



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV KOVOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF METAL AND TIMBER STRUCTURES

**KLOPENÍ TENKOSTĚNNÝCH OCELOVÝCH NOSNÍKŮ
S VAZBAMI VYBOČENÍ Z ROVINY OHYBU**

LATERAL-TORSIONAL BUCKLING OF STEEL BEAMS WITH RESTRAINTS OUT OF BENDING
PLANE

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS SUMMARY

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ivan Balázs

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JINDŘICH MELCHER, DrSc.

BRNO 2017

OBSAH

1. ÚVOD	3
2. CHARAKTERISTIKA TENKOSTĚNNÉHO PRUTU	3
3. STABILITA KOVOVÝCH PRUTŮ	4
3.1 Ideální ohýbaný nosník bez vazeb proti vybočení z roviny ohybu a kroucení.....	4
3.2 Ideální ohýbaný nosník s vazbami proti vybočení z roviny ohybu a kroucení	5
3.3 Skutečný ohýbaný nosník s nahodilými odchylkami	5
3.4 Stabilita tenkostěnných za studena tvarovaných profilů	6
4. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V PROBLEMATICE STABILIZACE NOSNÍKŮ PLOŠNÝMI PRVKY	6
5. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	11
6. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘOVÁNÍ.....	12
6.1 Zkušební sestavy.....	12
6.2 Rotační podepření bez vlivu plošného zatížení na panely.....	13
6.3 Rotační podepření s vlivem plošného zatížení na panely.....	16
6.4 Srovnání experimentálně určených hodnot	20
7. NUMERICKÁ ANALÝZA.....	21
8. ZÁVĚR.....	23
SEZNAM VYBRANÝCH POUŽITÝCH ZDROJŮ	25
ŽIVOTOPIS.....	27
VYBRANÉ PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA	28
ABSTRACT	29

1. ÚVOD

Využívání kovových prutů tenkostěnného průřezu ve stavebnictví umožňuje navrhovat lehké a efektivní konstrukce. Tyto průřezy jsou však náchylné k problémům stability a jejich odolnost může být nižší než při elementárním výpočtu prosté únosnosti. Obsáhlá problematika stability zahrnuje jednak problémy globální stability prutu (ztráta stability při tlaku či ohybu charakterizovaná štíhlostí prutu jako celku) a jednak problémy lokální v důsledku vysoké štíhlosti stěn tenkostěnného průřezu (boulení). Není-li ztráta stability konstrukčně zabráněno, nebo pokud štíhlost není dostatečně nízká, mají být problémy možné ztráty stability vždy zahrnuty ve statickém výpočtu.

Ve stavební praxi se setkáváme s případy, kdy jsou ke kovovým prutům tenkostěnného průřezu připojeny plošné prvky (např. opláštění). Tyto prvky tvoří pro prut vazby proti posunutí a natočení, které do jisté míry nebo plně brání přetvoření průřezu. Správné zohlednění vlivu těchto prvků může vést k hospodárnějšímu a efektivnějšímu návrhu průřezu. Tato práce se blíže zaměří na ohýbané kovové pruty tenkostěnného průřezu s příčnými a rotačními vazbami proti vybočení z roviny ohybu a kroucení.

2. CHARAKTERISTIKA TENKOSTĚNNÉHO PRUTU

Technologický pokrok ve zpracování kovů a produkci kovových výrobků v 19. a 20. století umožnil snížit hmotnost konstrukčních prvků využitím štíhlejších průřezů, resp. průřezů, které jsou složeny z několika relativně tenkých částí. Chování těchto průřezů se však v mnoha ohledech liší od průřezů masivních. To později vedlo k rozpracování rozsáhlé teorie tenkostěnných prutů, která zavedla základní předpoklady a metody výpočtu. Z hlediska teorie konstrukcí hovoříme o prutu jako o prvku, jehož jeden rozměr (délka) je řádově větší, než zbývající dva (šířka, výška) [1]. V případě, že se prut skládá z několika spolupůsobících prvků (stěn), jejichž tloušťka je řádově nižší než šířka, nazýváme jej tenkostěnný. Za tenkostěnný prut lze považovat takový prvek, pro který je splněna podmínka (2.1) [2], kde t je tloušťka stěny, h je charakteristický rozměr příčného řezu (šířka nebo výška) a l je délka.

$$t : h : l \leq 1 : 10 : 100. \quad (2.1)$$

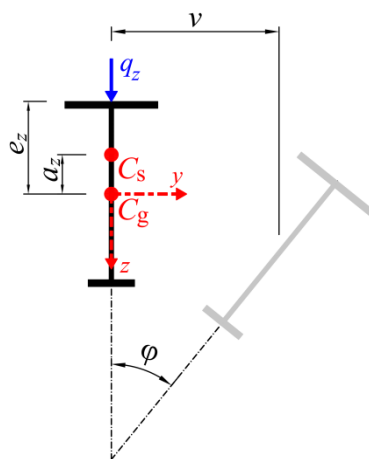
Na základě tvaru střednice průřezu rozeznáváme tenkostěnné pruty s otevřeným a uzavřeným průřezem. Pruty tenkostěnného průřezu mohou být vyrobeny válcováním za tepla, tvarováním za studena nebo mohou být svařeny z dílčích stěn, obvykle rovinných.

3. STABILITA KOVOVÝCH PRUTŮ

Vysoká pevnost kovů jako konstrukčních materiálů dovoluje významně snížit průřezovou plochu prvků, případně vytvořit průřez tenkostěnný, který se skládá z několika dílčích částí o tloušťce řádově menší, než ostatní rozměry. Takové zvyšování *štíhlosti* kovových prutů je spojeno také s jistými problémy, se kterými se u prutů masivních nesetkáváme. Únosnost štíhlých prutů je totiž zpravidla nižší, než únosnost, kterou bychom získali podle elementární teorie. Hovoříme o problémech vzpěrné odolnosti.

3.1 Ideální ohýbaný nosník bez vazeb proti vybočení z roviny ohybu a kroucení

U štíhlých ohýbaných prutů, které nejsou po délce zajištěny spojitými nebo diskrétními příčnými vazbami, se setkáváme s jevem, kdy jejich únosnost není limitována vyčerpáním plné únosnosti v prostém ohybu, nýbrž ztrátou stability celkovým nadměrným prostorovým přetvořením prutu z roviny ohybu – ztrátou příčné a torzní stability (klopením) [3]. JeV je charakterizován posunutím průřezu v rovině kolmé na rovinu ohybu současně s natočením. Ztráta stability ideálního ohýbaného nosníku nastává při dosažení kritického momentu M_{cr} . Situace je ilustrativně znázorněna na Obr. 3.1. Celková prostorová deformace průřezu má dvě složky: příčné posunutí v a úhel natočení (zkroucení) φ . Vybočení z roviny prvotního ohybu a pootočení prutu je na obrázku naznačeno.



Obr. 3.1 Ztráta příčné a torzní stability ideálního nosníku – příčný řez

Problém stability ohýbaného nosníku řešil již na konci 19. století Prandtl [4]. Významný je příspěvek Vlasova [1], který vypracoval obecnou teorii tenkostěnných prutů. Vlasov odvodil diferenciální rovnice stability libovolného tenkostěnného prutu otevřeného

průřezu namáhaného ohybem a osovou silou. Pro prut namáhaný pouze ohybem v rovině XZ je problém definován pomocí homogenních diferenciálních rovnic (3.1) a (3.2), kterým náleží okrajové podmínky dle způsobu uložení:

$$E \cdot I_z \cdot v^{IV} + (M_y \cdot \varphi)'' = 0, \quad (3.1)$$

$$E \cdot I_\omega \cdot \varphi^{IV} + \left[(-2 \cdot b_z \cdot M_y - G \cdot I_t) \cdot \varphi' \right]' + [q_z \cdot (e_z - a_z)] \cdot \varphi + M_y \cdot v'' = 0, \quad (3.2)$$

kde E je modul pružnosti v tahu a tlaku, G modul pružnosti ve smyku, I_z moment setrvačnosti průřezu k ose z , I_ω výsečový moment setrvačnosti, I_t moment setrvačnosti v prostém kroucení, q_z příčné zatížení, M_y ohybový moment, v a φ neznámé funkce přetvoření po délce nosníku a b_z je tzv. charakteristická úsečka. V československé literatuře byla teorie tenkostěnných prutů rozvíjena např. prostřednictvím Březiny [3], Mrázika [5], Melchera [6], Baláže [7]. Kritický moment M_{cr} je dán řešením vlastní hodnoty diferenciálních rovnic (3.1) a (3.2) a lze odvodit variační metodou [1]. Vztah pro výpočet kritického momentu nosníků alespoň jednoose symetrických průřezů je uveden také v národní příloze normy [8].

3.2 Ideální ohýbaný nosník s vazbami proti vybočení z roviny ohybu a kroucení

V praxi se často setkáváme s případy, kdy k průřezu tenkostěnného nosníku jsou v úseku mezi jeho podporami připojeny další prvky, ať už to jsou jiné nosníky nebo prvky plošného charakteru. Připojením dalších prutových nebo plošných prvků je určitým způsobem omezeno přetvoření daného nosníku a tím může být příznivě ovlivněna jeho vzpěrná odolnost. Diskrétní nebo spojitá vazba může poskytnout úplné nebo částečné podepření proti příčnému posunutí a proti natočení průřezu. Příčné podepření je charakterizováno určitou hodnotou smykové tuhosti S poskytnuté plošným prvkem a rotační podepření je charakterizováno určitou hodnotou rotační tuhosti C_D . V normě pro navrhování ocelových konstrukcí [8] se spojitým podepřením nosníků plošnými profily zabývá příloha BB, která uvádí hodnoty minimální požadované smykové a rotační tuhostí pro plné příčné a rotační podepření.

3.3 Skutečný ohýbaný nosník s nahodilými odchylkami

V částech 3.1 a 3.2 byl popsán problém příčné a torzní stability ideálního ohýbaného prutu, kdy ztráta stability nastane při dosažení kritického zatížení. Skutečný nosník se vyznačuje počátečními odchylkami (imperfekcemi), které výrazně snižují jeho odolnost.

Vzhledem k imperfekcím se skutečný nosník deformuje již od počátku zatěžování a rozdělení rovnováhy ve smyslu ideálního prutu nenastává. Jedná se o přechod od ideálního nosníku popsaného problémem vlastní hodnoty (kritického zatížení) ke skutečnému, kdy je řešen problém jeho pevnosti. S ohledem na složitost zohlednění všech imperfekcí lze všechny imperfekce nahradit pouze jedinou, a to počátečním zakřivením osy prutu. Pro tvar počátečního zakřivení je možné použít první vlastní tvar. Programové systémy pro výpočty konstrukcí zpravidla umožňují modifikovat původní geometrii konstrukce podle výsledků analýzy vlastních tvarů s ohledem na zadanou amplitudu počátečního zakřivení. Po tomto kroku je již možný geometricky, příp. geometricky a materiálově nelineární výpočet imperfektní konstrukce a pevnostní posouzení [9]. Posouzení ohýbaných prutů podle normy [8] je možné provést výpočtem vnitřních sil podle teorie I. řádu a imperfekce zohlednit pomocí redukčního součinitele klopení.

3.4 Stabilita tenkostěnných za studena tvarovaných profilů

Snaha o co největší hospodárnost vede ke snižování tloušťky konstrukčních prvků. Tvarováním za studena lze vyrobit profily, jejichž tloušťka může být i menší než 1 mm. Tato technologie byla výjimečně využita již v 19. století, největší rozmach nastal ve 20. století, kdy se tyto profily začaly rutinně využívat [10]. Jejich výroba spočívá v lisování plechů na ohraňovacích lisech, válcování za studena, příp. tažení za studena [10]. Za studena tvarované profily jsou v pozemním stavitelství obvykle využity jako vaznice, pažďíky nebo prvky opláštění. Při statickém řešení je nutno vzít v úvahu některé jevy vyplývající ze štíhlosti tenkých stěn a netuhosti příčného řezu (lokální a distorzní boulení). Postupy pro zavedení těchto jevů do výpočtu jsou v aktuálních normách.

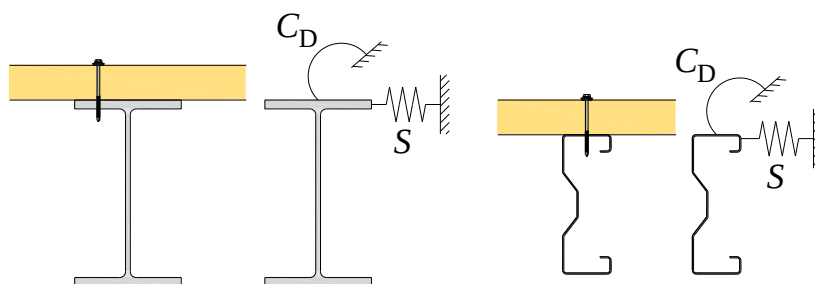


Obr. 3.2 Příklady profilů tvarovaných za studena

4. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V PROBLEMATICE STABILIZACE NOSNÍKŮ PLOŠNÝMI PRVKY

Plošné prvky střešního nebo stěnového opláštění jsou často uloženy na nosnících tenkostěnného průřezu – vaznicích nebo pažďících. Plošné prvky mohou být zastoupeny např.

trapézovými plechy, sendvičovými izolačními panely nebo jinými obdobnými profily, které jsou připojeny k tenkostěnnému nosníku a tvoří pro něj vazbu proti příčnému posunutí a proti natočení. Přetvoření nosníku je plně nebo částečně zabráněno prostřednictvím určité smykové tuhosti S a rotační tuhosti C_D zajištěné plošným profilem. Z praktického hlediska lze zpravidla uvažovat, že uložení prvků opláštění zabraňuje příčnému posunutí nosníku ve směru střednicové roviny plošných prvků [6]. Příklad ztráty stability prutů tuze příčně podepřených v přímce rovnoběžné s osou prutu byl teoreticky rozpracován Vlasovem [1], obdobnému problému se věnoval i Březina [3]. Postupy pro navrhování jsou vyloženy např. v práci [6].



Obr. 4.1 Vazby proti příčnému posunutí a natočení průřezu

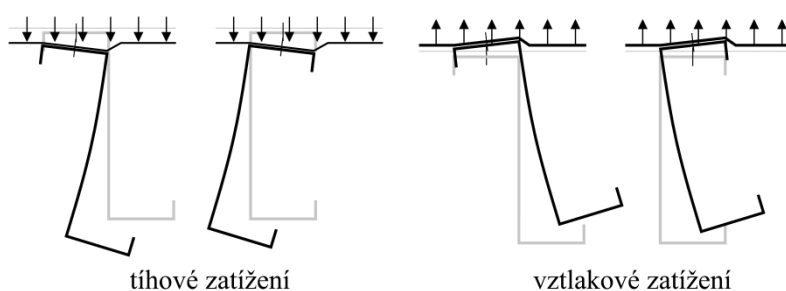
Plošné prvky připojené k tenkostěnnému nosníku (nejčastěji k jeho pásnici) mohou v obecném případě poskytovat úplné nebo částečné podepření proti posunutí průřezu i proti jeho natočení. V případě úplného podepření není třeba redukovat odolnost nosníku s ohledem na stabilitní problémy. Při částečném podepření je třeba uvažovat s možnou ztrátou stability, avšak hodnota kritického momentu M_{cr} je vyšší než v případě nosníku bez příčného podepření. Podepření proti posunutí je zajištěno určitou smykovou tuhostí plošných profilů, podepření proti natočení je zajištěno rotační tuhostí. Na skutečné chování těchto systémů má vliv řada faktorů, jako např. charakteristiky spojovacích prostředků a plošných prvků, způsob přenosu zatížení do nosníku, ohybová tuhost plošných prvků a další [6]. Vliv některých z nich může být vyhodnocen pomocí experimentů, případně numerické analýzy.

Problematika stabilizace tenkostěnných nosníků plošnými prvky byla a je řešena na řadě tuzemských i zahraničních výzkumných pracovištích. Na Technické univerzitě v Berlíně se touto problematikou zabývá např. Lindner. V příspěvku [11] podává základní výpočetní postupy pro započítání vlivu příčného podepření a odkazuje na řadu starších zdrojů a prací zabývajících se touto problematikou. Určení pružného kritického pružného momentu pro nosníky s plným příčným podepřením a rotačním podepřením o určité rotační tuhosti se věnuje např. příspěvek [12]. Vztah pro pružný kritický moment, který bere v potaz i smykovou a rotační tuhost zajištěnou plošnými profily, lze nalézt v příspěvku [13].

Rotačnímu podepření za studena tvarovaných vaznic trapézovými plechy jsou věnovány příspěvky [14] a [15], avšak nezohledňují vnější zatížení působící na povrch plechů.

Obecně lze konstatovat, že po stránce teoretické je zavedení příčného a rotačního podepření kovového tenkostěnného nosníku pokryto množstvím výzkumů. Otázkou však může být stanovení hodnot smykových a rotačních tuhostí pro různé typy plošných prvků.

Norma [16] obsahuje ustanovení pro nosníky příčně a rotačně stabilizované plošnými profily připojenými k jedné pásnici nosníku. Jejich aplikace je omezena na nosníky příčného řezu tvaru Z, C, Σ , U a kloboukového příčného řezu. Příčné podepření je realizováno prostřednictvím smykové tuhosti S a rotační pomocí rotační tuhosti C_D poskytnuté plošným prvkem. Pro příčné podepření uvádí norma [16] podmínku pro minimální hodnotu smykové tuhosti S zajištěné plošným prvkem. Přestože je primárně uvažováno s příčným podepřením prostřednictvím trapézových plechů, lze uvedenou podmínku použít i pro jiné typy plošných prvků. Vztah pro výpočet smykové tuhosti trapézového plechu norma přímo uvádí; pro jiné plošné prvky je uživatel odkázán na odbornou literaturu, případně zkoušky.

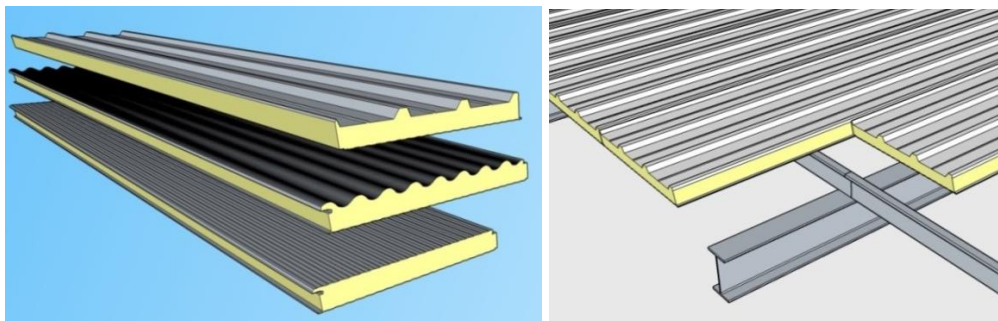


Obr. 4.2 Chování tenkostěnných nosníků při zatížení (podle [16])

Připojené plošné prvky mohou být zatíženy tíhovým nebo vztlakovým zatížením, která jsou přenášena do tenkostěnných nosníků. Chování nosníků pod tíhovým a vztlakovým zatížením znázorňuje Obr. 4.2 (podle [16]). Protože vektor zatížení obecně neprochází středem smyku průřezu, je nosník kromě ohybu v rovině namáhaný také kroucením a příčným ohybem. Podrobněji se vlivu orientace vnějšího zatížení působícího na plošné prvky na rotační podepření za studena tvarovaných profilů věnoval Vraný [17]. Uvádí, že tíhové zatížení obecně vede ke vzrůstu hodnoty rotační tuhosti, zatímco vztlakové k její redukci.

V současné době se uplatňuje použití sendvičových panelů coby střešních i stěnových plášťů uložených na pásnicích kovových nosníků (vaznic, paždíků). Skládají se z tenkých plechů a z izolačního jádra. Vybrané průřezy panelů a znázornění jejich možného uložení na kovových tenkostěnných vaznicích je na Obr. 4.3. Možnosti využití stabilizujícího vlivu sendvičových panelů na kovové nosníky byly a jsou předmětem výzkumů na řadě pracovišť.

Článek [18] shrnuje současný stav poznání a vysvětluje principy stabilizujícího účinku panelů. Je rozebrán případ plného i částečného příčného podepření. Pro zohlednění příčného podepření je nezbytná znalost hodnoty smykové tuhosti poskytnuté sendvičovými panely (obdobně pro rotační podepření je nutno znát hodnotu rotační tuhosti).



Obr. 4.3 Příklady sendvičových panelů a jejich uložení na konstrukci

Rozsáhlý teoretický i experimentální výzkum zaměřený na sendvičové panely probíhal v rámci projektu EASIE na Univerzitě Karlsruhe. V jeho rámci byla analyzována i stabilizace nosníků válcovaného průřezu sendvičovými panely, výsledky byly shrnuty v závěrečných zprávách (např. [19]) a publikovány v odborných časopisech.

Důležitým zdrojem je dokument [20], který podává postupy pro navrhování ocelových nosníků stabilizovaných sendvičovými panely a poskytuje informace, které nejsou obsaženy v normách pro navrhování ocelových konstrukcí. Podle tohoto dokumentu je možno smykovou tuhost poskytnutou sendvičovým panelem využít pro všechny typy průřezů (válcované, za studena tvarované), a to jak při zatížení tlakem, tak sáním působícím na sendvičové panely.

Rotační podepření je charakterizováno určitou hodnotou rotační tuhosti C_D . Její hodnota je ovlivněna tuhostí připojení nosníku a plošného prvku, tuhosti odpovídající ohybové tuhosti plošného prvku a tuhostí vyplývající z distorze příčného řezu nosníku [16]. V obecném případě je rotační tuhost ovlivněna i vnějším zatížením působícím na plošné prvky [17]. Norma [16] uvádí vztah pro hledanou hodnotu rotační tuhosti (4.1):

$$\frac{1}{C_D} = \frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,B}} + \frac{1}{C_{D,C}}. \quad (4.1)$$

V tomto vztahu značí $C_{D,A}$ rotační tuhost spojení mezi plošným prvkem a nosníkem, $C_{D,B}$ značí rotační tuhost vyvozenou distorzí příčného řezu nosníku a $C_{D,C}$ značí rotační tuhost odpovídající ohybové tuhosti plošného prvku. Rotační tuhosti $C_{D,B}$ a $C_{D,C}$ závisejí na

geometrických charakteristikách použitého profilu a plošného prvku a je možno je bez větších potíží určit [13]. V případě tuhosti $C_{D,A}$ je situace složitější. Norma [16] uvádí vztah pro její výpočet pro trapézové plechy. Dokument [20] uvádí vztah pro výpočet tuhosti $C_{D,A}$ pro sendvičové panely vycházející z postupu vyvinutého v rámci projektu EASIE při zkouškách rotačního podepření válcovaných průřezů sendvičovými panely.

Pro vztlakové zatížení působící na sendvičové panely se podle dokumentu [20] rotační podepření neuvažuje. Vztlakové zatížení způsobuje redukci kontaktní plochy mezi nosníkem a panelem mezi spojovacími prostředky. Tím může docházet k natočení průřezu mezi spojovacími prostředky, případně po celé jeho délce. Rotační tuhost se uvažuje jako nulová. Dokument [20] však v poznámce připouští určité malé hodnoty rotační tuhosti poskytnuté sendvičovými panely zatíženými sáním při použití za studena tvarovaných profilů. Vzhledem k nedostatku potřebných údajů mají být tyto hodnoty určeny experimentálně.

Norma [16] umožňuje zjednodušeně modelovat rotační podepření pomocí příčné pružiny na volné pásnici o tuhosti K , která lze zapsat vztahem (4.2):

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_C}, \quad (4.2)$$

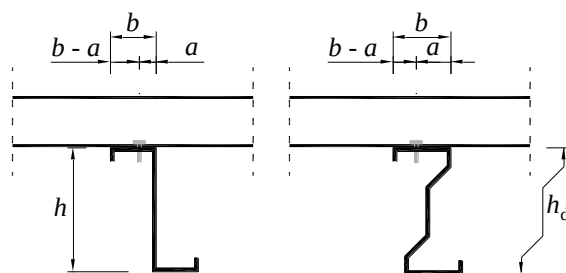
kde K_A je příčná tuhost odpovídající rotační tuhosti připojení nosníku a plošného prvku, K_B je příčná tuhost odpovídající distorzi příčného řezu nosníku (vyplývající z netuhosti příčného řezu) a K_C je příčná tuhost odpovídající ohybové tuhosti plošného prvku. Výraz $1/K_C$ lze dle normy zanedbat. Celková kombinovaná příčná tuhost K na jednotku délky je tedy dána vztahem (4.3) a příčnou tuhost K_B odpovídající distorzi příčného řezu nosníku lze určit pomocí vztahu (4.4) [16]; vztah lze odvodit metodou virtuálních prací:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B}}, \quad (4.3)$$

$$K_B = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot h^2 \cdot (h_d + b_{\text{mod}})}, \quad (4.4)$$

kde ν značí Poissonův součinitel, t tloušťku nosníku, h celkovou výšku a h_d rozvinutou výšku nosníku. Rozměr b_{mod} se určí v závislosti na tom, kde se při zatížení dotýká nosník plošného prvku. Pokud kontakt nastává v místě stojiny, platí $b_{\text{mod}} = a$, pokud kontakt nastává na volném okraji pásnice, uplatní se $b_{\text{mod}} = 2 \cdot a + b$. Kombinovanou příčnou tuhost K lze určit zkouškou.

Při znalosti K (výsledek zkoušky) a K_B (z výpočtu) lze dopočítat složku K_A podle vztahu (4.5) a výslednou rotační tuhost vztahem (4.6), kde l_A je šířka plošného prvku.



Obr. 4.4 Definice rozměrů potřebných do výpočtu

$$K_A = \frac{1}{\frac{1}{K} - \frac{1}{K_B}}, \quad (4.5)$$

$$C_D = \frac{K_A \cdot h^2}{l_A}. \quad (4.6)$$

5. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cíle disertační práce souvisí s vybranými otevřenými otázkami, které vyplynuly z předchozích kapitol a které lze rozvíjet dalším výzkumem. Jedním z cílů práce bude experimentální ověření rotačního podepření ocelových za studena tvarovaných nosníků prostřednictvím sendvičových panelů zatížených sáním. Případné prokázání přítomnosti rotační vazby i při vztakovém zatížení může vést ke zvýšení vzpěrné odolnosti tenkostěnného průřezu a tím k ekonomičtějším konstrukčním návrhům. Otázkou je míra tohoto rotačního podepření. Vzhledem k množství faktorů, které ovlivňují skutečné chování kovového nosníku spolupůsobícího s plošným prvkem, jeví se jako vhodná metoda k verifikaci rotačního podepření experimentální výzkum. Nejprve budou zhodnoceny možnosti využití různých zkušebních sestav se zvláštním zřetelem k nutnosti zavedení vnějšího zatížení na panely. Dalším krokem bude realizace vlastního experimentálního ověřování na vybraných zkušebních tělesech a vyhodnocení zkoušek. Zvláštní pozornost bude věnována vlivu distorze tenkostěnného průřezu za studena tvarovaného nosníku. Cenným poznatkem by mohlo být srovnání výsledků poskytnutých různými zkušebními sestavami.

Získané hodnoty rotačních tuhostí budou použity v rámci modelového příkladu, jehož cílem bude dimenzování tenkostěnného nosníku se zahrnutím účinku rotačního podepření

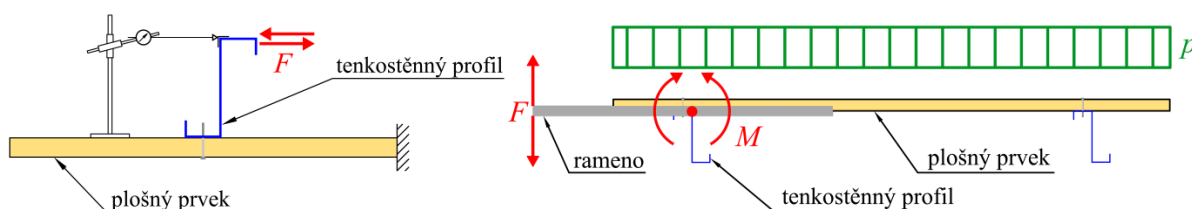
a srovnání s analogickým nosníkem, avšak bez rotační vazby. Dílčím úkolem bude ověření vlivu dotvarování jádra sendvičového panelu na rotační tuhost poskytnutou nosníku.

6. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘOVÁNÍ

6.1 Zkušební sestavy

Jedno z možných uspořádání zkoušky rotačního podepření za studena tvarovaných nosníků prostřednictvím plošných prvků je uvedeno v normě [16] a je znázorněno na Obr. 6.1. Nosník je zatěžován v úrovni volné pásnice silou F . Je měřena deformace průřezu v úrovni volné pásnice δ . Znalost tohoto posunutí a velikosti síly umožňuje určit hodnotu příčné tuhosti K ze vztahu (6.1). Při znalosti K a K_B lze dopočítat složku K_A a hledanou rotační tuhost podle vztahu (4.6). Tato zkušební sestava je relativně jednoduchá, avšak nepostihuje vliv vnějšího zatížení působícího na plošné prvky. Podle [20] není vhodná pro testy rotačního podepření poskytnutého sendvičovými panely pod zatížením, neboť má dávat nadhodnocené hodnoty rotačních tuhostí.

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} = \frac{\delta}{F}. \quad (6.1)$$



Obr. 6.1 Schéma zkušební sestavy rotačního podepření podle [16] (bez vlivu zatížení na povrch plošných prvků) a podle [20] (s vlivem zatížení na povrch plošných prvků)

Zkušební sestavu vhodnou pro experimentální ověření rotačního podepření při působení plošného zatížení na plošné prvky poskytuje dokument [20], její schéma je znázorněno na Obr. 6.1. Zkušební těleso je tvořeno dvojicí sendvičových panelů a dvojicí nosníků (v příčné poloze vzhledem k panelům). Ke koncům jednoho nosníku jsou připojena ramena, prostřednictvím kterých je aplikováno zatěžování nosníku prostřednictvím síly F (Obr. 6.1). Při návrhu zkoušky s vlivem externího zatížení na plošné prvky je podle [16] nutno věnovat pozornost orientaci průřezu nosníku s ohledem na směr zatížení působícího na plošné prvky (viz Obr. 4.2).

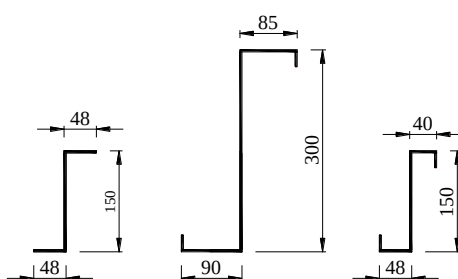
Experimentální ověřování se zaměřuje na rotační podepření s vlivem sání na sendvičové panely a na srovnávací ověření s použitím normové sestavy. Přehled experimentů shrnuje Tab. 6.1. Symbol * značí nosníky bez podélných výztuh pásnic.

charakteristika	série	počet experimentů	profily nosníků	poznámky
bez vlivu sání na povrch panelů	I	3	Z150-3*	standardní zkušební sestava dle [16]
	II	2	Z300-3	
	III	2	Z150-3	
s vlivem sání na povrch panelů	IV	2	Z150-3*	zkušební sestava dle [20] modifikovaná zkušební sestava
	V	2	Z300-3	
	VI	2	Z150-3	

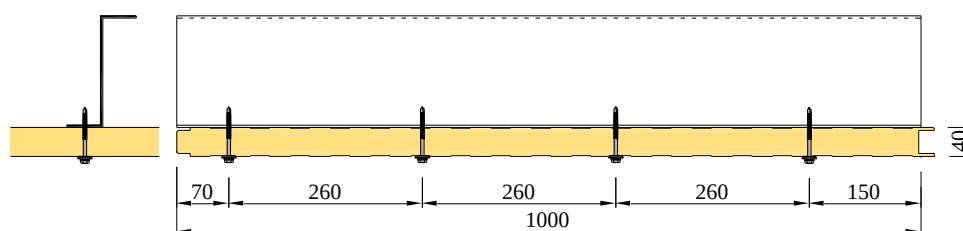
Tab. 6.1 Plán experimentálního ověřování

6.2 Rotační podepření bez vlivu plošného zatížení na panely

Pro zkoušky rotačního podepření ocelových tenkostěnných nosníků sendvičovými panely podle normy [16] byly vybrány za studena tvarované profily tvaru Z z oceli S220 GD+Z s povrchovou úpravou pozinkováním. Nominální tloušťka nosníků byla 3 mm a jejich výška 150 mm (série I – bez podélných výztuh pásnic, série III – s podélnými výztuhami pásnic), resp. 300 mm (série II). Délka nosníku pro jednu zkoušku byla 1 m. Na výpočet rotační tuhosti nemá přítomnost výztuh pásnic vliv, proto lze sloučit výsledky pro profily Z150-3 s výztuhami i bez výztuh do jedné skupiny. Jako plošný prvek byl použit sendvičový panel s tenkými krycími plechy a s polyuretanovým izolačním jádrem o tloušťce 40 mm, tloušťka krycích plechů byla 0,5 mm. Spojení panelu s nosníkem bylo realizováno pomocí samořezných šroubů opatřených pryžovou podložkou pro zajištění vodotěsnosti spoje.

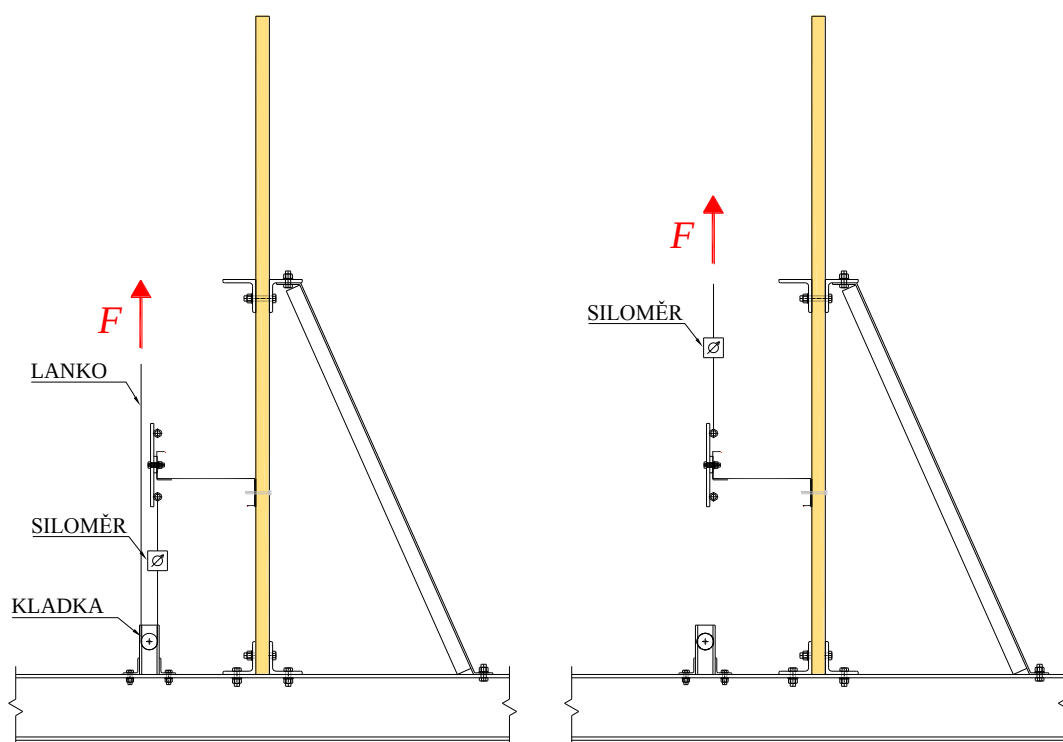


Obr. 6.2 Dimenze profilů použitých pro zkoušky rotačního podepření



Obr. 6.3 Schéma připojení sendvičového panelu k tenkostěnnému nosníku

Princip sestavy pro zkoušku rotačního podepření odpovídal sestavě předepsané normou [16]. Zkušební rám byl osazen kladkou pro umožnění zatěžování v obou směslech. V případě „negativního“ směsu zatěžování (Obr. 6.4) byla síla vnášena přes ocelové lanko připojené k mostovému jeřábu a procházející ocelovou kladkou dále přes siloměr připojený k závěsu na nosníku. V případě „pozitivního“ směsu zatěžování byl siloměr osazen na opačnou stranu závěsu na nosníku a připojen k jeřábu, jehož ovládáním byl nosník zatěžován. Při každé zkoušce byly pro každý smysl zatěžování pomocí mostového jeřábu provedeny tři cykly zatížení a odtížení nosníku tak, aby maximální příčná deformace nosníku δ činila cca desetinu výšky nosníku h , jak požaduje norma [16]. Schéma zkušební sestavy je na Obr. 6.4.



Obr. 6.4 Schéma zkušební sestavy („negativní“ a „pozitivní“ smysl zatěžování)

Síla k zatěžování nosníku byla měřena siloměrem připojeným k měřicí ústředně, který byl připojen k závěsu na nosníku a přes který byla síla pomocí zvedání háku mostového jeřábu vnášena. Na nosníku byly umístěny snímače posunu (úchylkoměry). Vyhodnocení je provedeno v souladu s [16]. Výstupem jednoho testu je celková kombinovaná příčná tuhost na jednotku délky K_{obs} , která je dána vztahem (6.2). Vzhledem k tomu, že skutečně naměřená tloušťka nosníků a skutečné materiálové charakteristiky mohou být odlišné od nominálních hodnot, je třeba provést úpravu výsledků zkoušky podle [16] a do dalšího výpočtu uvažovat již jen upravenou hodnotu K_{adj} , která se určí vztahem (6.3), kde opravný součinitel μ_R se vypočítá pomocí postupu uvedeného v [16].

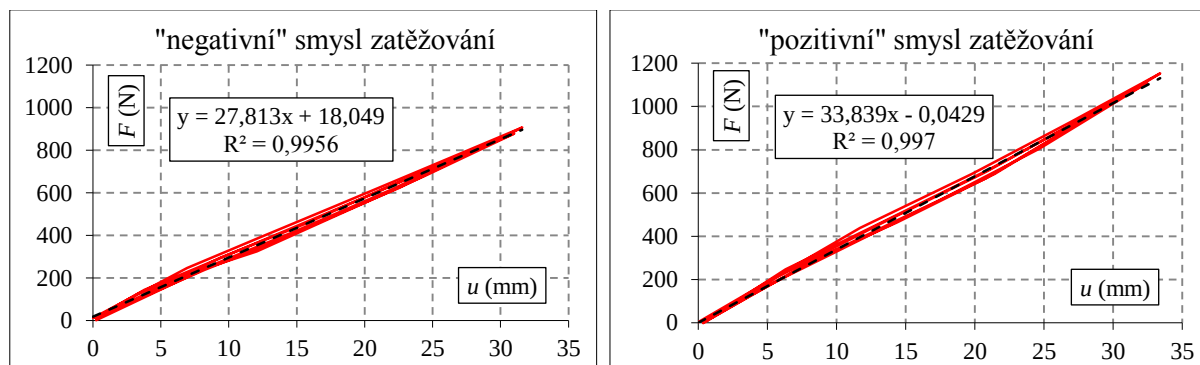
$$\frac{1}{K_{\text{obs}}} = \frac{\delta}{F}, \quad (6.2)$$

$$K_{\text{adj}} = \frac{K_{\text{obs}}}{\mu_R}. \quad (6.3)$$

Celková kombinovaná příčná tuhost K_{adj} se skládá ze složky K_A a K_B (viz kapitola 4). Pokud je posun δ měřen v úrovni volné pásnice, je možné distorzní tuhost K_B určit pomocí vztahu (4.4). Jelikož v rámci experimentů byl posun měřen v určité vzdálenosti h_δ od připojené pásnice a nikoli v úrovni volné pásnice, bylo nutné odvodit vztah pro K_B metodou virtuálních prací. Výsledkem je výraz (6.4). Při znalosti K_{adj} (upraveného výsledku zkoušky) a distorzní tuhosti K_B je možno určit složku K_A vztahem (4.5) a rotační tuhost vztahem (4.6).

$$K_B = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left[\frac{h_\delta^2}{2} \cdot (3 \cdot h - h_\delta) + h \cdot h_\delta \cdot b_{\text{mod}} \right]}. \quad (6.4)$$

Grafy (zde ilustrativně pro experimenty série II) znázorňují typickou závislost posunu δ na zatížení. Každým grafem byla proložena regresní přímka, jejíž směrnice udává hodnotu celkové kombinované příčné tuhosti K_{obs} . Na základě dat z experimentů byla výše uvedeným postupem vypočítána hledaná hodnota rotační tuhosti C_D . Výpočet je sumarizován v Tab. 6.2.



Obr. 6.5 Výstupy z experimentu II-2

smysl zatěžování	„negativní“				„pozitivní“							
test	II-1	II-2	III-1	III-2	I-1	I-2	I-3	II-1	II-2	III-1	III-2	
K_{obs} (N/mm)	23,5	27,8	55,3	44,2	86,8	62,7	77,7	29,5	33,8	52,8	41,7	
K_{adj} (N/mm)	22,4	26,5	52,3	41,9	81,3	58,4	72,1	28,1	32,2	50,0	39,5	
K_{B} (N/mm)	52,8	58,5	391,6	373,5	869,2	868,0	907,3	75,93	85,0	565,6	534,5	
K_{A} (N/mm)	38,8	48,3	60,39	47,22	89,66	62,64	78,28	44,69	51,8	54,8	42,7	
C_{D} (Nmm/mm/rad)	2680	3116	108	885	1210	865	1045	3084	3342	987	801	

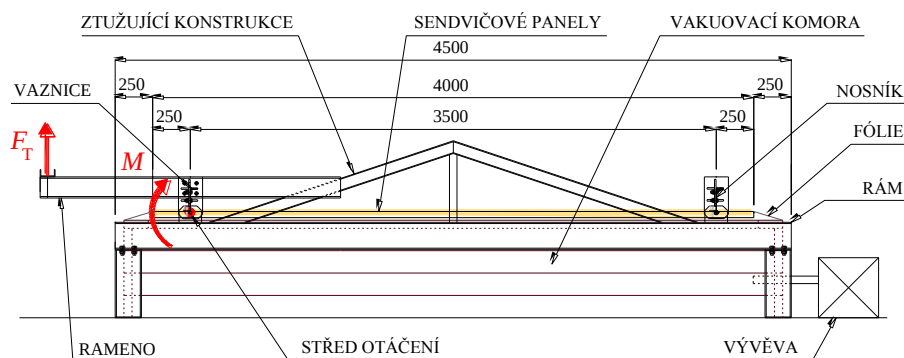
Tab. 6.2 Výsledky experimentů



Obr. 6.6 Zkušební sestava připravená k provedení zkoušky, detaily

6.3 Rotační podepření s vlivem plošného zatížení na panely

Pro ověření rotačního podepření poskytnutého za studena tvarovaným vaznicím sendvičovými panely pod zatížením v sérii IV (s profily Z150 bez výztuh pásnic) byl využit princip zkušební sestavy podle dokumentu [20] (Obr. 6.1). Délka panelů byla 4 m, délka nosníků použitých pro zkušební tělesa byla 2,4 m. Schéma zkušební sestavy je na Obr. 6.7.



Obr. 6.7 Zkušební sestava pro ověření rotačního podepření pod zatížením

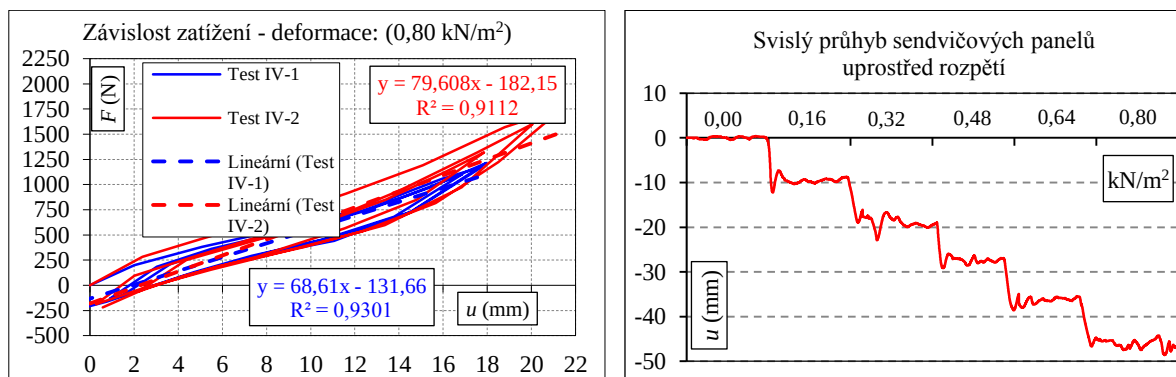
Zkušební těleso se skládalo ze dvou sendvičových panelů a dvou nosníků a přes čepy bylo uloženo na ocelovém rámu s vyztužující konstrukcí. Ke koncům jednoho nosníku byla připojena ocelová ramena, na koncích vzájemně spojená příčným nosníkem, v jehož středu byl připevněn závěs. Ten byl přes siloměr spojen s mostovým jeřábem. Ovládáním jeřábu bylo zkušební těleso zatěžováno. Pro simulování zatížení sáním byla použita zkušební metoda zatěžování vakuováním [21; 22]. Zkušební těleso bylo umístěno na vakuovací komoře s připojenou vývěvou, kterou byl odsáván vzduch. Tím byl v komoře zaručen vznik podtlaku

při spuštění vývěvy. Zatěžování bylo prováděno bez podtlaku a v pěti různých úrovních podtlaku (plošného zatížení) vyvozeného vakuováním a působícího na povrch panelů. V každé úrovni byly provedeny tři cykly zatěžování nosníku.



Obr. 6.8 Zkušební sestava a zatěžování nosníku

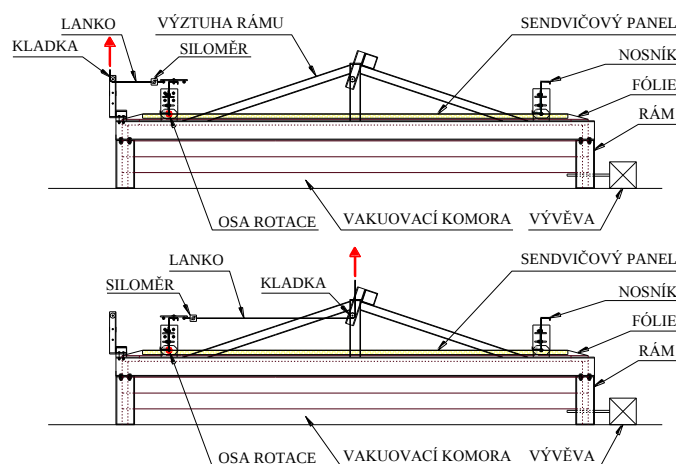
Vyhodnocení a výpočet rotační tuhosti v zásadě sleduje stejný postup, jako vyhodnocení testů podle normy [16]. Výstupem každé úrovně podtlaku je celková kombinovaná příčná tuhost K_{obs} , která je dána vztahem (6.2), ve kterém vystupuje síla F v úrovni horní pásnice a měřená deformace δ ve vzdálenosti h_δ od dolní pásnice vaznice. Vzhledem k tomu, že v rámci použité zkušební sestavy nebylo zatížení vnášeno přímo do horní pásnice ve formě osamělé síly, nýbrž ve formě krouticího momentu, byla hodnota odpovídající síly v horní pásnici odvozena pomocí mechanického modelu, kdy moment M byl rozložen do dvojice sil F působících v úrovni pásnic ocelového nosníku. S ohledem na skutečně naměřenou tloušťku nosníků byla provedena úprava výsledků zkoušek podle [16]. Upravené výsledky K_{adj} byly použity pro další výpočet rotační tuhosti C_D , který se již shodoval s postupem při vyhodnocení standardních testů. Následující graf znázorňuje typickou závislost zatížení (F) – deformace (δ), zde ilustrativně pro poslední úroveň podtlaku.



Obr. 6.9 Závislost zatížení – deformace (testy série IV, pátá úroveň podtlaku) a svislý průhyb sendvičových panelů v průběhu zkoušky (test IV-1)

Závislostmi byly proloženy regresní přímky, jejichž směrnice udávají hodnotu kombinované příčné tuhosti K_{obs} , z níž byly počítány hodnoty rotační tuhosti C_D . Shrnutí je v Tab. 6.3 a Tab. 6.4. V rámci zkoušky IV-1 byl měřen také průhyb panelů uprostřed rozpětí. Při poslední úrovni podtlaku ($0,80 \text{ kN/m}^2$) činil cca 47 mm (přibližně 1/75 rozpětí).

Pro sérii V byly použity profily Z300-3 a pro sérii VI profily Z150 (Obr. 6.2), oba s podélnou výztuhou pásnic. Zkušební sestava vycházela ze sestavy použité v rámci série IV, modifikován však byl způsob vnášení zatížení do nosníku, aby se přiblížil způsobu podle normy [16]. Síla byla vnášena do volné pásnice v polovině rozpětí nosníku pomocí mostového jeřábu. Háček jeřábu spojovalo s tenkostěnným nosníkem ocelové lanko se siloměrem, které bylo k háčku jeřábu připojeno přes kladku. Ovládáním jeřábu bylo zkušební těleso zatěžováno pomocí síly F (v obou smyslech). Plošné zatížení bylo vyvozeno vakuováním [21; 22]. Nejprve bylo provedeno zatěžování v „negativním“ smyslu (Obr. 6.10) bez podtlaku ve vakuovací komoře. Další fází bylo přenesení siloměru na opačnou stranu a zatěžování v „pozitivním“ smyslu (bez podtlaku) a při pěti různých úrovních podtlaku.

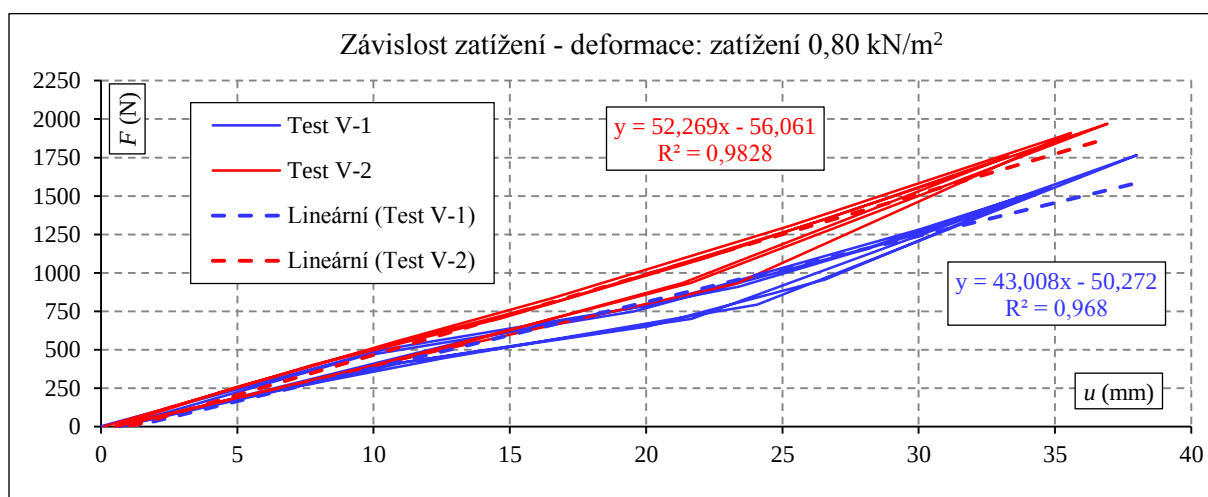


Obr. 6.10 Zkušební sestava pro ověření rotačního podepření pod zatížením



Obr. 6.11 Zkušební sestava

Princip zatěžování silou F odpovídá zkušební sestavě dané normou [16], což umožnilo i aplikaci příslušného postupu vyhodnocení. Pro každou úroveň podtlaku byla získána celková kombinovaná příčná tuhost K_{obs} podle vztahu (6.2), která byla upravena na hodnotu K_{adj} . Graf zachycuje typickou závislost síly F na deformaci δ , zde ilustrativně pro poslední úroveň podtlaku. Směrnice regresních přímek proložených závislostmi udávají hodnotu K_{obs} . Shrnutí získaných rotačních tuhostí pro všechny zkoušky a úrovně zatížení je v Tab. 6.3 a Tab. 6.4.



Obr. 6.12 Závislost zatížení – deformace (testy série V; pátá úroveň podtlaku)

úroveň podtlaku	test	C_D (Nmm/mm/rad)	úroveň podtlaku	test	C_D (Nmm/mm/rad)
0	V-1	2218	0	VI-1	574
	V-2	2344		VI-2	748

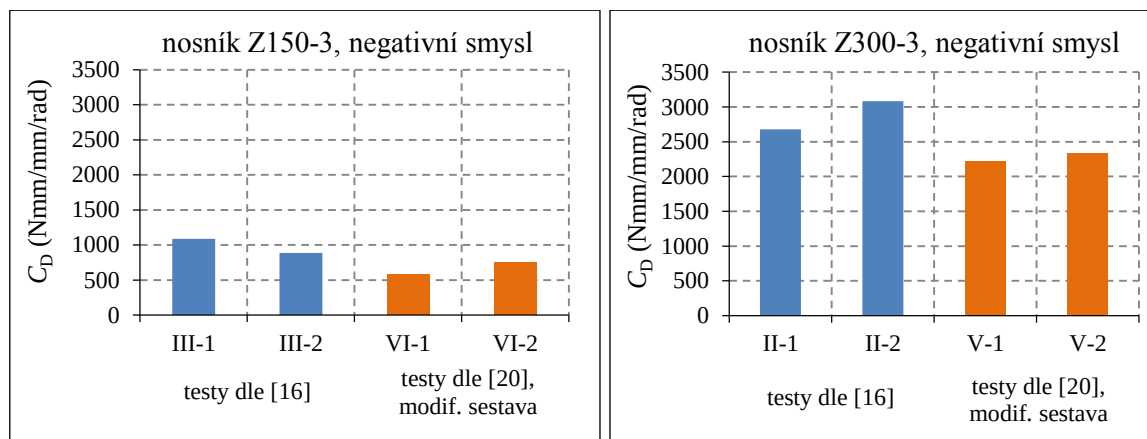
Tab. 6.3 Výsledky („negativní“ smysl zatěžování)

úroveň	test	C_D (Nmm/mm/rad)	úroveň	test	C_D (Nmm/mm/rad)	úroveň	test	C_D (Nmm/mm/rad)
0	IV-1	837	1	IV-1	889	2	IV-1	836
	IV-2	997		IV-2	1049		IV-2	1011
	V-1	1768		V-1	2004		V-1	2050
	V-2	2211		V-2	2390		V-2	2407
	VI-1	662		VI-1	708		VI-1	710
	VI-2	699		VI-2	731		VI-2	712
3	IV-1	761	4	IV-1	690	5	IV-1	643
	IV-2	984		IV-2	944		IV-2	779
	V-1	1815		V-1	1719		V-1	1535
	V-2	2353		V-2	2273		V-2	2139
	VI-1	651		VI-1	648		VI-1	560
	VI-2	657		VI-2	623		VI-2	568

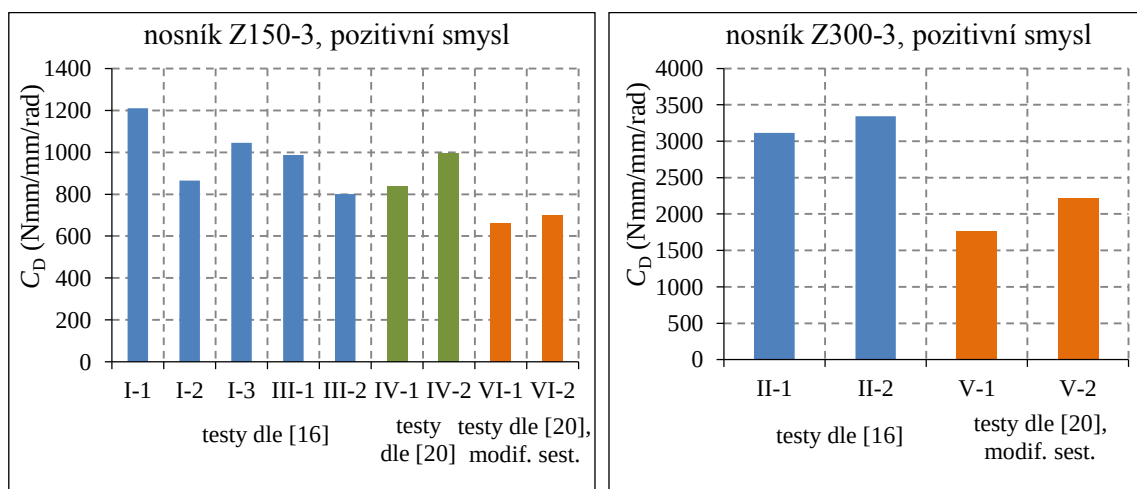
Tab. 6.4 Výsledky („pozitivní“ smysl zatěžování)

6.4 Srovnání experimentálně určených hodnot

Tento odstavec sumarizuje experimentálně zjištěné hodnoty rotačních tuhostí bez vlivu zatížení působícího na povrch sendvičových panelů. Shrnuje tedy testy podle zkušebního postupu dle normy [16] (série I, II a III) a dále prvotní fáze zkoušek s využitím zkušební sestavy dle [20] (série IV), resp. její modifikované podoby (série V a VI).

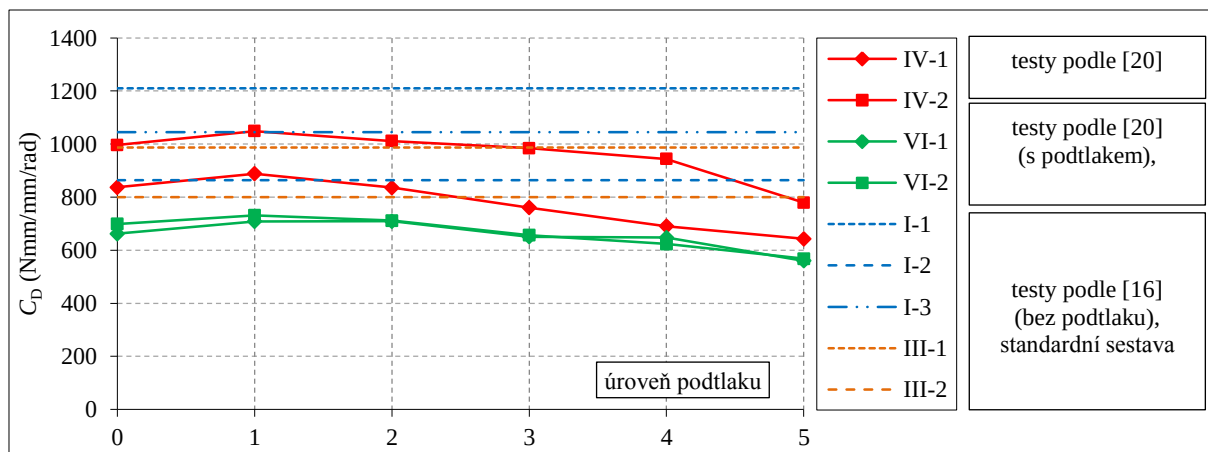


Obr. 6.13 Srovnání rotačních tuhostí (negativní smysl)

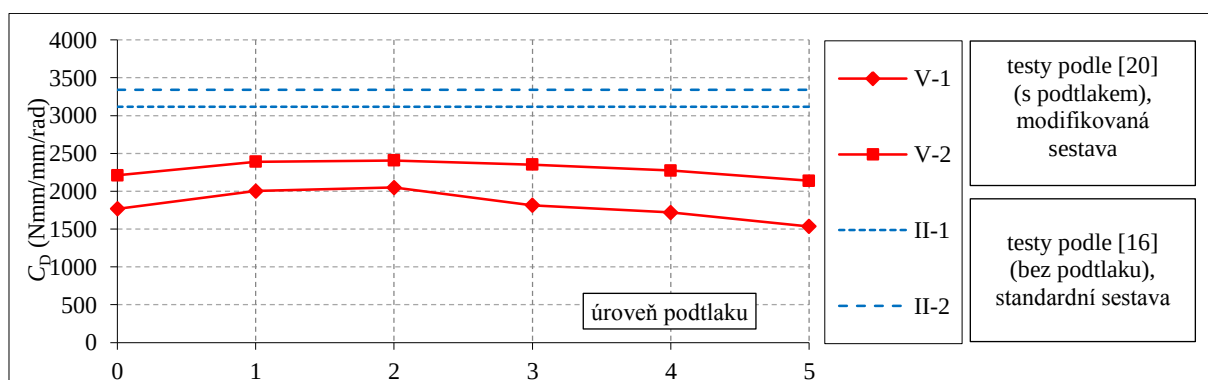


Obr. 6.14 Srovnání rotačních tuhostí (pozitivní smysl)

Rotační tuhost poskytnutá tenkostěnným vaznicím sendvičovými panely pod zatížením byla pro nosníky typu Z150-3 vyšetřována v rámci sérií IV (sestava dle [20]) a VI (modifikovaná sestava) a pro nosníky Z300-3 v rámci série V (modifikovaná sestava). V grafech znázorňujících tendenci hodnot rotační tuhosti se zvyšujícím se podtlakem simulujícím sání na povrch panelů jsou pro srovnání vyneseny i příslušné hodnoty rotační tuhosti získané standardními zkouškami (série I a III pro Z150-3 a série II pro Z300-3). Všechny výsledky byly následně statisticky vyhodnoceny.



Obr. 6.15 Srovnání výsledných rotačních tuhostí (Z150-3)

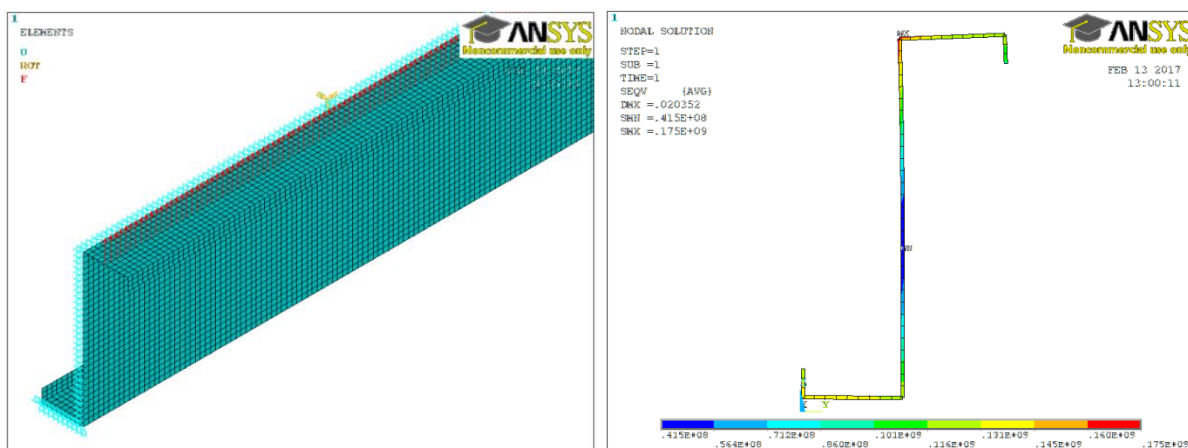


Obr. 6.16 Srovnání výsledných rotačních tuhostí (Z300-3)

7. NUMERICKÁ ANALÝZA

Jako doplněk k teoretickému a experimentálnímu vyšetřování byla provedena numerická analýza s využitím některých výsledků z experimentální analýzy. Norma [16] uvádí možné metody pro analýzu nosníků s rotačním podepřením zajištěným připojenou krytinou. Jedním z přístupů je postup, kdy se přídavná namáhání způsobená příčným ohybem a kroucením zavedou prostřednictvím ekvivalentního příčného zatížení volné pásnice. Rotační tuhost se v tomto přístupu nahradí ekvivalentním podepřením volné pásnice o tuhosti K . Pro přesnější výpočty má být použita numerická analýza, kdy se rotační podepření zohlední přímo rotační tuhostí o velikosti C_D . Numerický model má zahrnovat účinky imperfekce volné pásnice. Následně se provede analýza podle teorie II. řádu. Tento postup je ilustrován na nosníku typu Z300-3 z oceli třídy S220 GD+Z. Jedná se o průřez, který byl podroben experimentálnímu ověřování. Nosník je uvažován jako prostě uložený o rozpětí 6 m a zatížený spojitým zatížením o velikosti $-3,79$ kN/m (údaje převzaty z příkladu řešeného

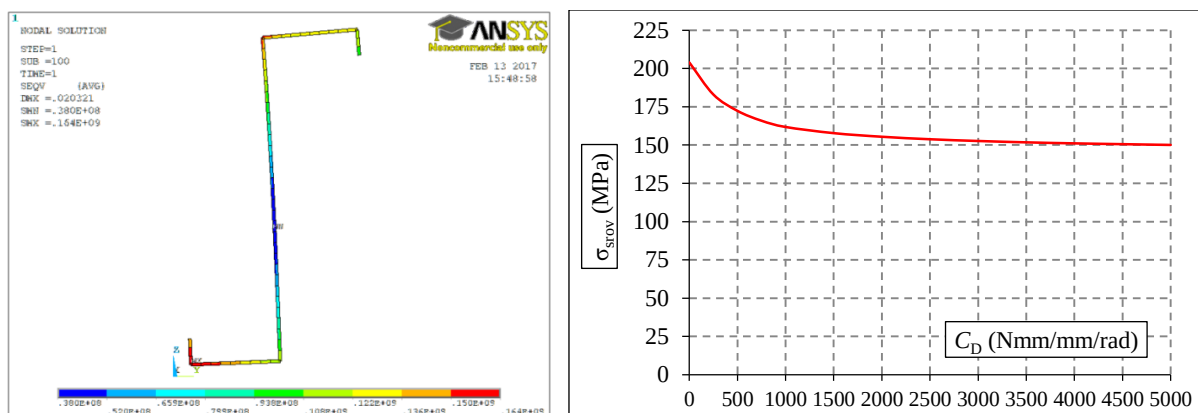
v disertační práci). Je uvažováno s experimentálně určenou hodnotou rotační tuhosti o velikosti 1353,89 Nmm/mm/rad (charakteristická hodnota ze statistického vyhodnocení). Analýza je provedena v programovém systému ANSYS 14.0 [23] založeném na metodě konečných prvků. Pro namodelování nosníku jsou použity prvky typu SHELL181. Okrajové podmínky odpovídají prostému uložení v úrovni dolní pásnice. Na uzlech tvořících průřez horní pásnice a stojiny je zamezeno příčnému posunu, čímž je modelováno příčné podepření. Rotační podepření je modelováno pomocí konečných prvků typu COMBIN14, které umožňují modelovat translační nebo rotační pružinu o zadané tuhosti. Materiál je zadán jako ideálně pružný s modulem pružnosti 210 GPa a Poissonovým součinitelem 0,3. Po vymodelování nosníku, zadání okrajových podmínek a zatížení byla provedena materiálově i geometricky lineární statická analýza, srovnávací napětí v nejvíce namáhaném řezu je na Obr. 7.1.



Obr. 7.1 Detail numerického modelu a výsledek analýzy podle teorie I. řádu

Další fází byla analýza vlastních tvarů poskytující vlastní čísla a tvary vybočení. První kladný vlastní tvar může být použit pro zavedení počátečního zakřivení nosníku do modelu. To má odpovídat prvnímu vlastnímu tvaru se zadanou amplitudou e_0 . Pro řešený příklad vychází tato amplituda ze vztahu $e_0 = L/600 = 10$ mm. Zavedením počátečního zakřivení vneseme do modelu vliv imperfekcí. Po tomto kroku je možné provést geometricky nelineární analýzu a ověřit maximální napětí. Program ANSYS umožňuje snadnou modifikaci zadané geometrie konstrukce podle uživatelem vybraného vlastního tvaru, což bylo provedeno. Poté byla v programu nastavena geometricky nelineární analýza a proveden výpočet. Důležitým výsledkem byl průběh srovnávacího napětí. To je pro nejnamáhanější průřez zobrazeno na Obr. 7.2. Výsledek geometricky nelineární analýzy potvrzuje jako rozhodující místo průřezu s nejvyšším srovnávacím napětím volnou (tlačenou) pásnici. Nejvyšší srovnávací napětí ve volné pásnici získané touto analýzou dosahuje 164 MPa. Mez kluzu materiálu nosníku

220 MPa tedy podle této analýzy nebyla překročena. Tento postup byl použitý pro zpracování parametrické studie závislosti velikosti srovnávacího napětí v dolní tlačené pásnici na velikosti rotační tuhosti. Výsledná závislost je zobrazena v grafu na Obr. 7.2.



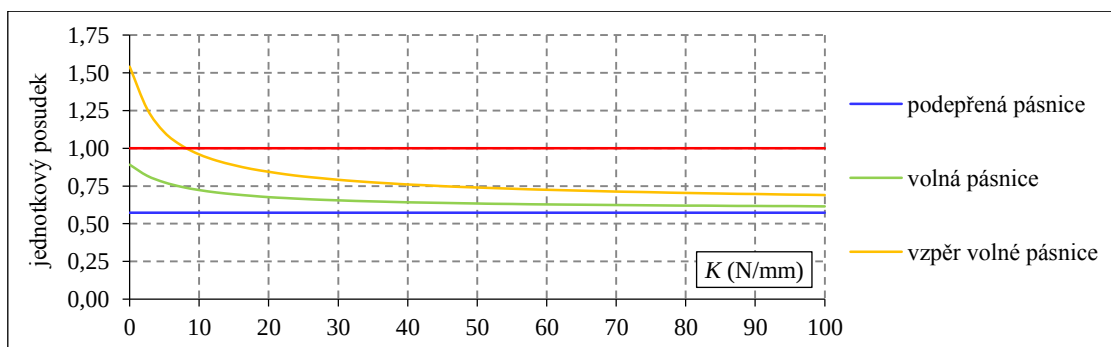
Obr. 7.2 Srovnávací napětí a závislost napětí na velikosti rotační tuhosti

8. ZÁVĚR

Práce je zaměřena na oblast ohýbaných kovových nosníků s vazbami vybočení z roviny ohybu a kroucení. Z rozsáhlé oblasti byly vybrány některé problémy, které byly podrobněji rozpracovány. Na základě provedených analýz lze formulovat vybrané závěry:

- Experimenty poskytly významné hodnoty rotační tuhosti, a to jak v případě normové, tak specializované zkušební sestavy a její modifikované varianty.
- Vyhodnocení výsledků ukazuje, že pro ocelový profil Z150-3 mm poskytly všechny použité zkušební sestavy srovnatelné hodnoty rotační tuhosti (okolo 1000 Nmm/mm/rad). V případě profilu Z300-3 byla rotační tuhost získaná z normové sestavy cca 1,6krát vyšší než v případě sestavy zohledňující zatížení sáním (normová sestava poskytla hodnoty okolo 3200 Nmm/mm/rad, specializovaná okolo 2000 Nmm/mm/rad).
- Se zvyšující se úrovní plošného zatížení na povrch panelů docházelo v rámci provedených experimentů k velmi pozvolnému snižování rotační tuhosti.
- V případě sestav s vlivem plošného zatížení se jeví jako vhodnější sestava s přímým zatěžováním nosníku prostřednictvím síly uprostřed jeho volné pásnice než sestava se zatěžováním prostřednictvím krouticího momentu, protože umožňuje využít normový postup vyhodnocení.

Získané hodnoty rotační tuhosti byly využity v rámci modelového příkladu, jehož cílem byl návrh za studena tvarované ocelové vaznice s využitím stabilizace prostřednictvím sendvičových panelů. V rámci příkladu se jako rozhodující ukázalo posouzení vzpěru volné pásnice při vztlačovém zatížení. Norma převádí rotační podepření na ekvivalentní příčné podepření volné pásnice charakterizované příčnou tuhostí K . V případě uvážení rotačního podepření na základě provedených experimentů bylo příslušné jednotkové posouzení rovno 0,77, tedy vaznice vyhověla. V případě, že by rotační podepření nebylo uváženo, tento rozhodující posudek by vzrostl na 1,54. V souvislosti s výše uvedenými skutečnostmi byl příklad využit k vyšetření vlivu míry rotačního podepření na výsledné jednotkové posudky, kdy byla parametricky měněna hodnota příčné tuhosti K . Na Obr. 8.1. jsou znázorněny posudky volné (tlačené) pásnice při působení záporného momentu. Je patrné, že pro řešený příklad i relativně nízké hodnoty tuhosti K vedou k významnému snížení jednotkového posudku týkajícího se vzpěru volné pásnice. Podobnou tendenci ukázala i numerická analýza.



Obr. 8.1 Studie vlivu míry rotačního podepření na jednotkové posudky

Souhrnně lze konstatovat, že výsledky experimentů shrnuté v této práci ukazují na přítomnost významných hodnot rotační tuhosti charakterizující rotační podepření při vztlačovém zatížení na povrch sendvičových panelů. Pro širší zobecnění by samozřejmě bylo nutné provést zkoušky i s jinými zkušebními tělesy s odlišnými charakteristikami.

Do prozatím otevřených otázek lze zařadit vliv okrajových podmínek nosníku při zkušebních sestavách s vlivem plošného zatížení na povrch plošných prvků. Zatímco v případě normové zkušební sestavy je nosník držen pouze plošným prvkem, v případě složitější sestavy s plošným zatížením je nutno nosník uložit pomocí čepů ještě na jeho okrajích. Tento vliv by mohl být efektivně ověřen prostřednictvím experimentální a numerické analýzy. Dalším možným směrem rozvoje může být rozsáhlejší numerické modelování vybraných problémů, které by mohlo usnadnit teoretický výzkum díky snadné možnosti změn potřebných parametrů modelovaných prvků v použitých programech.

SEZNAM VYBRANÝCH POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VLASOV, V. Z. *Tenkostěnné pružné pruty*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. 572 s.
- [2] SVOBODA, M., MELCHER, J. *Vybrané stati prvků ocelových konstrukcí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1970, 258 s.
- [3] BŘEZINA, V. *Vzpěrná únosnost kovových prutů a nosníků*. Praha: Nakladatelství ČSAV, 1962, 384 s.
- [4] PRANDTL, L. *Kipperscheinungen*. 1899. Cit. In: BŘEZINA, V. *Vzpěrná únosnost kovových prutů a nosníků*. Praha: Nakladatelství ČSAV, 1962, 384 s.
- [5] MRÁZIK, A., GRUSKA, J. *Výpočet tenkostěnných prutů*. Bratislava: Slovenská akadémia ved, 1965.
- [6] MELCHER, J. *Ohyb, kroucení a stabilita ocelových nosníků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1975, 218 s.
- [7] BALÁŽ, I., KOLEKOVÁ, Y. Critical moments. In: *Stability and Ductility of Steel Structures*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2002, s. 31-38. ISBN 963-05-7950-2.
- [8] ČSN EN 1993-1-1. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační inst., 2006, 96 s.
- [9] KINDMANN, R., WOLF, C. Geometrische Ersatzimperfektionen für Tragfähigkeitsnachweise zum Biegeknicken von Druckstäben. *Stahlbau*. 2009, 78 (1), s. 25-34. ISSN 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.200910003.
- [10] ŠKALOUD, M. *Tenkostěnné ocelové konstrukce z profilů tvarovaných za studena*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963, 92 s.
- [11] LINDNER, J. Zur Aussteifung von Biegeträgern durch Drehbettung und Schubsteifigkeit. *Stahlbau*. 2008, 77 (6), s. 427-435. ISSN 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.200810056.
- [12] KINDMANN, R., MUSZKIEWICZ, R. Verzweigungslasten und Eigenformen seitlich gestützter Biegeträger unter Berücksichtigung der Drehbettung. *Stahlbau*. 2002, 71 (10), s. 748-759. ISSN 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.200202500.
- [13] MISIEK, T., KÄPPLEIN, S., SAAL, H., UMMENHOFER, T. Stabilisation of beams by sandwich panels: Lateral and torsional restraint. In: *EUROSTEEL 2011: 6th*

- European Conference on Steel and Composite Structures*. Budapest: ECCS European Convention for Constructional Steelwork, 2011, s. 615-620. ISBN 978-92-9147-103-4.
- [14] ZHAO, C., YANG, J., WANG, F., CHAN, A. H. C. Rotational stiffness of cold-formed steel roof purlin-sheeting connections. *Engineering Structures*. 2014, 59, s. 284-297. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.10.024.
- [15] GAJDZICKI, M., GOCZEK, J. Numerical determination of rotational restraint of cold-formed Z-purlin according to EC3. *Int. J. of Steel Structures*. 2015, 15 (3), s. 633-645. ISSN 1598-2351 (Print), 2093-6311 (Online). DOI: 10.1007/s13296-015-9010-x.
- [16] ČSN EN 1993-1-3. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-3: Obecná pravidla- Doplnující pravidla pro tenkostěnné za studena tvarované prvky a plošné profily*. Praha: Český normalizační institut, 2008, 118 s.
- [17] VRANÝ, T. Effect of loading on the rotational restraint of cold-formed purlins. *Thin-Walled Structures*. 2006, 44 (12), s. 1287-1292. ISSN 0263-8231. DOI: 10.1016/j.tws.2007.01.004.
- [18] KÄPPLEIN, S., BERNER, K., UMMENHOFER, T. Stabilisierung von Bauteilen durch Sandwichelemente. *Stahlbau*. 2012, 81 (12), s. 951-958. ISSN 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.201201636.
- [19] KÄPPLEIN, S., MISIEK, T. *EASIE – Ensuring Advancement in Sandwich Construction Through Innovation and Exploitation. Report No.: D3.3 – part 1: Stabilisation of beams by sandwich panels*. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, 2011, 61 s.
- [20] *European Recommendations on the Stabilization of Steel Structures by Sandwich Panels*. Rotterdam: CIB, ECCS, 2013, 69 s. ISBN 978-90-6363-081-2.
- [21] MELCHER, J., KARMAZÍNOVÁ, M. *Experimentální verifikace procesu přetváření a únosnosti vláknocementových konstrukčních plošných dílců s využitím metody zatěžování vakuováním*. Ověřená technologie. Brno: Zkušebna nosných konstrukcí Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí Fakulty stavební VUT v Brně, 2009.
- [22] MELCHER, J. Behaviour of Thin-Walled Corrugated Sheets and Restrained Beams. In: *Proceedings of IABSE Colloquium on Thin-Walled Metal Structures in Buildings*. Stockholm: IABSE, 1986, s. 199-206.
- [23] ANSYS® Academic Research, Release 14.0.

ŽIVOTOPIS

Osobní údaje

Jméno a příjmení, titul: Ing. Ivan Balázs
Adresa (pracoviště): Veveří 331/95, 602 00 Brno
Kontaktní telefon: 737 486 728
E-mail: balazs.i@fce.vutbr.cz, ivan.balazs@seznam.cz

Vzdělání

1997 – 2005 Gymnázium Tišnov, Na Hrádku 20, 666 01 Tišnov
2005 – 2009 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, bakalářský studijní program Konstrukce a dopravní stavby
2009 – 2012 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, navazující magisterský studijní program Konstrukce a dopravní stavby
10/2009 – 2/2010 Studijní pobyt na University of Ljubljana, Faculty of Civil Engineering and Geodesy (Slovinsko)
2012 – dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, doktorský studijní program Konstrukce a dopravní stavby

Pracovní zkušenosti

2014 – dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, akademický pracovník – asistent
2014 – 2016 Firma Vladimír Fišer

Znalost cizích jazyků

anglický jazyk aktivně
německý jazyk pasivně

Znalost práce na PC

MS Windows, MS Office, RFEM, RSTAB, ANSYS, AutoCAD

VYBRANÉ PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA

BALÁZS, I., MELCHER, J. Geometricky nelineární analýza ocelových tenkostěnných nosníků jednoose symetrického průřezu zatížených kolmo k ose symetrie. *Sborník příspěvků vědecké konference Modelování v mechanice 2013*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013, s. 1-14. ISBN 978-80-248-2985-2.

BALÁZS, I., MELCHER, J. Geometricky nelineární numerická analýza tenkostěnných nosníků jednoose symetrického průřezu zatížených kolmo k rovině symetrie. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013, 13 (2), s. 1-10. ISSN 1213-1962.

BALÁZS, I., MELCHER, J. On problem of stabilization of steel thin-walled beams in bending by sandwich panels. *12th International Conference on Steel, Space & Composite Structures SS14*. Praha: CI-Premier Conference Organisation, 2014, s. 159-164. ISBN 978-981-09-0077-9.

BALÁZS, I., MELCHER, J. Stabilization of steel beams by sandwich panels: Influence of beam supports. *EUROSTEEL 2014, 7th European Conference on Steel and Composite Structures*. Neapol: ECCS, 2014. ISBN 978-92-9147-121-8.

BALÁZS, I., MELCHER, J. Stability of Thin-Walled Beams with Lateral Continuous Restraint. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2015, 15 (1), s. 1-10. ISSN 1804-4824. DOI: 10.1515/tvsb-2015-0001.

BALÁZS, I., MELCHER, J., KARMAZÍNOVÁ, M., BELICA, A., OLY, R., MISIEK, T. Experimental verification of torsional restraint given to thin-walled members by sandwich panels. *Zborník prednášok. 40. aktiv pracovníkov odboru ocelových konštrukcií*. Ošadnica: Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, 2015, s. 23-28. ISBN 978-80-89619-01-6.

BALÁZS, I., MELCHER, J., KARMAZÍNOVÁ, M., BELICA, A., OLY, R., MISIEK, T. Experimentální ověření míry rotačního podepření ocelových za studena tvarovaných nosníků pomocí sendvičových panelů. *53. celostátní konference o ocelových konstrukcích Hustopeče 2015*. Hustopeče: Česká společnost pro ocelové konstrukce, 2015, s. 3-5. ISBN 978-80-02-02601-3.

BALÁZS, I., MELCHER, J., BELICA, A. Experimental investigation of torsional restraint provided to thin-walled purlins by sandwich panels under uplift load. *Procedia Engineering*. 2016, 161, s. 818-824. ISSN 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.718.

ABSTRACT

The doctoral thesis focuses on problem of stability of steel thin-walled beams with lateral and torsional restraints along the spans. Theoretical background of lateral-torsional buckling of an ideal beam with and without restraints preventing out-of-plane buckling is briefly described. In the following chapters the problem of stabilization of steel thin-walled beams by planar members is dealt with. The state of the art in this field is summarized and some open questions are identified. The research in this field could bring new findings about actual behavior of these structural systems.

The rate of stabilization can be quantified using values of shear and rotational stiffness provided to a thin-walled member by a planar member. In the frame of the thesis the problem of torsional restraint given to steel cold-formed members by sandwich panels under load is discussed. In case of the uplift load applied on the sandwich panels the torsional restraint should be verified by experimental analysis. To contribute to this field, experimental verification of rotational stiffness provided to steel cold-formed beams by sandwich panels was proposed and performed. Torsional restraint under no external load as well as under uplift load applied on the panels was investigated. The purpose was to obtain the values of the rotational stiffness provided by planar members. The performed tests indicate significant and practically applicable rate of the torsional restraint even in case of the uplift load on the surfaces of the panels. Utilization of the values of the rotational stiffness might result in more economical, effective and reliable structural design. Selected problems were investigated using numerical modeling in a finite element method based software.