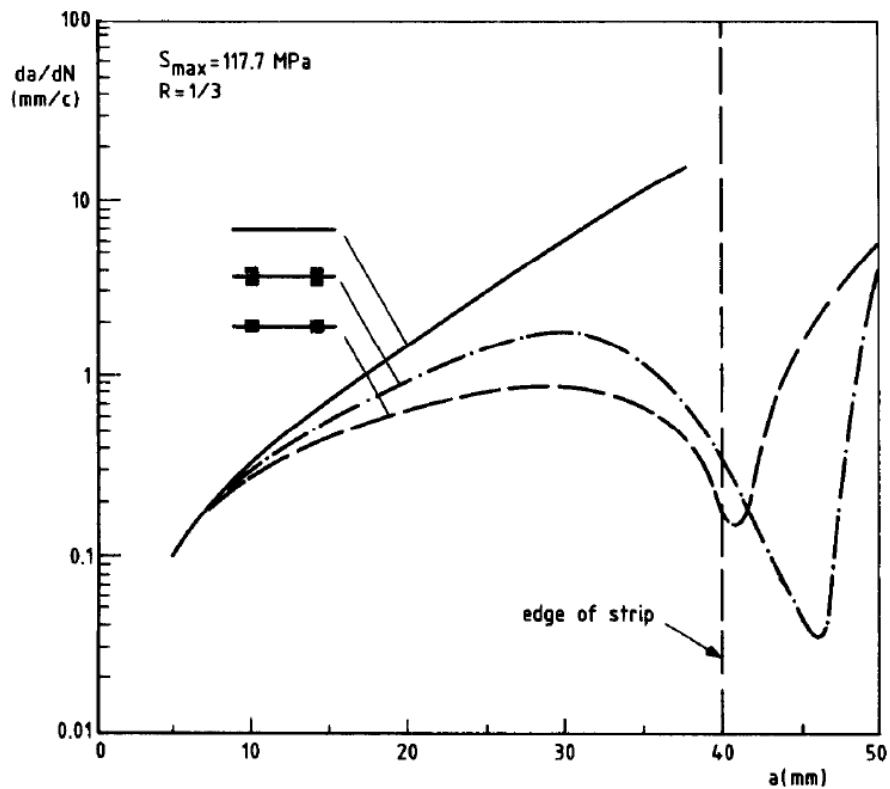
Zajímavým závěrem této práce bylo, že adhezivně připojené pásy poskytují větší životnost než pásy integrální. Trhlina, která proroste v panelu k zastavovači může snadno prorůstat dál do integrálního pásového zastavovače, zatímco u adhezivně připojeného pásu k tomuto nedochází, trhlina pokračuje v růstu v panelu pod zastavovačem, ale neproniká do něj [21]. Únavová trhlina v adhezivně připojeném zastavovači vznikala až při pozdějších fázích experimentu iniciací přímo na zastavovači [21]. Obrázek 45 a Obrázek 46 zobrazují rozdílné chování a rychlost růstu trhliny ve zmíněném experimentu pro adhezivně připojené pásové zastavovače (Bonded Strips), integrální pásové zastavovače (Integral Strips) a pro vzorek bez zastavovačů (Unstiffened Sheet). Rovněž lze vidět, že účinek zastavovače na zpomalení růstu trhliny se při přiblížení trhliny k umístění zastavovače zvyšuje, naopak při větší vzdálenosti trhliny před zastavovačem je jeho efekt na zpomalení růstu omezenější.

Dalším závěrem bylo, že při adhezivním připevnění pásových zastavovačů je dosaženo lepších výsledků na zpomalování šíření trhliny než při připevnění zastavovače nýtováním [21].

Při zkoušení zastavovačů z hliníkové slitiny 2024-T3, titanové slitiny Ti-6Al-4V a hybridního aramidového a hliníkového laminátu ARALL vycházel lepší efekt zpomalování růstu trhliny při použití ARALLu a při použití titanové slitiny [21].



Obrázek 45 Rozdílné chování růstu trhliny pro připojené a integrální pásy

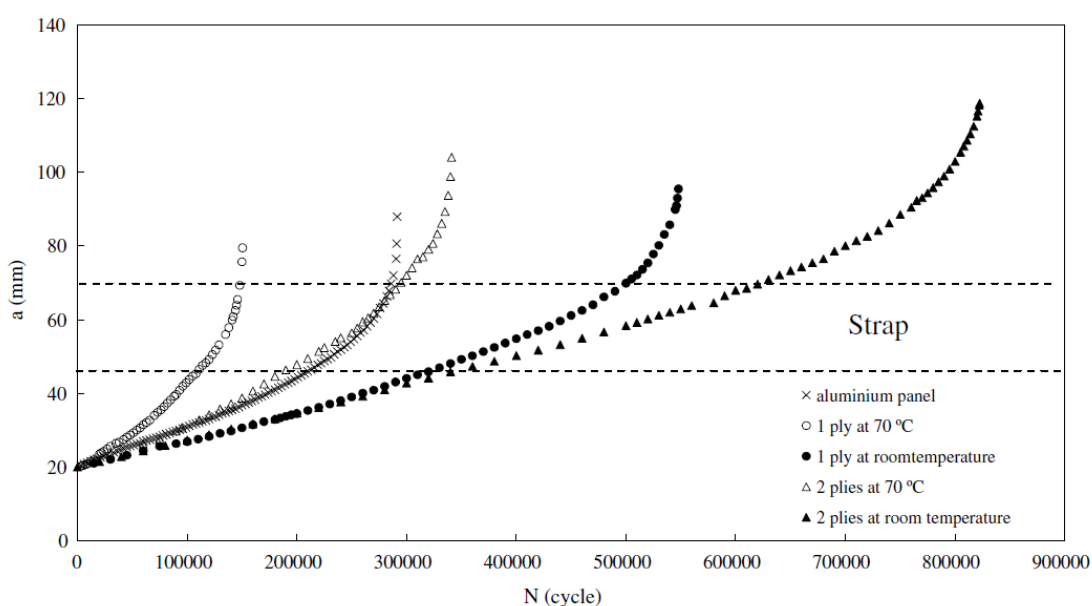


Obrázek 46 Rozdílné rychlosti šíření trhliny pro připojené a integrální pásy

Byť adhezivní připojení zřejmě umožňuje nejlepší výsledky pro zpomalení růstu trhliny [21], můžeme se setkat s významným problémem při jeho aplikaci. Konkrétně se jedná o případ, kdy

při připevňování pásů je adhezivum vytvrzováno při zvýšených teplotách a zároveň jsou pásy zhotoveny z materiálů s významným rozdílem součinitele tepelné roztažnosti oproti materiálu panelu [32, 4]. V takovém případě hrozí vznik nezanedbatelných tahových zbytkových napětí, které napomáhají rychlejšímu růstu únavové trhliny, což snižuje účinnost funkce vlastních zastavovačů růstu trhliny [32, 4]. Dokonce může vzniknout i situace, že taková aplikace zastavovačů by byla z hlediska zvýšení životnosti kontraproduktivní [32].

Obrázek 47 poskytuje ilustraci výše zmíněného problému na příkladu, kdy byl podroben experimentu zkušební vzorek s pásovým zastavovačem růstu trhliny z uhlíko-polymerního kompozitu (CFRP) [32]. Lze vidět, že zatímco vzorky, kde došlo k vytvrzení adheziva za pokojových teplot poskytují výrazné zvýšení životnosti, tak u vzorku s menší tloušťkou zastavovače vytvrzeného za zvýšené teploty 70 °C došlo k poklesu životnosti a u vzorku s větší tloušťkou jen k omezenému nárůstu životnosti [32].



Obrázek 47 Růst únavové trhliny při použití lepeného CFRP zastavovače s různou tloušťkou a teplotami vytvrzení

Pozitivní vliv připevněných pásových zastavovačů je dán dvěma mechanismy [32]. První se projevuje při přiblížení únavové trhliny do blízkosti zastavovače a při následném prorůstání pod něj, kdy zastavovač dané místo lokálně vyztužuje a dochází k přenosu zatížení od natrženého panelu na zastavovač. V panelu poté díky tomuto „ulehčení“ dochází i k poklesu rychlosti šíření trhliny [32, 18]. K druhému efektu dochází v momentě, kdy únavová trhlina kompletně proroste pod zastavovačem. Zastavovač nacházející se za čelem únavové trhliny poskytuje funkční napětí cestou. Zastavovač bude stále tahově zatížený a v oblasti trhliny bude působit silou omezující „otevírání trhliny“ v kolmém směru na její růst, a to povede i k snížení hnací síly trhliny [32, 4, 18], viz Obrázek 48. Tomuto efektu se říká „crack bridging“, neboli přemostění trhliny.

Růst trhliny při cyklickém zatěžování můžeme vyjádřit jako funkci poměru minimálního a maximálního napětí v cyklu R a rozdílu faktoru intenzity napětí při maximálním a minimálním napětí v cyklu ΔK , tedy jako [22]:

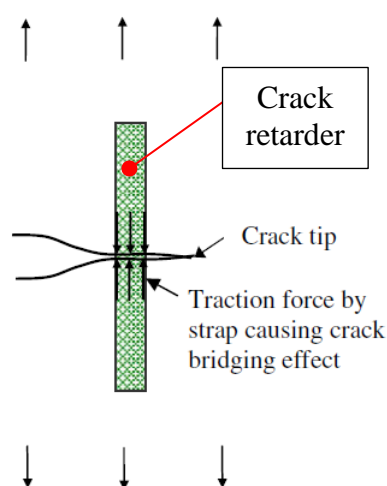
$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (22)$$

Kde a je délka trhliny a N počet cyklů. Vztah pro faktor intenzity napětí je dán jako [22]:

$$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (23)$$

Kdy β je součinitel faktoru intenzity napětí dán geometrií a σ je napětí.

Na výše uvedených vztazích lze oba dříve uvedené mechanismy zpomalení růstu trhliny vysvětlit tak, že v případě prvního mechanismu dochází k snížení napětí σ a druhý mechanismus zase vede k snížení součinitele faktoru intenzity napětí β [4].



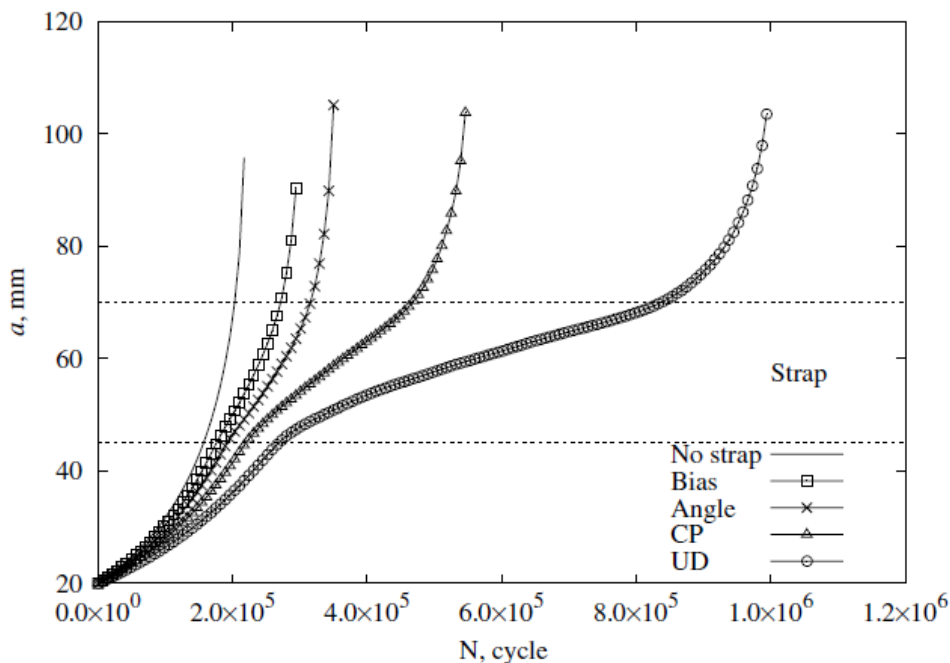
Obrázek 48 Efekt přemostění od připevněného pásového zastavovače (Popisek zastavovače přidán autorem diplomové práce)

Použití adhezivně připevněných zastavovačů růstu trhliny s sebou nese riziko poruchy odlupování (disbond) pásů, které se může s rostoucí délkou únavové trhliny dále šířit, a vede k významnému omezení efektu „přemostění trhliny,“ a tedy i k omezení účinnosti pásového zastavovače [32, 4].

Boscolo, Allegri a Zhang v článku [4] prezentovali pomocí experimentálními daty validovanou simulační metodou výzkum efektivity různých materiálů pásových zastavovačů růstu trhliny při použití pásů stejné hmotnosti. Uvažované materiály byly laminát z uhlíkových vláken a epoxidu *M21/T800*, laminát z S-skelných vláken a epoxidu, slitina titanu a hybridní laminát ze skelných vláken a hliníku *GLARE (Glass Laminated Aluminium Reinforced Epoxy)* [4]. Rovněž srovnávali účinnost různého kladení vrstev při použití uhlíko-epoxydového a sklo-epoxydového kompozitu [4]. Mimo to se výzkum věnoval i vlivu polohy pásových zastavovačů vůči počáteční trhlíně na jejich účinnost a vlivu jejich rozměrů na účinnost posouzených jak podle nárůstu životnosti, tak podle nárůstu životnosti vztaženého na gram přidané hmotnosti oproti panelu bez zastavovačů růstu trhliny [4].

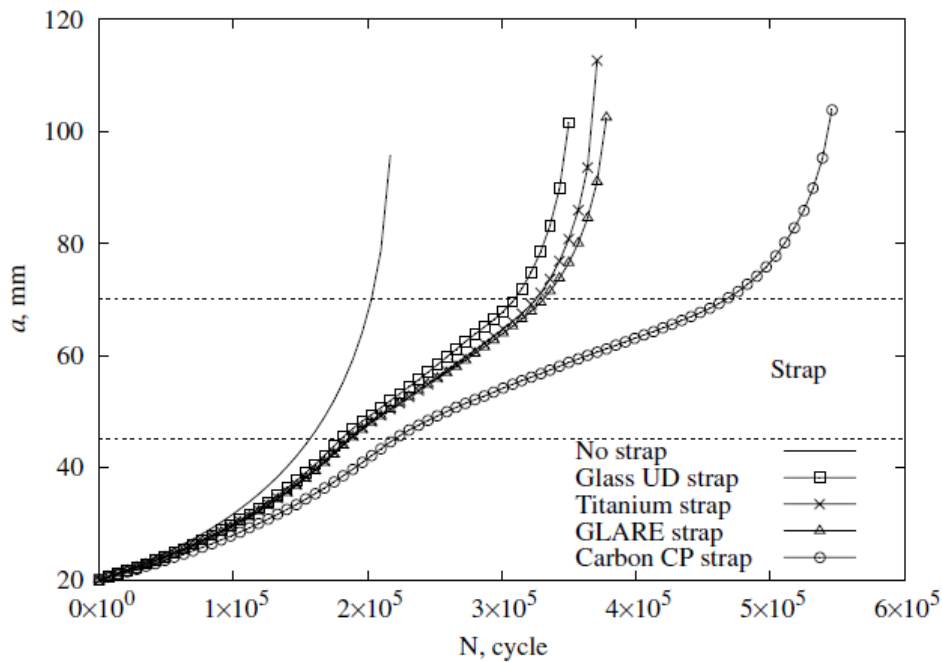
Obrázek 49 ukazuje očekávané životnosti při použití zastavovače z uhlíko-epoxydového laminátu při různém kladení vrstev, kdy *UD (Uni-Directional)* je jednosměrné kladení $[0]_4$, *CP (Cross-Ply)* je křížové kladení $[90/0]_s$, *Angle* je kladení $[30/60]_s$ a *Bias* je $[-45/45]_s$ [4]. Jak lze vidět, z hlediska očekávané životnosti se jako nejvýhodnější jeví využití jednosměrného kladení vrstev, nicméně při simulaci vycházelo, že při použití jednosměrného kladení dochází před selháním celého simulovaného vzorku ke kompletnímu odloupení

zastavovačů, což kdyby bylo považováno za nepřijatelné, tak nejlepší výsledek poskytuje křížové kladení vrstev [4]. Při výběru materiálu pro pásový zastavovač růstu trhliny se tedy jeví důležité mít důkladně definovaná nepřijatelná poruchová kritéria.



Obrázek 49 Očekávaná životnost zastavovačů z uhlíko-epoxydového laminátu při různých variantách kladení vrstev

Obrázek 50 ukazuje očekávané životnosti pro zastavovač zhotovený z různých materiálů [4]. Lze vidět, že nejlepší výsledky nabízí použití uhlíko-epoxydového kompozitu, následované materiálem *GLARE* a titanovou slitinou [4]. Je nutné poznamenat, že výzkum uvažoval vytvrzování adheziva při pokojové teplotě, tedy během zatěžování nebyla přítomná zbytková napětí od vytvrzování za zvýšené teploty, kdy je riziko, že při reálné aplikaci by tohle nebylo (alespoň z praktických důvodů) možné [4]. Využití uhlíko-epoxydového laminátu by mohlo nést zároveň riziko elektrochemické koroze při aplikaci na panel z hliníkové slitiny [4, 32], což by mohlo způsobit nevhodnost jeho užití. Naproti tomu materiál *GLARE* se jeví s hliníkovou slitinou jako kompatibilní a jeho aplikace poskytuje menší zbytkové napětí při vytvrzování adheziva za zvýšených teplot, což jej činí jako potenciálně velice slibný materiál na použití [26, 27, 28].



Obrázek 50 Očekávaná životnost zastavovačů při použití různých materiálů

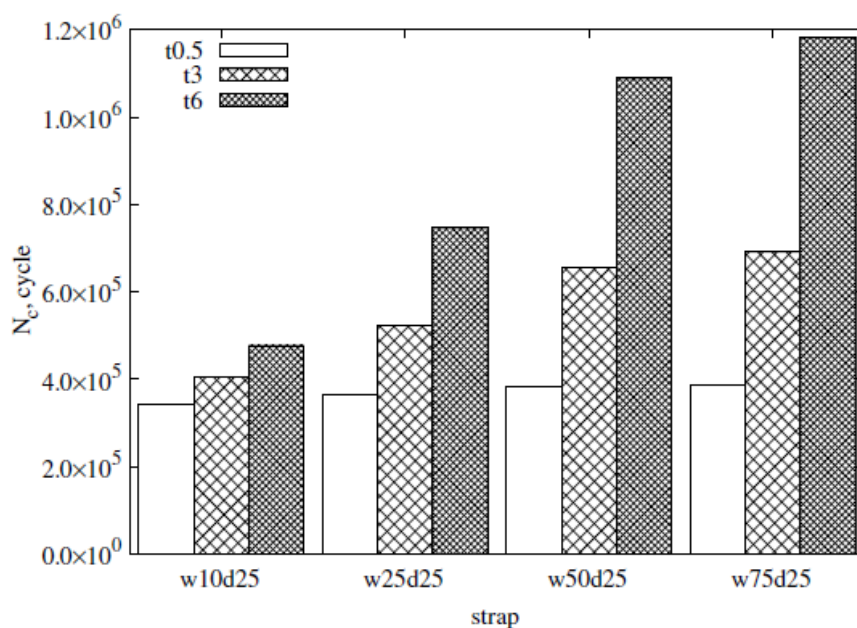
Co se týče vlivu polohy zastavovače a trhliny na jeho účinnost, tak z výzkumu vyplynulo, že menší vzdálenost zastavovače k trhlíně poskytuje lepší efekt na zvýšení životnosti [4]. Při použití různých rozměrů zastavovače byl dosažen výsledek, že větší šířka i tloušťka zastavovače vedou k vyšší životnosti, viz Obrázek 51. Nicméně při sledování poměru zvýšené životnosti a přidané hmotnosti nejsou závěry již tak jednoznačné, jak ilustruje Obrázek 52 [4]. Potenciální optimalizace návrhu pásového zastavovače růstu trhlin se tedy jeví jako komplexní záležitost.

Zajímavým poznatkem prezentovaným Syedem, Zhangem a Fitzpatrickem v jejich článku [28] je, že „účinnost“ adhezivně připojených zastavovačů růstu trhliny, ve smyslu procentuálního prodloužení životnosti panelu, se může významně lišit na základě vlastností materiálu panelu, k němuž jsou zastavovače připevněné. Byl srovnáván vliv shodných zastavovačů růstu trhliny zhotovených z *GLARE* na zkušební panely zhotovené ze dvou různých hliníkových slitin. První hliníkovou slitinou byla slitina *7085-T7651* s vyšší pevností, ale horšími únavovými vlastnostmi a druhou hliníkovou slitinou byla slitina *2624-T351* s lepšími únavovými vlastnostmi a nižší pevností [28].

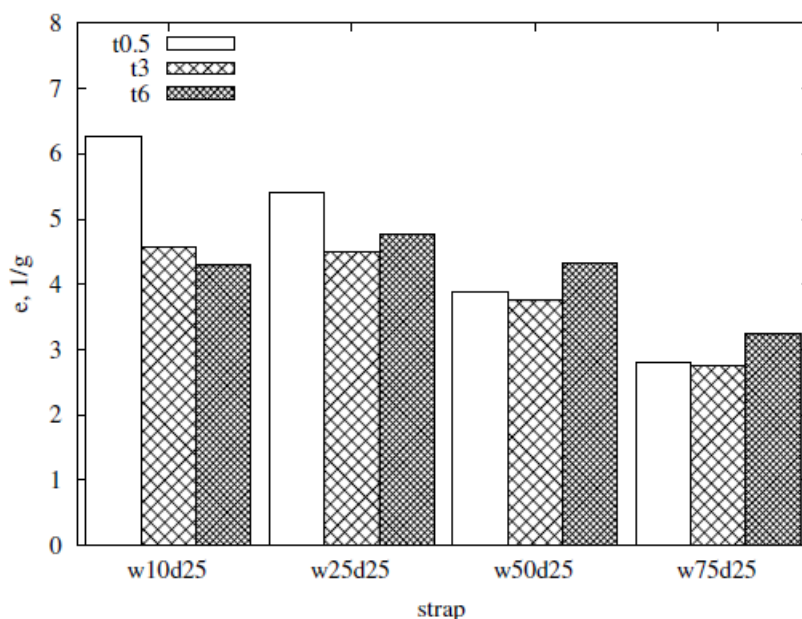
Obrázek 53 zobrazuje výsledek měření růstu únavové trhliny výše zmíněné práce. Lze na něm vidět, že aplikace zastavovačů růstu trhliny vedla ke zvýšení životnosti u panelů z obou hliníkových slitin [28]. Nicméně v případě slitiny *2624-T351* s lepšími inherentními únavovými vlastnostmi šlo o zlepšení životnosti „pouze“ o 27 %, zatímco u slitiny *7085-T7651* došlo k navýšení o 90 % [28].

Článek dále uvažoval šíření únavové trhliny dle Parisova zákona jako:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (24)$$

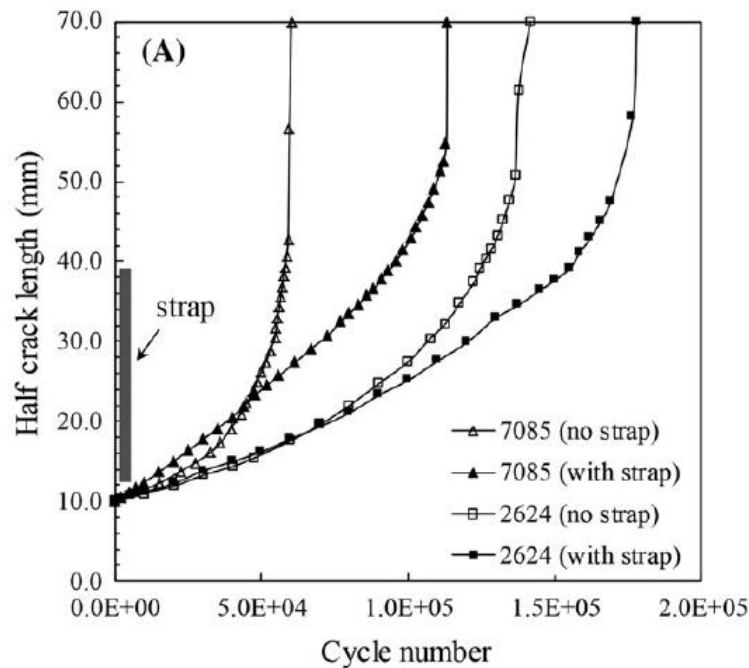


Obrázek 51 Očekávaná životnost při různých šířkách pásových zastavovačů (w) a tloušťkách (t)



Obrázek 52 Očekávaná životnost vztažená na nárůst hmotnosti při použití různých šířek pásových zastavovačů (w) a tloušťkách (t)

Ze zkušebních dat autoři vyhodnotili pro slitinu 7085-T7651 součinitel $C = 7E-12$ a exponent $n = 4,22$ [28]. U slitiny 2624-T351 byl součinitel $C = 4E-10$ a exponent $n = 2,39$ [28]. Pro významnější vliv exponentu n na růst trhliny než součinitele C pak byl vyvozen bližší závěr, že použití adhezivně připojených zastavovačů růstu trhliny má vyšší smysluplnost u materiálů právě s vyšším exponentem n dle Parisova zákona [28].



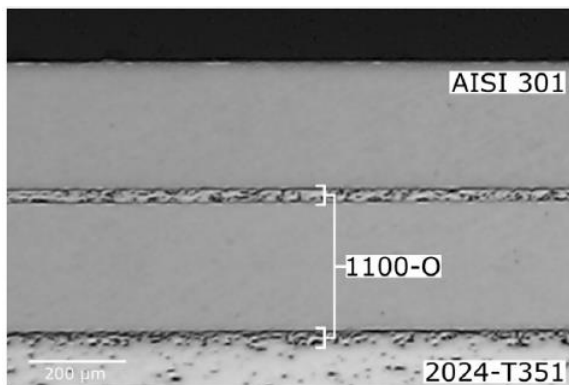
Obrázek 53 Srovnání růstu trhliny v závislosti na počtu zátěžových cyklech při použití slitiny 7085 a 2624

Jetela, Klement, Holzer a Kondrás ve svém výzkumném článku [10] zkoumali dva alternativní způsoby připevňování pásových zastavovačů růstu trhliny k adhezivnímu připevňování. První zkoumanou alternativou byla *studená kinetická depozice (Cold Spray)*, která nanáší vrstvu materiálu pomocí vysokorychlostních nárazů částic na základový materiál [10]. Touto metodou byly na zkušební vzorek z hliníkové slitiny 2024-T351 vytvořeny zastavovače z titanové alfa-beta slitiny Ti-6Al-4V a nerezové austenitické oceli AISI 301, která byla vybrána pro podobný součinitel tepelné roztažnosti se základovým materiálem z hliníkové slitiny a pro vysoký modul pružnosti [10]. Současně pro srovnání s těmito vzorky byly zkoušeny i zastavovače růstu trhliny připevněné adhezivně z kompozitu s jednosměrnými uhlíkovými vlákny o dvou a pěti vrstvách, konkrétně se jednalo o prepreg M10R/38%/UD150/CHS. Pro výzkum pásových zastavovačů z ocelových slitin byly zkoumány i adhezivně připevněné zastavovače ze slitiny AISI 301 v jednovrstvé i dvojevrstvé variantě zastavovače [10].

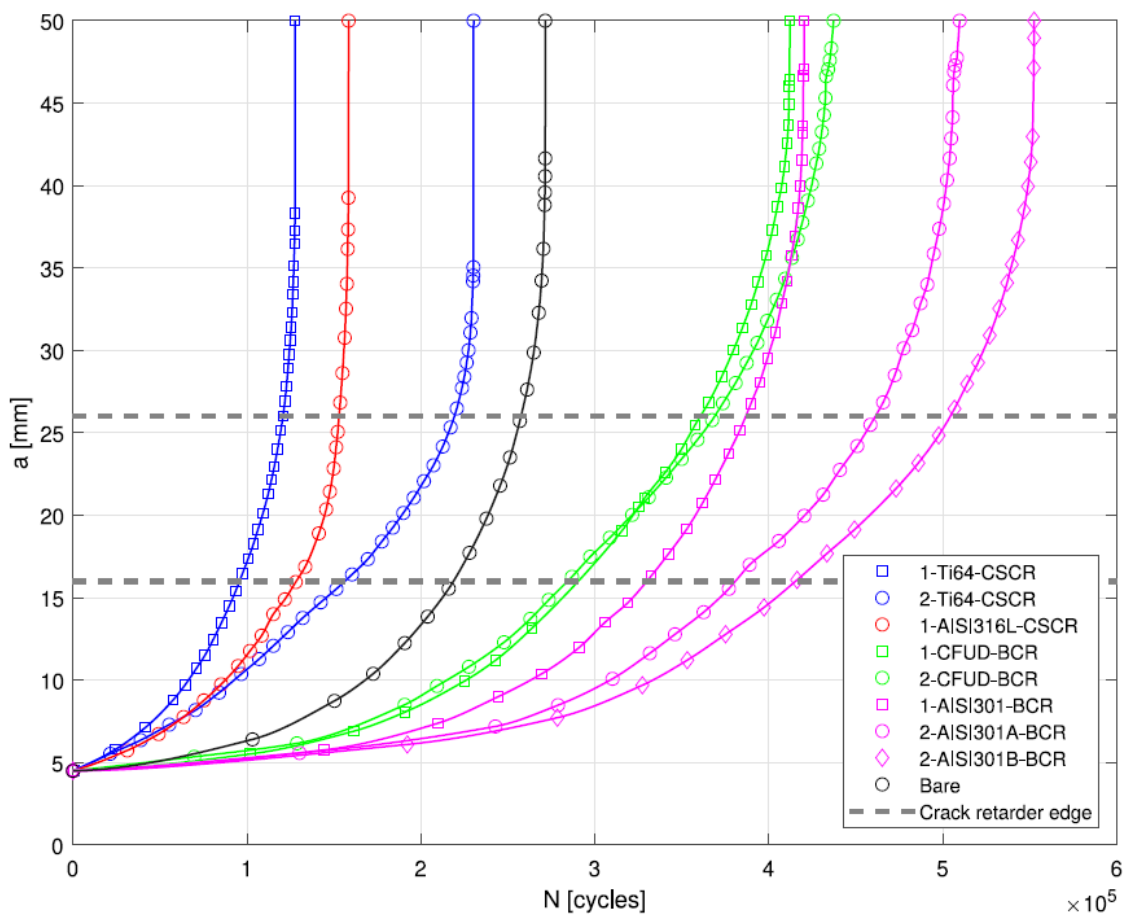
Druhou použitou alternativní metodou je ultrazvukové svařování (Ultrasonic consolidation), kde dochází k odstraňování vrstvy oxidů na povrchu dvou kovů a poté k jejich metalurgickému spojení [10]. Ultrazvukovým svařováním byly vytvořeny pásové zastavovače růstu trhliny z AISI 301, přičemž byla zkoumána varianta s jednou vrstvou a se dvěma vrstvami, varianta se dvěma vrstvami viz Obrázek 54 [10].

Obrázek 55 zobrazuje výsledné růstové křivky trhlín pro vzorky se zastavovači připevněnými studenou kinetickou depozicí (v legendě označované pomocí zkratky CSCR – Cold Spray Crack Retarders) a pro vzorky s adhezivně připevněnými zastavovači (BCR – Bonded Crack Retarders). Lze vidět, že metoda kinetické depozice se jeví jako nevhodná pro zhotovení zastavovačů růstu trhliny, jelikož proti vzorku bez zastavovačů vykázaly všechny vzorky s takto připevněnými zastavovači zhoršení životnosti. Bylo usouzeno, že hlavním důvodem pro zhoršení únavových vlastností bylo zanesení tahových zbytkových napětí do vzorku během výrobního procesu [10]. Dalším důvodem mohla být změna mechanických vlastností

zkušebního vzorku z hliníkové slitiny během zvýšené teploty, kterým byl vystaven při výrobním procesu [10]. Dále lze vypořadovat, že aplikace adhezivně připevněných ocelových zastavovačů růstu trhliny vedla k významnému zvýšení životnosti, jakožto i dříve zmiňované zastavovače z uhlíkového kompozitu.



Obrázek 54 Zastavovač růstu trhliny ze dvou vrstev AISI 301 připevněn ultrazvukovým svařováním



Obrázek 55 Růst únavové trhliny u vzorků se zastavovači připevněnými adhezivně a studenou kinetickou depozicí

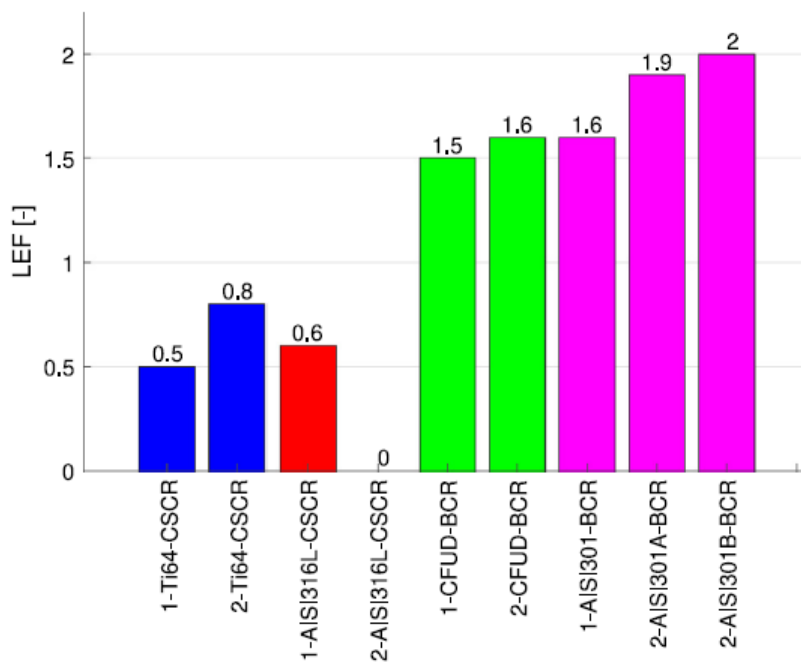
Obrázek 56 blíže ukazuje efekt adhezivně i studenou kinetickou depozicí použitých zastavovačů růstu trhliny, pomocí *faktoru prodloužení životnosti (Life Extension Factor – LEF)*, definovaném jako [10]:

$$LEF = \frac{N_i - N_{základní}}{N_{základní}} \quad (25)$$

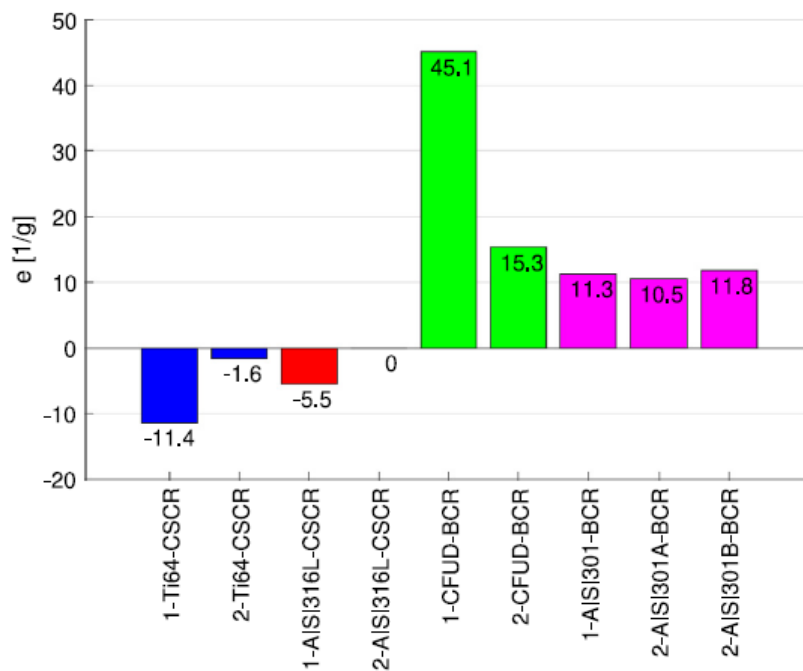
Kde N_i je životnost v zátěžových cyklech daného vzorku se zastavovači a $N_{základní}$ je životnost vzorku bez zastavovačů růstu trhliny. Mimo pokles životnosti u vzorků se zastavovači připevněnými studenou kinetickou depozicí lze pozorovat, že použití pěti vrstev uhlíkového laminátu vedlo oproti verzi se dvěma vrstvami laminátu pouze k malému zvýšení životnosti. Největší navýšení životnosti pak dávaly adhezivně připevněné zastavovače růstu trhliny z oceli. Nicméně pro srovnání byl uveden i Obrázek 57 zobrazující faktor prodloužení životnosti vztažený na přidanou hmotnost zastavovačů e pro různé varianty, definovaný přesněji jako:

$$e = \frac{\frac{N_i - N_{základní}}{N_{základní}} \cdot 100}{m_{zastavovače}} \quad (26)$$

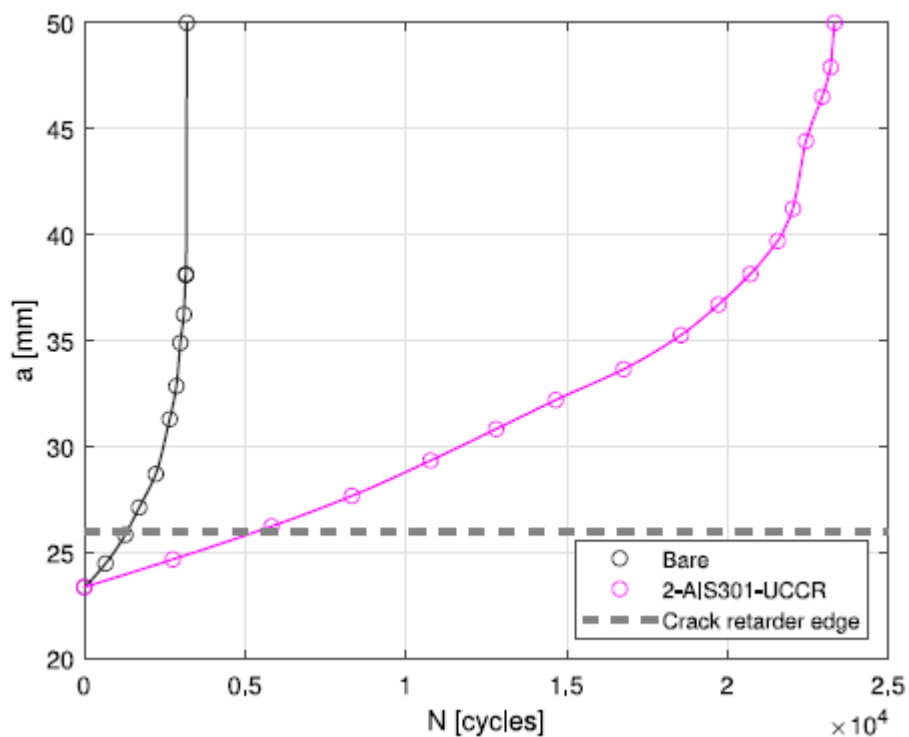
Kdy $m_{zastavovače}$ je hmotnost zastavovačů. Lze vidět, že varianty s ocelovými zastavovači v této metrice vychází hůře než varianty s laminátovými zastavovači, v případě srovnání s dvouvrstevným laminátovým zastavovačem se jedná o velmi významný rozdíl (hodnoty e vychází $45,1 \% g^{-1}$ ku $11,8 \% g^{-1}$ při uvážení pro ocelové zastavovače nejpříhodnější varianty). Využití ocelových adhezivně připevněných pásových zastavovačů růstu trhliny se tedy jeví z hlediska přidané hmotnosti jako nepříliš vhodné konstrukční řešení.



Obrázek 56 Faktor prodloužení životnosti pro vzorky se zastavovači připevněnými adhezivně a studenou kinetickou dispozicí



Obrázek 57 Faktor prodloužení životnosti vztahovaný na přidanou hmotnost pro vzorky se zastavovači připravenými adhezivně a studenou kinetickou dispozicí



Obrázek 58 Růstová křivka zkušebního vzorku s dvouvrstvým zastavovačem růstu trhliny připraveném ultrazvukovým svařováním

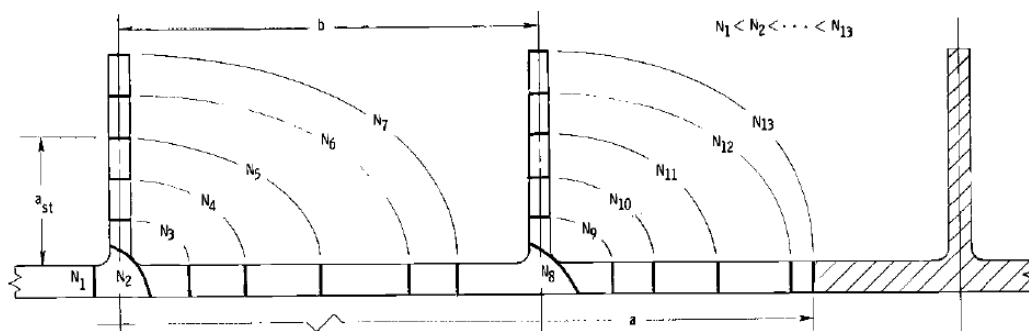
Obrázek 58 ukazuje růstovou křivku vzorku s dvouvrstvým ocelovým zastavovačem připraveným ultrazvukovým svařováním a pro srovnání i růstovou křivku vzorku bez

zastavovače. Je nutné podotknout, že oproti růstovým křivkám s adhezivně a studenou kinetickou dispozicí připevněnými zastavovači (Obrázek 55) probíhala únavová zkouška těchto variant za vyššího maximálního napětí. Jak lze vidět z obrázku, došlo k významnému nárůstu životnosti, přičemž bylo dosaženo *faktoru prodloužení životnosti* $LEF = 7,3$ a *faktoru prodloužení životnosti vztaženého na přidanou hmotnost zastavovačů* $e = 82,2 \% g^{-1}$ [10]. Nutno ovšem dodat, že v případě použití jednovrstvého ultrazvukovým svařováním připevněného zastavovače bylo dosaženo životnosti menší, než byla životnost prostého vzorku bez zastavovače [10]. Varianta ultrazvukovým svařováním připevněných pásových zastavovačů růstu trhliny se jeví jako potenciálně zajímavá alternativa k adhezivnímu připevňování pásových zastavovačů růstu trhliny.

3.2.2 Vliv výztuh („stringerů“) panelu na zpomalení růstu trhliny

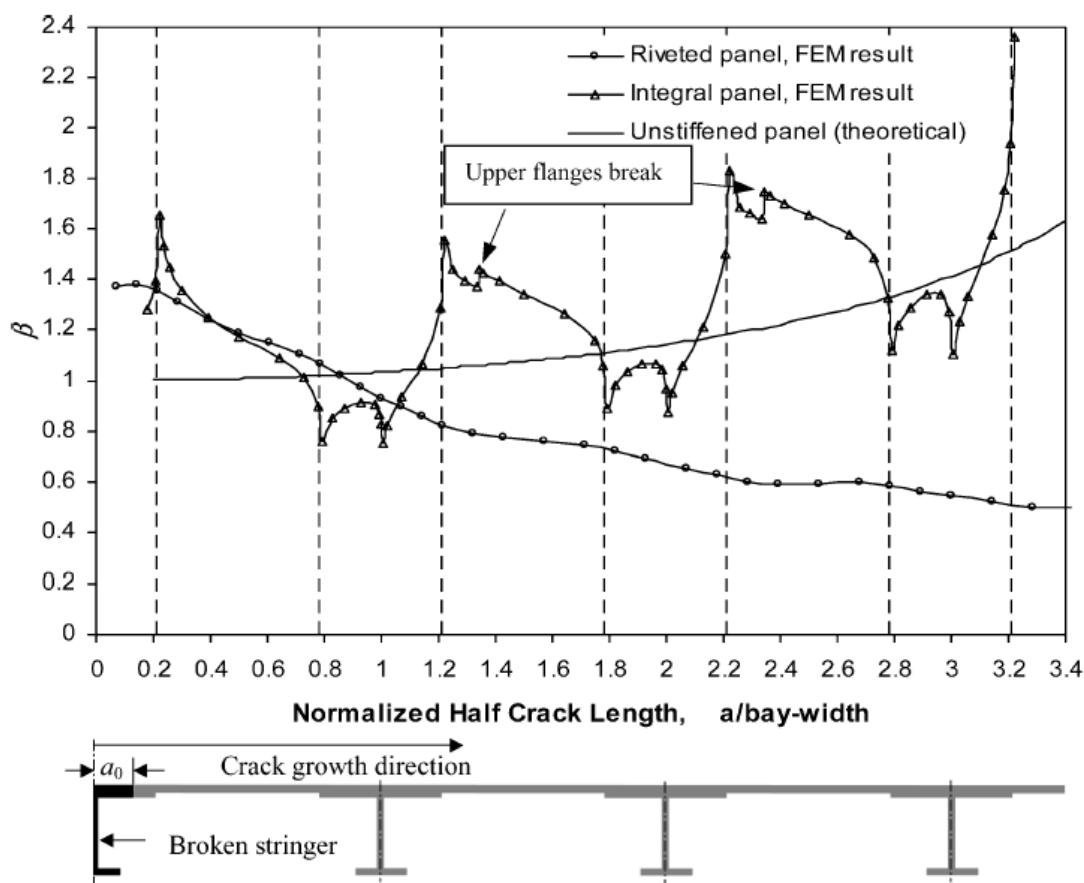
Smyslem této podkapitoly je krátce zmínit vliv výztuh na panelu, jež se přidávají primárně za účelem zvýšení tuhosti panelu, na schopnost panelu zpomalovat růst trhliny.

Poe ve své práci [17] popisuje experiment, kdy byly únavově zkoušeny integrální panely s výztuhami („stringery“) a byla vyhodnocena rychlost růstu trhliny za zátěžový cyklus v závislosti na délce únavové trhliny, přičemž totéž bylo určeno pro panel bez výztuh zatěžovaný stejným napětím. Výsledkem této práce byl závěr, že v důsledku rovnoměrného přerůstání trhliny z potahu do výztuh (viz Obrázek 59, přičemž N je počet zátěžových cyklů) nepřináší výztuhy integrálního panelu významný efekt redukce růstu únavové trhliny oproti prostým nevyztuženým panelům za stejného zatížení [17]. Podobný závěr je zmíněn i v [11, 25].



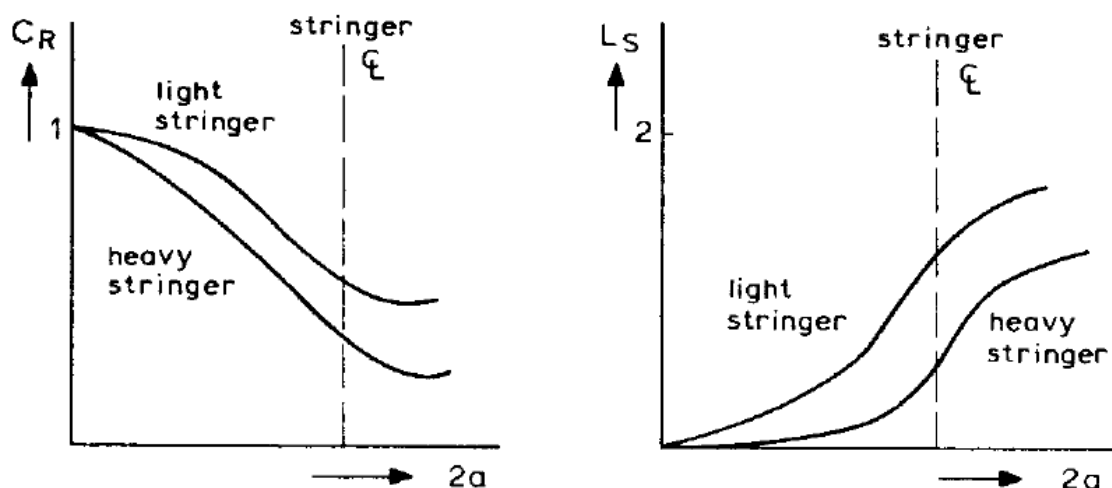
Obrázek 59 Růst trhliny v integrálním vyztuženém panelu

V případě použití výztuh („stringerů“) připevněných k panelu nýtováním můžeme hovořit o tom, že tyto výztuhy dokážou fungovat v konstrukci jako zastavovače růstu trhliny [33, 25]. Při šíření trhliny v takto vyztuženém panelu bude výztuha v momentě, kdy únavová trhlina překročí její polohu, stále funkční a bude snižovat zatížení nesené potahem panelu a bude docházet k snižování faktoru intenzity napětí na čele trhliny [33]. Zároveň po překročení únavové trhliny oblasti výztuhy dochází vlivem tuhosti výztuhy k zamezení deformace a rozevírání šířící se únavové trhliny, což se opět projevuje snížením faktoru intenzity napětí na čele trhliny [5], konkrétně snížením součinitele faktoru intenzity napětí β , viz Rovnice 23. Výztuhy tedy zpomalují růst trhliny obdobnými mechanismy, které pozorujeme při použití připojených pásových zastavovačů růstu trhliny (viz 3.2.1 Pásově zastavovače růstu trhliny).



Obrázek 60 Vývoj součinitele β faktoru intenzity napětí při šíření trhliny vyztuženým panelem

Pro ilustraci funkce výtuh integrálního panelu a srovnání s funkcí přínýtovaných výtuh slouží Obrázek 60 z práce [33] zobrazující výsledek MKP simulace šíření únavové trhliny v panelu, kde došlo ke zlomení prostřední výtuhy a vzniku trhliny v okolním potahu šířící se v obou směrech panelu (polovina této zlomené výtuhy je zobrazena v obrázku černě). Obrázek zobrazuje vývoj součinitele β v závislosti na růstu trhliny a lze vidět, že ačkoliv výtuhy integrálního panelu vedou k snižování součinitele při přibližování k výtuzi, tak při dalším šíření a prorůstání do výtuhy dochází opět k významnému navýšení. Vezmeme-li v potaz, že rychlost růstu trhliny za zátěžový cyklus je funkcí rozdílu faktoru intenzity napětí při maximálním a minimálním napětí (viz Rovnice 22), jež jsou závislé na součiniteli β , tak můžeme shledat podobný vývoj rychlosti růstu trhliny při pohledu na Obrázek 46, který zobrazoval vliv integrálních pásů coby pásových zastavovačů růstu trhliny. Pro nýtované výtuhy zobrazuje Obrázek 60 pozitivní vliv na součinitel β v důsledku dříve zmíněných mechanismů, nicméně je nutno podotknout, že simulace nezahrnovala selhání výtuh v důsledku překročení meze pevnosti, ke kterému by v důsledku stále většího přerozdělování zatížení na výtuhy v průběhu šíření v určité fázi došlo [33].



Obrázek 61 Závislost součinitelů C_R a L_S v závislosti na délce trhliny u panelu s nýtovanými výztuhami

Vliv nýtovaných výztuh na zpomalení růstu trhliny a zvýšení zatížení ve výztuze v závislosti na délce trhliny lépe ukazuje Obrázek 61 se zvýrazněním rozdílu podle tuhosti výztuhy [5]. Přičemž C_R je redukční součinitel faktoru intenzity napětí proti nevyztuženému panelu, tedy [5]:

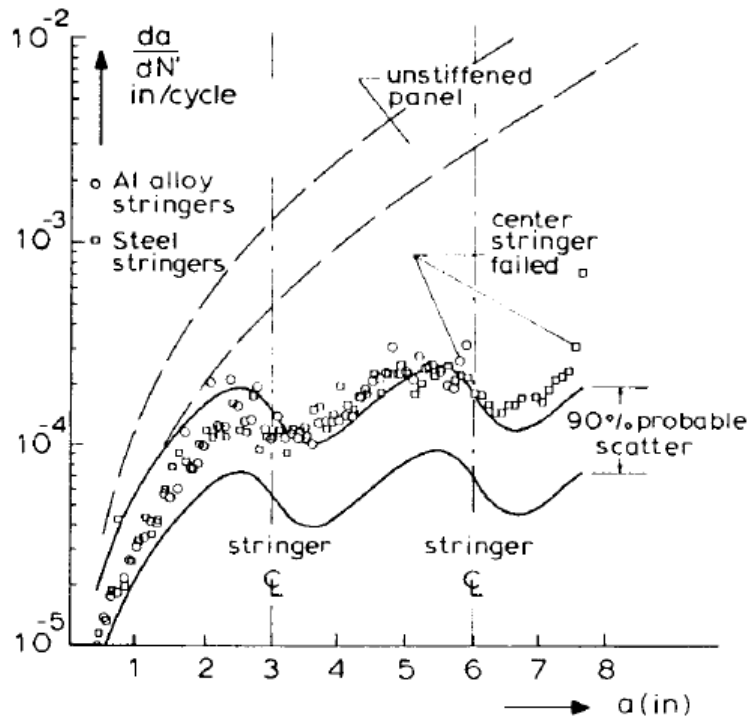
$$C_R = \frac{K_{vyztužen\acute{e}}}{K_{nevyztužen\acute{e}}} \quad (27)$$

L_S je součinitel koncentrace zatížení výztuh, platí pro něj [5]:

$$\sigma_{výztuha} = L_S \cdot \sigma \quad (28)$$

Obrázek 61 ilustruje, že v případě využití tužší výztuhy lze pozorovat významnější snížení faktoru koncentrace napětí, jelikož tužší výztuha přejímá větší napětí z potahu než míň tuhá. Zároveň v tužší výztuze dochází k menšímu nárůstu napětí, jelikož pro svou větší tuhost již tak v rámci panelu přenáší větší část zatížení než méně tuhá výztuha. Tudiž při přerozdělení zatížení z potahu dojde k míň významnému navýšení u tužší výztuhy, než u výztuhy míň tuhé [5]. Snižování faktoru koncentrace napětí nabývá na významnosti při přibližování trhliny k výztuze a při jejím podrůstání, načež dochází opět k zvyšování faktoru koncentrace napětí (podobný průběh můžeme sledovat u již dříve zmíněných připevněných pásových zastavovačů růstu trhliny při pohledu na Obrázek 46) [5]. Jak již bylo zmíněno, po kompletním prorostení trhliny pod výztuhou nadále ale stále dochází k efektu snížení faktoru intenzity napětí díky zamezování rozevírání trhliny [5].

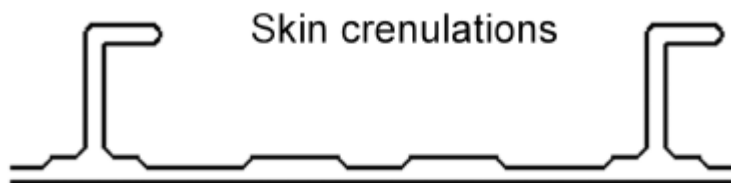
Obrázek 62 zobrazuje příklad závislosti rychlosti šíření trhliny za zátěžový cyklus na délce trhliny při prorůstání trhliny v panelu s přínýtovanými výztuhami pro oblasti dvou výztuh panelu a nabízí srovnání s nevyztuženým panelem [5]. Lze pozorovat zpomalení růstu trhliny při přibližování k výztuhám v důsledku snížení faktoru koncentrace napětí a celkově nižší hodnoty, než by poskytoval nevyztužený panel.



Obrázek 62 Růst trhliny skrze panel s přinýtovanými výztuhami

3.2.3 Zastavovače růstu trhliny vytvořené variací tloušťky panelu

Možnou variantou zastavování růstu trhliny u integrálního panelu je pomocí vytváření regionů s variací tloušťky panelu mezi výztuhami připomínající cimbuří (anglicky crenulation). Využití takových oblastí s variací tloušťky by mělo nabízet potenciál k zvyšování životnosti [18]. Obrázek 63 zobrazuje příklad, jak by takové zastavovače s variacemi tloušťky panelu ve tvaru cimbuří mohly vypadat.



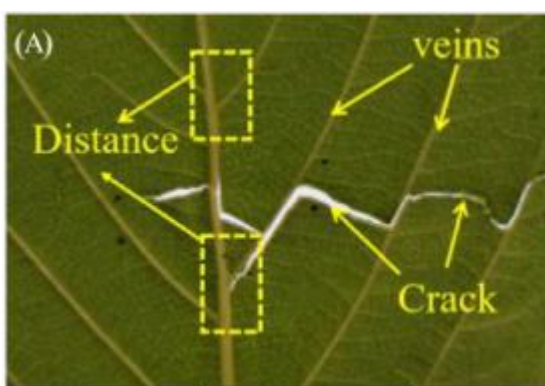
Obrázek 63 Vroubkovaný zastavovač růstu trhliny – ilustrace

Princip zpomalení by měl spočívat ve variaci faktoru intenzity napětí napříč oblastmi mezi výztuhami, přičemž klesá při vstupu únavové trhliny do prvku zastavovače a narůstá, když trhlina prvek opouští [18]. Při správném návrhu konstrukce by pak vliv poklesu faktoru intenzity napětí (a tedy i poklesu rychlosti šíření trhliny) měl převýšit vliv nárůstu faktoru intenzity napětí (nárůstu rychlosti šíření trhliny) a konstrukce by měla projevit vyšší životnost [18]. Dle [18] byl tento princip experimentálně demonstrován s navýšením životnosti panelu až o 100 % vůči hmotnostně ekvivalentním panelům, které nedisponovaly prvky zastavovačů ve tvaru cimbuří. Autor této diplomové práce nicméně nedisponuje přístupem k pracím

pojednávajících přímo o těchto experimentech, proto nebudou uváděny bližší informace o těchto výsledcích.

3.2.4 Bionické zastavovače růstu trhliny

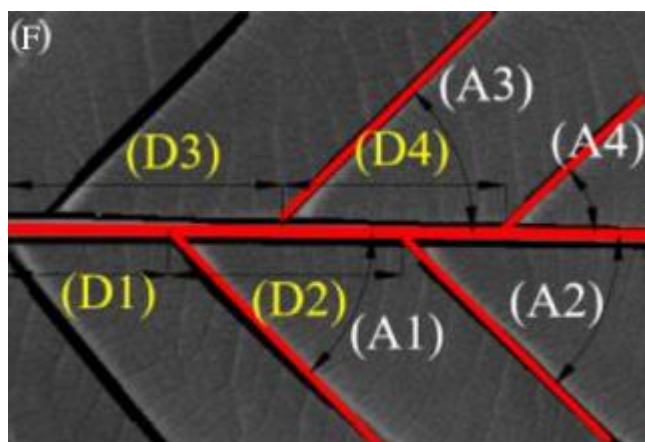
Liu et al. ve svém článku [13] uvedli návrh zastavovačů růstu trhliny, jež byly inspirovány žilkami listu. List vystavený působení venkovního prostředí vyhodnotili jako zatěžovaný proměnlivým zatížením a pozorovali u něj odchýlení trhliny z původního směru, což vedlo k prodloužení dráhy trhliny na listu, viz Obrázek 64. Inspirováni tímto jevem autoři provedli experimentální nanášení listovým žilkám podobných struktur z prášku z hliníkové slitiny 7075 (v této diplomové práci nazývané jako *Bionické zastavovače růstu trhliny*) pomocí laserového navařování na vzorek z hliníkové slitiny 2024 [13].



Obrázek 64 Odklonění trhliny na listu

Autoři článku pozorovali význam vzdáleností „sekundárních žilek“ listu na cestu, jíž rostla trhlina, z toho důvodu zpracovali dvě sady vzorků listů pro extrakci těchto vzdáleností a výsledkem bylo vytvoření čtyř zkušebních variant, jež uvádí

Tabulka 2 [13]. Obrázek 65 ukazuje význam uvedených rozměrů.

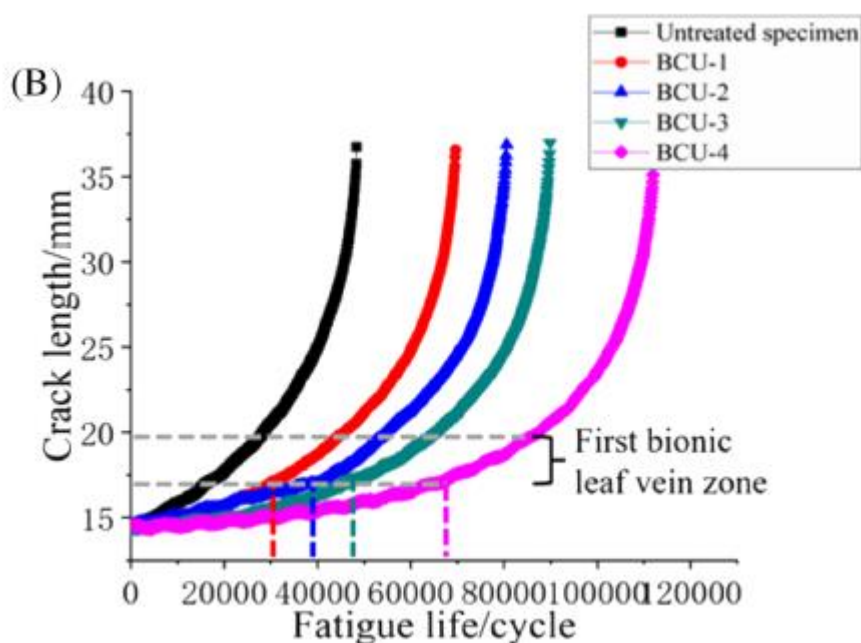


Obrázek 65 Vzdálenosti potřebné pro určení variant bionických zastavovačů růstu trhlin

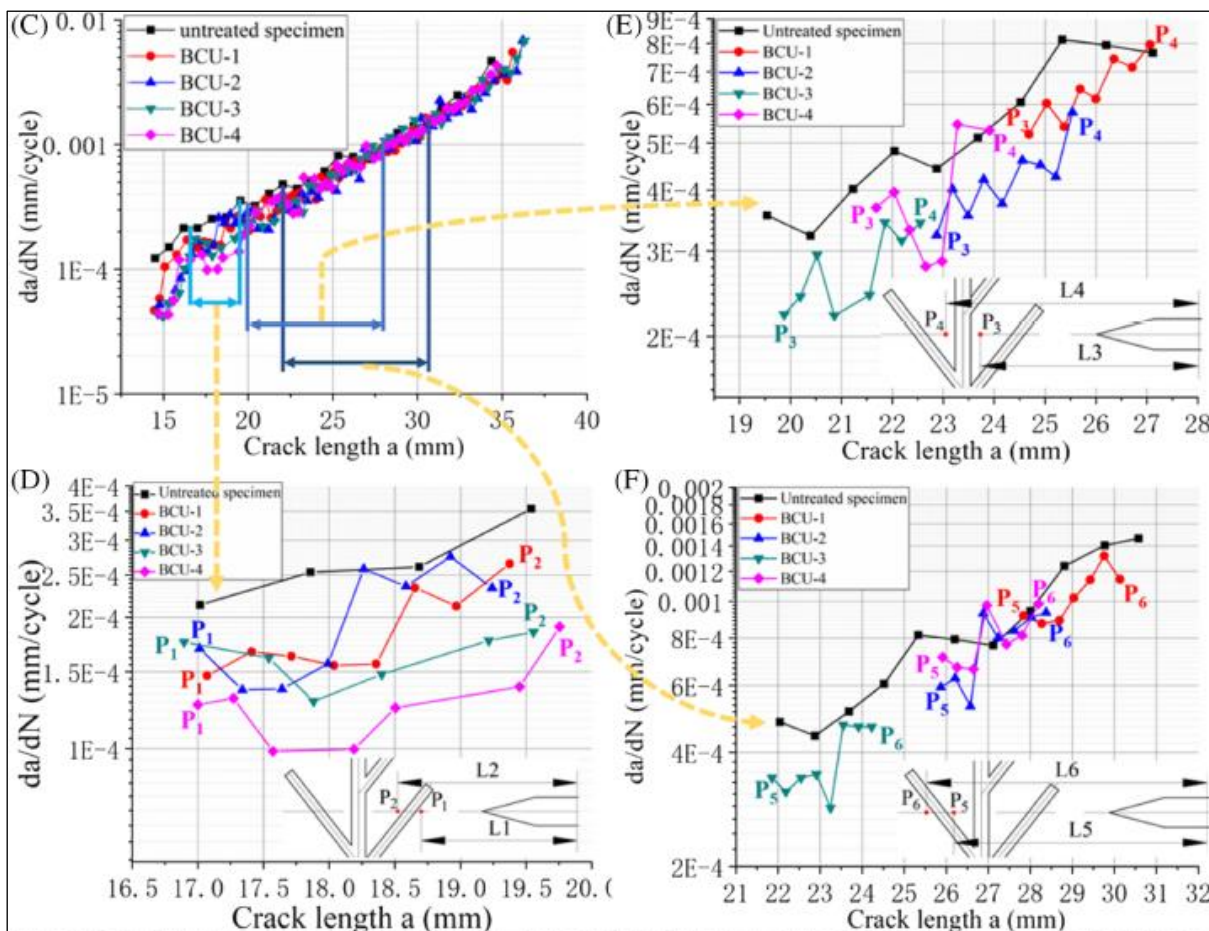
Tabulka 2 Rozměry testovaných variant bionických zastavovačů (data z [13])

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

Použití těchto bionických zastavovačů růstu trhliny vedlo k úspěšnému prodloužení životnosti upravených vzorků ve srovnání s prostým vzorkem bez zastavovače, viz Obrázek 66 [13]. Fakt, že únavová trhlina dosáhla oblasti zastavovače při různých cyklech zatížení, byl přisouzen tlakovým zbytkovým napětím, které vznikly při laserovém navaření zastavovačů [13]. Obrázek 67 ukazuje rychlost šíření trhliny v závislosti na délce a poloze trhliny pro různé varianty testovacích vzorků. Při pohledu na (ve směru růstu trhliny) poslední část růstu trhliny bionickým zastavovačem (F) lze vidět, že mimo variantu *BCU-3* neposkytovaly vzorky se zastavovačem jednoznačně lepší schopnost zpomalení růstu trhliny, než nevylepšený vzorek [13]. Důvodem byl shledán fakt, že únavová trhlina se v této části nacházela již ve fázi rychlého šíření únavové trhliny a bylo konstatováno, že bionické zastavovače v této fázi šíření trhliny ztrácí na účinku, a tedy je vhodné jejich využití v co největší blízkosti začínající únavové trhliny [13]. Což je podobný závěr, jaký se zdá být platný i u adhezivně připevněných pásových zastavovačů růstu trhliny (viz podkapitola 3.2.1 Pásový zastavovače růstu trhliny).



Obrázek 66 Délka trhliny při počtu zátěžových cyklů u zkoušky bionických zastavovačů růstu trhliny

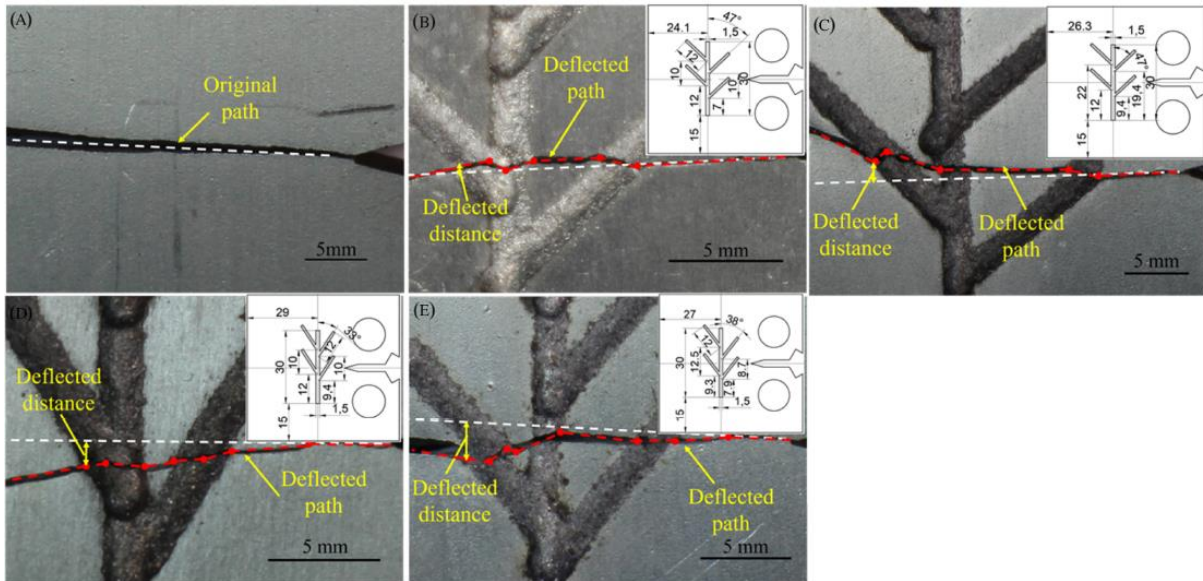


Obrázek 67 Rychlost šíření trhliny při růstu trhliny skrze různé části bionického zastavovače

Tabulka 3 Životnosti panelů s bionickými zastavovači (data z [13])

	Vzorek bez zastavovače	BCU-1	BCU-2	BCU-3	BCU-4
Životnost [cykly]	48 371	69 604	80 548	89 871	111 925
Nárůst životnosti	-	43,9 %	66,5 %	85,8 %	131,4 %

Tabulka 3 podává informace o životnosti vzorků při aplikaci různých rozměrových variant bionických zastavovačů růstu trhliny. Lze vidět, že typ *BCU-4* poskytuje nejlepší výsledky z hlediska celkové dosažené životnosti, přičemž došlo k nárůstu o 131,4 % zátěžových cyklů oproti vzorku, který nebyl vybaven bionickými zastavovači růstu trhliny.



Obrázek 68 Cesty šíření únavové trhliny u zkušebních vzorků bionických zastavovačů růstu trhliny. (A) vzorek bez zastavovačů, (B) BCU-1, (C) BCU-2, (D) BCU-3, (E) BCU-4

Obrázek 68 ilustruje hlavní mechanismus, kterým bionický zastavovač růstu trhliny napomáhá prodloužení životnosti [13]. V případě zkušebního vzorku bez zastavovače docházelo k růstu trhliny v přímce, zatímco u vzorků s bionickým zastavovačem růstu trhliny docházelo k odchýlení cesty, kterou se trhlina šířila. To vedlo k jejímu prodloužení, vyžadujíc více energie, a tudíž došlo k prodloužení životnosti [13]. Růst trhliny bionickým zastavovačem vyžaduje více energie než růst základním materiálem z důvodu, že laserovým navařováním zastavovače dochází k navýšení mikrotvrlosti v oblasti zastavovače [13]

Dalším efektem pozorovaným u vzorků se zastavovači, oproti vzorku bez zastavovačů, byl vznik sekundárních trhlin, což vedlo k zpomalení růstu primární trhliny [13]. Výhodou této varianty zastavovače růstu trhliny je to, že oproti pásovým zastavovačům dochází jen k velmi malému navýšení hmotnosti konstrukce, v případě výše uváděného článku šlo pouze o maximálně 0,13 g [13]. Ačkoliv článek neuváděl hmotnost vzorku bez zastavovače, lze předpokládat, že se jednalo o prakticky zanedbatelné navýšení.

4. TVORBA MKP MODELŮ VYZTUŽENÝCH PANELŮ SE ZASTAVOVAČI RŮSTU TRHLINY

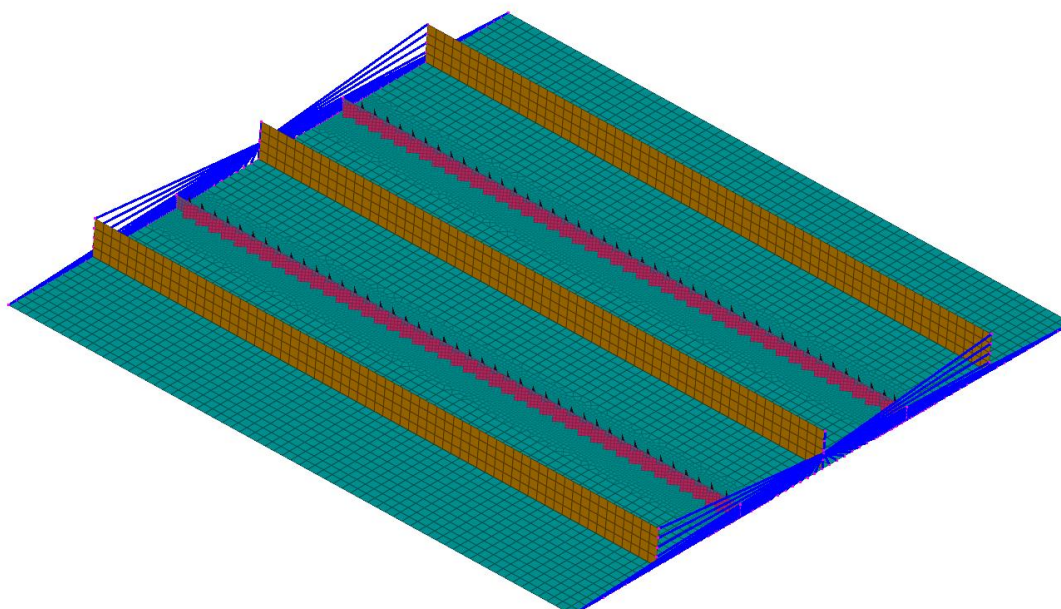
Tahle kapitola se bude věnovat popisu základního MKP modelu tlakem zatěžovaného vyztuženého panelu se zastavovačem růstu trhliny, jehož varianty budou zkoumány v rámci kapitoly 5.

MKP modely vyztužených panelů byly tvořeny převážně v BETA CAE Systems ANSA 23.1.0 s určitou mírou přípravných úkonů (pre-processing) prováděných v Patran 2022.2. Vlastní výpočty byly prováděny v MSC Nastran 2022.2 a zpracování výsledků (post-processing) byl prováděn v Patran 2022.2 a BETA CAE Systems META 23.1.0.

4.1 Základní model

Zkoumané panely jsou integrální panely z hliníkové slitiny 7075 T-6 se třemi výztuhami a celkem dvěma zastavovači růstu trhliny tvarově inspirovanými bionickými zastavovači růstu trhliny popisovanými v 3.2.4, které jsou umístěné mezi prostřední výztuhou a krajními výztuhami. Přesnější popis volby tohoto typu zastavovačů růstu trhliny viz 4.1.2. Obrázek 69 ukazuje příklad MKP modelu vyztuženého panelu se zastavovači růstu trhliny, které jsou vyznačeny růžovou a fialovou barvou, potah má barvu tyrkysovou a výztuhy barvu oranžovou. Panel byl podroben výpočtu nelineární sekvencí řešení SOL 106, přičemž byl postupně deformačně tlakově zatěžován v záporném směru osy x na jednom okraji do dosažení zadaného maximálního deformačního zatížení okraje -3 mm (viz 4.1.4.).

0:H10TW2BW2BL9.bdf : ORIGINAL STATE



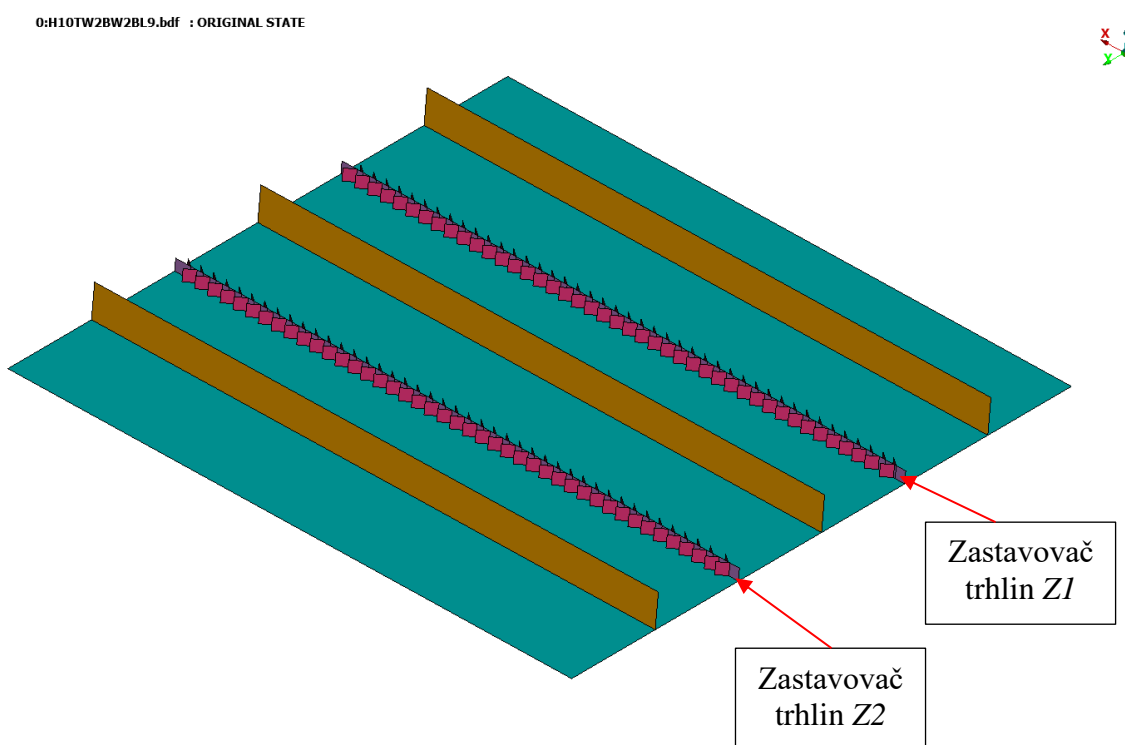
Obrázek 69 Příklad modelu zkoumaného vyztuženého panelu (varianta H10TW2BW2BL9)

4.1.1 Geometrie

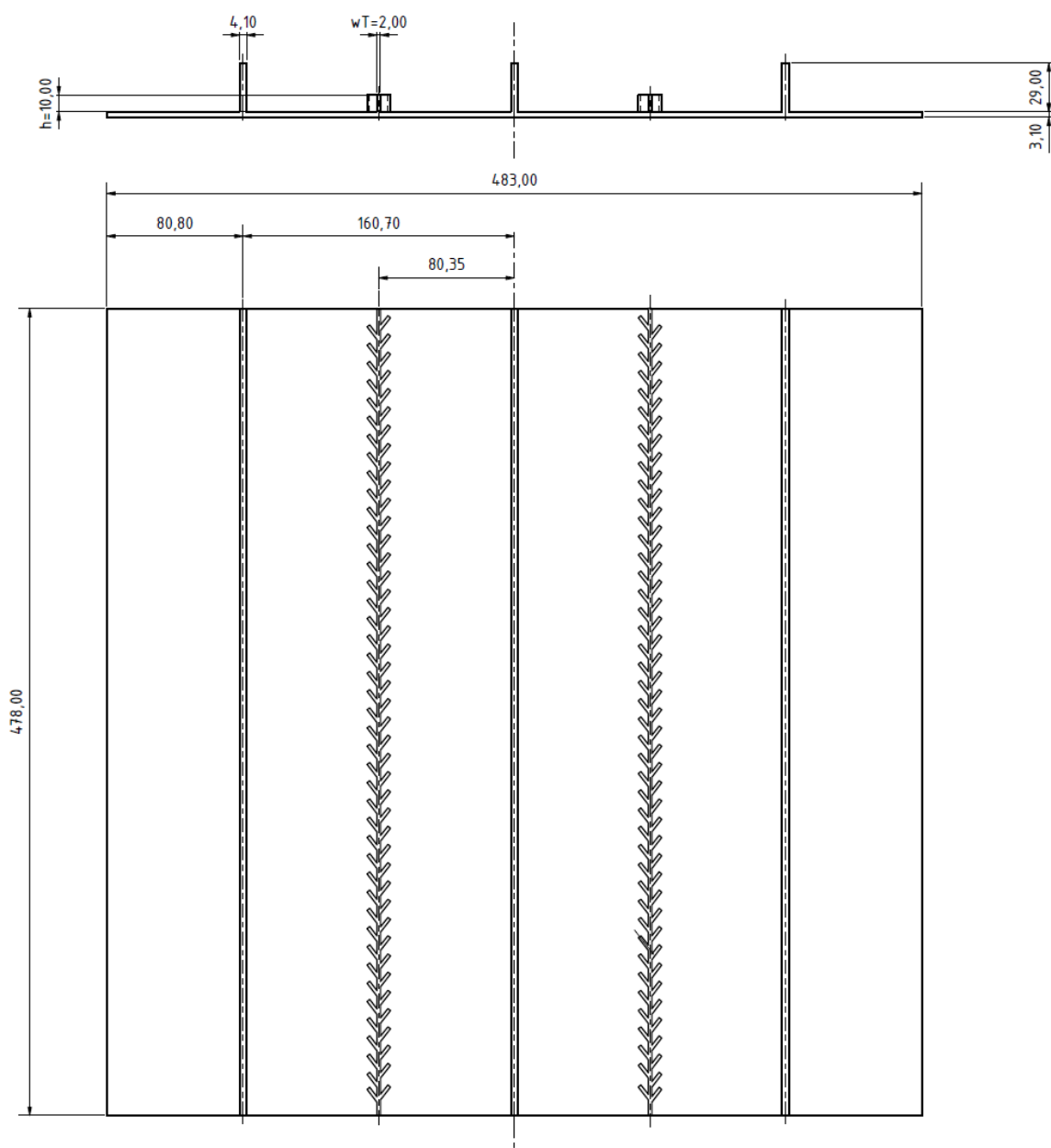
Příklad geometrie základního modelu vyztuženého panelu se zastavovači růstu trhliny poskytuje Obrázek 70 a jednoduchý výkres poskytuje Obrázek 71. Potah vyobrazený tyrkysovou barvou má tloušťku $t_p = 3,1$ mm, výztuhy mají tloušťku $t_s = 4,1$ mm. Panel je symetrický podél střednicové roviny prostřední výztuhy, včetně obou zastavovačů růstu trhliny. Zjednodušený výkres rozměrů zastavovače růstu trhliny ZI s popisem jeho částí viz Obrázek 72.

Rozměry tvaru zastavovačů růstu trhliny byly inspirovány variantou BCU-4 bionických zastavovačů růstu trhliny popisovaných v 3.2.4, viz Tabulka 2. S ohledem na konkrétní rozměry panelu, které byly inspirovány skutečným na tlak testovaným integrálním panelem (viz 4.2), byly vzdálenosti postranních větví zastavovače drobně „škálovány“ přibližně 1,025krát (viz Obrázek 72). Pro dosažení shodného počtu postranních větví na obou stranách terminálu byl po prvních čtyřech postranních větvích ve směru osy x (dvě z každé strany terminálu) zvolen nový rozměr rozteče postranních větví jako 10,8 mm, který je blízký středové hodnotě „škálovaných“ vzdáleností postranních větví z obou stran terminálu D_2 a D_4 . Každý zastavovač poté je standardně tvořen z terminálu a 43 párů postranních větví.

Výška zastavovače růstu trhliny h , šířka jeho tzv. terminálu (fialová barva) w_T a postranních větví (růžová barva) w_B a délka postranní větve L_B jsou hlavní parametry, které v této diplomové práci byly pro různé varianty měněny. Vliv těchto změn na výslednou únosnost panelu v tlaku byl následně vyhodnocován, viz kapitola 5.



Obrázek 70 Příklad geometrie modelu zkoumaného vyztuženého panelu (varianta H10TW2BW2BL9)



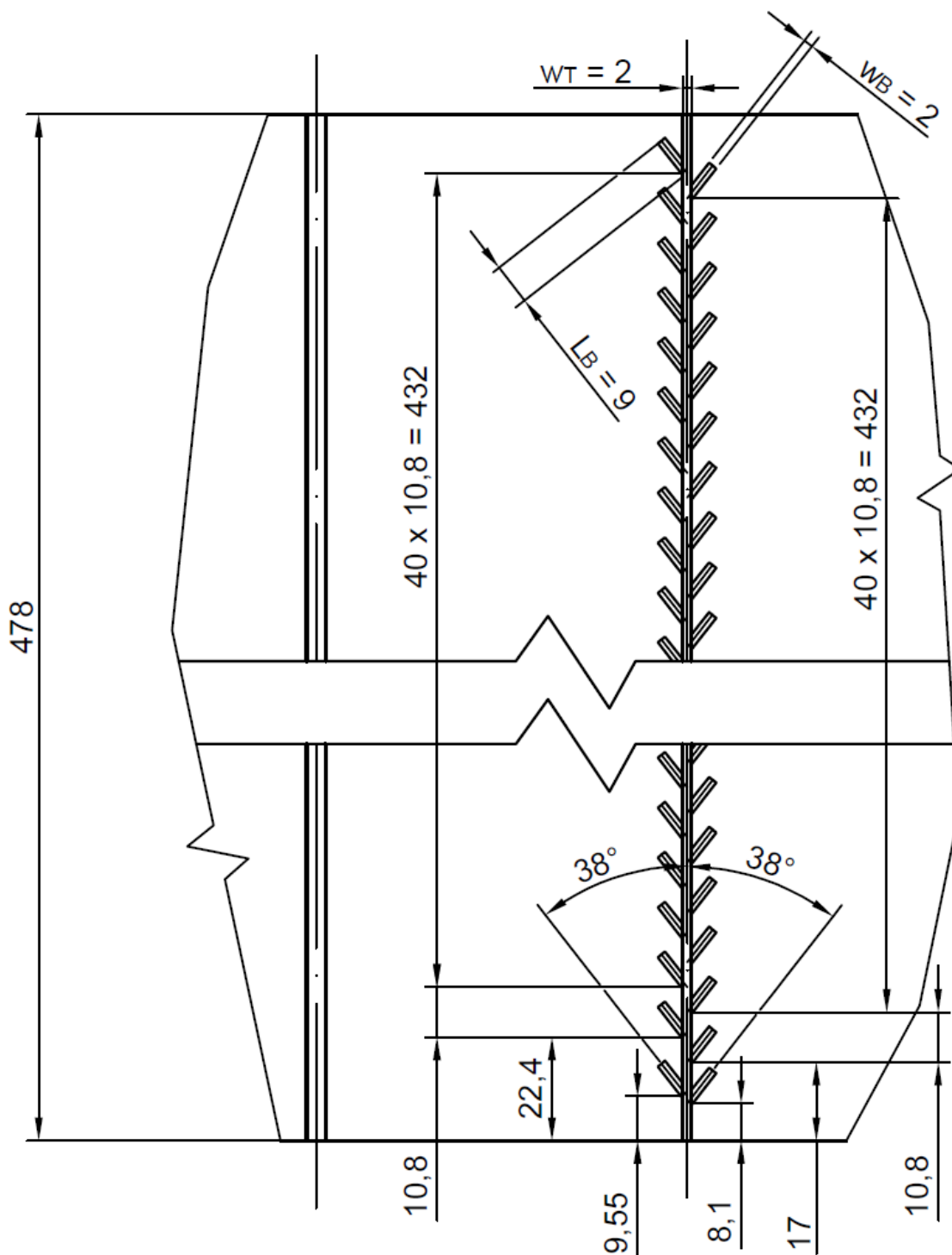
Obrázek 71 Výkres základního MKP modelu vyztuženého panelu

4.1.2 Použité zastavovače růstu trhliny

Jak bylo zmíněno výše, zastavovače růstu trhliny aplikované na zkoumané panely jsou tvarově inspirované variantou BCU-4 bionických zastavovačů růstu trhliny zmíněných v 3.2.4. Tyto bionické zastavovače růstu trhliny byly v příslušném výzkumu [13] aplikovány laserovým navařováním a měly zanedbatelnou výšku. Naproti tomu zastavovače růstu trhliny zkoumané v této diplomové práci mají významnou výšku (základní varianta z předchozích obrázků má výšku $h = 10 \text{ mm}$) a jsou uvažovány jako integrální součást panelu.

Tahle volba zastavovačů růstu trhliny byla provedena na základě instrukcí vedoucího diplomové práce Ing. Tomáše Katrňáka. Účelem této diplomové práce je zkoumat vliv různých konfigurací tohoto typu zastavovačů růstu trhliny na zvýšení únosnosti panelu v tlaku. Účinnost těchto zastavovačů růstu trhliny z hlediska prodloužení únavové životnosti panelu není cílem

této diplomové práce a měla by být dle autorova vědomí předmětem budoucích výzkumných prací.



Obrázek 72 Geometrie zastavovačů růstu trhliny

V diplomové práci jsou zkoumány různé varianty zastavovačů růstu trhliny, přičemž se jedná hlavně o parametry výšky zastavovače růstu trhliny h , šířka terminálu w_T , šířka postranní větve

w_B a délka postranní větve L_B , viz Obrázek 72. Pro účely jednoduššího rozpoznání různých geometrických variant je zaveden způsob kódového označení variant.

Například varianta, kterou ukazuje Obrázek 69 a Obrázek 70 nese označení H10TW2BW2BL9.

„H10“ (Height) v názvu značí výšku zastavovače růstu trhliny, tedy v tomto případě $h = 10$ mm. „TW2“ (Terminal Width) značí šířku terminálu, v tomto případě $w_T = 2$ mm. „BW2“ (Branch Width) značí šířku postranní větve, v tomto případě $w_B = 2$ mm. „BL9“ (Branch Length) značí délku postranní větve, v tomto případě $L_B = 9$ mm.

Tahle varianta je základní variantou, při zkoumání odlišných variant se změnou jednoho z výše zmíněných parametrů zůstávají ostatní zmíněné parametry shodné s verzí H10TW2BW2BL9.

U variant, jejichž geometrie se liší jinými způsoby než jen změnou výše zmíněných parametrů, následuje za výše zmíněnými kódovými označeními speciální dodatek odkazující na jejich specifickou odlišnost, která je vždy u dané zkoumané varianty v kapitole 5 uvedena a vysvětlena (například varianta z podkapitoly 5.5 s polovičním množstvím postranních větví je označena H10TW2BW2BL9-HALFBRANCH).

4.1.3 MKP síť

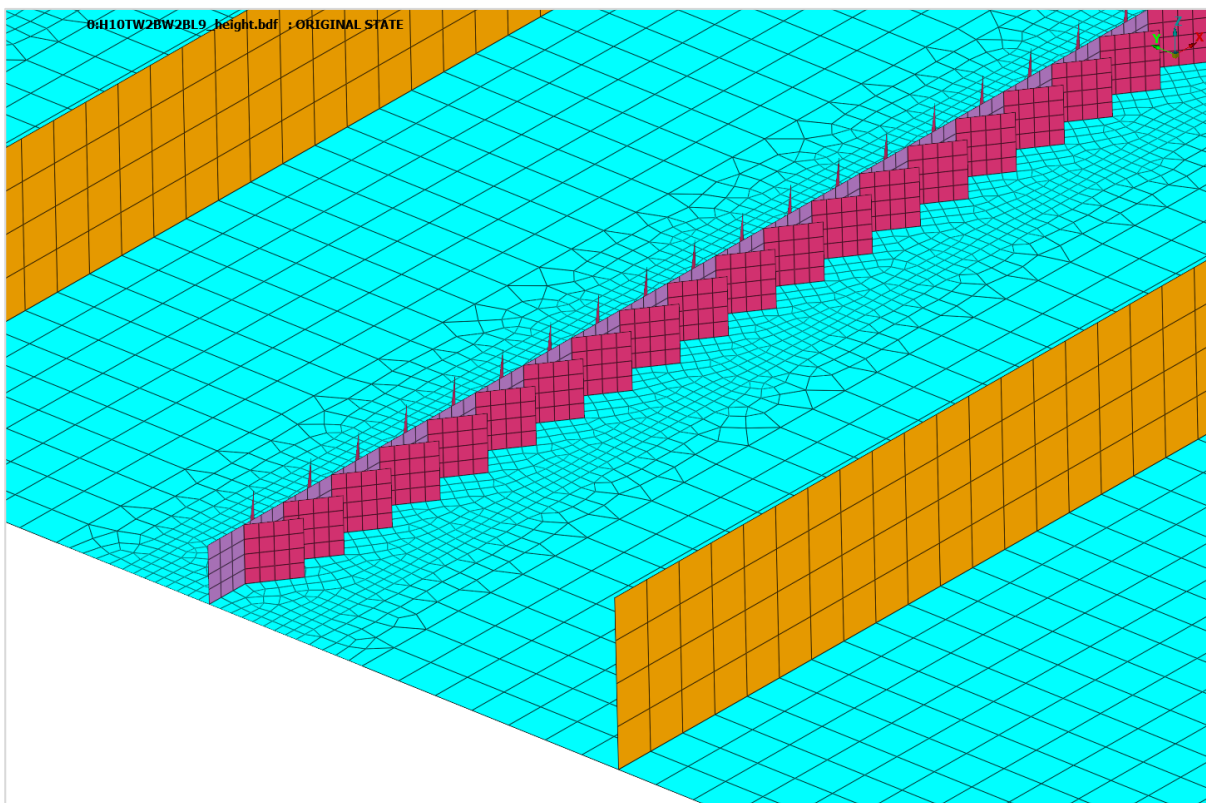
Síť je tvořena kombinací QUAD4 a TRI9 shell elementů s převahou QUAD4 elementů. Pro ilustraci, příklad, který ukazuje Obrázek 69 (H10TW2BW2BL9) je složen z 16910 QUAD4 elementů a 2056 TRI9 elementů. Pro většinu panelu (výztuhy a většina potahu) je použita jedna velikost QUAD4 elementů, která je volena tak, aby na výšku výztuhy byly přítomny čtyři řady elementů (odůvodnění volby tohoto počtu viz 4.2.1). Velikost hrany elementů vychází tedy přibližně na 7,25 mm.

S ohledem na to, že zastavovače růstu trhliny mají oproti výztuhám složitější geometrii je v pásmu v okolí 60 mm od zastavovačů volena pro potah jemnější síť, viz Obrázek 74 a Obrázek 75. Tahle síť je kombinací QUAD4 a TRI9 elementů. Obrázek 75 ukazuje detailněji oblast zjemnění sítě potahu v okolí zastavovače růstu trhliny, přičemž obsahuje pásmo široké 34 mm, kde je vlastní zjemněná síť, pro variantu H10TW2BW2BL9 na obrázku se jedná o elementy se standardní velikostí hrany 2 až 2,5 mm. V okolí tohoto pásma jemné sítě jsou dvě pásma přechodové oblasti, každé široké 13 mm, kde hrubší síť okolního potahu postupně přechází na jemnější síť okolí zastavovačů růstu trhliny.

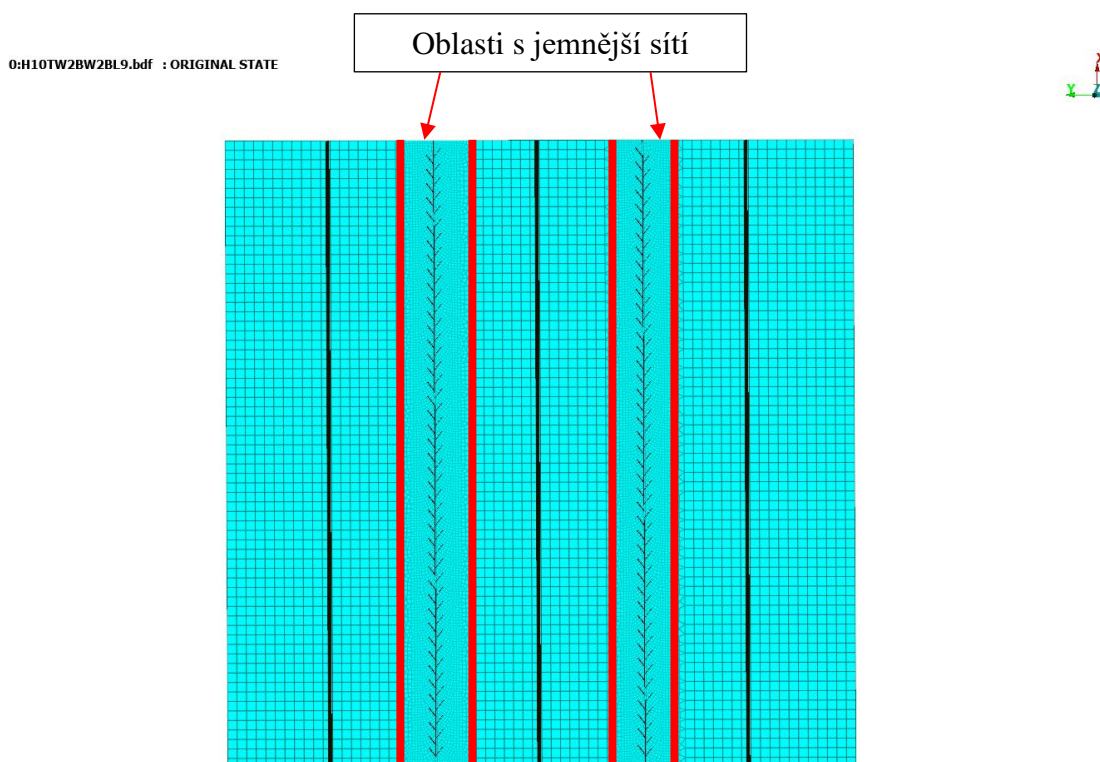
Vlastní zastavovače růstu trhliny jsou tvořeny QUAD4 elementy a jejich velikost je volena obdobným způsobem, jako pro většinovou síť, tedy tak, aby na výšku zastavovače růstu trhliny byly přítomny čtyři řady elementů, což pro variantu H10TW2BW2BL9 vede na elementy se svislou hranou (směr osy z) o velikosti 2,5 mm.

Obrázek 73 ukazuje příklad sítě většinového potahu, výztuh, zastavovačů růstu trhliny i části oblasti zjemněné sítě v okolí zastavovačů růstu trhliny pro variantu H10TW2BW2BL9.

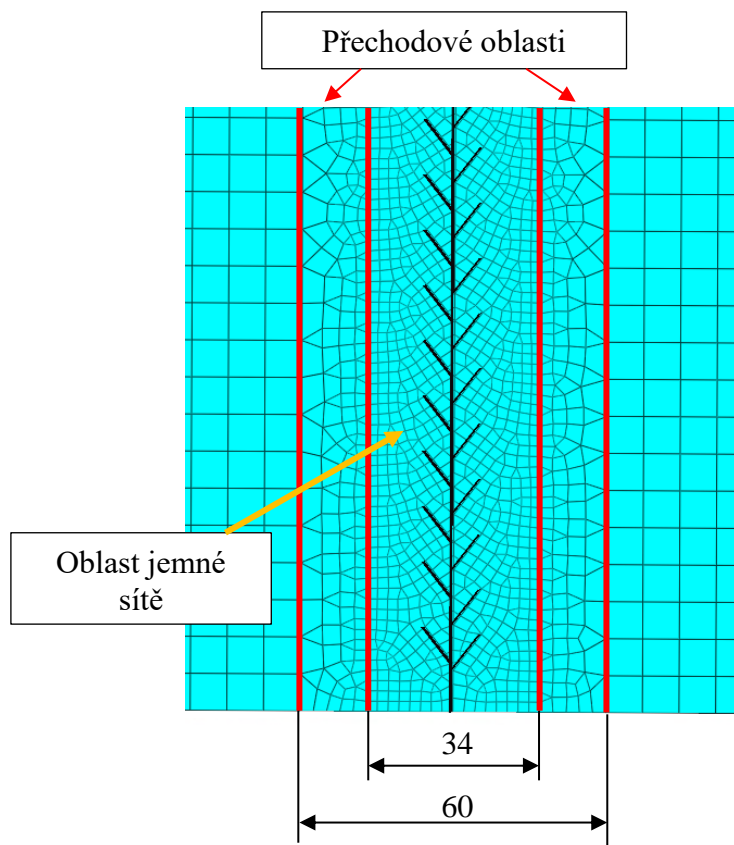
Síť je stejně jako geometrie panelu standardně symetrická podle střednicové roviny prostřední výztuhy.



Obrázek 73 Síť základního vyztuženého panelu se zastavovačem (H10TW2BW2BL9)



Obrázek 74 Ilustrace oblastí jemnější sítě v okolí zastavovačů



Obrázek 75 Oblasti zjemnění sítě

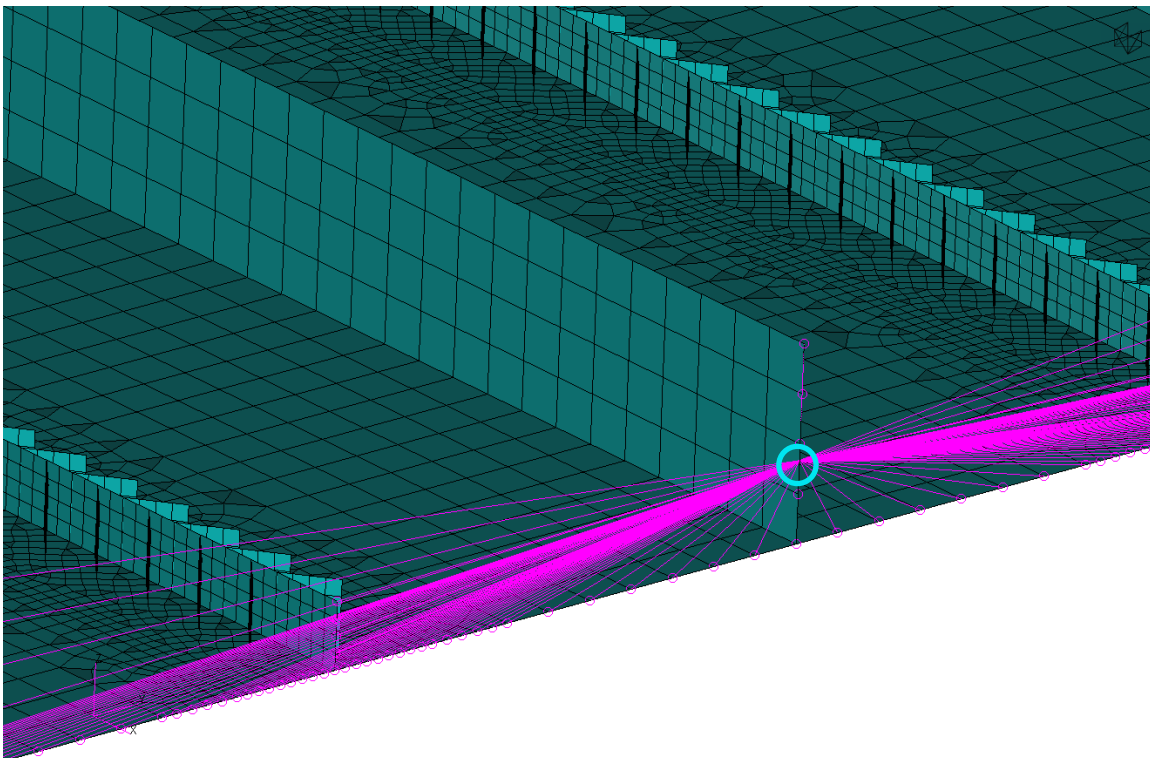
4.1.4 Okrajové podmínky a zatížení

Panel je na obou hranách kolmých na zatížení i výztuhy vetknut, což je realizováno odebráním všech šesti stupňů volnosti s pomocí užití SPC podmínky. Na obou těchto hranách je vytvořen MPC RBE2 prvek, kdy uzly ležící na hraně panelu (potahu, výztuh i zastavovačů růstu trhliny) byly daným RBE2 prvkům přiděleny jako podřízené tzv. „slave“ uzly a vedoucí „master“ uzel byl vytvořen v těžišti zmíněné skupiny uzlů. Na tyto RBE2 prvky bude v textu odkazováno jako na RBE2 prvek 1 a RBE2 prvek 2 očíslované vzestupně podél kladného směru osy x. Vedoucí uzel RBE2 prvku 1 v prezentovaném případě H10TW2BW2BL9 má číslo 3 a vedoucí uzel RBE2 prvku 2 má číslo 2. Obrázek 76 ukazuje část RBE2 prvku 2, značen růžovou barvou. Tyrkysovým prstencem je zvýrazněn příslušný vedoucí uzel.

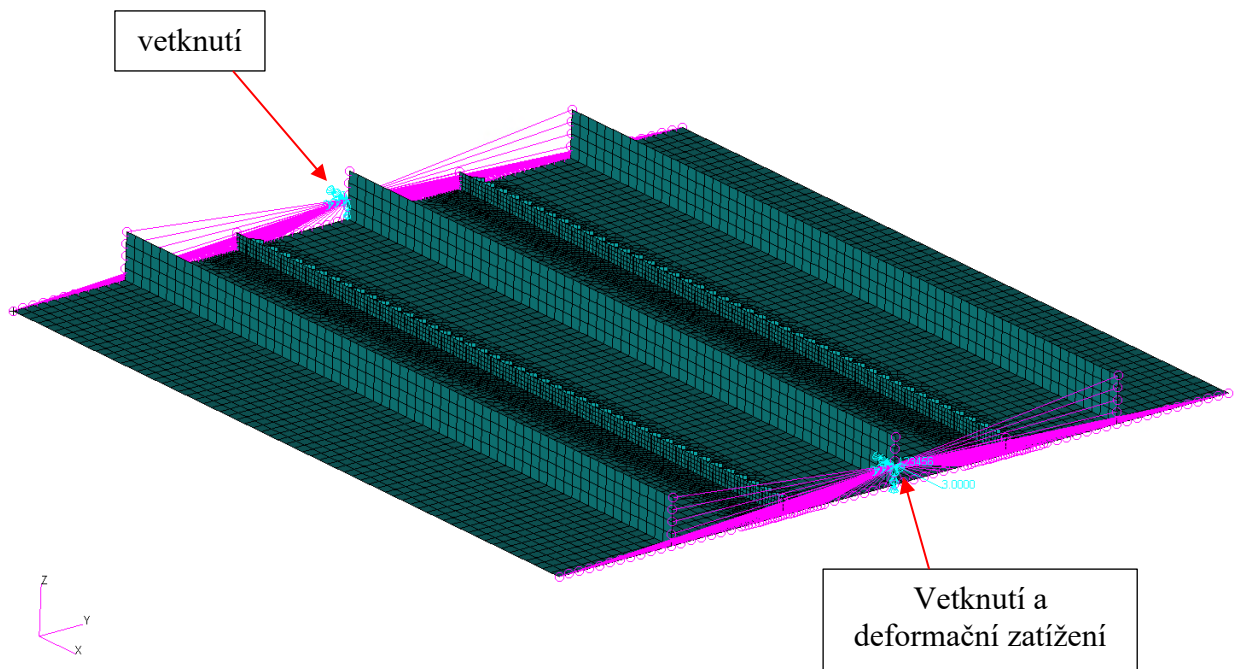
Do zmíněných vedoucích uzlů je zaveden výše zmíněný SPC prvek simulující vetknutí, přičemž daný MPC RBE2 tuto podmínku „rozvádí“ na celou hranu.

Zatížení má formu nucené deformace hrany s RBE2 prvkem 2 v záporném směru osy x. Maximální deformační zatížení této hrany, ke kterému ve výpočtu dochází je -3 mm. Obrázek 77 ukazuje celý panel s okrajovými podmínkami (značené tyrkysovou barvou) a MPC RBE2 prvky (značené růžovou barvou).

Obrázek 78 ukazuje zadání okrajových podmínek a zatížení ve vstupním souboru formátu .bdf pro řešič MSC NASTRAN u varianty H10TW2BW2BL9.



Obrázek 76 Master uzel RBE2 prvku 2 a uzel (GRID) číslo 2



Obrázek 77 Okrajové podmínky na MKP modelu panelu

```

$ Loads for Load Case : DEFAULT.SC1
SPCADD 4      3      2
$ Enforced Displacements for Load Set : spcd.2.r1
SPCD 5      2      1      -3.
LOAD 5      1.      1.      1
$ Displacement Constraints of Load Set : spc1.3
SPC1 3      123456 2      3

```

Obrázek 78 Zadání okrajových podmínek a zatížení v .bdf vstupního souboru řešiče MSC NASTRAN

4.1.5 Materiál

Panel je uvažován z hliníkové slitiny 7075 T-6, přičemž jsou zadány jeho vlastnosti jako následující:

Youngův modul pružnosti: $E = 71016 \text{ MPa}$

Mez kluzu: $R_{p02} = 427 \text{ MPa}$

Poissonův poměr: $\mu = 0,33$

Hustota: $\rho = 2710 \text{ kg/m}^3$

Pro výpočet je uvažován materiálový model jako elastoplastický bilineární.

V případě bilineárního modelu dochází k deformaci dle Hookova zákona se směrnicí E do dosažení meze kluzu a následně podle daného tangenciálního modulu deformace E_T . Respektive, do řešiče je zadán tzv. *Hardening slope H*, který je určen jako [34]:

$$H = \frac{E_T}{1 - \frac{E_T}{E}} \quad (29)$$

Tahový diagram materiálu při uvažování elasto-plastického bilineárního modelu viz Obrázek 80.

Obrázek 79 ukazuje zadání materiálových vlastností ve vstupním souboru formátu .bdf pro řešič MSC NASTRAN.

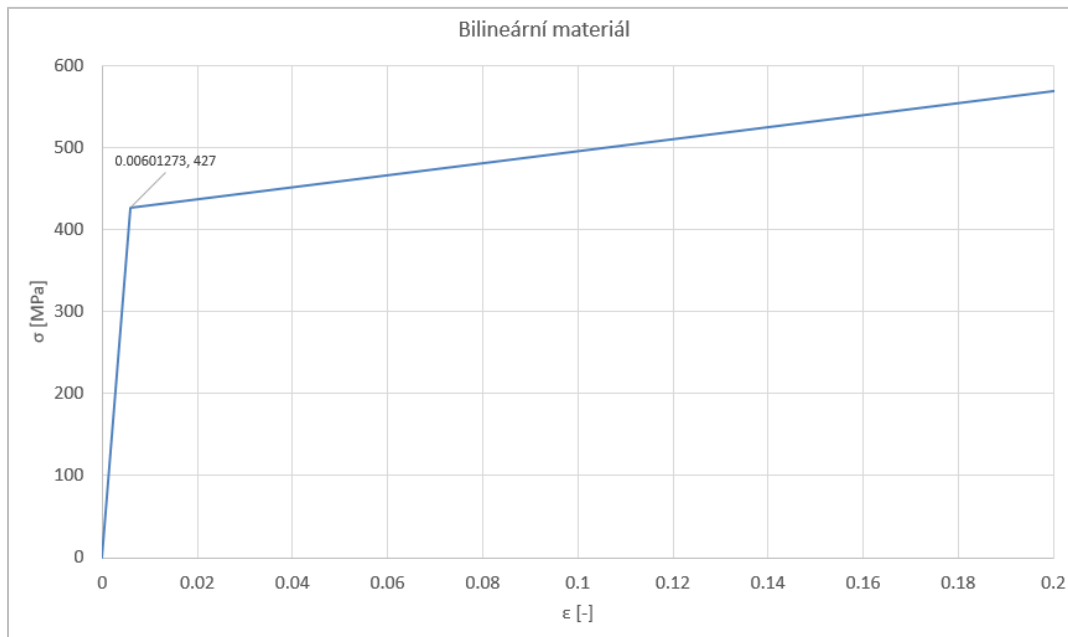
```

$ Referenced Material Records
$ Material Record : mat1.1
$ Description of Material :
MATS1 1 PLASTIC 740. 1 1 427.
MAT1 1 71016. 26697.74 .33 2.71

```

Obrázek 79 Zadání materiálových vlastností v .bdf vstupního souboru řešiče MSC NASTRAN

Dodatečný komentář k volbě elasto-plastického bilineárního modelu pro výpočet je uveden v 4.2.2.



Obrázek 80 Tahový diagram u bilineárního modelu

4.1.6 Nastavení analýzy

U jednotlivých variant byla prováděna nelineární statická analýza s využitím sekvence řešení *SOL 106*. Výpočet byl standardně nastaven na 200 kroků, kdy zatížení v prvním kroku odpovídalo 0,5 % zadaného deformačního zatížení -3 mm (tedy -0,015 mm) a zatížení finálního kroku pak odpovídalo -3 mm.

V případě selhání výpočtu pro nedosažení konvergence byl počet kroků navyšován a výpočet opakován. Standardně bylo pro dosažení konvergence v daném kroku povoleno řešiči použít až 120 iterací, byť v případě některých variant byl i tento parametr navýšen.

Obrázek 81 ukazuje zadání výpočtu ve vstupním souboru formátu .bdf pro řešič MSC NASTRAN u varianty H10TW2BW2BL9.

```
SOL 106
CEND
ECHO = NONE
SUBCASE 1
  SUBTITLE=DEFAULT
  NLPARM = 1
  SPC = 4
  LOAD = 5
  DISPLACEMENT(PLOT, SORT1, REAL)=ALL
  SPCFORCES(PLOT, SORT1, REAL)=ALL
  STRESS(PLOT, SORT1, REAL, VONMISES, BILIN)=ALL
BEGIN BULK
PARAM   POST      1
PARAM   AUTOSPC   NO
PARAM   LGDISP    1
PARAM   PRTMAXIM  YES
NLPARM  1          200          AUTO    25          120          ALL
```

Obrázek 81 Zadání parametrů výpočtu v .bdf vstupního souboru řešiče MSC NASTRAN

4.1.7 Typický výsledek

V této části je prezentován výsledek analýzy výše uváděného základního modelu panelu H10TW2BW2BL9, typově podobný i dalším variantám zkoumaných v této diplomové práci. Sledovanou veličinou při posuzování výsledků je reakční síla ve směru osy x přítomná ve vedoucím uzlu RBE2 prvku 1 (uzel má číslo 3, viz 4.1.4). Hodnota této reakční síly je určena pro každý krok výpočtu (hodnotu deformačního zatížení). Maximální hodnota této reakční síly v průběhu zatěžování bude nazývána F_{max} a je považována za únosnost vyztuženého panelu. U ostatních zkoumaných variant v kapitolách 5 a 6 je postupováno analogicky.

Obrázek 83 ukazuje průběh reakční síly při postupném deformačním zatěžování. Na obrázku jsou zvýrazněné momenty 1 až 5, které slouží pro lepší ilustraci průběhu zatěžování.

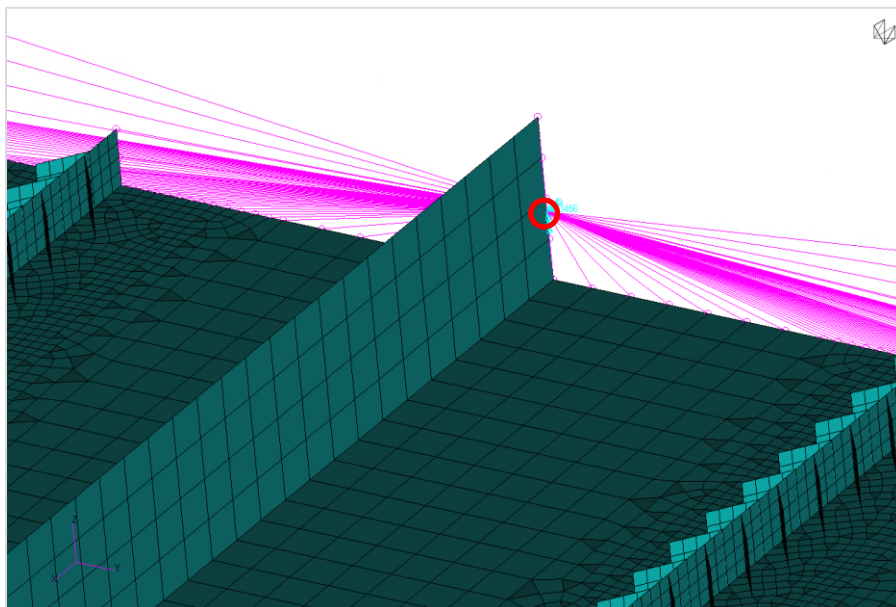
Moment 1 ukazuje situaci, kdy nedošlo k počátečnímu zvlnění potahu. Obrázek 84 ukazuje celkovou deformaci panelu a redukované napětí na panelu dle teorie HMM. V těchto obrázcích i dalších je deformace pro lepší vizualizaci graficky zobrazena v měřítku 10:1 vůči skutečné deformaci. Obrázky jsou ve větší velikosti také uvedené v Příloze 1.

Moment 2 ukazuje situaci, kdy dochází k počátečnímu zvlnění potahu. Obrázek 85 ukazuje celkovou deformaci a redukované napětí pro moment těsně před zvlněním. Obrázek 86 ukazuje celkovou deformaci a redukované napětí pro moment těsně po zvlnění.

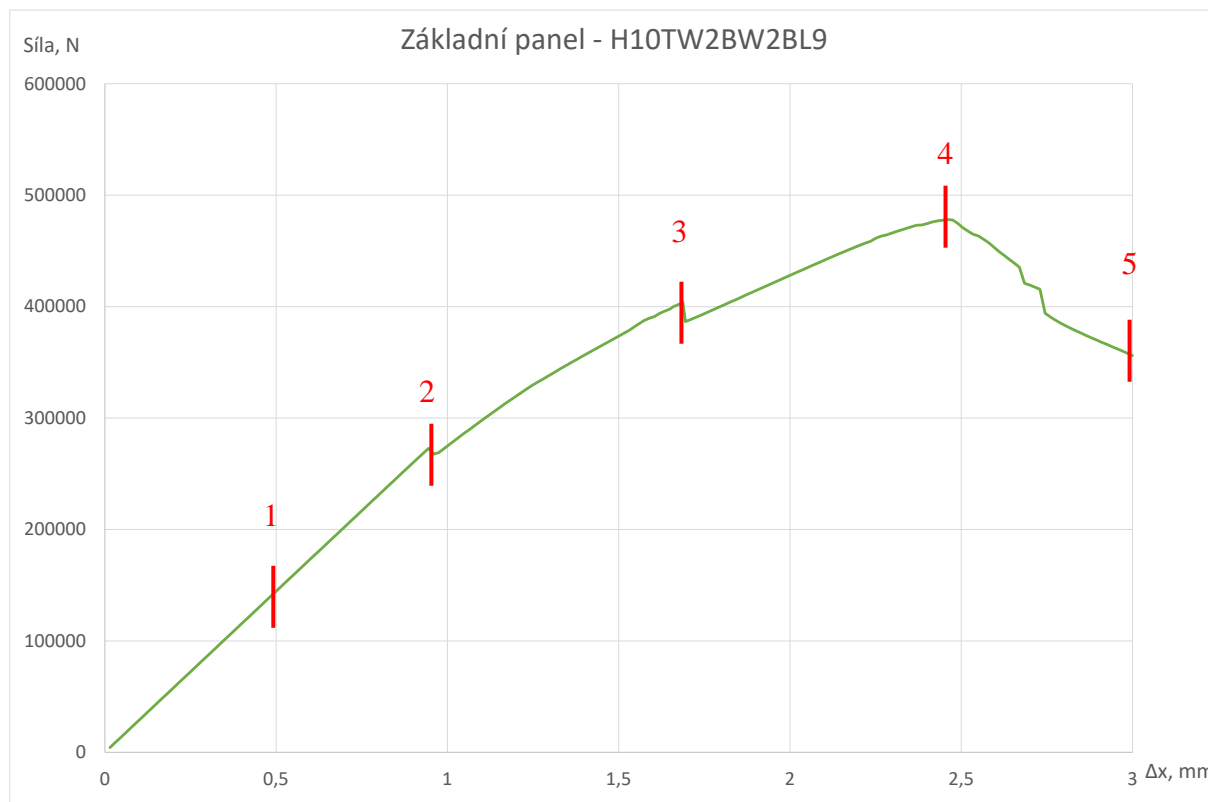
Moment 3 ukazuje situaci, kdy dojde ke změně počtu půlvln v potahu ze dvou na tři. Obrázek 87 ukazuje celkovou deformaci a redukované napětí v momentě těsně před změnou počtu půlvln. Obrázek 88 ukazuje celkovou deformaci a redukované napětí těsně po změně. Lze vidět, že napětí v zastavovačích rústu trhliny překračuje mez kluzu $R_{p02} = 427 \text{ MPa}$. V tuto chvíli zřejmě přestávají zastavovače trhlín být schopné přejímat významné další zatěžování.

Moment 4 ukazuje situaci, kdy je pozorována maximální reakční síla F_{max} a panel se nachází na mezi únosnosti. V tomto případě $F_{max} = 478150,9 \text{ N}$. Obrázek 89 ukazuje celkovou deformaci a redukované napětí v tomto okamžiku.

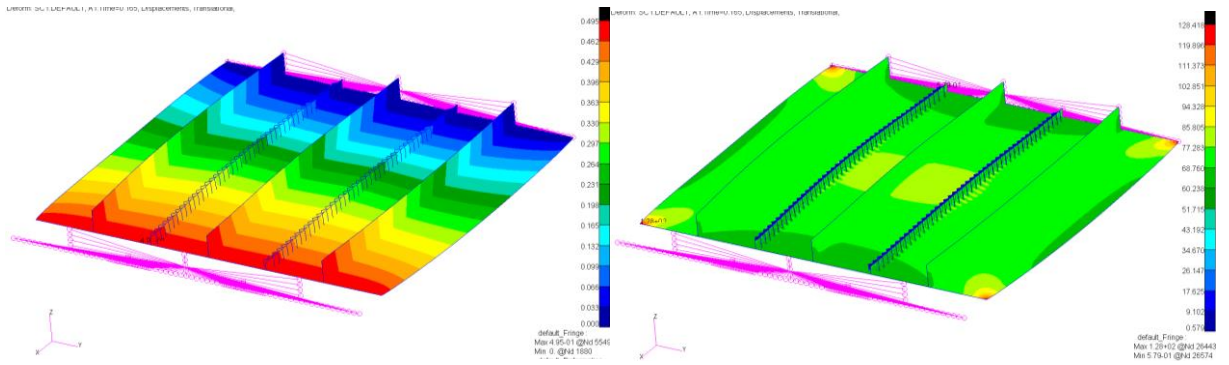
Moment 5 ukazuje situaci dosažení maximálního deformačního zatížení a konec výpočtu. Obrázek 90 ukazuje celkovou deformaci a redukované napětí.



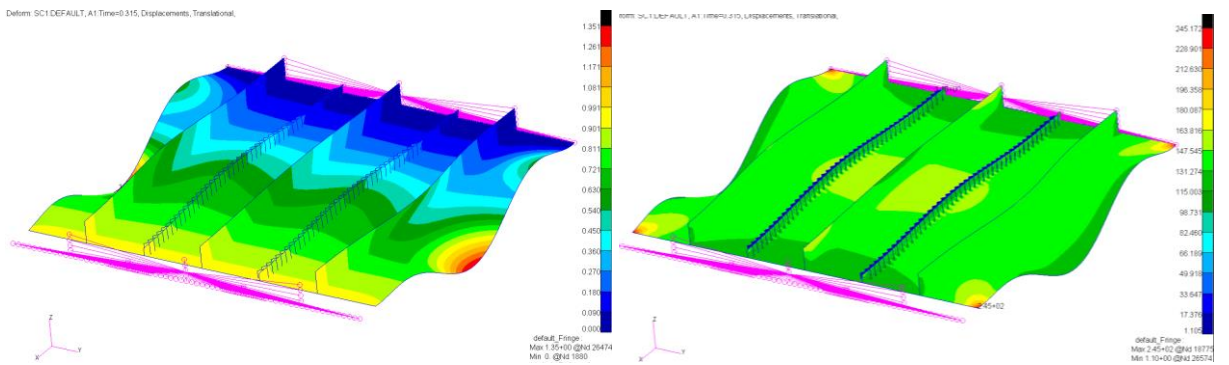
Obrázek 82 Vedoucí uzel pro odečítání reakční síly



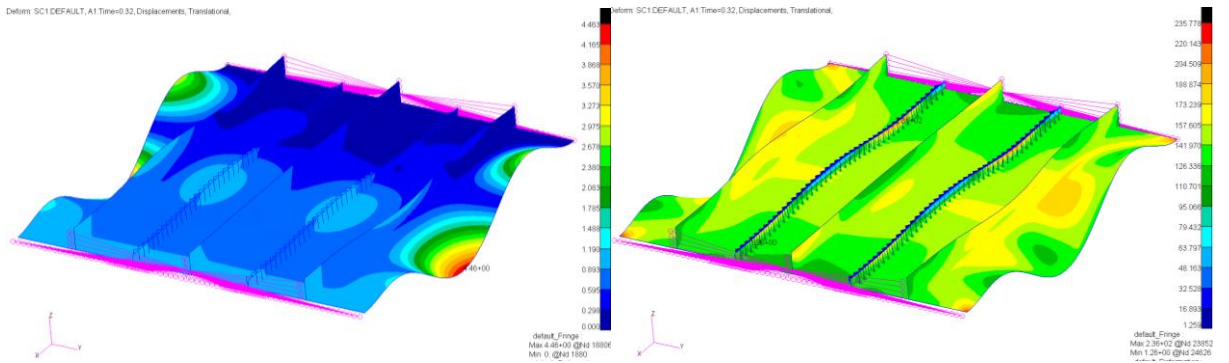
Obrázek 83 Průběh reakční síly pro základní panel H10TW2BW2BL9



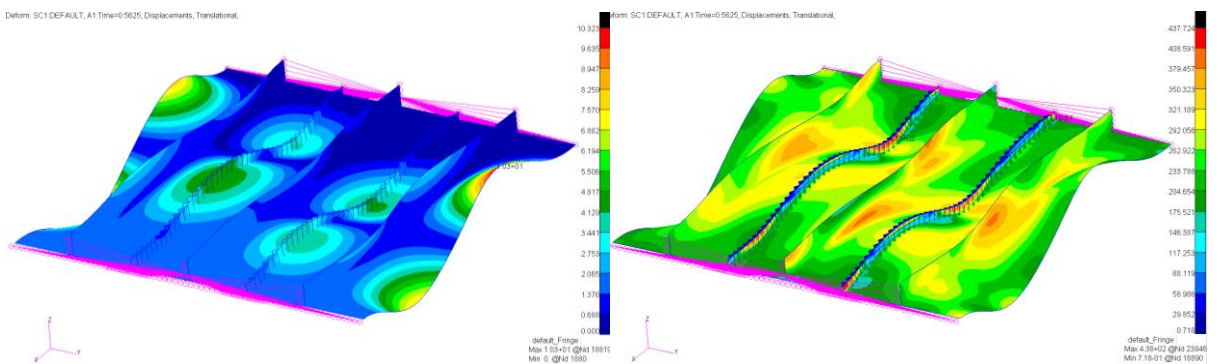
Obrázek 84 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 16,5 % maximálního deformačního zatížení (1)



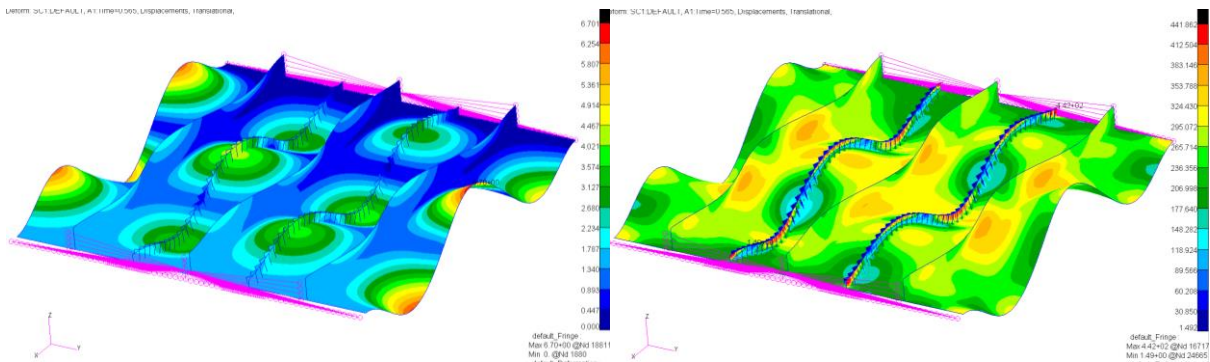
Obrázek 85 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 31,5 % maximálního deformačního zatížení (2)



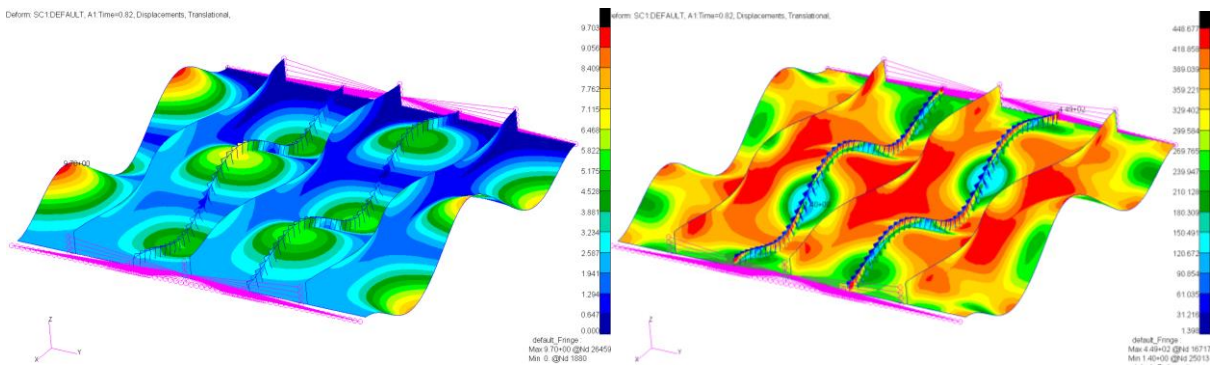
Obrázek 86 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 32 % maximálního deformačního zatížení (2)



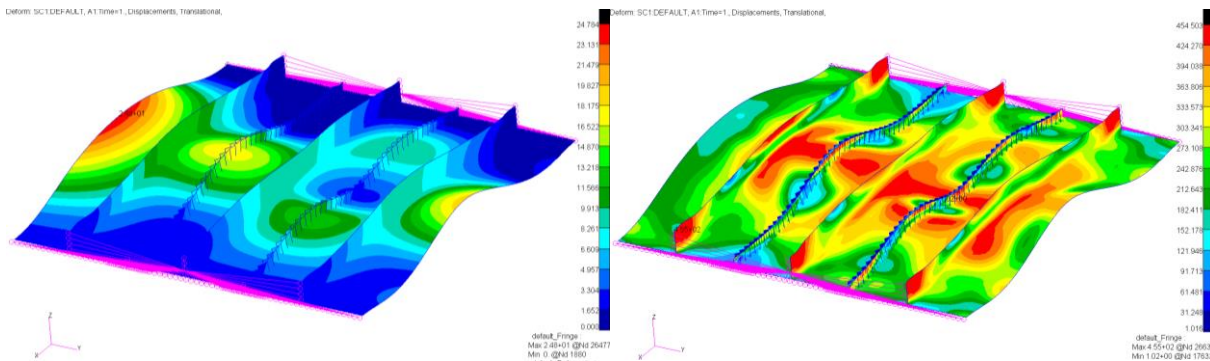
Obrázek 87 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 56,25 % maximálního deformačního zatížení (3)



Obrázek 88 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 56,5 % maximálního deformačního zatížení (3)



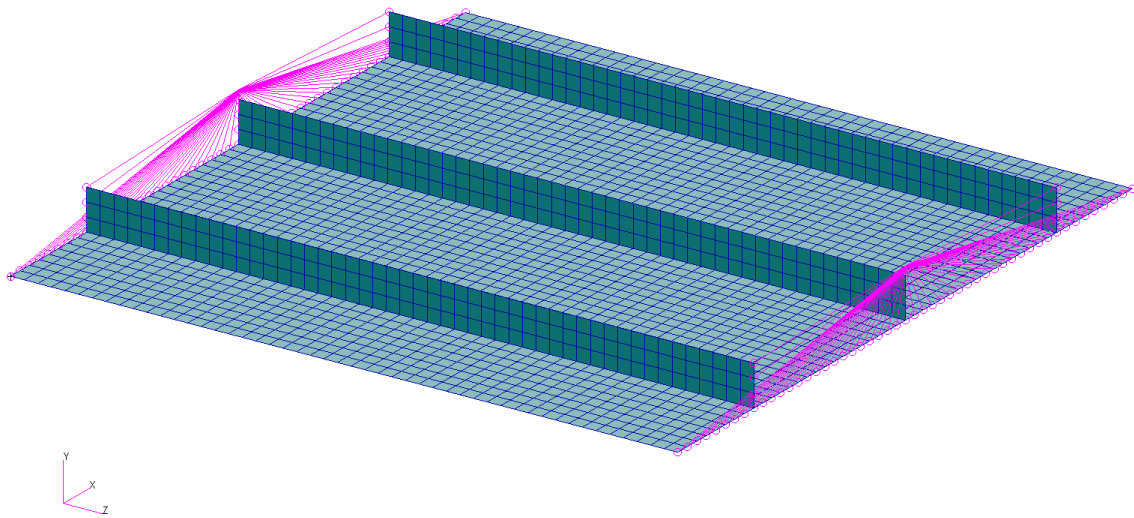
Obrázek 89 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 82 % maximálního deformačního zatížení – Mez únosnosti (4)



Obrázek 90 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 100 % maximálního deformačního zatížení (5)

4.2 Vliv počtu elementů a materiálového modelu na přesnost výpočtu

V rámci předmětu „Průmyslový projekt (N-TLT, N-STL)“ v letním semestru prvního ročníku navazujícího magisterského studia v akademickém roce 2021/2022 se autor této diplomové práce věnoval studiu vlivu různé hustoty sítě a použitého materiálového modelu na přesnost vyhodnocení únosnosti panelu geometricky téměř shodného s panelem prezentovaným v 4.1. Rozdílem bylo, že tenhle panel nebyl pro potenciální zvýšení únosnosti vyztužen zastavovači růstu trhliny, příklad použitého MKP modelu viz Obrázek 91. Zmíněný panel byl modelem skutečného panelu, jež byl předtím experimentálně podroben zkoušce v tlaku a byl dostupný průběh tlakové síly (viz Obrázek 92).

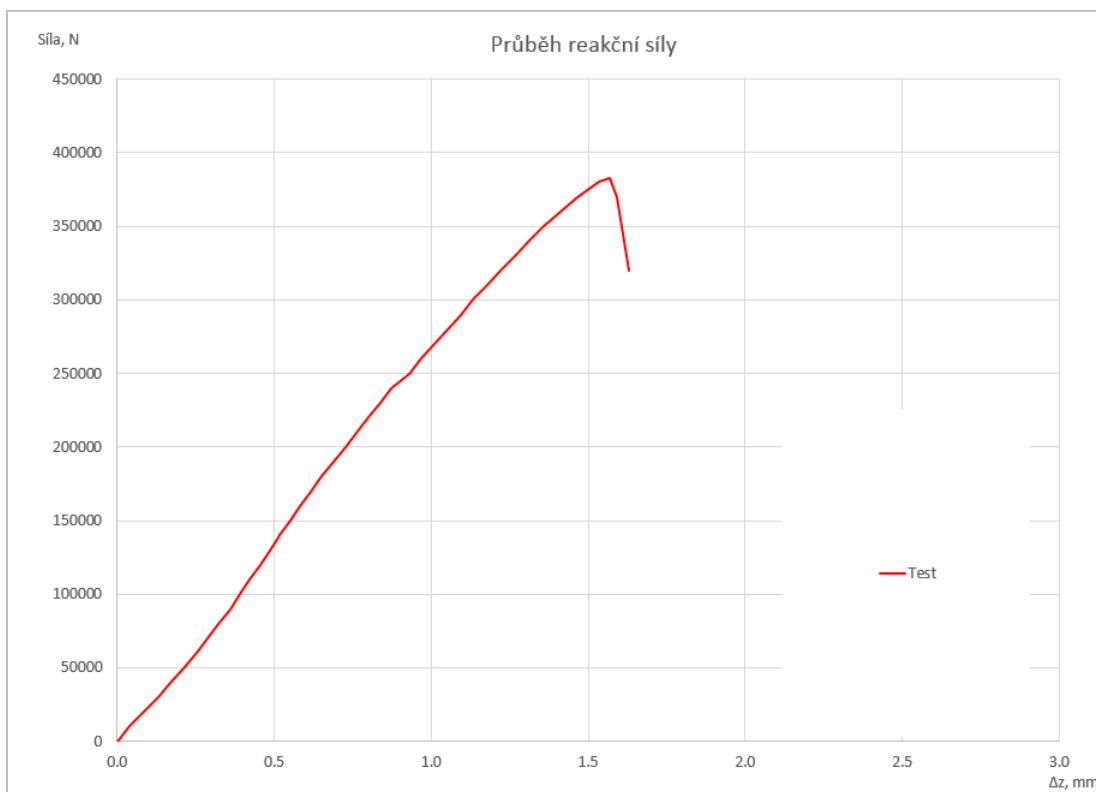


Obrázek 91 MKP model panelu bez zastavovačů růstu trhliny

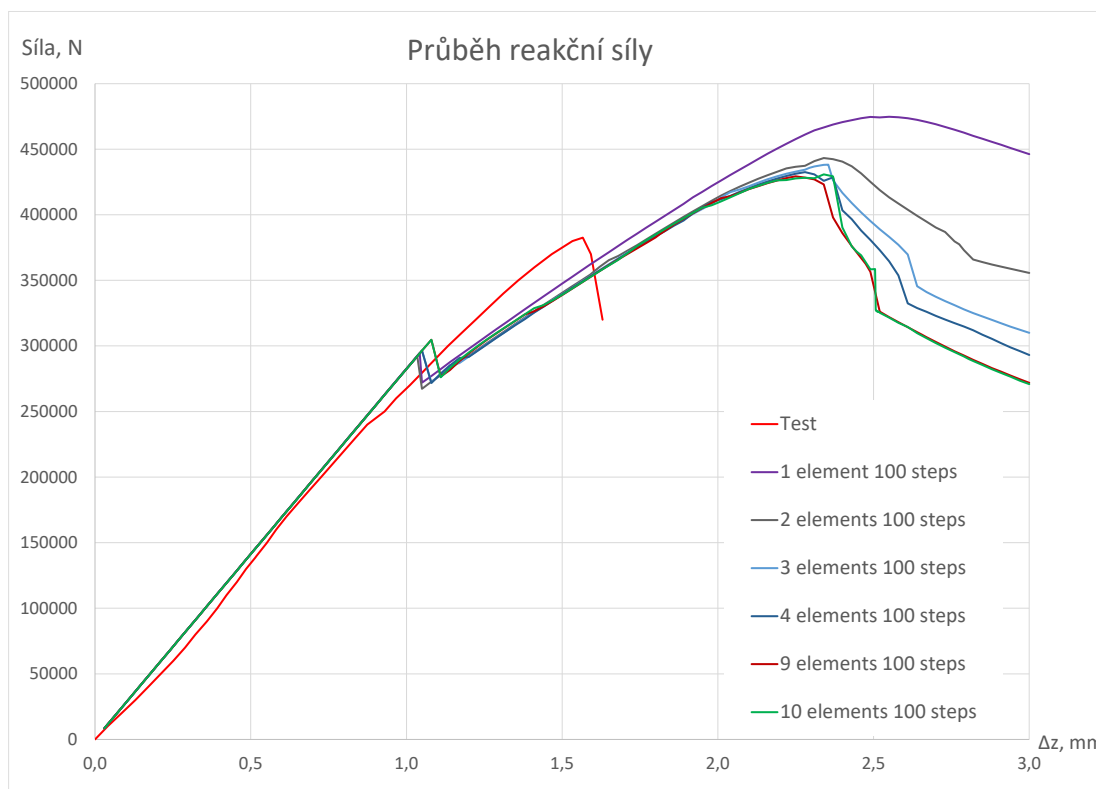
Závěry z tohoto „průmyslového projektu“ byly relevantní pro tvorbu modelů během zpracování této diplomové práce, následující strany se proto budou věnovat stručnému shrnutí dosažených poznatků.

4.2.1 Vliv počtu elementů na přesnost výpočtu

Primární snahou bylo zjistit vliv počtu elementů v síti MKP modelu panelu na přesnost získané maximální tlakové síly F_{max} , při deformačním zatěžování panelu a jeho ztrátě stability. Bylo sledováno 10 variant s velikostmi čtvercových QUAD4 elementů od 2,9 mm po 29 mm (odpovídající deseti elementům na výšku výztuhy v prvním případě a jednomu v druhém případě). Obrázek 93 zobrazuje průběh reakční síly na deformační zatěžování pro vybrané varianty a testovaný vzorek, se kterým byly výsledky srovnávány.



Obrázek 92 Experimentální průběh tlakové síly



Obrázek 93 Průběhy reakční síly pro různé množství elementů na výšku výztuhy

Tabulka 4 ukazuje hodnoty maximální tlakové síly F_{max} pro jednotlivé varianty jemnosti sítě panelu vyjádřené pomocí počtu elementů na výšku výztuhy. Zároveň srovnává dané síly F_{max} s maximální tlakovou silou F_{max10} pro variantu s deseti elementy na výšku výztuhy, který byl očekáván jako nejpřesnější a dále srovnává síly F_{max} s maximální tlakovou silou získanou při experimentu $F_{maxtest}$. Lze vidět, že i nejpřesnější zkoumané varianty se oproti experimentálně získané síle liší o 12,2 % až 12,6 % a také, že prosté zvyšování počtu elementů nezbytně neposkytuje přesnější výsledek (varianty se sedmi, osmi a devíti elementy na výšku výztuhy poskytly přesnější výsledek, než varianta s deseti elementy na výšku výztuhy).

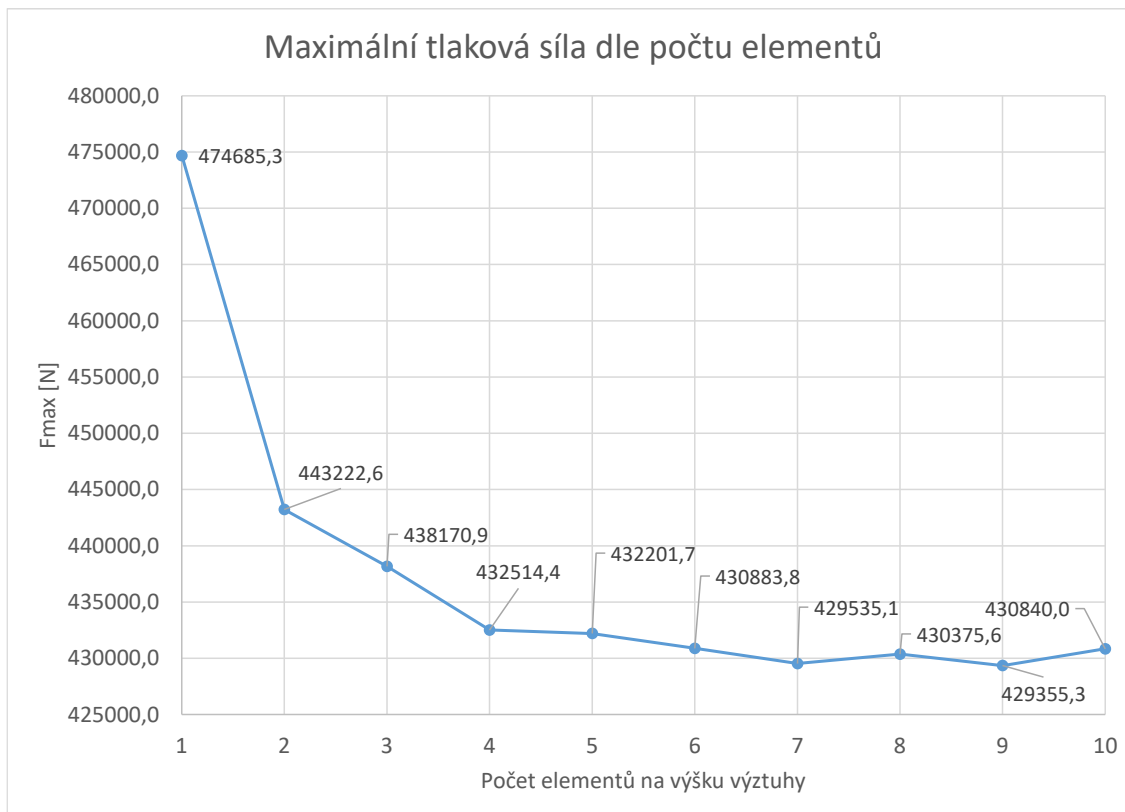
Rovněž lze vidět, že od použití čtyř elementů na výšku výztuhy další zjemňování sítě poskytuje zlepšení přesnosti maximálně v desetinách procent experimentální síly $F_{maxtest}$. Pro lepší vizualizaci tohoto posledního poznatku slouží Obrázek 94 zobrazující maximální reakční sílu F_{max} dle počtu elementů na výšku výztuhy.

Tabulka 4 Maximální tlaková síla pro různou jemnost sítě panelu

Počet elementů na výšku výztuhy	F_{max} [N]	Přesnost vztažena na 10 prvků (+% F_{max10}) [%]	Přesnost vztažena na test (+% $F_{maxtest}$) [%]
1	474685,3	10,2	24,1
2	443222,6	2,9	15,8
3	438170,9	1,7	14,5
4	432514,4	0,4	13,0
5	432201,7	0,3	13,0
6	430883,8	0,0	12,6
7	429535,1	-0,3	12,3
8	430375,6	-0,1	12,5
9	429355,3	-0,3	12,2
10	430840,0	0	12,6
TEST	382600,0	-	0

Tabulka 5 Počet elementů, uzlů a doba výpočtu různých variant jemnosti sítě panelu

Počet elementů na výšku výztuhy	Počet elementů celkem	Počet uzlů celkem	Doba výpočtu [s]	Doba výpočtu [min]
1	336	388	50	0,83
2	1320	1408	70	1,17
3	2891	3002	158	2,63
4	5148	5295	296	4,93
5	8118	8302	725	12,08
6	11682	12502	1256	20,93
7	15985	16242	2051	34,18
8	20592	20883	2284	38,07
9	26916	27418	3199	53,32
10	32505	32870	6360	106,00



Obrázek 94 Maximální tlaková síla F_{max} dle počtu prvků na výšku výztuhy

Význam posledního zmíněného poznatku nabývá na hodnotě, zohlední-li se Tabulka 5, která mimo celkový počet elementů a uzlů pro zkoumané varianty udává i výpočetní čas daných variant, jež byly prováděny na terminálu Leteckého ústavu Fakulty strojního inženýrství na Vysokém učení technickém v Brně. Lze vidět, že s přibývajícím počtem elementů dochází rovněž k dramatickému nárůstu výpočetního času, jehož lepší vizualizaci v sekundách poskytuje Obrázek 95.

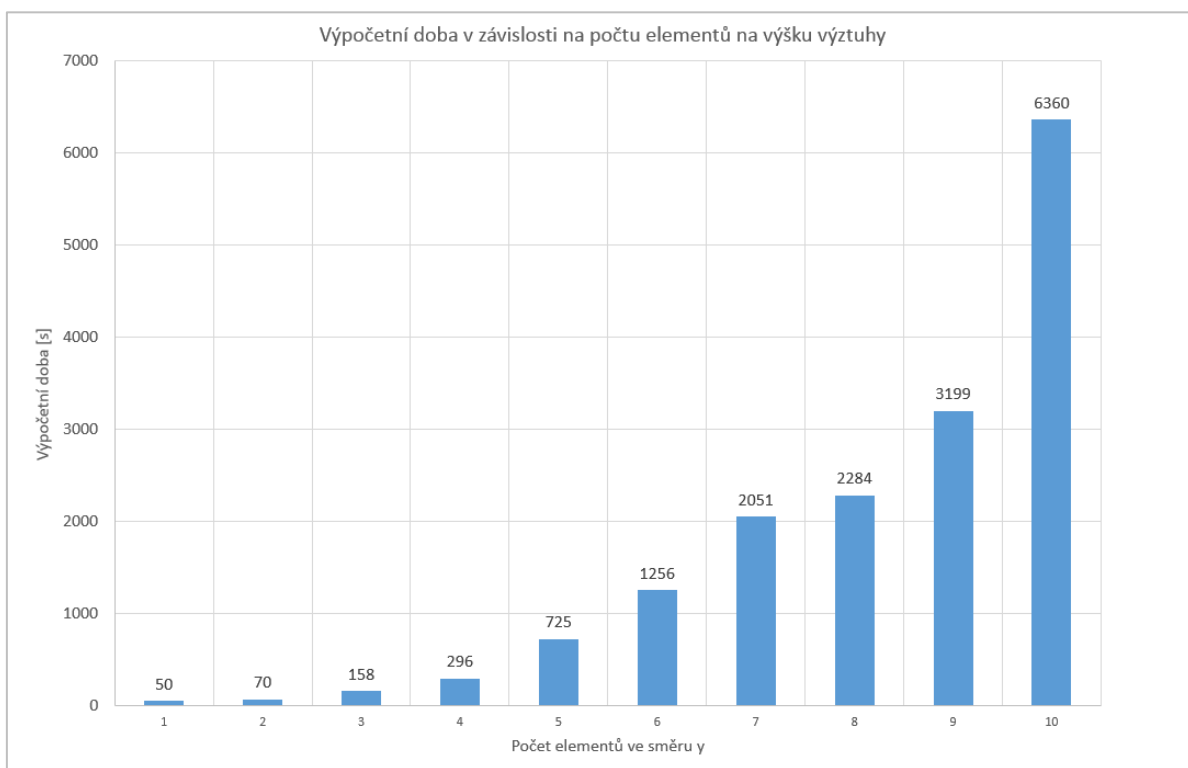
S ohledem na omezený nárůst přesnosti při zvyšování počtu elementů na výšku výztuhy nad čtyři, a naopak významný nárůst výpočetního času se jeví využití jemnosti sítě s počtem čtyř elementů na výšku výztuhy pro praktické účely jako nejlepší a tohoto poznatku je využíváno při tvorbě MKP modelů pro panely zkoumané v této diplomové práci, jak bylo zmíněno i v 4.1.3.

4.2.2 Vliv materiálového modelu na přesnost výpočtu

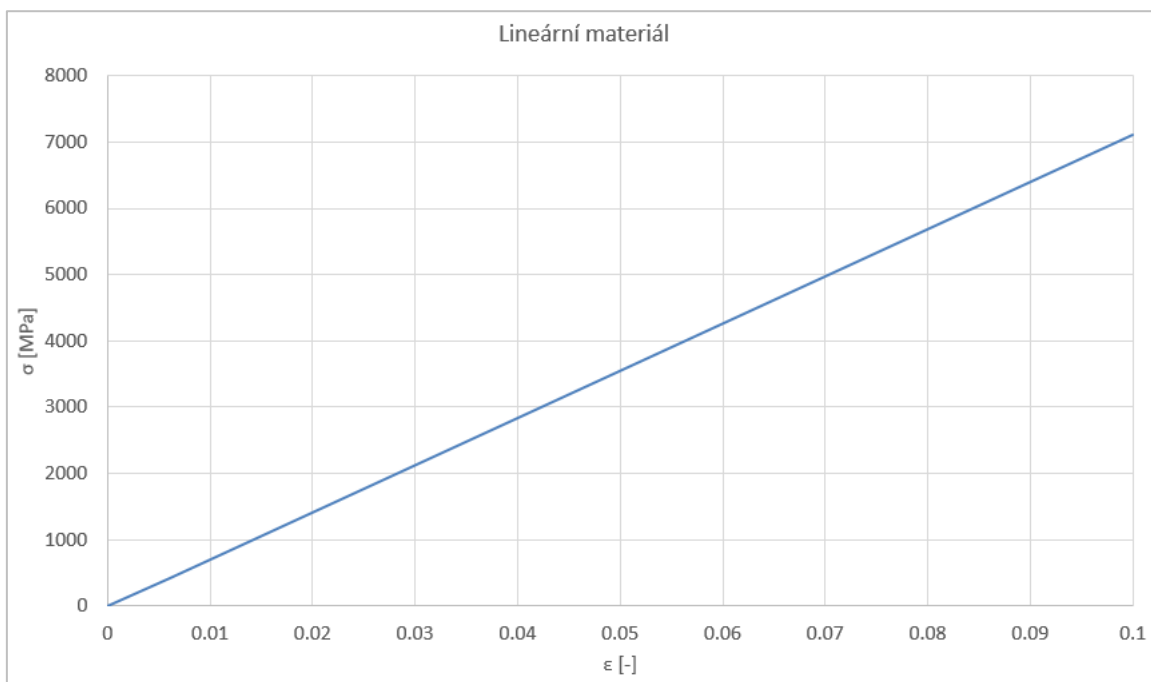
Kromě jemnosti MKP sítě byl sledován i vliv použitého materiálového modelu. Jednalo se o elastický lineární model, bilineární elasto-plastický model a tabulkově zadaný elasto-plastický model. V případě lineárního modelu probíhá veškerá deformace pomocí Hookova zákona a „tahový diagram“ poté ukazuje Obrázek 96, kdy směrnicí je Youngův modul pružnosti E .

V případě bilineárního modelu dochází k deformaci dle Hookova zákona se směrnicí E do dosažení meze kluzu a následně podle daného tangenciálního modulu deformace E_T . Respektive, do řešiče je zadán tzv. *Hardening slope* H , který je určen dle Rovnice 29. „Tahový diagram“ bilineárního modelu viz Obrázek 97, jedná se o stejný materiálový model, který je popsán v 4.1.5.

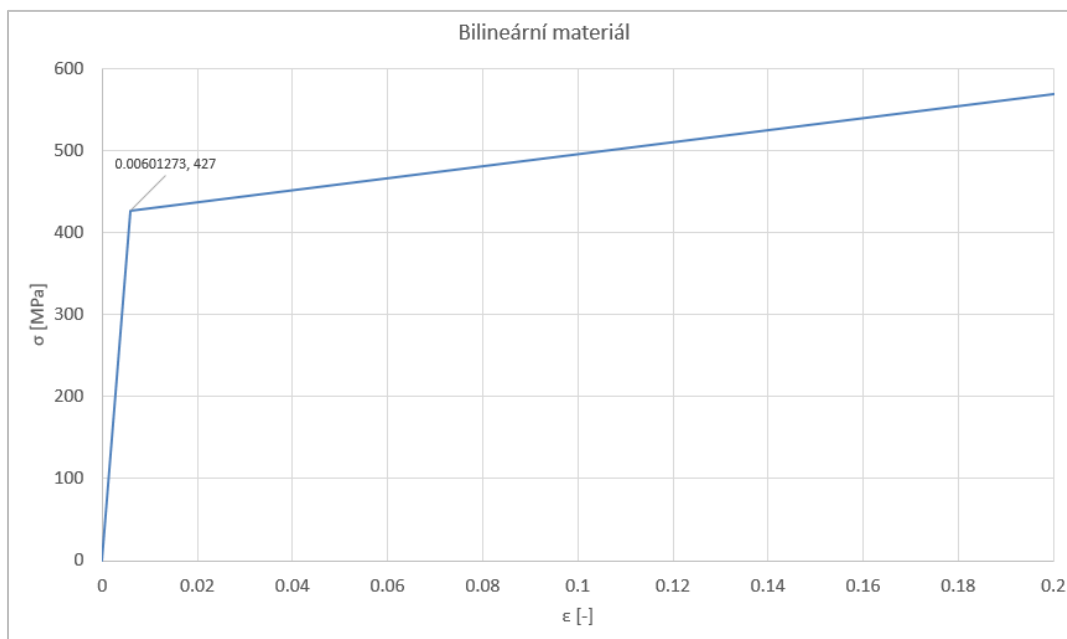
Tabulkově zadaný model má hodnoty tahového diagramu se skutečným napětím zadány pomocí tabulky bodů a ukazuje jej Obrázek 98.



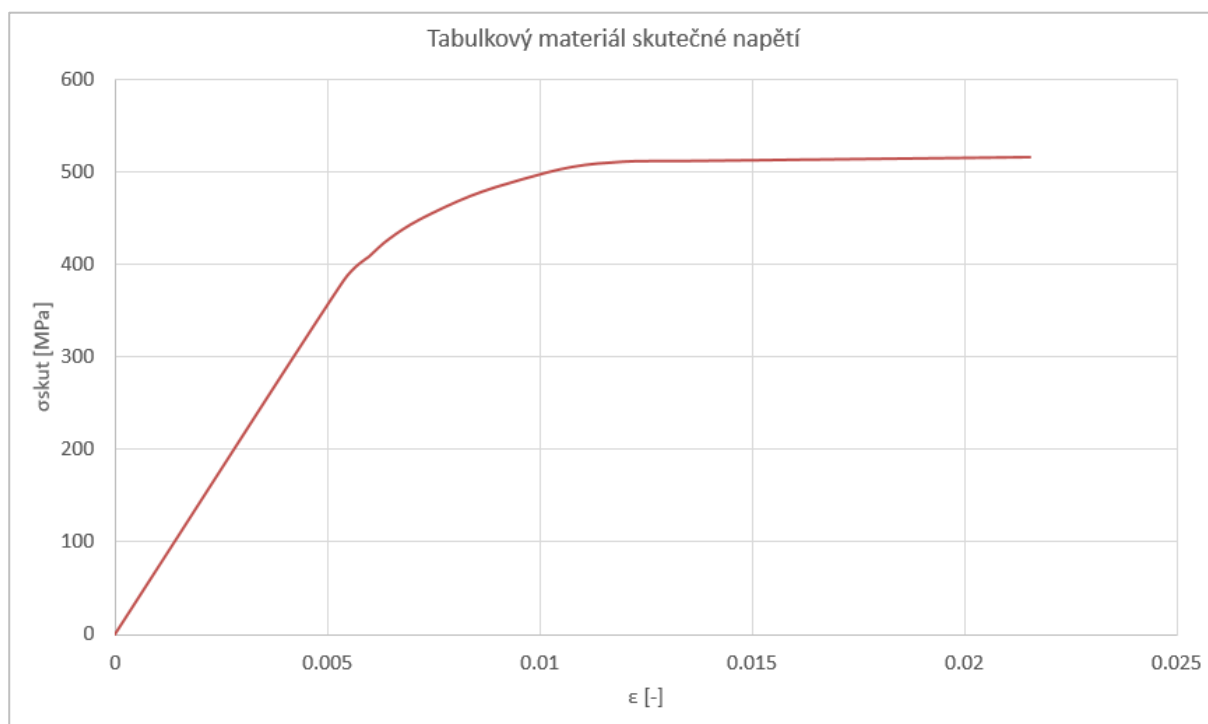
Obrázek 95 Závislost výpočetní doby na počtu elementů na výšku výztuhy



Obrázek 96 Tahový diagram u lineárního modelu



Obrázek 97 Tahový diagram u bilineárního modelu

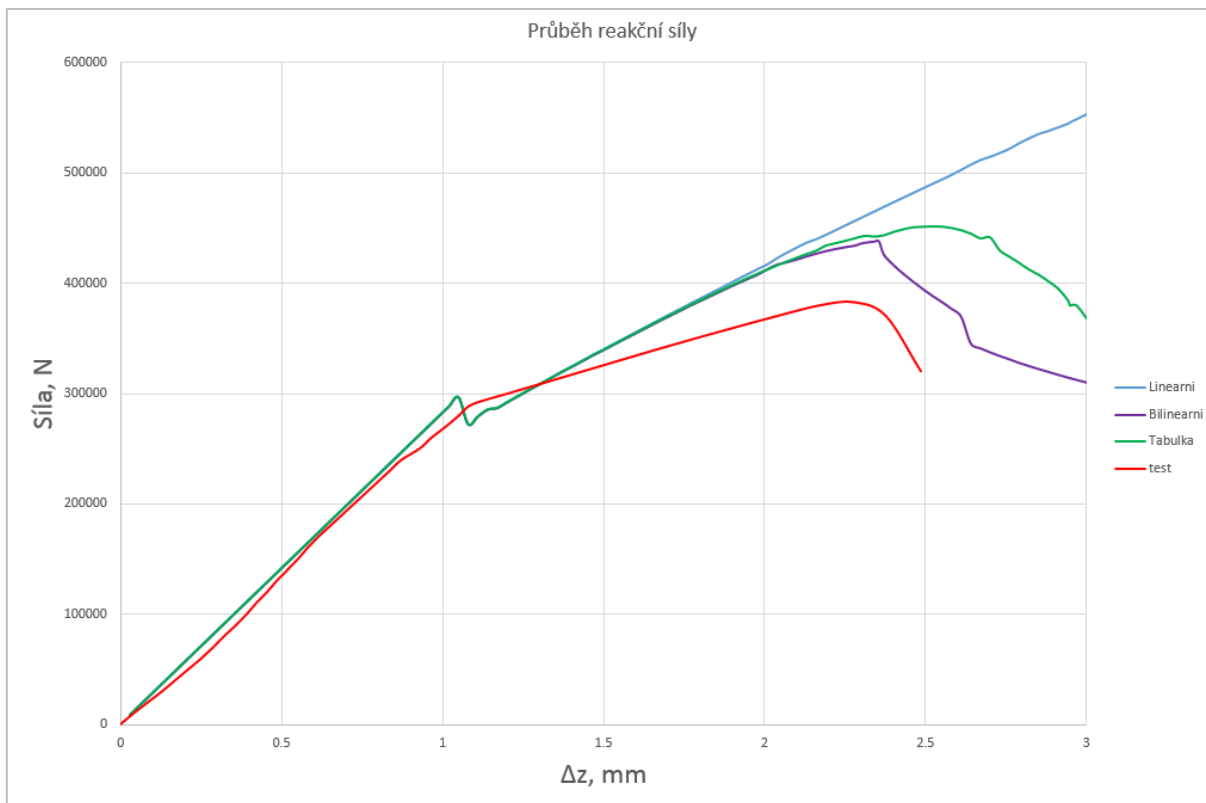


Obrázek 98 Tahový diagram skutečného napětí při zadání tabulkou

Obrázek 99 ukazuje výsledný průběh reakční síly pro jednotlivé materiálové modely a pro tlakovou sílu při experimentu. Lze vidět, že nejnižší, a tedy nejpřesnější maximální tlakovou reakční sílu poskytuje bilineární model, což blíže uvádí i Tabulka 6, která k maximální tlakové síle F_{max} jednotlivých materiálových modelů poskytuje i přesnost vztaženou na procentuální nárůst maximální síly při experimentu $F_{maxtest}$ a dále i přesnost vztaženou na procentuální nárůst

maximální tlakové reakční síly u bilineárního modelu F_{maxbi} , jež byl považován za standardní model pro výpočet.

Lze konstatovat, že bilineární model poskytuje nejpřesnější výsledek, je tedy smysluplné jej užívat i ve výpočtech prováděných v této diplomové práci.



Obrázek 99 Průběh reakční síly pro různé varianty materiálového modelu

Tabulka 6 Velikost maximální tlakové síly pro různé materiálové modely

Model materiálu	F_{max} [N]	přesnost vztažena na bilineární materiál (+% F_{maxbi}) [%]	přesnost vztažena na test (+% $F_{maxtest}$) [%]
Lineární	553095,4	26,2	44,6
Bilineární	438170,9	0,0	14,5
Tabulkový	451237,5	3,0	17,9
Test	382600,0	-	0,0

4.3 Únosnost prostého vyztuženého panelu s úpravou sítě pro zastavovače

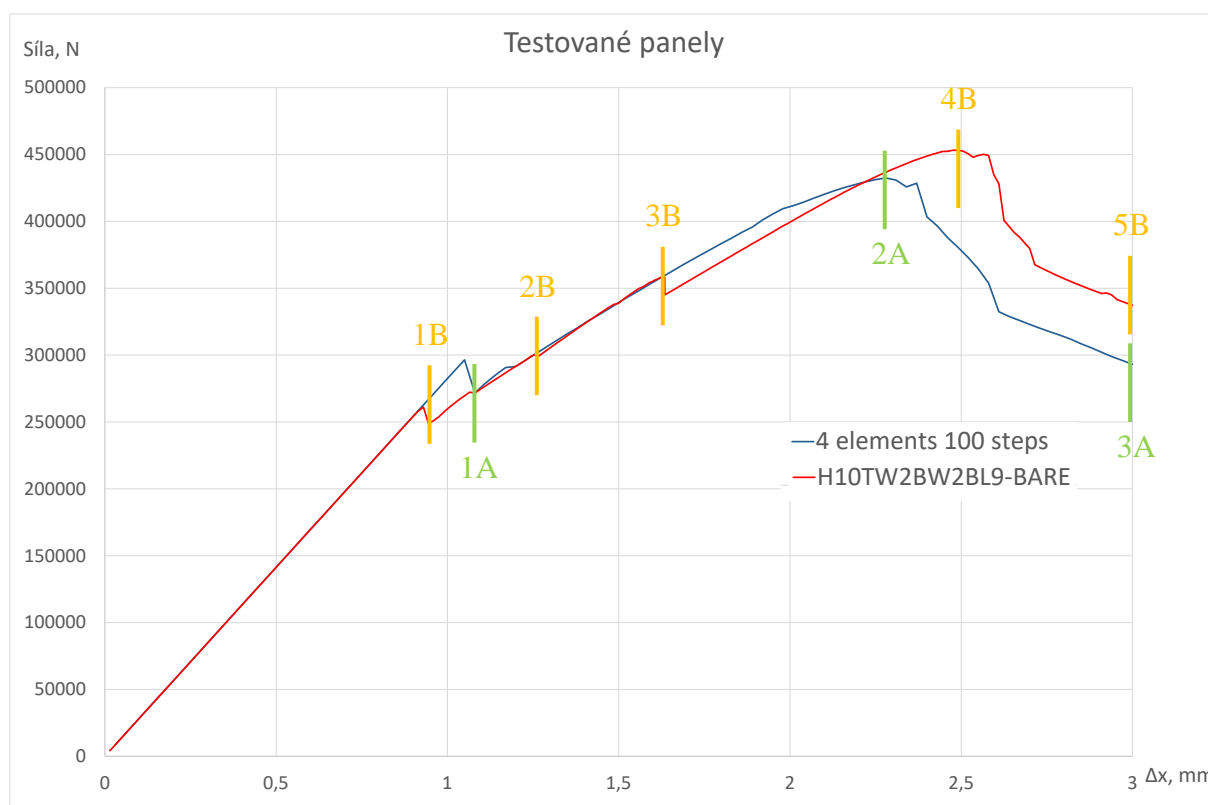
Pro určení účinnosti zastavovačů růstu trhliny na únosnost panelu je třeba srovnat únosnost daného vyztuženého panelu se zastavovači s prostým vyztuženým panelem bez zastavovačů růstu trhliny. Z hlediska praktičnosti výpočtu by se nabízelo určovat únosnost prostého panelu s pomocí modelu s rovnoměrnou sítí z QUAD4 prvků, který typově ukazuje Obrázek 91 (byť s vyšším počtem elementů dle poznatků 4.2.1).

Nicméně vytvoří-li se síť pro analýzu únosnosti prostého vyztuženého panelu pomocí odstranění elementů zastavovačů růstu trhliny a zachová se nerovnoměrná síť na potahu panelu

uzpůsobená přítomnosti zastavovačů růstu trhliny, pak lze zjistit, že rozdíly ve spočítané únosnosti tohoto panelu s nerovnoměrnou sítí a tím s rovnoměrnou sítí nejsou nevýznamné.

Pro ilustraci tohoto slouží Obrázek 100, který ukazuje průběh reakční síly u tlakem zatěžovaného panelu s rovnoměrnou obdélníkovou sítí o čtyřech elementech na výšku výztuhy (modrá barva) s průběhem reakční síly u tlakem zatěžovaného panelu vytvořeném odstraněním elementů zastavovačů růstu trhliny u panelu H10TW2BW2BL9 (červená barva), který byl prezentován jako příklad v 4.1. Tento prostý panel vytvořený odstraněním elementů zastavovačů růstu trhliny, stejně jako všechny typově podobné jsou v kódovém označení variant představeném v 4.1.2 označené pomocí doplnění přípony „-BARE“ za název varianty, v případě modelu prostého panelu vzniklého z varianty H10TW2BW2BL9 se jedná tedy o „H10TW2BW2BL9-BARE.“

Z obrázku je patrné, že únosnost panelu s nerovnoměrnou sítí je vyšší než u panelu s rovnoměrnou sítí. Pro posouzení vlivu zastavovačů růstu trhliny na zvýšení únosnosti panelu je tedy praktičtější získanou únosnost z MKP výpočtu panelu se zastavovači růstu trhliny srovnávat se získanou únosností prostého panelu, který s ním sdílí síť potahu. Pokud by se získaná únosnost srovnávala s únosností prostého panelu s rovnoměrnou sítí, tak by účinnost zastavovačů růstu trhliny na únosnost panelu byla zřejmě nadhodnocená.

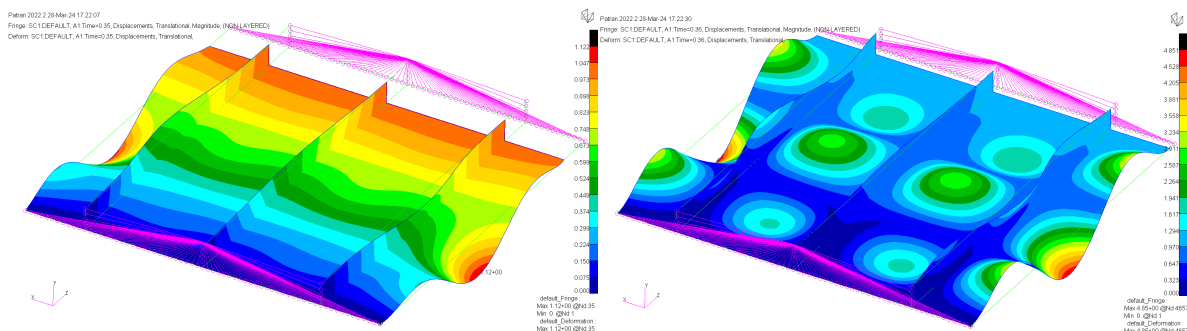


Obrázek 100 Průběh reakční síly pro prostý panel s rovnoměrnou sítí a pro panel se sítí uzpůsobenou zastavovačům růstu trhliny

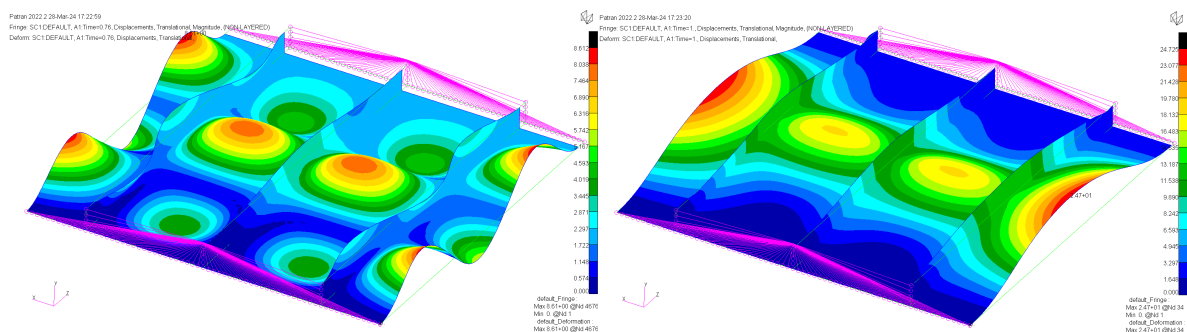
Na obrázku jsou zvýrazněné určité momenty zatěžování, označované u prostého panelu s rovnoměrnou sítí písmenem A, v případě panelu s nerovnoměrnou sítí písmenem B. S pomocí

těchto momentů zatěžování je na dalších stranách ilustrována rozdílnost v průběhu deformace panelů při zatěžování.

Obrázek 101 ukazuje rozložení deformace v moment 1A prvotního zvlnění potahu panelu s rovnoměrnou sítí. Obrázek 102 (vlevo) ukazuje moment 2A meze únosnosti a Obrázek 102 (vpravo) ukazuje moment dosažení maximálního deformačního zatížení 3A. Pro snadnější viditelnost jsou deformace zobrazeny s měřítkem 10:1 vůči jejich skutečné velikosti. Obrázky jsou ve větší velikosti také uvedené v Příloze 2.

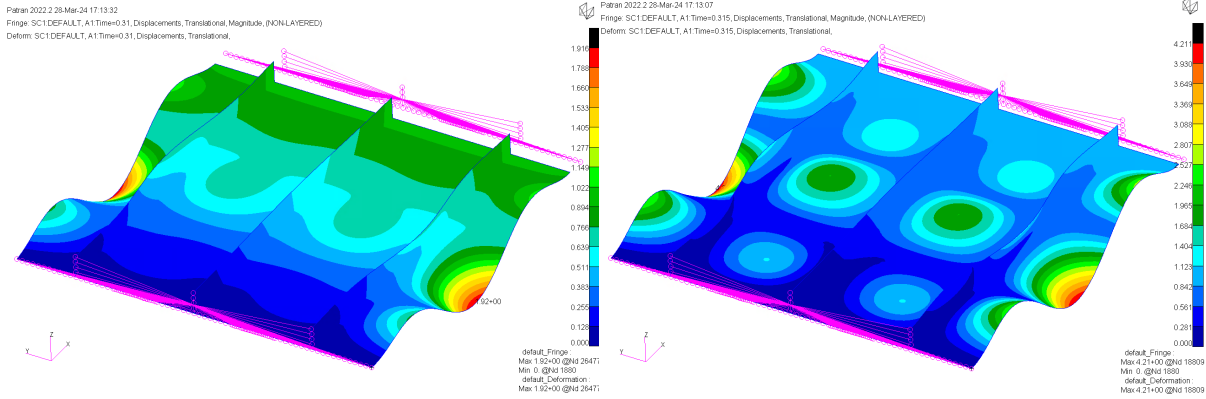


Obrázek 101 Prostý panel s rovnoměrnou sítí při 35 % maximálního deformačního zatížení (1A) (vlevo) a při 36 % maximálního deformačního zatížení (1A) (vpravo)

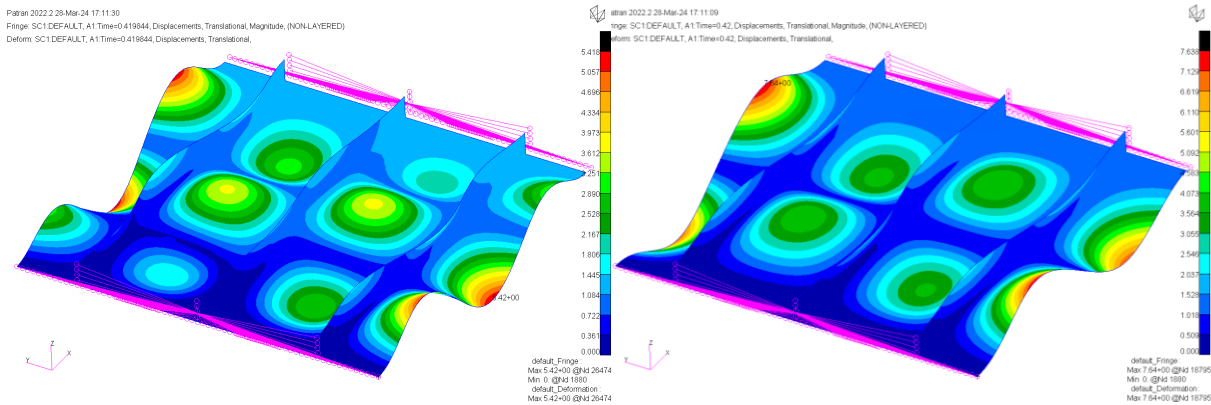


Obrázek 102 Prostý panel s rovnoměrnou sítí při 76 % maximálního deformačního zatížení – mez únosnosti (2A) (vlevo) a při 100 % maximálního deformačního zatížení (3A) (vpravo)

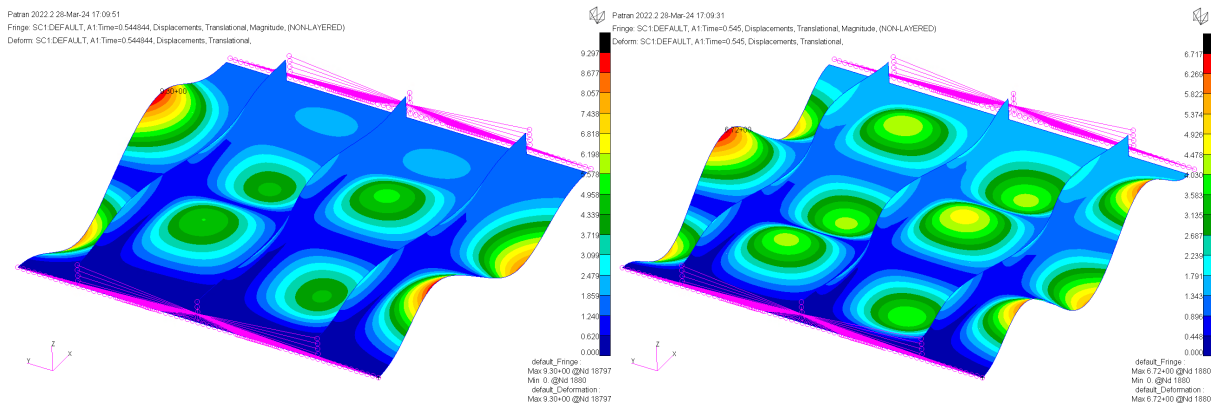
Obrázek 103 ukazuje rozložení deformace v moment 1B, kdy dochází k prvotnímu zvlnění potahu panelu s nerovnoměrnou sítí. Obrázek 104 ukazuje moment 2B, kdy u prostého panelu s nerovnoměrnou sítí nastává tzv. Mode Jumping (zmíněný v 2.4.8), který není u panelu s rovnoměrnou sítí přítomný. Obrázek 105 ukazuje moment 3B, kdy nastává další Mode Jumping (rovněž nepřítomný u panelu s rovnoměrnou sítí). Obrázek 106 (vlevo) ukazuje moment 4B meze únosnosti a Obrázek 106 (vpravo) ukazuje moment 4B, kdy je dosaženo maximálního deformačního zatížení výpočtu. Deformace jsou opět zobrazeny s měřítkem 10:1. Obrázky jsou ve větší velikosti také uvedené v Příloze 2.



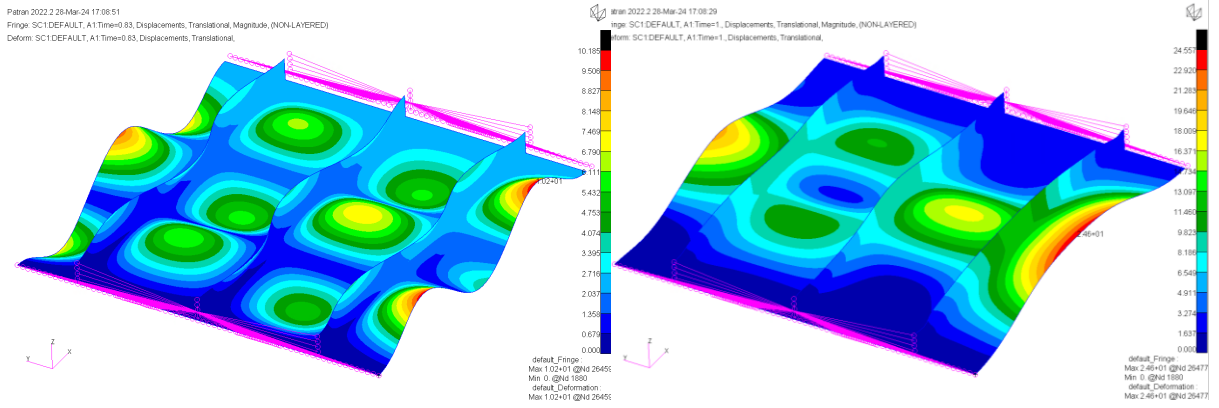
Obrázek 103 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 31 % maximálního deformačního zatížení (1B) (vlevo) a při 31,5 % maximálního deformačního zatížení (1B) (vpravo)



Obrázek 104 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 41,9 % maximálního deformačního zatížení (2B) (vlevo) a při 42 % maximálního deformačního zatížení (2B) (vpravo)



Obrázek 105 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 54,48 % maximálního deformačního zatížení (3B) (vlevo) a při 54,5 % maximálního deformačního zatížení (3B) (vpravo)



Obrázek 106 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 83 % maximálního deformačního zatížení – mez únosnosti (4B) (vlevo) a při 100 % maximálního deformačního zatížení (5B) (vpravo)

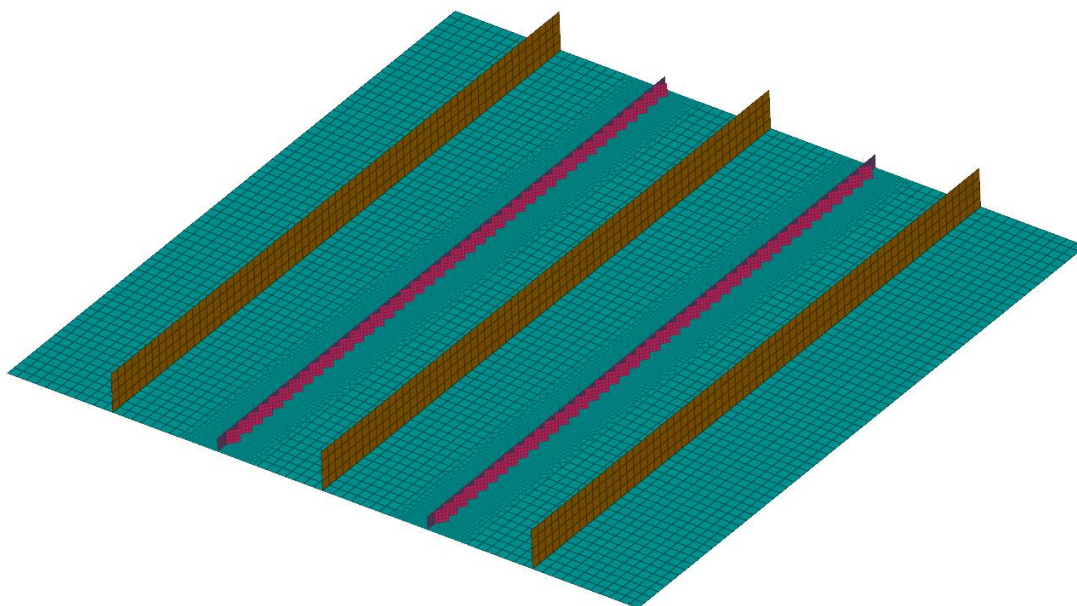
5. ZKOUŠENÍ RŮZNÝCH VARIANT ROZMĚRŮ ZASTAVOVAČŮ RŮSTU TRHLINY

Tato kapitola se bude věnovat prezentování zkoumaných geometrických variant panelů se zastavovači růstu trhliny a prezentování výsledků příslušných MKP analýz tlakového deformačního zatěžování s ohledem na dosažené zlepšení maximální únosnosti proti příslušnému vyztuženému panelu bez zastavovače.

5.1 Změna tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny (parametr w_T)

V této podkapitole je zkoumán vliv tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny w_T . Zkoumáno bylo devět variant o tloušťkách terminálu w_T 1 až 3 mm, s rozstupem tlouštěk mezi variantami $\Delta w_T = 0,25$ mm. Obrázek 107 zobrazuje model varianty H10TW2BW2BL9, který byl použit a sloužil jako základ modelů variant počítaných v této kapitole. Jedná se o stejný model, který byl prezentován v 4.1.

0:H10TW2BW2BL9_height.bdf : ORIGINAL STATE



Obrázek 107 Síť variant zkoumaných na změnu tloušťky terminálu w_T

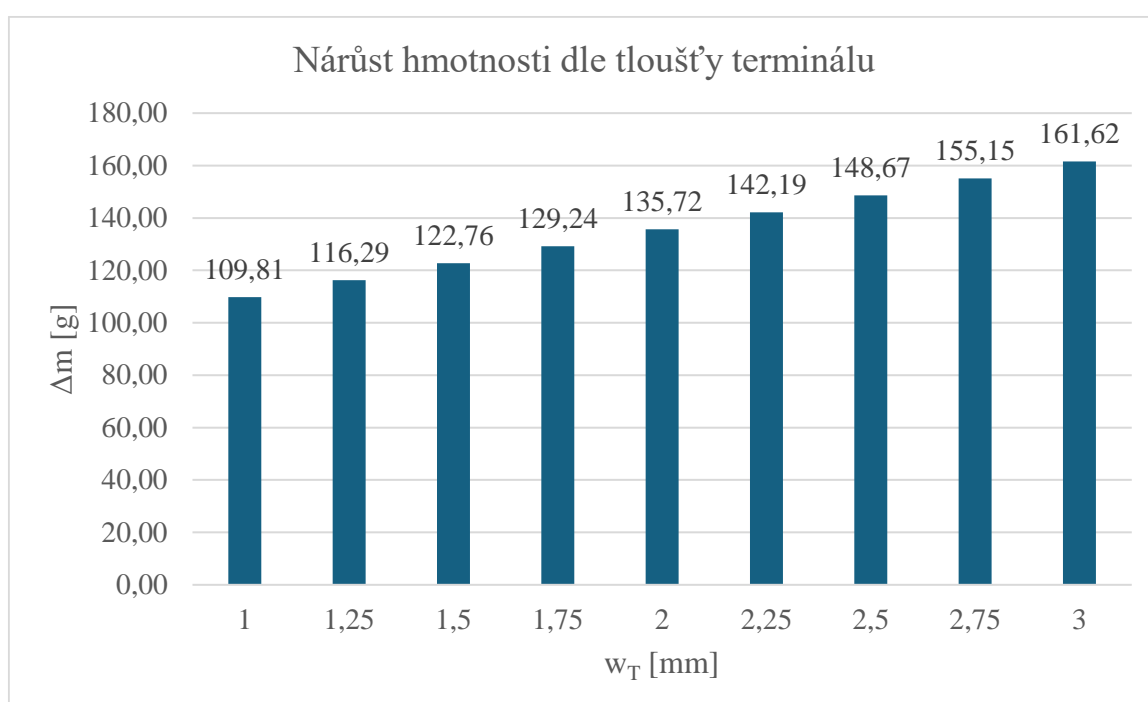
5.1.1 Popis (změna w_T)

Modely variant zkoumaných v této podkapitole byly vytvořeny úpravou parametru tloušťky elementů tvořící terminály zastavovačů růstu trhliny ve výpočetním souboru .bdf modelu varianty H10TW2BW2BL9. Všechny modely tedy sdílí síť s tímto modelem.

Tabulka 7 shrnuje zkoumané varianty v této podkapitole s uvedením příslušné tloušťky terminálu zastavovačů w_T a hmotnosti Δm zastavovačů růstu trhliny daného panelu (terminálů i postranních větví), o kterou je navýšena hmotnost panelu proti prostému panelu bez zastavovačů růstu trhliny. Tuto hmotnost Δm ukazuje pro lepší ilustraci i Obrázek 108.

Tabulka 7 Varianty zkoumaných panelů s různou tloušťkou terminálu zastavovačů růstu trhliny w_T

Varianta	w_T [mm]	Δm [kg]	Δm [g]
H10TW1BW2BL9	1,00	0,1098	109,8
H10TW1.25BW2BL9	1,25	0,1163	116,3
H10TW1.5BW2BL9	1,50	0,1228	122,8
H10TW1.75BW2BL9	1,75	0,1292	129,2
H10TW2BW2BL9	2,00	0,1357	135,7
H10TW2.25BW2BL9	2,25	0,1422	142,2
H10TW2.5BW2BL9	2,50	0,1487	148,7
H10TW2.75BW2BL9	2,75	0,1551	155,1
H10TW3BW2BL9	3,00	0,1616	161,6

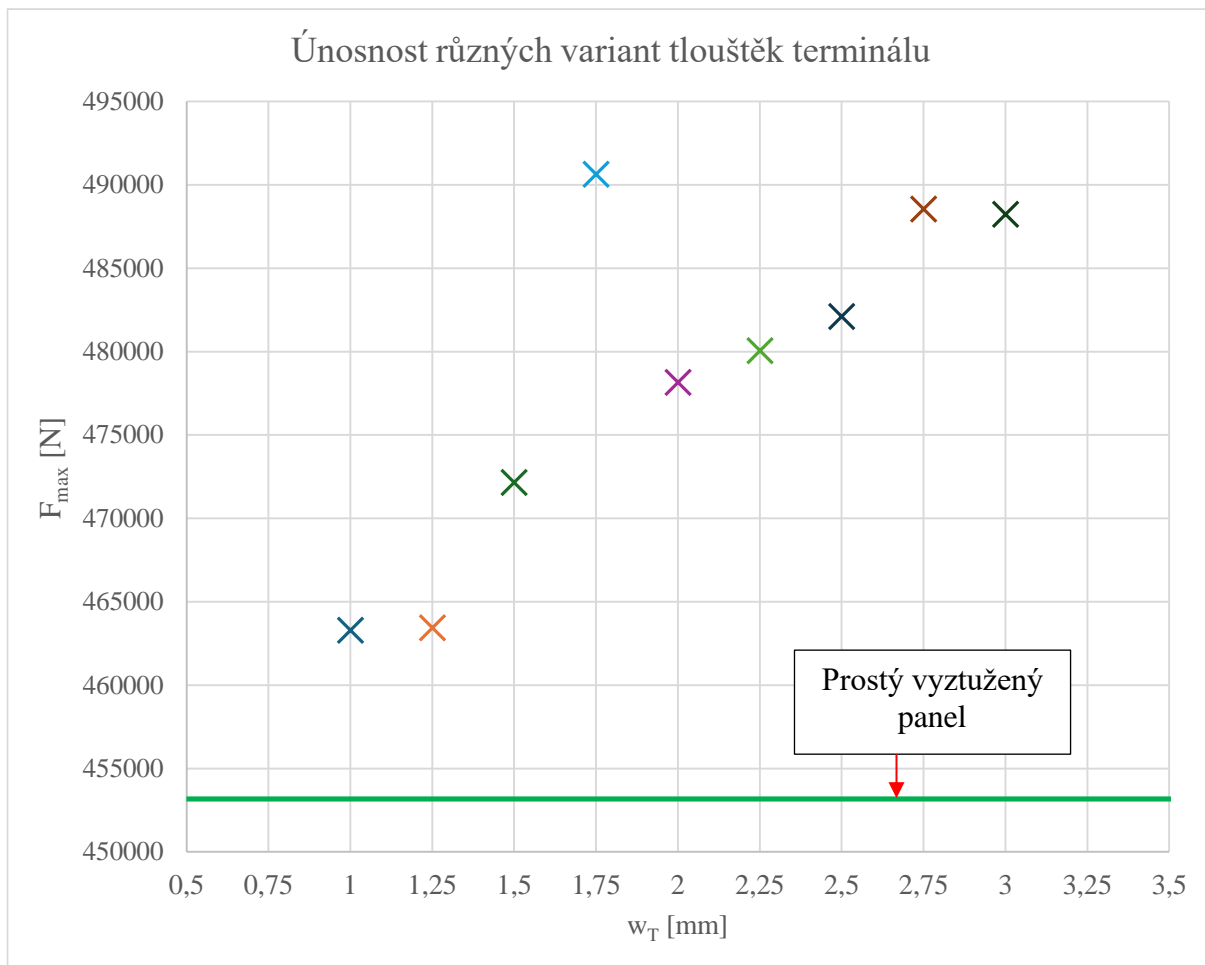


Obrázek 108 Nárůst hmotnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny

5.1.2 Výsledky (změna w_T)

Vzhledem k tomu, že všechny varianty sdílí síť modelu s variantou H10TW2BW2BL9, je možné všechny získané únosnosti srovnávat s únosností prostého panelu H10TW2BW2BL9-BARE, tedy prostého panelu bez zastavovačů růstu trhliny s jinak shodnou sítí jako H10TW2BW2BL9.

Tabulka 8 uvádí únosnosti jednotlivých variant F_{max} , kterou rovněž „křížky“ ukazuje Obrázek 109 s vyjádřenou únosností prostého panelu H10TW2BW2BL9-BARE pro porovnání. Dále tabulka uvádí procentuální navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ v procentech únosnosti prostého panelu (také zobrazuje Obrázek 110), hmotnost zastavovačů růstu trhliny Δm a procentuální navýšení únosnosti panelu vztažené na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$ (viz Obrázek 111).



Obrázek 109 Únosnost variant tloušťek terminálu ve vztahu k únosnosti prostého panelu H10TW2BW2BL9-BARE

Tabulka 8 Výsledné hodnoty únosností různých varianty tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny

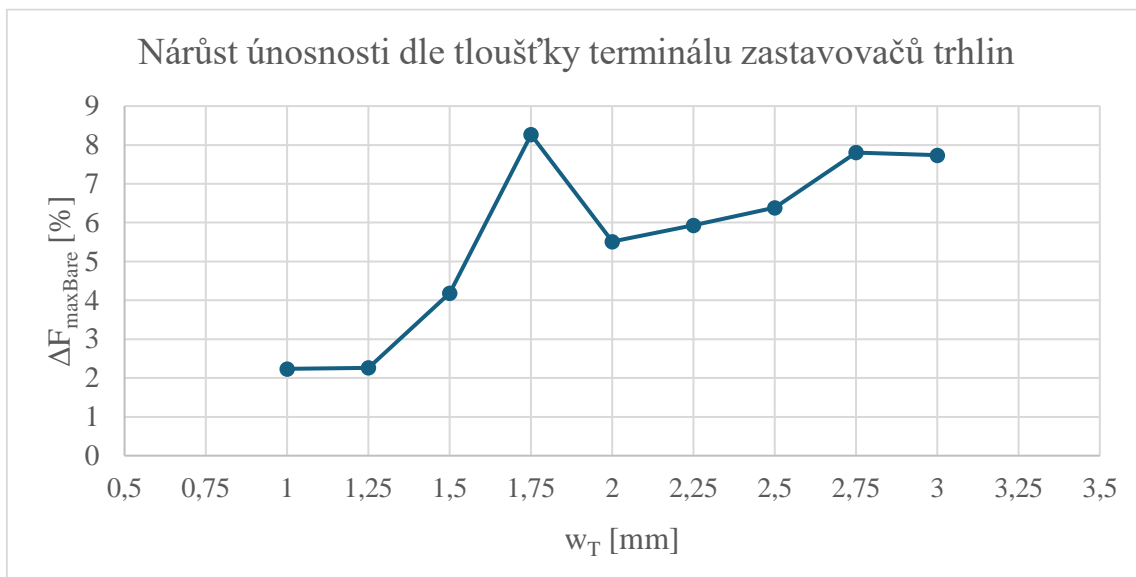
Varianta	w_T [mm]	F_{max} [N]	$\Delta F_{maxBare}$ [%]	Δm [kg]	$\Delta F_{maxBare} / \Delta m$ [%/kg]
H10TW1BW2BL9	1,00	463286	2,23	0,1098	20,3
H10TW1.25BW2BL9	1,25	463425	2,26	0,1163	19,5
H10TW1.5BW2BL9	1,50	472139	4,19	0,1228	34,1
H10TW1.75BW2BL9	1,75	490625	8,26	0,1292	63,9
H10TW2BW2BL9	2,00	478151	5,51	0,1357	40,6
H10TW2.25BW2BL9	2,25	480044	5,93	0,1422	41,7
H10TW2.5BW2BL9	2,50	482100	6,38	0,1487	42,9
H10TW2.75BW2BL9	2,75	488537	7,80	0,1551	50,3
H10TW3BW2BL9	3,00	488224	7,73	0,1616	47,9
H10TW2BW2BL9-BARE	-	453172	-	-	-

Procentuální navýšení maximální únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ pro danou maximální únosnost F_{max} dané varianty a únosnost prostého panelu $F_{maxBare}$ lze vyjádřit jako:

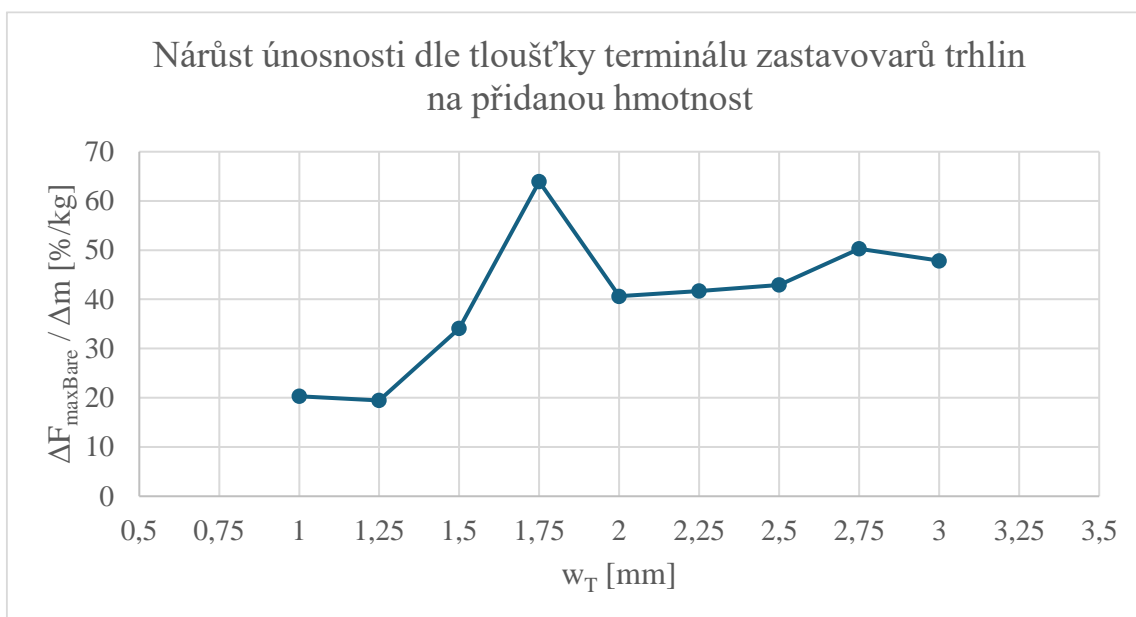
$$\Delta F_{maxBare} = \frac{F_{max} - F_{maxBare}}{F_{maxBare}} \cdot 100\% \quad (30)$$

Procentuální navýšení únosnosti panelu vztažené na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$ lze vyjádřit prostě jako:

$$\Delta F_{maxBare}/\Delta m = \frac{\frac{F_{max} - F_{maxBare}}{F_{maxBare}} \cdot 100\%}{\Delta m} = \frac{\Delta F_{maxBare}}{\Delta m} \quad (31)$$



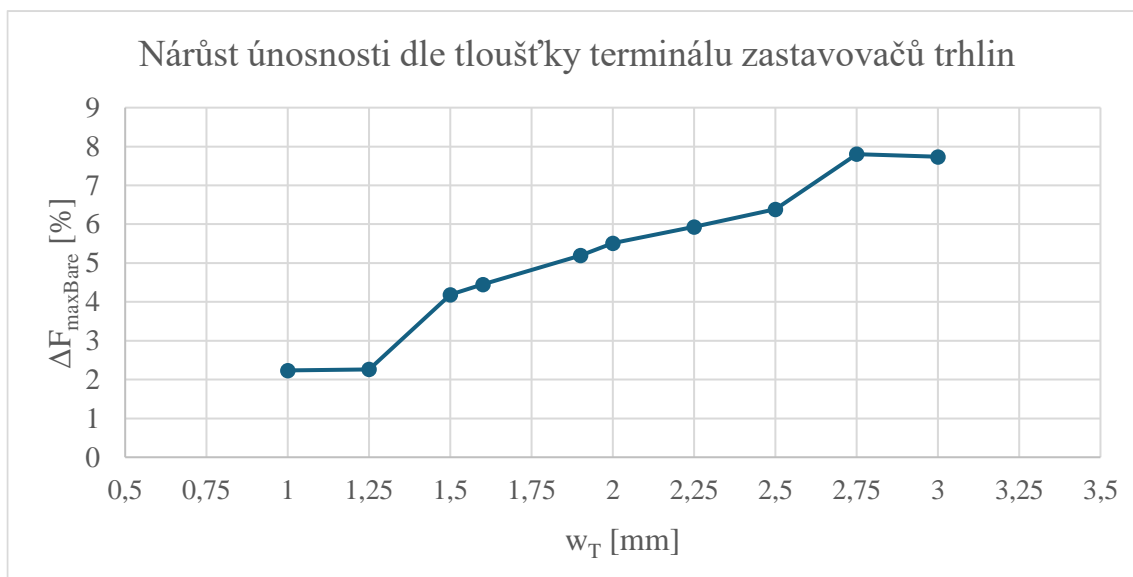
Obrázek 110 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny



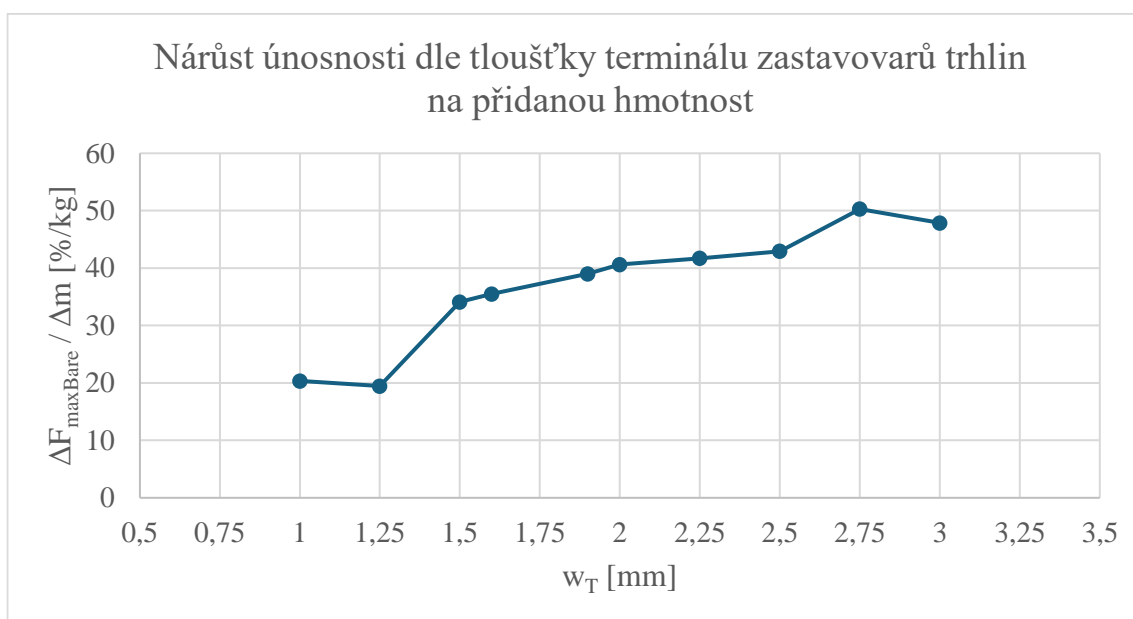
Obrázek 111 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny na přidanou hmotnost

Z výše uvedených obrázků lze vidět, že hodnota únosnosti pro variantu H10TW1.75BW2BL9 s tloušťkou terminálu zastavovačů růstu trhliny $w_T = 1,75$ mm se významně odchyľuje od trendu, který lze pozorovat u hodnot únosnosti ostatních variant. Lze předpokládat, že se jedná o určitou anomálii při výpočtu, a proto tato varianta byla nahrazena variantami H10TW1.6BW2BL9 s tloušťkou terminálu $w_T = 1,6$ mm a variantou H10TW1.9BW2BL9 s tloušťkou terminálu $w_T = 1,9$ mm.

Získané hodnoty únosnosti těchto dvou variant viz Tabulka 9. Obrázek 112 ukazuje nárůst $\Delta F_{maxBare}$ v procentech únosnosti prostého panelu dle tloušťky terminálu jednotlivých variant s doplněním nových variant. Obrázek 113 ukazuje procentuální navýšení únosnosti panelu vztahované na přidanou hmotnost zastavovačů $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$ s doplněním nových variant.



Obrázek 112 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhlin – doplněné



Obrázek 113 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhlin na přidanou hmotnost – doplněné

Tabulka 9 Výsledné hodnoty únosností pro dodatečné varianty tloušťek terminálu zastavovačů

Varianta	w_T [mm]	F_{max} [N]	$\Delta F_{maxBare}$ [%]	Δm [kg]	$\Delta F_{maxBare} / \Delta m$ [%/kg]
H10TW1.6BW2BL9	1,60	473338	4,45	0,1254	35,5
H10TW1.9BW2BL9	1,90	476710	5,19	0,1331	39,0

Obrázek 112 a Obrázek 113 ukazují, že s rostoucí tloušťkou terminálu zastavovačů růstu trhliny w_T má procentuální navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ i procentuální navýšení únosnosti vztažené na přidanou hmotnost $\Delta F_{maxBare} / \Delta m$ rostoucí charakter.

5.2 Změna tloušťky postranních větví zastavovačů růstu trhliny (parametr w_B)

V téhle podkapitole je zkoumán vliv tloušťky postranních větví zastavovačů růstu trhliny w_B . Zkoumáno bylo osm variant o tloušťkách postranních větví w_B 1,00; 1,50; 1,75; 2,00; 2,25; 2,50; 2,75 a 3,00 mm. Stejně jako v podkapitole 5.1 byl použit model varianty H10TW2BW2BL9, který sloužil jako základ modelů variant počítaných v této kapitole. Jedná se o stejný model, který byl prezentován v 4.1.

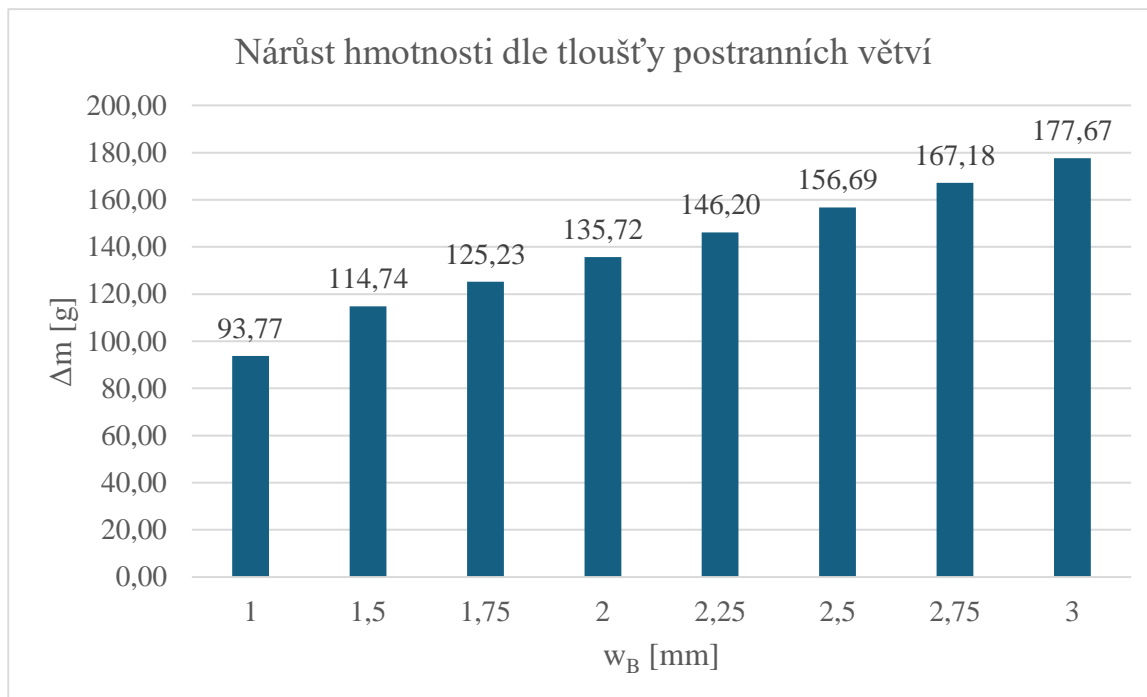
5.2.1 Popis (změna w_B)

Modely variant zkoumaných v této podkapitole byly vytvořeny úpravou parametru tloušťky elementů tvořící postranní větev zastavovačů růstu trhliny ve výpočetním souboru .bdf modelu varianty H10TW2BW2BL9. Všechny modely tedy sdílí síť s tímto modelem.

Tabulka 10 shrnuje zkoumané varianty v této podkapitole s uvedením příslušné tloušťky postranních větví zastavovačů w_B a hmotnosti Δm zastavovačů růstu trhliny daného panelu (terminálů i postranních větví), o kterou je navýšena hmotnost panelu proti prostému panelu bez zastavovačů růstu trhliny. Tuto hmotnost Δm ukazuje pro lepší ilustraci i Obrázek 114.

Tabulka 10 Varianty zkoumaných panelů s různou tloušťkou postranních větví zastavovačů w_B

Varianta	w_B [mm]	Δm [kg]	Δm [g]
H10TW2BW1BL9	1,00	0,0938	93,8
H10TW2BW1.5BL9	1,50	0,1147	114,7
H10TW2BW1.75BL9	1,75	0,1252	125,2
H10TW2BW2BL9	2,00	0,1357	135,7
H10TW2BW2.25BL9	2,25	0,1462	146,2
H10TW2BW2.5BL9	2,50	0,1567	156,7
H10TW2BW2.75BL9	2,75	0,1672	167,2
H10TW3W2BL9	3,00	0,1777	177,7



Obrázek 114 Nárůst hmotnosti dle tloušťky postranních větví zastavovačů růstu trhliny

5.2.2 Výsledky (změna w_B)

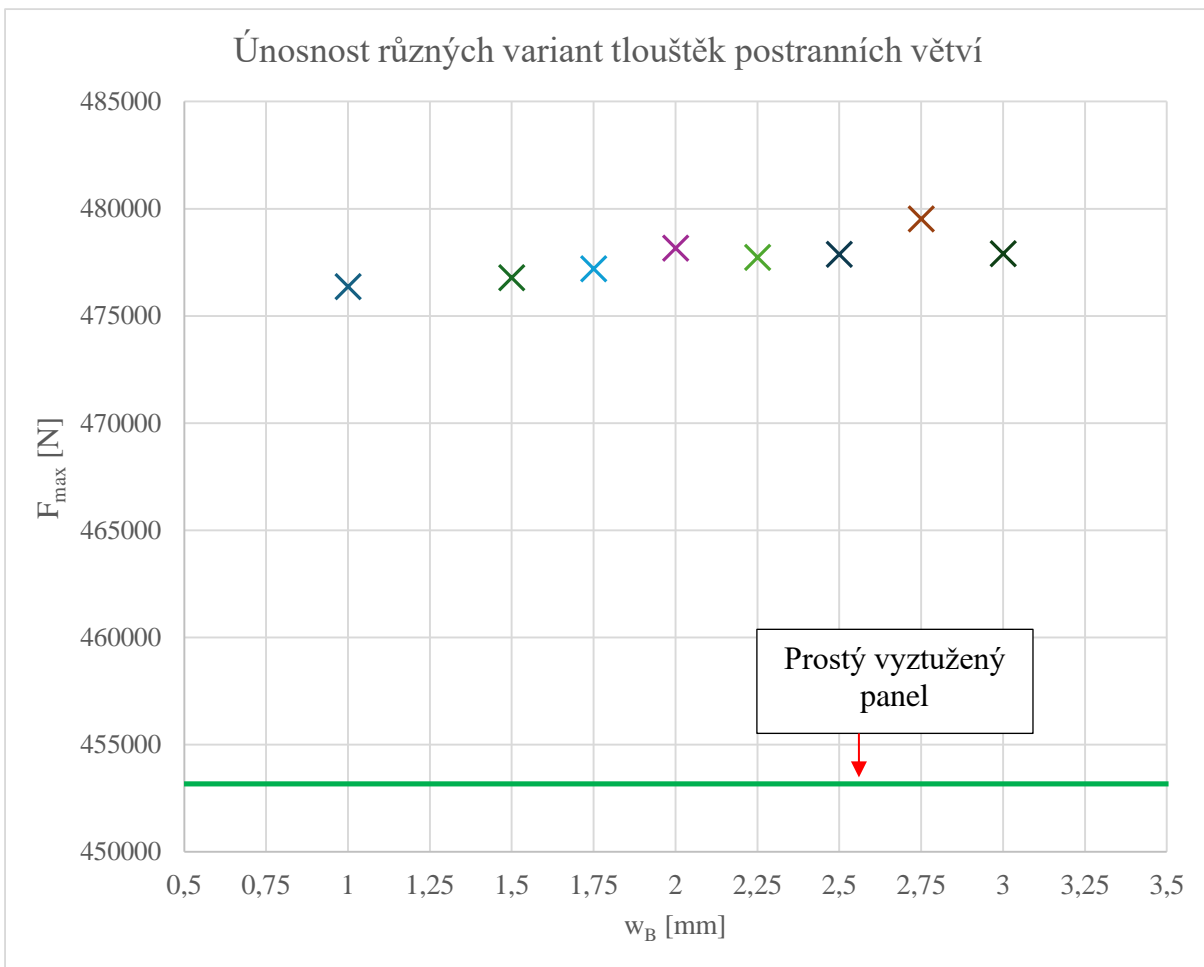
Vzhledem k tomu, že všechny varianty sdílí síť modelu varianty H10TW2BW2BL9, je možné všechny získané únosnosti srovnávat s únosností prostého panelu H10TW2BW2BL9-BARE, tedy prostého panelu bez zastavovačů růstu trhliny s jinak shodnou sítí jako H10TW2BW2BL9.

Tabulka 11 uvádí únosnosti jednotlivých variant F_{max} , kterou rovněž „křížky“ ukazují Obrázek 115 s vyjádřenou únosností prostého panelu H10TW2BW2BL9-BARE pro porovnání. Dále tabulka uvádí procentuální navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ v procentech únosnosti prostého panelu (také zobrazuje Obrázek 116), hmotnost zastavovačů růstu trhliny Δm a procentuální navýšení únosnosti panelu vztahované na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$ (viz Obrázek 117).

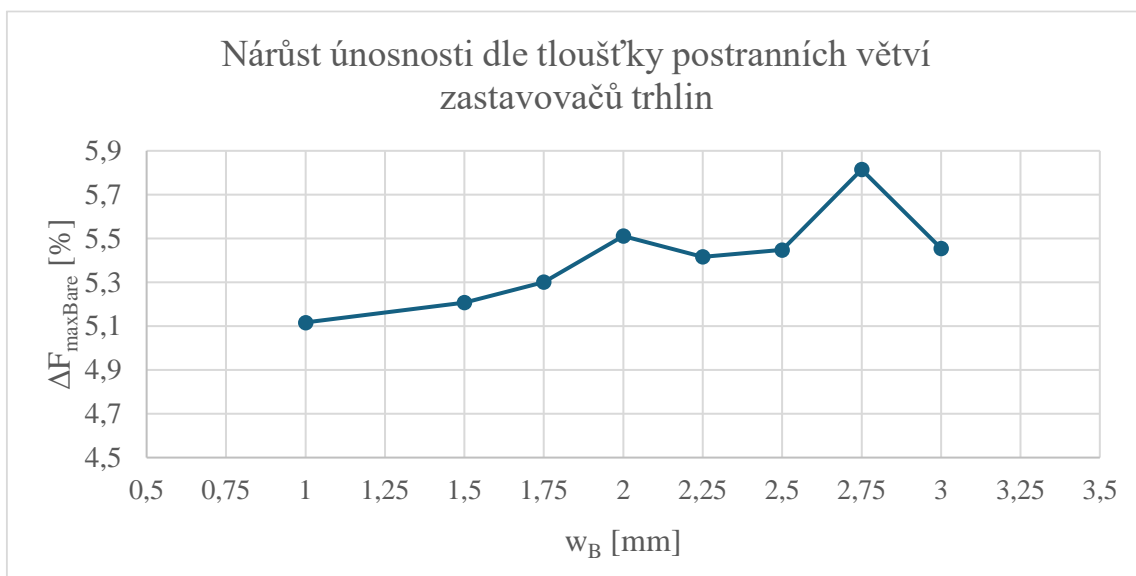
Z obrázků lze vidět, že s rostoucí tloušťkou postranních větví zastavovačů růstu trhliny w_B má procentuální navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ mírně rostoucí charakter. Procentuální navýšení únosnosti vztahované na přidanou hmotnost $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$ má naproti tomu klesající charakter.

Tabulka 11 Výsledné hodnoty únosností pro různé varianty tloušťky postranních větví

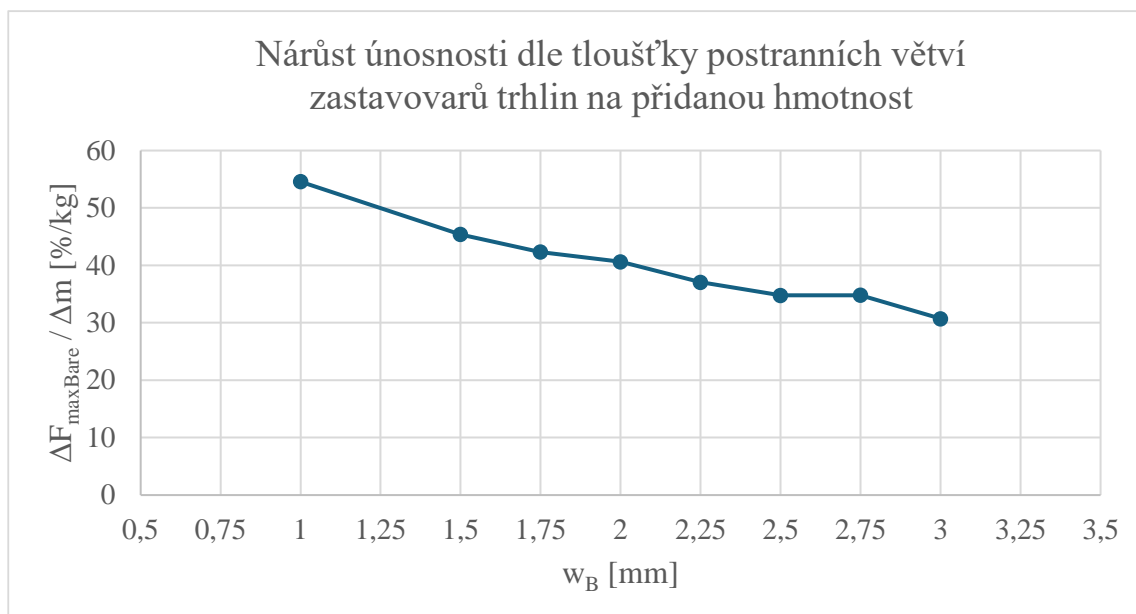
Varianta	w_B [mm]	F_{max} [N]	$\Delta F_{maxBare}$ [%]	Δm [kg]	$\Delta F_{maxBare} / \Delta m$ [%/kg]
H10TW2BW1BL9	1,00	476359	5,12	0,0938	54,6
H10TW2BW1.5BL9	1,50	476771	5,21	0,1147	45,4
H10TW2BW1.75BL9	1,75	477196	5,30	0,1252	42,3
H10TW2BW2BL9	2,00	478151	5,51	0,1357	40,6
H10TW2BW2.25BL9	2,25	477720	5,42	0,1462	37,0
H10TW2BW2.5BL9	2,50	477862	5,45	0,1567	34,8
H10TW2BW2.75BL9	2,75	479527	5,82	0,1672	34,8
H10TW3W2BL9	3,00	477894	5,46	0,1777	30,7
H10TW2BW2BL9-BARE	-	453172	-	-	-



Obrázek 115 Únosnost variant tloušťek terminálu ve vztahu k únosnosti prostého panelu H10TW2BW2BL9-BARE



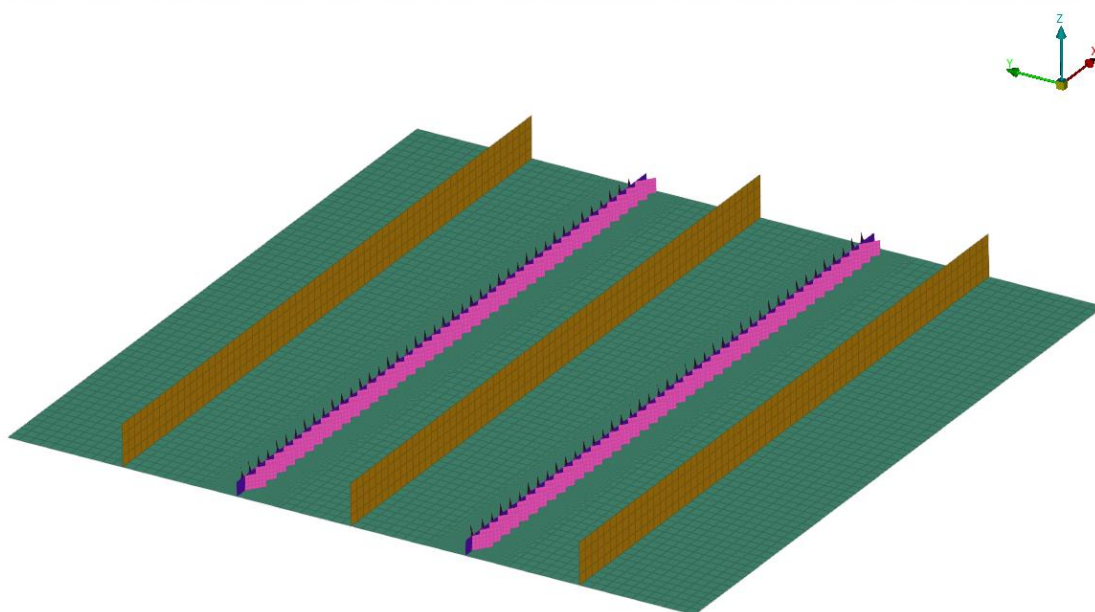
Obrázek 116 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny



Obrázek 117 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny na přidanou hmotnost

5.3 Změna délky postranních větví zastavovačů růstu trhliny (parametr L_B)

V této podkapitole je zkoumán vliv délky postranní větve L_B . Zkoumáno bylo pět variant o délkách L_B 4,5 až 13,5 mm, s rozstupem délek mezi variantami $\Delta L_B = 2,25$ mm. Obrázek 118 zobrazuje model varianty H10TW2BW2BL13.5 používaný ve výpočtech této podkapitoly. Model je typově podobný se základním modelem popsáním v 4.1.



Obrázek 118 Varianta H10TW2BW2BL13.5

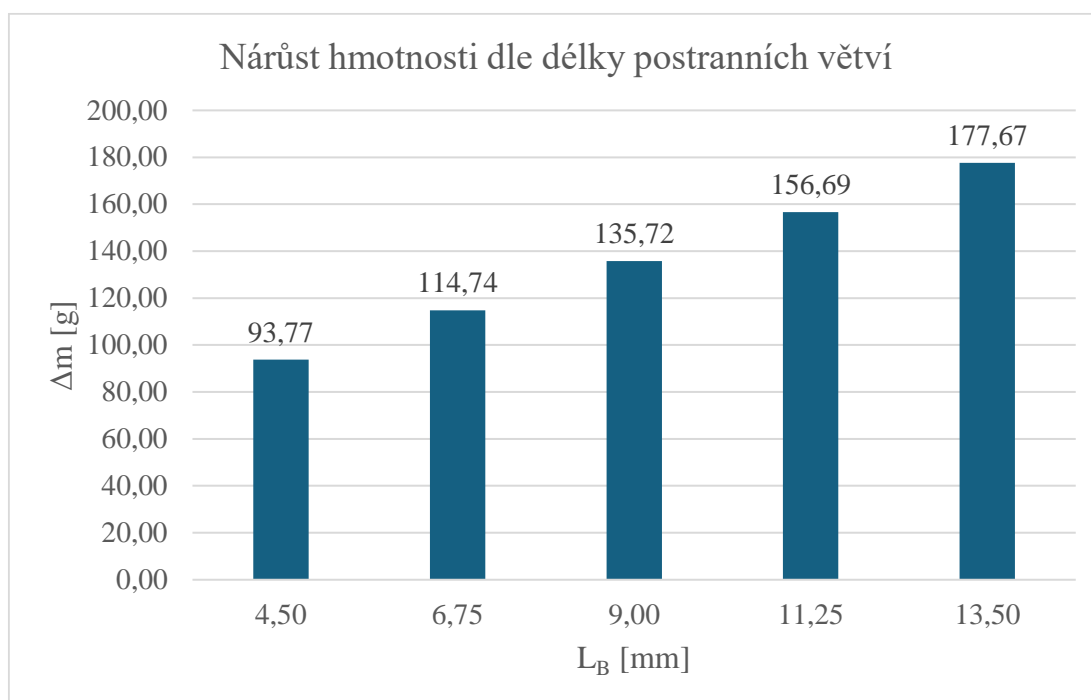
5.3.1 Popis (změna L_B)

Základní variantou v této podkapitole je H10TW2BW2BL13.5, s délkou postranní větve $L_B = 13,5$ mm. Postranní větve jsou složeny z Quad4 elementů o velikosti $2,25 \times 2,5$ mm při čtyřech řadách elementů na výšku a šesti sloupců elementů na délku postranní větve. Většiny dalších variant s kratší délkou postranních větví L_B je dosaženo pomocí odstranění příslušného počtu sloupců elementů z každé postranní větve v modelu. Výjimkou je varianta H10TW2BW2BL9, která byla řešena již v předchozích podkapitolách a v zájmu zachování porovnatelnosti výsledků je pro ni použita síť z předchozích podkapitol. Všechny ostatní varianty mimo délku postranních větví sdílí stejnou síť varianty H10TW2BW2BL13.5. Obrázek 120 ukazuje část sítě v okolí zastavovače růstu trhliny varianty H10TW2BW2BL13.5, s délkou postranní větve $L_B = 13,5$ mm a Obrázek 121 ukazuje totéž pro variantu H10TW2BW2BL4.5, s délkou postranní větve $L_B = 4,5$ mm.

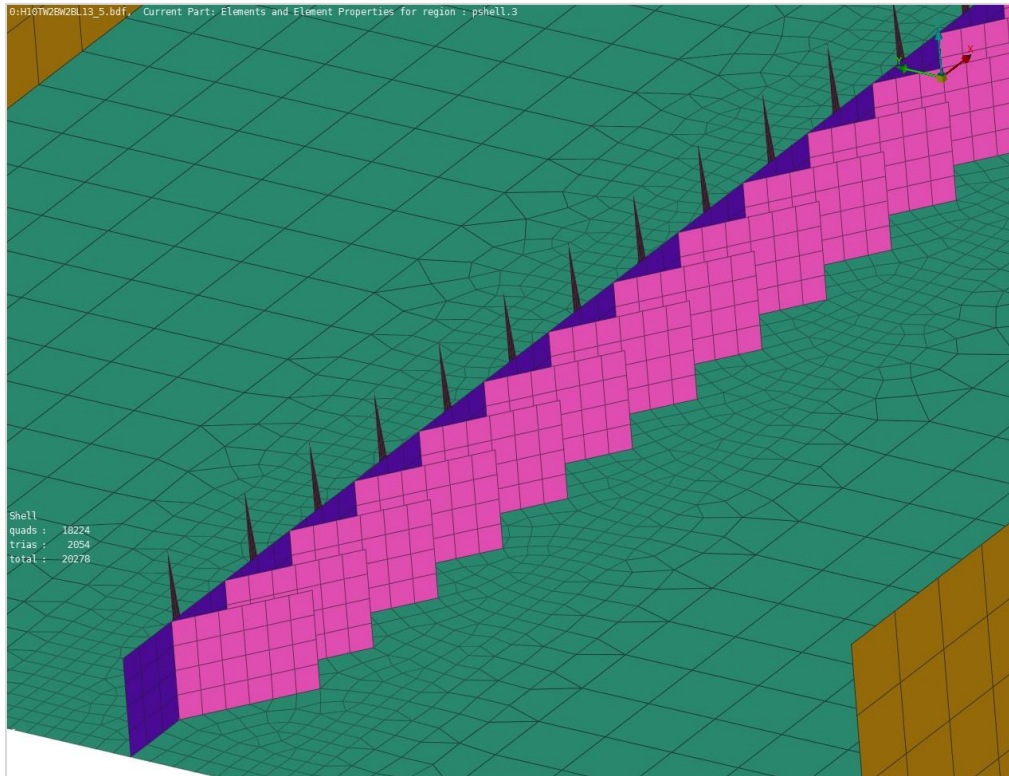
Tabulka 12 shrnuje zkoumané varianty v této podkapitole s uvedením příslušné délky postranních větví L_B a hmotnosti Δm zastavovačů růstu trhliny daného panelu (terminálů i postranních větví), o kterou je navýšena hmotnost panelu proti prostému panelu bez zastavovačů růstu trhliny. Tuto hmotnost Δm ukazuje pro lepší ilustraci i Obrázek 119.

Tabulka 12 Varianty zkoumaných panelů s různou délkou postranních větví L_B

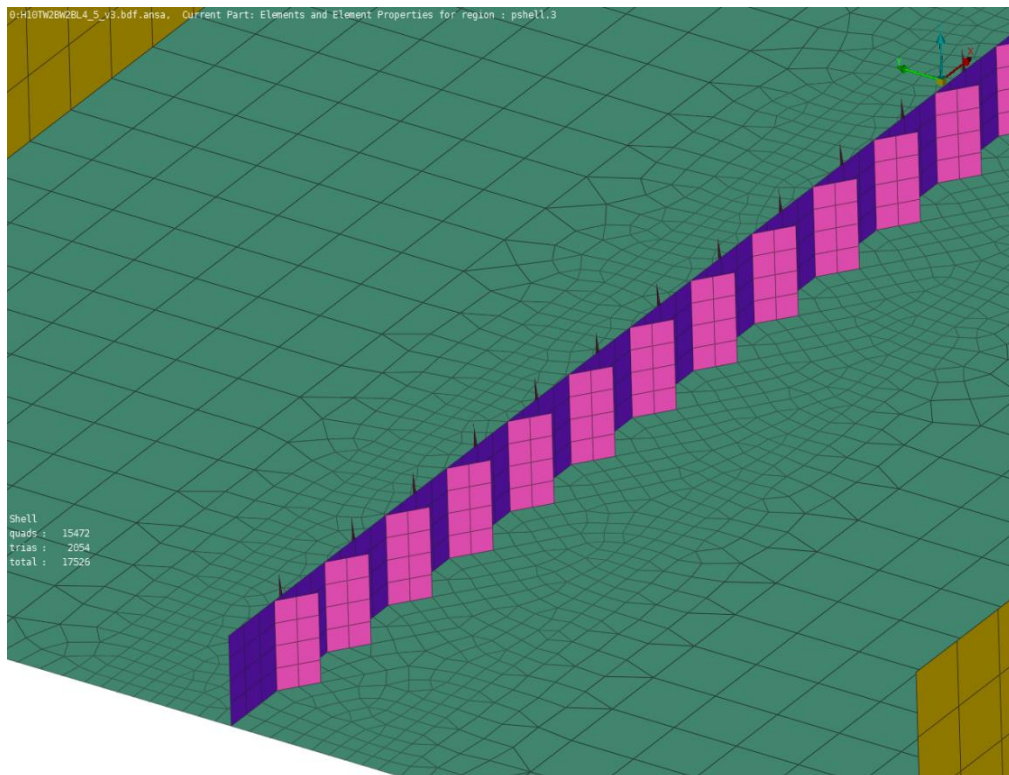
Varianta	L_B [mm]	Δm [kg]	Δm [g]
H10TW2BW2BL4.5	4,50	0,09377	93,77
H10TW2BW2BL6.75	6,75	0,11474	114,74
H10TW2BW2BL9	9,00	0,13572	135,72
H10TW2BW2BL11.25	11,25	0,15669	156,69
H10TW2BW2BL13.5	13,50	0,17767	177,67



Obrázek 119 Nárůst hmotnosti dle délky postranní větve



Obrázek 120 Varianta s délkou postranních větví $L_B = 13,5$ mm (H10TW2BW2BL13.5)



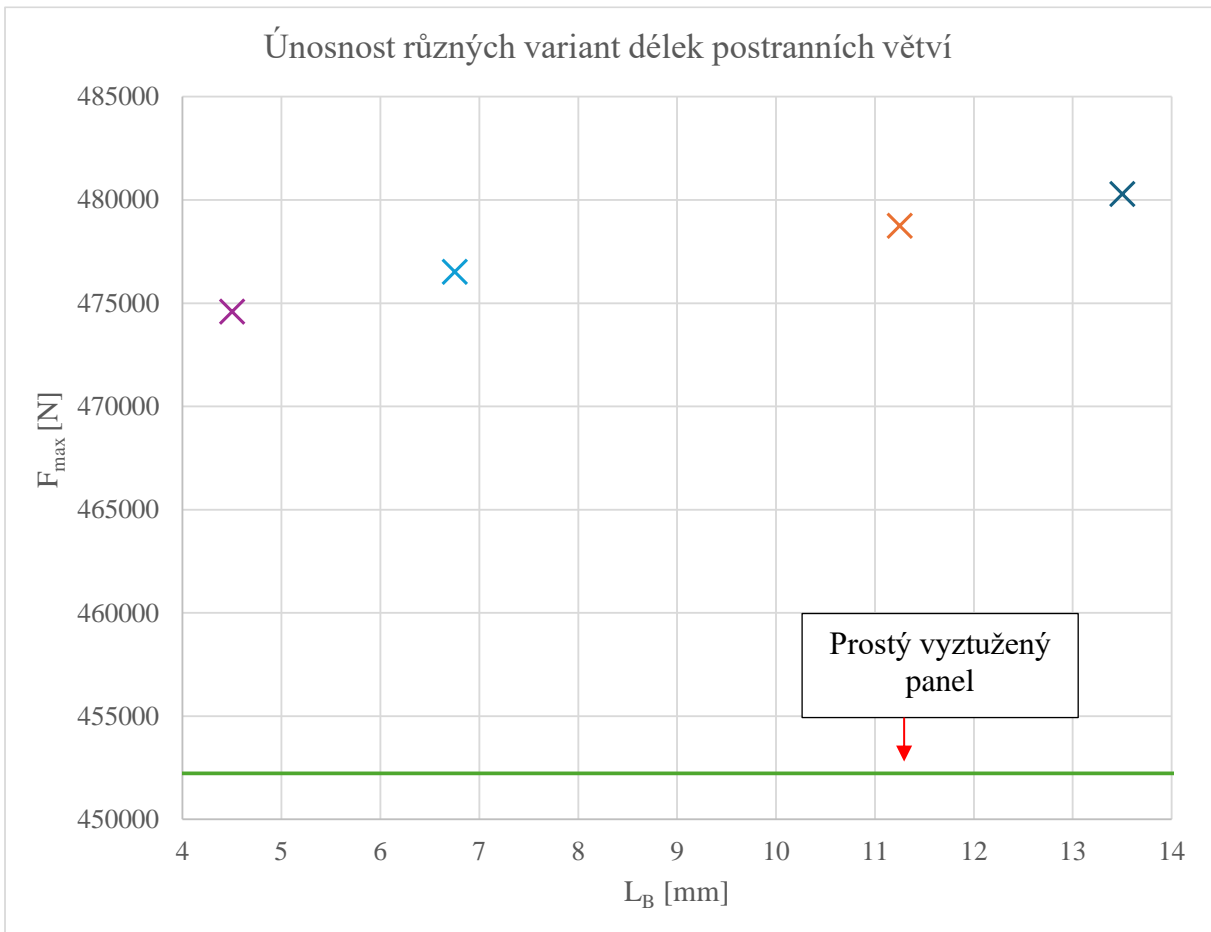
Obrázek 121 Varianta s délkou postranních větví $L_B = 4,5$ mm (H10TW2BW2BL4.5)

5.3.2 Výsledky (změna L_B)

Vzhledem k tomu, že všechny varianty mimo variantu H10TW2BW2BL9 sdílí síť, je možné jejich únosnosti srovnávat s prostým panelem H10TW2BW2BL13.5-BARE, což pomocí křížků ukazuje Obrázek 122. Únosnost varianty H10TW2BW2BL9 byla srovnávána s prostým panelem H10TW2BW2BL9-BARE, shodně s předchozími podkapitolami.

Tabulka 13 uvádí únosnosti jednotlivých variant F_{max} . Dále tabulka uvádí procentuální navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ v procentech únosnosti prostého panelu (také zobrazuje Obrázek 123), hmotnost zastavovačů růstu trhliny Δm a procentuální navýšení únosnosti panelu vztažené na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$ (viz Obrázek 124).

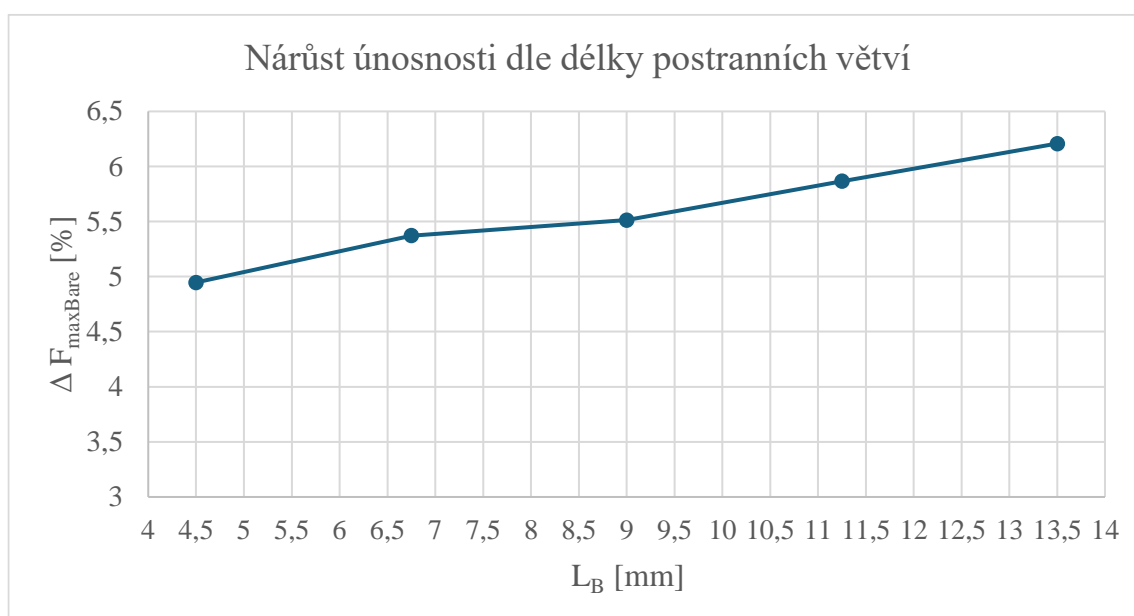
Obrázek 123 a Obrázek 122 ukazují, že s rostoucí délkou postranních větví L_B dochází rovněž ke zvýšení maximální únosnosti panelů. Obrázek 124 ukazuje, že nárůst maximální únosnosti vztažený na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny s rostoucí délkou postranních větví L_B klesá.



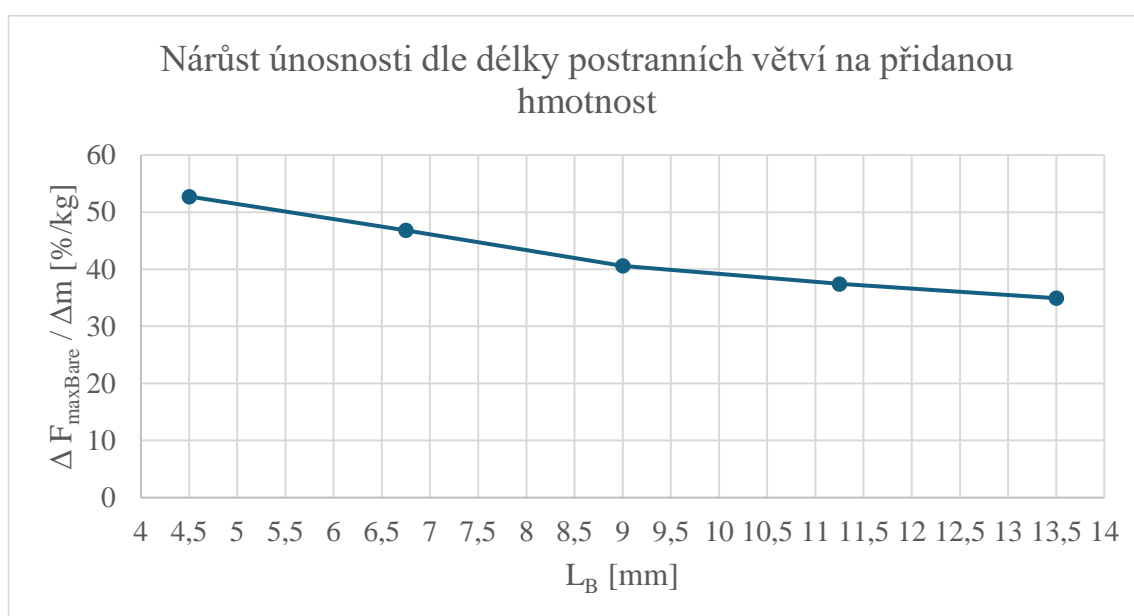
Obrázek 122 Únosnost variant délek postranních větví ve vztahu k únosnosti prostého panelu H10TW2BW2BL13.5-BARE

Tabulka 13 Výsledné hodnoty únosností pro různé varianty délky postranních větví

Varianta	L_B [mm]	F_{max} [N]	$\Delta F_{maxBare}$ [%]	Δm [kg]	$\Delta F_{maxBare} / \Delta m$ [%/kg]
H10TW2BW2BL4.5	4,50	474594	4,95	0,0938	52,75
H10TW2BW2BL6.75	6,75	476516	5,37	0,1147	46,81
H10TW2BW2BL9	9,00	478151	5,51	0,1357	40,61
H10TW2BW2BL11.25	11,25	478749	5,87	0,1567	37,43
H10TW2BW2BL13.5	13,50	480294	6,21	0,1777	34,94
H10TW2BW2BL9-BARE	-	453172	-	-	-
H10TW2BW2BL13.5-BARE	-	452225	-	-	-



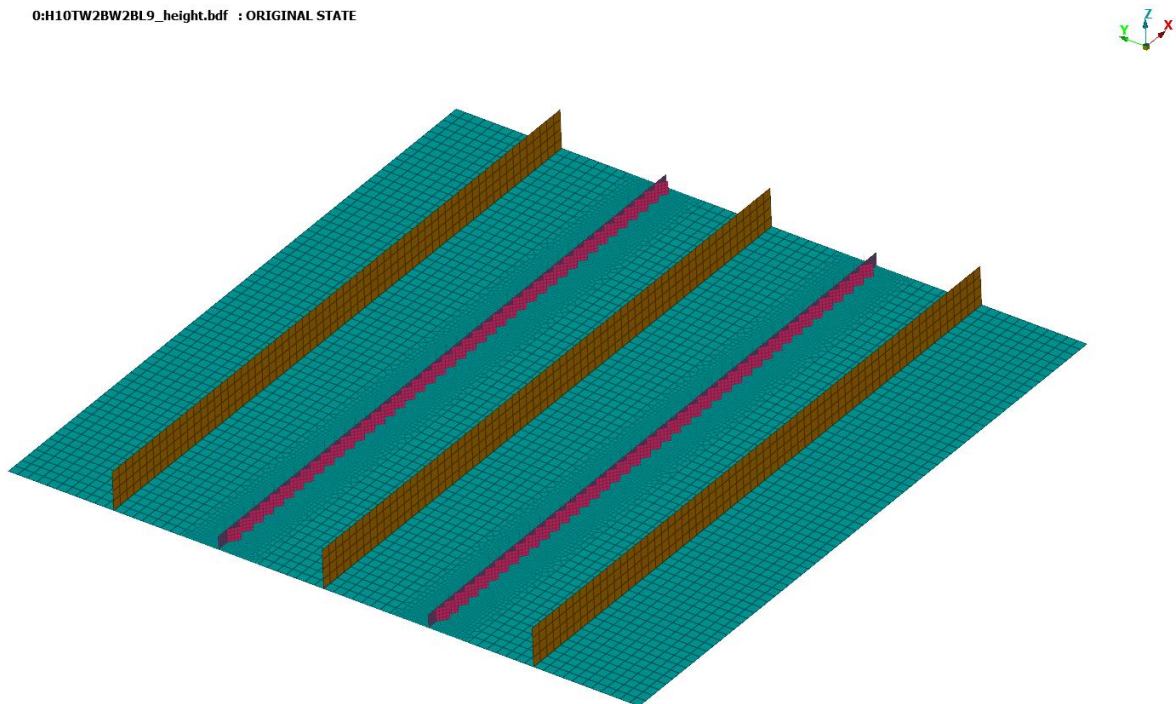
Obrázek 123 Nárůst únosnosti dle délky postranních větví



Obrázek 124 Nárůst únosnosti dle délky postranních větví vztážený na přidanou hmotnost

5.4 Změna výšky zastavovačů růstu trhliny (parametr h)

V této podkapitole je zkoumán vliv výšky zastavovačů růstu trhliny h . Zkoumáno bylo pět variant o výškách h 2 až 10 mm, s rozestupem výšek mezi variantami $\Delta h = 2$ mm. Obrázek 125 zobrazuje model varianty H10TW2BW2BL9 používaný ve výpočtech této podkapitoly. Jedná se o stejný model, který byl prezentován v 4.1.



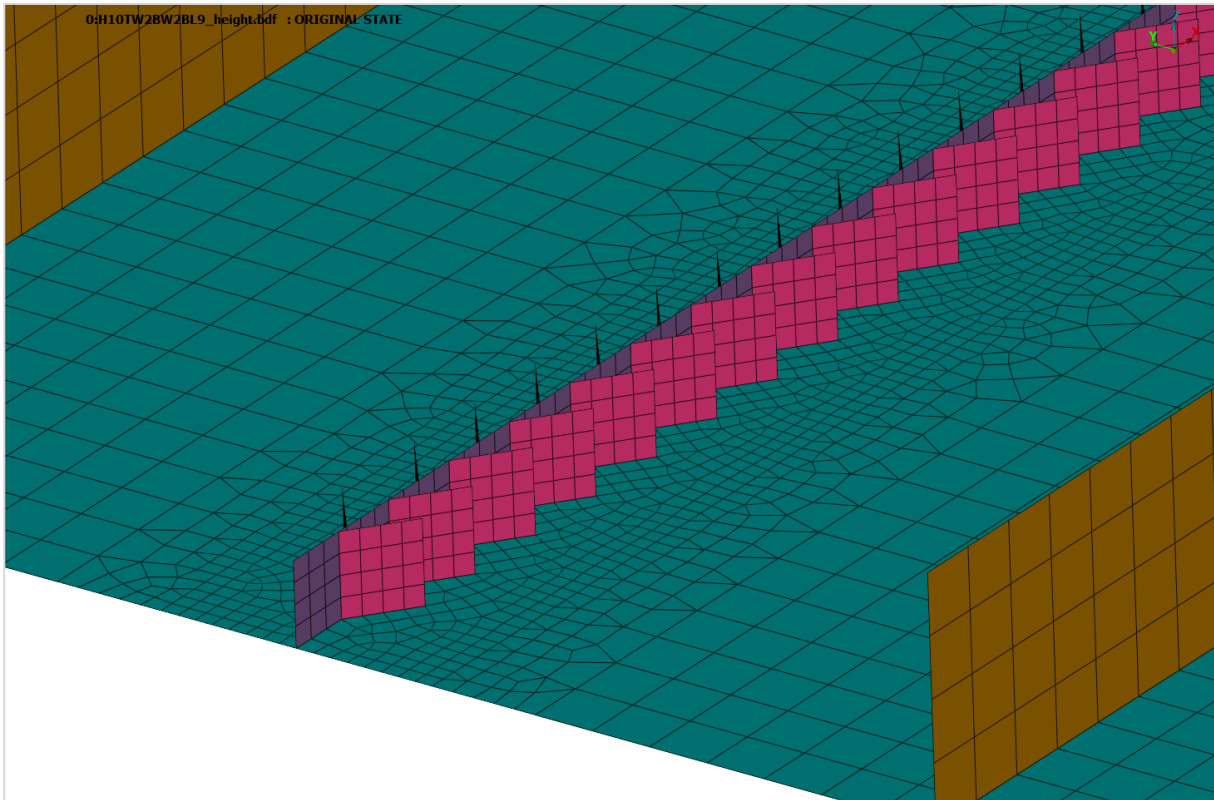
Obrázek 125 Varianta H10TW2BW2BL9

5.4.1 Popis (změna h)

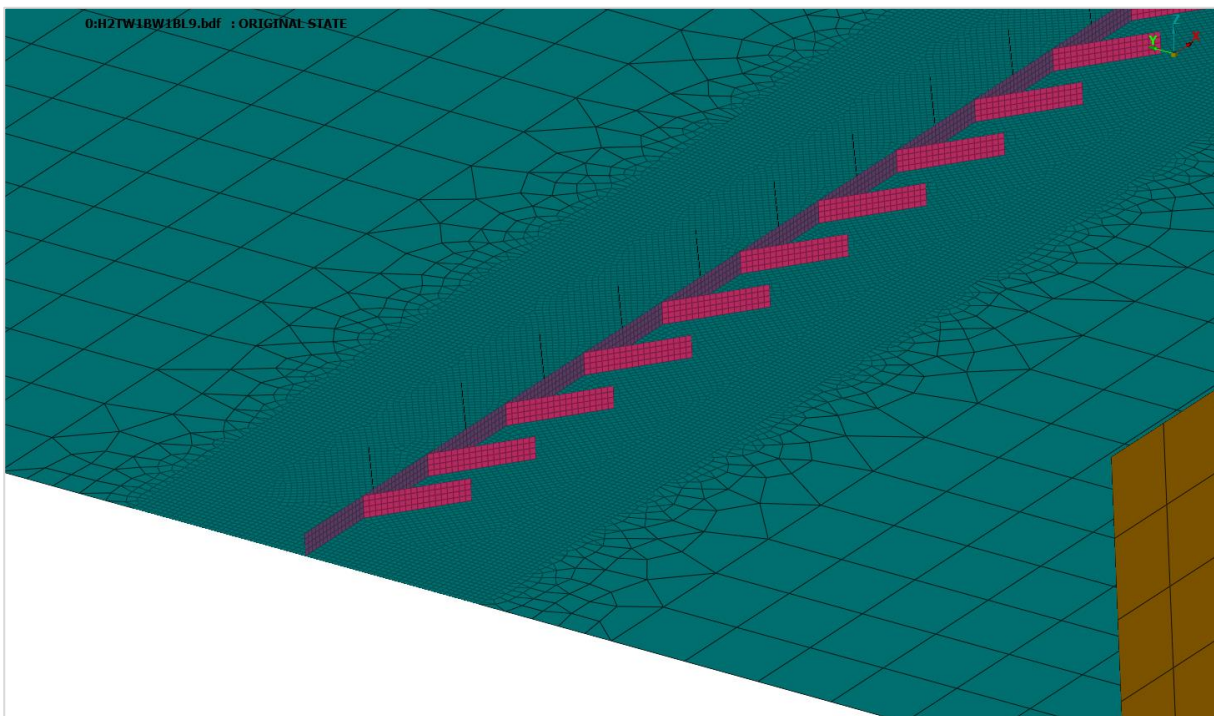
Mimo použitou základní variantu H10TW2BW2BL9 byly vytvořeny modely a sítě ostatních variant s jemností sítě v oblasti zastavovačů růstu trhliny volenou tak, aby na danou výšku zastavovačů h byly přítomny 4 řady elementů a elementy ve zjemněném pásmu (viz 4.1.3) byly podobné velikosti.

Obrázek 126 ukazuje část sítě v okolí zastavovače růstu trhliny H10TW2BW2BL9 s výškou zastavovačů $h = 10$ mm a Obrázek 127 ukazuje část sítě v okolí zastavovače růstu trhliny H2TW2BW2BL9 s výškou zastavovačů $h = 2$ mm.

Tabulka 14 shrnuje zkoumané varianty v této podkapitole s uvedením příslušné výšky zastavovačů h a hmotnosti Δm zastavovačů růstu trhliny daného panelu (terminálů i postranních větví), o kterou je navýšena hmotnost panelu proti prostému panelu bez zastavovačů růstu trhliny. Tuto hmotnost Δm ukazuje pro lepší ilustraci i Obrázek 128.



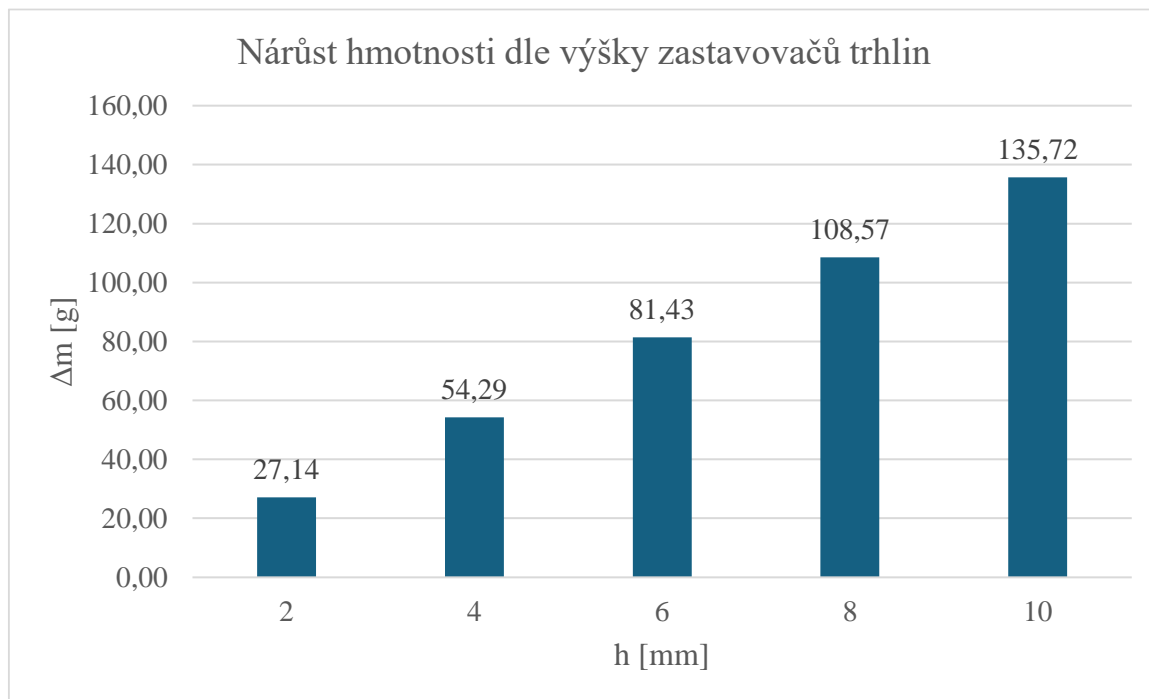
Obrázek 126 Varianta s výškou zastavovačů $h = 10$ mm (H10TW2BW2BL9)



Obrázek 127 Varianta s výškou zastavovačů $h = 2$ mm (H2TW2BW2BL9)

Tabulka 14 Varianty zkoumaných panelů s různou výškou zastavovačů růstu trhliny h

Varianta	h [mm]	Δm [kg]	Δm [g]
H2TW2BW2BL9	2	0,0271	27,14
H4TW2BW2BL9	4	0,0543	54,29
H6TW2BW2BL9	6	0,0814	81,43
H8TW2BW2BL9	8	0,1086	108,57
H10TW2BW2BL9	10	0,1357	135,72



Obrázek 128 Nárůst hmotnosti dle výšky zastavovačů růstu trhliny

5.4.2 Výsledky (změna h)

Vzhledem k tomu, že každá varianta vyžadovala unikátní síť, je nutné hodnoty získané únosnosti v tlaku každé varianty pro posouzení efektu zastavovačů srovnat s hodnotou získanou z analýzy varianty příslušného prostého panelu. Tedy panelu bez zastavovačů růstu trhliny s jinak shodnou sítí jako má daná varianta (viz 4.3).

Tabulka 15 uvádí únosnosti jednotlivých variant F_{max} . Dále tabulka uvádí procentuální navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ v procentech únosnosti prostého panelu (také zobrazuje Obrázek 129), hmotnost zastavovačů růstu trhliny Δm a procentuální navýšení únosnosti panelu vztažené na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$ (viz Obrázek 130).

Z obrázků lze vidět, že hodnoty $\Delta F_{maxBare}$ a $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$ varianty H4TW2BW2BL9, tedy varianty s výškou zastavovačů $h = 4$ mm, se významně odchylojí od trendu hodnot získaných u zkoušených ostatních variant. Důvod přibližuje Obrázek 131, který ukazuje únosnost $F_{maxBare}$ jednotlivých prostých panelů zkoumaných variant, lze vidět, že pro variantu H4TW2BW2BL9 byla dosažena hodnota významně nižší než u ostatních variant, což způsobuje zkreslení výsledků při zkoumání nárůstu únosnosti.

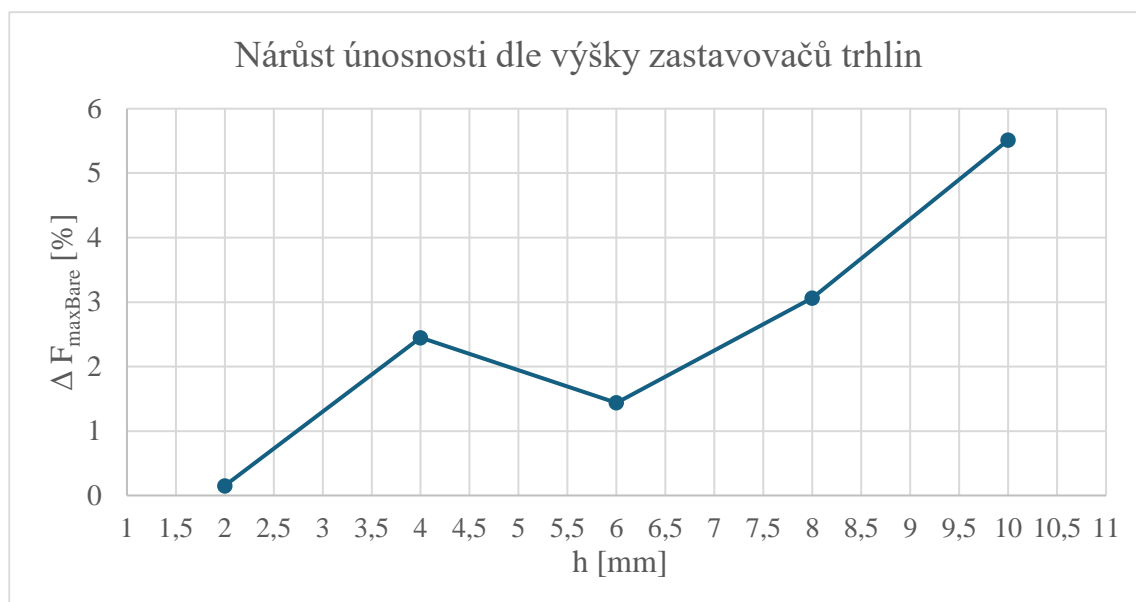
Pro dosažení korektnějšího výsledku trendu vývoje nárůstu únosnosti dle výšky zastavovačů byla varianta H4TW2BW2BL9 nahrazena variantou H5TW2BW2BL9, jejíž výsledky ukazuje Tabulka 16.

Obrázek 132 ukazuje procentuální navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ s výše popsanou úpravou variant a Obrázek 133 ukazuje procentuální navýšení únosnosti vztažené na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$.

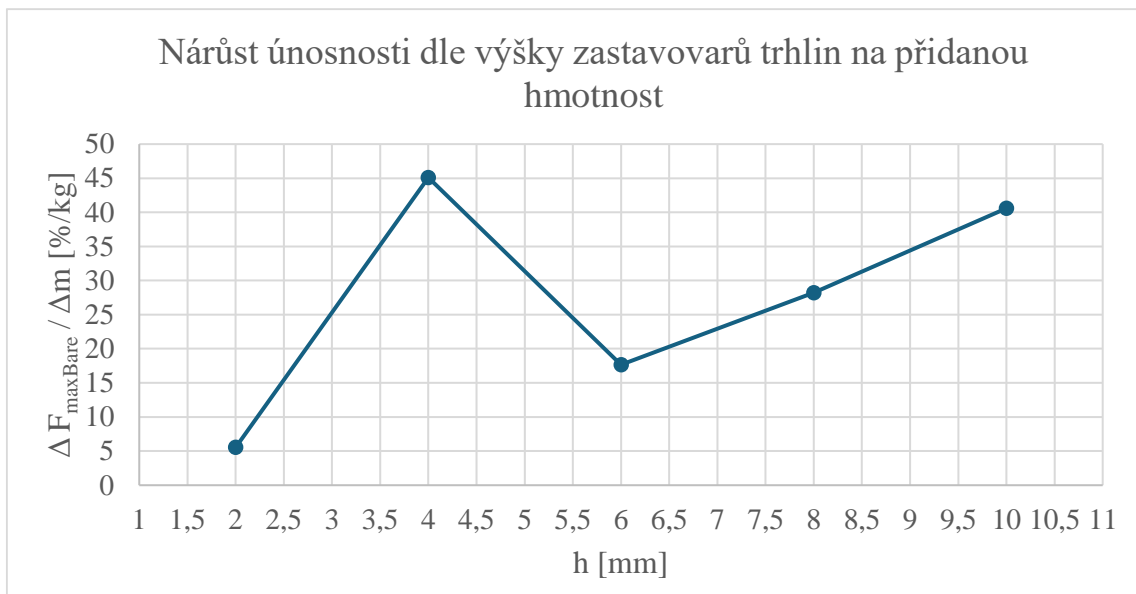
Lze vidět, že s rostoucí výškou zastavovačů růstu trhliny h má procentuální navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ i procentuální navýšení únosnosti vztažené na přidanou hmotnost $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$ rostoucí charakter.

Tabulka 15 Výsledné hodnoty únosností pro různé varianty výšky zastavovačů růstu trhliny

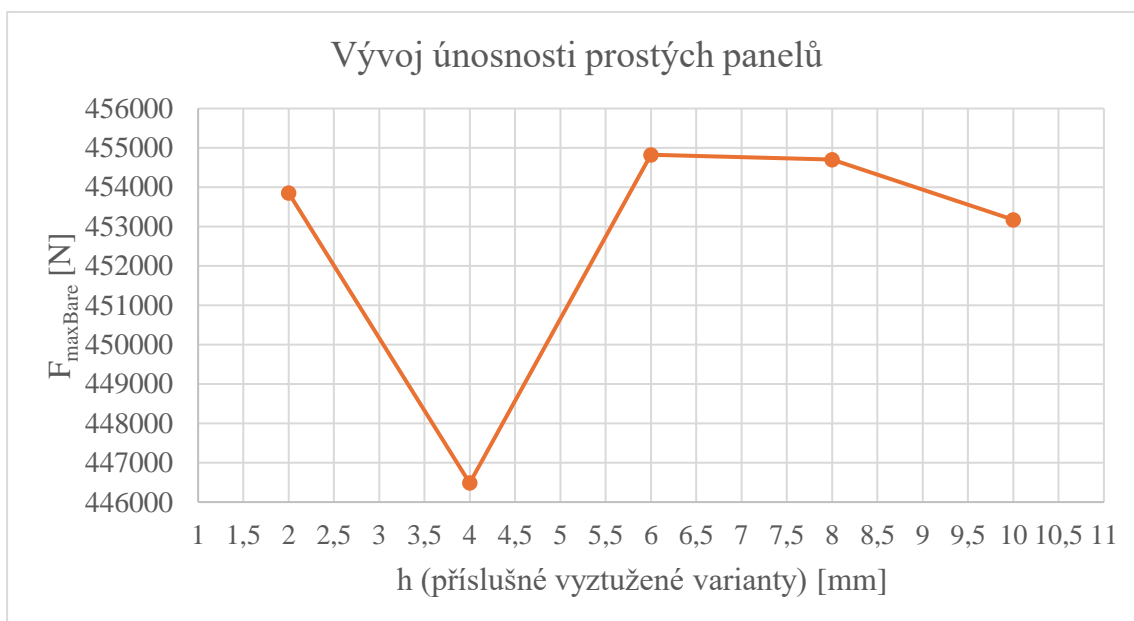
Varianta	h [mm]	F_{max} [N]	$\Delta F_{maxBare}$ [%]	Δm [kg]	$\Delta F_{maxBare} / \Delta m$ [%/kg]
H2TW2BW2BL9	2	454540	0,15	0,0271	5,56
H2TW2BW2BL9-BARE	-	453856	-	-	-
H4TW2BW2BL9	4	457420	2,45	0,0543	45,11
H4TW2BW2BL9-BARE	-	446487	-	-	-
H6TW2BW2BL9	6	461369	1,44	0,0814	17,67
H6TW2BW2BL9-BARE	-	454824	-	-	-
H8TW2BW2BL9	8	468637	3,06	0,1086	28,23
H8TW2BW2BL9-BARE	-	454701	-	-	-
H10TW2BW2BL9	10	478151	5,51	0,1357	40,61
H10TW2BW2BL9-BARE	-	453172	-	-	-



Obrázek 129 Nárůst únosnosti dle výšky zastavovačů růstu trhliny



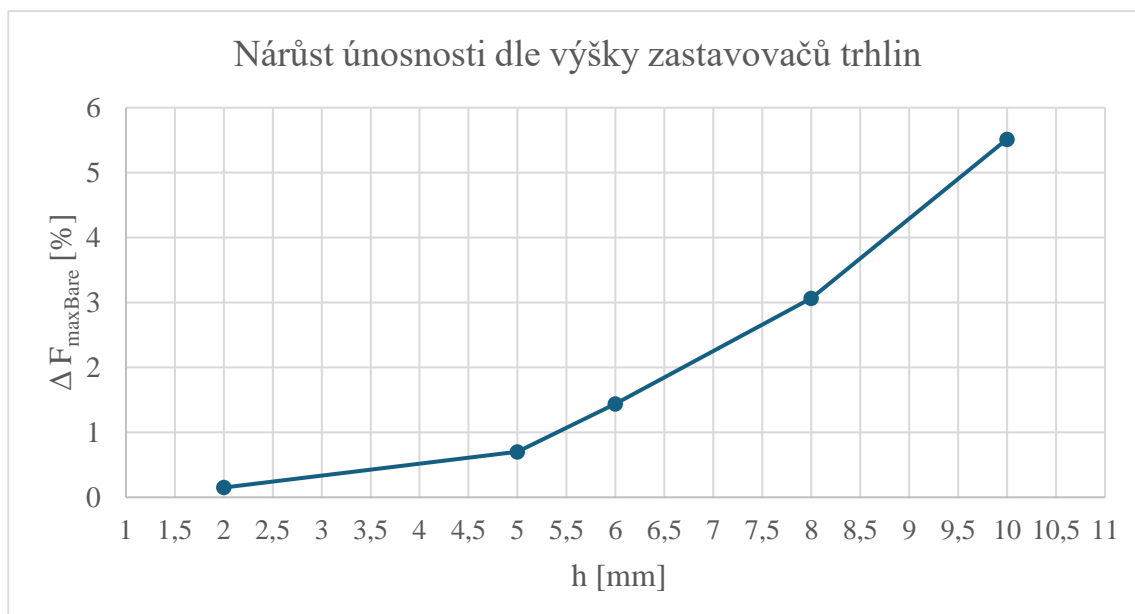
Obrázek 130 Nárůst únosnosti dle výšky zastavovačů růstu trhliny na přidanou hmotnost



Obrázek 131 Vývoj únosnosti prostých panelů

Tabulka 16 Výsledné hodnoty únosnosti pro variantu H5TW2BW2BL9

Varianta	h [mm]	F_{\max} [N]	$\Delta F_{\max\text{Bare}}$ [%]	Δm [kg]	$\Delta F_{\max\text{Bare}} / \Delta m$ [%/kg]
H5TW2BW2BL9	5	458944	0,70	0,0679	10,32
H5TW2BW2BL9-BARE	-	455752	-	-	-



Obrázek 132 Nárůst únosnosti dle výšky zastavovačů růstu trhliny – upravené



Obrázek 133 Nárůst únosnosti dle výšky zastavovačů růstu trhliny na přidanou hmotnost – upravené

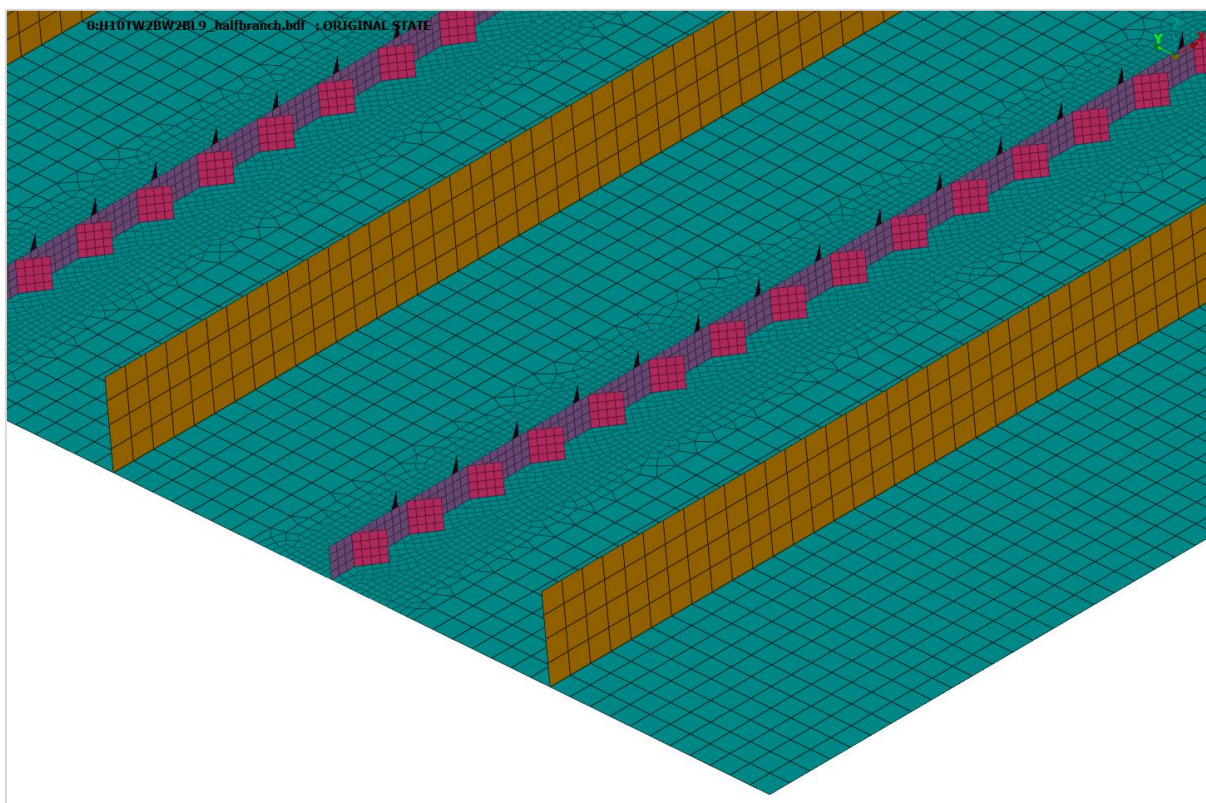
5.5 Varianta s polovičním množstvím postranních větví

V této podkapitole je zkoumána jedna varianta vyztuženého panelu, která oproti geometrii prezentované v 4.1.1 disponuje polovičním počtem postranních větví zastavovačů růstu trhliny.

5.5.1 Popis (poloviční množství postranních větví)

Zkoumaná varianta vychází ze základní varianty H10TW2BW2BL9, která byla prezentovaná v 4.1. Liší se množstvím postranních větví zastavovačů růstu trhliny, kdy každý zastavovač růstu trhliny základní varianty měl 43 párů postranních větví, tedy 43 postranních větví z vnitřní

strany (tzn. strany bližší centrální výztuže) a 43 postranních větví z vnější strany (bližší okraji panelu). Dohromady na celý panel tedy 172 postranních větví. U varianty zkoumané v této kapitole, nazývané H10TW2BW2BL9-HALFBRANCH, disponuje každý zastavovač růstu trhliny 22 postranními větvemi z vnější strany a 21 postranními větvemi z vnitřní strany. Tedy dohromady 86 postranními větvemi, tzn. polovičního množství než základní varianta. Obrázek 135 ukazuje zjednodušený výkres geometrie zastavovače růstu trhliny ZI nacházejícího se v záporném směru osy y od centrální výztuhy. Zkoumaná varianta H10TW2BW2BL9-HALFBRANCH vznikla ze základní varianty H10TW2BW2BL9 odstraněním polovičního množství postranních větví, mimo tento rozdíl ale sdílí se základní variantou síť. Obrázek 134 ukazuje část sítě zkoumané varianty.



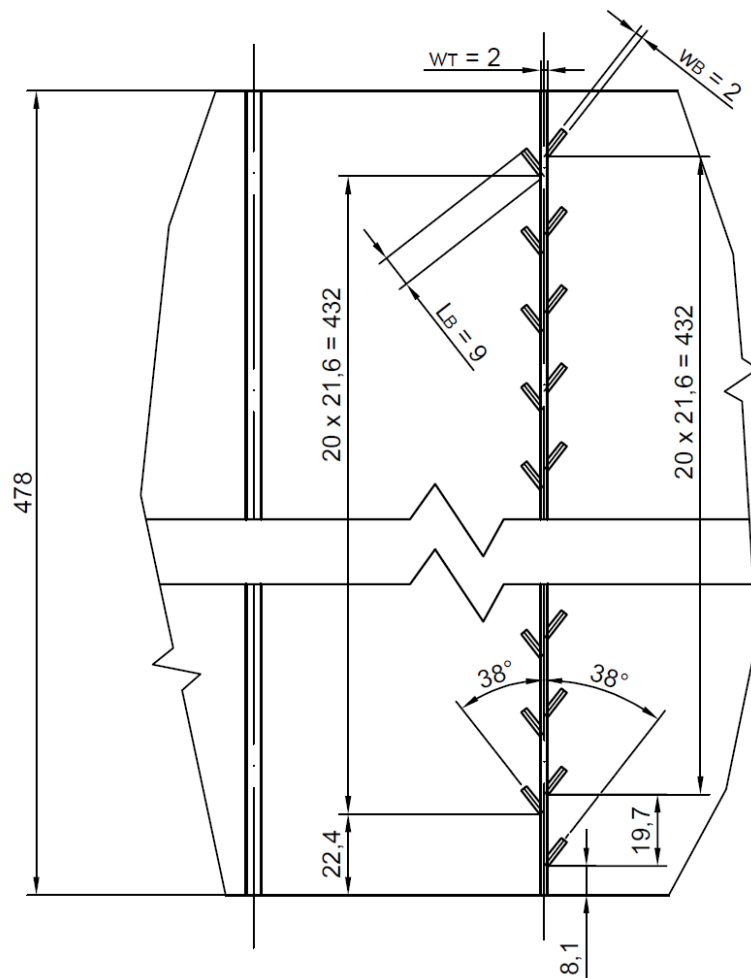
Obrázek 134 Síť varianty s polovinou postranních větví (H10TW2BW2BL9-HALFBRANCH)

5.5.2 Výsledky (poloviční množství postranních větví)

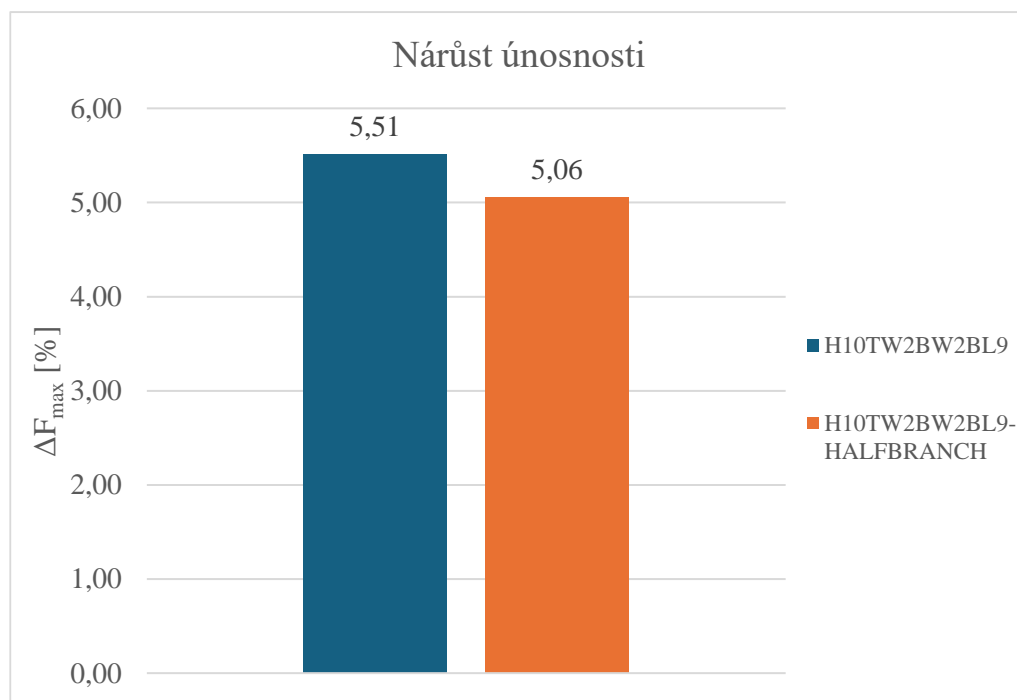
S ohledem na to, že varianta H10TW2BW2BL9-HALFBRANCH sdílí se základní variantou H10TW2BW2BL9 síť, jsou jejich únosnosti srovnávány.

Tabulka 17 uvádí únosnosti těchto variant F_{max} . Dále tabulka uvádí procentuální navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ v procentech únosnosti prostého panelu (také zobrazuje Obrázek 136), hmotnost zastavovačů růstu trhliny Δm a procentuální navýšení únosnosti panelu vztažené na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$ (viz Obrázek 137).

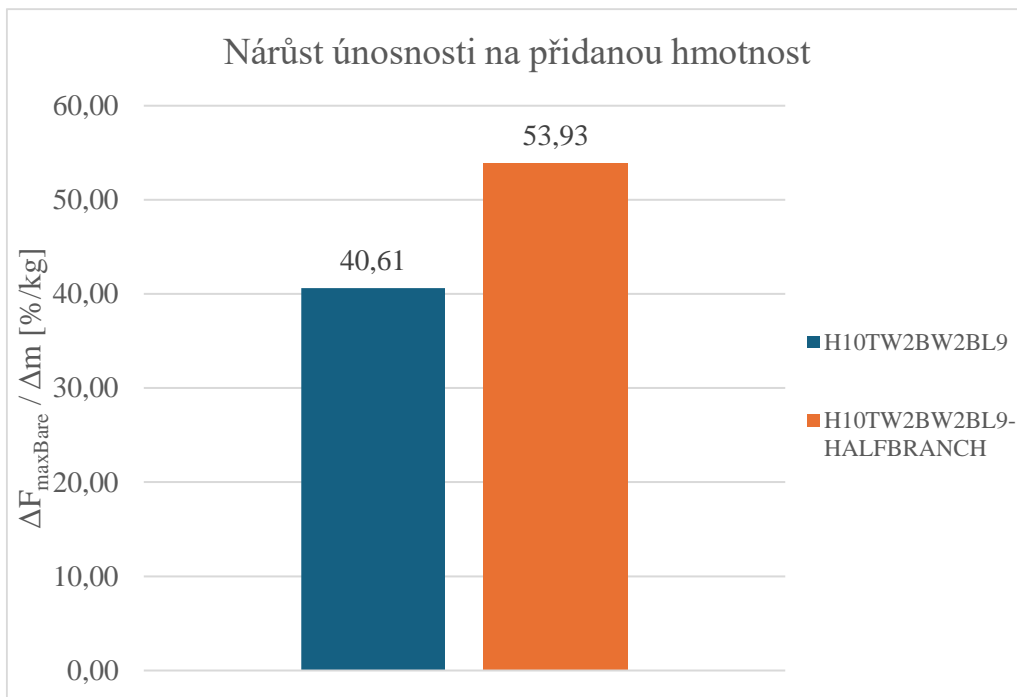
Lze vidět, že varianta s polovičním množstvím postranních větví zastavovačů růstu trhliny dosáhla nižšího navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$, ale poskytuje vyšší navýšení únosnosti panelu vztažené na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$.



Obrázek 135 Geometrie zastavovačů růstu trhliny H10TW2BW2BL9-HALFBRANCH



Obrázek 136 Nárůst únosnosti zkoumané varianty a základní varianty



Obrázek 137 Nárůst únosnosti na přidanou hmotnost zkoumané varianty a základní varianty

Tabulka 17 Výsledné hodnoty zkoumané varianty a základní varianty

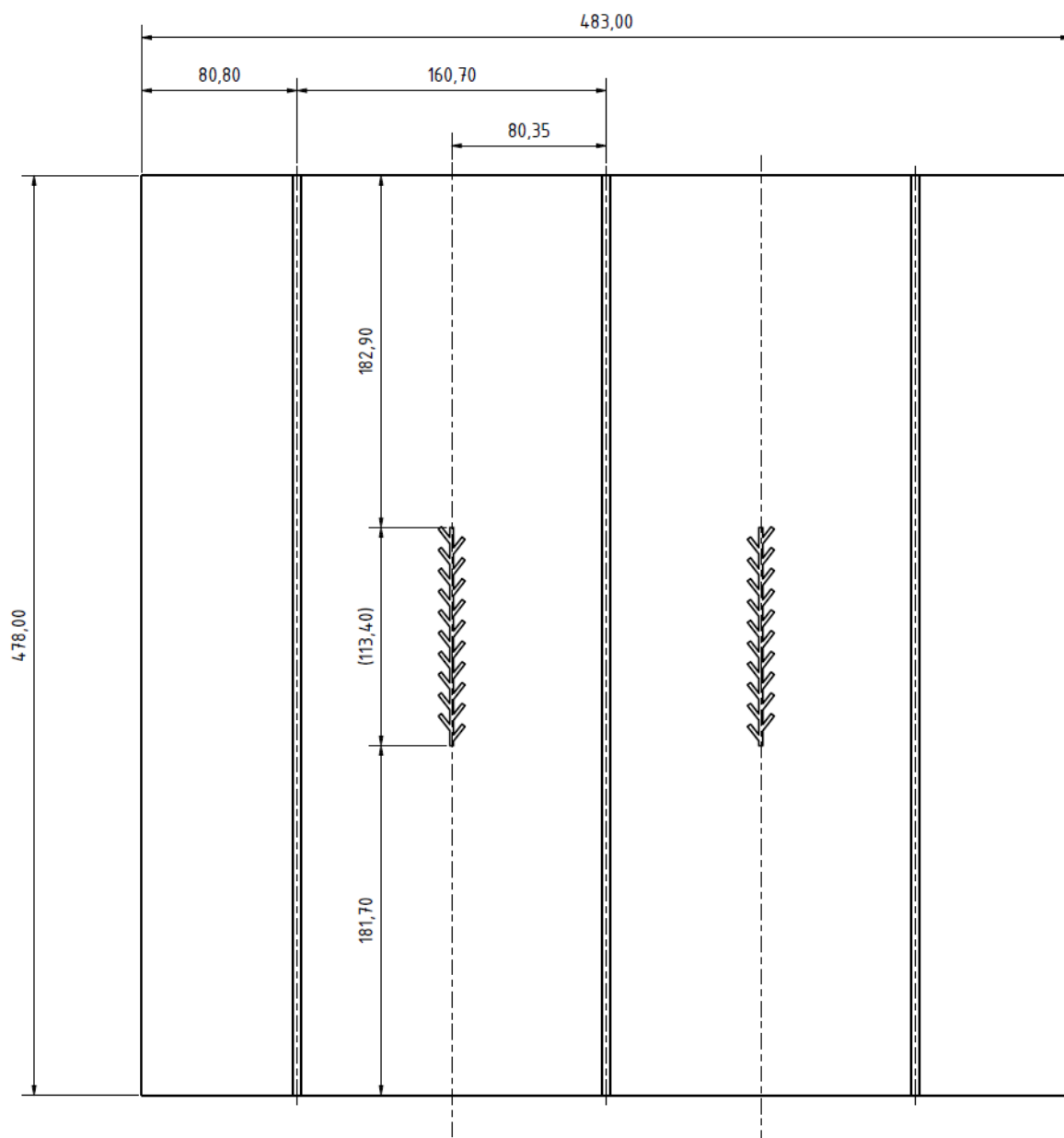
Varianta	F_{\max} [N]	$\Delta F_{\max\text{Bare}}$ [%]	Δm [kg]	$\Delta F_{\max\text{Bare}} / \Delta m$ [%/kg]
H10TW2BW2BL9	478151	5,51	0,1357	40,6
H10TW2BW2BL9-HALFBRANCH	476087	5,06	0,0938	53,9
H10TW2BW2BL9-BARE	453172	-	-	-

5.6 Varianta se zkrácenými zastavovači růstu trhliny

V této podkapitole je zkoumána jedna varianta vyztuženého panelu, jehož geometrie se od té prezentované v 4.1.1 liší tím, že zastavovače růstu trhliny nejsou průběžné po celé délce panelu, ale mají omezenou délku.

5.6.1 Popis (zkrácené zastavovače růstu trhliny)

Zkoumaná varianta, nazývaná H10TW2BW2BL9-PARTIALLENGTH, vychází ze základní varianty H10TW2BW2BL9, která byla prezentovaná v 4.1. Liší se tím, že zastavovače růstu trhliny mají pouze omezenou délku 113,4 mm a jsou lokalizované, jak ukazuje Obrázek 138. Zastavovače růstu trhliny nedosahují zatěžovaných hran panelu, jak tomu bylo ve všech předchozích případech, v důsledku toho není tedy do nich přímo zanášeno zatížení, které je zanášeno jen do uzlů potahu a hlavních výztuh na hraně (viz 4.1.4). Zkoumaná varianta vznikla ze základní varianty H10TW2BW2BL9 odstraněním příslušných elementů terminálu a postranních větví zastavovačů růstu trhliny, jinak ale s ní sdílí síť. Obrázek 139 ukazuje část sítě zkoumané varianty.



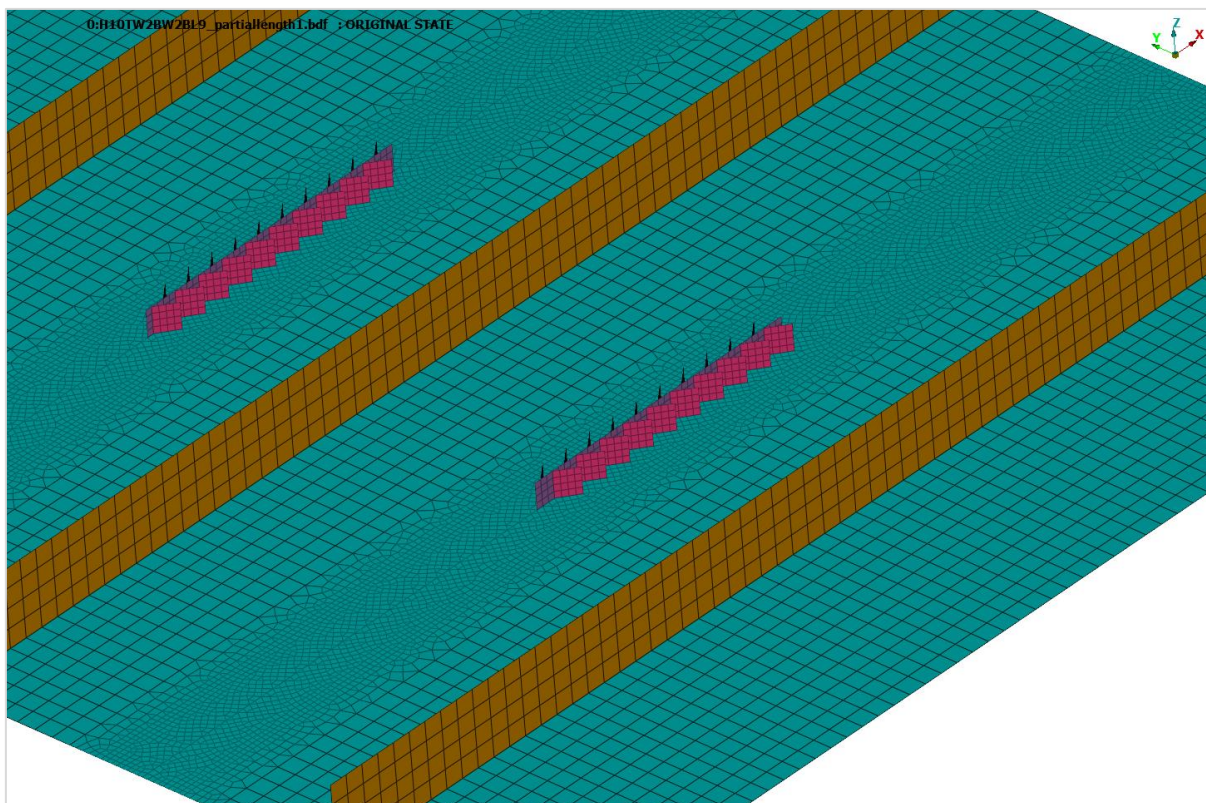
Obrázek 138 Zjednodušený výkres pohledu shora MKP modelu použité varianty se zkrácenými zastavovači růstu trhliny

5.6.2 Výsledky (zkrácené zastavovače růstu trhliny)

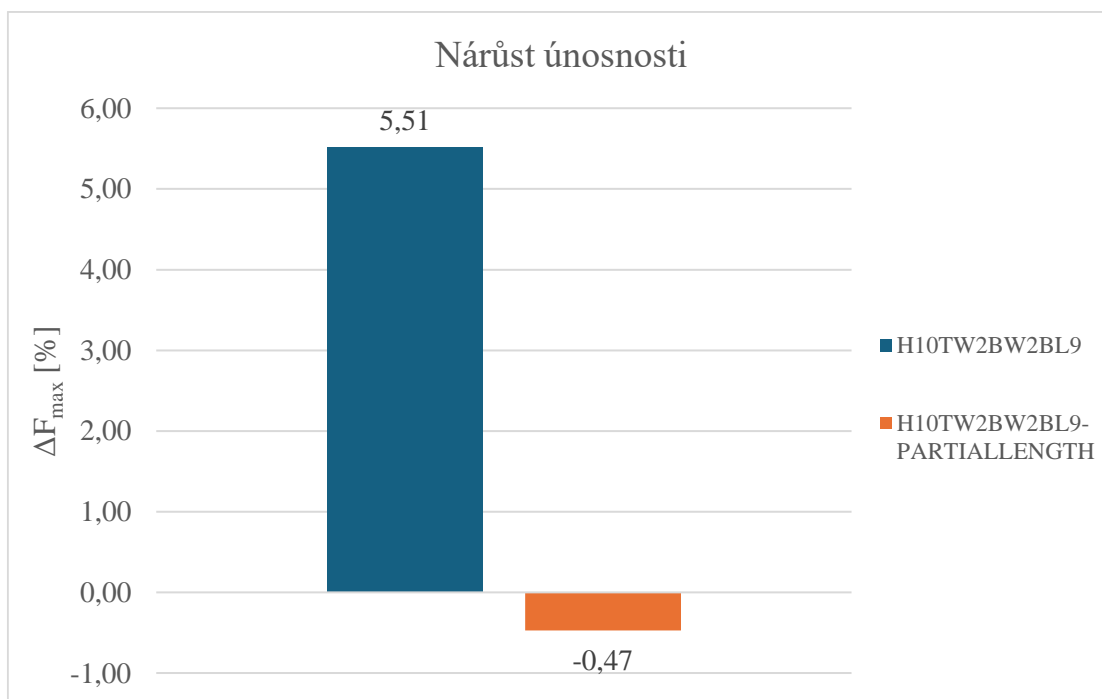
S ohledem na to, že varianta H10TW2BW2BL9-PARTIALLENGTH sdílí se základní variantou H10TW2BW2BL9 síť, jsou jejich únosnosti srovnávány.

Tabulka 18 Výsledné hodnoty zkoumané varianty a základní varianty

Varianta	F_{\max} [N]	$\Delta F_{\max\text{Bare}}$ [%]	Δm [kg]	$\Delta F_{\max\text{Bare}} / \Delta m$ [%/kg]
H10TW2BW2BL9	478151	5,51	0,1357	40,6
H10TW2BW2BL9-PARTIALLENGTH	451032	-0,47	0,0318	-14,8
H10TW2BW2BL9-BARE	453172	-	-	-



Obrázek 139 Síť varianty se zkrácenými zastavovači růstu trhliny



Obrázek 140 Nárůst únosnosti zkoumané varianty a základní varianty

Tabulka 18 uvádí únosnosti těchto variant F_{max} . Dále tabulka uvádí procentuální navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ v procentech únosnosti prostého panelu (také zobrazuje Obrázek 140). Při pohledu na obrázek i do tabulky lze vidět, že užití takové varianty zastavovače růstu trhliny

se jeví z hlediska navýšení únosnosti panelu jako kontraproduktivní, jelikož došlo k poklesu únosnosti.

Tabulka dále uvádí hmotnost zastavovačů růstu trhliny Δm a pro úplnost i procentuální navýšení únosnosti panelu vztažené na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$, které kvůli reálnému snížení únosnosti nemá ale praktický význam.

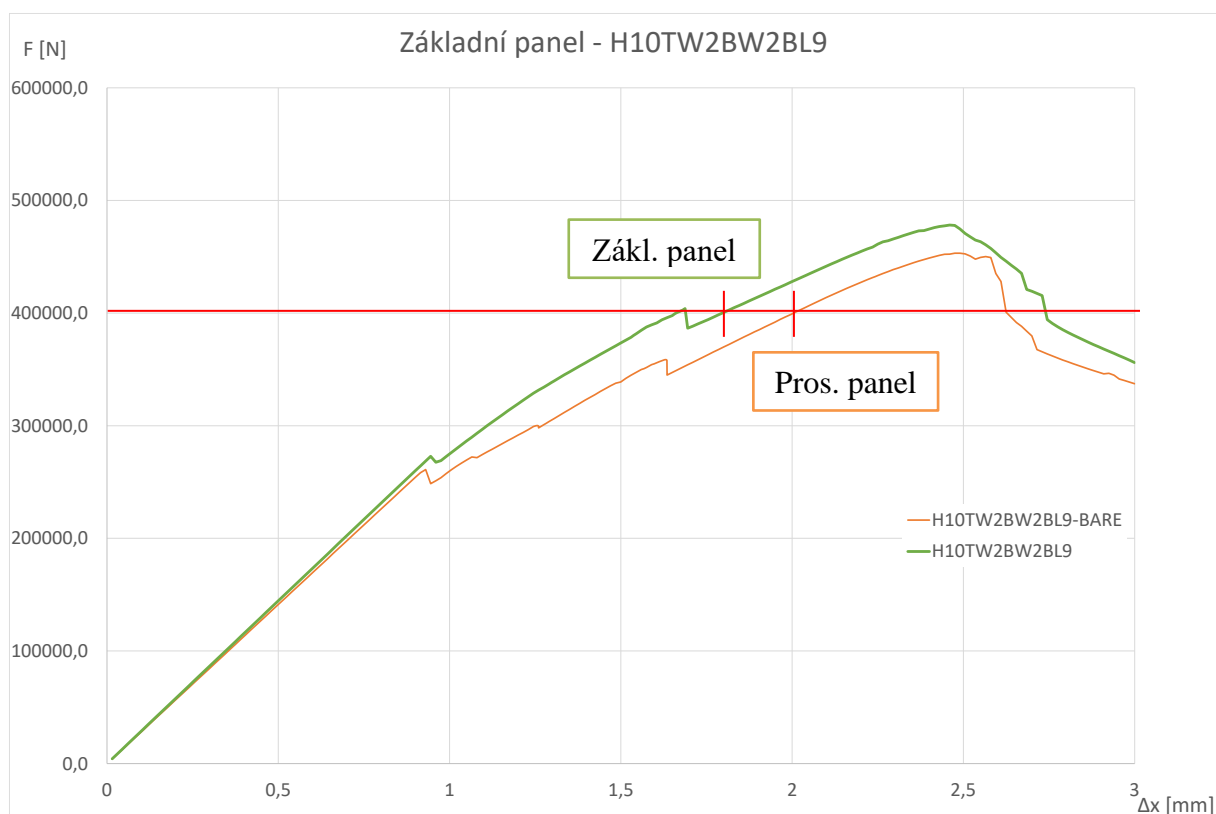
6. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Tato kapitola je věnována zhodnocení výsledků zkoušených variant prezentovaných v kapitole 5.

6.1 Srovnání základního a prostého panelu

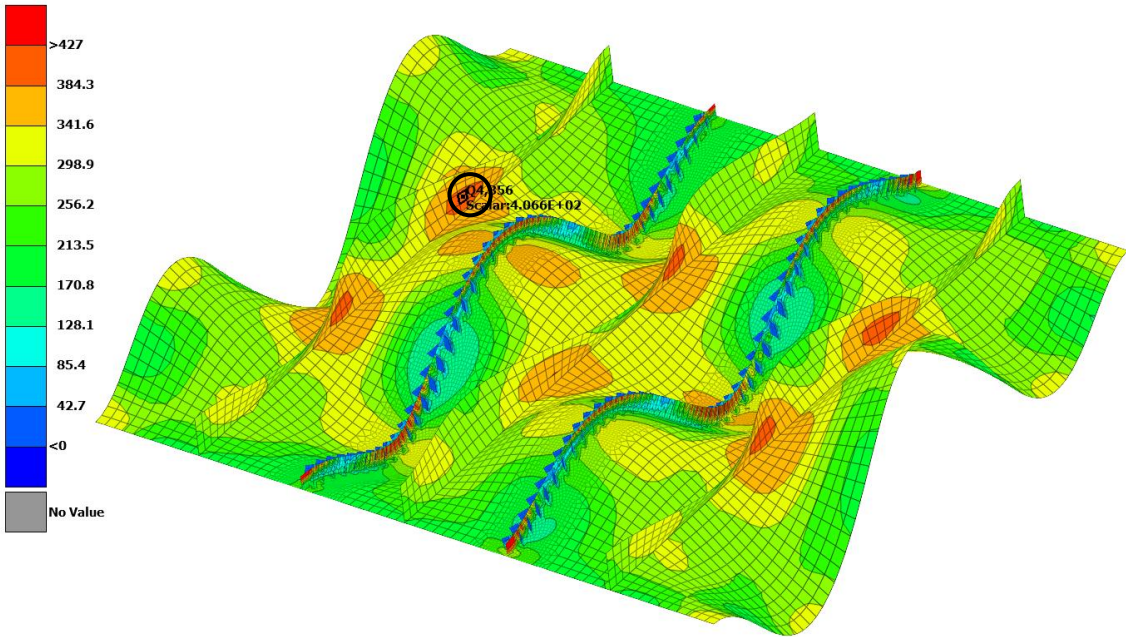
Před vlastním zhodnocením výsledků zkoumaných variant je v této podkapitole ukázán příklad efektu zastavovačů růstu trhliny na napětí a deformaci vyztuženého panelu. Obrázek 141 ukazuje průběh zatěžování základní varianty H10TW2BW2BL9 (také prezentované v 4.1.7) a prostého panelu stejné varianty, tedy sdílející MKP síť. Pro obě varianty byl vybrán zátěžový stav, kdy reakční síla na okraji panelu F odpovídá přibližně hodnotě 400 kN, v grafu jsou tyto stavy označeny svislými červenými úsečkami. V případě základního panelu konkrétně $F = 400,5$ kN s deformačním zatížením $\Delta x = -1,8$ mm a v případě prostého panelu $F = 400,8$ kN s deformačním zatížením $\Delta x = -2,01$ mm.

Pro každý panel je vybrán jeden element výztuhy, pro který je srovnáno redukované napětí dle teorie HMM σ u obou panelů a jeden element deformovaného potahu, pro který je srovnána deformace d u obou panelů.



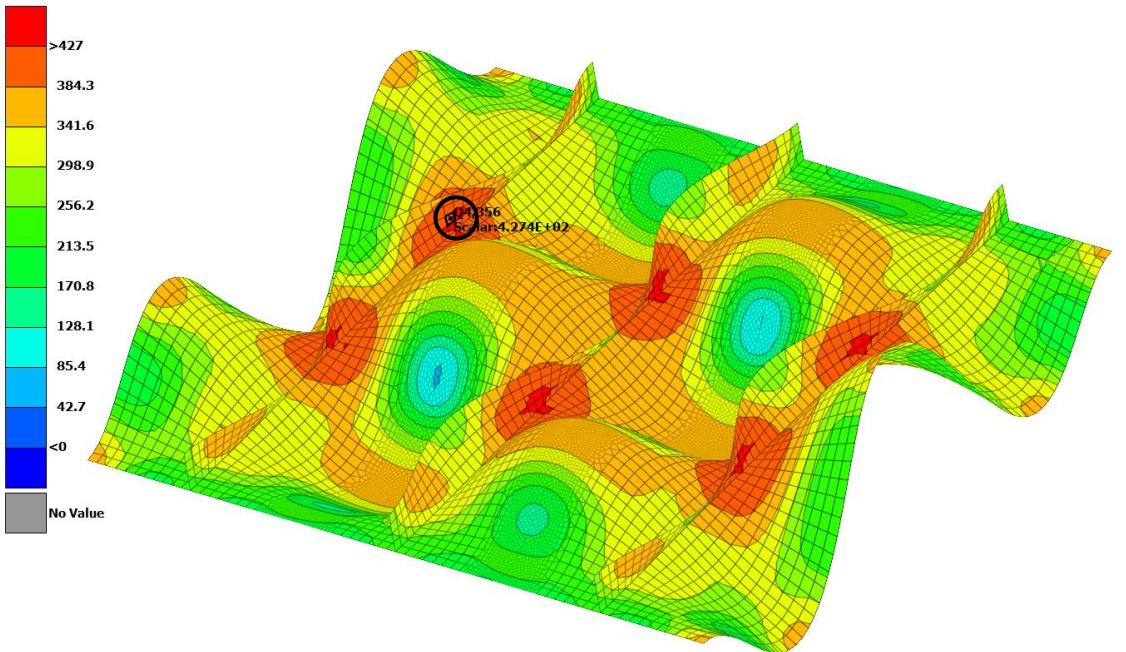
Obrázek 141 Průběh zatížení u základního panelu a příslušného prostého panelu

0:h10tw2bw2bl9_height.op2 : Scalar: Stresses,Von Mises,Average of Top Bottom : : Scale Factor 1.000E+01 : SUBCASE 1 ::LOADSTEP 6.000000E-01 ::DEFAULT: SUBCASE 1



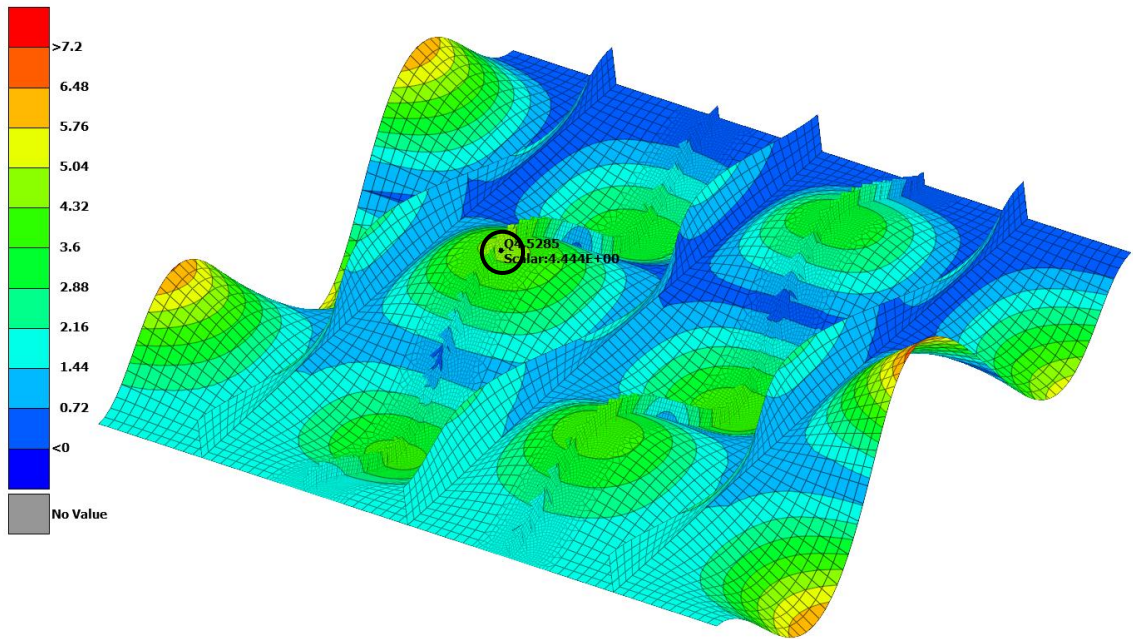
Obrázek 142 Redukované napětí při $F \approx 400$ kN – základní panel

0:h10tw2bw2bl9_bare_height.op2 : Scalar: Stresses,Von Mises,Average of Top Bottom : : Scale Factor 1.000E+01 : SUBCASE 1 ::LOADSTEP 6.700000E-01 ::DEFAULT: SUBCASE 1



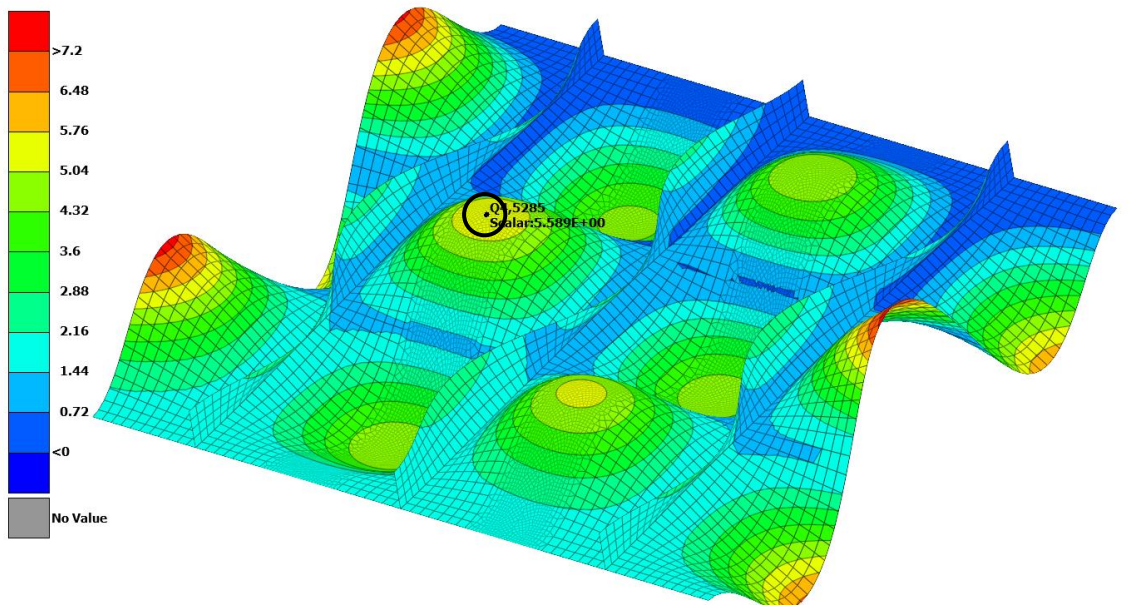
Obrázek 143 Redukované napětí při $F \approx 400$ kN – prostý panel

0:h10tw2bw2bl9_height.op2 : Scalar: Displacements,Translational,Magnitude : : Scale Factor 1.000E+01 : SUBCASE 1 ::LOADSTEP 6.000000E-01 ::DEFAULT: SUBCASE 1



Obrázek 144 Deformace při $F \approx 400$ kN – základní panel

0:h10tw2bw2bl9_bare_height.op2 : Scalar: Displacements,Translational,Magnitude : : Scale Factor 1.000E+01 : SUBCASE 1 ::LOADSTEP 6.700000E-01 ::DEFAULT: SUBCASE 1



Obrázek 145 Deformace při $F \approx 400$ kN – prostý panel

Obrázek 142 ukazuje rozložení napětí σ pro základní panel a Obrázek 143 prostého panelu. V případě základního panelu lze pozorovat u vybraného elementu výztuhy redukované napětí $\sigma = 406,6$ MPa, v případě prostého panelu $\sigma = 427,4$ MPa. Lze tedy vidět, že při stejném silovém zatížení dosahuje panel se zastavovači růstu trhlin nižších napětí ve výztuhách, jelikož část zatížení je přenášena zastavovači růstu trhlin.

Obrázek 144 ukazuje rozložení deformace pro základní panel a Obrázek 145 pro prostý panel. Vybraný element u základního panelu dosahuje deformace $d = 4,444$ mm díky vyztužení potahu zastavovači růstu trhlin, v případě prostého panelu činí deformace $d = 5,589$ mm.

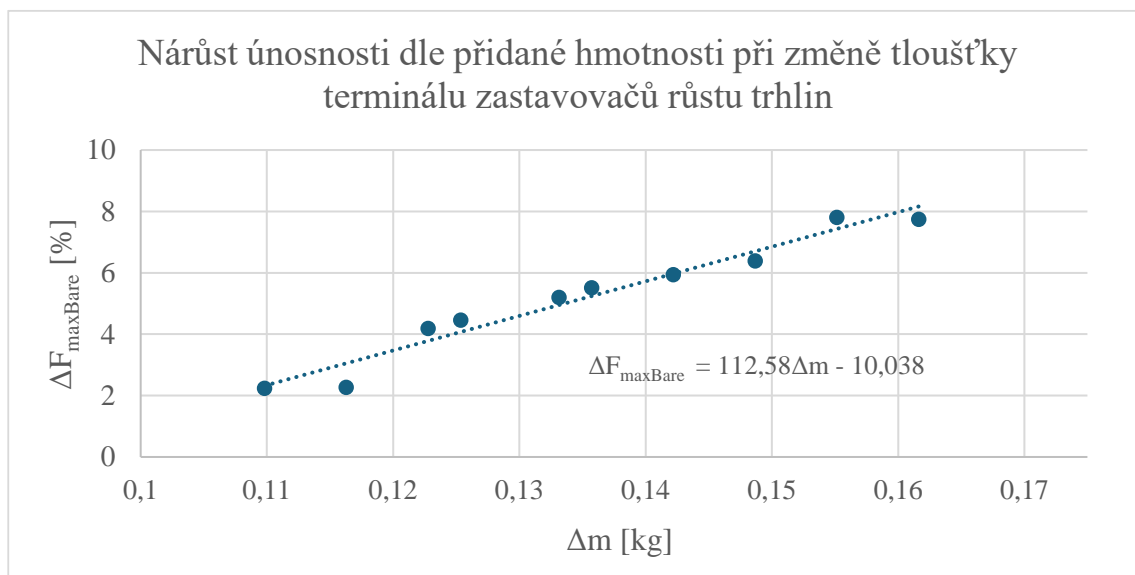
Všechny obrázky zobrazují pro lepší vizualizaci deformaci graficky v měřítku 10:1. Poloha srovnávaných elementů je zvýrazněna černým kroužkem.

6.2 Změna tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhlin (parametr w_T)

Jak ukazuje Obrázek 112 s rostoucí tloušťkou terminálu zastavovačů růstu trhliny dochází i k nárůstu procentuálního navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ vyztuženého panelu. Obrázek 146 ukazuje nárůst procentuálního navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ v závislosti na přidané hmotnosti zastavovačů růstu trhliny jako bodový graf s lineární spojnicí trendu ve formátu vyjadřující navýšení únosnosti jako funkci přidané hmotnosti Δm terminálu zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare} = k \cdot \Delta m + q$. Kdy k je lineární směrnice a q absolutní člen.

Obrázek 113 pak ukazuje, že zároveň dochází i k nárůstu procentuálního navýšení únosnosti vztaheného na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$.

Z tohoto se jeví, že zvyšování tloušťky terminálu w_T může být vhodný způsob pro efektivní zvýšení únosnosti vyztuženého panelu.



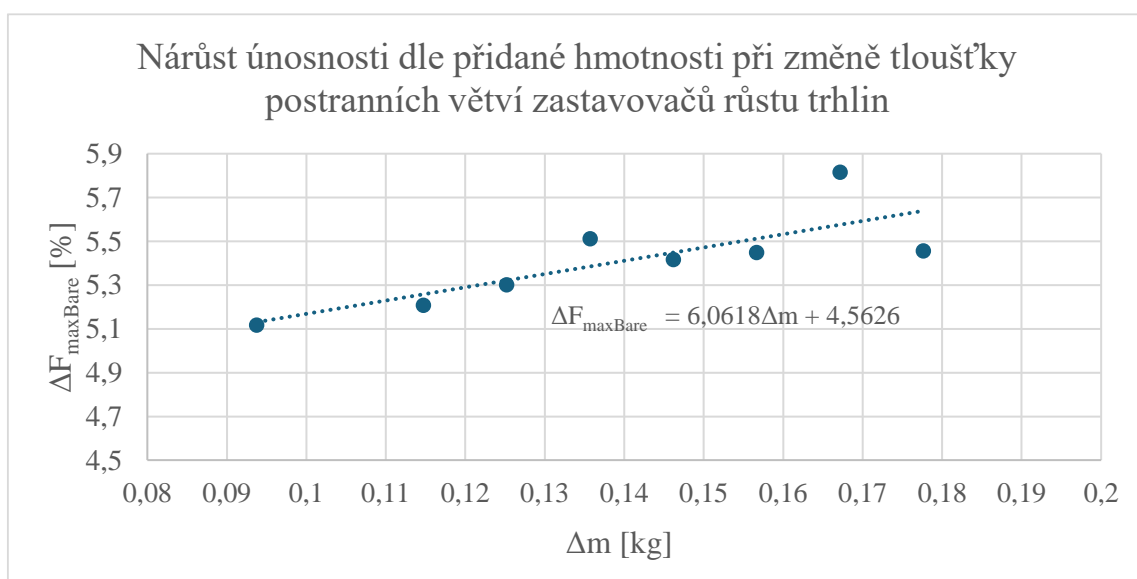
Obrázek 146 Nárůst únosnosti dle přidané hmotnosti u změny tloušťky terminálu – trend

6.3 Změna tloušťky postranních větví zastavovačů růstu trhliny (parametr w_B)

Obrázek 116 ukazuje, že s rostoucí tloušťkou postranních větví zastavovačů růstu trhliny dochází i k nárůstu procentuálního navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$. Obrázek 147 udává formou

bodového grafu s lineární spojnicí trendu nárůst procentuálního navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ v závislosti na přidané hmotnosti zastavovačů růstu trhliny. Lze vidět, že tento nárůst je relativně mírný s lineární směrnici spojnice $k = 6,0618$. Srovná-li se to s lineární směrnici trendu v 6.2, která se rovnala $k = 112,58$, tak lze konstatovat, že zvyšování tloušťky postranních větví w_B dosahuje zřejmě sotva 5,38 % lineárního růstu procentuálního navýšení únosnosti, jaký byl dosažen při navyšování tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny w_T .

Při pohledu na Obrázek 117 pak lze vidět, že při zvyšování tloušťky postranních větví zastavovačů růstu trhliny dochází k poklesu procentuálního navýšení únosnosti vztaženého na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$.



Obrázek 147 Nárůst únosnosti dle přidané hmotnosti u změny tloušťky postranních větví – trend

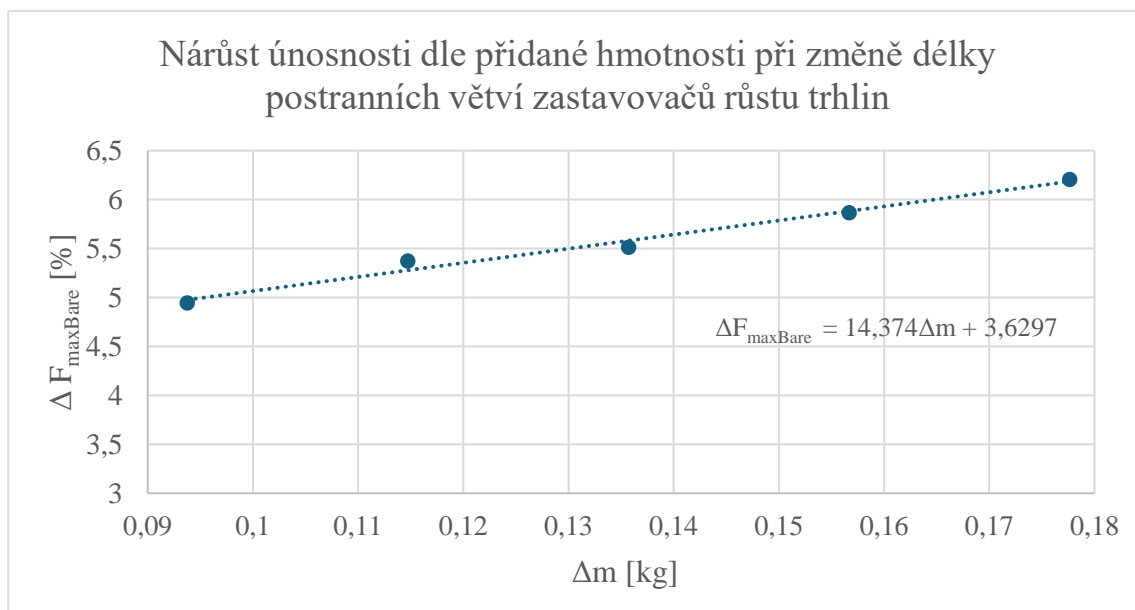
Zvyšování tloušťky postranních větví w_B se tedy nejeví jako vhodný způsob pro efektivní zvýšení únosnosti vyztuženého panelu.

6.4 Změna délky postranních větví (parametr L_B)

Obrázek 123 ukazuje, že s rostoucí délkou postranních větví zastavovačů růstu trhliny dochází i k nárůstu procentuálního navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$. Obrázek 148 udává formou bodového grafu s lineární spojnicí trendu nárůst procentuálního navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ v závislosti na přidané hmotnosti zastavovačů růstu trhliny. Lze vidět, že ačkoliv oproti 6.3 je lineární růst více než dvojnásobný, tak dosahuje pouze 12,77 % růstu, jaký byl dosažen při navyšování tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny w_T v 6.2.

Při pohledu na Obrázek 124 pak lze vidět, že při zvyšování délky postranních větví zastavovačů růstu trhliny dochází k poklesu procentuálního navýšení únosnosti vztaženého na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$.

Zvyšování délky postranních větví L_B se tedy nejeví jako vhodný způsob pro efektivní zvýšení únosnosti vyztuženého panelu.



Obrázek 148 Nárůst únosnosti dle přidané hmotnosti u změny délky postranních větví – trend

6.5 Změna výšky zastavovačů růstu trhlíny (parametr h)

Obrázek 132 ukazuje, že s rostoucí výškou zastavovačů růstu trhlíny dochází i k nárůstu procentuálního navýšení únosnosti $\Delta F_{\max\text{Bare}}$. S ohledem na to, že lineární spojnice trendu se nezdá vhodná pro zachycení trendu vývoje $\Delta F_{\max\text{Bare}}$ a zdá se, že vhodnější by byla polynomická spojnice trendu o vyšším řádu, která by neumožnila jednoduché srovnání jako v předešlých kapitolách. Tyto varianty jsou proto srovnávány s ostatními až v rámci celkového zhodnocení v 6.8.

Obrázek 133 ukazuje že dochází i k nárůstu procentuálního navýšení únosnosti vztaženého na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhlíny $\Delta F_{\max\text{Bare}}/\Delta m$.

Z tohoto se jeví, že zvyšování výšky zastavovačů růstu trhlíny h může být vhodný způsob pro efektivní zvýšení únosnosti vyztuženého panelu.

6.6 Varianta s polovičním množstvím postranních větví

Obrázek 136 ukazuje, že snížení počtu postranních větví vede k poklesu navýšení únosnosti $\Delta F_{\max\text{Bare}}$. Nicméně při pohledu na Obrázek 137 lze vidět, že při polovičním množství postranních větví je dosaženo většího navýšení únosnosti vztaženého na přidanou hmotnost zastavovačů růstu trhlíny $\Delta F_{\max\text{Bare}}/\Delta m$. Je tedy dosaženo vyšší efektivity z hlediska přidané hmotnosti.

6.7 Varianta se zkrácenými zastavovači růstu trhlíny

Obrázek 140 lze vidět, že při aplikaci zkráceného zastavovače růstu trhlíny dochází k poklesu únosnosti, tato varianta se tedy z hlediska zvýšení únosnosti jeví jako naprosto nevhodná.

6.8 Celkové zhodnocení

Tato podkapitola je věnována celkovému zhodnocení získaných výsledků a shrnutí vhodnosti změn zkoumaných parametrů v této práci prezentovaných zastavovačů růstu trhliny na zvýšení únosnosti vyztuženého panelu.

Obrázek 149 ukazuje navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ ve vztahu ku přidané hmotnosti Δm všech zkoumaných variant. Lze vidět, že všechny variace určitého rozměrového parametru obsahují základní variantu H10TW2BW2BL9. Z pohledu této varianty je možné nahlížet na jednotlivé zkoumané změny.

Lze tak například vidět, že zvyšování tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny w_T vede k významnému nárůstu únosnosti. Vyjma varianty s nejvyšší hmotností, který vybočuje z trendu, dle názoru autora pravděpodobně z důvodu výpočetní anomálie, pro vyjasnění důvodu by bylo třeba výpočtu dalších variant. Zároveň lze vidět, že snižováním tloušťky terminálu w_T dochází k prudkému poklesu navýšení únosnosti, nejprudšímu ze všech variací určitého rozměrového parametru. Parametr w_T se tedy jeví jako významný pro efektivní navýšení únosnosti.

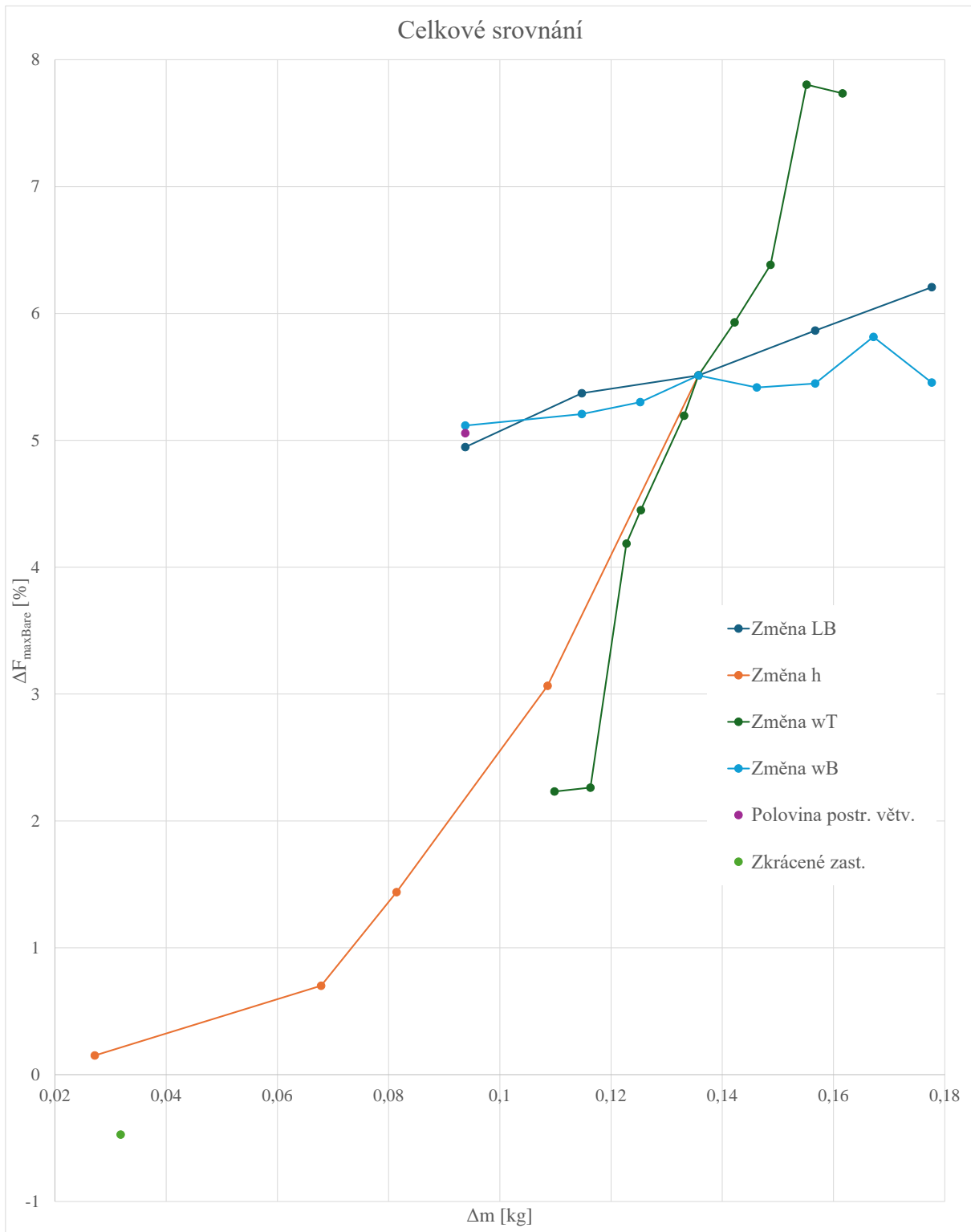
Při zmenšování výšky zastavovačů růstu trhliny h ze základní varianty lze rovněž vidět prudký pokles navýšení únosnosti. Ztráta navýšení únosnosti není z pohledu efektivity na přidanou hmotnost významnější než v případě změny parametru w_T , je nicméně velice výrazná. Parametr h se tedy rovněž jeví jako významný pro efektivní navýšení únosnosti.

Naproti tomu lze vidět, že při zvyšování tloušťky postranních větví w_B a zvyšování délky postranních větví L_B dochází jen k relativně malému nárůstu únosnosti. Jedná se tedy o nepříliš efektivní způsob zvyšování únosnosti z hlediska přidané hmotnosti. A naopak při zmenšování parametru L_B či w_B dochází jen k mírnému poklesu únosnosti, což lze pozorovat i u varianty s polovičním množstvím postranních větví. Tyto varianty poskytují lepší efektivitu navýšení únosnosti z hlediska přidané hmotnosti ve srovnání s variantami, kde byla snižována hodnota parametru w_T či h . Změna parametrů L_B a w_B se tedy jeví, že má jen velice omezený vliv na zvyšování i snižování únosnosti.

Z hlediska vytvoření hmotnostně efektivní konfigurace se tedy jeví, že zvětšování parametrů navyšující pouze hmotnost postranních větví je neefektivní. „Zkracování“ a „ztenčování“ postranních větví a potenciálně i snižování jejich počtu vede k významnému snížení hmotnosti za relativně malých ztrát na navýšení únosnosti. Naopak zmenšování parametru w_T souvisejícího pouze s hmotností terminálu vede k nejvýraznějšímu poklesu navýšení únosnosti za pouze malého zisku „ušetřené“ hmotnosti.

Jeví se tedy, že postranní větve se na navyšování únosnosti podílí jen malým dílem a hlavní význam má zvyšování parametrů upravující terminál zastavovačů růstu trhliny. S ohledem na to, že terminál, oproti postranním větvím, v konstrukci přímo přenáší tlakové zatížení, se toto zdá jako intuitivní závěr.

Ukáže-li se v budoucnu, že tento typ zastavovačů růstu trhliny poskytuje významný efekt navýšení únavové životnosti, pak z hlediska únosnosti bude zřejmě nejsmysluplnější hledat vhodnou konfiguraci z hlediska změn výšky zastavovačů růstu trhliny h a tloušťky terminálu w_T . Parametry související s postranními větvemi, tedy jejich počet, délka L_B a šířka w_B by měly být zřejmě voleny v nejnižších hodnotách, které by zároveň dovolovaly zachování případného významného efektu navýšení životnosti.



Obrázek 149 Celkové srovnání nárůstu únosnosti ve vztahu k přidání hmotnosti

7. ZÁVĚR

V diplomové práci byla provedena studie vlivu čtyř hlavních rozměrových parametrů specifického druhu zastavovačů růstu trhliny ve formě integrálních výztuh o tvaru připomínající žilky listu na tlakovou únosnost integrálního vyztuženého panelu křídla. Zkoumanými parametry byly výška zastavovačů růstu trhliny h , tloušťka tzv. terminálu w_T , tloušťka tzv. postranních větví w_B a délka postranních větví L_B . Mimo tyto parametry byla zkoušena i varianta s polovičním počtem postranních větví oproti ostatním variantám a varianta se zkrácenou délkou zastavovačů růstu trhliny. Únosnost v tlaku byla vyhodnocována pomocí nelineárních výpočtů metodou konečných prvků.

Důležitým aspektem hodnocení účinnosti dané varianty byla hmotnost zastavovačů růstu trhliny, o který by byla hmotnost prostého panelu bez zastavovačů růstu trhlín jejich aplikací navýšena. Proto kromě parametru navýšení únosnosti v procentech únosnosti prostého panelu bez zastavovačů růstu trhliny $\Delta F_{maxBare}$, bylo jako parametr sledováno i tohle navýšení únosnosti $\Delta F_{maxBare}$ vztažené na hmotnost zastavovačů růstu trhliny Δm , o které byla hmotnost panelu navyšována oproti prostému panelu. Výsledný parametr byl tedy $\Delta F_{maxBare}/\Delta m$. Celkové zhodnocení bylo provedeno v podkapitole 6.8, kdy hlavní výsledky ukazuje Obrázek 149.

Ze studie vyplynulo, že hlavní vliv na navýšení únosnosti mají rozměrové parametry, které souvisejí se změnou terminálu zastavovačů růstu trhliny, tedy tloušťka terminálu w_T a výška zastavovačů h . U tloušťky terminálu w_T se efekt navýšení únosnosti pohyboval v rozpětí od 2,23 % do 7,80 % únosnosti prostého panelu. U výšky zastavovačů h šlo o navýšení únosnosti o 0,15 % až 5,51 % únosnosti prostého panelu.

Vliv rozměrových parametrů souvisejících pouze s postranními větvemi, tedy tloušťka postranních větví w_B a délka postranních větví L_B , se ukázal jako nepříliš významný na navýšení únosnosti. Obzvláště z hlediska efektivního využití přidané hmotnosti. Zvětšování těchto parametrů z výchozí zkoumané varianty H10TW2BW2BL9 vedlo k významnému zvyšování hmotnosti a zároveň vedlo jen k relativně mírnému navýšení únosnosti. Naopak zmenšování těchto parametrů vedlo k významnému snižování hmotnosti za relativně nízkých ztrát na navýšení únosnosti. Efekt navýšení únosnosti při změně tloušťky postranních větví w_B byl od 5,11 % do 5,81 % únosnosti prostého panelu. Při změně délky postranních větví L_B šlo o navýšení únosnosti o 4,94 % až 6,21 % únosnosti prostého panelu. U zkoušené varianty s polovičním množstvím postranních větví byla rovněž pozorována relativně nízká ztráta na navýšení únosnosti s ohledem na sníženou hmotnost proti jinak shodné variantě se standardním množstvím postranních větví (pokles z navýšení únosnosti 5,51 % na 5,06 % únosnosti prostého panelu).

Varianta se zkrácenou délkou zastavovačů růstu trhliny se ukázala z hlediska navýšení únosnosti jako kontraproduktivní, jelikož došlo k poklesu únosnosti oproti panelu bez zastavovačů (došlo k celkovému poklesu únosnosti o 0,47 % únosnosti prostého panelu). Její využití za účelem zvýšení únosnosti v tlaku se tedy jeví jako naprosto nevhodné.

Pokud by se v dalším výzkumu ukázal významný vliv zkoumaného druhu zastavovačů růstu trhliny na zvýšení tahové únavové životnosti, pak v rámci vytvoření hmotnostně efektivní konstrukce by bylo zřejmě nejperspektivnější pro zlepšení tlakové únosnosti panelu hledat vhodnou konfiguraci s pomocí změn výšky zastavovačů růstu trhliny h a tloušťky terminálu w_T . Parametry související s postranními větvemi, tedy jejich počet, délka L_B a šířka w_B by měly být zřejmě voleny v nejnižších hodnotách, které by zároveň dovolovaly zachování případného významného efektu navýšení životnosti.

Jak výše uvedené naznačuje, bylo by vhodné, aby případný další výzkum se v první řadě zaměřil na prozkoumání vhodnosti a efektivnosti daného typu zastavovačů růstu trhliny na

navýšení tahové únavové životnosti. Dále by bylo vhodné některou ze zkoumaných variant, například základní variantu H10TW2BW2BL9, fyzicky vyrobit a podrobit zkoušce v tlaku pro validaci v této diplomové práci provedených výpočtů. Následně by bylo prospěšné provést další MKP výpočty pro větší množství a rozpětí hodnot hlavních rozměrových parametrů zastavovačů růstu trhliny pro důkladnější pochopení jejich vlivu na navýšení únosnosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BAKER, Alan. Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure. Online. *Composite Structures*. 1999, roč. 47, č. 1-4, s. 431-443. ISSN 02638223. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00011-8). [cit. 2024-02-20].
2. BEDNARCYK, Brett; YARRINGTON, Phillip; LUCKING, Ryan; COLLIER, Craig; AINSWORTH, James et al. Efficient Design and Analysis of Lightweight Reinforced Core Sandwich and PRSEUS Structures. Online. *52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. 2011, s. -. ISBN 978-1-60086-951-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/6.2011-1909>. [cit. 2024-03-06].
3. BOLLER, Christian a BUDERATH, Matthias. Fatigue in aerostructures—where structural health monitoring can contribute to a complex subject. Online. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007, roč. 365, č. 1851, s. 561-587. ISSN 1364-503X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1924>. [cit. 2023-09-28].
4. BOSCOLO, Marco; ALLEGRI, Giuliano a ZHANG, Xiang. Design and Modelling of Selective Reinforcements for Integral Aircraft Structures. Online. *AIAA Journal*. 2008, roč. 46, č. 9, s. 2323-2331. ISSN 0001-1452. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.35712>. [cit. 2024-01-29].
5. BROEK, David. Stiffened sheet structures. In: BROEK, David. *Elementary engineering fracture mechanics*. 3rd printing. Hague: Martinus Nijhoff Publishers, 1984, s. 409-432. ISBN 90-247-2580-1.
6. BRUHN, E. F. *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*. 2nd Edition. U.S.A.: Tri-State Offset Company, 1973. ISBN 978-0961523404.
7. CS-25, Amendment 27. *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes*. European Aviation Safety Agency EASA, 2021-11-24.
8. DOMAZET, Željko. Comparison of fatigue crack retardation methods. Online. *Engineering Failure Analysis*. 1996, roč. 3, č. 2, s. 137-147. ISSN 13506307. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/1350-6307\(96\)00006-4](https://doi.org/10.1016/1350-6307(96)00006-4). [cit. 2024-02-19].
9. GRANDT, F. Damage Tolerant Design and Nondestructive Inspection - Keys to Aircraft Airworthiness. Online. *Procedia Engineering*. 2011, roč. 17, s. 236-246. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.10.025>. [cit. 2023-10-15].
10. JETELA, Václav; KLEMENT, Josef; HOLZER, Jakub a KONDÁS, Ján. Bonded and additively manufactured crack retarders: A comparative study of damage tolerance properties. Online. *International Journal of Fatigue*. 2023, roč. 170. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107509>. [cit. 2024-02-19].

11. LANCIOTTI, A.; LAZZERI, L.; POLESE, C.; RODOPOULOS, C.; MOREIRA, P. et al. Fatigue Crack Growth in Stiffened Panels, Integrally Machined or Welded (LBW or FSW): the DaToN Project Common Testing Program. *Tech Science Press*. 2011, roč. 7, č. 3, s. 211-229.
12. LAZZERI, Roberta. A COMPARISON BETWEEN SAFE LIFE, DAMAGE TOLERANCE AND PROBABILISTIC APPROACHES TO AIRCRAFT STRUCTURE FATIGUE DESIGN. Online. *Aerotecnica Missili e Spazio*. 2002, č. 81, s. 53-64. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267563386_A_COMPARISON_BETWEEN_SAFE_LIFE_DAMAGE_TOLERANCE_AND_PROBABILISTIC_APPROACHES_TO_AIRCRAFT_STRUCTURE_FATIGUE_DESIGN. [cit. 2023-10-15].
13. LIU, Jiaming; WU, Lushen; SONG, Minjie; HU, Yun; LEI, Min et al. Crack resistance behaviour of aluminium alloy for aircraft skin with bionic coupling units processed by laser cladding. Online. 2020, roč. 43, č. 11, s. 2756-2760. ISSN 8756-758X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ffe.13315>. [cit. 2024-02-09].
14. MEGSON, T. H. G. *Aircraft Structures for engineering students*. 4th Edition. Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-0-75066-7395.
15. NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.
16. PAIK, Jeom Kee a KIM, Bong Ju. Ultimate strength formulations for stiffened panels under combined axial load, in-plane bending and lateral pressure. Online. *Thin-Walled Structures*. 2002, roč. 40, č. 1, s. 45-83. ISSN 02638231. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(01\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(01)00043-X). [cit. 2024-03-11].
17. POE, CC. Fatigue Crack Propagation in Stiffened Panels. Online. *Damage Tolerance in Aircraft Structures*. 1971, s. 79-79-19. ISBN 978-0-8031-0031-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1520/STP26674S>. [cit. 2024-02-15].
18. QUINN, D; MURPHY, A a CERVI, L. Fatigue performance of aircraft panels with novel skin buckling containment features. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2011, roč. 225, č. 7, s. 791-806. ISSN 0954-4100. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0954410011399035>. [cit. 2024-01-29].
19. ROACH, Dennis a RACKOW, Kirk. Development and Validation of Bonded Composite Doubler Repairs for Commercial Aircraft. Online. *Aircraft Sustainment and Repair*. 2018, s. 545-743. ISBN 9780081005408. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100540-8.00011-X>. [cit. 2024-01-29].
20. RŮŽEK, R.; PAVLAS, J. a DOUBRAVA, R. Application of indentation as a retardation mechanism for fatigue crack growth. Online. *International Journal of Fatigue*. 2012, roč. 37, s. 92-99. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.09.012>. [cit. 2024-02-12].

21. SCHIJVE, J. CRACK STOPPERS AND ARALL LAMINATES. Online. *Engineering Fracture Mechanics*. 1990, roč. 37, č. 2, s. 405-421. ISSN 0013-7944. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(90\)90050-Q](https://doi.org/10.1016/0013-7944(90)90050-Q). [cit. 2024-01-29].
22. SCHIJVE, J. *Fatigue of Structures and Materials*. 2. Dordrecht: Springer Nature, 2009. ISBN 1402068089. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6808-9>.
23. SONG, P a SHIEH, Y. L. Stop drilling procedure for fatigue life improvement. Online. *International Journal of Fatigue*. 2004, roč. 26, č. 12, s. 1333-1339. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.04.009>. [cit. 2024-02-19].
24. STAMATELOS, D.G.; LABEAS, G.N. a TSERPES, K.I. Analytical calculation of local buckling and post-buckling behavior of isotropic and orthotropic stiffened panels. Online. *Thin-Walled Structures*. 2011, roč. 49, č. 3, s. 422-430. ISSN 02638231. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.11.008>. [cit. 2024-03-11].
25. SWIFT, T. Application of Damage Tolerance Technology to Type Certification. Online. S. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/811062>. [cit. 2024-02-16].
26. SYED, Abdul Khadar; ZHANG, Xiang; MOFFATT, James E. a FITZPATRICK, Michael E. Effect of temperature and thermal cycling on fatigue crack growth in aluminium reinforced with GLARE bonded crack retarders. Online. *International Journal of Fatigue*. 2017, roč. 98, s. 53-61. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.01.018>. [cit. 2024-01-29].
27. SYED, Abdul Khadar; ZHANG, Xiang; MOFFATT, James E.; MAZIARZ, Robert; CASTELLETTI, Luigi et al. Fatigue performance of bonded crack retarders in the presence of cold worked holes and interference-fit fasteners. Online. *International Journal of Fatigue*. 2017, roč. 105, s. 111-118. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.08.023>. [cit. 2024-01-29].
28. SYED, A.K.; ZHANG, X. a FITZPATRICK, M.E. A comparison of fatigue crack growth performance of two aerospace grade aluminium alloys reinforced with bonded crack retarders. Online. 2018, roč. 41, č. 5, s. 1237-1242. ISSN 8756-758X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ffe.12744>. [cit. 2024-01-29].
29. TAVARES, Sérgio M. O. a DE CASTRO, Paulo M. S. T. *Damage Tolerance of Metallic Aircraft Structures*. Cham (Switzerland): Springer, 2019. ISBN 978-3-319-70190-5.
30. VESCOVINI, Riccardo a BISAGNI, Chiara. Two-step procedure for fast post-buckling analysis of composite stiffened panels. Online. *Computers and Structures*. 2013, roč. 128, s. 38-47. ISSN 00457949. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.06.002>. [cit. 2024-03-12].
31. YOO, Chai H. a LEE, Sung C. *Stability of structures: principles and applications*. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-0-12-385122-2.

32. ZHANG, X.; BOSCOLO, M.; FIGUEROA-GORDON, D.; ALLEGRI, G. a IRVING, P.E. Fail-safe design of integral metallic aircraft structures reinforced by bonded crack retarders. Online. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009, roč. 76, č. 1, s. 114-133. ISSN 00137944. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.02.003>. [cit. 2024-01-29].
33. ZHANG, Xiang a LI, Yazhi. Damage Tolerance and Fail Safety of Welded Aircraft Wing Panels. Online. *AIAA Journal*. 2005, roč. 43, č. 7, s. 1613-1623. ISSN 0001-1452. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.10275>. [cit. 2024-02-15].
34. 4 main nonlinear material models: NX Nastran version. *Enterfea* [online]. 21.2.2017 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://enterfea.com/4-main-nonlinear-material-models-nx-nastran-version/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Celková ztráta stability nosníku zatíženého tlakem

NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 2 Lokální ztráta stability u nosníku zatíženého tlakem

NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 3 Zatížení tlačného nosníku kolmou silou

MEGSON, T. H. G. *Aircraft Structures for engineering students*. 4th Edition. Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 13: 978-0-75066-7395.

Obrázek 4 Závislost kritického napětí ztráty vzpěrné stability na štíhlosti nosníku dle Eulerovy metody

MEGSON, T. H. G. *Aircraft Structures for engineering students*. 4th Edition. Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 13: 978-0-75066-7395.

Obrázek 5 Tahový diagram s definovaným tečným modulem deformace

NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 6 Závislost kritického napětí na štíhlosti nosníku pro metodu tečného modulu deformace a redukovaného modulu deformace

LUONGO, Angelo; FERRETTI, Manuel a DI NINO, Simona. Elasto-Plastic Buckling of Planar Beam Systems. In: *Stability and Bifurcation of Structures*. Cham: Springer International Publishing, 2023, s. 243-263. ISBN 978-3-031-27571-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-031-27572-2_8.

Obrázek 7 Schematický náčrt tlakem zatížené stěny

MEGSON, T. H. G. *Aircraft Structures for engineering students*. 4th Edition. Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-0-75066-7395.

Obrázek 8 ztráta stability panelu o čtvercových půlvlnách

NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 9 Součinitel uložení k dle počtu půlvln m a poměru délky a ku šířce b – kloubové uložení

MEGSON, T. H. G. *Aircraft Structures for engineering students*. 4th Edition. Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-0-75066-7395.

Obrázek 10 Součinitel uložení hran k dle typu uložení a poměru délky a ku šířce b

MEGSON, T. H. G. *Aircraft Structures for engineering students*. 4th Edition. Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-0-75066-7395.

Obrázek 11 Součinitele uložení k_c pro zakřivené panely zatížené tlakem

NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 12 Okrajové podmínky u Z nosníku

BRUHN, E. F. *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*. 2nd Edition. U.S.A.: Tri-State Offset Company, 1973. ISBN 978-0961523404.

Obrázek 13 Rozložení napětí v nosníku po lokální ztrátě stability před tím, než nastane *crippling*

NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 14 Kritické napětí pro *crippling* taženého nosníku z hliníkové slitiny

NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 15 Podélně vyztužený panel Z nosníky

BRUHN, E. F. *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*. 2nd Edition. U.S.A.: Tri-State Offset Company, 1973. ISBN 978-0961523404.

Obrázek 16 Rozložení zatížení u podélně vyztuženého panelu

NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 17 Efektivní spolučinná šířka potahu z hlediska rozložení napětí

NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 18 Krut podélných výztuh v důsledku ztráty stability potahu

NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 19 Hodnota součinitele K_c v závislosti na poměru šířky sekce potahu b vůči tloušťce t

NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 20 MKP model panelu zatěžovaného tlakem

Vlastní tvorba

Obrázek 21 Napětí v integrálním MKP panelu krátce po ztrátě stability potahu

Vlastní tvorba

Obrázek 22 Napětí v integrálním MKP panelu po dalším zatěžování

Vlastní tvorba

Obrázek 23 Počáteční zvlnění (Initial buckling) vyztuženého panelu
(A) NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.
(B) STAMATELOS, D.G.; LABEAS, G.N. a TSERPES, K.I. Analytical calculation of local buckling and post-buckling behavior of isotropic and orthotropic stiffened panels. Online. *Thin-Walled Structures*. 2011, roč. 49, č. 3, s. 422-430. ISSN 02638231. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.11.008>. [cit. 2024-03-11].

Obrázek 24 Deformace integrálního MKP panelu zatíženého tlakem krátce po počátečním zvlnění
Vlastní tvorba

Obrázek 25 Počáteční zvlnění vyztuženého panelu (A) se Z nosníky, (B) s integrálními výztuhami
(A), (B) NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 26 (A) Lokální ztráta stability stojiny výztuhy (B) Torzní lokální ztráta stability stojiny výztuhy
STAMATELOS, D.G.; LABEAS, G.N. a TSERPES, K.I. Analytical calculation of local buckling and post-buckling behavior of isotropic and orthotropic stiffened panels.

Obrázek 27 Ztráta vzpěrné stability celého panelu
NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 28 Deformace integrálního MKP panelu zatíženého tlakem po ztrátě vzpěrné stability
Vlastní tvorba

Obrázek 29 (A) Torzní ztráta stability vyztuženého panelu (B) Kombinace torzní a celkové ztráty stability vyztuženého panelu
NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 30 Ztráta stability potahu mezi nýtovými spoji (inter-rivet buckling)
NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 31 (A) *Wrinkling* u vyztuženého panelu (B) *Wrinkling* a *inter-rivet buckling* u vyztuženého panelu
NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe Structural Design*. 2nd Edition. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 1999. ISBN 978-962-7218-09-0.

Obrázek 32 Mode Jumping (A); (D); (G) Panel podroben experimentu, (B); (E); (H) Panel v MKP výpočtu, (C); (F); (I) Hrubá ilustrace deformace v normálovém směru panelu

(A), (D), (G) VESCOVINI, Riccardo a BISAGNI, Chiara. Two-step procedure for fast post-buckling analysis of composite stiffened panels. Online. *Computers and Structures*. 2013, roč. 128, s. 38-47. ISSN 00457949. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.06.002>. [cit. 2024-03-12].

(B), (E), (H) VESCOVINI, Riccardo a BISAGNI, Chiara. Two-step procedure for fast post-buckling analysis of composite stiffened panels. Online. *Computers and Structures*. 2013, roč. 128, s. 38-47. ISSN 00457949. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.06.002>. [cit. 2024-03-12].

(C), (F), (I) Vlastní tvorba

Obrázek 33 (AI) Rozdělení konstrukčních přístupů z hlediska únavy v letectví BOLLER, Christian a BUDERATH, Matthias. Fatigue in aerostructures—where structural health monitoring can contribute to a complex subject. Online. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007, roč. 365, č. 1851, s. 561-587. ISSN 1364-503X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1924>. [cit. 2023-09-28]

Obrázek 34 (AII) Růstová křivka trhliny ukazující časový interval dostupný pro kontrolu trhliny

ROACH, Dennis; RACKOW, Kirk; a (ed.). Chapter Eleven - Development and Validation of Bonded Composite Doubler Repairs for Commercial Aircraft. In: JONES, Rhys; BAKER, Alan; MATTHEWS, Neil a CHAMPAGNE, Victor. *Aircraft Sustainment and Repair*. Amsterdam: Elsevier, 2018, s. 545-743. ISBN 978-0-08-100540-8.

Obrázek 35

SCHMIDT, H. J.; SCHMIDT-BRANDECKER, B. a TOBER, G. Design of Modern Aircraft Structure and the Role of NDI. Online. *NDT.net*. 1999, roč. 4, č. 6. Dostupné z: <https://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/001/001.htm>. [cit. 2024-02-20].

Obrázek 36

(A) RAVI-CHANDAR, K. Dynamic Loading and Crack Arrest. Online. *Comprehensive Structural Integrity*. 2003, s. 347-426. ISBN 9780080437491. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043749-4/07042-7>. [cit. 2024-02-20].

(B) SINGH, Ripudaman; PARK, Jai H. a ATLURI, Satya N. Growth of multiple cracks and their linkup in a fuselage lap joint. Online. *AIAA Journal*. 1994, roč. 32, č. 11, s. 2260-2268. ISSN 0001-1452. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/3.12285>. [cit. 2024-02-20].

Obrázek 37 Oprava únavové trhliny metodou opravného svařování

DOMAZET, Željko. Comparison of fatigue crack retardation methods. Online. *Engineering Failure Analysis*. 1996, roč. 3, č. 2, s. 137-147. ISSN 13506307. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/1350-6307\(96\)00006-4](https://doi.org/10.1016/1350-6307(96)00006-4). [cit. 2024-02-19].

Obrázek 38 Oprava únavové trhliny pomocí oboustranné navařené kovové záplaty (zvýraznění trhliny přidáno autorem diplomové práce)
DOMAZET, Željko. Comparison of fatigue crack retardation methods. Online. *Engineering Failure Analysis*. 1996, roč. 3, č. 2, s. 137-147. ISSN 13506307. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/1350-6307\(96\)00006-4](https://doi.org/10.1016/1350-6307(96)00006-4). [cit. 2024-02-19].

Obrázek 39 Oprava únavové trhliny pomocí oboustranné adhezivně připojené kompozitní záplaty
DOMAZET, Željko. Comparison of fatigue crack retardation methods. Online. *Engineering Failure Analysis*. 1996, roč. 3, č. 2, s. 137-147. ISSN 13506307. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/1350-6307\(96\)00006-4](https://doi.org/10.1016/1350-6307(96)00006-4). [cit. 2024-02-19].

Obrázek 40 Příklad zamezení šíření únavové trhliny metodou indentace (popisek trhliny přidán autorem diplomové práce)
RŮŽEK, R.; PAVLAS, J. a DOUBRAVA, R. Application of indentation as a retardation mechanism for fatigue crack growth. Online. *International Journal of Fatigue*. 2012, roč. 37, s. 92-99. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.09.012>. [cit. 2024-02-12].

Obrázek 41 Vliv jednorázového tahového přetížení na růst trhliny
SCHIJVE, J. *Fatigue of Structures and Materials*. 2. Dordrecht: Springer Nature, 2009. ISBN 1402068089. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6808-9>.

Obrázek 42 Zkušební vzorek s aplikací vyvrtání únavové trhliny
SONG, P a SHIEH, Y. L. Stop drilling procedure for fatigue life improvement. Online. *International Journal of Fatigue*. 2004, roč. 26, č. 12, s. 1333-1339. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.04.009>. [cit. 2024-02-19].

Obrázek 43 Pásové zastavovače růstu trhlin na zkušebních vzorcích Schijveho
SCHIJVE, J. CRACK STOPPERS AND ARALL LAMINATES. Online. *Engineering Fracture Mechanics*. 1990, roč. 37, č. 2, s. 405-421. ISSN 0013-7944. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(90\)90050-Q](https://doi.org/10.1016/0013-7944(90)90050-Q). [cit. 2024-01-29].

Obrázek 44 Schéma integrálních i připojených pásových zastavovačů růstu trhlin u Schijveho
SCHIJVE, J. CRACK STOPPERS AND ARALL LAMINATES. Online. *Engineering Fracture Mechanics*. 1990, roč. 37, č. 2, s. 405-421. ISSN 0013-7944. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(90\)90050-Q](https://doi.org/10.1016/0013-7944(90)90050-Q). [cit. 2024-01-29].

Obrázek 45 Rozdílné chování růstu trhliny pro připojené a integrální pásy
SCHIJVE, J. CRACK STOPPERS AND ARALL LAMINATES. Online. *Engineering Fracture Mechanics*. 1990, roč. 37, č. 2, s. 405-421. ISSN 0013-7944. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(90\)90050-Q](https://doi.org/10.1016/0013-7944(90)90050-Q). [cit. 2024-01-29].

Obrázek 46 Rozdílné rychlosti šíření trhliny pro připojené a integrální pásy
SCHIJVE, J. CRACK STOPPERS AND ARALL LAMINATES. Online. *Engineering Fracture Mechanics*. 1990, roč. 37, č. 2, s. 405-421. ISSN 0013-7944. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(90\)90050-Q](https://doi.org/10.1016/0013-7944(90)90050-Q). [cit. 2024-01-29].

Obrázek 47 Růst únavové trhliny při použití lepeného *CFRP* zastavovače s různou tloušťkou a teplotami vytvrzení

ZHANG, X.; BOSCOLO, M.; FIGUEROA-GORDON, D.; ALLEGRI, G. a IRVING, P.E. Fail-safe design of integral metallic aircraft structures reinforced by bonded crack retarders. Online. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009, roč. 76, č. 1, s. 114-133. ISSN 00137944. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.02.003>. [cit. 2024-01-29].

Obrázek 48 Efekt přemostění od připevněného pásového zastavovače

ZHANG, X.; BOSCOLO, M.; FIGUEROA-GORDON, D.; ALLEGRI, G. a IRVING, P.E. Fail-safe design of integral metallic aircraft structures reinforced by bonded crack retarders. Online. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009, roč. 76, č. 1, s. 114-133. ISSN 00137944. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.02.003>. [cit. 2024-01-29].

Obrázek 49 Očekávaná životnost zastavovačů z uhlíko-epoxydového laminátu při různých variantách kladení

BOSCOLO, Marco; ALLEGRI, Giuliano a ZHANG, Xiang. Design and Modelling of Selective Reinforcements for Integral Aircraft Structures. Online. *AIAA Journal*. 2008, roč. 46, č. 9, s. 2323-2331. ISSN 0001-1452. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.35712>. [cit. 2024-01-29].

Obrázek 50 Očekávaná životnost zastavovačů při použití různých materiálů

BOSCOLO, Marco; ALLEGRI, Giuliano a ZHANG, Xiang. Design and Modelling of Selective Reinforcements for Integral Aircraft Structures. Online. *AIAA Journal*. 2008, roč. 46, č. 9, s. 2323-2331. ISSN 0001-1452. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.35712>. [cit. 2024-01-29].

Obrázek 51 Očekávaná životnost při různých šířkách pásových zastavovačů (w) a tloušťkách (t)

BOSCOLO, Marco; ALLEGRI, Giuliano a ZHANG, Xiang. Design and Modelling of Selective Reinforcements for Integral Aircraft Structures. Online. *AIAA Journal*. 2008, roč. 46, č. 9, s. 2323-2331. ISSN 0001-1452. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.35712>. [cit. 2024-01-29].

Obrázek 52 Očekávaná životnost vztažená na nárůst hmotnosti při použití různých šířek pásových zastavovačů (w) a tloušťek (t)

BOSCOLO, Marco; ALLEGRI, Giuliano a ZHANG, Xiang. Design and Modelling of Selective Reinforcements for Integral Aircraft Structures. Online. *AIAA Journal*. 2008, roč. 46, č. 9, s. 2323-2331. ISSN 0001-1452. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.35712>. [cit. 2024-01-29].

Obrázek 53 Srovnání růstu trhliny v závislosti na počtu zátěžových cyklech při použití slitiny 7085 a 2624

SYED, A.K.; ZHANG, X. a FITZPATRICK, M.E. A comparison of fatigue crack growth performance of two aerospace grade aluminium alloys reinforced with bonded crack retarders. Online. 2018, roč. 41, č. 5, s. 1237-1242. ISSN 8756-758X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ffe.12744>. [cit. 2024-01-29].

Obrázek 54 Zastavovač růstu trhliny ze dvou vrstev *AISI 301* připevněn ultrazvukovým svařováním

JETELA, Václav; KLEMENT, Josef; HOLZER, Jakub a KONDÁS, Ján. Bonded and additively manufactured crack retarders: A comparative study of damage tolerance properties. Online. *International Journal of Fatigue*. 2023, roč. 170. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107509>. [cit. 2024-02-19].

Obrázek 55 Růst únavové trhliny u vzorků se zastavovači připevněnými adhezivně a studenou kinetickou depozicí

JETELA, Václav; KLEMENT, Josef; HOLZER, Jakub a KONDÁS, Ján. Bonded and additively manufactured crack retarders: A comparative study of damage tolerance properties. Online. *International Journal of Fatigue*. 2023, roč. 170. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107509>. [cit. 2024-02-19].

Obrázek 56 Faktor prodloužení životnosti pro vzorky se zastavovači připevněnými adhezivně a studenou kinetickou dispozicí

JETELA, Václav; KLEMENT, Josef; HOLZER, Jakub a KONDÁS, Ján. Bonded and additively manufactured crack retarders: A comparative study of damage tolerance properties. Online. *International Journal of Fatigue*. 2023, roč. 170. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107509>. [cit. 2024-02-19].

Obrázek 57 Faktor prodloužení životnosti vztažený na přidanou hmotnost pro vzorky se zastavovači připevněnými adhezivně a studenou kinetickou dispozicí

JETELA, Václav; KLEMENT, Josef; HOLZER, Jakub a KONDÁS, Ján. Bonded and additively manufactured crack retarders: A comparative study of damage tolerance properties. Online. *International Journal of Fatigue*. 2023, roč. 170. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107509>. [cit. 2024-02-19].

Obrázek 58 Růstová křivka zkušební vzorku s dvouvrstvým zastavovačem růstu trhliny připevněném ultrazvukovým svařováním

JETELA, Václav; KLEMENT, Josef; HOLZER, Jakub a KONDÁS, Ján. Bonded and additively manufactured crack retarders: A comparative study of damage tolerance properties. Online. *International Journal of Fatigue*. 2023, roč. 170. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107509>. [cit. 2024-02-19].

Obrázek 59 Růst trhliny v integrálním vyztuženém panelu

POE, CC. Fatigue Crack Propagation in Stiffened Panels. Online. *Damage Tolerance in Aircraft Structures*. 1971, s. 79-79-19. ISBN 978-0-8031-0031-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1520/STP26674S>. [cit. 2024-02-15].

Obrázek 60 Vývoj součinitele β faktoru intenzity napětí při šíření trhliny vyztuženým panelem

ZHANG, Xiang a LI, Yazhi. Damage Tolerance and Fail Safety of Welded Aircraft Wing Panels. Online. *AIAA Journal*. 2005, roč. 43, č. 7, s. 1613-1623. ISSN 0001-1452. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.10275>. [cit. 2024-02-15].

Obrázek 61 Závislost součinitelů CR a LS v závislosti na délce trhliny u panelu s nýtovanými výztuhami

BROEK, David. Stiffened sheet structures. In: BROEK, David. *Elementary engineering fracture mechanics*. 3rd printing. Hague: Martinus Nijhoff Publishers, 1984, s. 409-432. ISBN 90-247-2580-1.

Obrázek 62 Růst trhliny skrze panel s přínýtovanými výztuhami

BROEK, David. Stiffened sheet structures. In: BROEK, David. *Elementary engineering fracture mechanics*. 3rd printing. Hague: Martinus Nijhoff Publishers, 1984, s. 409-432. ISBN 90-247-2580-1.

Obrázek 63 Vroubkovaný zastavovač růstu trhliny – ilustrace

QUINN, D; MURPHY, A a CERVI, L. Fatigue performance of aircraft panels with novel skin buckling containment features. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2011, roč. 225, č. 7, s. 791-806. ISSN 0954-4100. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0954410011399035>. [cit. 2024-01-29].

Obrázek 64 Odklonění trhliny na listu

LIU, Jiaming; WU, Lushen; SONG, Minjie; HU, Yun; LEI, Min et al. Crack resistance behaviour of aluminium alloy for aircraft skin with bionic coupling units processed by laser cladding. Online. 2020, roč. 43, č. 11, s. 2756-2760. ISSN 8756-758X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ffe.13315>. [cit. 2024-02-09].

Obrázek 65 Vzdálenosti potřebné pro určení variant bionických zastavovačů růstu trhlin LIU, Jiaming; WU, Lushen; SONG, Minjie; HU, Yun; LEI, Min et al. Crack resistance behaviour of aluminium alloy for aircraft skin with bionic coupling units processed by laser cladding. Online. 2020, roč. 43, č. 11, s. 2756-2760. ISSN 8756-758X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ffe.13315>. [cit. 2024-02-09].

Obrázek 66 Délka trhliny při počtu zátěžových cyklů u zkoušky bionických zastavovačů růstu trhlin LIU, Jiaming; WU, Lushen; SONG, Minjie; HU, Yun; LEI, Min et al. Crack resistance behaviour of aluminium alloy for aircraft skin with bionic coupling units processed by laser cladding. Online. 2020, roč. 43, č. 11, s. 2756-2760. ISSN 8756-758X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ffe.13315>. [cit. 2024-02-09].

Obrázek 67 Rychlost šíření trhliny při růstu trhliny skrze různé části bionického zastavovače

LIU, Jiaming; WU, Lushen; SONG, Minjie; HU, Yun; LEI, Min et al. Crack resistance behaviour of aluminium alloy for aircraft skin with bionic coupling units processed by laser cladding. Online. 2020, roč. 43, č. 11, s. 2756-2760. ISSN 8756-758X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ffe.13315>. [cit. 2024-02-09].

Obrázek 68 Cesty šíření únavové trhliny u zkušebních vzorků bionických zastavovačů růstu trhlin

LIU, Jiaming; WU, Lushen; SONG, Minjie; HU, Yun; LEI, Min et al. Crack resistance behaviour of aluminium alloy for aircraft skin with bionic coupling units processed by laser cladding. Online. 2020, roč. 43, č. 11, s. 2756-2760. ISSN 8756-758X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ffe.13315>. [cit. 2024-02-09].

Obrázek 69 Příklad modelu zkoumaného vyztuženého panelu (varianta H10TW2BW2BL9)

Vlastní tvorba

Obrázek 70 Příklad geometrie modelu zkoumaného vyztuženého panelu (varianta H10TW2BW2BL9)

Vlastní tvorba

Obrázek 71 Výkres základního MKP modelu vyztuženého panelu

Vlastní tvorba

Obrázek 72 Geometrie zastavovačů růstu trhliny

Vlastní tvorba

Obrázek 73 Síť základního vyztuženého panelu se zastavovačem (H10TW2BW2BL9)

Vlastní tvorba

Obrázek 74 Ilustrace oblastí jemnější sítě v okolí zastavovačů

Vlastní tvorba

Obrázek 75 Oblasti zjemnění sítě

Vlastní tvorba

Obrázek 76 Master uzel RBE2 prvku 2 a uzel (GRID) číslo 2

Vlastní tvorba

Obrázek 77 Okrajové podmínky na MKP modelu panelu

Vlastní tvorba

Obrázek 78 Zadání okrajových podmínek a zatížení v .bdf vstupního souboru řešiče MSC NASTRAN

Vlastní tvorba

Obrázek 79 Zadání materiálových vlastností v .bdf vstupního souboru řešiče MSC NASTRAN

Vlastní tvorba

Obrázek 80 Tahový diagram u bilineárního modelu

Vlastní tvorba

Obrázek 81 Zadání parametrů výpočtu v .bdf vstupního souboru řešiče MSC NASTRAN

Vlastní tvorba

Obrázek 82 Vedoucí uzel pro odečítání reakční síly

Vlastní tvorba

Obrázek 83 Průběh reakční síly pro základní panel H10TW2BW2BL9

Vlastní tvorba

Obrázek 84 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 16,5 % maximálního deformačního zatížení (1)

Vlastní tvorba

Obrázek 85 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 31,5 % maximálního deformačního zatížení (2)

Vlastní tvorba

Obrázek 86 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 32 % maximálního deformačního zatížení (2)

Vlastní tvorba

Obrázek 87 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 56,25 % maximálního deformačního zatížení (3)

Vlastní tvorba

Obrázek 88 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 56,5 % maximálního deformačního zatížení (3)

Vlastní tvorba

Obrázek 89 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 82 % maximálního deformačního zatížení – Mez únosnosti (4)

Vlastní tvorba

Obrázek 90 Celková deformace (vlevo) a redukované napětí (vpravo) při 100 % maximálního deformačního zatížení (5)

Vlastní tvorba

Obrázek 91 MKP model panelu bez zastavovačů růstu trhliny

Vlastní tvorba

Obrázek 92 Experimentální průběh tlakové síly

Vlastní tvorba

Obrázek 93 Průběhy reakční síly pro různé množství elementů na výšku výztuhy

Vlastní tvorba

Obrázek 94 Maximální tlaková síla F_{max} dle počtu prvků na výšku výztuhy

Vlastní tvorba

Obrázek 95 Závislost výpočetní doby na počtu elementů na výšku výztuhy

Vlastní tvorba

Obrázek 96 Tahový diagram u lineárního modelu

Vlastní tvorba

Obrázek 97 Tahový diagram u bilineárního modelu

Vlastní tvorba

Obrázek 98 Tahový diagram skutečného napětí při zadání tabulkou
Vlastní tvorba

Obrázek 99 Průběh reakční síly pro různé varianty materiálového modelu
Vlastní tvorba

Obrázek 100 Průběh reakční síly pro prostý panel s rovnoměrnou sítí a pro panel se sítí
uzpůsobenou zastavovačům růstu trhliny
Vlastní tvorba

Obrázek 101 Prostý panel s rovnoměrnou sítí při 35 % maximálního deformačního
zatížení (1A) (vlevo) a při 36 % maximálního deformačního zatížení (1A) (vpravo)
Vlastní tvorba

Obrázek 102 Prostý panel s rovnoměrnou sítí při 76 % maximálního deformačního
zatížení – mez únosnosti (2A) (vlevo) a při 100 % maximálního deformačního zatížení
(3A) (vpravo)
Vlastní tvorba

Obrázek 103 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 31 % maximálního deformačního
zatížení (1B) (vlevo) a při 31,5 % maximálního deformačního zatížení (1B) (vpravo)
Vlastní tvorba

Obrázek 104 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 41,9 % maximálního deformačního
zatížení (2B) (vlevo) a při 42 % maximálního deformačního zatížení (2B) (vpravo)
Vlastní tvorba

Obrázek 105 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 54,48 % maximálního deformačního
zatížení (3B) (vlevo) a při 54,5 % maximálního deformačního zatížení (3B) (vpravo)
Vlastní tvorba

Obrázek 106 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 83 % maximálního deformačního
zatížení – mez únosnosti (4B) (vlevo) a při 100 % maximálního deformačního zatížení
(5B) (vpravo)
Vlastní tvorba

Obrázek 107 Síť variant zkoumaných na změnu tloušťky terminálu wT
Vlastní tvorba

Obrázek 108 Nárůst hmotnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny
Vlastní tvorba

Obrázek 109 Únosnost variant tlouštěk terminálu ve vztahu k únosnosti prostého panelu
H10TW2BW2BL9-BARE
Vlastní tvorba

Obrázek 110 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny
Vlastní tvorba

Obrázek 111 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny na přidanou hmotnost
Vlastní tvorba

Obrázek 112 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny – doplněné
Vlastní tvorba

Obrázek 113 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny na přidanou hmotnost – doplněné
Vlastní tvorba

Obrázek 114 Nárůst hmotnosti dle tloušťky postranních větví zastavovačů růstu trhliny
Vlastní tvorba

Obrázek 115 Únosnost variant tlouštěk terminálu ve vztahu k únosnosti prostého panelu H10TW2BW2BL9-BARE
Vlastní tvorba

Obrázek 116 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny
Vlastní tvorba

Obrázek 117 Nárůst únosnosti dle tloušťky terminálu zastavovačů růstu trhliny na přidanou hmotnost
Vlastní tvorba

Obrázek 118 Varianta H10TW2BW2BL13.5
Vlastní tvorba

Obrázek 119 Nárůst hmotnosti dle délky postranní větve
Vlastní tvorba

Obrázek 120 Varianta s délkou postranních větví $LB = 13,5$ mm (H10TW2BW2BL13.5)
Vlastní tvorba

Obrázek 121 Varianta s délkou postranních větví $LB = 4,5$ mm (H10TW2BW2BL4.5)
Vlastní tvorba

Obrázek 122 Únosnost variant délek postranních větví ve vztahu k únosnosti prostého panelu H10TW2BW2BL13.5-BARE
Vlastní tvorba

Obrázek 123 Nárůst únosnosti dle délky postranních větví
Vlastní tvorba

Obrázek 124 Nárůst únosnosti dle délky postranních větví vztažený na přidanou hmotnost
Vlastní tvorba

Obrázek 125 Varianta H10TW2BW2BL9

Vlastní tvorba

Obrázek 126 Varianta s výškou zastavovačů $h = 10$ mm (H10TW2BW2BL9)

Vlastní tvorba

Obrázek 127 Varianta s výškou zastavovačů $h = 2$ mm (H2TW2BW2BL9)

Vlastní tvorba

Obrázek 128 Nárůst hmotnosti dle výšky zastavovačů růstu trhliny

Vlastní tvorba

Obrázek 129 Nárůst únosnosti dle výšky zastavovačů růstu trhliny

Vlastní tvorba

Obrázek 130 Nárůst únosnosti dle výšky zastavovačů růstu trhliny na přidanou hmotnost

Vlastní tvorba

Obrázek 131 Vývoj únosnosti prostých panelů

Vlastní tvorba

Obrázek 132 Nárůst únosnosti dle výšky zastavovačů růstu trhliny – upravené

Vlastní tvorba

Obrázek 133 Nárůst únosnosti dle výšky zastavovačů růstu trhliny na přidanou hmotnost – upravené

Vlastní tvorba

Obrázek 134 Síť varianty s polovinou postranních větví (H10TW2BW2BL9-HALFBRANCH)

Vlastní tvorba

Obrázek 135 Geometrie zastavovačů růstu trhliny H10TW2BW2BL9-HALFBRANCH

Vlastní tvorba

Obrázek 136 Nárůst únosnosti zkoumané varianty a základní varianty

Vlastní tvorba

Obrázek 137 Nárůst únosnosti na přidanou hmotnost zkoumané varianty a základní varianty

Vlastní tvorba

Obrázek 138 Zjednodušený výkres pohledu shora MKP modelu použité varianty se zkrácenými zastavovači růstu trhliny

Vlastní tvorba

Obrázek 139 Síť varianty se zkrácenými zastavovači růstu trhliny

Vlastní tvorba

Obrázek 140 Nárůst únosnosti zkoumané varianty a základní varianty
Vlastní tvorba

Obrázek 141 Průběh zatížení u základního panelu a příslušného prostého panelu
Vlastní tvorba

Obrázek 142 Redukované napětí při $F \approx 400$ kN – základní panel
Vlastní tvorba

Obrázek 143 Redukované napětí při $F \approx 400$ kN – prostý panel
Vlastní tvorba

Obrázek 144 Deformace při $F \approx 400$ kN – základní panel
Vlastní tvorba

Obrázek 145 Deformace při $F \approx 400$ kN – prostý panel
Vlastní tvorba

Obrázek 146 Nárůst únosnosti dle přidané hmotnosti u změny tloušťky terminálu –
trend
Vlastní tvorba

Obrázek 147 Nárůst únosnosti dle přidané hmotnosti u změny tloušťky postranních
větví – trend
Vlastní tvorba

Obrázek 148 Nárůst únosnosti dle přidané hmotnosti u změny délky postranních větví –
trend
Vlastní tvorba

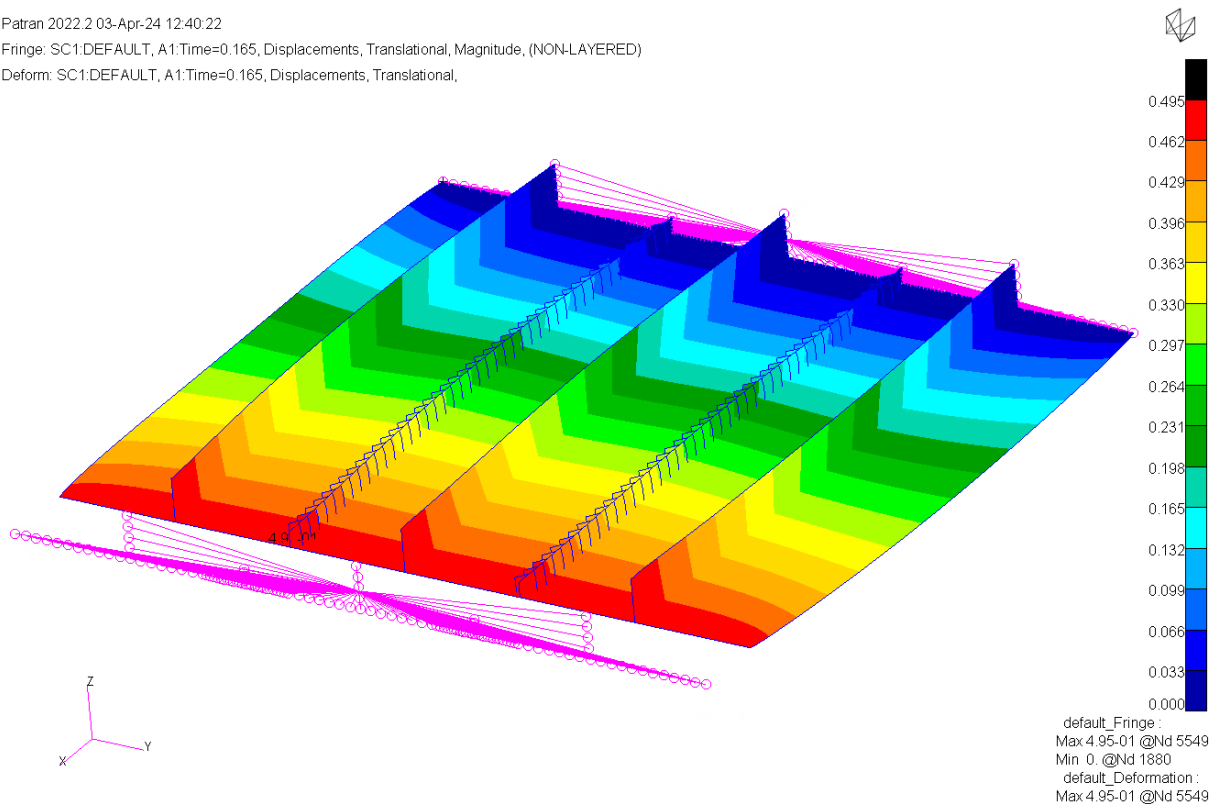
Obrázek 149 Celkové srovnání nárůstu únosnosti ve vztahu k přidané hmotnosti
Vlastní tvorba

PŘÍLOHA 1 – NAPĚTÍ A DEFORMACE TYPICKÉHO VÝSLEDKU

Patran 2022.2 03-Apr-24 12:40:22

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.165, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.165, Displacements, Translational,

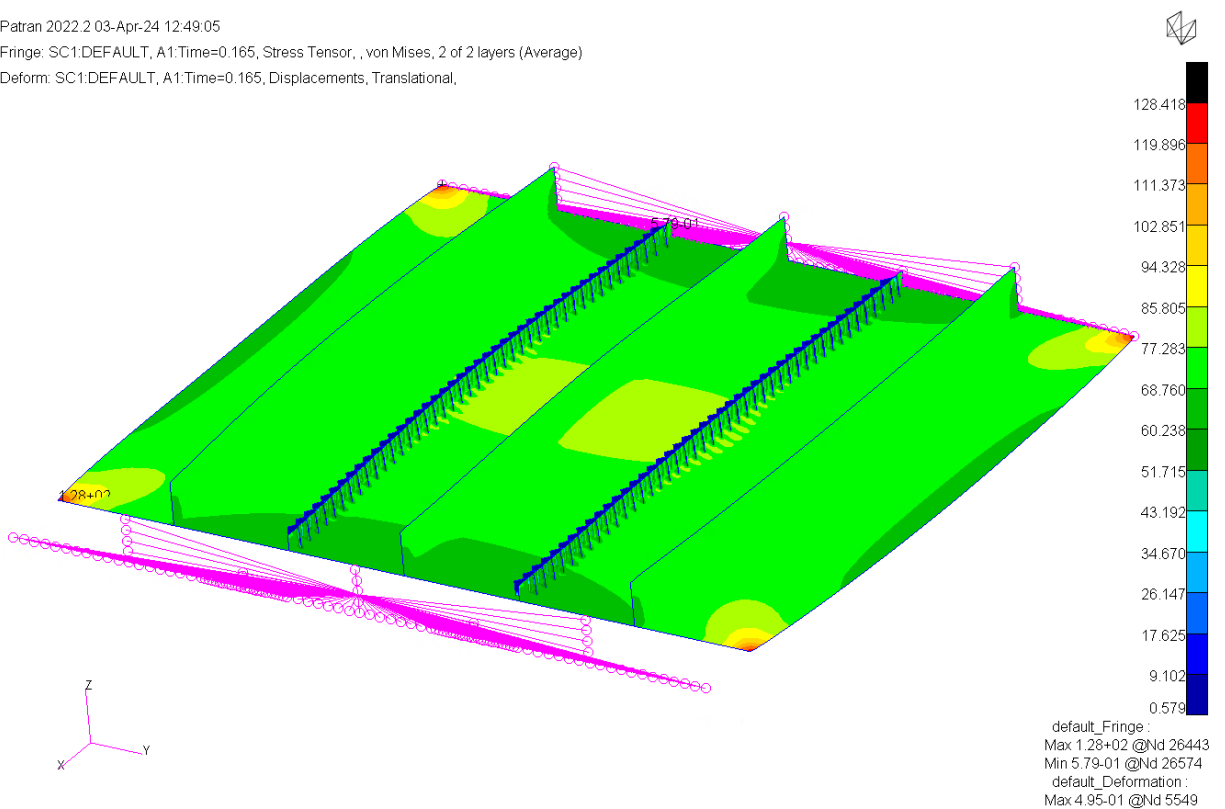


Obrázek P1: 1 Celková deformace při 16,5 % maximálního deformačního zatížení (1)

Patran 2022.2 03-Apr-24 12:49:05

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.165, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.165, Displacements, Translational,

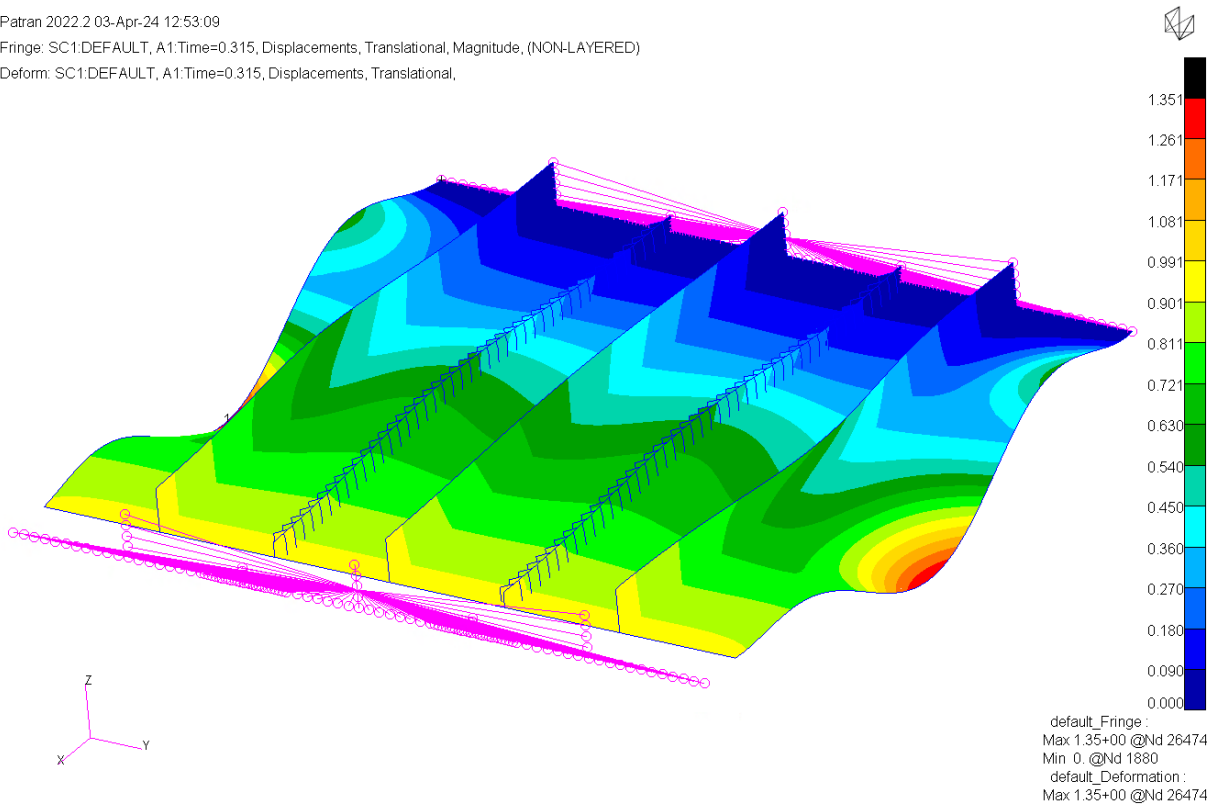


Obrázek P1: 2 Redukované napětí při 16,5 % maximálního deformačního zatížení (1)

Patran 2022.2 03-Apr-24 12:53:09

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.315, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.315, Displacements, Translational,

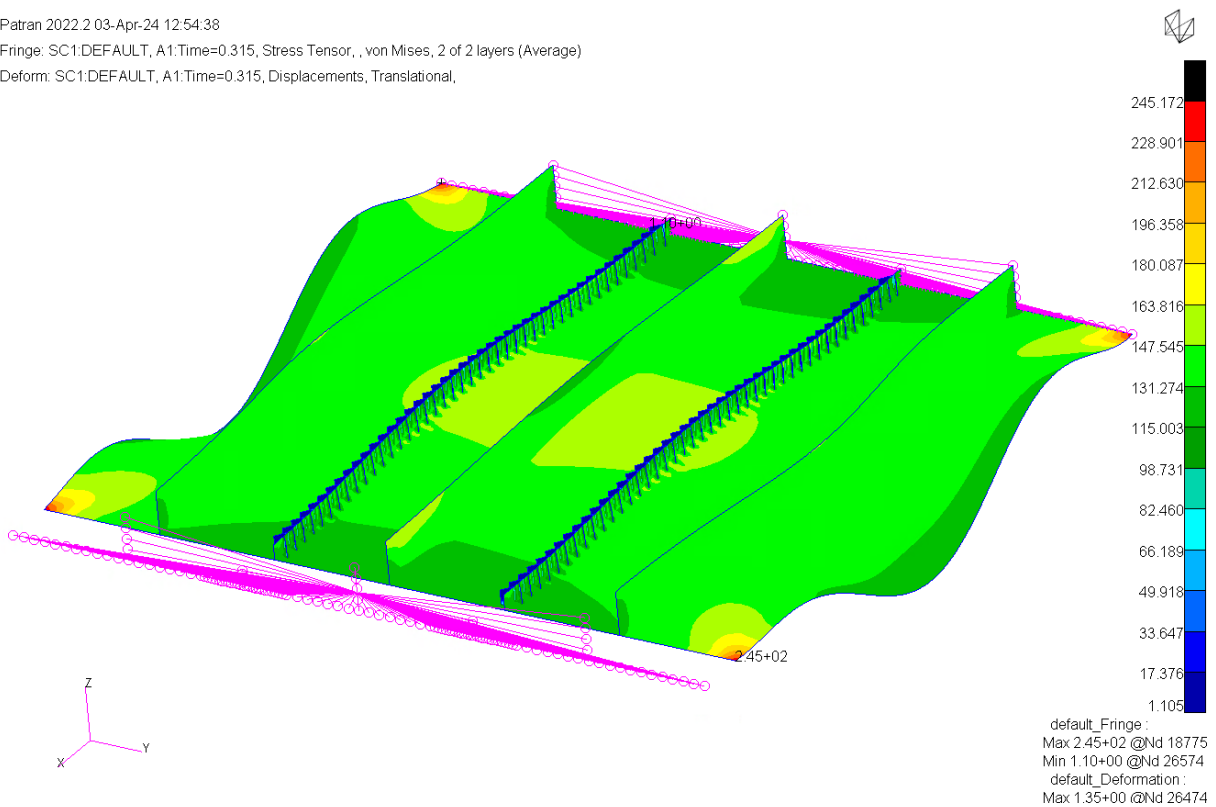


Obrázek P1: 3 Celková deformace při 31,5 % maximálního deformačního zatížení (2)

Patran 2022.2 03-Apr-24 12:54:38

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.315, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.315, Displacements, Translational,

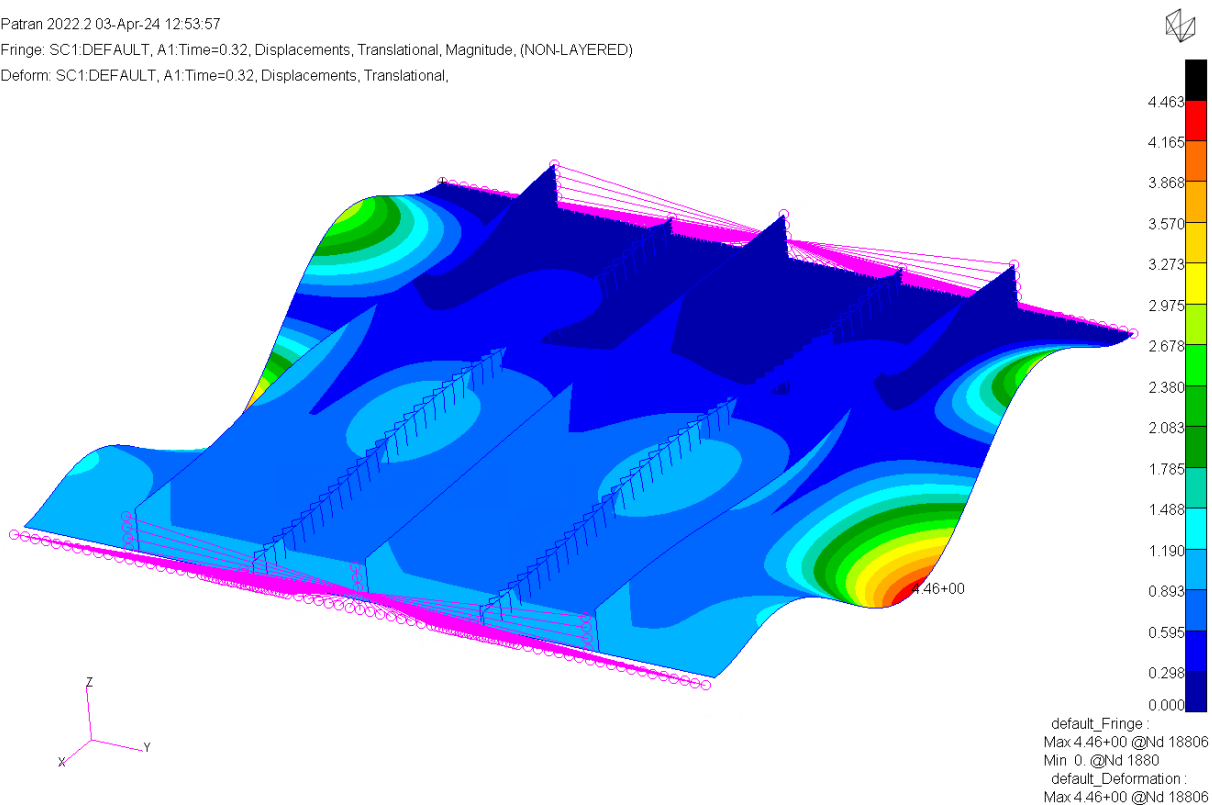


Obrázek P1: 4 Redukované napětí při 31,5 % maximálního deformačního zatížení (2)

Patran 2022.2 03-Apr-24 12:53:57

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.32, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.32, Displacements, Translational,

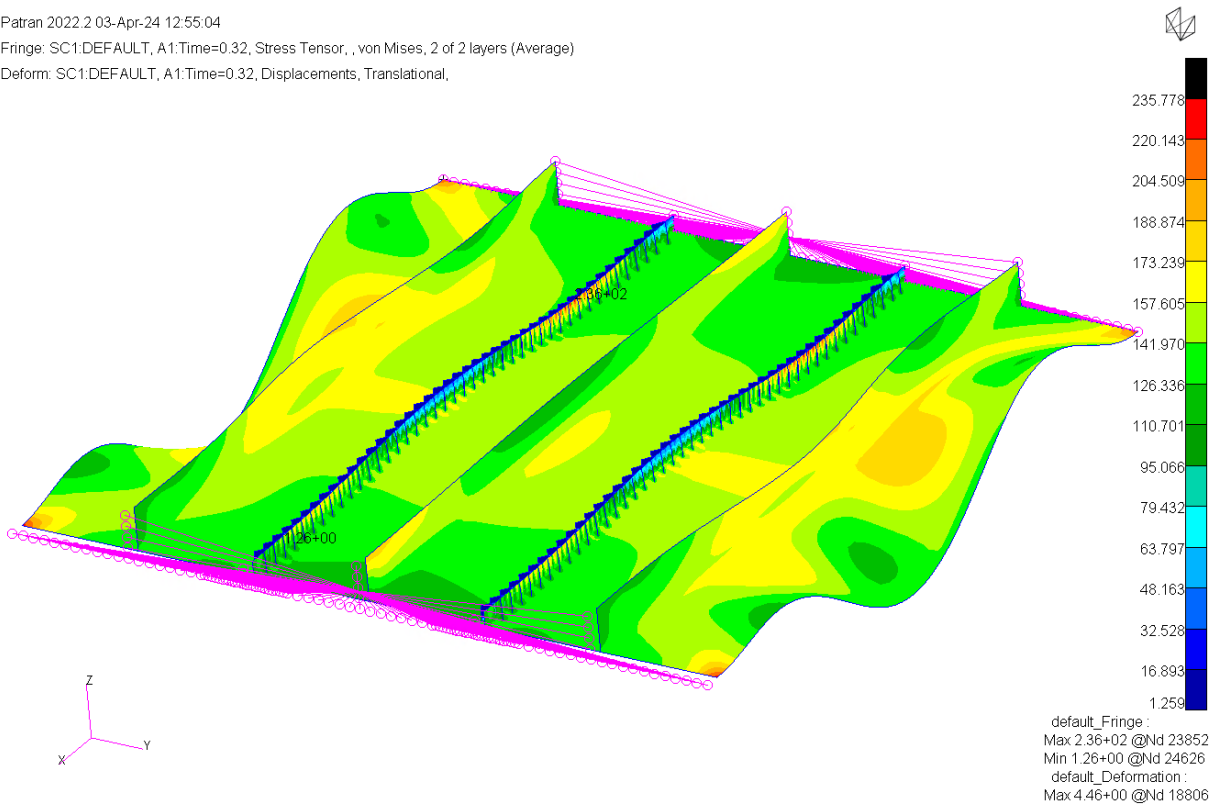


Obrázek P1: 5 Celková deformace při 32 % maximálního deformačního zatížení (2)

Patran 2022.2 03-Apr-24 12:55:04

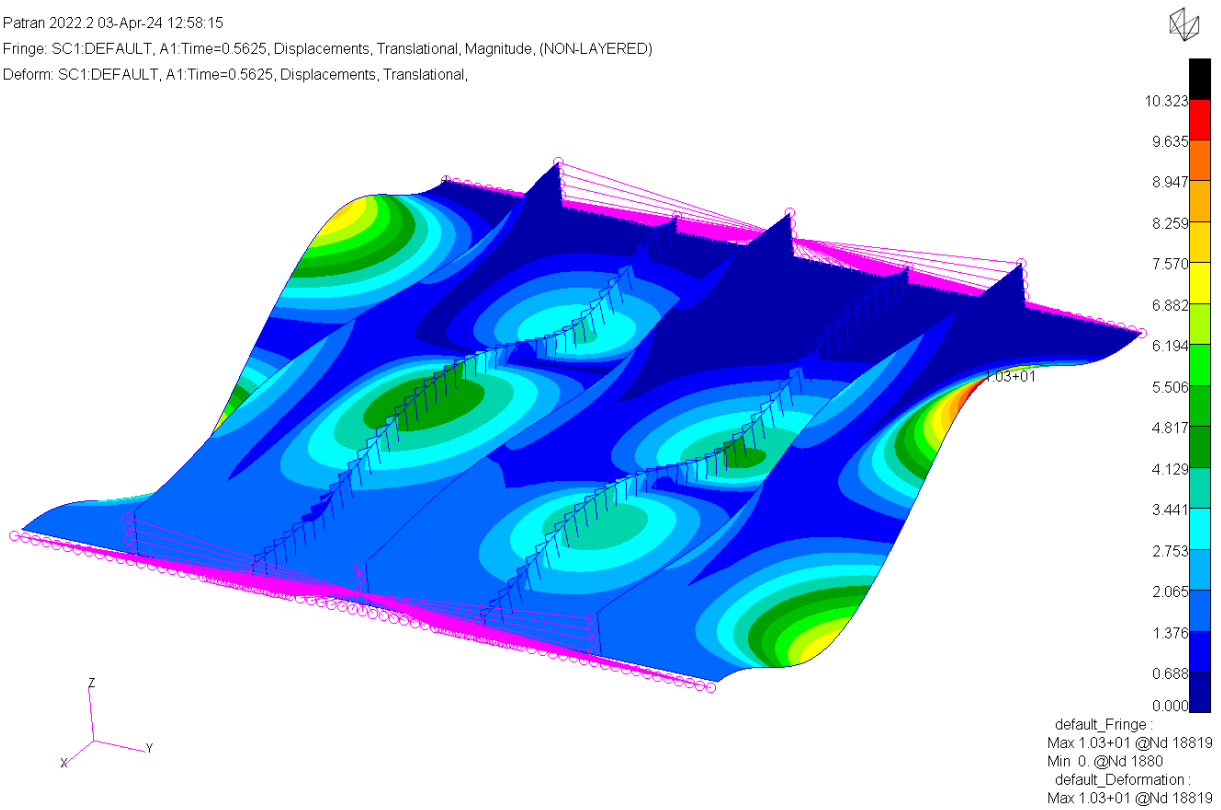
Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.32, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.32, Displacements, Translational,



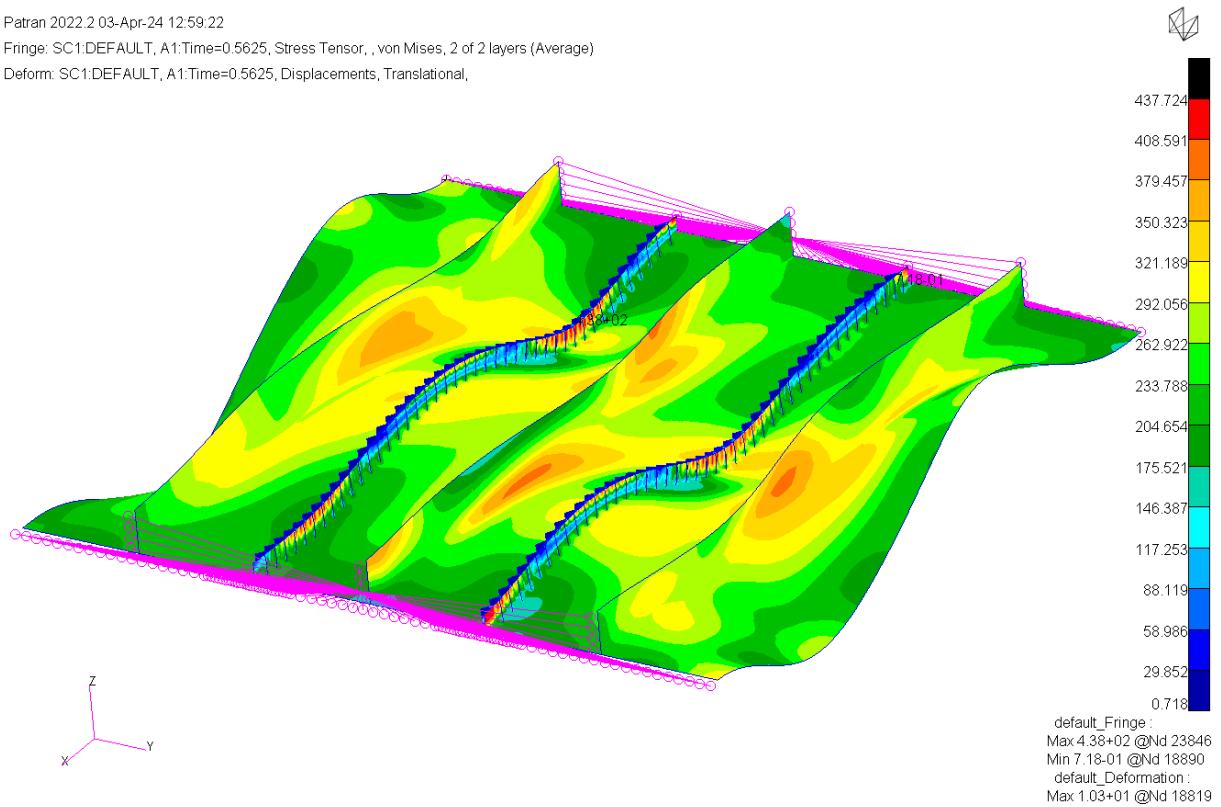
Obrázek P1: 6 Redukované napětí při 32 % maximálního deformačního zatížení (2)

Patran 2022.2 03-Apr-24 12:58:15
Fringe: SC1.DEFAULT, A1.Time=0.5625, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)
Deform: SC1.DEFAULT, A1.Time=0.5625, Displacements, Translational,



Obrázek P1: 7 Celková deformace při 56,25 % maximálního deformačního zatížení (3)

Patran 2022.2 03-Apr-24 12:59:22
Fringe: SC1.DEFAULT, A1.Time=0.5625, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)
Deform: SC1.DEFAULT, A1.Time=0.5625, Displacements, Translational,

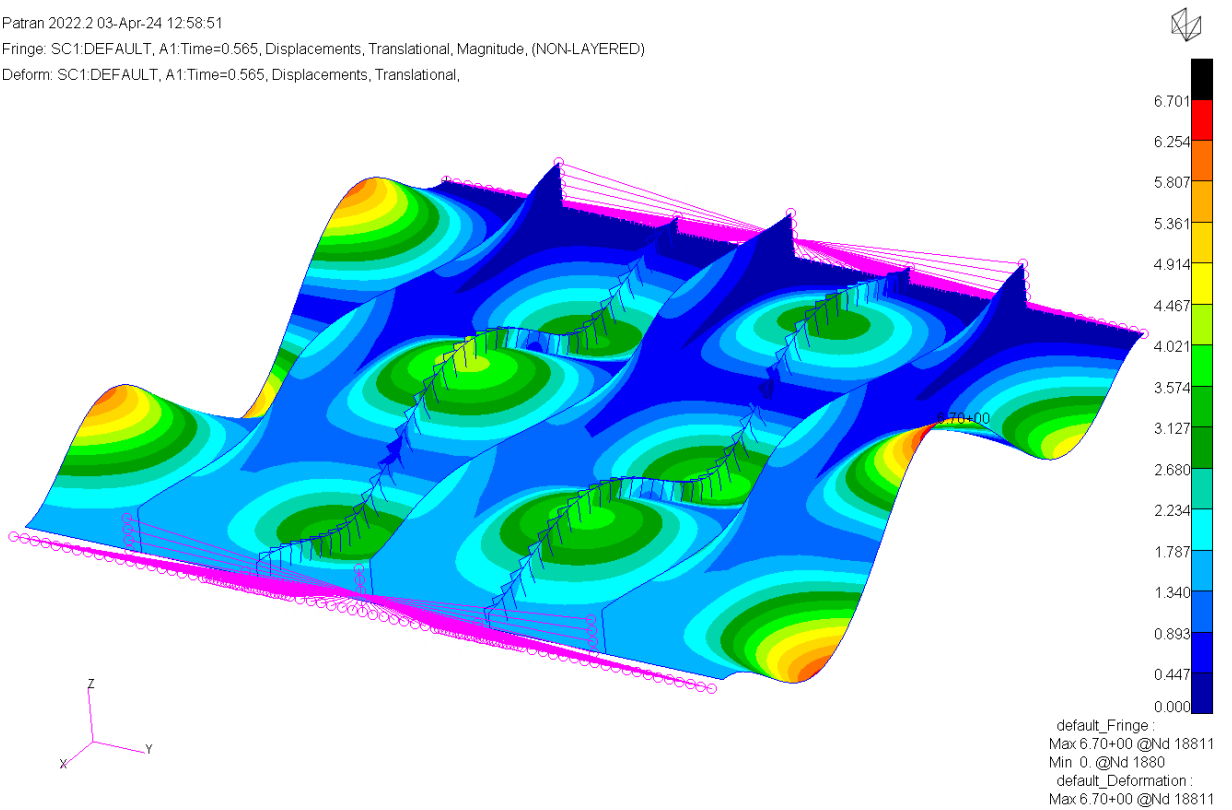


Obrázek P1: 8 Redukované napětí při 56,25 % maximálního deformačního zatížení (3)

Patran 2022.2 03-Apr-24 12:58:51

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.565, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.565, Displacements, Translational,

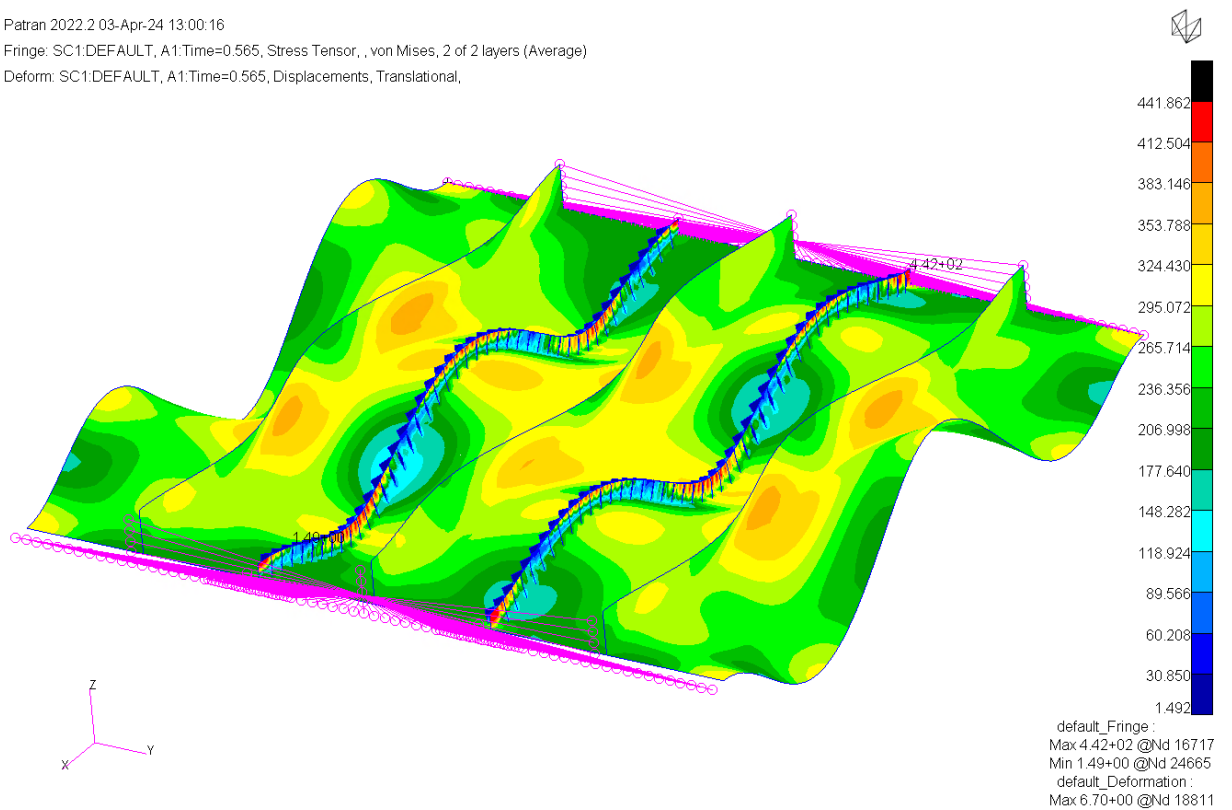


Obrázek P1: 9 Celková deformace při 56,5 % maximálního deformačního zatížení (3)

Patran 2022.2 03-Apr-24 13:00:16

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.565, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.565, Displacements, Translational,

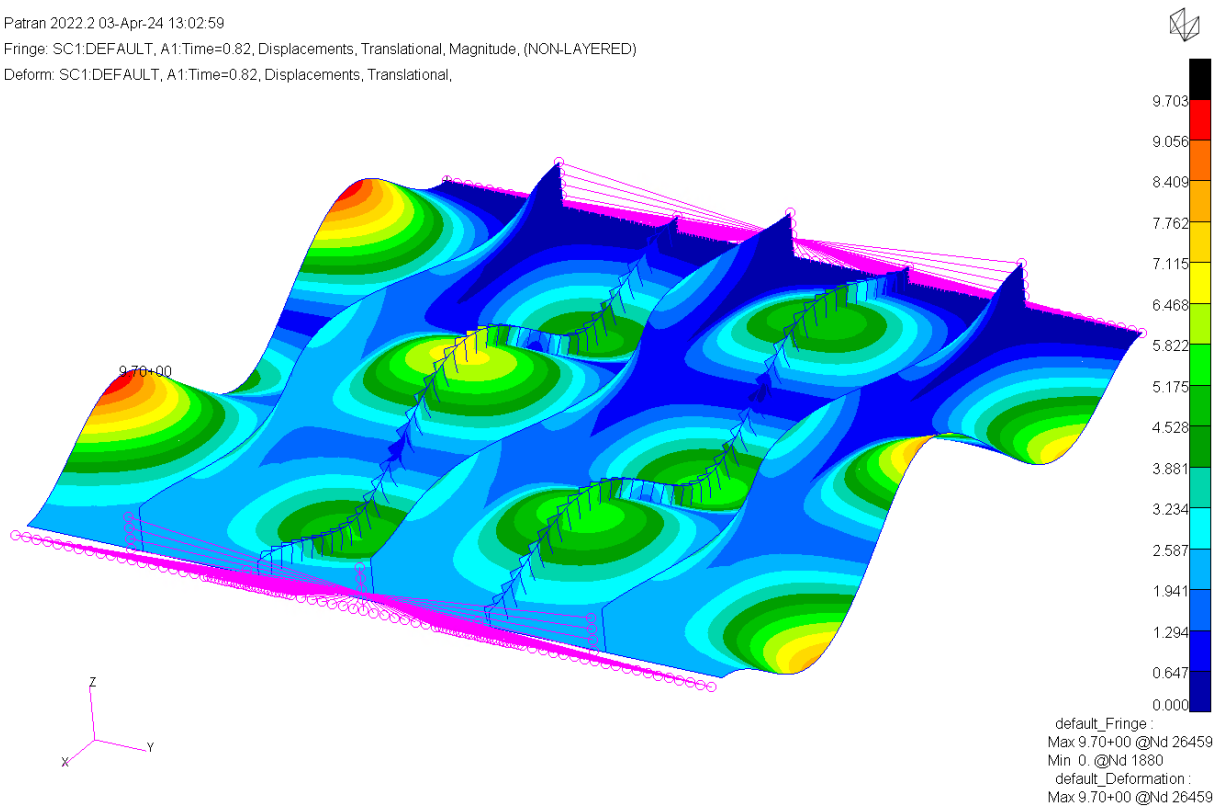


Obrázek P1: 10 Redukované napětí při 56,5 % maximálního deformačního zatížení (3)

Patran 2022.2 03-Apr-24 13:02:59

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.82, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.82, Displacements, Translational,

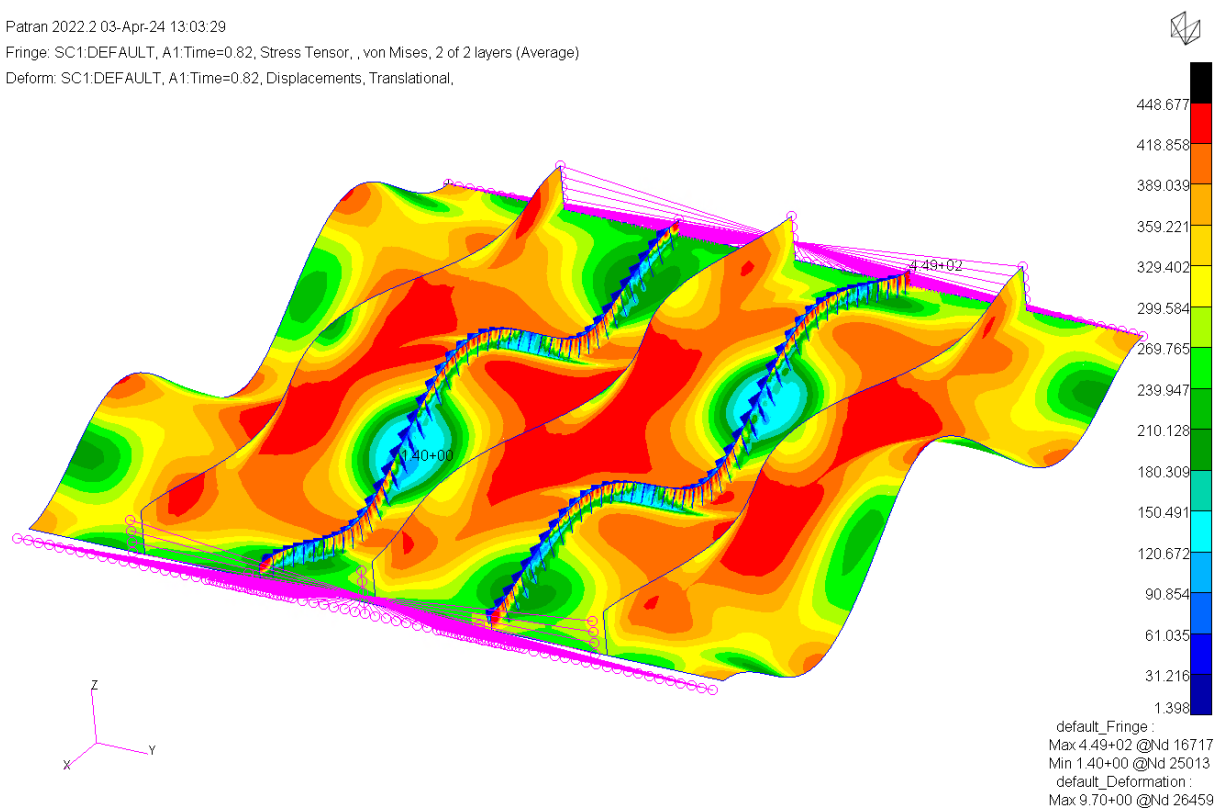


Obrázek P1: 11 Celková deformace při 82 % maximálního deformačního zatížení – Mez únosnosti (4)

Patran 2022.2 03-Apr-24 13:03:29

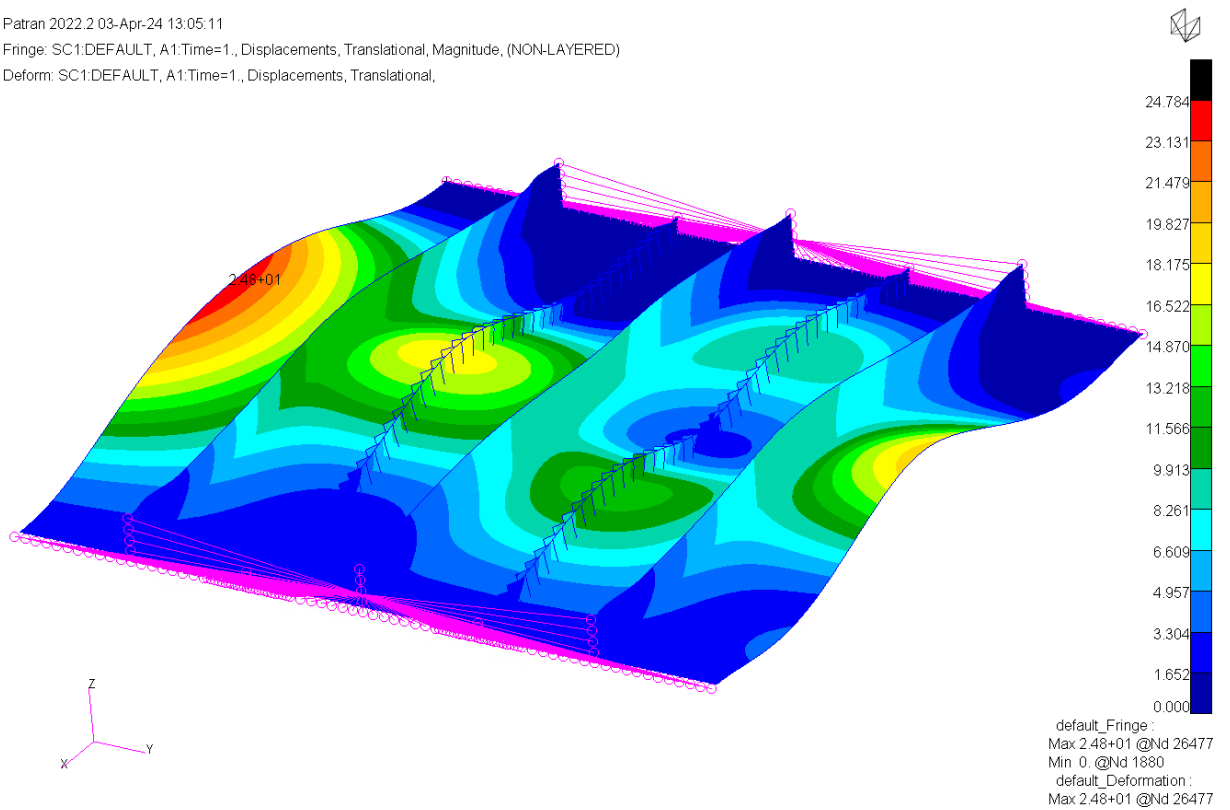
Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.82, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.82, Displacements, Translational,



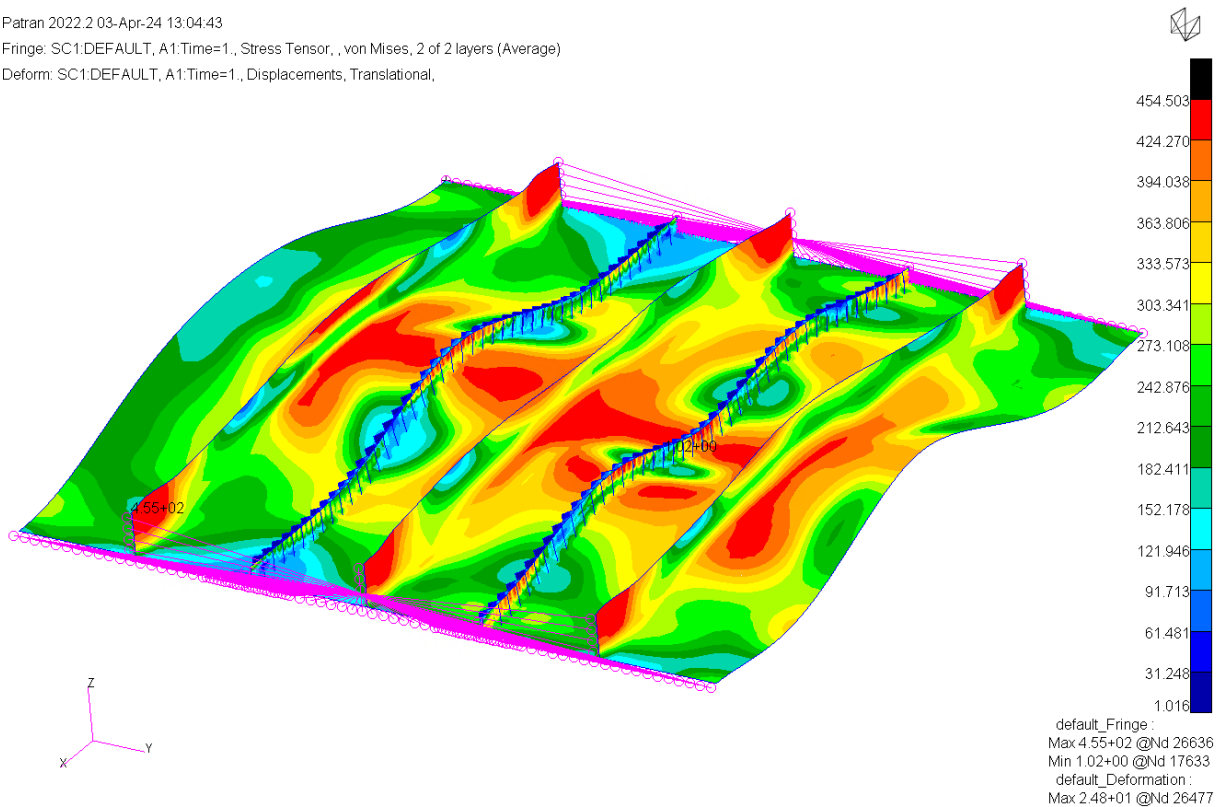
Obrázek P1: 12 Redukované napětí při 82 % maximálního deformačního zatížení – Mez únosnosti (4)

Patran 2022.2 03-Apr-24 13:05:11
Fringe: SC1.DEFAULT, A1:Time=1., Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)
Deform: SC1.DEFAULT, A1:Time=1., Displacements, Translational,



Obrázek P1: 13 Celková deformace při 100 % maximálního deformačního zatížení (5)

Patran 2022.2 03-Apr-24 13:04:43
Fringe: SC1.DEFAULT, A1:Time=1., Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)
Deform: SC1.DEFAULT, A1:Time=1., Displacements, Translational,



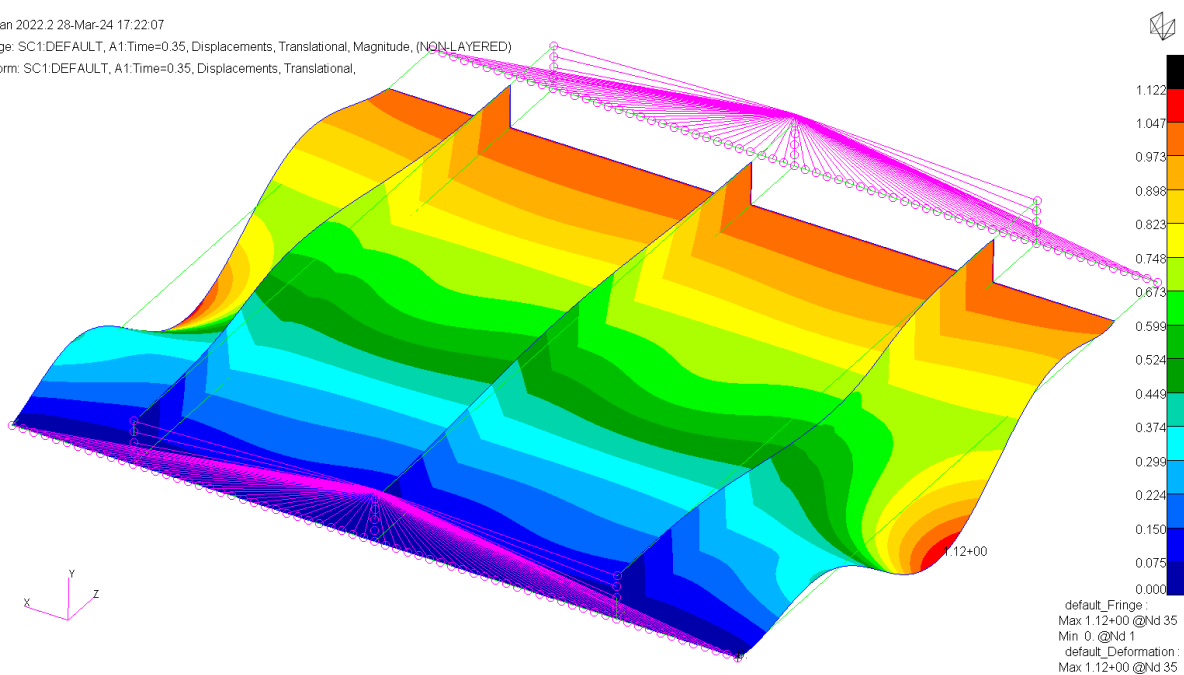
Obrázek P1: 14 Redukované napětí při 100 % maximálního deformačního zatížení (5)

PŘÍLOHA 2 – DEFORMACE PROSTÉHO PANELU DLE TYPU SÍTĚ

Patran 2022.2 28-Mar-24 17:22:07

Fringe: SC1.DEFAULT, A1:Time=0.35, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1.DEFAULT, A1:Time=0.35, Displacements, Translational,

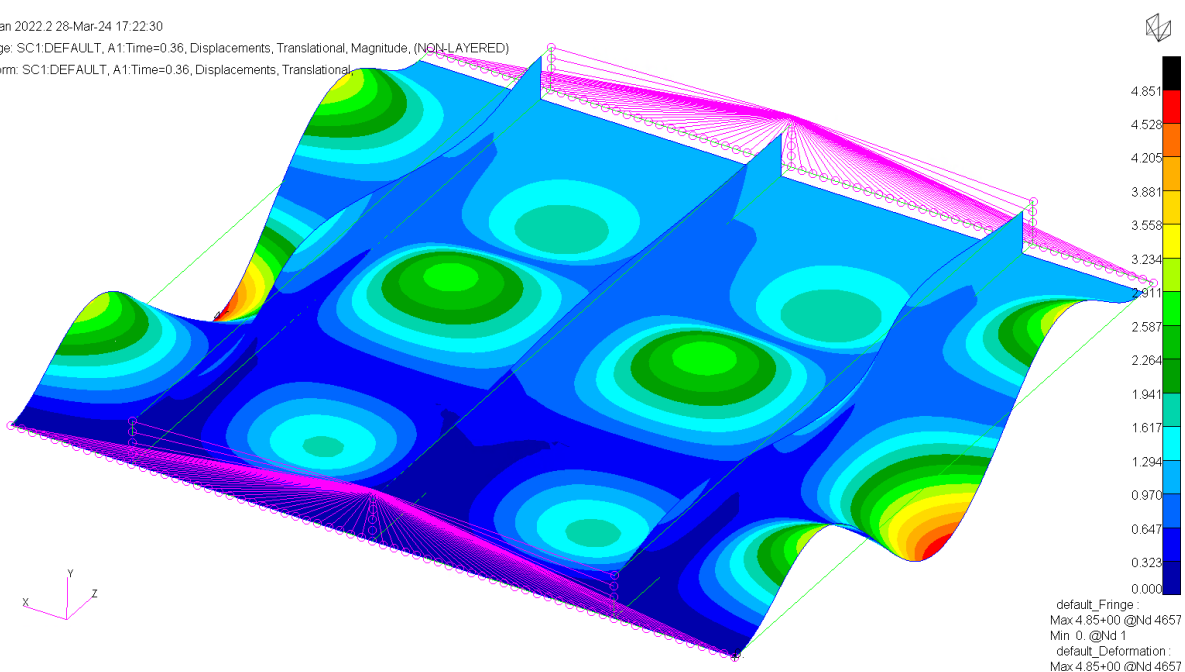


Obrázek P2: 1 Prostý panel s rovnoměrnou sítí při 35 % maximálního deformačního zatížení (1A)

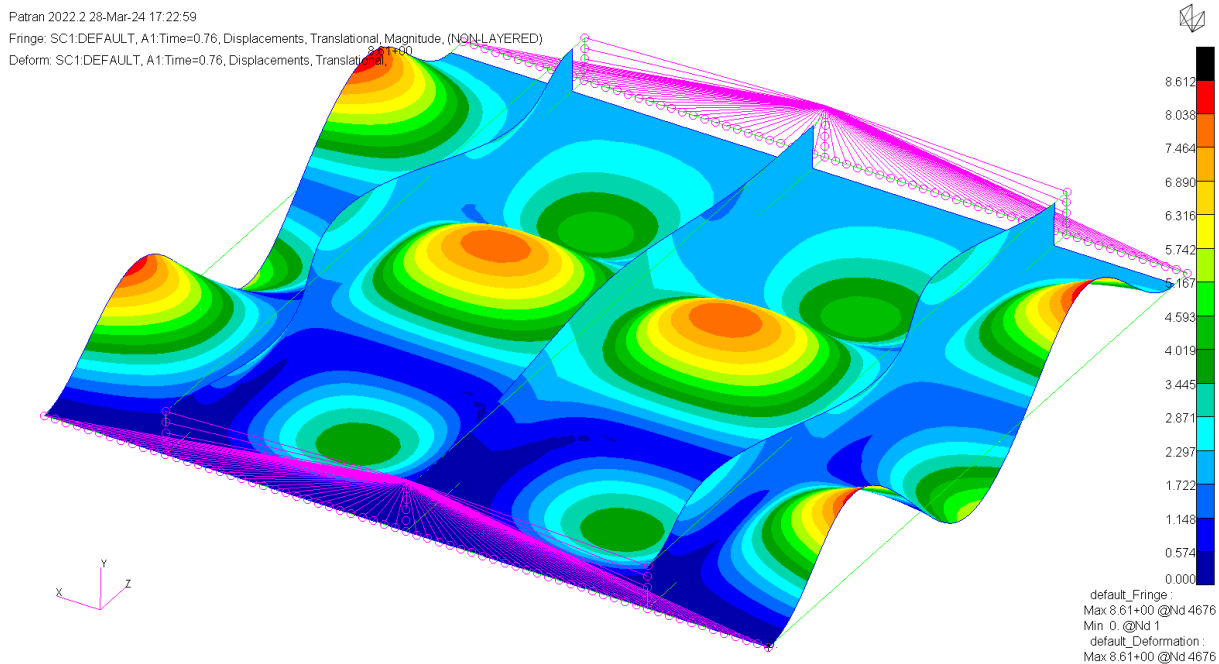
Patran 2022.2 28-Mar-24 17:22:30

Fringe: SC1.DEFAULT, A1:Time=0.36, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

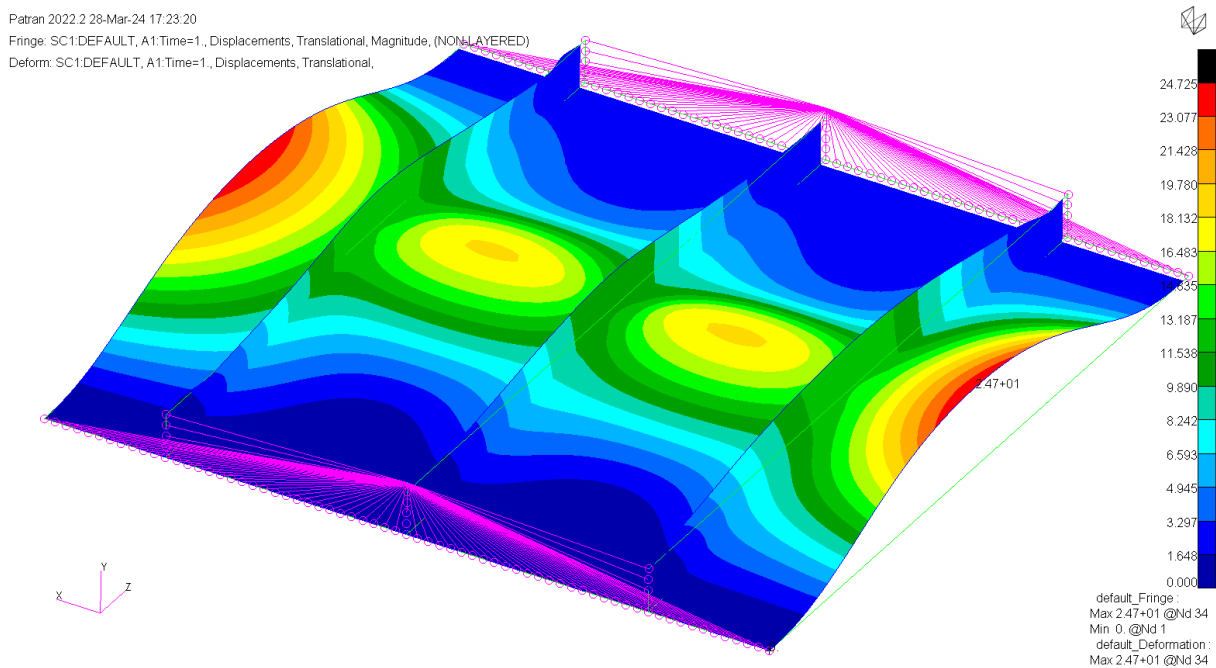
Deform: SC1.DEFAULT, A1:Time=0.36, Displacements, Translational,



Obrázek P2: 2 Prostý panel s rovnoměrnou sítí při 36 % maximálního deformačního zatížení (1A)



Obrázek P2: 3 Prostý panel s rovnoměrnou sítí při 76 % maximálního deformačního zatížení –
 mez únosnosti (2A)

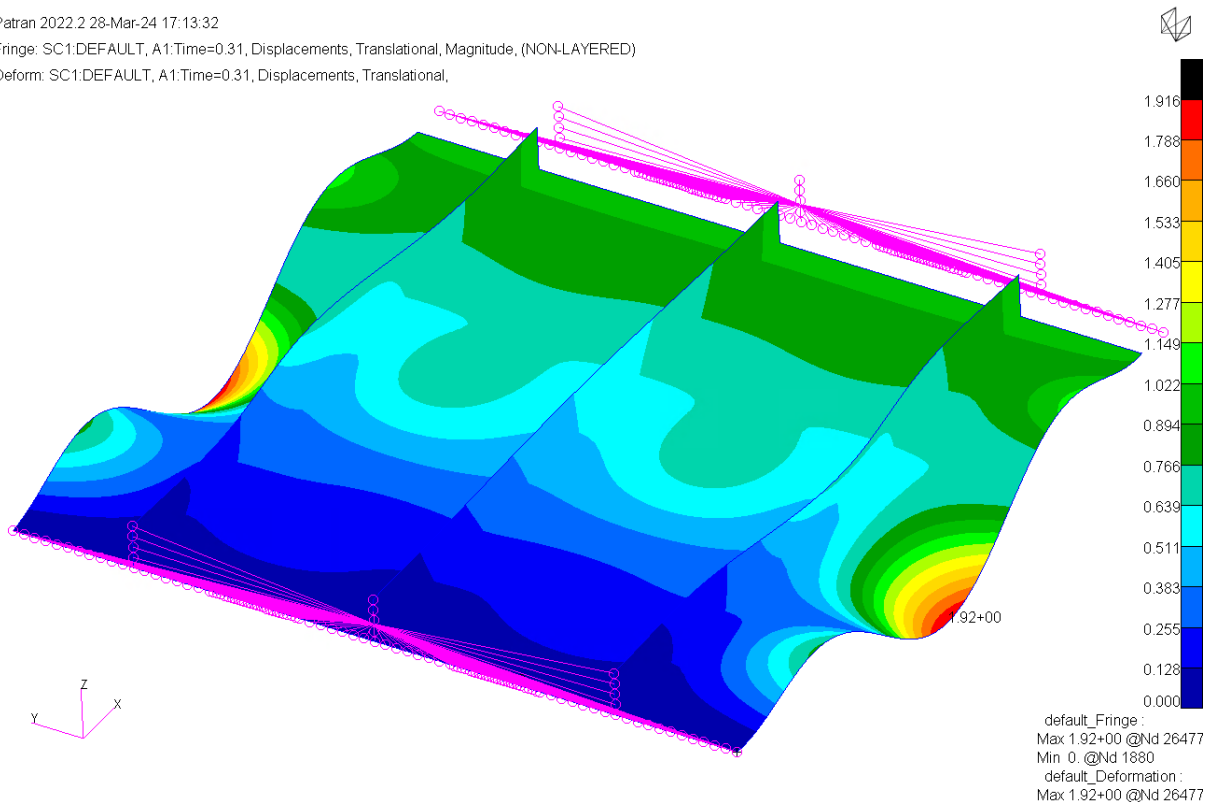


Obrázek P2: 4 Prostý panel s rovnoměrnou sítí při 100 % maximálního deformačního zatížení
 (3A)

Patran 2022.2 28-Mar-24 17:13:32

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.31, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.31, Displacements, Translational,

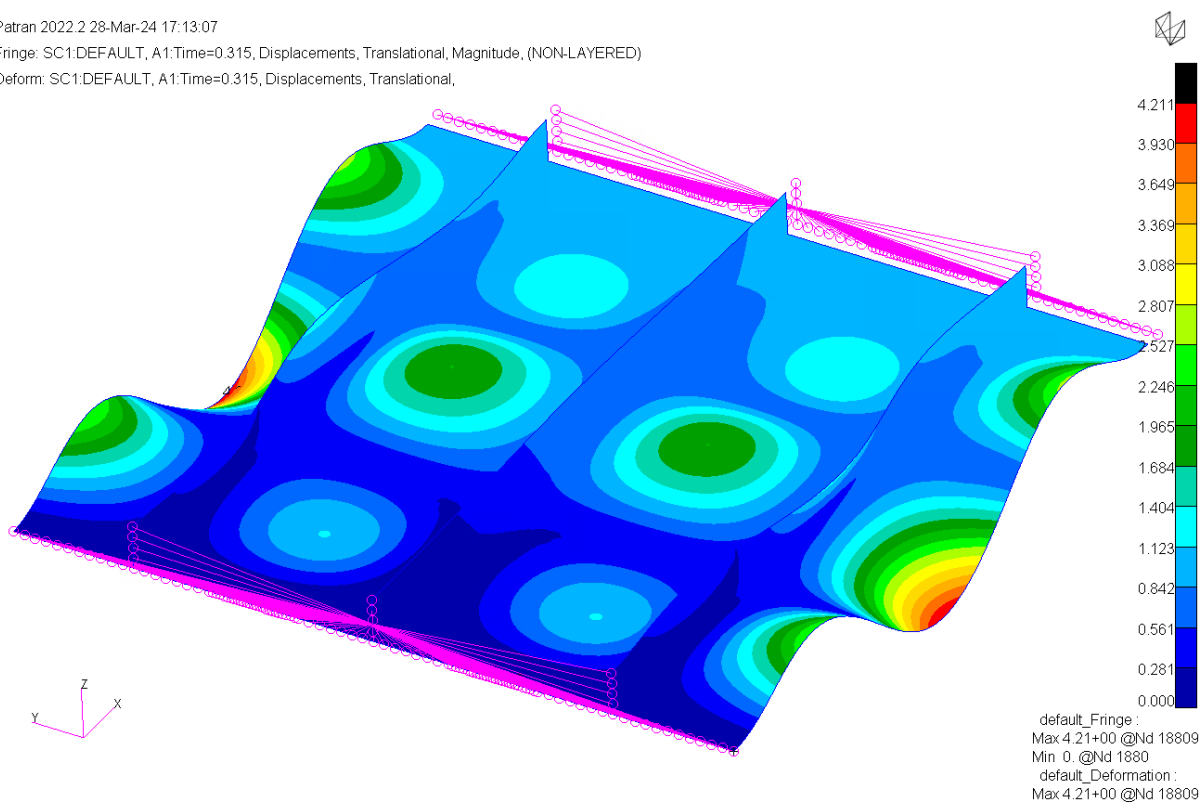


Obrázek P2: 5 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 31 % maximálního deformačního zatížení (1B)

Patran 2022.2 28-Mar-24 17:13:07

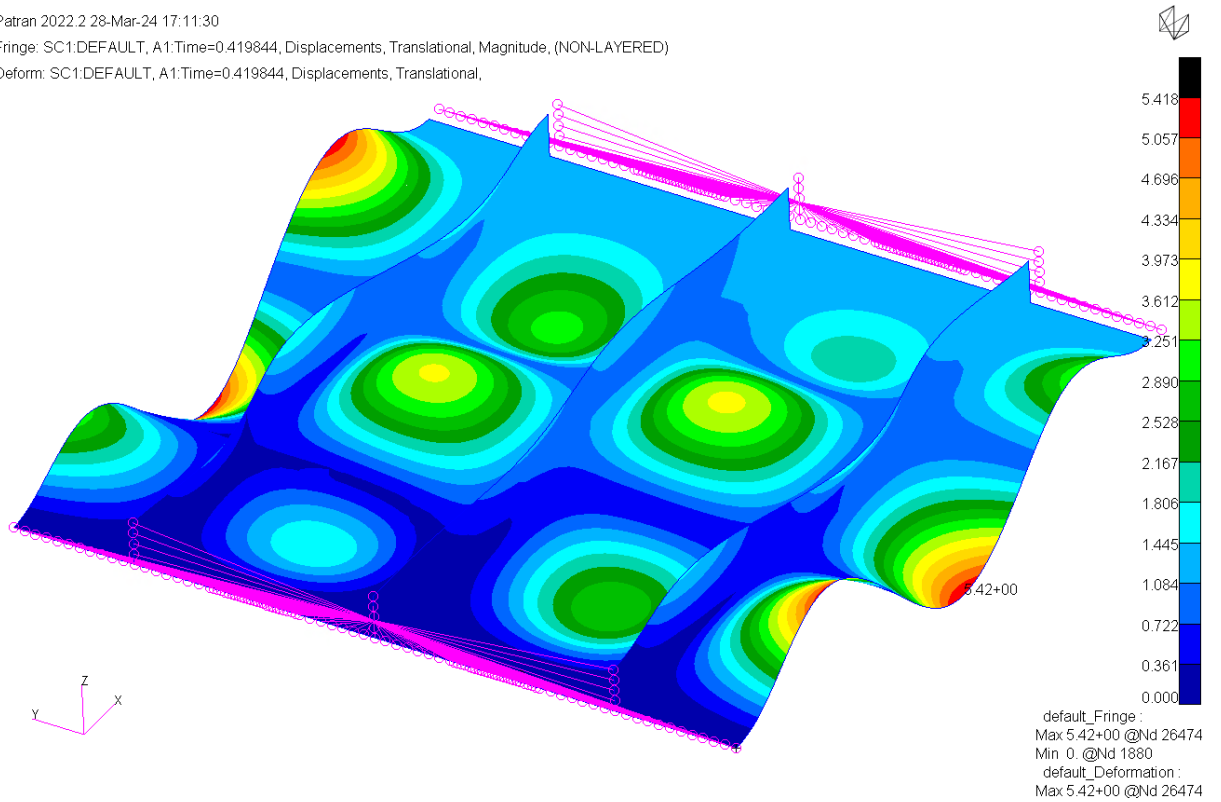
Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.315, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.315, Displacements, Translational,



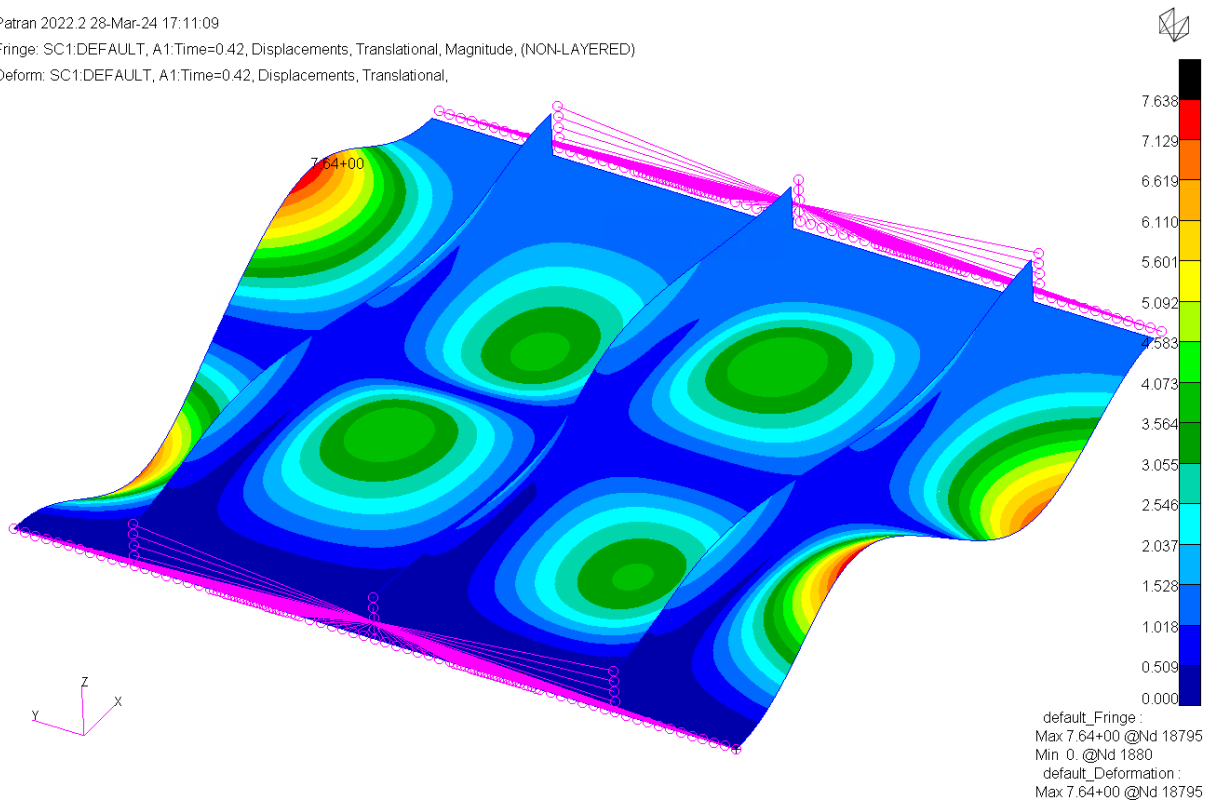
Obrázek P2: 6 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 31,5 % maximálního deformačního zatížení (1B)

Patran 2022.2 28-Mar-24 17:11:30
Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.419844, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)
Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.419844, Displacements, Translational,



Obrázek P2: 7 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 41,9 % maximálního deformačního zatížení (2B)

Patran 2022.2 28-Mar-24 17:11:09
Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.42, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)
Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.42, Displacements, Translational,

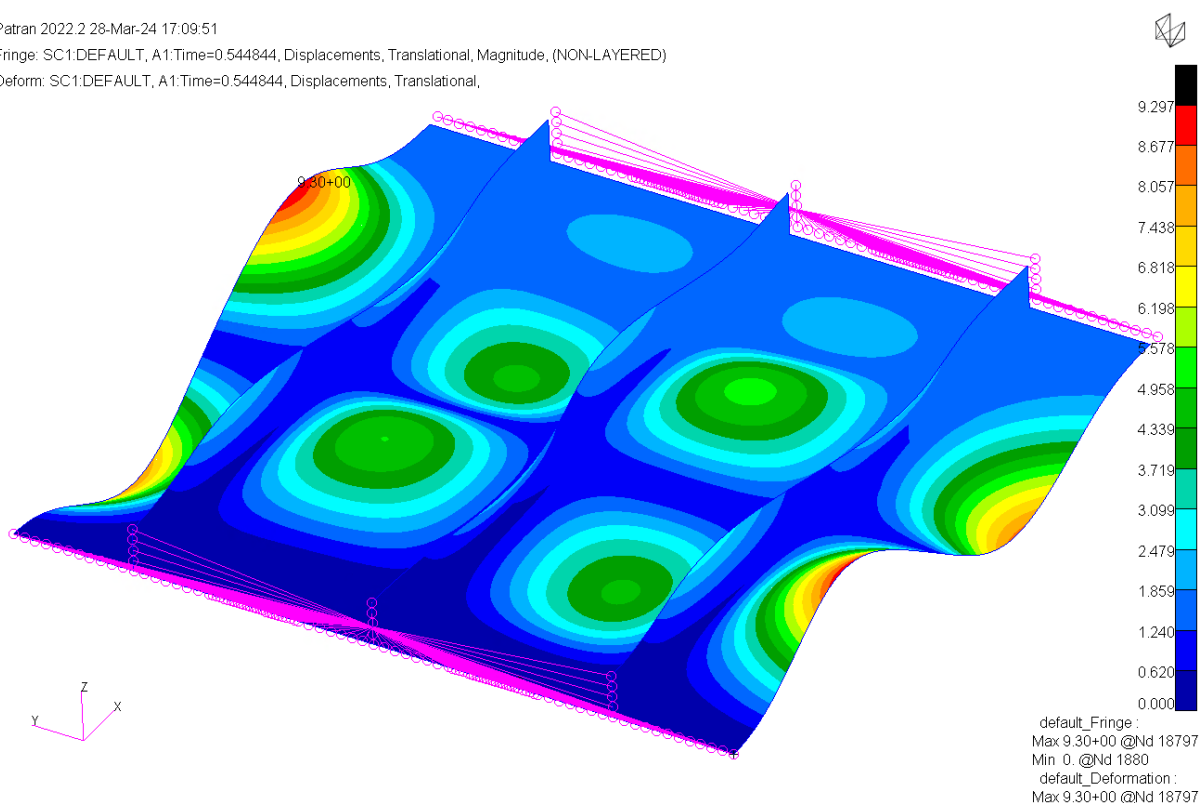


Obrázek P2: 8 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 42 % maximálního deformačního zatížení (2B)

Patran 2022.2 28-Mar-24 17:09:51

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.544844, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.544844, Displacements, Translational,

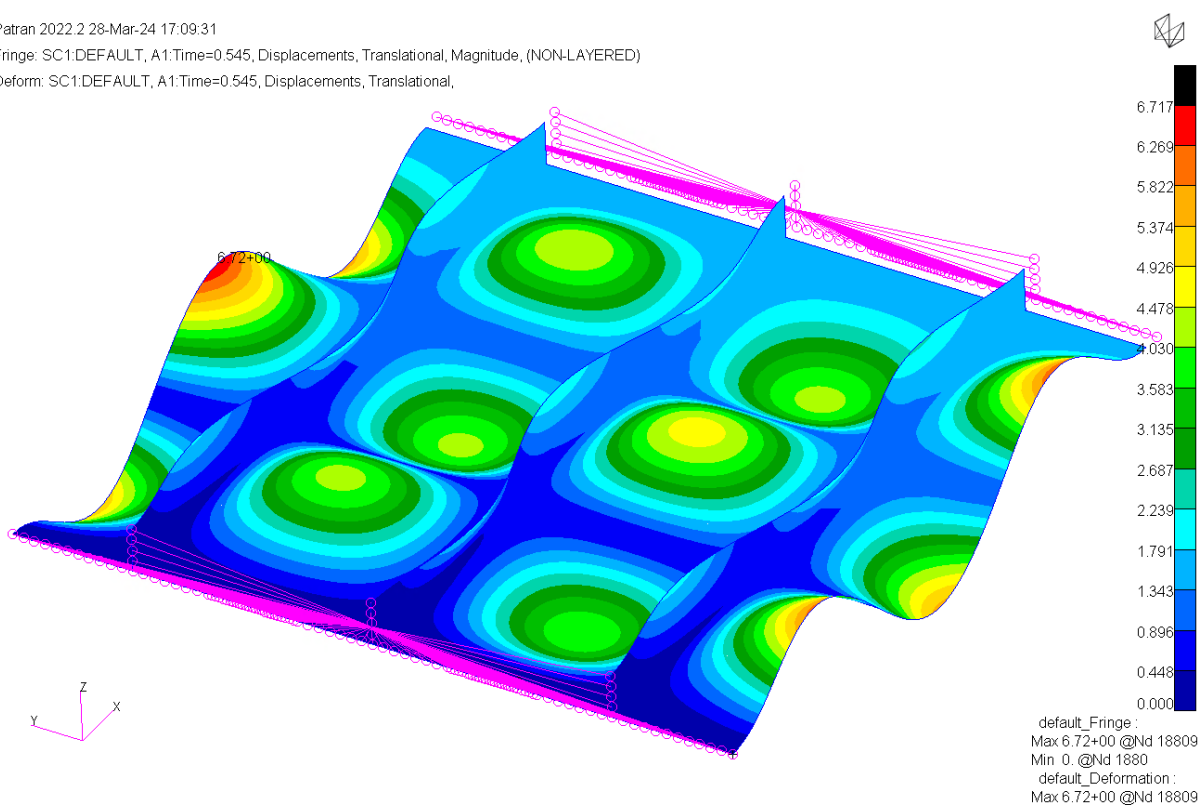


Obrázek P2: 9 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 54,48 % maximálního deformačního zatížení (3B)

Patran 2022.2 28-Mar-24 17:09:31

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.545, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.545, Displacements, Translational,

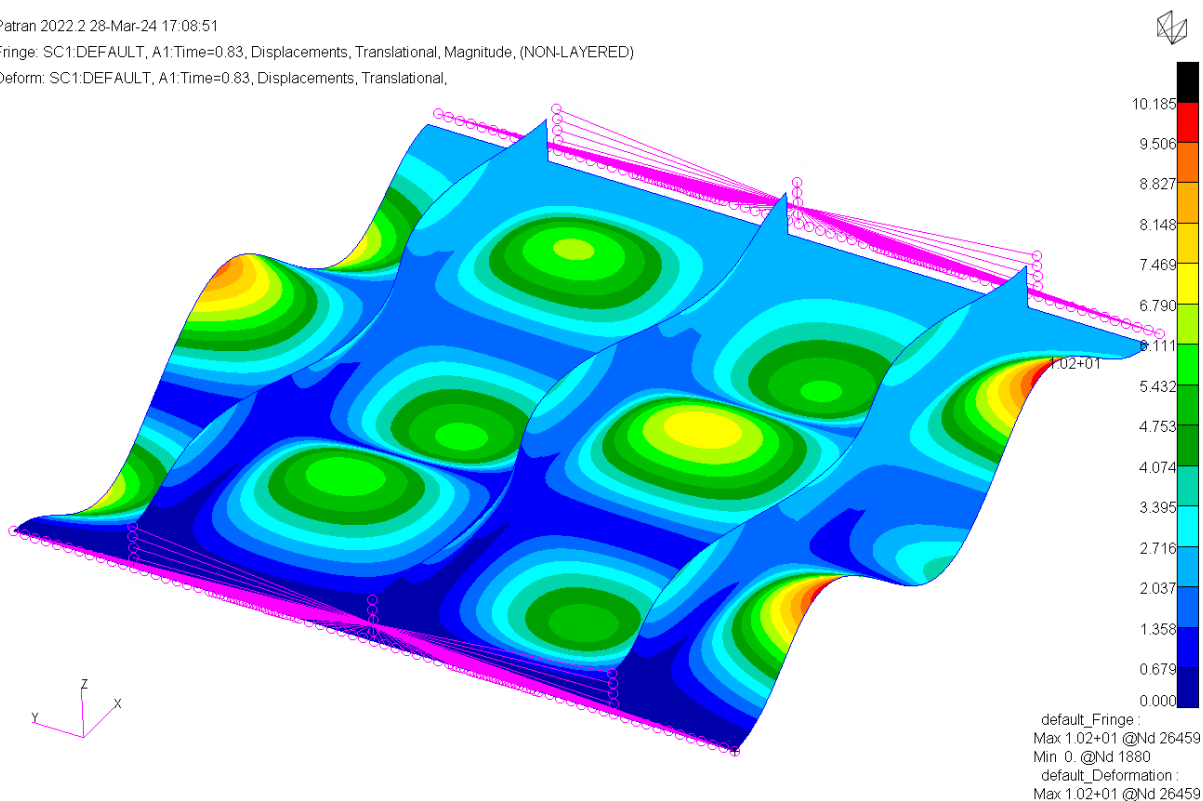


Obrázek P2: 10 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 54,5 % maximálního deformačního zatížení (3B)

Patran 2022.2 28-Mar-24 17:08:51

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.83, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.83, Displacements, Translational,

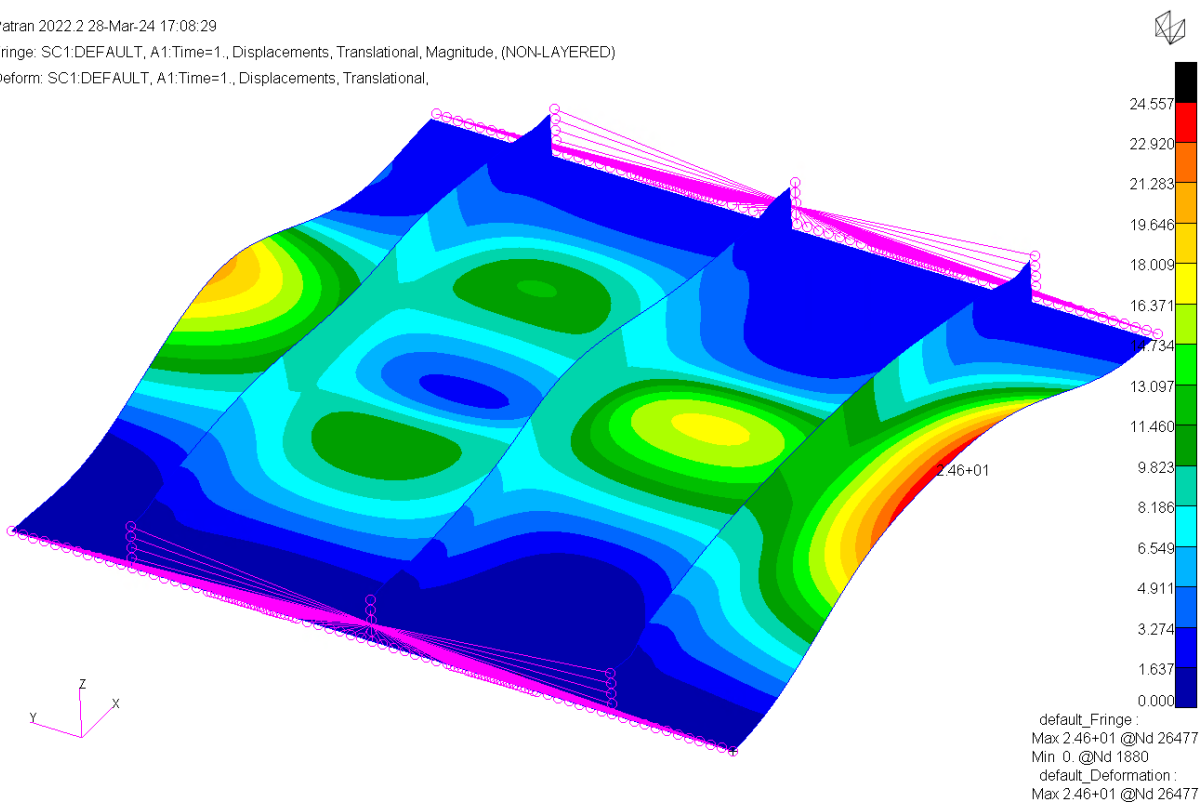


Obrázek P2: 11 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 83 % maximálního deformačního zatížení – mez únosnosti (4B)

Patran 2022.2 28-Mar-24 17:08:29

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=1., Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:DEFAULT, A1:Time=1., Displacements, Translational,



Obrázek P2: 12 Prostý panel s nerovnoměrnou sítí při 100 % maximálního deformačního zatížení (5B)