



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Stavebná fakulta

Meno a priezvisko:

Ing. Maroš Mojto

Autoreferát dizertačnej práce:

Experimentálna a numerická analýza nasúvaného spoja v
konštrukciách stožiarov

na získanie akademického titulu:	philosophiae doctor – PhD.
v doktorandskom študijnom programe:	teória a konštrukcie inžinierskych stavieb
v študijnom odbore:	stavebníctvo
forma štúdia:	denná
Miesto a dátum:	Bratislava, 23.06.2023

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedre stavebnej mechaniky, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ: *Ing. Maroš Mojto*
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: *prof. Ing. Ján Brodniansky, PhD.*
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti: *Ing. Miloš Slivanský, PhD.*
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

prof. Ing. Vincent Kvočák, PhD.
Katedra kovových a drevených konštrukcií
SvF TU Košice

Ing. Michal Botló, PhD.
AFRY CZ s.r.o. – Slovensko
BBC 5, Plynárenská 7/A, 821 09 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 22.8.2023 o 10:30 h na
Katedra kovových a drevených konštrukcií SvF STU v Bratislave, Radlinského
11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan fakulty

Abstrakt

Táto práca analyzuje správanie nasúvaného spoja s osemuholníkovým prierezom vo vertikálnych nosných konštrukciách. Cieľom je verifikácia numerického modelu, skúmanie minimálnej dĺžky nasunutia, rozvoj analytického prístupu a analýza vplyvu parametrov na nasúvaný spoj. Vyvinutý a overený numerický model simuluje správanie nasúvaného spoja. Experimentálne merania a numerické simulácie ukázali citlivosť spoja na geometrické imperfekcie a výskyt lokálnych napätí. Navrhnutý analytický prístup umožňuje výpočet napätia v závislosti od rôznych parametrov. Výsledky práce poskytujú užitočné poznatky pre optimalizáciu návrhu nasúvaných spojov a ich využitie vo vertikálnych nosných štruktúrach.

Obsah

1. Úvod.....	4
1.1. Ciele práce	5
2. Analytický prístup	5
3. Experimentálny model.....	7
4. Numerický model.....	13
5. Verifikácia numerického modelu.....	15
6. Aplikácia numerického modelu	17
7. Záver	20
7.1. Odporúčanie pre ďalší výskum v tejto oblasti	21
7.2. Odporúčanie pre inžiniersku prax	22
Literatúra.....	22
PUBLIKÁCIE AUTORA RELEVANTNÉ K PRÁCI	24

1. Úvod

Nasúvaný spoj je významným prvkom v konštrukciách, ako sú veterné turbíny, stožiare a podobne. Ide o spojenie dvoch kónických rúr s kruhovým alebo polygonálnym prierezom, ktoré sa často používa v oceľových stĺpoch ako alternatíva k prírubovému spoju. Jeho výhodou je, že nepotrebuje dodatočné zvary alebo skrutky, pretože zaťaženie sa prenáša z vrchnej rúry na spodnú pomocou geometrie a trenia.

Pri návrhu nasúvaných spojov je potrebné zohľadniť niekoľko faktorov, ktoré ovplyvňujú ich správanie a výsledné napätia. Medzi tieto faktory patria geometria spoja, dĺžka nasunutia, tvar prierezu dielcov, výrobné imperfekcie alebo trenie. V súčasnosti sa pri návrhu uplatňuje len minimálna dĺžka nasunutia vzhľadom na priemer dielca, pričom ďalšie faktory nie sú zohľadnené. Tento, síce jednoduchý a praktický prístup, obmedzuje možnosti pri návrhu a spôsobuje nejasnosti v inžinierskej praxi. V súčasnosti sa nasúvané spoje stávajú jednou z možných alternatív pre veterné turbíny na mori. Z tohto dôvodu je snahou podrobnejšie preskúmať ich správanie.

Existujú analytické vzťahy na výpočet napätí v nasúvanom spoji pri pôsobení osovej sily a ohybového momentu, ktoré boli predstavené v práci [1] z roku 2003. Publikácie [2] a [3] priniesli ďalšie rozšírenie problematiky. Avšak tieto vzťahy sa nedostatočne uplatňujú v praxi, preto je potrebné preskúmať ich správnosť a spoľahlivosť pre rôzne geometrické a zaťažovacie podmienky.

V roku 2016 sa na TU Delft začal experimentálny výskum nasúvaného spoja s cieľom využiť ho pri spojení spodnej a vrchnej veže veterných turbín. Sústredili sa najmä na aplikáciu vibrácií pri nasúvaní a vysúvaní vrchného dielca. Tento experimentálny výskum bol overený na vzorkách a neskôr aj na plnohodnotnej veternej turbíne vid'. [4], [5] a [6]. Avšak základné správanie nasúvaného spoja bolo v rámci tohto experimentu skúmané len okrajovo vid'. [7] a [3].

Ďalší významný výskum nasúvaného spoja prebieha na STU v Bratislave od roku 2010. Výsledky týchto prác, uvedené v publikáciách [8], [9], [10] a [11], sa zaoberajú analytickým prístupom, numerickými modelmi a experimentálnymi meraniami. Autori týchto prác odporúčajú ďalší výskum v tejto oblasti, najmä pokiaľ ide o presnejšiu numerickú analýzu a vplyv parametrov ovplyvňujúcich nasúvaný spoj, ako napríklad mnohouholníkový prierez, dĺžku nasunutia a imperfekcie.

Doposiaľ sa uskutočnilo niekoľko experimentálnych meraní nasúvaného spoja, prevažne na kruhových prierezoch. Avšak nasúvaný spoj má svoje využitie aj

na mnohouholníkových prierezoch, ktoré doposiaľ neboli dostatočne experimentálne odskúšané.

Z hľadiska optimálnej dĺžky nasunutia existuje napr. odporúčanie uvedené v publikácii [9], že dĺžka nasunutia rovná 1,5-násobku priemeru dielca sa zdá byť konzervatívna. Z toho vyplýva potreba ďalších experimentálnych štúdií s cieľom preskúmať a potvrdiť správanie nasúvaného spoja a jeho parametrov.

1.1. Ciele práce

Ciele tejto práce sú v súlade s odporúčaniami predchádzajúcich výskumov, požiadavkami praxe a skúsenosťami získanými počas prípravnej fázy. Cieľom je rozšíriť poznatky o nasúvaných spojoch, konkrétne o spojoch s osemuholníkovým prierezom. Hlavnými cieľmi sú: verifikácia numerického modelu na základe experimentálnych meraní, skúmanie minimálnej dĺžky nasunutia pre nasúvaný spoj s osemuholníkovým prierezom, rozvoj analytického prístupu na výpočet napätia v nasúvanom spoji a analýza vplyvu jednotlivých parametrov, ako je dĺžka nasunutia, tenie, uhol stúpania dielca (kónicita) alebo nedokonalosti (imperfekcie).

2. Analytický prístup

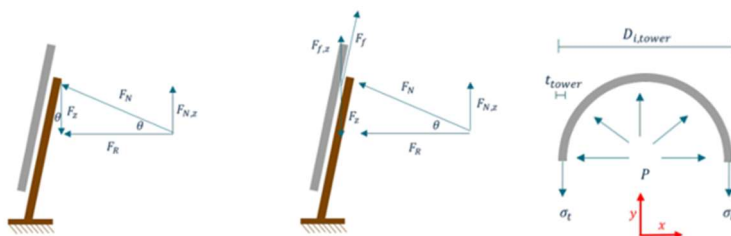
V súčasnej literatúre sa nachádzajú analytické vzťahy na výpočet napätia v nasúvanom spoji. Tieto vzťahy sa opakujú v rôznych dostupných zdrojoch, ako napríklad v literatúrach [3], [2] alebo [9]. Ich princíp spočíva v prevode pôsobiacej vertikálnej sily alebo ohybového momentu na tangenciálne napätie (normálové napätie v dotyčnicovom smere). Pri prenose vertikálnej sily tieto vzťahy poskytujú jednoznačné riešenie, ale pri ohybovom momente sa objavujú niektoré nejasnosti.

Osová sila v smere osi prúta

Pre prípad pôsobenia vertikálnej sily F_z na vrchný diel spoja je uvedená rovnováha síl na Obr. 2.1. V ľavej časti obrázku je zobrazená rovnováha síl bez trenia, v strednej časti je uvedená rovnováha síl s trením a v pravej časti je zobrazený prenos síl do normálového tangenciálneho napätia σ_{tan} . Výsledné vzťahy na výpočet napätia s prenosom sily bez trenia (2.1) a s prenosom sily so zohľadnením trenia (2.2).

$$\sigma_{tan} = \frac{F_z}{2 * t_{tower} * \pi * h_{overlap} * \tan(\theta_{cone})} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (2.1)$$

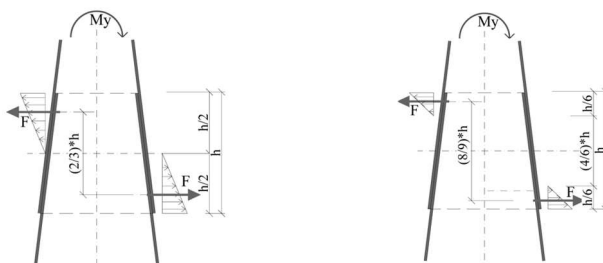
$\sigma_{tan} = \frac{F_z}{2 * \pi * h_{overlap} * t_{tower} * (\tan(\theta_{cone}) + \mu_s)} \left[\frac{N}{m^2} \right]$	(2.2)
---	-------



Obr. 2.1 Spôsob prenosu síl, v strede a na pravej strane rovnomerný tlak P [3]

Ohybový moment

Pre ohybový moment existuje tiež definovaný analytický prístup, avšak prináša viacero nejasností v porovnaní s vertikálnou silou. Tento prístup je založený na predpoklade, že vrchný diel spoja sa opiera o spodný diel. Tento kontakt vzniká medzi hornou a protiahlou spodnou časťou spoja. V tejto situácii vzniká rameno sily, cez ktoré sa prenáša ohybový moment. Celkovú situáciu si môžeme predstaviť na základe Obr. 2.2, kde na ľavej strane je uvedený základný vzťah. Na pravej strane je znázornená naša úprava pri uvažovaní kratšej dĺžky nasunutia. Analytické vzťahy pre základný spôsob prenosu je prezentovaný na základe (2.3) a modifikovaný spôsob prenosu je zobrazený pomocou vzťahu (2.4)



Obr. 2.2 Spôsob prenosu síl pri ohybovom zaťažení.

$$\sigma_{tan} = \frac{3 * M_y}{h^2 * t} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (2.3)$$

$$\sigma_{tan} = \frac{9,6 * M_y}{2 * h^2 * t_{tower}} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (2.4)$$

Tieto vzťahy predstavujú relatívne jednoduché a pochopiteľné správanie, čo je pre inžiniersku prax prijateľné. Ak sa tieto vzťahy overia a potvrdí sa ich správnosť, môžu byť užitočným nástrojom pri návrhu nasúvaného spoja. Na základe prezentovaných analytických vzťahov je možné povedať, že pri výpočte napätia od osovej sily nevstupuje do výpočtu priemer dielca a pri výpočte napätia od ohybového momentu dokonca ani súčiniteľ trenia.

Spôsob zavedenia trenia prezentoval autor v publikácii [3], kde prezentuje vzťah na výpočet tangenciálneho napätia so zohľadnením trenia vid'. (2.5).

$$\sigma_{tan} = \frac{M_{y,ed}}{t_{tower} * h_{overlap} * \pi * D_{t,slip} * (\tan(\theta_{cone}) + \mu_s)} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (2.5)$$

3. Experimentálny model

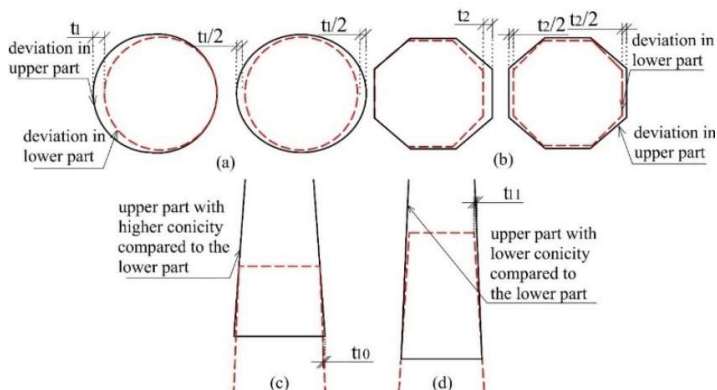
V prvom kroku bol vykonaný predprípravný experiment (zostava vzoriek A). V týchto značne nedokonalých 8 uholníkových experimentálnych modeloch sme definovali základné požiadavky pre zostavu vzoriek B.

V experimentálnom meraní zostavy vzoriek B bola geometria vzoriek navrhnutá tak aby zahŕňala jednotlivé parametre. Celkovo bolo dodaných 16 vzoriek (32 dielcov) s polygonálnym 8 uholníkovým prierezom. Polovica vzoriek bolo pozinkovaných a polovica bola nepozinkovaných (oceľ bez povrchovej úpravy). V rámci vzoriek sa skombinovali dve kónicity (10 a 25) a dve štihlosti prierezu. Priemer dielcov sa pohyboval od 100 mm do 260 mm.



Obr. 3.1 Experimentálna zostava vzoriek B. Fotka vo výrobnjej hale dodávateľa vzoriek, spoločnosti ELV produkt a.s..

Na základe prípravnej fázy bolo zistené, že geometrické imperfekcie výrazne ovplyvňujú správanie nasúvaného spoja. Preto sa pred vykonaním experimentálnej zostavy B zameralo na analýzu týchto imperfekcií. Cieľom bolo zatriediť nasúvaný spoj s pohľadu imperfekcií. Navrhnutá metodika spočívala v definícia max. výrobných tolerancií pre oceľové rúry použité v nasúvanom spoji pomocou ktorých je nasledovne definovaná maximálna imperfekcia v nasúvanom spoji.



Obr. 3.2 Navrhnutá hlavná nedokonalosť v tvare prierezu (vo vrchnej časti). Nedokonalosť v kónicite (v spodnej časti).

Tab. 1 Maximálne odchýlky t_1 a t_2 pre kruhový a polygonálny prierez.

Norma	Odchýlka t_1 v [mm] pre kruhové prierezy		Odchýlka t_2 v [mm] pre polygonálny prierez	
	D = 242 mm	D = 1250 mm	D = 242 mm	D = 1250 mm
STN EN 1090-2 [12] Tab. B.6	2,00/1,00 ^a	2,00/1,00 ^a	2,00/1,00 ^a	2,00/1,00 ^a
STN EN 1090-2 [12] Tab. B.11	A = 6,8 B = 10 C = 14,6	A = 17,50 B = 25,00 C = 37,50	A = 6,8 B = 10 C = 14,6	A = 17,50 B = 25,00 C = 37,50
STN EN 40-2 [13] Časť 5.7.1.2	14,5	75,00	NA	NA
STN EN 40-2 [13] Časť 5.7.1.3	NA	NA	14	92
STN EN 40-2 [13] Časť 5.7.1.1	4,8	25,00	4,8	25,00
STN EN 10217-7 [14] Tab. B.10	D3 = 3,63 D4 = 2,42	D2 = 25,00	D3 = 3,63 D4 = 2,42	D2 = 25,00
STN EN 10217-7 [14] Časť 8.8.4.5	D3 = 3,63 D4 = 2,42	D2 = 50,00	D3 = 3,63 D4 = 2,42	D2 = 50,00

^a Požiadavka nie je vzťahnutá k priemeru dielca.

^b Priemer opísanej kružnice bol použitý pre polygonálny prierez.

Prezentované výsledky v Tab. 1 predstavujú maximálne imperfekcie pre nasúvaný spoj pre zavedenú odchýlku t_1 a t_2 vid'. Obr. 3.2 V tabuľke sú uvedené prierezy s priemerom 242 mm, ktorý zodpovedá nášmu experimentálnemu meraniu a priemeru 1250 mm, ktorý bol zvolený ako príklad.

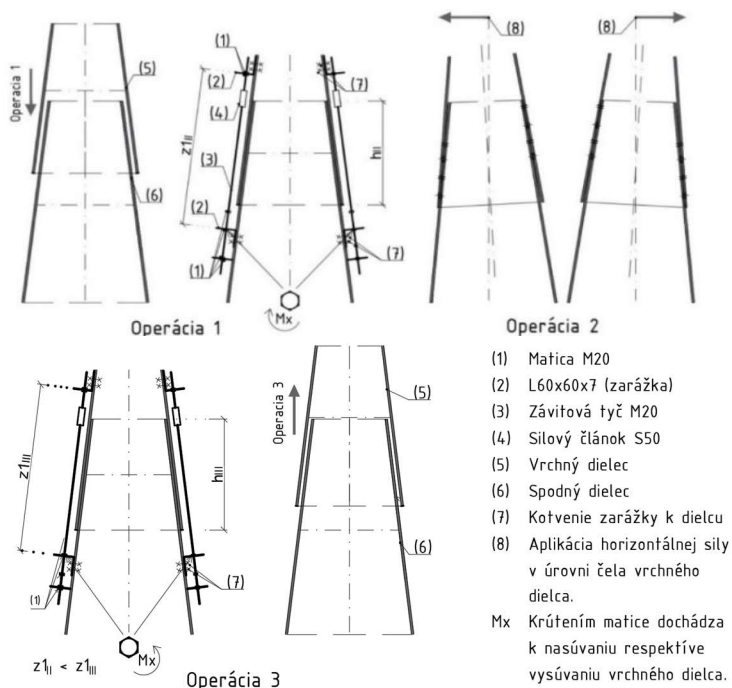
Na základe výsledkov je možné konštatovať, že v súčasnosti definované tolerancie pre kruhové a polygonálne rúry je veľmi zložité použiť na definíciu dovoľených geometrických imperfekcií v nasúvaných spojov. Vypočítané dovolené odchýlky t_1 a t_2 sa výrazne líšia a nie je jasné, ktoré z nich by bolo vhodné použiť.

Okrem toho boli jednotlivé experimentálne rúry zatriedené na základe tolerancií pre rúry. Na základe tohto zatriedenia sa rozhodlo, že vzorky s malou štíhlosťou (vzorky s malým priemerom) nebudú skúmané. Tieto vzorky vykazovali príliš veľké imperfekcie a s veľkou pravdepodobnosťou by tieto imperfekcie znemožnili objektívne vyhodnotenie vzoriek. Toto rozhodnutie bolo založené na záveroch z prípravnej fázy experimentu.

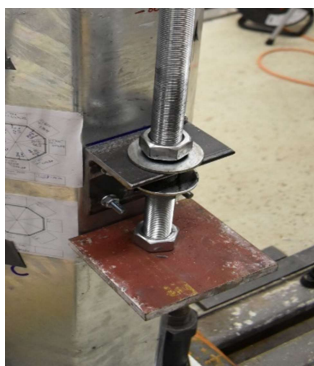
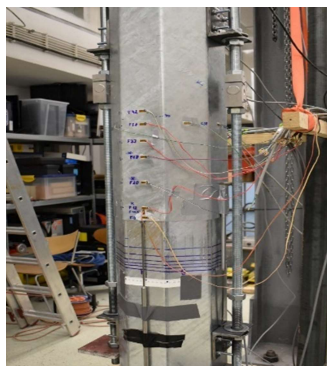
Priebeh experimentálneho merania a meracie zariadenia

V záveroch prípravnej fázy bola stanovená požiadavka na zachytenie (meranie) procesu nasúvania vrchného dielca. Na tento účel sme navrhli konštrukčné riešenie, ktoré je znázornené na Obr. 3.3 a Obr. 3.4. Toto riešenie pozostáva z rôznych komponentov, ako sú závitové tyče, zarážky, matice, kontramatice, podložky a doplnkové oceľové dosky. Pomocou krútenia matic je možné dosiahnuť buď nasúvanie alebo vysúvanie vrchného dielca.

Horizontálna sila bola vnášaná do čela stĺpa pomocou ťahaných lán. Na zaznamenávanie meraných veličín sme použili zostavu HBM Spider 8. Konkrétne sme merali aplikované sily, deformácie a pretvorenia (napätia). Deformácie sme merali v čele vrchného dielca vo dvoch kolmých smeroch, a taktiež sme merali inklináciu vrchného dielca v jeho spodnej polohe na štyroch stenách. Väčšina meracích zariadení pozostávala z jednosmerných tenzometrov, ktoré sme umiestnili na vrchný dielec v mieste nasúvaného spoja. Hlavným meraným parametrom boli tangenciálne napätia (normálové napätia na hornom povrchu vrchnej rúry v smere dotyčnice). Postupne sme tiež dopĺňali tenzometre v axiálnom (vertikálnom) smere.

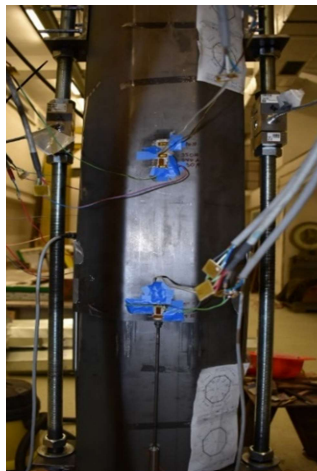
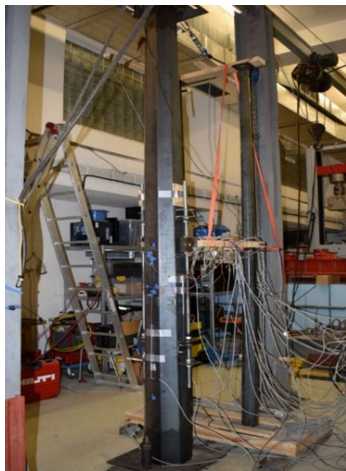


Obr. 3.3 Schéma zaťažovania nasúvaného spoja. Operácia 1 predstavuje nasúvanie. Operácia 2 predstavuje ohýbanie a operácie 3 predstavuje vysúvanie.

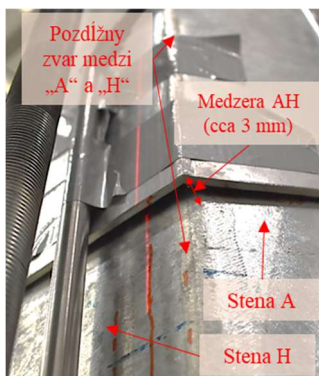
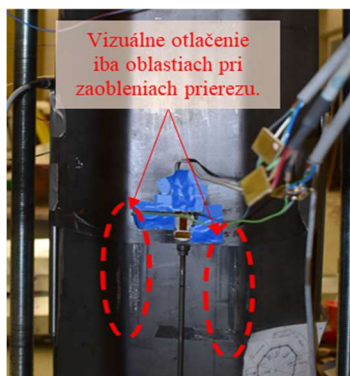


Obr. 3.4 Mechanizmus na nasúvanie a vysúvanie vrchného dielca.

Na Obr. 3.5 a Obr. 3.6 sú zobrazené vybrané experimentálne merania. Obr. 3.6 na ľavej strane zachytáva otláčenie (miesto kontaktu) medzi vrchným a spodným dielcom po zaťažení - rovnakú polohu kontaktných napätí sme dosahovali aj v numerickom modeli. Na pravej strane je zobrazená medzera medzi vrchným a spodným dielcom v mieste pozdĺžneho zvaru - v tomto mieste sme aplikovali medzeru do numerického modelu.



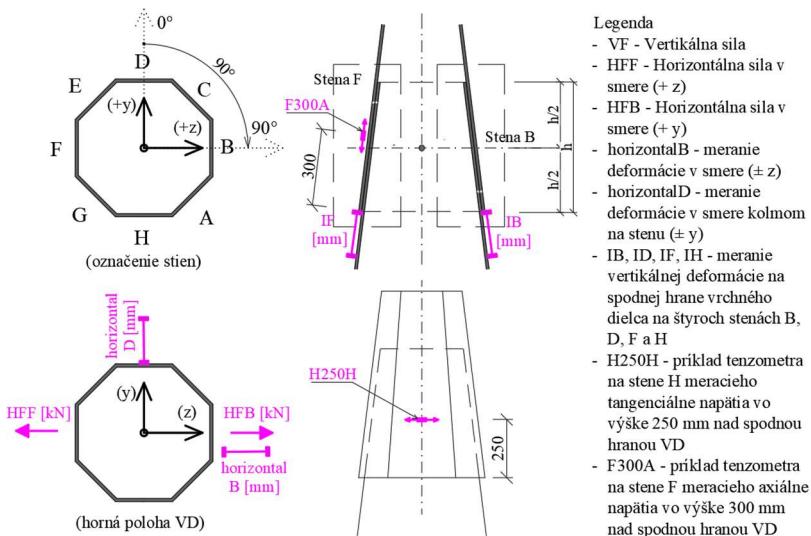
Obr. 3.5 Experiment 07



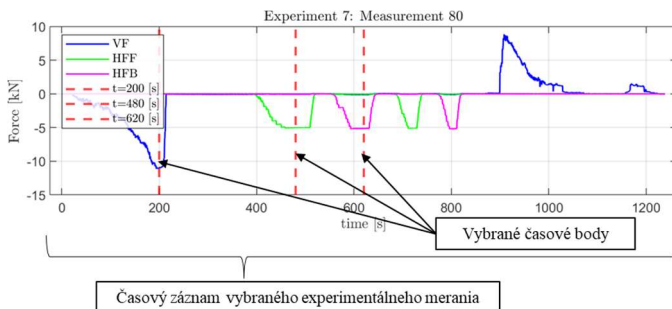
Obr. 3.6 Otláčenie vrchného dielca o spodný dielac na ľavej strane. Medzera medzi vrchným a spodným dielcom v mieste pozdĺžneho zvaru na pravej strane.

Merané dáta

V rámci zostavy vzoriek B sme uskutočnili celkovo 95 experimentálnych meraní, ktoré zahŕňali vzorky č. 03 až 08. Každé meranie zaznamenávalo konkrétnu záujmovú udalosť v čase, ako napríklad nasunutie alebo ohýbanie. Pred každým experimentálnym meraním sme vykonali vysunutie vrchného dielca a následné pomalé uloženie. Cieľom bolo eliminovať akékoľvek napätie pred spustením merania.

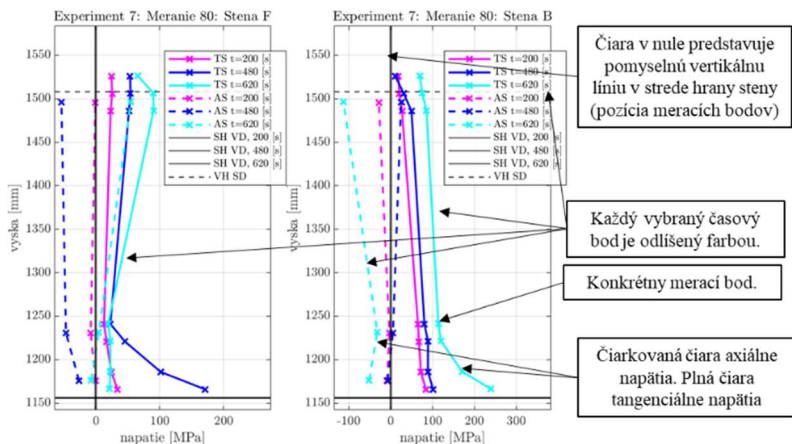


Obr. 3.7 Spôsob označenie meraných experimentálnych veličín.



Obr. 3.8 Príklad časového záznamu experimentálneho merania aplikovaných síl.

Spôsob vyhodnotenia dát prebiehal v časovom zázname, ako je zobrazené na Obr. 3.8, kde sme sledovali časový priebeh konkrétnych veličín pre jednotlivé experimentálne merania. Druhý spôsob vyhodnotenia sa realizoval vo vybraných časových bodoch, označených červenými čiarkovanými vertikálnymi čiarami na Obr. 3.8. Tieto dáta boli prezentované vo vertikálnom zobrazení, pričom vertikálna os predstavovala dĺžku nasúvaného spoja. Príklad takéhoto vyhodnotenia je uvedený na Obr. 3.9.



Obr. 3.9 Príklad prezentácie dát vo vybraných časových bodoch v rámci vybraného experimentálneho merania.

Experimentálne meranie je možné sumarizovať nasledovne:

- V procese nasúvania vznikali prevažne ťahové tangenciálne napätia.
- Všeobecné správanie pri ohybe nasúvaného spoja je naprieč experimentami rovnaké (dve protiľahlé zóny otláčenia).
- Rozdiely vo veľkosti napätí boli identifikované ako dôsledky imperfekcií.
- Merané napätie v rámci nasúvania 5 až 10 krát väčšie než očakávané hodnoty. Počas montáže dochádza k predopnutiu nasúvaného spoja.

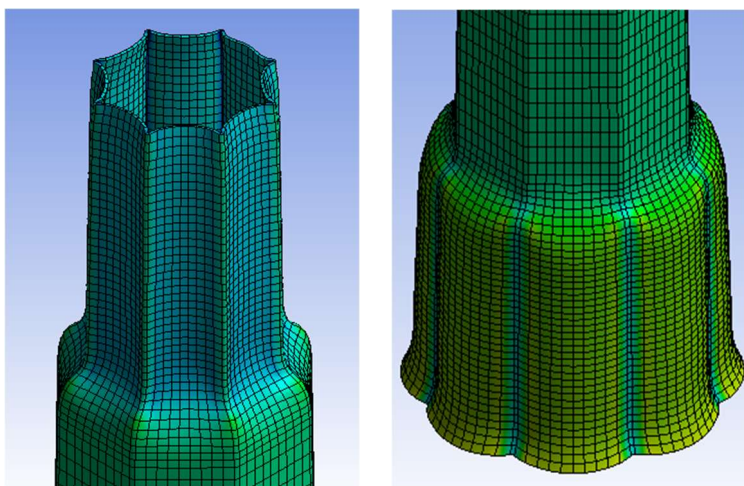
4. Numerický model

Numerický model bol vytvorený pomocou softvéru ANSYS 2019 [15]. Modelovaná geometria zahŕňa kompletnú geometriu experimentálnej vzorky. Výpočet

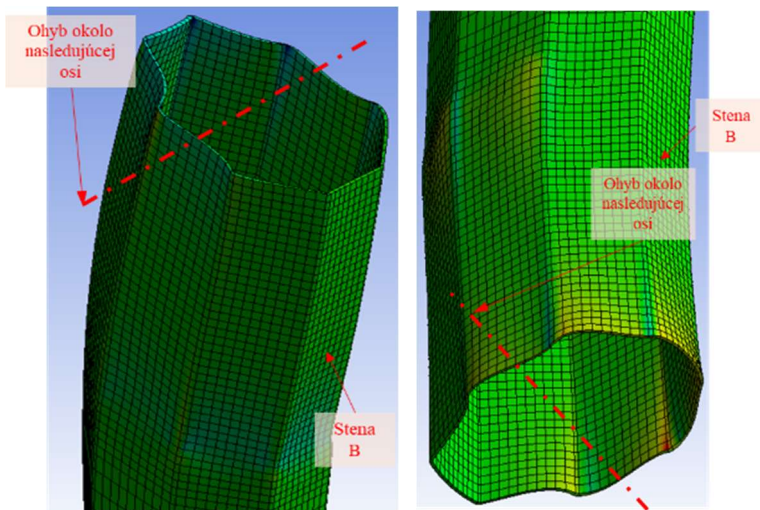
bol realizovaný prostredníctvom statickej analýzy s využitím nelineárneho riešenia s nesymerickou Newton-Raphsonovou metódou. Kontakt medzi vrchnou a spodnou časťou bol modelovaný ako trecí s koeficientom trenia 0,4 a s použitím kontaktného algoritmu Augmented Lagrange. Kontakt bol modelovaný ako ideálny bez geometrických medzier na rovných plochách polygonálneho prierezu. Geometrické medzery boli zohľadnené iba vo forme zaoblení, ktoré vznikajú rozdielnym polomerom zaoblenia medzi vonkajšou časťou spodného dielca a vnútornou časťou vrchného dielca. Prípadná požadovaná lokálna medzera (imperfekcia) medzi vrchným a spodným dielcom bola zohľadnená prostredníctvom matematickej medzery.

Aplikácia vertikálnej sily a horizontálne sily (ohýbanie)

Obr. 4.1 a Obr. 4.2 prezentujú výsledky z numerického ideálneho modelu pri zaťažení vertikálnou a horizontálnou silou. Obrázky prezentujú zväčšené deformácie.



Obr. 4.1 Deformácia v mierke $\times 10000$. Na ľavej strane je spodný dielce. Na pravej strane je horný dielce. Vertikálna sila $FV1 = 11 \text{ kN}$.



Obr. 4.2 Deformácia v mierke $\times 150$. Na ľavej strane spodný dielec. Na pravej strane horný dielec. Horizontálna sila $F_{H1} = 5,2 \text{ kN}$.

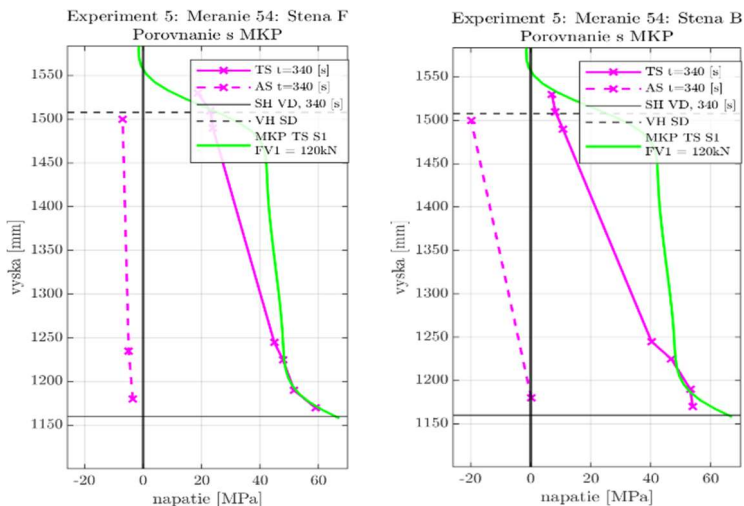
5. Verifikácia numerického modelu

Nasúvanie – pôsobenie vertikálnej sily

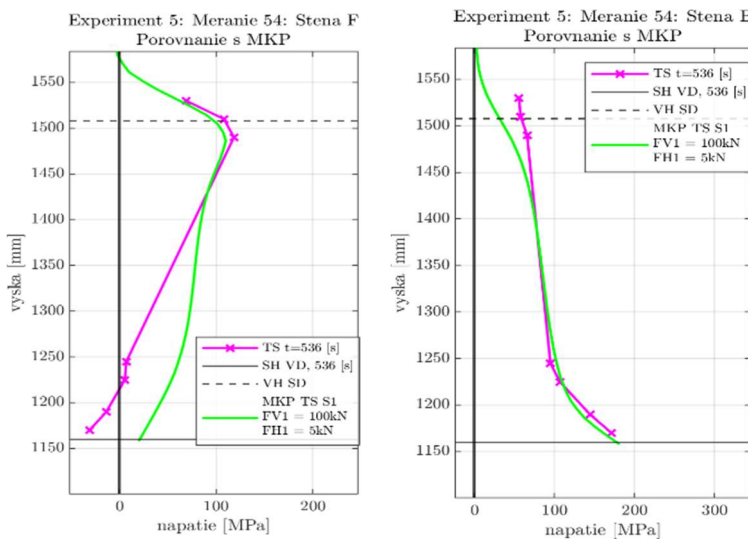
Obr. 5.1 prezentujú porovnanie medzi modifikovaným numerickými výsledkami (zelená farba) a experimentálnymi hodnotami (fialová farba) pri pôsobení vertikálnej sily na nasúvaný spoj. Modifikácia numerického modelu spočívala v zohľadnení 120 kN predpätia.

Ohybanie – pôsobenie horizontálnej sily

Obr. 5.2 prezentujú porovnanie medzi numerickými výsledkami (zelená farba) a experimentálnymi hodnotami (fialová farba) pri pôsobení horizontálnej sily na nasúvaný spoj. Modifikácia numerického modelu spočívala v zohľadnení predpätia rovné 120 kN a aplikáciou matematických medzier na steny „H“, „A“ a „B“.



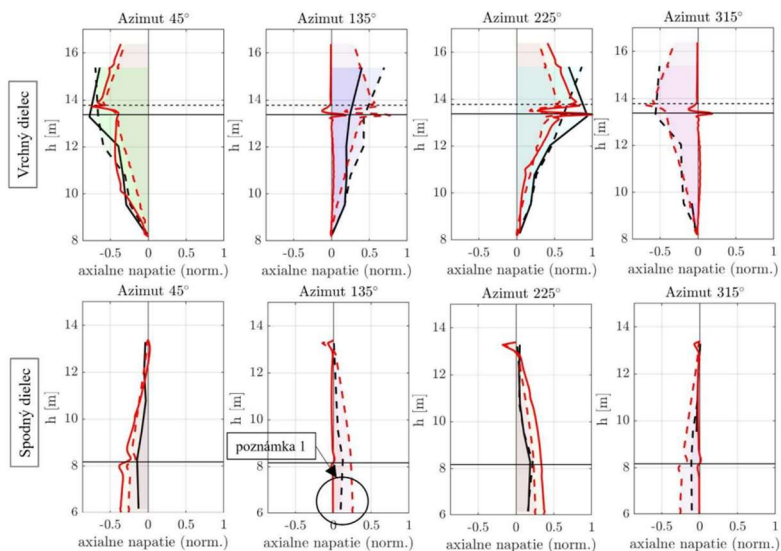
Obr. 5.1 Porovnanie medzi experimentálnymi výsledkami ($V_F = 11$ kN) a numerickým modelom ($FV1 = 120$ kN). Na pravej strane je stena F. Na ľavej strane je stena B.



Obr. 5.2 Porovnanie medzi experimentálnymi výsledkami ($HFB = 5,2$ kN) a numerickým modelom s imperfekciou (H a A s 1 mm a B s $0,5$ mm) ($FV1 = 120$ kN, $FH1 = 5,2$ kN). Na pravej strane je uvedená stena F. Na ľavej strane je uvedená stena B. Čas = 416 s.

Verifikácia numerického modelu na základe dát z veternej turbíny

Na Obr. 5.3 je prezentované porovnanie medzi numerickými výsledkami a experimentálnymi meraniami na veternej turbíne na mori. V tomto prípade sa jednalo o nasúvaný spoj s kruhovým prierezom. Keďže presné hodnoty zaťaženia nebolo známe hodnoty boli normalizované. Výsledky porovnania naznačujú rovnaký trend medzi experimentálnym modelom a numerickým modelom.



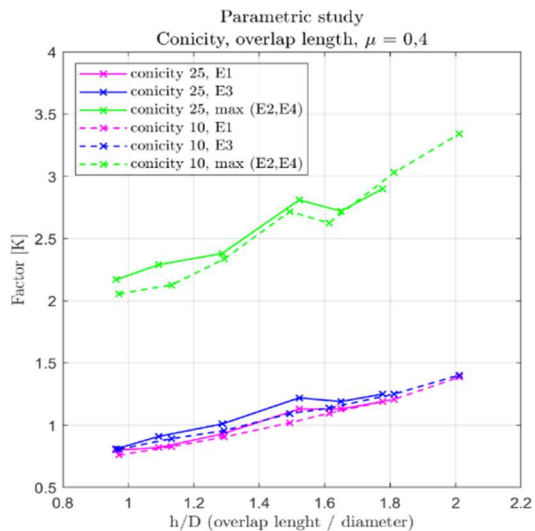
Obr. 5.3 Porovnanie medzi MKP modelom (červené krivky) a meranými hodnotami (čierné krivky)

Zhodnotenie

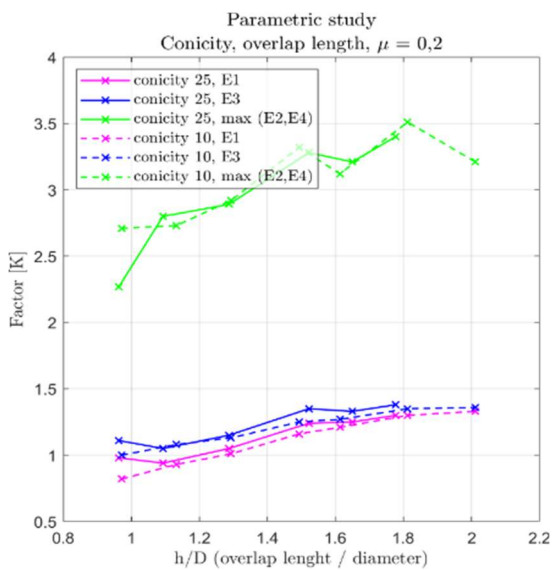
Na základe predchádzajúcich verifikačných krokov a ich výsledkov je možné konštatovať, že numerický model vytvorený na základe MKP je spoľahlivý a použiteľný pri ďalšom skúmaní a analýze nasúvaného spoja.

6. Aplikácia numerického modelu

Na základe overeného numerického modelu je vytvorená parametrická štúdia (Obr. 6.1 a Obr. 6.2) zohľadňujúca dĺžku nasunutia, konicitu a trenie. Parametrická štúdia je vyjadrená faktorom K , ktorý bol integrovaný do pôvodného analytického vzťahu (6.1).



Obr. 6.1 Parametrická štúdiá zohľadňujúca kónicitu a dĺžku nasunutia pre 8 uholníkový prierez s trením $\mu_s = 0,4$.



Obr. 6.2 Parametrická štúdiá zohľadňujúca kónicitu a dĺžku nasunutia pre 8 uholníkový prierez s trením $\mu_s = 0,2$.

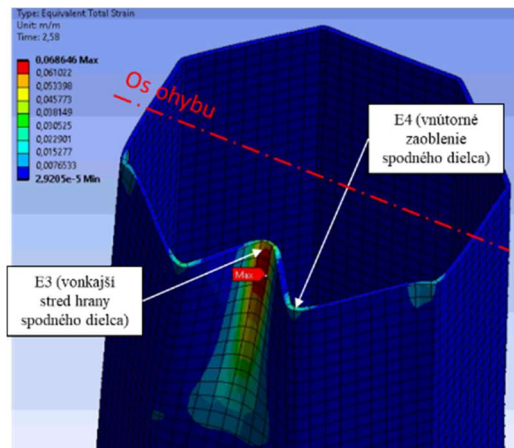
Parameter imperfekcie bol zohľadnený na základe experimentálnych meraní a je vyjadrený faktorom Ki s hodnotou 1,6 a následne integrovaný do (6.1) a vytvorený (6.2). To znamená, že experimentálny model osemuholníkového prierezu vykazoval priemerné napätie, ktoré bolo 1,6-krát väčšie v porovnaní s geometricky ideálnym verifikovaným numerickým modelom.

$$\sigma_t = K * \frac{3 * M_y}{t * h^2} \quad (6.1)$$

$$\sigma_t = Ki * K * \frac{3 * M_y}{t * h^2} \quad (6.2)$$

Plastické pretvorenie nasúvaného spoja

Z dôvodu laboratórnych možností sme v rámci experimentov zaťažovali vzorky tak, aby sa správali elasticky. V experimentálnom meraní nedochádzalo k plastickým pretvoreniam (porušeniu) materiálu. Verifikovaný numerický model nám umožňuje identifikovať takéto poškodenia prostredníctvom postupného zvyšovania zaťaženia.



Obr. 6.3 Pohľad na spodnú rúru. Označenie extrémnych polôh E3 a E4 pri 6,8% totálnej plastickej deformácii.

Na základe Obr. 6.3 k maximálnemu plasticckému pretvoreniu došlo na spodnom dieľci vo vrchnej polohe. Takýto spôsob „porušenia“ vznikol z dôvodu otláčenia vrchného dieľca o spodný dielec o steny "E" a "G". Toto otláčenie postupne zatláčalo stenu "F" do vnútra prierezu spodného dieľca.

7. Záver

Dizertačná práca sa zaoberala správaním nasúvaného spoja s osemuholníkovým prierezom. Výskum bol založený na kombinácii experimentálnych, numerických a analytických analýz, pričom cieľom práce bolo verifikovať numerický model, skúmať minimálnu dĺžku nasunutia, rozvíjať analytický prístup a analyzovať vplyv jednotlivých parametrov na nasúvaný spoj.

V práci bol vyvinutý a predstavený numerický model, ktorý je schopný správne simulovať správanie nasúvaného spoja. Tento model bol overený pomocou experimentálnych meraní z 8 rôznych experimentov, pričom sa zistilo, že numerický model sa zhoduje s experimentálnymi údajmi. Počas procesu verifikácie boli identifikované rôzne javy, ktoré podporujú zhodu medzi modelom a meraniami. Napríklad, miesta otláčenia experimentálnych dieľcov korešpondovali s miestami kontaktných napätí v numerickom modeli. Dôležitou modifikáciou numerického modelu bolo zahrnutie objektívnych (logických) imperfekcií v podobe medzier medzi spodným a vrchným dieľcom a aplikáciou prepätia. Táto modifikácia pomohla zlepšiť zhodu medzi numerickými výsledkami a experimentálnymi meraniami hodnotami.

Pri aplikácii geometrických imperfekcií sa zistilo, že nasúvaný spoj s osemuholníkovým prierezom je citlivý na tieto imperfekcie. Experimentálne vzorky ukázali výskyt medzier medzi stenami v mieste pozdĺžneho zvaru, čo spôsobovalo zväčšené lokálne napätia. V rámci práce bola navrhnutá metóda na zohľadnenie týchto imperfekcií v nasúvanom spoji, a to pomocou tolerancií pre oceľové rúry na základe ktorých je možné stanoviť maximálne imperfekcie nasúvaného spoja.

V rámci práce bola tiež predstavená parametrická štúdia, ktorá bola integrovaná do existujúcich analytických vzťahov prostredníctvom faktora, ktorý zohľadňuje konkrétne parametre. Na základe tejto štúdie, vypracovanej na základe overeného numerického modelu, je možné určiť napätie v nasúvanom spoji v závislosti od rôznych parametrov. Táto štúdia poskytuje jednak čitateľom jednoduchý výpočet rovnomerného („uniformného“) napätia v nasúvanom spoji a tiež umožňuje odhaliť extrémne („špičkové“) hodnoty napätia v rámci celého spoja.

Experimentálne merania poskytli množstvo užitočných poznatkov pre prípadné ďalšie štúdie. Navrhnutý experimentálny postup umožnil opakované vysúvanie vrchného dielca, čo odhalilo významné montážne napätie (od 20 MPa do 80 MPa) v nasúvanom spoji pri nasúvaní vrchného dielca. Toto napätie je viacnásobne vyššie ako vypočítané napätie z maximálnej dosiahnutej sily pri nasúvaní. Predpokladá sa, že toto napätie je spôsobené imperfekciami, ktoré sa musia prekonať počas procesu nasúvania. Toto napätie ovplyvňuje akékoľvek nasledujúce merania, a preto je dôležité zohľadniť ho pri akejkolvek analýze. Aplikácia tohto napätia (prepätie) do numerického modelu výrazne prispela k zlepšeniu presnosti modelu.

7.1. Odporúčanie pre ďalší výskum v tejto oblasti

V ďalšom výskume v tejto oblasti sa odporúča využiť verifikovaný numerický model na ďalšie skúmanie vplyvov jednotlivých parametrov. Napríklad, je možné skúmať iný počet hrán polygonálneho prierezu alebo overiť iný pomer medzi priemerom dielca a hrúbkou steny. V rámci numerickej analýzy sa odporúča pristúpiť k explicitnému riešeniu, aby bolo možné zachytiť správanie nasúvaného spoja, napríklad v procese "stick-slip" efektu.

Je tiež odporúčané zistiť, pri akom počte hrán mnohouholníkového prierezu sa nasúvaný spoj začne správať podobne ako nasúvaný spoj s kruhovým prierezom.

Nadviazanie na predstavený spôsob zohľadnenia imperfekcií je ďalším odporúčaním. Je potrebné definovať maximálnu povolenú imperfekciu a zahrnúť ju do numerického modelu. Z niektorých nepublikovaných výsledkov vyplýva, že pri určitej veľkosti imperfekcie vo forme medzery medzi stenami už vplyv imperfekcie nerastie. Je vhodné overiť a potvrdiť toto správanie. Odporúča sa tiež zohľadniť imperfekcie v nasúvanom spoji s kruhovým prierezom a overiť tvrdenie, že kruhový prierez vykazuje menšie lokálne napätia.

Výskum v oblasti aplikácie montážneho predpätia naznačuje, že toto napätie neprispieva k maximálnym napätiam v spoji. Skôr zväčšuje napätia v miestach s minimálnymi hodnotami. Ak by sa tento predpoklad potvrdil, mohlo by sa tvrdiť, že montážne napätia v nasúvanom spoji sú síce významné, ale neprispievajú k maximálnemu napätiu v spoji.

7.2. Odporúčanie pre inžiniersku prax

V kontexte oceľových stožiarov sa nasúvaný spoj odporúča ako vhodná metóda spájania. Pri návrhu nasúvaného spoja s mnohouholníkovým prierezom je dôležité venovať pozornosť výrobnému procesu, pretože nedokonalosti v spoji majú významný vplyv na jeho správanie a výsledné napätie. V porovnaní s kruhovými prierezmi, kde nedochádza k takým rozsiahlym lokálnym kontaktom, nie je požiadavka na výrobnú kvalitu taká významná.

Výskum ukazuje, že je možné navrhovať nasúvaný spoj aj s kratšou dĺžkou nasunutia než je predpísaný 1,5-násobok priemeru dielca. Toto je možné realizovať na základe prezentovanej parametrickej štúdie, ktorá bola vypracovaná na základe overeného numerického modelu. Parametrická štúdia umožňuje zohľadniť dĺžku nasunutia, kónicitu, súčiniteľ trenia a imperfekcie. Avšak skracovanie dĺžky nasunutia sa odporúča len v prípade, keď nedochádza k 100% ohybovému využitiu prierezu nad alebo pod nasúvaným spojom. Skracovaním dĺžky nasunutia sa pomerne zväčšuje kontaktná plocha, čo je pozitívnym faktorom, ako je uvedené v predstavenej parametrickej štúdii.

Numerické výsledky naznačujú, že v nasúvanom spoji s polygonálnym prierezom síce dochádza k prvotným lokálnymi elastickým a plastickým deformáciám. Avšak, pri dĺžke nasunutia 1,5-násobku priemeru dielca k porušeniu (dosiahnutie 5% plastického pretvorenia) došlo mimo oblasť nasúvaného spoja. Toto zistenie naznačuje istú odolnosť nasúvaného spoja vzhľadom na spolupôsobenie vonkajšej a vnútornej rúry pri plastických deformáciách.

Celkovo možno konštatovať, že na základe dlhoročného bezproblémového správania a výsledkov experimentálnych meraní je možné širšie využívať nasúvaný spoj. Na jeho návrh je možné použiť overený numerický model a prezentovanú parametrickú štúdiu. Tieto výsledky poskytujú dôveryhodné informácie a užitočné poznatky pre inžinierov pri optimalizácii návrhu nasúvaných spojov v rôznych konštrukciách.

Literatúra

- [1] VAN DER TEMPEL, J a B IJtje SCHIPHOLT. The Slip-Joint Connection Alternative connection between pile and tower. *Dowec*. 2003, 17.

- [2] SLOCUM, Richard a Mark FAIRBAIRN. Slip Joints Connections – How Do These Things Work? *Electrical Transmission and Substation Structures 2015*. 2015, 363–374.
- [3] KAMPHUIS, T,P, J. *Design, testing and verification of the DOT500 slip-joint support structure*. B.m., 2016. Delft University of Technology.
- [4] SEGEREN, M. L.A. a K. W. HERMANS. Experimental investigation of the dynamic installation of a slip joint connection between the monopile and tower of an offshore wind turbine. In: *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2014, s. 817–827. ISSN 17426596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/524/1/012080
- [5] SUN, Junzi. *Open Aircraft Performance Modeling Based on an Analysis of Aircraft Surveillance Data* [online]. B.m., 2019. b.n. Dostupné z: doi:10.4233/uuid
- [6] SEGEREN, Maxim L.A., Eliz Mari LOURENS, Apostolos TSOUVALAS a Tjeerd J.J. VAN DER ZEE. Investigation of a slip joint connection between the monopile and the tower of an offshore wind turbine. In: *IET Renewable Power Generation* [online]. 2014, s. 1964–1972. ISSN 17521424. Dostupné z: doi:10.1049/iet-rpg.2013.0163
- [7] THAKOR, Sawan. *Numerical validation of experimental modal analysis of a Slip-joint connection in offshore wind turbine* [online]. B.m., 2019 [vid. 2023-06-19]. b.n. Dostupné z: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:65d20d6e-7abc-4f69-ba7d-f5267e8291e6?collection=education>
- [8] RECKÝ, Jozef. *Teoretické a konštrukčné problémy ocelových stožiarov* [online]. B.m., 2012. Slovenská technická univerzita v Bratislave. Dostupné z: doi:SvF - 10935- 4286
- [9] BOTLÓ, Michal. *Nasúvané spoje ohraňovaných stožiarov* [online]. B.m., 2017. Slovenská technická univerzita v Bratislave. Dostupné z: doi:SvF-13420-50559
- [10] BOTLO, Michal. SLIP-JOINT CONNECTION OF CONICAL TOWER SEGMENTS - EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS. In: [online]. 2017. Dostupné z: doi:10.5593/sgem2017H/63/S26.082

- [11] BRODNIANSKY, J., J. BRODNIANSKY, J. RECKÝ, M. MAGURA, T. KLAS a M. BOTLÓ. Slip joint connection of conical towers subjected to bending and torsion. In: *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III* [online]. B.m.: CRC Press, 2019, s. 55–60. Dostupné z: doi:10.1201/9780429021596-9
- [12] STN EN 1090-2 *Execution of steel structures and aluminium structures Part 2: Technical requirements for steel structures*
- [13] STN EN 40-2 *Lighting columns Part 2: General requirements and dimensions*. 1982
- [14] EN-10217-7: *European Norm for Welded Steel Tube for Pressure Purposes - Part 7: Stainless steel tubes*
- [15] ANSYS ONLINE HELP. *ANSYS Inc.* [online]. Dostupné z: <http://www.https://ansyshelp.ansys.com>

Publikácie autora relevantné k práci

Mojto, M.: Vplyv násuvnej dĺžky na nasúvaný spoj. V: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2020, s. 477–483. ISBN 978-80-227-5052-3

Mojto, M.: Parameter dĺžky nasunutia na nasúvaný spoj. V: *Juniorstav 2021: zborník príspevků*. 23. odborná konferencia doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno, ČR: ECON publishing, 2021, s.255-260, ISBN 978-80-86433-75-2

Mojto, M. – Brodniansky J. – prof. Brodniansky J. – Recký J. – Tillinger M.: Modelling and experimental tests of spatial structure focused on slip joints. V: *INSPIRING THE NEXT GENERATION, The 7th International Conference on Spatial Structures and the Annual Symposium of the IASS*, 2021, s.1989-1997, ISBN 978-1-7399393-3-5, [online]

Mojto, M. – Brodniansky J. – prof. Brodniansky J.: The effect of manufacturing imperfections in the slip joints, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2022, 1252(1), 012026. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1252/1/012026

Mojto, M.: Vplyv kónicity na nasúvaný spoj. structures.sk. Navrhovanie, posudzovanie, realizácia a obnova nosných konštrukcií [elektronický dokument] – ISSN 2644-6553. – Roč. 2, č. 1 (2020), s. 18-21 [online]

Mojto, M. – Brodniansky, J.: Vyhodnotenie imperfekcií oceľových rúr použitých v nasúvanom spoji. V: structures.sk. Navrhovanie, posudzovanie, realizácia a obnova nosných konštrukcií. Stupava (Slovensko): ISSN 2644-6553. – Roč. 3, č. 2 (2021), s. 58-63

Mojto, M. – Brodniansky J. – Klas, T.: Imperfekcie na rúrach v nasúvanom spoji. V: TZB-info [elektronický dokument] : odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov. – Praha (Česko) : Topinfo. – ISSN (online) 1801-4399. – Roč. 24, č. 20 (2022), s. 1-10

Mojto, M.: Výrobné imperfekcie v nasúvanom spoji. V: Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering. Bratislava: Spektrum STU, 2021, s. 463--470. ISBN 978-80-227-5150-6

Mojto, M. Brodniansky J. – prof. Brodniansky J. – Recký J.: Experimentálne skúšanie nasúvaného spoja - zaťaženie nasúvaním. V: Moderné trendy v navrhovaní konštrukcií z ocele, dreva, betónu a skla: 45. celoštátny aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií sa zahraničnou účasťou pri príležitosti 80. výročia Katedry kovových a drevených konštrukcií SvF STU v Bratislave. Kočovce, Slovensko: vyd. – Stupava (Slovensko) : structureSS, 2022, s. 197-206. ISBN 978-80-974153-1-0

Mojto, M.: Simulácia nasúvaného spoja použitého vo veternej turbíne. V: Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering. Bratislava: Spektrum STU, 2022, s. 482-489. ISBN 978-80-227-5251-0

Mojto, M. Brodniansky J. Klas T.: Experimentálne skúšanie nasúvaného spoja - vplyv dĺžky Nasunutia. V: Zbierka prednášok: 46. Aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií. Oščadnica, Slovensko: vyd. – EDIS - Vydavateľstvo UNIZA v roku 2023, 2023, s. 191-199. 978-80-554-1967-1