

SBORNÍK

semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí

10.2. a 19.9.2025

Editoři: J. Studnička a I. Prajzlerová

Editoři: J. Studnička a I. Prajzlerová

Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí Vydalo: České vysoké učení technické v Praze

Zpracovala: Fakulta stavební, katedra ocelových a dřevěných konstrukcí a Nadace Františka Faltuse

Kontaktní adresa: prof. J. Studnička, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Tisk: powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha 6

Počet stran: 61, Náklad: 100, První vydání, 2025

ISBN 978-80-01-07462-6 (tištěná verze)

ISBN 978-80-01-07463-3 (online)

OBSAH

Jiří Studnička	Nadace Františka Faltuse	4
Pavel Bartůšek	Styčnickové plechy tlačných prutů	9
Vojtěch Dynybyl	Metody sledování degradace ocelových mostů	11
Ramazan Koca	Tapered Steel Member at Elevated Temperature	13
Jakub Mareš	Lepené spoje skleněných konstrukcí.....	15
Tadeáš Zeman	Tlumič kmitání lanových prvků	17
Aleš Chovanec	Únosnost trapézových plechů za požáru	19
Jan Jochman	Deformace materiálů na bázi dřeva.....	25
Dominika Macháčová	Přípoje trapézových plechů s momentovým překrytím.....	31
Šimon Povolný	Houževnatost ocelových komponent za extrémních podmínek.....	37
Jakub Štěpán	Výsledky experimentů aplikace HFMI na nové a opravené svary	43
Přehled činnosti katedry ocelových a dřevěných konstrukcí v roce 2024		49

NADACE FRANTIŠKA FALTUSE

Jiří Studnička

1. Krátký životopis Františka Faltuse

Dlouholetý profesor ČVUT a nejznámější postava ocelových konstrukcí Československa druhé poloviny dvacátého století František Faltus se narodil 5.1.1901 českým rodičům ve Vídni. Tam také vystudoval střední školu a v roce 1923 s vyznamenáním i Technickou univerzitu.

Po studiích nastoupil u projekční firmy Waagner Biro, kde se zapojil do projektování mostu přes Dunajský kanál. Přitom v roce 1925 také získal na TU Vídeň doktorát za disertační práci „Příspěvek k výpočtu staticky neurčitých konstrukcí“ (Beitrag zur Berechnung statisch unbestimmter Tragwerke).

V roce 1926 se mladý Dr. Ing. Faltus jako český vlastenec a člen Sokola přemístil z Vídně do Plzně, kde nastoupil zaměstnání v konstrukci Škodových závodů. Jako velmi inspirující se pro F. Faltuse ukázala účast na první přípravné schůzi tehdy zakládané inženýrské organizace IABSE v Curychu v roce 1926, kde se velká pozornost věnovala tehdejší novince ve spojování ocelových konstrukcí, svařování elektrickým obloukem. Dr. Ing. Faltus rozpoznal význam novinky i pro praxi stavebních ocelových konstrukcí a po návratu z Curychu inicioval ve Škodovce rozsáhlé výzkumné práce na poli svařování, nejprve související se svařováním tzv. prolamovaných nosníků. Po zdokonalení praktického svařování byl u zrodu tehdy ve světě největšího celosvařovaného příhradového mostu s rozpětím 49,6 m postaveného v areálu Škodovky v Plzni, který byl dohotoven v roce 1931 (z provozních důvodů odstraněn v roce 2019). Toto rozpětí bylo za dva roky překonáno rovněž celosvařovaným obloukovým silničním mostem přes Radbuzu opět v Plzni. Oblouk má rozpětí 51 m a po rekonstrukci a rozšíření mostovky na konci minulého století je i dnes pod názvem Tyršův most v plném provozu.

Ve výzkumu svařování F. Faltus pokračoval celý život a jako významný odborník byl žádán o rady třeba i při svařování tlakové nádoby první československé atomové elektrárny A1 v Jaslovských Bohunicích. Je také autorem známé příručky pro svařování, která posloužila ke studiu mnoha generacím svářečů.

Jako teoreticky zdatný a praxí zocelený odborník neunikl F. Faltus pozornosti vysokého školství. Již v roce 1938 se začala projednávat jeho profesura na Vysoké škole inženýrského stavitelství v Praze, okupace ale jmenování zdržela o sedm let. Na fakultu inženýrského stavitelství ČVUT se tak Faltus dostal až po ukončení války v roce 1945, kdy doslova z ničeho zde vybudoval Ústav ocelových konstrukcí. V roce 1947 také zastával jeden rok funkci děkana fakulty. Po sloučení tří stavebních fakult (fakulty inženýrského stavitelství, fakulty pozemních staveb a architektury a fakulty zeměměřické) do jedné Fakulty stavební v roce 1960 vedl až do roku 1970 katedru ocelových konstrukcí této velké fakulty.

Profesor Faltus byl přirozeně i velmi známou osobou ve světě. Za významnou činnost v IABSE byl jmenován v roce 1975 čestným členem této největší mezinárodní inženýrské organizace, přednášel na univerzitách v USA, Číně, Sovětském svazu a v mnoha zemích Evropy.

I po odchodu z katedry ocelových konstrukcí v roce 1970 stále ještě vedl vědecké aspiranty katedry. Dokud mu zdraví sloužilo, zajímal se o ocelové konstrukce, psal odborné posudky atd. Zemřel po delší nemoci na podzim roku 1989.

2. Založení Nadace

Myšlenka založit Nadaci Františka Faltuse vznikla při přípravě oslav stých narozenin českého nestora ocelových konstrukcí profesora Faltuse, které připadly na 5.1.2001.

Nadace byla oficiálně založena v únoru 2001 s cílem finančně pomáhat studentům Fakulty stavební ČVUT v Praze zaměřeným na ocelové konstrukce. Základní jmění Nadace, více než půl milionu Kč, pocházelo z daru dnes již nežijící dcery profesora Faltuse, paní Ing. Very Dunder, CSc. z Kalifornie, USA. Jmění Nadace se postupně zvyšuje o dary poskytnuté českým ocelářským a stavebním průmyslem.

Činnost Nadace popisují výroční zprávy, účetní uzávěrky a zprávy dozorcí rady pravidelně uveřejňované na webu Nadace <http://www.ocel-drevo.fsv.cvut.cz/nff/>. Příslušné listiny za rok 2023 přetiskujeme pro informaci čtenářů i v tomto sborníku.

3. Výroční zpráva o činnosti Nadace Františka Faltuse v roce 2024

Tato výroční zpráva byla schválena Správní radou. Vyjádření Dozorcí rady k této zprávě je obsaženo v samostatné výroční zprávě této rady.

3.1 Hospodaření Nadace v roce 2024

Nadace měla v roce 2024 bankovní účet u Komerční banky (KB) č. 115-6922800247/0100 využívaný pro příjem darů i výplatu odměn studentům a další účet u Raiffeisen banky (RB) č. 7218050002/5500. Na těchto účtech bylo na konci roku 2024: v RB 3 503,98 Kč a v KB 161 296,04 Kč.

Termínované vklady:

Pro lepší zhodnocení nadačního jmění byly v průběhu roku 2024 finanční prostředky ukládány též na několikaměsíční termínované vklady u těchto bank. Stav termínovaných vkladů na konci roku 2024 ukazuje následující tabulka.

Vklady splatné v roce 2025

Banka	Trvání vkladu	Vklad (Kč)	Délka	Úrok p.a.	Úrok po zdanění Kč
KB	2.10.2024/2.1.2025	1 800 000,00	3 m.	3,25%	
RB	6.11.2024/6.1.2025	1 220 000,00	2 m.	2,75%	
KB	17.10.2024/17.1.2025	262 158,39	3 m.	3,25%	
RB	12.11.2024/12.1.2025	1 310 000,00	2 m.	2,75%	
		4 592 158,39			

Z tabulky plyne, že na termínovaných vkladech bylo na konci roku 2024 uloženo celkem 4 592 158,39 Kč. Na úrocích z termínovaných vkladů získala v roce 2024 Nadace celkem 195 119,23 Kč (z toho 24 724,80 Kč bylo na účty Nadace připsáno teprve na začátku roku 2025).

Dary:

Jako každý rok byly předsedou Správní rady i v roce 2024 osloveny firmy z oblasti projektování a výroby stavebních ocelových konstrukcí s prosbou o dary. Během roku 2024 se takto podařilo shromáždit celkem 375 000,- Kč. Podrobnosti o darech jsou v následující tabulce.

Dary v roce 2024

Datum	Dar (Kč)	Dárce
08.02.2024	20 000,-	ČKAIT
20.02.2024	30 000,-	Doosan Ljentes
15.04.2024	30 000,-	MCE Slaný
27.05.2024	10 000,-	Ing.J.Žižková
27.05.2024	10 000,-	Ing.J.Žižka
02.09.2024	20 000,-	Statika Olomouc
20.09.2024	25 000,-	Pragoprojekt
20.09.2024	15 000,-	SUDOP
25.09.2024	15 000,-	VHSC
26.09.2024	20 000,-	Nordec
02.10.2024	10 000,-	EXCON
08.10.2024	10 000,-	Software Dlubal
14.10.2024	10 000,-	PUDIS
30.10.2024	10 000,-	ČAOK
30.10.2024	20 000,-	Aliaz Liberec
05.11.2024	20 000,-	Allcons
25.11.2024	20 000,-	Metrostav
03.12.2025	10 000,-	KONSTAT
04.12.2025	40 000,-	Valbek
13.12.2025	20 000,-	ČKAIT
19.12.2025	10 000,-	SCIA CZ
Celkem	375 000,-	

Provozní náklady Nadace se v roce 2024 omezily jen na úhradu za účetní práce (7 865,- Kč), a za poplatek KB (891,- Kč). Všichni členové Správní i Dozorčí rady v souladu se statutem Nadace vykonávali svoji činnost bezplatně.

Stav nadačního jmění, který k 31.12.2023 činil 4 469 044,78 Kč, se ke dni 31.12.2024 zvýšil na hodnotu 4 781 683,21 Kč.

3.2 Činnost Nadace v roce 2024 a odměny studentům

Výplaty odměn se řídily pravidly z 1.1.2024.

Odměny pro postgraduální studenty:

Postgraduální studenti katedry vystoupili na dvoudílném Seminári doktorandů katedry ve dnech 5.2.2024 a 20.9.2024 a publikovali výsledky svých výzkumů ve sborníku vydaném k semináři. Za to bylo každému autorovi práce z oboru ocelových konstrukcí vyplaceno 5 000,- Kč: celkem tak autorské odměny činily $6 \times 5\,000 = 30\,000,-$ Kč. Jeden student obdržel odměnu 10 000,- Kč za publikaci v impaktovaném časopise. Postgraduálním studentům bylo na odměnách vyplaceno celkem 40 000,- Kč.

Odměny pro magisterské studenty:

Dva diplomanti katedry ocelových konstrukcí, kteří obhájili práci z oboru ocelových konstrukcí s hodnocením A, a současně byli nejlepší u své komise, byli odměněni částkou 6 000,- Kč. Dalších

sedm diplomantů, kteří obhájili alespoň na úrovni B, bylo po obhajobě práce odměněno částkou 3 000,- Kč. Celkem tak bylo na odměny za státnice vynaloženo 33 000,- Kč. Na stipendia bylo magisterským studentům vyplaceno 33 000,- Kč. Celkem tak bylo studentům magisterského studia vyplaceno 66 000,- Kč.

Odměny pro bakalářské studenty:

Bakaláři katedry ocelových konstrukcí, kteří obhájili závěrečnou práci z oboru ocelových konstrukcí s hodnocením A a B (celkem 15) byli odměněni částkou 3 000,- Kč. Jeden bakalář, který byl nejlepší u své komise a obhájil s výsledkem A, obdržel 6 000,- Kč. Na odměny za státnice bylo vyplaceno celkem 51 000,- Kč. Na stipendia na vypracování bakalářské práce bylo šesti studentům vyplaceno 51 000,- Kč. Za nejlepší bakalářské projekty bylo vyplaceno čtyřem studentům celkem 16 000,- Kč. Celkem tak bakaláři obdrželi 118 000,- Kč.

Ve prospěch studentů katedry tak bylo v roce 2024 vynaloženo celkem 224 000,- Kč.

V Praze 20.3.2025

Prof. Ing. Jiří Studnička, DrSc., předseda správní rady, v.r.

3.3 Zpráva Dozorčí rady

Dozorčí rada Nadace Františka Faltuse (dále DR) potvrzuje, že Správní rada (dále SR) postupovala v roce 2024 podle Statutu NFF, podle Zákona o nadacích a nadačních fondech č. 227 ze dne 3. září 1997 v aktuálním znění od 1. ledna 2014 a změny a doplnění provedených zákonem č. 210/2002 Sb.

V oblasti hospodaření NFF DR rada velmi oceňuje výsledky úsilí k získání darů a organizaci termínovaných vkladů ke zhodnocení nadačního jmění. DR konstatuje, že finanční výkaz předkládaný SR s výpisem z účtů nadačního jmění a výpis termínovaných vkladů odpovídá požadavkům DR o hospodaření nadace. Vzhledem k povinnosti postupovat při výkazu majetku podle Zákona o účetnictví, požaduje DR v dalších letech pro možnost běžné kontroly stavu majetku výpisy z příslušných bankovních účtů.

V oblasti činnosti NFF DR vyjadřuje souhlas s výplatami odměn a stipendií studentům, které byly vyplaceny v souladu s dokumentem „Pravidla Nadace FF pro vyplácení odměn studentům bakalářského, magisterského a prezenčního postgraduálního studia platná od 1.1.2024“, schválenému (per rollam) SR ze září 2023.

V Praze 25. března 2025.

Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc., předseda dozorčí rady, v.r.

Prof. Ing. Michal Jandera, Ph.D., člen dozorčí rady, v.r.

Ing. Jan Samec, Ph.D., člen dozorčí rady, v.r.

3.4 Souhrn veškerých darů přijatých Nadací FF a částek vynaložených na odměny studentům

Rok	Dary (Kč)	Odměny studentům (Kč)
2000	564 494,-	-
2001	81 000,-	20 000,-
2002	45 000,-	-
2003	51 000,-	26 000,-
2004	233 000,-	57 475,-
2005	306 100,-	119 000,-
2006	330 000,-	174 000,-
2007	427 000,-	250 000,-
2008	381 000,-	202 000,-
2009	373 000,-	111 000,-
2010	336 000,-	142 000,-
2011	246 500,-	128 000,-
2012	294 047,-	100 000,-
2013	216 000,-	48 000,-
2014	180 000,-	61 000,-
2015	260 000,-	47 000,-
2016	235 500,-	69 000,-
2017	239 000,-	64 000,-
2018	273 000,-	44 000,-
2019	290 000,-	80 500,-
2020	255 000,-	78 000,-
2021	360 000,-	60 500,-
2022	309 500,-	65 350,-
2023	477 500,-	221 000,-
2024	375 000,-	224 000,-
Celkem	7 138 641,-	2 391 825,-

STYČNÍKOVÉ PLECHY TLAČENÝCH PRUTŮ

GUSSET PLATES OF COMPRESSED MEMBERS

Pavel Bartůšek

Abstract

This work deals with the behaviour of compressed members gusset plates connected on one side (single shear-plane), where the connection eccentricity induces not only compression but also bending of the plate. A new method for calculating buckling resistance is described, based on a collapse mechanism involving two plastic hinges, as proposed by Khoo, Perera, and Albermani [1]. This approach utilizes the principle of virtual work and enables a more realistic assessment of the load-bearing capacity compared to previous methods.

Key words: steel structures, gusset plate connection, compressive resistance, numerical model, buckling

ÚVOD

Styčnickový plech je tradiční konstrukční prvek sloužící ke spojování dvou nebo více ocelových prvků prostřednictvím šroubů, nýtů nebo svarů.

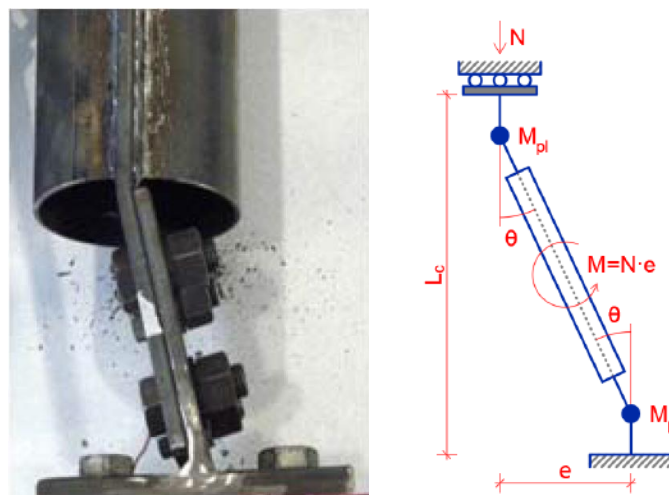
Při zatížení tlakovou silou a velké štíhlosti u tenkých plechů může docházet ke ztrátě stability. Vybočení potom zásadně ovlivňuje návrh styčnickových plechů, přičemž při tlakových zatíženích je tento návrh obzvláště náročný. Kromě posouzení samotného průřezu plechu je nezbytné zohlednit také únosnost spojovacích prostředků (šroubů, svarů) a interakci s připojeným prutem, který může svým vlastním vybočením ovlivnit celkové chování spoje. Disertační práce se zaměřuje na chování excentricky zatížených styčnickových plechů v tlaku, u nichž kromě tlakové síly působí také ohybový moment vzniklý excentricitou ve spoji.

SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Nejnovějším přístupem k výpočtu vzpěrné únosnosti styčnickových plechů je metoda založená na mechanismu porušení, při němž ve styčnicku vznikají dva plastické klouby. Na obr.1 lze vidět uvažovaný mechanismus porušení. Tento přístup jako první představili autoři Khoo, Perera a Albermani [1]. Jímí navržená metoda se zásadně liší od všech předchozích postupů, které tradičně pracovaly s roznosem napětí pod úhlem a s efektivní šířkou.

Nový výpočetní model využívá principu virtuálních prací, přičemž klíčovým krokem je stanovení normálové síly, která iniciuje vznik kinematického mechanismu – tedy vytvoření dvou plastických kloubů. Tato síla je následně porovnávána s kritickou vzpěrnou silou. Jelikož je v důsledku předchozího zatížení osovou silou část únosnosti průřezu plechů již vyčerpána, dochází ke snížení síly potřebné ke vzniku kinematického mechanismu – plastických kloubů, což je zohledněno ve výsledné únosnosti styčnickového plechu.

Tento postup byl zkoumán Veseckým a kol. [2]. I přes relativně menší odchylky predikované únosnosti, vykazoval postup řadu výsledků na straně nebezpečné. To bylo autory přisouzeno zanedbání počáteční excentricity přípoje v návrhovém postupu. Dále nebylo v případě styčnickových plechů proměnné šířky zřejmé, který průřez je rozhodující pro stanovení ohybové tuhosti plechu nebo jeho únosnosti. Výsledky rovněž ukázaly, že délky plastických kloubů u širokých plechů, u nichž nedochází ke zplastizování v celé šířce ale pouze lokálně, by bylo nezbytné pro stanovení únosnosti omezit.



Obr. 1: Styčnickový plech po ukončení experimentu (vlevo) a předpokládaný mechanismus porušení (vpravo) [1]

Fig. 1: Gusset plate after the completion of the experiment (on the left) and assumed collapse mechanism (on the right) [1]

CÍLE VÝZKUMU

Cílem disertační práce je experimentální studie na dvanácti zkušebních vzorcích tlacených trubek s různými tvary styčnickových plechů, úhly jejich napojení na podporující konstrukci, štíhlostmi ztužujících prvků (trubek) a tloušťkami styčnickových plechů pro jednostranné přípoje. Zkoušeny budou i různé třídy oceli, od oceli S355 až po S690. Následně budou vytvořeny numerické modely, které budou validovány na základě výsledků zkoušek. Numerické modely budou sloužit k provedení parametrické studie. Na základě získaných výsledků budou navrženy nové postupy pro stanovení vzpěrné únosnosti styčnickových plechů, případně budou rozšířeny současné návrhové metody.

ZÁVĚR

U excentricky zatížených tlacených styčnickových plechů dochází k interakci mezi tlakem a ohybem a neexistují pro ně zavedené normové postupy. Metoda navržená autory Khoo, Perera a Albermaniho [1] nabízí pokročilý přístup k posouzení vzpěrné únosnosti pomocí plastických kloubů a principu virtuálních prací. Jak bylo ukázáno dříve [2], postup má řadu omezení. Proto bude na základě plánovaných experimentů a numerické studie metoda upravena, aby její výsledky mohly být použity pro spolehlivý návrh tlacených styčnickových plechů různých geometrií.

LITERATURA

- [1] KHOO, X.E., M. PERERA and F. ALBERMANI. Design of Eccentrically Connected Cleat Plates in Compression. *Advance Steel Construction*, 2009, 6(2), 678-687.
DOI: 10.18057/IJASC.2010.6.2.1. Dostupné také z: https://www.ascjournal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=206:vol6no22&catid=113&Itemid=559.
- [2] VESECKÝ, J., M. JANDERA and K. CÁBOVÁ. Compressive Resistance of Eccentrically Connected Gusset Plates. *Journal of Structural Engineering*. 2020, 146(12), 1-23.
DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.000282.
Dostupné také z: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0002821>.

METODY SLEDOVÁNÍ DEGRADACE OCELOVÝCH MOSTŮ

METHODS FOR MONITORING THE DEGRADATION OF STEEL BRIDGES

Vojtěch Dynybyl

Abstract

This paper explores the possibility of using a simple and globally affordable long-term monitoring system developed to monitor the degradation of steel bridges. Only displacements and inclination of bridge structures in the bearing area are measured. The objective of the monitoring system is to detect changes in the behaviour of the structure, to quantify the traffic loading on the bridge and to determine stress spectra to predict the service life of the structure. This information can contribute to the prevention of bridge collapses.

Key words: steel bridges, long-term monitoring, degradation, bearings, inclination, displacement

ÚVOD

Přes vývoj nových technologií, metod výpočtů a měřicích systémů dochází i v dnešní době ke kolapsům mostů. Příčiny těchto kolapsů jsou různé. Jedná se například o povodně, dlouhodobé podemílání spodní stavby, o korozi, únavu, chybu při návrhu či realizaci, o špatnou údržbu, přetížení apod. [1]. Některé kolapsy mostů je možné předpovědět na základě využití dlouhodobého monitoringu zaznamenávajícího degradaci konstrukcí.

Dlouhodobé monitoringy mostů jsou dnes obvykle navrhovány jako rozsáhlé s velkým počtem snímačů a měřených míst. Pomocí těchto monitoringů lze s jistotou spolehlivostí detekovat poškození konstrukcí nebo v některých případech dokonce poškození lokalizovat. Rozsáhlé monitorovací systémy však představují velké finanční náklady pro správce infrastruktur. Z tohoto důvodu není reálné jejich globální využití na velkém množství mostních konstrukcí. Je proto snaha o vývoj jednoduchých a cenově dostupných monitorovacích systémů zajišťujících dostatečně kvalitní výsledky využitelné pro prevenci kolapsu při zásadní degradaci mostu.

MĚŘENÍ DEGRADACE POMOCÍ ODEZVY NA ZATÍŽENÍ

Jedním z možných způsobů sledování degradace mostních konstrukcí je detekovat zvyšování rozkmitů či amplitud napětí či změny průběhů napětí (při pohyblivém zatížení mostních konstrukcí), ke kterým dochází kvůli snižování tuhostí konstrukcí vlivem jejich poškození. Pro toto měření je obvykle nutné využití odporových tenzometrů či snímačů dráhy zachycených na strunu uprostřed rozpětí mostu. Tato měření jsou však pro dlouhodobé monitoringy nevhodná, protože v případě odporových tenzometrů není jistá jejich životnost a změna vlastností v průběhu delších časových intervalů a v případě snímačů dráhy je velmi problematické jejich umístění do prostoru pod mostem (řeka, komunikace). Proto má velký potenciál měření posunů a natočení mostních konstrukcí v oblasti ložisek za předpokladu teoretické závislosti průběhu natočení nosné konstrukce v oblasti ložisek na průběhu napětí či průhybů uprostřed rozpětí.

ZKUŠENOSTI S MĚŘENÍM V LOŽISKÁCH

Při rešerši nebylo nalezeno velké množství měření zabývajících se pouze odezvou ložisek či využívající data o natočení konstrukcí v místě ložisek. Měření v oblasti ložisek je totiž obvykle součástí větších monitorovacích systémů. V rámci výzkumů a projektů na působišti autora se měření v ložiskách u dlouhodobých monitoringů využívá a jsou s ním zkušenosti. Jedná se však

pouze o vodorovné posuny, natočení ložisek (resp. natočení konstrukce v oblasti ložisek) pro měření zpravidla aplikováno není.

Výzkumy chování ložisek ukazují, že je důležité sledovat stav ložisek, protože při zhoršení jejich funkčnosti dochází i ke změně tuhosti v natočení, což může ovlivnit odezvu mostní konstrukce na pohyblivé zatížení [2]. Částečné zablokování ložisek má také vliv na celkové namáhání konstrukce například z důvodů zamezení dilatace od teploty. Bylo zjištěno, že tento defekt ovlivňuje i modální charakteristiky mostu [3].

Byly také zkoumány možnosti detekce poškození mostní konstrukce pomocí vážení vozidel za pohybu za použití natočení mostní konstrukce v oblasti ložisek. Byla numericky modelována poškození (pomocí snížení tuhosti) na mostní konstrukci a byl sledován vliv tohoto poškození na velikost natočení mostní konstrukce v místě ložisek od zatížení jedoucimi vozidly. Při vyšší míře poškození dosahovalo i natočení vyšších hodnot [4].

CÍLE VÝZKUMU

Cílem disertační práce je prověřit možnosti využití sledování degradace mostních konstrukcí jednoduchým a cenově dostupným měřením posunů a natočení konstrukce v oblasti ložisek. Dílčími cíli jsou kvantifikace zatížení a rozkmitu napětí (kdy bude zkoumáno měření v ložiskách v kontextu způsobů měření Weigh in motion) a dále detekce poškození pomocí změn chování sledované mostní konstrukce. Budou prováděny experimenty in situ na různých typech mostů s důrazem na ověření využitelnosti, přesnosti a limitů měření natočení a posunů ložisek při přejezdech vozidel (zpravidla vlaků). Následně budou tyto mosty numericky modelovány, budou simulovány poruchy a bude sledována změna odezvy (průběhů natočení a posunů) v ložiskách při zatížení jedoucimi vozidly na poškozené a nepoškozené konstrukci.

OZNÁMENÍ

Práce je podpořena grantem TAČR TM05000045 – Smart railway infrastructure monitoring system.

LITERATURA

- [1] WARDHANA, K. and F.C. HADIPRIONO. Analysis of Recent Bridge Failures in the United States. Online. Journal of Performance of Constructed Facilities. 2003, roč. 17, č. 3, s. 144-150. ISSN 0887-3828. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2003\)17:3\(144\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2003)17:3(144)).
- [2] PARK, Y. et al. Evaluation of Bridge Support Condition Using Bridge Responses. Online. Structural Health Monitoring. 2019, roč. 18, č. 3, s. 767-777. ISSN 1475-9217. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1475921718773672>.
- [3] FU, Y. and J.T. DEWOLF. Monitoring and Analysis of a Bridge with Partially Restrained Bearings. Online. Journal of Bridge Engineering. 2001, roč. 6, č. 1, s. 23-29. ISSN 1084-0702. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2001\)6:1\(23\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:1(23)).
- [4] OBRIEN, E. J. et al. Identifying Damage on a Bridge using Rotation-Based Bridge Weigh-In-Motion. Online. Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2021, roč. 11, č. 1, s. 175-188. ISSN 2190-5452. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00445-w>.

TAPERED STEEL MEMBER AT ELEVATED TEMPERATURE

OCELOVÝ PRVEK PROMĚNNÉHO PRŮŘEZU ZA ZVÝŠENÉ TEPLoty

Ramazan Koca

Abstract

Ocelové nosníky a sloupy proměnného průřezu se v moderních ocelových konstrukcích osvědčily vhodným využitím materiálu a díky konstrukčním možnostem. Za zvýšené teploty při požáru je chování ovlivněno degradací materiálu, které vede ke kombinaci boulení, vzpěru a klopení. Současná návrhová norma EN1993-1-2:2005 nabízí pravidla pro prizmatické pruty. Rozšíření na prvky s náběhy umožňuje obecná metoda, která ale není rozpracována do návrhových detailů. Její přesnost a rozsah použití také nejsou ověřeny praxí. V práci jsou prezentovány numerické simulace při teplotě oceli 550 °C, které kombinují geometrii náběhů se štíhlostí nosníku.

Key words: tapered beam, lateral-torsional buckling, fire, Eurocode 3, ABAQUS

INTRODUCTION

Tapered steel members are widely used in modern steel structures due to their efficient material usage and favourable structural performance. Under fire conditions, however, their behaviour is significantly influenced by material degradation and complex stability interactions, particularly lateral-torsional buckling (LTB). While Eurocode 3 offers design rules for prismatic members, its application to tapered beams at high temperatures remains limited. To address this, numerical simulations were performed at 550 °C to evaluate the impact of taper ratio and beam slenderness.

LITERATURE REVIEW

Research on the fire performance of tapered steel members has highlighted the inadequacy of directly applying ambient-temperature design formulas, as they tend to yield overly conservative estimates of fire resistance, revealing both a safety margin and a need for calibration to improve efficiency [1]. While Eurocode 3 suggests adapting the General Method for fire design by reducing material strengths, it lacks specific guidance for tapered geometries [1]. These limitations have prompted investigations into the behaviour of non-uniform members under elevated temperatures, including studies on local buckling phenomena that further illustrate the complexity of their fire response [2].

NUMERICAL STUDY

Six tapered steel beams were modelled in ABAQUS. Each had a flange thickness of 10 mm, web thickness of 8 mm, and flange width of 120 mm. Web heights varied linearly from $h_1 = 250$ mm to $h_2 = 475$ – 750 mm, with lengths ranging from 3 to 5 meters, as shown in Fig.1. Ceramic fire pads were assumed to maintain uniform steel temperature of 550 °C. Table 1 summarizes the geometric parameters of the six beams and the ultimate loads obtained from the numerical simulations.

Beams with higher taper and shorter spans (e.g., B1) showed greater strength and stiffness. Longer beams (B3, B6) with higher slenderness exhibited significant reduction in resistance. All fire-affected material properties were modelled using EN 1993-1-2 reduction factors.

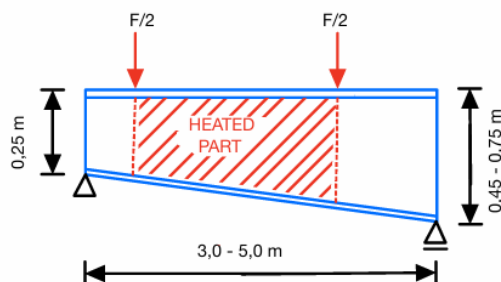


Fig. 2: General geometry of tested beams (B1–B6)
Obr. 2: Obecná geometrie zkoušených nosníků (B1–B6)

Table 1: Summary of Beam Geometry and Results
Tab. 1: Souhrn geometrie nosníku a výsledků

Beam	Length [mm]	h_1-h_2 [mm]	Taper Ratio	Ultimate Load [kN]
B1	3000	250-675	2.70	313.9
B2	4000	250-750	3.00	234.1
B3	5000	250-750	3.00	99.6
B4	3000	250-475	1.90	201.3
B5	4000	250-475	1.90	146.6
B6	5000	250-475	1.90	104.7

CONCLUSION

This study confirms that taper ratio and slenderness are critical parameters influencing LTB performance of tapered beams in fire. Higher taper improves capacity for shorter beams but provides limited benefit for slender spans. The findings will be validated through experimental testing under identical thermal and geometric conditions. Results aim to contribute to improved design guidance for tapered members under fire exposure.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the European Commission, Research Fund for Coal and Steel [RFCS-2022-02-RPJ] “TAPERFRAME – Design of steel portal frames made of web tapered members with and without openings at normal temperature and fire conditions.

REFERENCES

- [1] DAVID, G. Tapered Steel Elements under Fire Situation – Éléments Métalliques à Inertie Variable en Cas d’Incendie. Mémoire de Fin d’Études. Clermont-Ferrand: Polytech Clermont-Ferrand, 2015. Also accessible at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3314.9926>.
- [2] MARAVEAS, C. Local Buckling of Steel Members under Fire Conditions: A review. Fire Technology. 2018. DOI: 10.1007/s10694-018-0768-1. Also accessible from: <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0768-1>.

LEPENÉ SPOJE SKLENĚNÝCH KONSTRUKCÍ

ADHESIVE BONDED JOINTS OF GLASS STRUCTURES

Jakub Mareš

Abstract

Glass adhesive bonded joints are an alternative to more traditional mechanical fasteners that allow for a clean appearance. However, their mechanical properties depend on the type of adhesive, workmanship, temperature and a variety of additional influences. The identification of potential failure modes and their key influencing parameters is of crucial importance for the design of glass-bonded joints. The thesis will focus on understanding the fracture behaviour of these joints and developing reliable design approaches for practical applications.

Key words: glass, adhesives, bonded joints, failure mods, crack

ÚVOD

V současnosti se vývoj v oblasti spojování skleněných konstrukcí zaměřuje na omezení vizuálních dopadů spojů na celkový vzhled stavby. Skleněná konstrukce totiž kvůli přítomnosti konstrukčních spojů často ztrácí dojem transparentnosti a spojitosti, který je jednou z klíčových vlastností, díky níž sklo po staletí nachází využití v mnoha architektonických aplikacích. Rostoucí požadavky na výsledný design vedou inženýry k důsledné optimalizaci rozměrů spojů a k preferenci transparentních materiálů pro spojování skleněných konstrukcí [1].

I když jsou stále nejrozšířenější metodou spojování nosných skleněných konstrukcí spoje s mechanickými spojovacími prostředky, v posledních desetiletích větší pozornost získává technologie lepení. Použitím transparentních lepidel je možné vytvořit dojem vizuálně čisté a spojitě konstrukce [2]. Volba lepidla s dostatečnou duktilitou zároveň přispívá ke zmenšení špiček napětí vyplývajících z geometrie spoje. Většímu rozšíření této technologie v současnosti brání nedostatek informací o jejím chování v průběhu celé životnosti stavby [1].

ÚNOSNOST LEPENÝCH SPOJŮ

Únosnost lepených spojů závisí na jejich způsobu porušení. Pokud je použito lepidlo s nízkou duktilitou a vysokou pevností, vznikají na povrchu skla výrazné špičky napětí. V takovém případě je rozhodující pro únosnost spoje pevnost skla a jeho následný křehký lom, který je pro skleněné konstrukce nežádoucí. Pevnost skla závisí na mnoha parametrech, jako je výskyt mikrotrhlin na povrchu skla, historie skladování a zatěžování skleněné tabule nebo vlastnosti okolního prostředí. Sledování těchto parametrů od výroby až do zabudování do konstrukce bývá obtížné, ne-li nemožné [1].

Nedojde-li k porušení skla, nastává selhání lepené mezivrstvy. To se může stát dvěma základními způsoby: kohezním porušením lepidla nebo adhezní ztrátou soudržnosti na rozhraní mezi lepidlem a sklem. Kohezní porušení se vyznačuje šířením trhliny skrz objem lepidla a lze jej popsat pomocí lomových vlastností lepidla. Tyto vlastnosti jsou výrazně ovlivněny kvalitou provedení lepení či teplotou [3].

Oproti tomu adhezní porušení představuje rozvoj trhliny na rozhraní mezi lepidlem a sklem. Pevné spojení na tomto rozhraní je výsledkem chemických vazeb, mechanických adhezních sil a dalších fyzikálních jevů. Předchozí výzkum prokázal, že adhezní síly při zvýšené teplotě významně klesají a adhezní únosnost spoje navíc závisí na chemických vlastnostech lepeného povrchu, jeho drsnosti

nebo na míře smáčení skla lepidlem [4].

Je zřejmé, že skutečný způsob porušení může být kombinací výše uvedených mechanismů, jako je například porušení skla a současná ztráta adheze, nebo kombinace kohezního a adhezního porušení lepidla. Tato variabilita činí návrh lepených spojů závislým na mnoha klíčových parametrech a činí z něj multikriteriální optimalizační úlohu.

CÍLE A PLÁN VÝZKUMU

Cílem disertační práce je přispět k hlubšímu porozumění mechanického chování lepených spojů skla prostřednictvím kombinace experimentálních zkoušek a pokročilého numerického modelování. V rámci experimentální části výzkumu budou určeny základní lomové vlastnosti lepidel Loctite® EA 9455 a EPOX® G300 pomocí zkoušek malých rozměrů (DCB – double cantilever beam test, ENF – end notch flexure test). Tato lepidla byla vybrána na základě předchozího výzkumu Zikmundové [5] zaměřeného na zkoušky laboratorního stárnutí. Následně budou provedeny zkoušky spojů sklo-sklo v reálných nosnících namáhaných ohybem, případně kombinací smyku a ohybu.

Paralelně s experimentálním výzkumem bude probíhat i implementace numerických modelů v programu Matlab® založených na variačním modelu poškození, principech lomové mechaniky a diskretizace úlohy pomocí metody konečných prvků. Výpočty budou kalibrovány a ověřovány na základě získaných experimentálních dat. Ambicí práce je nejen popsat lomové chování lepených smykových spojů skla v kombinaci smyku a ohybu a při různých teplotách okolního prostředí, ale také formulovat spolehlivý návrhový postup těchto spojů.

OZNÁMENÍ

Výzkum probíhá za podpory Grantové agentury České republiky (Grant No. 23-06016S) a za podpory Studentské grantové soutěže ČVUT v Praze (Grant No. SGS25/121/OHK1/3T/11).

LITERATURA

- [1] HALDIMANN, M., A. LUIBLE and M. OVEREND. Structural Use of Glass. Zürich: Internat. Association for Bridge and Structural Engineering, 2008, 215 s. Structural engineering documents, 10. ISBN 978-3-85748-119-2.
- [2] LAVKO, M. and V. KVOČÁK. Comparison of Mechanical and Adhesive Joints for Structural Glass – A review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, 867(1), 1-7. ISSN 1757-8981, 1757-899X. Dostupné také z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/867/1/012027>.
- [3] HASHEMINIA, S. M et al. Failure Mechanism of Bonded Joints with Similar and Dissimilar Material. Composites Part B: Engineering. 2019, 161(-), 702-709. ISSN 13598368.
- [4] PARK, H. and S. H. LEE. Review on Interfacial Bonding Mechanism of Functional Polymer Coating on Glass in Atomistic Modeling Perspective. Polymers. 2021, 13(14), 2244. ISSN 2073-4360.
- [5] ZIKMUNDOVÁ, M. and M. ELIÁŠOVÁ. Small-Scale Test of Transparent Adhesives in Glass Structures under Shear Stress and Their Ageing Resistance. International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research. 2022, 6(1), 1-7. ISSN 2616-4507. Dostupné také z: <https://thescipub.com/abstract/10.3844/sgamrsp.2022.1.7>.

TLUMIČ KMITÁNÍ LANOVÝCH PRVKŮ

VIBRATION DAMPER FOR CABLE ELEMENTS

Tadeáš Zeman

Abstract

Nowadays, several types of dampers are used for low-frequency damping of stay cables. These include pendulum dampers, louvre dampers, aerodynamic spoilers, friction dampers, and viscous dampers. Each type has its own advantages and disadvantages. As a part of this research, is a plan to conduct small-scale experiments on louvre dampers, optimize them, and simultaneously create a digital computational model. Subsequently, full-scale dampers will be tested.

Key words: vibration damper, guyed masts, dynamic response, cable vibration, wind excitation

ÚVOD

Současné inženýrství čelí stále komplexnějším výzvám zejména v oblasti výstavby vysokých a štíhlých konstrukcí, jako jsou kotvené stožáry, mosty a energetická vedení. Klíčovou roli v jejich stabilitě a dlouhodobé životnosti hrají nosná lana. Ta jsou však dlouhodobě vystavena dynamickým zatížením, která mohou vést k nízkofrekvenční únavě materiálu. Tento jev, často spojený s velkými amplitudami kmitání, představuje jednu z nejzásadnějších hrozeb pro integritu a bezpečnost těchto kritických infrastruktur. Cílem začínajícího výzkumu je vyvinout nový typ tlumiče kmitání, tzv. žaluziový tlumič.

SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Nízkofrekvenční kmitání, jako je například galloping (kmitání vyvolané aerodynamickými silami, často zesílené námrazou), nebo vibrační odezva na silné poryvy větru či seismickou aktivitu, může vést k postupnému poškození lan a jejich spojovacích prvků. I když tato kmitání probíhají s relativně malou frekvencí, jejich velká amplituda způsobuje značné cyklické namáhání, které postupně snižuje únavovou životnost materiálu. Důsledkem může být nejen nutnost nákladných oprav, ale v extrémních případech i katastrofické selhání konstrukce, obr. 1.

Touto problematikou se zabývá několik výzkumných skupin jak v zahraničí [1], tak v ČR [2].

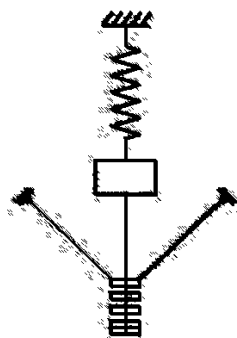


Obr. 3: Pohled na poškozený kyvadlový tlumič
Fig. 3: A view of the broken pendulum damper

Na obr. 1 je vidět havarované kyvadlo kyvadlového tlumiče. Poškození vzniklo třením lana kyvadla o rám konstrukce, kde jsou také patrné stopy kontaktu.

PLÁNOVANÉ EXPERIMENTY

V rámci výzkumu nového žaluziového tlumiče, obr. 2, jsou plánované experimenty zaměřené na optimalizaci tlumiče a vytvoření validaci numerického modelu. Zkoušky budou rozděleny do několika skupin; první skupina zkoušek bude sloužit pro ověření vlastností použitých materiálů, poté dojde k testování jednotlivých komponent nového typu tlumiče. Zde se bude ověřovat funkčnost klíčových mechanismů, jako jsou třecí plochy a ložiska. Následně bude probíhat testování žaluziového tlumiče v menším měřítku, u nějž se bude ověřovat funkčnost navrženého konceptu tlumiče, a získají se prvotní data pro validaci digitálního modelu.



Obr. 2: Schéma žaluziového tlumiče
Fig. 2: Diagram of the louvre damper

ZÁVĚR

Výzkum a vývoj efektivních tlumičů kmitání pro nosná lana je klíčový pro zajištění dlouhodobé stability a bezpečnosti moderních vysokých konstrukcí, jako jsou kotvené stožáry. Jak ukazuje případ poškozeného kyvadlového tlumiče, současná řešení čelí výzvám souvisejícím s provozními podmínkami a nízkofrekvenční únavou materiálu způsobenou, zejména vlivem jevů jako je kupř. galloping. Proto je nezbytný další výzkum a optimalizace tlumicích systémů. Plánované experimenty se žaluziovými tlumiči, od detailní charakterizace materiálů přes testování komponent a modelů v malém měřítku, až po tvorbu a validaci numerického výpočetního modelu, představují ucelený přístup k vývoji robustních a spolehlivých řešení.

OZNÁMENÍ

Výzkum je podpořen operačním programem Jana Amose Komenského, Výzva č. 02_23_020 Mezisektorová spolupráce.

LITERATURA

- [1] MAGUDULA, M. K., 2001. Dynamic Response of Lattice Towers and Guyed Masts. ASCE Publications. ISBN 9780784475119.
- [2] PIRNER, M. a O. FISCHER, 2010. Dynamika ve stavební praxi. ČKAIT. ISBN 978-80-87438-18-3.

ÚNOSNOST TRAPÉZOVÝCH PLECHŮ ZA POŽÁRU

RESISTANCE OF TRAPEZOIDAL SHEETING IN FIRE

Aleš Chovanec

Abstract

This study investigates the performance of two types of fasteners: self-drilling screws with washers and powder-actuated fasteners under both ambient and elevated temperatures. Experimental tests were carried out for five temperatures (20, 350, 500, 600, and 700 °C) and two sheet thicknesses (0.75 and 1.5 mm), with four repetitions per configuration. The obtained data offer a better understanding of the mechanical response of these connections across the considered temperature range. The paper also presents two large-scale fire experiments of a lightweight roof with trapezoidal sheeting. Both fire tests resulted in a failure of the sheeting connection.

Key words: fire resistance, cold-formed steel, trapezoidal sheeting, fastener, catenary action

ÚVOD

Trapézové plechy vykazují při požáru výrazné snížení ohybové únosnosti, zejména kvůli jejich malé tloušťce. Plech po vyčerpání ohybové únosnosti přechází do tzv. membránového působení. Membránové působení je charakterizováno velkými deformacemi v průběhu zatěžování, což způsobí značná namáhání kotevních prostředků, které přenáší síly do podpůrné konstrukce. Právě tyto přípoje často rozhodují o celkové únosnosti trapézového plechu za požáru a představují kritický prvek návrhu celé konstrukce.

ZKOUŠKY PŘÍPOJŮ TRAPÉZOVÝCH PLECHŮ

Zkoušky přípojů samovrtného šroubu a nastřelovacího hřebu probíhaly v laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze v roce 2024. Byl zkoušen samovrtný šroub EJOT JT2-8-5,5x35 V16 a nastřelovací hřeb Hilti X-ENP-19 L15. Průměr použitého šroubu činil 5,46 mm s podložkou o průměru 16 mm. Hřeb měl průměr 4,5 mm. Oba typy spojovacích prostředků jsou znázorněny na obr. 1. Přípoje spojovaly dva plechy. Jeden z nich představoval trapézový plech tl. 0,75 a 1,5 mm z oceli S320GD+Z, druhý podporový ocelový nosník tl. 6 mm z oceli S235. Vzdálenost přípoje od okraje plechu činila 30 mm. Byl použit zkušební stroj MTS Elite Qtest 100 a laserový extenzometr s reflexními páskami pro měření vzájemného posunu plechu a podpůrné konstrukce. Přípoj byl zatěžován smykem rychlostí 1 mm/min. do porušení přípoje nebo do posunu plechů cca 40 mm. V případě zvýšené teploty byla použita elektrická válcová pec Elsklo CEP RH1. Kontrola teploty probíhala pomocí termočlánku, který byl umístěn v místě přípoje mezi plechy. Druhý termočlánek byl umístěn v el. peci. Zkušební sestava za běžné a zvýšené teploty je na obr. 2. Nejprve probíhalo zahřívání vzorku na požadovanou teplotu, ustálení požadované teploty trvalo zhruba 30 min. Po dosažení a ustálení teploty byl přípoj zatěžován posunem 1 mm/min. do porušení přípoje, resp. do celkové deformace cca 40 mm. Oba typy přípojů byly zkoušeny za pěti různých teplot (běžná teplota, 350, 500, 600 a 700 °C), proběhla čtyři opakování každé zkoušky.



Obr. 4: Zkoušený samovrtný šroub a nastřelovací hřeb
Fig. 4: Tested self-drilling screw and powder-actuated fastener



Obr. 2: Zkoušky přípojů za běžné teploty (vlevo) a teploty 600 °C (vpravo)

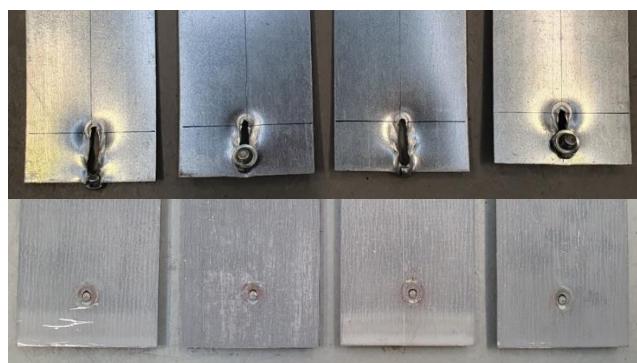
Fig. 2: Joints testing at normal temperature (left) and at 600 °C (right)

Typickým způsobem porušení samovrtného šroubu bylo v případě tenkého plechu 0,75 mm za běžné teploty a 350 °C otláčení, za zvýšených teplot 500, 600 a 700 °C otláčení nebo otláčení a následné vylomení hlavy šroubu za výrazné deformace, viz obr. 3. U plechu tl. 1,5 mm docházelo k porušení stříhem šroubu za všech zkoušených teplot. Přípoj nastřelovacím hřebem pro tenké plechy tl. 0,75 mm vykazoval porušení otláčením za všech teplot. V případě zvýšené teploty a plechu tl. 1,5 mm nastalo za běžné teploty porušení otláčením, za zvýšených teplot stříhem hřebu, viz obr. 4.



Obr. 3: Způsob porušení šroubu a plechu 0,75 mm: 350 °C (nahore) a 600 °C (dole)

Fig. 3: Failure modes for 0.75 mm sheet with self-drilling screw: 350 °C (top), 600 °C (bottom)



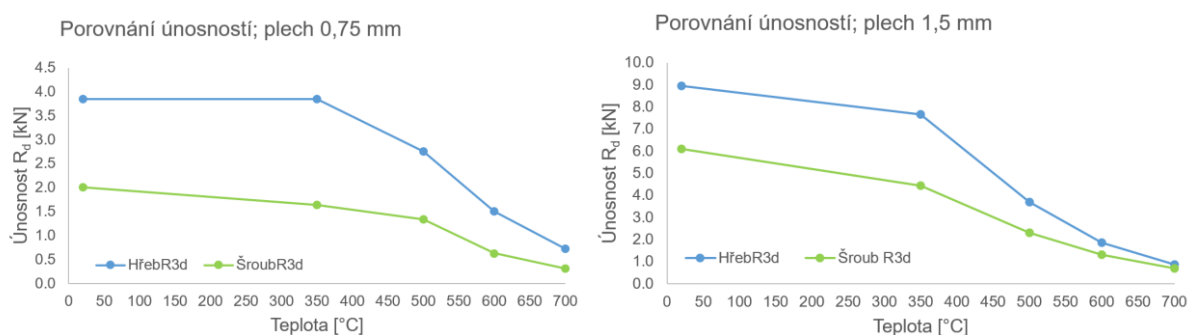
Obr. 4: Způsob porušení hřebu a plechu 1,5 mm: běžná teplota (nahore) a 600 °C (dole)

Fig. 4: Failure modes for 1.5 mm sheet with shot nail: ambient (top), 600 °C (bottom)

Výpočet návrhové únosnosti R_d vycházel z postupu uvedeného v dokumentu ECCS [1], který doporučuje uvažovat únosnost R_{obs} zjištěnou zkouškami jako maximum celkové deformace z intervalu (0; 3 mm). Lu a kol. ve svém článku [2] doporučuje uvažovat mezní deformaci 20 mm za běžné teploty a 15 mm za zvýšené teploty. Autor tohoto textu zjistil, že zvýšení hodnoty intervalu mezní deformace nevede vždy k vyšší návrhové únosnosti kvůli zpravidla větším rozptylu hodnot $R_{obs,i}$, což se projeví ve větší hodnotě směrodatné odchylky s , která vstupuje do výpočtu. V tomto výzkumu bylo uvažováno s mezní deformací 3 mm posunu spoje. Síla R_m je střední hodnota únosností $R_{obs,i}$ se zohledněním skutečné tloušťky ocelového jádra plechu a materiálových vlastností použité oceli. Materiálové vlastnosti oceli vstupující do výpočtu byly zjištěny tahovými zkouškami. Součinitel k zohledňuje počet zkoušených vzorků, s je výběrová směrodatná odchylka a γ_{M2} je dílčí součinitel spolehlivosti:

$$R_d = (R_m - k \cdot s) / \gamma_{M2} \quad (1)$$

Výsledné hodnoty návrhové únosnosti v závislosti na teplotě jsou zobrazeny na obr. 5. Je vidět, že nastřelovací hřeb má vyšší návrhovou únosnost ve všech měřených teplotách a obou tl. plechů než samovrtný šroub. U tenkého plechu 0,75 mm a samovrtného šroubu bylo navíc při teplotách 500 °C a vyšších pozorováno porušení vytržením hlavy šroubu, což představuje nežádoucí způsob porušení z hlediska požárního návrhu.



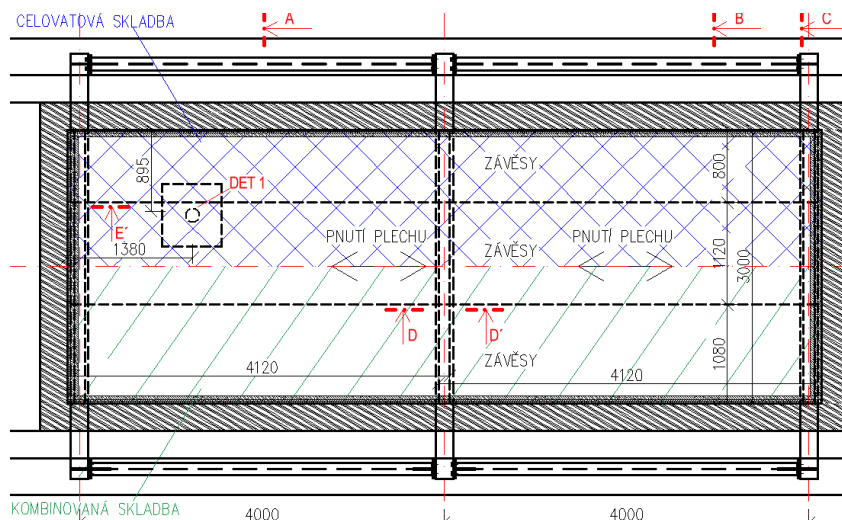
Obr. 5: Návrhová únosnost samovrtného šroubu a nastřelovacího hřebu při zvýšené teplotě

Fig. 5: Design resistance of self-drilling screws and shot nails at elevated temperatures

POŽÁRNÍ ZKOUŠKA PLECHU 85/280/0,75

První požární zkouška proběhla v červnu 2024 v požární zkušebně Pavus ve Veselí nad Lužnicí. Byl zkoušen lehký střešní plášť na trapézovém plechu 85/280/0,75 mm. Výška plechu byla 85 mm, rozteč vln 280 mm a tl. 0,75 mm. Trapézový profil měl podélnou výztuhu horní pásnice a každé stojiny. Jednalo se o 2x prostý nosník o rozponu 2x4 m s překrytím plechů na vnitřní podpore 120 mm. Půdorys vzorku je na obr. 6. Jednotlivé tabule plechu byly vzájemně spojeny samovrtnými šrouby průměru 4,8 mm po vzdálenosti 500 mm. U okraje vzorku byly použity výztužné a lemovací L profily tloušťky 1 mm. Ve třetině rozpětí jednoho pole byl vytvořen otvor průměru 150 mm se středem uprostřed horní pásnice, okolo otvoru byl použit výztužný plech 650x680x1,25 mm, kotvený samovrtnými šrouby průměru 5,5 mm do horní pásnice sousedních vln trapézového plechu. Plech byl kotven k podporám šrouby EJOT JT2-8-5,5x35 V16 (šroub průměru 5,5 mm s podložkou průměru 16 mm), 2 šrouby v každé vlně s roztečí mezi šrouby 60 mm. Jednalo se o stejný typ šroubu, který byl použit u zkoušek přípojí. Ocelové podpory z 2xUPE270+UPE120 byly vysunuty z pece a spojeny v rám rozpěrami z HEB 160. Šířka podpor pro uložení plechu byla 120 mm. Celý rám byl kluzně uložen na teflonových deskách, aby bylo možné měřit relativní deformaci rámu pomocí tenzometrů umístěných v polovině délky HEB profilů. Byly použity dvě varianty skladby střešního pláště, které se lišily použitou tepelnou izolací: 1) nehořlavý tepelný izolant z minerálních vláken (podélná orientace vláken, objemová hmotnost 100 kg/m³) tl. 2x40 mm a hořlavý tepelný izolant z EPS tl. 80 mm a 2) nehořlavý tepelný izolant z minerálních vláken tl. 2x80 mm. Skladba

dále obsahovala parozábranu a fóliovou hydroizolaci, v části s EPS také skelné vlákno mezi hydroizolací a tepelným izolantem z EPS. V jednom poli bylo zatížení vnášeno z horní strany vzorku pomocí ocelových desek. Zatížení v druhém poli bylo umístěno na horní povrch vzorku a závěsy Hilti MF TSH M8. Ocelové desky byly na horním povrchu vzorku rozmístěny tak, aby vlny trapézového plechu byly rovnoměrně zatíženy. Využití plechu činilo 38 %. Zkušební pec byla vytápěna soustavou naftových hořáků, teplota v peci byla regulována tak, aby odpovídala normové požární křivce. Při zkoušce se měřily vodorovné reakce v podporách, deformace spodní pásnice plechu uprostřed rozpětí, prokluz krajních podpor, teplota plechu uprostřed rozpětí a v místě přípojů, teplota podpor a teplota skladby střešního pláště (mezi jednotlivými vrstvami, spára i plocha).

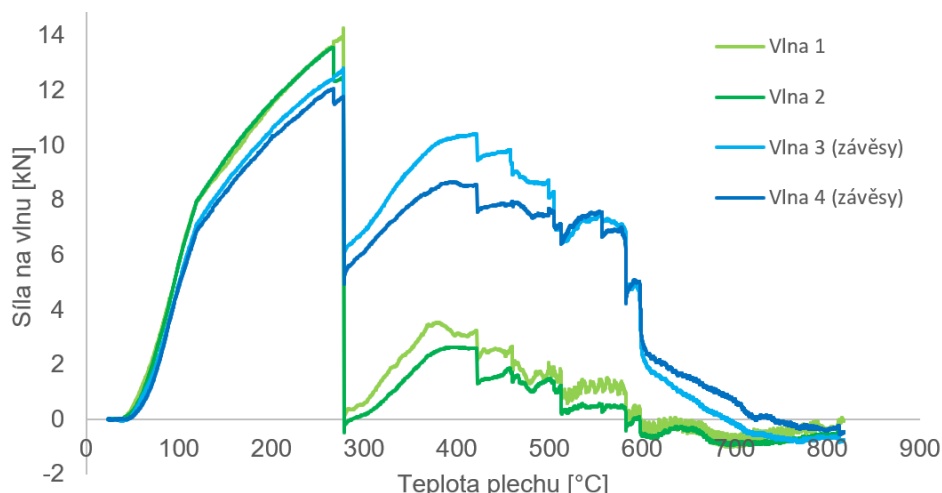


Obr. 6: Půdorys vzorku
Fig. 6: Plan view of the tested specimen

Zkouška byla ukončena ve 29. minutě zřícením vzorku z levé podpory do pece. Většina šroubů byla porušena vylomením hlavy šroubu za výrazné deformace. Největší naměřená deformace otvoru plechu v místě přípoje byla cca 80 mm, viz obr. 7 vlevo. Na obr. 8 je uveden graf vodorovné síly na 1 vlnu plechu (na 2 přípoje) v závislosti na teplotě plechu uprostřed rozpětí. Vodorovná síla na 1 vlnu byla spočítána jako zjištěná reakce rámu vydělená počtem vln na polovině délky podpory. Maximální tahové síly v rámu (plech se pohybuje směrem ven z pece kvůli teplotní roztažnosti) bylo dosaženo cca ve 2. minutě zkoušky, poté je patrný náhlý pokles síly z důvodu ustřížení šroubů pravděpodobně v místě kotvení dvou plechů do ocelové podpory. Max. tlakové síly (pohyb plechu směrem do pece) bylo dosaženo ke konci zkoušky. Teplota plechu u šroubů dosahovala v závěru zkoušky u krajní i vnitřní podpory zhruba 700 °C.



Obr. 7: Vzorek po zkoušce
Fig. 7: Specimen after test



Obr. 8: Vodorovná síla na 1 vlnu plechu v závislosti na teplotě

Fig. 8: The horizontal reaction per one rib of the sheeting as a function of temperature

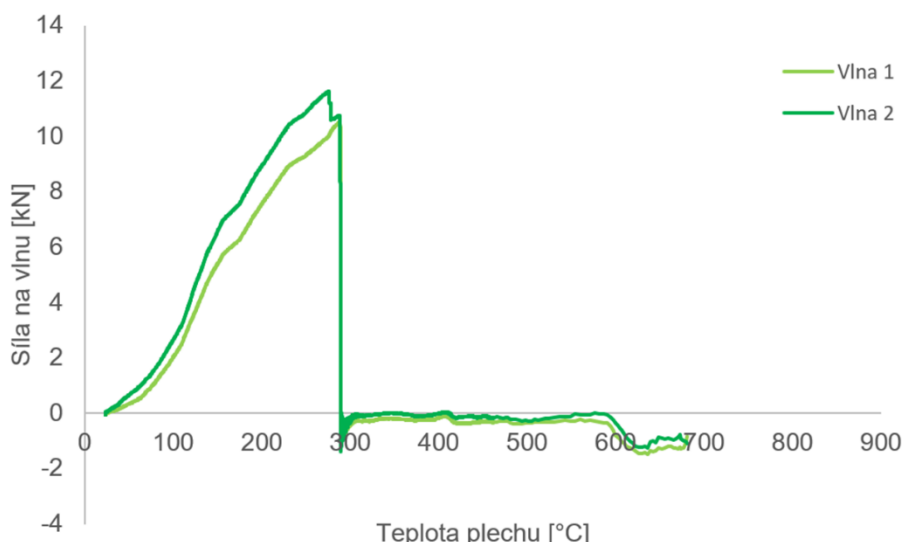
POŽÁRNÍ ZKOUŠKA PLECHU 150/280/1,5

Druhá požární zkouška proběhla v září 2024 a věnovala se chování lehkého střešního pláště na vysokém trapézovém plechu 150/280/1,5 mm o rozponu 6 m. Zkouška byla zaměřena především na chování samovrtných šroubů a trapézového plechu za zvýšené teploty. Uspořádání zkoušky bylo obdobné první požární zkoušce, podpory byly opět vysunuty z pece a spojeny v tuhý rám. Byly použity shodné šrouby EJOT JT2-8-5,5x35 V16, 2 šrouby v každé vlně. Skladba střešního pláště byla v tomto případě tvořena nehořlavým tepelným izolantem z minerálních vláken (podélná orientace vláken) tl. 2x80 mm, parozábranou a fóliovou hydroizolací. Vrstvy tepelné izolace byly kladeny s přesahem 200 mm na obě strany. Celkové charakteristické zatížení při zkoušce bylo 2,75 kN/m², což odpovídá využití plechu 44 %, vzorek byl zatížen 24 ks ocelových svařenců o hmotnosti 160 kg. Teplota v peci byla opět regulována tak, aby odpovídala normové požární křivce. Při zkoušce se měřily stejné veličiny jako u první zkoušky. Zkouška byla ukončena ve 14. min. dosednutím plechu na podpory v peci, které byly instalovány požární zkušebnou kvůli zamezení pádu vzorku do pece. Všechny šrouby byly porušeny stříhem, viz obr. 9 vpravo. Na obr. 10 je uvedena závislost vodorovné síly (na 1 vlnu plechu, t.j. na 2 spojovací prostředky) na teplotě plechu uprostřed rozpětí. Průběh grafu má podobný charakter jako u první požární zkoušky. Maximální tahové síly v rámu bylo opět dosaženo cca ve 2. minutě zkoušky, poté je patrný náhlý pokles síly. Max. tlakové síly v rámu bylo dosaženo ke konci zkoušky.



Obr. 9: Vzorek po zkoušce

Fig. 9: Specimen after test



Obr. 10: Vodorovná síla na 1 vlnu plechu v závislosti na teplotě

Fig. 10: The horizontal reaction per one rib of the sheeting as a function of temperature

ZÁVĚR

Pomocí zkoušek přípojů se zjistilo chování samovrtného šroubu a nastřelovacího hřebu za běžné a zvýšené teploty. Nastřelovací hřeb má vyšší návrhovou únosnost ve všech měřených teplotách a obou tl. plechů než samovrtný šroub. Velkorozměrové požární zkoušky prokázaly, že přípoje tvoří kritické místo návrhu za zvýšených teplot. K porušení alespoň části šroubů došlo v prvních minutách obou zkoušek. U první zkoušky došlo k porušení většiny šroubů vylomením hlavy šroubu za výrazné deformace, což zajistilo membránové působení po dosažení ohybové únosnosti profilu. U druhé zkoušky profilu větší tloušťky se šrouby porušily stříhem a k významnému membránovému působení tak nedošlo. Požární zkoušky budou sloužit k validaci numerického modelu, který se následně použije pro parametrickou studii s těmito proměnnými parametry: využití profilu od zatížení teplotou, průřez trapézového plechu, tloušťka plechu, statické schéma, resp. rozpon plechu a způsob připojení na podpůrnou konstrukci. Cílem práce je vytvořit návrhový postup pro přímé stanovení požární odolnosti lehkého střešního pláště na trapézovém plechu (dané parametry, při kterých je mezní stav R možné považovat za splněný pro určitý počet minut). Bude se také jednat o podklad pro tvorbu rozšířené aplikace výsledků požárních zkoušek pro posouzení požární odolnosti lehkého střešního pláště s nosným trapézovým plechem.

OZNÁMENÍ

Výzkum vzniká za finanční podpory České agentury pro standardizaci v rámci rozborového úkolu „Požární odolnost lehkých střešních plášťů“ a grantu SGS22/140/OHK1/3T/11.

LITERATURA

- [1] The Testing of Connections with Mechanical Fasteners in Steel Sheeting and Sections. ECCS, 2009. ISBN: 92-9147-000-91.
- [2] LU, W., ZHONGCHENG, M., MÄKELÄINEN, P. and J. OUTINEN. Design of Screwed Steel Sheeting Connection at Ambient and Elevated Temperatures. Thin-Walled Struct. 49, 2011, 1526-1533.

DEFORMACE MATERIÁLŮ NA BÁZI DŘEVA

DEFORMATION OF WOOD-BASED MATERIALS

Jan Jochman

Abstract

This study presents a deep-learning approach for predicting long-term deformation of wood-based panels—specifically oriented strand board (OSB) and multi-layer solid wood panels (SWP). A hybrid one-dimensional CNN + LSTM network is trained on time-series measurements of mid-span deflection together with air temperature and relative humidity obtained from a multi-year bending experiment. To accelerate learning while preserving key information, only local minima and maxima of the deformation signal are retained. The model is evaluated under several training/validation splits and its performance is qualitatively compared with a classical logarithmic regression previously applied to the same dataset. Results show that the deep network captures both slow creep trends and rapid climate-induced fluctuations more effectively than the regression baseline. The paper describes network architecture, data pre-processing, and assessment methodology.

Key words: wood-based materials, deformation, convolutional neural network, machine learning

ÚVOD

Deformace dřeva a materiálů na bázi dřeva představují komplexní proces ovlivněný změnami vlhkosti a teploty vzduchu. Kromě elastických složek zahrnují i viskoelastické a mechano-sorpční dotvarování, která se výrazně projevují při dlouhodobém zatížení za proměnlivých klimatických podmínek. V rámci předchozího výzkumu byly tyto vlivy analyzovány na základě dlouhodobého experimentu a pro predikci průhybu (deformace) byl použit logaritmický regresní model [1]. Ačkoliv regresní přístupy poskytují spolehlivé výsledky při modelování dlouhodobých trendů, ukázala se jejich omezená schopnost reagovat na dynamické změny v klimatických podmínkách, jako jsou náhlé či postupné výkyvy vlhkosti nebo teploty. Tyto změny přitom mohou zásadně ovlivnit rychlost i charakter deformací.

Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto využít metody strojového učení, které umožňují lépe zachytit nelineární a proměnlivé vztahy mezi vstupními faktory a výslednou deformací. V této studii je prezentován přístup založený na hluboké neuronové síti typu CNN+LSTM, která kombinuje schopnost konvolučních vrstev extrahovat prostorové vzory ze vstupních dat s paměťovou kapacitou rekurentní sítě LSTM určenou pro zpracování časových řad. Model je trénován na reálných experimentálních datech, přičemž vstupními veličinami jsou relativní čas, teplota a vlhkost vzduchu, a cílovou proměnnou je průhyb (deformace). Pro urychlení výpočtu a zefektivnění procesu učení byla navíc provedena selekce dat, kdy byla využita pouze lokální minima a maxima deformací, což modelu umožnilo soustředit se na klíčové změny v časových řadách.

Dílním cílem disertační práce je ověřit, zda lze pomocí strojového učení přesněji predikovat deformace dřevěných materiálů ve vztahu ke klimatickým podmínkám, a zda tyto modely mohou nabídnout vyšší flexibilitu a přesnost oproti klasickým analytickým metodám používaným v inženýrské praxi.

METODY NEURONOVÝCH SÍTÍ PRO PREDIKCI DEFORMACÍ

Predikce časově závislých deformací materiálů (např. creep neboli dotvarování, případně jiné viskoelastické jevy) je komplexní úlohou, kterou lze řešit pomocí různých typů neuronových sítí.

V této části stručně představíme hlavní typy používané v literatuře – vícevrstvý perceptron (MLP), konvoluční neuronové sítě (CNN) a dlouhou krátkodobou paměť (LSTM).

a) Vícevrstvý perceptron (MLP): historicky patří MLP (resp. obecně umělé neuronové sítě) k prvním modelům zkoumaným pro predikci dotvarování ve stavebních materiálech. Například Reda Taha et al. [2] ukázali, že ANN model dokáže s výbornou přesností predikovat dotvarování zdiva při zohlednění velkého počtu vstupních faktorů, kde tradiční matematické modely selhávaly. V současnosti se MLP uplatňuje například k predikci celých křivek dotvarování materiálů – Gu a Sang [3] použili hluboký MLP model k predikci průběhu dotvarování kompozitu na základě jeho mikrostruktury, přičemž dosáhli vyšší přesnosti než tradiční přístupy. To ilustruje schopnost MLP zachytit komplexní vztahy mezi materiálovými parametry a časově závislou deformací. Obecně však samostatný MLP nebývá preferovaným nástrojem pro predikci dlouhodobých časových řad, neboť postrádá mechanismus pro uchování historie a neefektivně by musel zpracovávat velmi dlouhé vstupní vektory. Při výrazném prodlužování vstupních sekvencí totiž roste počet parametrů sítě, což zvyšuje riziko přeučení a prodlužuje dobu učení.

b) Konvoluční neuronová síť (CNN): CNN je typ sítě určené původně pro analýzu obrazů, využívající konvoluční vrstvy s filtrováním, které automaticky extrahuje lokální vzory z dat. Konvoluční jádra sdílejí váhy napříč vstupem, což dramaticky snižuje počet parametrů a umožňuje efektivně rozpoznávat opakující se rysy. V kontextu časových řad lze CNN aplikovat analogicky – například 1D konvolucí na sekvencí data – a tím odhalit lokální časové vzory či frekvenční složky v deformacích. Výhodou je, že CNN se dokáže naučit skryté abstraktní příznaky v datech, které by jinak nebyly zjevné. Nasazení CNN pro predikci dlouhodobých deformací materiálů je relativně nové, ale již bylo úspěšně demonstrováno. Zhu a Wang [4] jako jedni z prvních aplikovali konvoluční sítě na predikci dotvarování a smršťování betonu. Jejich CNN modely trénované na rozsáhlé databázi creepových a smršťovacích křivek (906 zkoušek pro creep, 1114 pro smršťování) dosáhly vysoké přesnosti predikce a umožnily navrhnout uživatelskou podprogramovou funkci pro simulaci těchto jevů v softwaru ABAQUS. Konvoluční přístup se v tomto případě osvědčil jako rychlá a spolehlivá metoda predikce dlouhodobých deformací betonových prvků. Úspěch CNN v této doméně je podmíněn její schopností naučit se relevantní charakteristiky průběhu deformace (např. tvar křivky dotvarování) z dat, obdobně jako se učí rozeznávat tvary a obrazce v počítačovém vidění. CNN však sama o sobě neuchovává informaci o sekvencí závislosti nad rámec šířky svého konvolučního filtru – neumí tedy přímo modelovat dlouhodobou paměť systému. Proto se v úlohách časových řad CNN často kombinuje s rekurentními prvky, případně se navrhuje hlubší architektura zvyšující recepční okno.

c) Dlouhá krátkodobá paměť (LSTM): rekurentní neuronové sítě (RNN) jsou navrženy pro sekvencí data – opakovaně zpracovávají vstupy v čase a udržují vnitřní stav (paměť), který reprezentuje informace o minulých stavech. Klasické RNN však trpí problémy mizejícího a explodujícího gradientu při učení dlouhých sekvencí, což omezuje jejich schopnost zachytit dlouhodobé závislosti. Tento nedostatek řeší architektura Long Short-Term Memory (LSTM), kterou představili Hochreiter a Schmidhuber [5]. LSTM zavádí do každé buňky sítě vnitřní stav s lineární transformací (tzv. cell state) a sadu řídicích bran (vstupní, výstupní a zapomínací brána), které regulují průtok informací. Tím LSTM efektivně eliminuje problémy klasických RNN s gradienty a umožňuje učit se závislosti i na velmi vzdálených časových okamžicích. Funkčnost je taková, že LSTM si může “pamatovat” důležité rysy signálu po libovolně dlouhou dobu, pokud je zapomínací brána nevymaže. Díky těmto vlastnostem se LSTM staly populární pro modelování časově závislých deformací konstrukcí. V literatuře najdeme řadu příkladů využití LSTM pro predikci dotvarování a posunů: např. Liu et al. [6] použili LSTM (s předzpracováním PCA a klouzavým průměrem) k úspěšné predikci dlouhodobých deformací betonové hráze Lijiaxia. LSTM modely obecně prokazují lepší přesnost než klasické statistické modely při predikci neustálených, nelineárních a zátěžově závislých deformací konstrukcí. Jejich výhodou je právě schopnost automaticky skloubit informace o aktuálním stavu (krátkodobá paměť) s trendem akumulovaným v čase (dlouhodobá paměť), což je pro creep a podobné jevy klíčové. Navzdory schopnosti zachytit složité časové vzory, efektivní využití modelu stále závisí na kvalitě a množství dostupných

trénovacích dat. Nevýhodou LSTM může být vyšší počet parametrů a delší trénování (kvůli složitým branám) v porovnání s jednoduššími modely – proto vznikly i jejich zjednodušené varianty.

VYTVOŘENÝ PREDIKTIVNÍ MODEL: CNN + LSTM

Pro predikci dlouhodobých deformací dřeva zvolil autor hybridní neuronový model typu CNN + LSTM, který kombinuje schopnosti extrakce prostorových rysů pomocí konvoluce s dlouhodobou pamětí rekurentní architektury. Tento přístup umožňuje zachytit jak krátkodobé výkyvy (např. reakci na denní změny vlhkosti), tak i dlouhodobé trendy (např. creep při konstantním zatížení a kolísajícím klimatu).

Na vstupu modelu byly zpracovány multivariantní časové řady zahrnující relativní čas od začátku experimentu, deformaci a odpovídající klimatické podmínky (teplotu a relativní vlhkost). V první fázi byly pomocí 1D konvolučních vrstev extrahovány lokální příznaky, které zachycují rychlé změny ve vstupních signálech. Tato fáze zároveň sloužila jako forma redukce dat a odstranění šumu, což výrazně snížilo výpočetní náročnost následujících vrstev.

Na výstup konvoluční části byla navázána vrstva LSTM, která zajišťovala modelování časových závislostí a uchovávání dlouhodobého kontextu. LSTM byla schopna naučit se akumulaci deformací vlivem vlhkosti a zatížení v čase, a tím postihnout jevy jako viskoelastické či mechano-sorpční dotvarování.

Zvolená architektura byla oproti jednodušším modelům (např. MLP nebo základní model CNN) výhodná především v tom, že umožňovala současně rozpoznávat lokální dynamiku i dlouhodobé vzory bez potřeby ručního definování zpožděných vstupů nebo zvyšování hloubky sítě. Oproti základnímu modelu LSTM navíc došlo ke snížení počtu parametrů a urychlení trénování díky efektivnímu předzpracování vstupních signálů konvoluční částí.

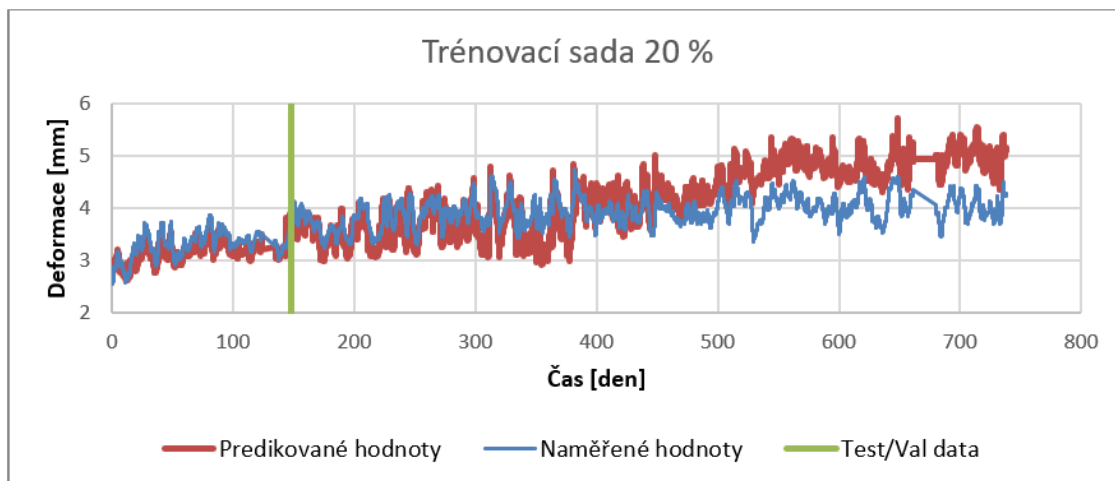
Volba modelu CNN + LSTM byla motivována také dostupným množstvím dat. Zároveň bylo cílem udržet přiměřenou generalizační schopnost bez rizika přeučení. Model se tak ukázal jako optimální kompromis mezi složitostí, přesností a výpočetní efektivitou při predikci nelineárních deformací materiálů v závislosti na čase a podmínkách prostředí.

VYHODNOCENÍ MODELU A FUNKČNOST

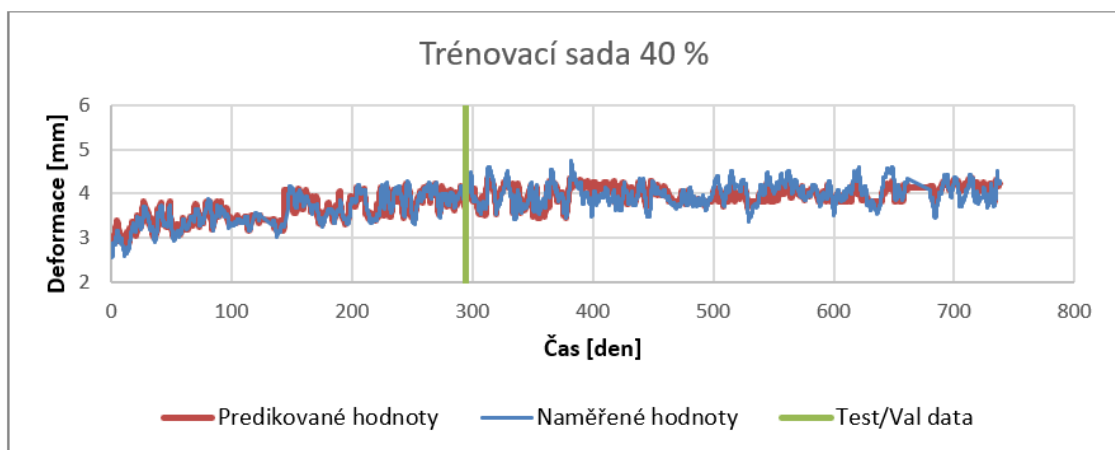
Pro ověření schopnosti navrženého neuronového modelu predikovat dlouhodobé deformace byly provedeny numerické experimenty na základě dat ze dvou typů deskových materiálů – OSB desek a vícevrstevných SWP desek. U každého typu deskového materiálu byla provedena sada výpočtů se třemi různými poměry trénovacích a validačních dat (train ratio): 0,2, 0,4 a 0,6. Tento přístup umožnil otestovat robustnost modelu v závislosti na dostupném množství historických dat.

Pro každý výpočetní běh byl výstup modelu porovnán s reálnými měřenými deformacemi. Hodnocení přesnosti bylo provedeno pomocí průměrné kvadratické odchylky predikce od reality (RMSE). Model byl vždy trénován a testován samostatně na jednotlivém typu desky zvlášť, aby nedocházelo ke kontaminaci dat a výsledky odrážely reálnou predikční schopnost při různých délkách vstupních časových řad.

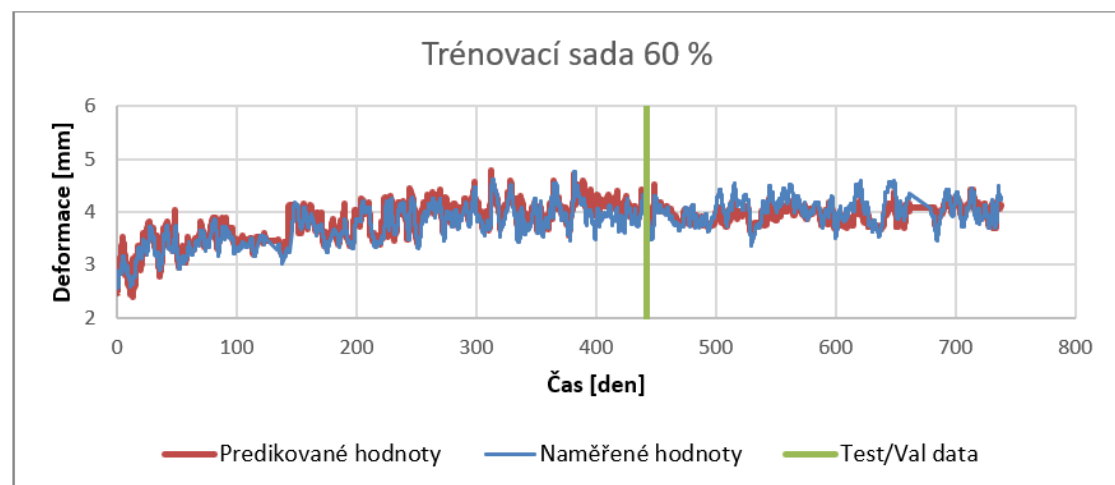
U SWP desek byly výsledky predikce zobrazeny také graficky na obr. 1 až 3, přičemž pro každý trénovací poměr byl vytvořen samostatný graf zachycující průběh měřených a predikovaných deformací v čase. V grafech je zřetelně oddělena trénovací fáze od validační, což umožňuje detailní vizuální posouzení přesnosti modelu při predikci dosud neznámých dat.



Obr. 5: Predikce deformace SWP desky – trénovací poměr 0,2
Fig. 5: Deformation prediction of SWP panel – training ratio 0.2



Obr. 2: Predikce deformace SWP desky – trénovací poměr 0,4
Fig.2: Deformation prediction of SWP panel – training ratio 0.4



Obr.3: Predikce deformace SWP desky – trénovací poměr 0,6
Fig.3: Deformation prediction of SWP panel – training ratio 0.6

Tab. 2: Porovnání přesnosti predikce modelu pro OSB a SWP desky při různých poměrech trénovacích dat (metrika RMSE)**Table 2: Comparison of model prediction accuracy for OSB and SWP panels under different training ratios (RMSE metric)**

Train ratio	Odchylka (RMSE) - SWP	Odchylka (RMSE) - OSB
0,2	0,0127	0,0025
0,4	0,0053	0,0021
0,6	0,0051	0,0017

Z výsledků uvedených v tab. 1 je patrné, že s rostoucím podílem trénovacích dat dochází u obou materiálů ke zlepšení predikční přesnosti modelu. Nejvýraznější pokles RMSE byl pozorován mezi train ratio 0,2 a 0,4, což naznačuje, že již střední množství trénovacích vzorků poskytuje modelu dostatek informací pro rozpoznání základních trendů.

Výsledky potvrdily, že zvolená architektura CNN+LSTM umožňuje modelu nejen sledovat dlouhodobý trend dotvarování, ale zároveň citlivě reagovat na krátkodobé výkyvy způsobené změnami teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Díky schopnosti zpracovávat více vstupních proměnných v časové doméně je model schopen zachytit komplexní nelineární vztahy mezi klimatickými podmínkami a mechanickým chováním materiálu, což u tradičních regresních přístupů nelze. Jistým omezením však zůstávají úseky, v nichž nebyla zaznamenávána data. Model tyto mezery interpretuje jako lineární průběh, což zvyšuje odhadovanou chybu a může lokálně zhoršovat proces učení. Pro zmírnění tohoto problému lze do budoucna uvažovat o implementaci modelů schopných explicitně označit nejistotu v predikcích (např. Bayesian LSTM), které reagují na chybějící či nejistá data.

NAVAZUJÍCÍ EXPERIMENTY

V současné době probíhají rozšířené experimenty na OSB deskách a SWP deskách v klimatické komoře s řízenou teplotou a relativní vlhkostí vzduchu. Cílem těchto testů je vytvoření rozsáhlejšího a kvalitnějšího datasetu pro každý materiálový typ zvlášť, což umožní zvýšit přesnost a stabilitu predikcí. Na základě těchto dat bude navržen zobecněný model pro každý jednotlivý typ materiálu, který nebude trénován na jeden konkrétní vzorek, ale bude schopen predikovat chování libovolného vzorku téhož materiálu. Oproti současným přístupům, kde je síť trénována vždy samostatně na jeden měřený prvek, tak dojde k výraznému rozšíření praktické použitelnosti modelu v rámci daného typu materiálu.

Z hlediska strojového učení je dále plánováno využití vytvořených sítí k in-silico simulacím budoucích teplotních a vlhkostních scénářů. Pomocí generátorů syntetických klimatických řad (např. Monte-Carlo realizací nebo stochastických modelů navázaných na dlouhodobé meteorologické predikce) bude možné předložit neuronové síti tisíce možných průběhů teploty a vlhkosti a získat tak statistické rozdělení očekávaných deformací. Z těchto výstupů bude odvozen součinitel dotvarování pro různé úrovně pravděpodobnosti. Výsledný postup umožní:

- kvantifikovat vliv klimatické nejistoty na dlouhodobé chování dřevěných prvků,
- provádět citlivostní analýzy (např. jak o 5 % vyšší průměrná vlhkost v průběhu užívání zvýší v různých variacích finální průhyb).

ZÁVĚR

V článku byla ověřena účinnost hlubokého neuronového modelu typu CNN + LSTM pro predikci dlouhodobých deformací OSB a SWP desek za proměnlivých klimatických podmínek. Model byl natrénován na experimentálních datech obsahujících průběh deformace, teplotu a relativní vlhkost vzduchu.

Experimenty pro tři poměry trénovacích dat (0,2 / 0,4 / 0,6) prokázaly, že s rostoucím objemem tréninku klesá střední kvadratická chyba predikce (RMSE) u obou materiálů, přičemž největší zlepšení nastalo mezi poměry 0,2 a 0,4. Model zároveň vykázal schopnost citlivě reagovat na krátkodobé výkyvy vlhkosti a teploty, což regresní přístupy postrádají.

Získané výsledky potvrzují, že navržená architektura představuje efektivní nástroj pro spolehlivou a flexibilní predikci deformací dřeva a materiálů na jeho bázi. Architektura CNN + LSTM pracuje čistě s vícerozměrnou časovou řadou, a proto je pravděpodobné, že po minimální úpravě vstupních kanálů ji bude možné použít pro predikci deformací při stálém zatížení téměř na jakýkoli typ materiálu.

Rozšířená měření v klimatické komoře poskytnou rozmanitý dataset, který odstraní omezení dosavadního modelu trénovaného samostatně na jednotlivém typu desky zvlášť. Na základě datasetu vzniknou zobecněné modely pro každý typ zkoušeného materiálu na bázi dřeva, což podstatně zvýší praktickou využitelnost.

OZNÁMENÍ

Príspevek byl zpracován za podpory Studentské grantové soutěže ČVUT v Praze v rámci projektu SGS25/121/OHK1/3T/11 s názvem „Udržitelné materiály“.

LITERATURA

- [1] JOCHMAN, J. Deformace materiálů na bázi dřeva In: Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. Praha: CTU FCE. Department of Steel and Timber Structures, 2024. p. 15-18. ISBN 978-80-01-07318-6.
- [2] REDA TAHA, M. M., N.G. SHRIVE and Y. ISLAM. Artificial Neural Networks for Predicting Creep with an Example Application to Structural Masonry. Canadian Journal of Structural Engineering. 2003. DOI: 10.1139/L03-003.
- [3] GU, A. and S. SANG. Predicting Creep Behavior in Composites from Microstructural Features using Deep Learning. AIP Advances 14 . 2024,. DOI: 0.1063/5.0229859.
- [4] ZHU, J. and Y. WANG. Convolutional Neural Networks for Predicting Creep and Shrinkage of Concrete. Construction and Building Materials Volume 306. 2021, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124868.
- [5] HOCHREITER, S. and J. SCHMIDHUBER. Long Short-Term Memory. Neural Computation. 9 (8), 1997, p. 1735-1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
- [6] WANG, S., B. YANG, H. CHEN, W. FANG and T. YU. LSTM-Based Deformation Prediction Model of the Embankment Dam of the Danjiangkou Hydropower Station. Water 2022, 14, 2464. DOI: 10.3390/w14162464.

PŘÍPOJE TRAPÉZOVÝCH PLECHŮ S MOMENTOVÝM PŘEKRYTÍM

TRAPEZOIDAL SHEETING WITH MOMENT RESISTING OVERLAPS

Dominika Macháčová

Abstract

This paper presents an experimental investigation of the structural behaviour of multi-span systems of trapezoidal sheeting with moment resisting overlaps at the inner supports. This complex system is problematic in terms of determining its load bearing capacity. This complexity arises from the variable stiffness of the profile along its length (simple section / overlapped section), the connection between the profiles, interaction between the trapezoidal sheeting and the support (web crippling) and the moment redistribution. The current design procedures do not fully consider the benefits of the lap connection for multi-span trapezoidal sheeting, which is clearly over-conservative, therefore research is needed. The experimental results will be used to validate a FE model created using Abaqus software, serving for a subsequent parametric study.

Key words: trapezoidal sheeting, moment resisting overlap connection, multi-span beam, moment redistribution, cold-formed steel

ÚVOD

Disertační práce je zaměřena na studium chování trapézových plechů s momentovým překrytím, resp. chování trapézových plechů nad vnitřní podporou spojitého nosníku. Tento článek je konkrétně věnován experimentální studii této problematiky.

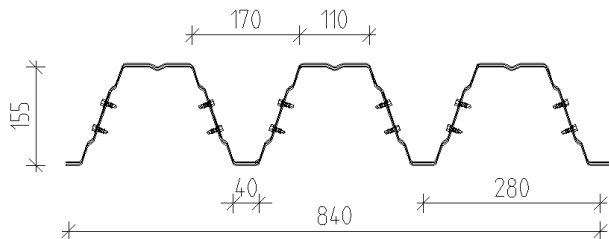
V místě nad vnitřní podporou spojitého nosníku dochází ke kombinovanému namáhání od ohybového momentu a příčné tlakové síly a z tohoto důvodu je stanovení únosnosti trapézového plechu nad vnitřní podporou spojitého nosníku komplikované. Vlivem kombinace zatížení může nad vnitřní podporou docházet k borcení stojiny plechu spolu s lokálním boulením, které mají za následek vytvoření plastického kloubového mechanismu, natočení průřezu způsobené borcením stojiny v místě podpory a následně redistribuci ohybového momentu.

Tato problematika nemá v současných návrhových postupech odpovídající podporu. Dosud nebyl publikován postup zohledňující redistribuci ohybového momentu ani odvozena závislost momentu na natočení v místě vnitřní podpory (se zohledněním zdvojení průřezu nad podporou). Vyšší tuhost průřezu způsobená vzájemným překrytím plechů zjevně ovlivňuje průběh vnitřních sil a deformací na spojitém nosníku. Vzorce pro výpočet únosnosti průřezů vzájemně spojených překrytím nad vnitřní podporou byly odvozeny převážně pouze pro tenkostěnné Z-vaznice, např. Egrtová [1]. Z těchto důvodů je provedení experimentální a numerické studie nezbytné pro výstižnější popis chování trapézových plechů s vlivem překrytí, tj. stanovení únosnosti přípoje, míry redistribuce vnitřních sil, průběhu ohybového momentu a průhybu a odvození křivky závislosti momentu na natočení.

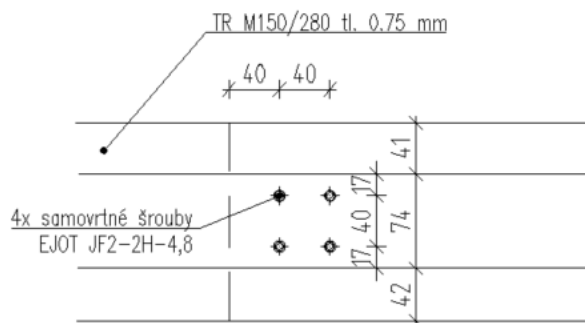
EXPERIMENTY

Uspořádání experimentu spojitý nosník s překrytím je obtížné, proto bylo v souladu s doporučením normy EN 1993-1-3 [2] provedeno zjednodušení a experimenty spojitých nosníků byly nahrazeny zkouškami na prostých nosnících zatížených uprostřed rozpětí. Takové uspořádání přibližně odpovídá průběhu ohybového momentu spojitý nosník v oblasti nadpodporových momentů. Norma [2] určuje délku rozpětí prostého nosníku jako $L_{test} = 0,4 \cdot L$, kde L je rozpětí sousedních polí spojitý nosníku. Při dodržení této délky rozponu je získán stejný poměr mezi

ohybovým momentem a reakcí v podpoře jako v případě spojitého nosníku o dvou stejných polích. Zkoušen byl trapézový plech M 150/280 tloušťky 0,75 mm (obr. 1) se dvěma různými délkami překrytí plechu a_{ol} a s pěti různými rozpory l . Spojovací prostředky a jejich rozmístění bylo pro všechny experimenty stejné. Byly použity samovrtné šrouby EJOT JF2-2H o průměru 4,8 mm respektující hodnoty okrajových vzdáleností a roztečí dle normy [2]. Byly použity 4 spojovací prostředky (2 ks ve dvou řadách) na jednu stojinu – viz obr. 2.



Obr. 6: Příčný řez trapézového plechu M 150/280/0,75 se samovrtnými šrouby
Fig. 6: Cross-section of trapezoidal sheeting M150/280/0.75 with self-drilling screws



Obr. 7: Uspořádání spojovacích prostředků na okraji překrytí
Fig. 7: Fasteners arrangement at the edge of the overlap

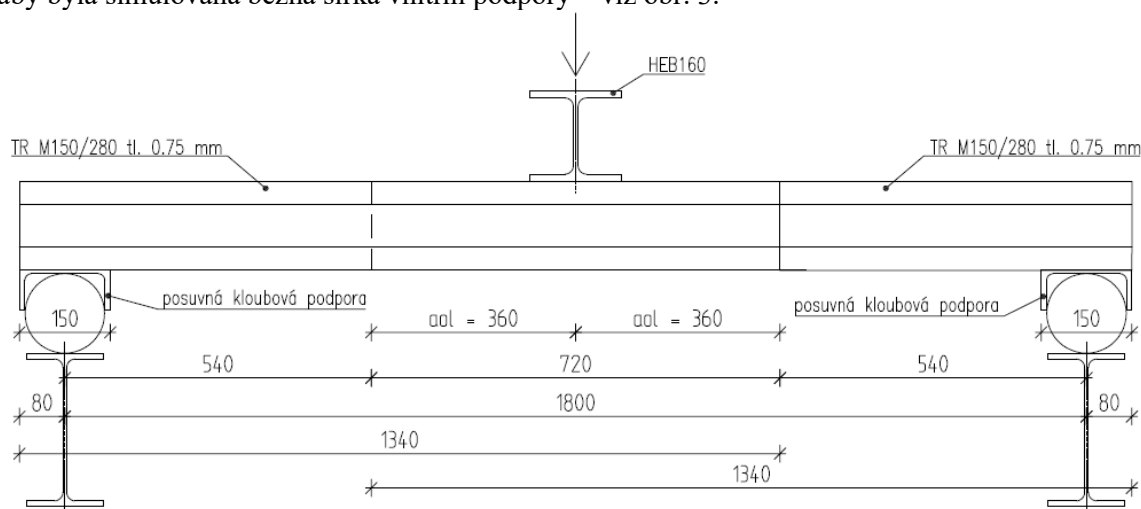
USPOŘÁDÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK

Experimenty byly provedeny pro pět rozponů – 4500 mm, 5000 mm, 5500 mm, 6250 mm a 7000 mm – a byly určeny dvě délky překrytí trapézových plechů a_{ol} (uvažováno od osy podpory na každou stranu – viz obr. 3). Pro zajištění tuhosti přípoje odpovídající tuhosti průběžného plechu (spojitý nosník s momentovými přípoji lze uvažovat jako průběžný nosník), by se minimální délka překrytí dle [2] měla rovnat $0,08 \cdot L$, kde L je rozpětí pole spojitého nosníku. Tato hodnota byla zvolena pro první zkoušenou délku překrytí. Druhá hodnota délky překrytí zkoušených vzorků byla určena tak, aby byla plně využita únosnost zdvojeného průřezu – odpovídá $0,1 \cdot L$. Délky překrytí jsou pro všechny rozpory uvedeny v tab. 1.

Tab. 3: Délky překrytí trapézových plechů (označení dané zkoušky v závorce)
Table 3: Lap lengths of the trapezoidal sheeting (designation of the test in brackets)

Rozpon polí spojitého nosníku [mm]	$L_{test} = 0,4 \cdot L$ [mm]	min. délka překrytí ($0,08 L$) podle [2] [mm]	zvolená délka překrytí ($0,1 L$) [mm]
4500	1800	360 (1.1)	450 (2.1)
5000	2000	400 (1.2)	500 (2.2)
5500	2200	440 (1.3)	550 (2.3)
6250	2500	500 (1.4)	625 (2.4)
7000	2800	560 (1.5)	700 (2.5)

Zatížení bylo do trapézových plechů vneseno pomocí tuhého ocelového profilu se šířkou 160 mm, aby byla simulována běžná šířka vnitřní podpory – viz obr. 3.



Obr. 8: Schéma uspořádání zkoušky vzorku 1.1
Fig. 8: Scheme of the arrangement of the test specimen 1.1

PŘÍPRAVA A PRŮBĚH ZKOUŠEK

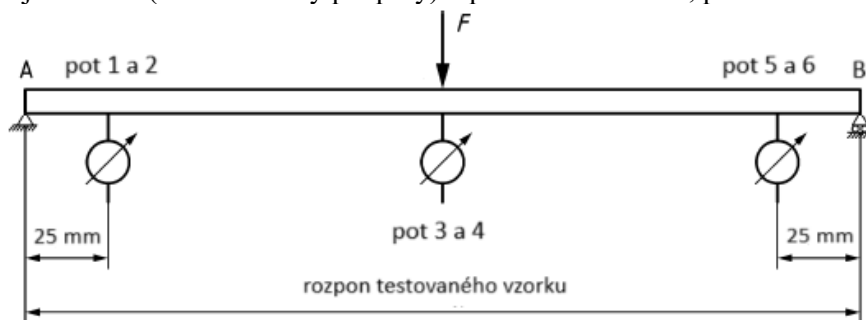
Pro zkoušky byl použit trapézový plech o šířce rovnající se třem vlnám. Vzorek byl smontován ze dvou dílců propojených samovrtnými šrouby tak, aby byly dodrženy délky překrytí. Před samotnou zkouškou byly změřeny počáteční geometrické imperfekce průřezu jednoho vzorku (1.3) pomocí DIC (digitální korelace obrazu).

Vzorky byly upevněny pod zatěžovací válec a přes roznášecí profil byly zatěžovány osamělou silou. Roznášecí profil měl šířku 160 mm a hmotnost 52 kg. Toto zatížení bylo poté přičteno k naměřeným hodnotám zatížení vnášeného hydraulickým lisem. V místě podpor vzorku byly vlny podepřené dřevěnými hranoly, aby nedošlo k jejich deformaci a nebyly zkresleny výsledky deformace uprostřed rozpětí nosníku či nedošlo k dosažení únosnosti v borcení stojin na krajích vzorku. Vnější vlny trapézového plechu byly v místě roznášecího nosníku a v místě podpor drženy závitovými tyčemi, aby nedošlo k příčnému vybočení plechu. Šířka uložení na krajních podporách byla 150 mm. Uspořádání zkoušky je vyobrazeno na obr. 4.



Obr. 9: Instalace zkušební vzorku a měření deformací potenciometry
Fig. 9: Installation of the test specimen and measurement of the deformation by potentiometers

Deformace byly měřeny celkem 6 potenciometry na horní pásnici vzorku. Dva potenciometry měřily deformace uprostřed rozponu nosníku – potenciometr 3 a 4 – a dva měřily deformace při každém okraji nosníku (25 mm od osy podpory) – potenciometr 1 a 2, potenciometr 5 a 6 – obr. 5.



Obr. 10: Schéma uspořádání potenciometrů
Fig. 10: Scheme of the arrangement of the potentiometers

Rychlost zatěžování závisela na rozponu nosníku. Byla zvolena počáteční rychlost, která byla po dosažení únosnosti 5x navýšena (dosažení únosnosti odpovídalo přibližně deformaci $L/200$, kde L je rozpětí prostého nosníku). Zatěžování probíhalo do té doby, dokud nebyla dosažena deformace uprostřed nosníku minimálně $L/20$ pro získání sestupné větve grafu závislosti deformace na zatížení, která je pro odvození závislosti křivky momentu na natočení potřebná.

Při porušení vždy docházelo k borcení stojiny pod zatěžovacím nosníkem a deformacím vnějších vln těsně za vzájemným překrytím. Porušení bylo nesymetrické – viz obr. 6.



Obr. 11: Deformace vnějších vln a borcení stojiny pod zatěžovacím nosníkem
Fig. 11: Deformation of the webs and web crippling under the load bearing profile

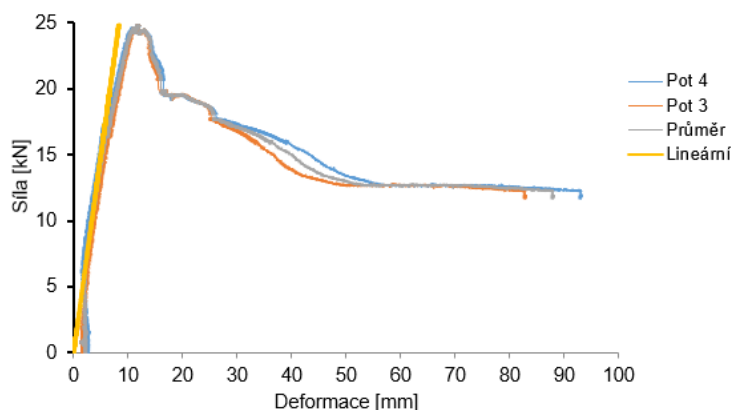
VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

Pomocí potenciometrů byly změřeny deformace uprostřed rozpětí nosníku (potenciometr 3 a 4) a na krajích (potenciometr 1, 2, 5 a 6). Záznamy byly následně upraveny – bylo odečteno dosednutí vzorku a přitížení od zatěžovacího nosníku – a byla stanovena únosnost jednotlivých vzorků a konečný graf závislosti deformace na zatížení dle [2] (Fig. A.8) – viz obr. 7. Graf závislosti natočení na ohybovém momentu byl získán dle připravované normy [2] (Fig. A.9) – viz obr. 8.

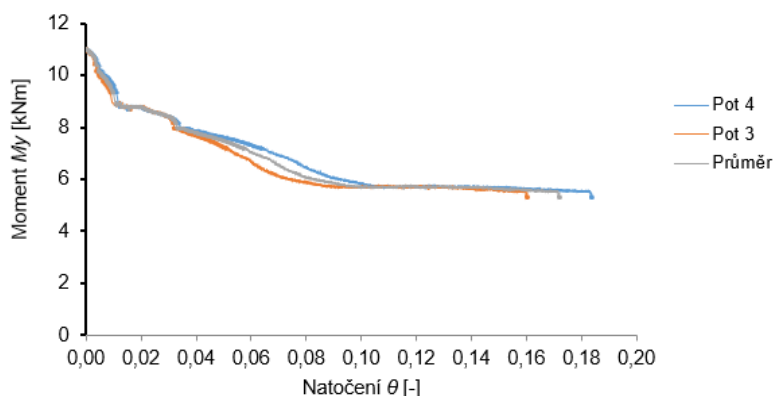
Natočení bylo vypočítáno dle vzorce (A.5) dle [2]:

$$\theta = \frac{2 (\delta_{pl} - \delta_e - \delta_{lin})}{0,5 L_{test} - L_e} \quad (1)$$

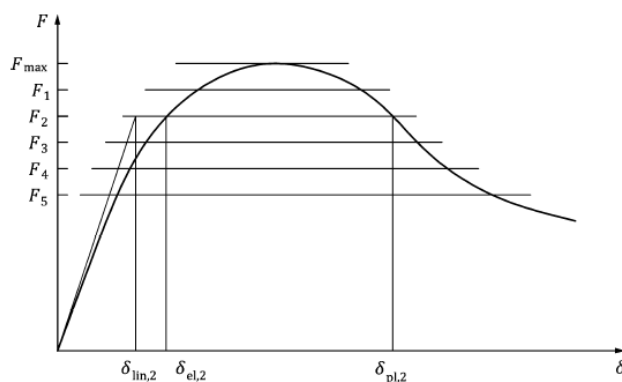
kde δ_{pl} je deformace odpovídající danému zatížení na sestupné části křivky (obr. 9);
 δ_e průměrná deformace měřená ve vzdálenosti L_e od podpory;
 δ_{lin} fiktivní deformace odpovídající danému zatížení získaná lineárním chováním (obr. 9);
 L_{test} rozpon zkoušeného prostého nosníku;
 L_e vzdálenost krajního měřeného místa potenciometru od podpory.



Obr. 12: Graf závislosti deformace na zatížení uprostřed vzorku (1.1)
Fig. 12: Final load-deformation diagram at midspan (1.1)



Obr. 13: Graf závislosti natočení na ohybovém momentu (1.1)
Fig. 13: Moment-rotation diagram (1.1)



Obr. 14: Jednotlivé deformace na křivce pracovního diagramu při zatížení [2]
Fig. 14: Deformation on load-deformation diagram according to [2]

Pro každý vzorek byla stanovena hodnota ohybového momentu a lokální příčné síly, které byl vzorek schopný přenést. Hodnota ohybového momentu byla stanovena uprostřed rozpětí a v místě těsně za překrytím plechů – viz tab. 2.

Tab. 4: Hodnota ohybového momentu a lokální příčné síly
Table 4: Load bearing capacity of specimens

Číslo vzorku	Lokální příčná síla [kN]	Ohybový moment uprostřed rozpětí [kNm]	Ohybový moment za překrytím [kNm]
1.1	24,87	11,19	6,71
1.2	25,45	12,72	7,64
1.3	25,62	14,09	8,45
1.4	19,97	12,48	7,49
1.5	18,23	12,76	7,66
2.1	26,49	11,92	5,96
2.2	24,28	12,14	6,07
2.3	24,78	13,63	6,81
2.4	20,59	12,87	6,43
2.5	21,80	15,26	7,63

ZÁVĚR

Únosnosti momentových přípojí trapézových plechů jsou ovlivněny vybočením vnějších vln trapézových plechů těsně za překrytím, kde bylo porušení iniciováno a kde nebylo zabráněno příčnému vybočení závitovými tyčemi. V praxi je vybočení vnějších vln zabráněno spojením s navazujícím trapézovým plechem nebo v případě krajního plechu okrajovým výztužným profilem.

Výsledky experimentů tedy plně nereprezentují únosnost zdvojeného průřezu přímo pod osamělým břemenem z důvodu vybočení vnějších vln trapézových plechů těsně za překrytím, které mělo výrazný vliv na únosnost zkušební vzorku. Výsledky zkoušek budou použity pro validaci numerických modelů sloužící pro následnou parametrickou studii spojitých nosníků odpovídající skutečnému chování profilů při použití v praxi. Takový model umožní spolu se stanovením únosnosti stanovit i průběh vnitřních sil při rozdílné tuhosti částí průřezu.

Parametrická studie se bude zároveň zabývat dalšími typy průřezů trapézových plechů, tloušťek plechů, délkami překrytí a šířkou vnitřní podpory.

OZNÁMENÍ

Výzkum je podporován grantem SGS25/119/OHK1/3T/11 Způsoby porušení a stanovení únosnosti štíhlých konstrukcí a přípojí.

LITERATURA

- [1] EGRTOVÁ, J. Stabilita tenkostěnných za studena tvarovaných Z vaznic v oblasti nadpodporových momentů, disertační práce. Praha, 2011.
- [2] prEN 1993-1-3. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-3: Cold-Formed Members and Sheeting. 2023.

HOUŽEVNATOST OCELOVÝCH KOMPONENT ZA EXTRÉMNÍCH PODMÍNEK

TOUGHNESS OF STEEL COMPONENTS UNDER EXTREME CONDITIONS

Šimon Povolný

Abstract

This paper deals with multi-purpose modular support system, specifically with multimaterial steel welded components. Those components are part of a bigger structure, but the research requirements are now clearly pointing at the need of gaining new information in the branch of steel toughness. The most knowledge-enriching part is welding together two (or more) steel plates of a different steel strength class. Given that each class has some toughness on it own, it is now desired to find out how to get the toughness of combined material without performing a field test before using any new combination. Hence, there is a plan to create a formula or a set of suggestion for calculating the toughness of a part made from various steel materials.

Key words: toughness, weld, energy, fracture mechanics, steel

ÚVOD

Autorův výzkum je zaměřen na modulární systém dočasných podpěr. Jedná se o dílčí část grantového projektu, jehož výsledky mají být kryty patentem a z toho důvodu není možné v této publikaci uvádět veškerá data v největších podrobnostech. Dočasné podpěry mohou být využívány v nejrůznějších podmínkách, tedy na suchu, na vodě (kde bude třeba zohlednit větší vystavení povětrnostním podmínkám), v místě vysoké agresivity prostředí a zejména v extrémních teplotách. To zohledňují také experimenty, které budou prováděny v rozsahu teplot od -40 °C do +40 °C.

Hlavní součástí výzkumného projektu jsou opakovaně používané ocelové svařence. Vzhledem k neobvyklému tvaru svařenců jsou svařené dílce v rámci výpočtu rozděleny na jednotlivé komponenty, které jsou dále detailněji analyzovány. Z předchozích analýz celého ocelového prvku bylo určeno kritické místo, které je potřeba podrobit podrobnějším výpočtům a analýzám. Zároveň je žádoucí, aby byla výsledná tloušťka plechů v daném místě co nejmenší, a proto byla zvolena kombinace dvou ocelí různých pevnostních tříd.

Zvolený detail kombinuje 2 plechy stejné tloušťky, ale jiného materiálu. První materiál je ocel S355J2, která je využita pro většinu analyzovaného svařovaného tělesa, druhý materiál je ocel S700M, která do konstrukce přináší potřebnou pevnost. Výpočet statické únosnosti ocelových konstrukcí svařených z různých materiálů byl proveden a ověřen autory vícera různých pokusů[1],[2]. Zajímavá je ale únosnost multimateriálového detailu z hlediska houževnatosti konstrukce, protože toto chování doposud nebylo dostatečně detailně popsáno.

V oboru ocelových konstrukcí lze mezi publikovanými vědeckými články najít přístupy, které uvažují ještě jiným způsobem – vytvoření nového typu oceli, který kombinuje vysokou pevnost s vysokou houževnatostí [3],[4],[5]. Tato cesta sice může vést k jednorázově nejspokojivějším výsledkům, nicméně v běžné praxi je tato varianta natolik nedostupná, že tento výzkum autor dále nerozvíjí a zaměřuje se na kombinaci různých, ale běžně dostupných materiálů.

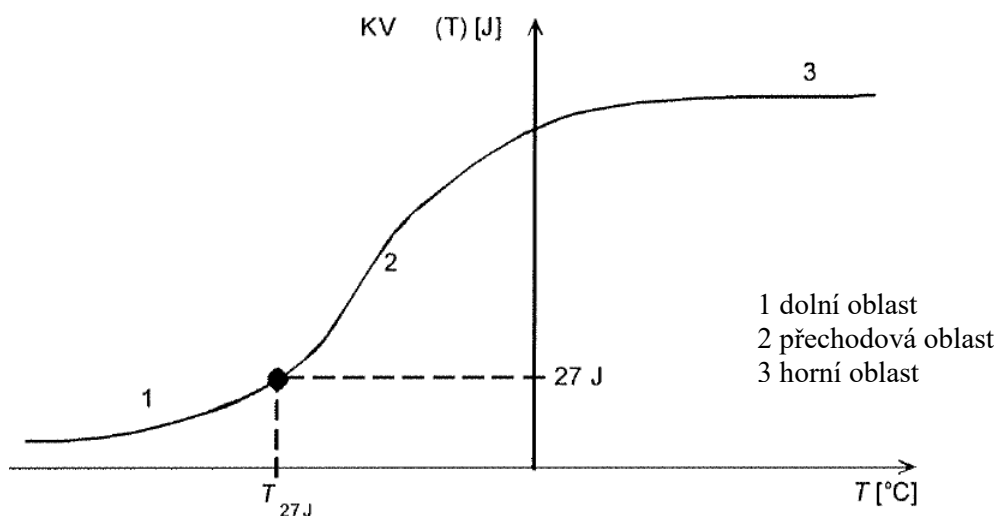
Kromě toho, že je potřeba prověřit chování dvou plechů z různých pevnostních tříd oceli, je vhodné také prověřit svařence s různou technologií provádění svaru. V rámci experimentu tak budou zkoušeny prvky, které budou svařovány koutovým swarem (který lze považovat za nejběžnější ve stavební praxi), a dále lze do budoucna uvažovat též o svařování magnetickým pulsem, laserem či výbuchem (ačkoliv to jsou svary náročnější na provedení a jejich využití v navazující praxi by bylo

méně časté).

HOUŽEVNATOST OCELI

Znalost houževnatosti konstrukce je důležitá pro odhalení rizika křehkého lomu. K tomu často dochází při finálním stádiu únavového procesu. Cyklická únava však není jediným případem, při kterém může křehký lom nastat. Dalším kritickým případem je vliv nízké teploty na konstrukci.

Houževnatost udává práci potřebnou pro přeražení normovaného vzorku a je stanovena rázovou zkouškou v ohybu za použití Charpyho kladiva. Jednotkou je J/mm^2 . Houževnatost oceli klesá s teplotou, tedy při nižší teplotě dojde k porušení prvku i při vykonání menší práce. Pro kovové materiály je důležitá přechodová teplota (přechodová oblast):



Obr. 15: Přechodová oblast
Fig. 15: Transition area

Horní oblast – prvky vykazují pružně-plastické chování při tvárných způsobech porušení

Hodnota KV – vyjadřuje velikost nárazové práce v Joulech, spotřebované k přeražení vzorku při zkoušce vrubové houževnatosti při dané teplotě T. Obecně nejnižším požadavkem bývá 27 J.

Běžnou praxí je, že bezpečně stanovená teplota je o určitý rozdíl větší než naměřená teplota KV. Tím je zajištěna bezpečnost použití konstrukce. Hodnota se uvádí i s bezpečnostním rozdílem, například teplota T_{50} je o 50 °C vyšší než naměřená hodnota.

V závislosti na lomové houževnatosti je volena ocel použitá pro konkrétní konstrukce. Při výběru se zohledňuje mez kluzu v závislosti na tloušťce materiálu a úroveň houževnatosti. Dále se zohledňuje tvar prvku, tloušťka prvku, koncentrace napětí a náchylnost ke vzniku dílenské vady.

K určení požadované houževnatosti lze využít dvě metody:

- Lomová mechanika – hodnota požadované houževnatosti nesmí překročit návrhovou hodnotu pevnosti materiálu
- Numerická analýza + experiment – simulace výsledné konstrukce a vyhodnocení výsledků experimentu

LOMOVÁ MECHANIKA

Základním předpokladem přístupu lomové mechaniky je trhlina s násobně větší délkou v porovnání se šířkou. Lomová mechanika začala být podrobněji zkoumána v momentě, kdy došlo ke zjištění, že při tahovém namáhání kruhové tyče není normálové napětí rozděleno rovnoměrně, ale je ovlivněno výskytem rýh.

Při výskytu rýhy či otvoru v ocelovém prvku může napětí obsahovat příčné i podélné složky a může dojít ke dvouosé napjatosti. Základním předpokladem je existence eliptické trhliny, kde a je hlavní poloosa a b je vedlejší poloosa.

Pokud je b v porovnání s a velmi malé, výrazně vzroste koncentrace napětí α . Ta se vypočte dle rovnice

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (2)$$

kde α je součinitel koncentrace napětí;
 σ_{max} maximální napětí;
 σ_{nom} nominální napětí.

Pro případ, kdy se poměr b/a blíží 0, nelze tuto rovnici v praxi aplikovat. Z toho důvodu jsou vyvinuty metody zjišťování součinitele koncentrace napětí α .

V tělese mohou nastat 2 specifické stavy:

- Rovinná napjatost

Při stavu rovinné napjatosti je jedno ze tří hlavních napětí nulové (typicky napětí v příčném směru, tedy kolmo na rovinu plechu). Rovinná napjatost se vyskytuje typicky u tenkých plechů.

$$(RN) \quad \varepsilon_z = -\nu * \frac{\sigma_x}{E} - \nu * \frac{\sigma_y}{E}; \sigma_z = 0 \quad (3)$$

kde ε_i je poměrná deformace v daném směru;
 σ_i napětí v daném směru;
 E Youngův modul pružnosti;
 ν Poissonova konstanta.

- Rovinná deformace

Stav rovinné deformace vystihuje situaci, při které okolní materiál nepřipustí zkrácení vlivem namáhání a z toho důvodu vznikne velké namáhání napříč tloušťkou plechu. Pak vznikne trojosá napjatost, které se běžně vyskytuje u tlustých plechů.

$$(RD) \quad \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \nu * \frac{\sigma_x}{E} - \nu * \frac{\sigma_y}{E}; \sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \text{ když } \varepsilon_z = 0 \quad (4)$$

kde ε_i je poměrná deformace v daném směru;
 σ_i napětí v daném směru;
 E Youngův modul pružnosti;
 ν Poissonova konstanta.

Lomová mechanika zahrnuje metody spojené s analýzou napětí. Jde zejména o metody, které analyzují napětí v okolí trhliny z napětí působícího v okolních bodech.

LINEÁRNĚ ELASTICKÁ LOMOVÁ MECHANIKA

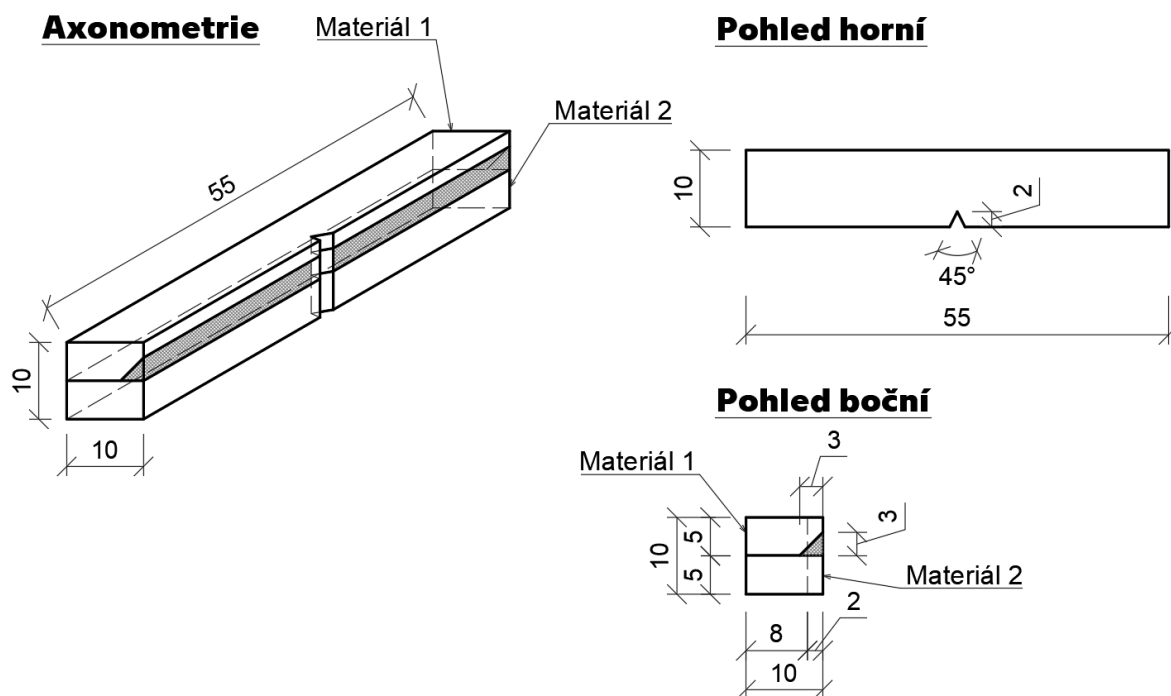
LELM je platná pouze pro některé materiály, v případě materiálů s velkou plastickou deformací není možné ji použít. Je určena ke stanovení kritického napětí nebo kritické délky trhliny. Obecně je pro výpočet kritického napětí nebo kritické délky trhliny potřeba stanovit kritérium či limit, při jehož překonání dojde k nestabilnímu šíření trhliny.

ELASTICKO-PLASTICKÁ LOMOVÁ MECHANIKA

Vzhledem k daným omezením LELM bylo potřeba přistoupit k pokročilejšímu přístupu, kterým je EPLM. Tato výpočetní metoda je postavena na energetické bilanci systému a je vhodnější pro výpočet materiálů vykazujících nelineární chování.

PŘÍPRAVA EXPERIMENTÁLNÍCH TĚLES

Pro provedení experimentu budou připravena tělesa, která rozměrem odpovídají zkušebním vzorkům dle příslušné normy (ČSN EN ISO 148-1 Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda). Neobvyklostí prováděného experimentu bude výskyt dvou materiálů a dojde k analýze rozdílných způsobů propojování jednotlivých materiálů. Aby byla zkouška směrodatná, budou analyzovány vzorky z jednoho materiálu, dále ze dvou materiálů svařených koutovým svarem metodou MMA, ze dvou materiálů svařených koutovým svarem metodou MIG a také ze dvou materiálů, které budou jen bodově svařeny na podstavách obdélníku a celkově budou co nejpřesněji simulovat chování dvou na sobě položených materiálů bez svarového propojení.



Obr. 16: Vzor zkušebního tělesa
Fig. 16: Sample test body

Pro větší přehlednost prováděných experimentů je uvedena tabulka 1:

Tab. 5: Tabulka experimentálních těles
Table 5: Table of experimental specimens

označení	typ svaru	kombinace materiálů	počet vzorků při každé teplotě	Zkoušené teploty [°C]	počet vzorků celkem
Z-A-A	žádný	A-A	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
Z-A-B	žádný	A-B	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
Z-B-B	žádný	B-B	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
B-A-A	bodový na kratších stranách	A-A	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
B-A-B	bodový na kratších stranách	A-B	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
B-B-B	bodový na kratších stranách	B-B	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
K-A-A	koutový, metoda MMA	A-A	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
K-A-B	koutový, metoda MMA	A-B	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
K-B-B	koutový, metoda MMA	B-B	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
M-A-A	koutový, metoda MAG	A-A	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
M-A-B	koutový, metoda MAG	A-B	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
M-B-B	koutový, metoda MAG	B-B	10	-40; -20; 0, 20, 40	50
				vzorků celkem:	600

svařovací metody využitě pro přípravu vzorků

V rámci svařování konstrukcí hrají velkou roli zvolené svařovací metody. Zejména je důležité zohlednit tepelně ovlivněnou oblast a residuální pnutí, které ve svařovaných konstrukcích vznikají. V rámci přípravy experimentu budou použity následující metody:

- MMA – Manual metal arc (111)

Ruční svařování elektrický obloukem obalenou elektrodou. Je běžné, nenáročné na vybavení, a proto se využívá velmi často na staveništích. Jako zdroj tepla je využíván elektrický oblouk, který hoří mezi elektrodou a základním materiálem. Tato metoda je zvolena kvůli jednoduchosti provedení.

- MAG – metal active gas (135)

Při svařování metodou MAG se využívají plyny, které reagují ve svarové lázni (nejčastěji CO₂). Svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře, používá se tavící elektroda. Tato metoda je zvolena pro svou vysokou přesnost a dobrou využitelnost při automatizaci svařování (svařování pomocí svařovacích robotů).

V rámci navazující optimalizace provedení svařenců by bylo možné využívat ještě další svařovací metody, ovšem jejich využití by bylo muselo být opodstatněné zejména s ohledem na jejich komplikované použití. Svařování magnetickým pulsem má výhodu v přesnosti, rychlosti a dobré propojenosti jednotlivých materiálů. Největší výhodou svařování laserem je jeho přesnost. Svařování výbuchem je velice přínosné z hlediska dobrého plošného propojení materiálů (vlnkovitá struktura svaru zajistí velmi pevné spojení), ale velice náročné z pohledu provádění svaru a přípravy vhodných podmínek svařování.

ZÁVĚR

V rámci výzkumu byly specifikovány konkrétní požadavky na podrobnou analýzu detailu vybraného z většího celku. Tento detail je důležitý zejména kvůli ověření neobvyklé kombinace materiálů při zatěžování v extrémních podmínkách. Pozitivní výsledky laboratorních testů a analytických výpočtů by znamenaly možnost praktického využití této konstrukční varianty v praxi, což je jednak přínosné z hlediska konkrétního využití v rámci výzkumného grantového projektu a také z hlediska obecného vědění ve smyslu chování multimateriálových ocelových svařenců.

OZNÁMENÍ

Výzkum byl podpořen grantem SGS22/140/OHK1/3T/11 – Nosné konstrukce z moderních materiálů.

Výzkum je podporován grantem FW06010741 – Výzkum a vývoj pontonového hydraulického modulárního systému a univerzálního systému elektropohonu pro pontonový systém.

LITERATURA

- [1] CHEN, C. at al., Effects of Welding on the Tensile Performance of High Strength Steel T-stub Joints. Structures, 2017, 9, 70–78. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2016.09.008>.
- [2] BARSOUM, Z. and M. KHURSHID. Ultimate Strength Capacity of Welded Joints in High Strength Steels. Procedia Structural Integrity, 2017, 5, 1401–1408. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2017.07.204>.
- [3] NIU, G. at al., Superior Fracture Toughness in a High-Strength Austenitic Steel with Heterogeneous Lamellar Microstructure. Acta Materialia, 2022, 226, 117642. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2022.117642>.
- [4] SUN, J. at al., Making Low-Alloyed Steel Strong and Tough by Designing a Dual-Phase Layered Structure. Acta Materialia, 2022, 227, 117701. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2022.117701>.
- [5] HILHORST, A., P.J. JACQUES and T. PARDOEN. Towards the Best Strength, Ductility, and Toughness Combination: High Entropy Alloys are Excellent, Stainless Steels are Exceptional. Acta Materialia, 2023, 260, 119280. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2023.119280>.

VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ APLIKACE HFMI NA NOVÉ A OPRAVENÉ SVARY

EXPERIMENTS RESULTS ON THE APPLICATION OF HFMI TREATMENT TO NEW AND REPAIRED WELDS

Jakub Štěpán

Abstract

In this study, fatigue tests were conducted on specimens loaded by four-point bending. The benefits of the HFMI method were compared to specimens without post-welding treatment (as welded). The loading was applied at several levels with constant stress range amplitude and stress ratio (parameter R). The impact of the HFMI method was also investigated for steels of different strengths, ranging from S355 to S960. After completing the fatigue tests and the initiation of fatigue cracks, the welds were repaired and the HFMI treatment was applied again. These repaired specimens were loaded with the same parameters as in the case of the previous specimens. The results show an increase in cycles to failure when using the HFMI method for both new and repaired welds. This has significant potential for future repair and reconstruction of bridge structures damaged by fatigue.

Key words: fatigue, cracks, HFMI treatment, steel bridges, weld repair

ÚVOD

Jednou z možností zvýšení únavové životnosti svarů je využití metody vysokofrekvenčního opracování souhrnně označované HFMI (z angl. High Frequency Mechanical Impact). Metoda HFMI spočívá v mechanickém opracování povrchu svaru při vysoké frekvenci (obvykle kolem 100 Hz). Tím dochází ke vzniku lokální plastické deformace („drážky“), která vytváří plynulý rádius na přechodu svarového kovu do základního materiálu a zlepšuje celkovou geometrii vrubu. V důsledku této deformace dochází ke vzniku tlakových napětí v povrchové vrstvě svaru, která pomáhají redukovat nežádoucí tahová napětí (např. reziduální pnutí po svařování nebo dalších tepelných procesech při výrobě), čímž dochází ke zvýšené únavové životnosti takto opracovaných svařovaných detailů.

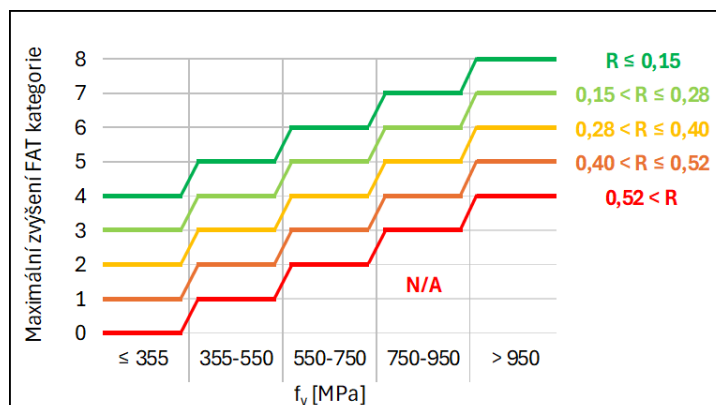
NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO PROGRAMU A ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

V rámci parametrické studie byly analyzovány mostní konstrukce a jejich únavové detaily, přičemž byly využity nejprve teoretické numerické modely pro výpočet rozkmitů napětí. Následně byla využita data z měření rozkmitů a spekter napětí na stávajících mostech. Ze získaných výsledků byly vybrány dva potenciálně kritické únavové detaily. Prvním je křížení podélného a příčného svaru s výřezem ve stěně a druhým je svar příčné výztuhy stěny hlavního nosníku. Oba zmíněné příklady představují běžný detail ocelových mostů a jsou znázorněné na obr. 1.



Obr. 17: Vybrané únavové detaily [1]
Fig. 17: Selected fatigue details [1]

Následně byla provedeny numerické výpočty s cílem stanovit velikost provozních středních napětí v obou uvedených detailech. Velikost středního napětí (také ozn. R-parametr nebo R-faktor, z angl. stress ratio) je totiž klíčový parametr pro návrh a posouzení únavové životnosti při použití metody HFMI. S rostoucím středním napětím dochází ke snižování efektu a přínosu HFMI a tím i redukci navýšení únavové životnosti. Tento jev je přisuzován chování mikrostruktury, kdy zatěžování při vyšších tahových napětích přispívá k dřívějšímu „uvolnění“ vneseného tlakového napětí a tím dochází k rychlejší ztrátě efektu HFMI. Dle doporučení Mezinárodního svářečského institutu (IIW) je na obr. 2 znázorněno možné zvýšení únavové kategorie detailu při použití metody HFMI v závislosti na mezi kluzu základního materiálu a velikosti středního napětí R. Doporučení vydané IIW je aktuálně omezeno do hodnoty $R = 0,52$. Pro vyšší střední napětí není aktuálně dostatek experimentů a dat. [2]



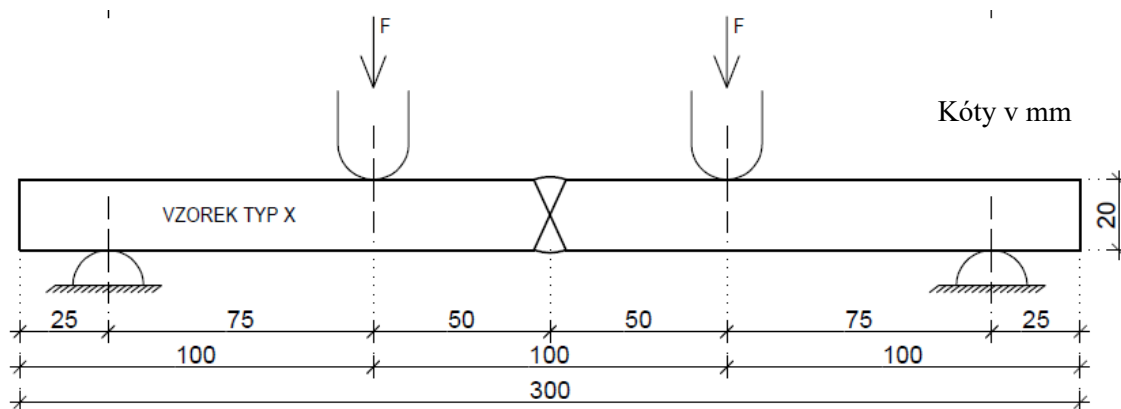
Obr. 18: Možné zvýšení kategorie detailu v závislosti na materiálu a R-faktoru

Fig. 18: Possible increase in FAT category depending on base material and R-factor

Výsledky z analýzy středního napětí posloužily jako základní vstupní parametr pro návrh zkušebních vzorků a experimentálního programu. Cílem tohoto experimentálního programu bylo provést únavové zkoušky s využitím metody HFMI při zatěžování s vyšším středním napětím ($R > 0,5$) a doplnit tak některá chybějící data v odborné literatuře, případně zpřesnit již dosavadní výsledky. Jelikož při vyšších hodnotách středního napětí dochází k výraznější redukci pozitivního efektu HFMI, lze předpokládat, že u detailů stejné únavové kategorie bude rozhodovat (tj. dojde dříve ke vzniku únavové trhliny) prvek zatěžovaný s vyšším středním napětím. Z tohoto důvodu byl vybrán detail příčného svaru bez výřezu ve stěně. Jedná se o detail kategorie FAT 71 (resp. až FAT 90 při dodržení požadavků uvedených v ČSN EN 1993-1-9 s ohledem na svařování, použití výběhových desek nebo NDT kontrol).

TECHNOLOGIE HFMI NA NOVÉM SVARU

První část experimentálního programu aplikace HFMI na nový svarový spoj zahrnovala výrobu celkem 144 zkušebních vzorků s příčným tupým svarem, které reprezentují zmiňovaný únavový detail kategorie FAT 71 (svar V) a FAT 90 (svar X). Geometrie vzorků byla přizpůsobena laboratorním podmínkám a možnostem zkušebních strojů, zvolen byl proto výsledný návrh obdélníku s celkovými rozměry 300x80 mm s tloušťkou základního materiálu 20 mm (obr. 3). V rámci experimentů bylo zároveň žádoucí získat porovnání jednotlivých pevnostních tříd materiálů a ověřit původní předpoklady. Proto byly zkušební vzorky vyrobeny celkem ze 4 druhů oceli: S355J2+N, S460NL, S690QL a S960QL. Vzorky byly pro každý materiál rozděleny na 2 skupiny. První skupinu představovaly vzorky bez dodatečné úpravy po svařování „as welded“, druhou skupinu vzorky s aplikovanou technologií HFMI a bylo sledováno vzájemné porovnání počtu cyklů do porušení (tj. vzniku únavové trhliny). Pro únavové zkoušení bylo navrženo zatěžování 4-bodovým ohybem s konstantním rozkmitem napětí a příslušným *R-faktorem* od $R = 0,1$ (nízká střední napětí) až po vysoká střední napětí $R = 0,55$ nebo $R = 0,7$.

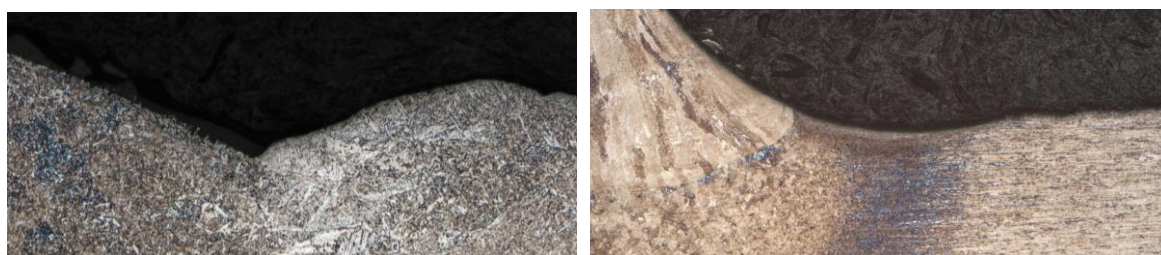
**Obr. 19: Zkušební vzorek s příčným svarem X (identicky pro svar V)****Fig. 19: Specimen with transverse butt X-weld (identical for V-weld)**

Všechny vzorky byly svařeny ve strojních dílnách ČVUT. Pro svařování byly vytvořeny příslušné svařovací postupy (WPS) s cílem provádět svařování na všech typech vzorků identicky (tj. použití shodného přídavného materiálu, dodržování předepsaných teplot interpass a teplot předehřevu nebo rychlosti svařování). Dodržováním svařovacích postupů tak byla redukována variabilita výsledků následných únavových zkoušek s ohledem na reziduální pnutí nebo deformace po svařování. Samotné svařování probíhalo obvykle používanou metodou 135 MAG (obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu), což odpovídá dnešní běžné praxi při svařování mostních konstrukcí ve výrobě i na montáži. Z celkem 144 vyrobených zkušebních vzorků bylo pro únavové zkoušky využito 136. Zbývajících 8 kusů bylo použito na destruktivní materiálové zkoušky pro získání nebo zpřesnění materiálových dat (zkouška tahem, metalografie nebo měření tvrdosti). Seznam vzorků a jejich rozdělení je uvedeno v následující tab. 1.

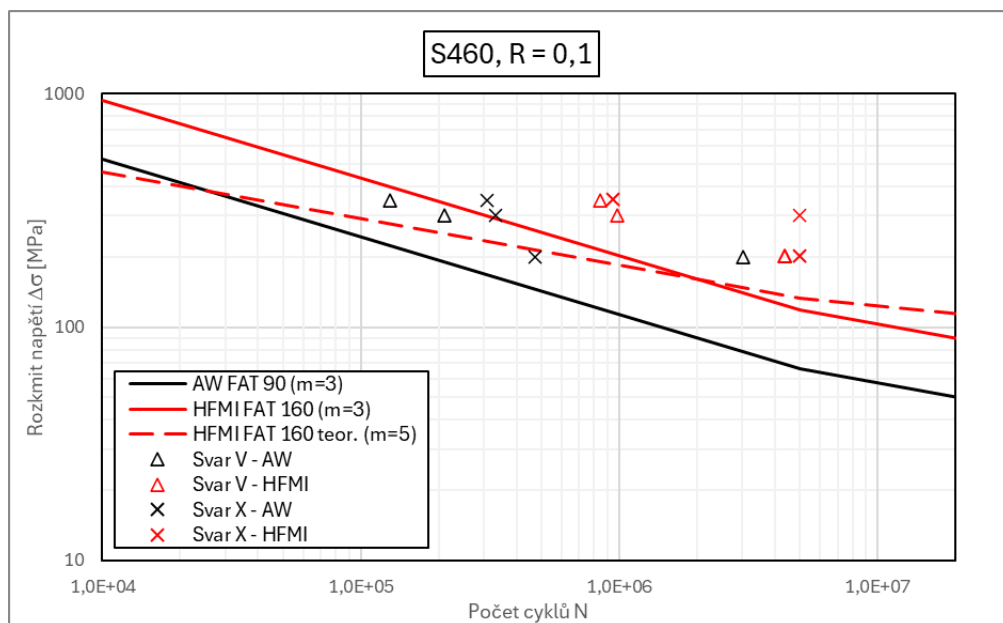
Tab. 6: Počty zkušebních vzorků dle třídy pevnosti materiálu**Table 6: Number of specimens depending on material strength class**

	S355	S460	S690	S960
Svar V, as welded	7	11	9	7
Svar V, HFMI	7	11	9	7
Svar X, as welded	7	11	9	7
Svar X, HFMI	7	11	9	7

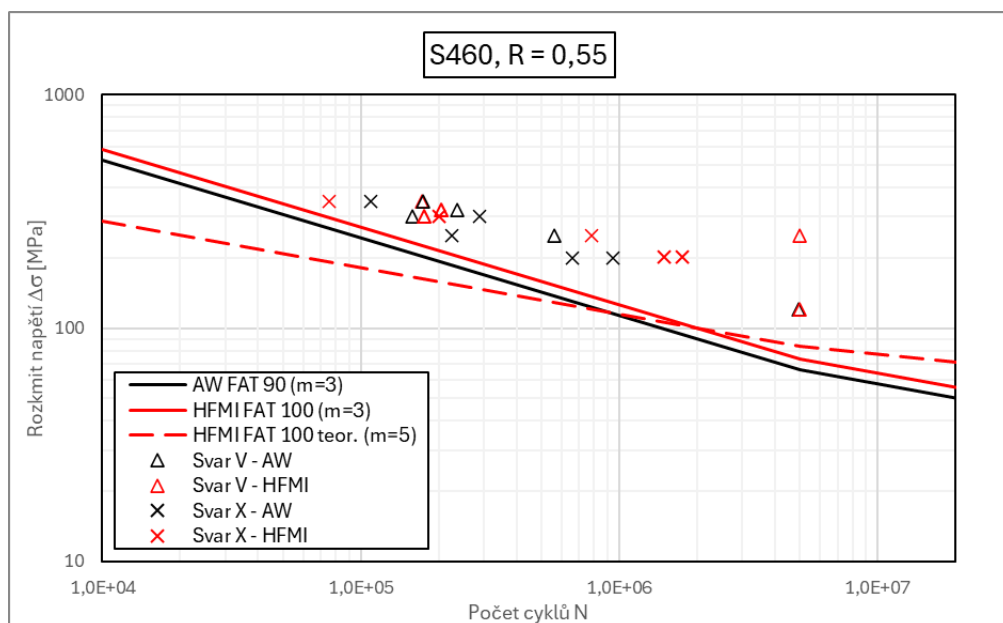
Před zahájením únavových zkoušek byly provedeny destruktivní materiálové zkoušky. Nejprve byla na výbrusech měřena mikrotvrdost v jednotlivých hloubkách a porovnány vzorky bez opracování (as welded) se vzorky s HFMI kvůli stanovení rozsahu a hloubky ovlivnění. Dále byly na výbrusech vzorků provedeny metalografické snímky kvůli kontrole správné aplikace HFMI a ověření předpokladu zjemnění geometrie vrubu. Snímky jsou zobrazeny na následujícím obr. 4.

**Obr. 20: Metalografie vzorku as welded (vlevo) a vzorku HFMI (vpravo)****Fig. 20: Metallography of as welded specimen (left) and HFMI specimen (right)**

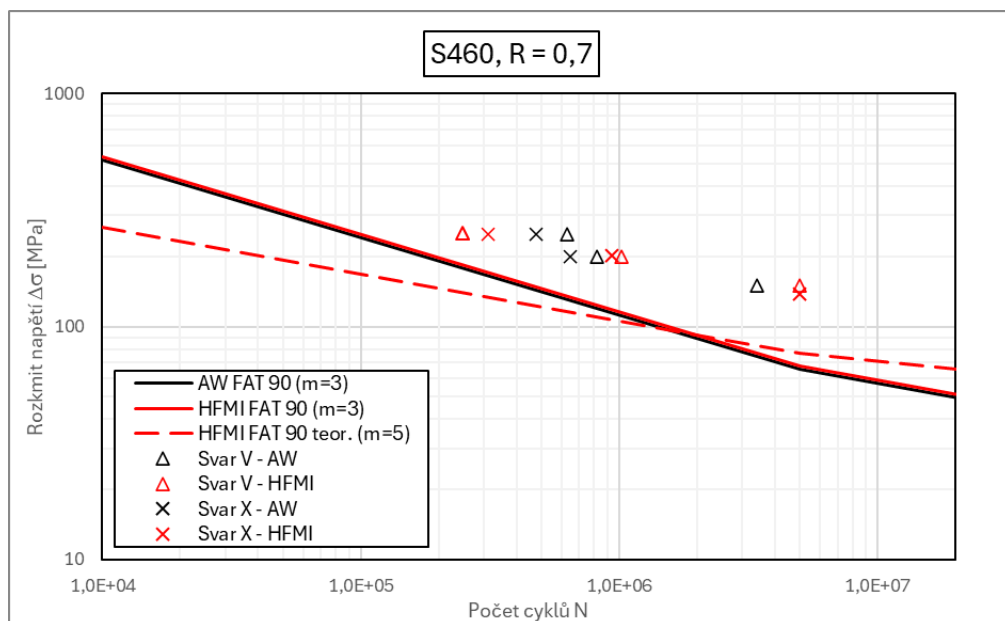
Výsledky únavových zkoušek jsou prezentovány ve formě S-N křivek, pro názornost pouze pro materiál S460, který obsahuje největší množství dat (obr. 5. – obr. 7.). Z výsledků je patrný významný přínos metody HFMI v oblastech nízkých středních napětí ($R = 0,1$), kde dle předpokladů zvýšení únavové kategorie dosahuje až 8 FAT tříd v závislosti na materiálu. Předpoklad snižování efektivity HFMI u vyšších středních napětí byl potvrzen u zbývajících případů pro $R = 0,55$ a $R = 0,7$, kde bylo dosaženo maximálního navýšení pouze o 2 kategorie u materiálu S960. U prezentovaných výsledků S460 je při vysokých středních napětích únavová životnost vzorků s HFMI vyšší maximálně o 1 FAT kategorii nebo je statisticky srovnatelná se vzorky as welded.



Obr. 21: Vyhodnocení výsledků vzorků S460 ($R=0,1$) s využitím S-N křivek
Fig. 21: Evaluation of S460 ($R=0,1$) specimens results and fitting S-N curves



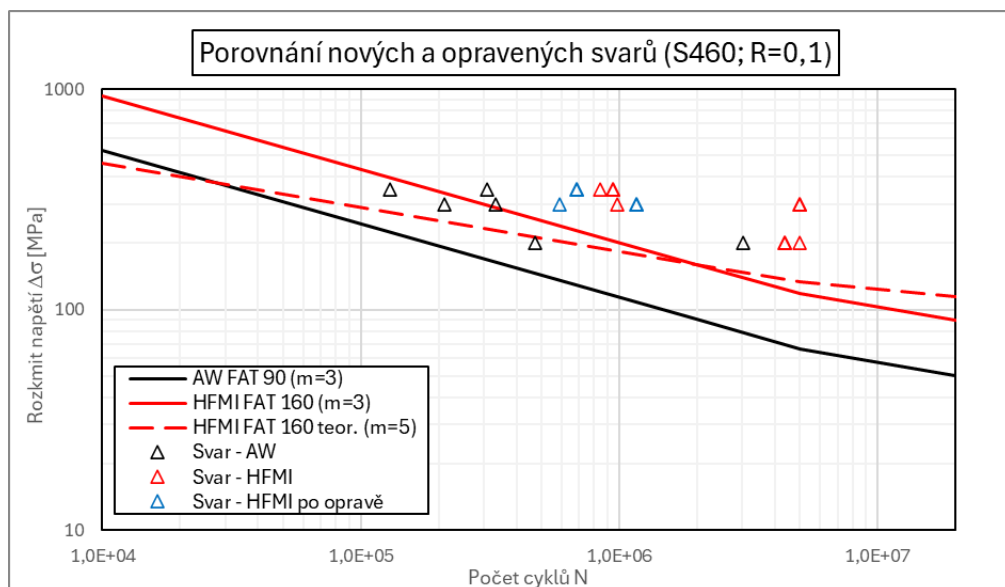
Obr. 22: Vyhodnocení výsledků vzorků S460 ($R=0,55$) s využitím S-N křivek
Fig. 22: Evaluation of S460 ($R=0,55$) specimens results and fitting S-N curves



Obr. 23: Vyhodnocení výsledků vzorků S460 (R=0,7) s využitím S-N křivek
Fig. 23: Evaluation of S460 (R=0,7) specimens results and fitting S-N curves

TECHNOLOGIE HFMI NA SVARU PO OPRAVĚ

Po provedení zkoušek HFMI na novém svaru byly vzorky s nakmitanou únavovou trhlinou dále využity a byla provedena lokální oprava poškozeného místa. Poškozené místo bylo nejprve vybroušeno nebo vydrážkováno a následně znovu svařeno. Svařování opravených vzorků proběhlo se stejnými parametry jako původní svařování nového svaru. Po dokončení opravného svařování byla provedena kontrola NDT (PT + UT) pro odhalení případných povrchových nebo vnitřních vad. Následně byla na vzorky aplikována technologie HFMI a pokračovalo se v zatěžování se stejnými parametry jako v případě nového svaru (obr. 8.). Tento postup simuluje opravu poškozené části konstrukce s únavovou trhlinou a její následný provoz se stejným dopravním zatížením.



Obr. 24: Vyhodnocení výsledků vzorků S460 (R=0,1) po opravě s využitím S-N křivek
Fig. 24: Evaluation of S460 (R=0,1) repaired specimens results and fitting S-N curves

ZÁVĚR

V rámci experimentální části disertační práce byly provedeny série únavových zkoušek vzorků s aplikováním technologie HFMI a porovnány se vzorky po běžném svaření. Připraveno bylo celkem 136 zkušebních vzorků ze čtyř pevnostních tříd oceli (od S355 až po S960). Vzorky byly navrženy s příčným tupým svarem V nebo X uprostřed rozpětí a zatěžovány čtyřbodovým ohybem s konstantním rozkmitem napětí a příslušným *R-faktorem*. Výsledkem experimentu bylo porovnání počtu cyklů do porušení u běžných vzorků po svaření se vzorky s HFMI.

Výsledky experimentů jednoznačně potvrzují významný přínos metody HFMI zejména u nižších hodnot středního napětí ($R = 0,1$). V těchto oblastech nízkých středních tahových napětí dosahovalo zvýšení únavové životnosti několika FAT kategorií v závislosti na pevnostní třídě materiálu a odpovídalo nebo dokonce převyšovalo doporučené hodnoty dle IIW. [1] Tyto režimy s nízkým středním napětím jsou dobře uplatnitelné na reálných dynamicky namáhaných konstrukcích (mosty, stožáry). Např. u mostních konstrukcí se může jednat o podélníky nebo příčníky, kde hodnota napětí od stálých zatížení (tj. středního napětí) dosahuje nízkých hodnot a přínos HFMI může být značný.

Naproti tomu vzorky zatěžované v oblastech vyšších tahových napětí ($R = 0,55$ nebo $R = 0,7$) vykazují značné poklesy únavové životnosti. Získané výsledky mohou pomoci doplnit potřebná data v této oblasti problematiky. U ocelí vyšších pevností však stále zůstává otázka únavové životnosti spojená s citlivou materiálovou strukturou (zejména tvrdé a křehké struktury bainitu a martenzitu) a jednotlivými tepelnými procesy v průběhu výroby (předehřev, svařování nebo žíhání).

V navazující části experimentu byly vzorky s únavovou trhlinou opraveny a znovu svařeny. Poté byla na opravený svar aplikována metoda HFMI a celý proces únavového zatěžování byl opakován se shodnými parametry jako v případě nového svaru. Počet cyklů do porušení takto opraveného svaru s HFMI se oproti původnímu svaru zvýšil přibližně dvojnásobně a zároveň se ukázalo, že svar po opravě s HFMI dosahoval srovnatelných výsledků jako nový svar s HFMI. Získané výsledky tak dávají ve spojitosti s jednoduchou, rychlou a levnou metodou HFMI výhledově nové možnosti efektivních oprav mostních konstrukcí zasažených únavovými trhlinami a mohou přispět k výraznému zlevnění a zefektivnění celého procesu rekonstrukce ocelových mostů s ohledem na únavovou životnost.

Hlavním cílem disertační práce je analýza HFMI v oblastech s vyšším středním napětím, kde aktuálně chybí teoretické modely i numerické experimenty a možnost využití metody HFMI na ocelové mosty s ohledem na rozkmity a spektra napětí měřená na skutečných konstrukcích. Provedené experimenty a získané výsledky přispěly k naplnění hlavních cílů disertační práce.

OZNÁMENÍ

Práce je podpořena grantem TAČR – Program Doprava 2030 (CL02000098 – „Redukce uhlíkové stopy dopravní infrastruktury optimalizovaným navrhováním a užitím HFMI pro vysokopevnostní a korozi odolné oceli“) a grantem SGS25/121/OHK1/3T/11 – Udržitelné materiály.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 1993-1-9 ed. 2 - Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-9: Únava. Česká technická norma, Český normalizační institut, 2013.
- [2] MARQUIS, G.B. and Z. BARSOUM. IIW Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints [online]. Singapore: Springer Singapore, 2016, 2016-09-30, s. 1-34 [cit. 2024-02-14]. IIW Collection. ISBN 978-981-10-2503-7. Dostupné z: https://doi:10.1007/978-981-10-2504-4_1.

PŘEHLED ČINNOSTI KATEDRY OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ V ROCE 2024

Články registrované ve WoS

- BOUTAR, Y. et al. Study of the Effect of Bio-Inspired Surface Texture on the Shear Strength of Bonded 3Dprinted Materials: Comparison between Stainless Steel and Polycarbonate Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024, 131 1-10. ISSN 0143-7496. DOI 10.1016/j.ijadhadh.2024.103658.
- DER, B. and F. WALD. Numerical Design Calculation of Bolted Lap Joints at Elevated Temperatures. *Fire Safety Journal*. 2024, 147 ISSN 1873-7226. DOI 10.1016/j.firesaf.2024.104202.
- DOLEJŠ, J., P. RYJÁČEK, P. ČERVENKA, M. WERUNSKÝ, L. KOLPASKÝ and V. PRÍBRASKÝ. Replacing a Steel Bridge Using Longitudinal Rotation. *Structural Engineering International*. 2024, 34(1), 97-101. ISSN 1683-0350. DOI 10.1080/10168664.2022.2124937.
- GHIMIRE, A., F. WALD et al. Numerical Design Calculation of the High-Strength Steel Welds. *Engineering Structures*. 2024, 300(117201), 1-15. ISSN 1873-7323. DOI 10.1016/j.engstruct.2023.117201.
- GHIMIRE, A., F. WALD et al. Numerical Design Calculation of the Fillet Weld Resistance. *Welding in the World*. 2024, 68 (2), 441-458. ISSN 1878-6669. DOI 10.1007/s40194-023-01638-9.
- JŮZA, J. and M. JANDERA. I-Section Stainless Steel Portal Frames: Loading Tests and Numerical Modelling. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024, 212 ISSN 0143-974X. DOI 10.1016/j.jcsr.2023.108293.
- MIKEŠ, K. et al. Glued-in Steel Plate and Screwed Connections in Timber-Concrete Composites Systems: Mechanical Performance and Design Implications. *Journal of Building Engineering*. 2024, 96 ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.job.2024.110477.
- RUBIO, R., P. QUINTANA GALLO and D.M. CARRADINE. Seismic Design and Nonlinear Response Comparison of a Hybrid Timber Building Configured with BRB- and SMA-braced LVL Frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2024, 22(2), 461-486. ISSN 1570-761X. DOI 10.1007/s10518-023-01781-0.
- ŠEJNA, J., K. CÁBOVÁ et al. On the Char front Temperature of Beech (*Fagus Sylvatica*). *Wood Science and Technology*. 2024, 58(4), 1535-1553. ISSN 1432-5225. DOI 10.1007/s00226-024-01574-x.
- ŠEJNA, J., F. WALD et al. Application of Hybrid Cement in Passive Fire Protection of Steel Structures. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2024, 15(2), 277-297. ISSN 2040-2317. DOI 10.1108/JSFE-01-2023-0007.
- ZDRAŽILOVÁ, M., Z. SOKOL and M. ELIÁŠOVÁ. Experimental Study on Full-Scale Glass Roof Panels with Embedded Laminated Connections under the Short-Term and Long-Term Loading. *Journal of Building Engineering*. 2024, 95 ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.job.2024.110112.
- ŽIDLICKÝ, B., J. MAREŠ and F. WALD. The Influence of Sandwich Panel Cladding on Horizontal Structure Stiffness. *Thin-Walled Structures*. 2024, 199 ISSN 0263-8231. DOI 10.1016/j.tws.2024.111771.
- ŽITNÝ, J., P. RYJÁČEK, et al. Probabilistic Assessment of the Equilibrium of a Steel Railway Bridge Based on Wind Tunnel and Traffic Records. *Structural Engineering International*. 2024, 34(1), 34-44. ISSN 1683-0350. DOI 10.1080/10168664.2023.2188341.

Příspěvky v databázi Scopus

- BOUTAR, Y. et al. Study of the Effect of Bio-Inspired Surface Texture on the Shear Strength of Bonded 3Dprinted Materials: Comparison between Stainless Steel and Polycarbonate Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024, 131 1-10. ISSN 0143-7496. DOI 10.1016/j.ijadhadh.2024.103658.
- DER, B. and F. WALD. Numerical Design Calculation of Bolted Lap Joints at Elevated Temperatures. *Fire Safety Journal*. 2024, 147 ISSN 1873-7226. DOI 10.1016/j.firesaf.2024.104202.
- DOLEJŠ, J., P. RYJÁČEK, P. ČERVENKA, M. WERUNSKÝ, L. KOLPASKÝ and V. PRÍBRASKÝ. Replacing a Steel Bridge Using Longitudinal Rotation. *Structural Engineering International*. 2024, 34(1), 97-101. ISSN 1683-0350. DOI 10.1080/10168664.2022.2124937.
- GHIMIRE, A., F. WALD et al. Numerical Design Calculation of the High-Strength Steel Welds. *Engineering Structures*. 2024, 300(117201), 1-15. ISSN 1873-7323. DOI 10.1016/j.engstruct.2023.117201.
- GHIMIRE, A., F. WALD et al. Numerical Design Calculation of the Fillet Weld Resistance. *Welding in the World*. 2024, 68 (2), 441-458. ISSN 1878-6669. DOI 10.1007/s40194-023-01638-9.
- JŮZA, J. and M. JANDERA. I-Section Stainless Steel Portal Frames: Loading Tests and Numerical Modelling. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024, 212 ISSN 0143-974X. DOI 10.1016/j.jcsr.2023.108293.
- MIKEŠ, K. et al. Glued-in Steel Plate and Screwed Connections in Timber-Concrete Composites Systems: Mechanical Performance and Design Implications. *Journal of Building Engineering*. 2024, 96 ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.job.2024.110477.
- RUBIO, R., P. QUINTANA GALLO and D.M. CARRADINE. Seismic Design and Nonlinear Response Comparison of a Hybrid Timber Building Configured with BRB- and SMA-braced LVL Frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2024, 22(2), 461-486. ISSN 1570-761X. DOI 10.1007/s10518-023-01781-0.
- ŠEJNA, J., K. CÁBOVÁ et al. On the Char front Temperature of Beech (*Fagus Sylvatica*). *Wood Science and Technology*. 2024, 58(4), 1535-1553. ISSN 1432-5225. DOI 10.1007/s00226-024-01574-x.
- ŠEJNA, J., F. WALD et al. Application of Hybrid Cement in Passive Fire Protection of Steel Structures. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2024, 15(2), 277-297. ISSN 2040-2317. DOI 10.1108/JSFE-01-2023-0007.
- ZDRAŽILOVÁ, M., Z. SOKOL and M. ELIÁŠOVÁ. Experimental Study on Full-Scale Glass Roof Panels with Embedded Laminated Connections under the Short-Term and Long-Term Loading. *Journal of Building Engineering*. 2024, 95 ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.job.2024.110112.
- ŽIDLICKÝ, B., J. MAREŠ and F. WALD. The Influence of Sandwich Panel Cladding on Horizontal Structure Stiffness. *Thin-Walled Structures*. 2024, 199 ISSN 0263-8231. DOI 10.1016/j.tws.2024.111771.
- ŽITNÝ, J., P. RYJÁČEK, et al. Probabilistic Assessment of the Equilibrium of a Steel Railway Bridge Based on Wind Tunnel and Traffic Records. *Structural Engineering International*. 2024, 34(1), 34-44. ISSN 1683-0350. DOI 10.1080/10168664.2023.2188341.

Recenzované články

- DOLEJŠ, J. a P. ORNSTOVÁ. Modelování podlahových dílců fasádních lešení. *Lešenář*. 2024, (25), 16-19. ISSN 2464-5338.
- DOLEJŠ, J. a P. ORNSTOVÁ. Modelování podlahových dílců fasádních lešení. *TZB info*. 2024, ISSN 1801-4399.

- KUKLÍK, P. Vícepodlažní dřevostavby a přínos 2. generace Eurokódu 5 pro jejich navrhování. Časopis stavebnictví. 2024, XVIII(01-02/2024), 26-32. ISSN 1802-2030.
- MAREŠ, J., Y. BOUTAR a M. ELIÁŠOVÁ. Lepené spoje u skleněných konstrukcí. TZB info. 2024, 2024 ISSN 1801-4399.
- ROTTER, T.: Stav mostů v České republice. Edice DOPRAVA 03/24, 42-44. Doprava /Stavebniserver.com/2024.
- RYJÁČEK, P., M. JANDERA, F. WALD, P. KUKLÍK, M. ELIÁŠOVÁ a J. DOLEJŠ. Nová generace Eurokódů v oblasti ocelových, dřevěných a skleněných konstrukcí. Konstrukce. 2024, 23(1/2024), 36-41. ISSN 1803-8433.
- ŠEJNA, J., P. DOBROVOLNÝ a F. WALD. Částečná požární ochrana ocelových konstrukcí – část 1: Shrnutí teoretických poznatků. TZB info. 2024, 2024 ISSN 1801-4399.
- ŠEJNA, J., P. DOBROVOLNÝ a F. WALD. Částečná požární ochrana ocelových konstrukcí – část 2: Experimenty, numerické modely a srovnání. TZB info. 2024, ISSN 1801-4399.
- ŠEJNA, J. a D. ŠEJNOVÁ PITELKOVÁ. Překračujeme normy v oblasti zuhelnatění dřevěných konstrukcí při přirozeném či orientovaném požáru. Konstrukce. 2024, 23 88-94. ISSN 1803-8433.

Stat' ve sborníku

- BOUTAR, Y., M. ELIÁŠOVÁ, P. TICHÁ, Z. KELAR TUČEKOVÁ and J. KELAR. Influence of Bonded Air- Versus Tin-side on the Shear Strength of Glass-to-Glass Joints of Transparent Epoxy Adhesive at Elevated Temperatures. In: Challenging Glass 9 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass. Delft, 2024-06-19/2024-06-20. Delft: Delft University of Technology (TU Delft), 2024. sv. 9. ISSN 2589-8019. DOI 10.47982/cgc.9.497.
- CHOVANEC, A. Únosnost trapézových plechů za požáru. In: STUDNIČKA, J. a I. PRAJZLEROVÁ, eds. Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. 2024-02-05/2024-09-20. Praha: ČVUT FSv. Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2024. s. 11-14. ISBN 978-80-01-07318-6.
- ČERVENKA, P. a J. DOLEJŠ. Steel FRC Slab in Compression in Steel-Concrete Composite Frame Joints. In: KNOBLOCH, M. et al., eds. Composite Construction in Steel and Concrete IX. 9TH International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete, Online, 2021-07-27/2021-07-29. Berlin: Ernst & Sohn, 2024. s. 510-521. ISBN 978-3-433-03378-4.
- DER, B., F. WALD and M. VILD. Numerical Design Calculation of Fin Plate Connections in Fire. In: Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures, CIGOS 2024, 4-5 April,. 7th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures, CIGOS 2024, HoChhiMin City, 2024-04-04/2024-04-05. Wien: Springer, 2024. s. 543-553. 1. sv. 1. ISSN 2366-2565. ISBN 978-981-97-1972-3. DOI 10.1007/978-981-97-1972-3_60.
- DOLEJŠ, J., K. ŠKRÉTA a S. VLASÁK. Problémy navrhování a provádění lešení v ČR. In: 47. Aktiv pracovníkov odboru ocelových konštrukcií. Spišská Nová Ves, 2024-05-22/2024-05-24. Košice. s. 49-54. ISBN 978-80-553-3305-2.
- ELIÁŠOVÁ, M., J. FÍLA a Z. SOKOL. Využití plných skleněných cihel ve stavebnictví. In: 47. Aktiv pracovníkov odboru ocelových konštrukcií. Spišská Nová Ves, 2024-05-22/2024-05-24. Košice. s. 55-60. ISBN 978-80-553-3305-2.
- GOLUBIATNIKOV, K., A. GHIMIRE, F. WALD and M. VILD. Limit Strain in the Elastic-Plastic Analysis in Steel. In: Nordic Steel Construction Conference 2024 (NSCC 2024). Nordic Steel Construction Conference 2024, Lulea, 2024-06-26/2024-06-28. Lulea University of Technology, 2024. 1. DOI 10.5281/zenodo.11449395.
- HOANG, T.L. Šroubové přípoje tenkostěnných konstrukcí za vysokých teplot. In: Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. s. 9-10. ISBN 978-80-01-07318-6.

- JANDERA, M. a A. CHOVANEC. Shrnutí normy EN 1993-1-14 pro navrhování s využitím MKP. In: XXVI. konference Ocelové konstrukce 2024 – Sborník příspěvků. XXVI. konference Ocelové konstrukce 2024, Pasohlávky, 2024-05-21. s. 27-36. ISBN 978-80-86604-92-3.
- JIROUŠEK, J. Projekt odezvy na dlouhodobý výpadek vnější elektrické sítě v Jaderné elektrárně Temelín. In: Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. s. 31-36. ISBN 978-80-01-07318-6.
- JOCHMAN, J. Deformace materiálů na bázi dřeva. In: STUDNIČKA, J. a I. PRAJZLEROVÁ, eds. Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. ČVUT FSv. Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2024. s. 15-18. ISBN 978-80-01-07318-6.
- KOMLEV, V. and J. MACHÁČEK. Design of Cable-Nets for Glass Facades. In: ENGINEERING MECHANICS 2024. 30th International Conference Engineering Mechanics 2024, Milovy, 2024-05-14/2024-05-16. Brno: Brno University of Technology, 2024. s. 162-165. 1 st edition, 2024. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-214-6235-9.
- KUKLÍK, P. a A. GREGOROVÁ. Přínos 2. generace Eurokódu 5 pro navrhování dřevostaveb. In: Dřevostavby 2024. Konference Dřevostavby 2024, Volyně, 2024-03-26/2024-03-27. s. 3-8. ISBN 978-80-86837-07-9.
- MACHAČOVÁ, D. Připoje trapézových plechů s momentovým překrytím. In: Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2024. s. 19-22. ISBN 978-80-01-07318-6.
- POVOLNÝ, Š. Vysoce namáhané ocelové komponenty při mimořádném zatížení. In: STUDNIČKA, J. a I. PRAJZLEROVÁ, eds. Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. ČVUT FSv. Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2024. s. 23-26. ISBN 978-80-01-07318-6.
- RUŠAROVÁ, S. Rychlosti zuhelnatění dřeva se zohledněním vlivu vývoje trhlin: Numerické řešení s využitím pravděpodobnostních postupů. In: Sborník 7. studentské vědecké konference. Zapálení2024, Fakulta stavební ČVUT, 2024-06-04/2024-06-05. s. 63-66. 1. ISBN 978-80-01-07311-7.
- RYJÁČEK, P., M. POLÁK a V. DYNBYL. Dynamické zkoušky na železničních mostech při rychlosti 200km/h. In: Sborník příspěvků. Železniční mosty a tunely 2024, Praha, 2024-01-30. Praha: SUDOP Praha a.s., 2024.
- RYJÁČEK, P., M. POLÁK a V. DYNBYL. Dynamické zkoušky na železničních mostech při rychlosti 200km/h. In: 47. Aktiv pracovníkov odboru ocelových konstrukcií. Spišská Nová Ves, 2024-05-22/2024-05-24. Košice. s. 161-167. ISBN 978-80-553-3305-2.
- RYJÁČEK, P., V. DYNBYL, M. POLÁK and J. LITOŠ. Dynamic Behaviour and Damping of Steel Railway Bridges at A Speed of 200 Km/H. In: 11th International Symposium on Steel Bridges 2024. Praha, 2024-09-11/2024-09-13. Berlin: Ernst & Sohn, 2024. s. 111-114. ISSN 2509-7075. DOI 10.1002/cepa.3091.
- RYJÁČEK, P. a kol. Možnosti a zkušenosti s aplikací optovláknových snímačů pro sledování mostů. In: 29.Mezinárodní symposium Mosty/bridges 2024. Mosty/bridges 2024, Brno, 2024-04-25/2024-04-26. s. 162-168. ISBN 978-80-86604-91-6.
- RYJÁČEK, P. et al. The Dynamic Analysis of the Troja Footbridge – the Analysis of the Possibility of the Early Warning before the Collapse. In: SMAR 2024 – 7th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. 7th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Salerno, 2024-09-04/2024-09-06. Amsterdam: Elsevier B.V., 2024. s. 228-237. sv. 64. ISSN 2452-3216. DOI 10.1016/j.prostr.2024.09.235.
- RYJÁČEK, P. a kol. Dynamická analýza Trojské lávky - poznatky z analýzy možnosti včasné detekce jejího porušení. In: 29.Mezinárodní symposium Mosty/bridges 2024. Mosty/bridges 2024, Brno, 2024-04-25/2024-04-26. Brno: Sekurkon, 2024. s. 99-109. ISBN 978-80-86604-91-6.
- STREJČEK, M. a M. JANDERA. Roznos lokálního zatížení přes skladbu tepelné izolace na plochých střechách s trapézovými plechy. In: XXVI. konference Ocelové konstrukce 2024 – Sborník příspěvků. XXVI. konference Ocelové konstrukce 2024, Pasohlávky, 2024-05-21. s. 54-63. ISBN 978-80-86604-92-3.

- ŠEJNA, J., K. CÁBOVÁ, F. WALD and D. ŠTRAUS. Probabilistic Modelling of Wood Charring Rates: A Parametric Study and Next Steps. In: LUÍS SIMÕES DA SILVA, L.S. et al., eds. Proceedings of the 13th International Conference on Structures in Fire (SiF 2024). SIF 2024 13th International Conference on Structures in Fire, Coimbra, 2024-06-19/2024-06-21. s. 1455-1464. sv. 1. ISBN 978-989-35292-2-5.
- ŠEJNA, J., K. CÁBOVÁ a F. WALD. Požární ochrana ocelových konstrukcí dřevěnými materiály. In: 47. Aktiv pracovníkov odboru oceľových konštrukcií. Spišská Nová Ves, 2024-05-22/2024-05-24. s. 177-182. ISBN 978-80-553-3305-2.
- ŠEJNA, J., P. DOBROVOLNÝ a F. WALD. Částečná ochrana oceli při požáru, tzv. coatback – možnost pro membránové působení. In: XXVI. konference Ocelové konstrukce 2024 – Sborník příspěvků. XXVI. konference Ocelové konstrukce 2024, Pasohlávky, 2024-05-21. s. 17-26. ISBN 978-80-86604-92-3.
- ŠEJNA, J., K. CÁBOVÁ a F. WALD. Pasivní požární ochrana oceli při požáru – typy, nové možnosti. In: XXVI. konference Ocelové konstrukce 2024 – Sborník příspěvků. XXVI. konference Ocelové konstrukce 2024, Pasohlávky, 2024-05-21. s. 7-16. ISBN 978-80-86604-92-3.
- ŠTEFANOVIČOVÁ, N. Technologická optimalizace výroby hybridních ocelových nosníků. In: STUDNIČKA, J. a I. PRAJZLEROVÁ, eds. Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. ČVUT FSv. Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2024. s. 37-42. ISBN 978-80-01-07318-6.
- ŠTĚPÁN, J. Zvyšování únavové životnosti svařených detailů metodou HFMI. In: STUDNIČKA, J. a I. PRAJZLEROVÁ, eds. Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. ČVUT FSv. Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2024. s. 27-30. ISBN 978-80-01-07318-6.
- ŠTĚPÁN, J. and P. RYJÁČEK. Increasing Fatigue Life of New Welded and Repaired Joints by hfmi Treatment. In: 11th International Symposium on Steel Bridges 2024. Praha, 2024-09-11/2024-09-13. Berlin: Ernst & Sohn, 2024. s. 248-255. ISSN 2509-7075. DOI 10.1002/cepa.3094.
- VIDLÁK, K. Plán přechodu z preventivní údržby na proaktivní preventivní údržbu parogenerátoru. In: STUDNIČKA, J. a I. PRAJZLEROVÁ, eds. Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. ČVUT FSv. Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2024. s. 43-48. ISBN 978-80-01-07318-6.
- VIJAYAKUMAR, M. Analysis of the Fusion Link of the Fire Separating Wall. In: STUDNIČKA, J. a I. PRAJZLEROVÁ, eds. Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. ČVUT FSv. Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2024. ISBN 978-80-01-07318-6.

Knihy

- WALD, F. et al. Steel Connection Design by Inelastic Analysis. Chichester: John Wiley & Sons, 2024. ISBN 9781394222155.
- RYJÁČEK, P. Steel Temporary Bridges for Quick Infrastructure Repair after Catastrophic Events. Brussels: ECCS European Convention for Constructional Steelwork, 2024. ISBN 978-92-9147-198-0.

Výzkumné zprávy

- RYJÁČEK, P., V. STANČÍK a kol. Koncepční návrh zvoleného konstrukčního řešení tlakové obálky velkých rozměrů – souhrn prací za rok 2024. [Výzkumná zpráva] 2024.

Hodnocené aplikované výsledky

- RYJÁČEK, P., K. GOLUBIATNIKOV a kol. Programové vybavení pro kritériální hodnocení emisní hlučnosti mostních závěrů po zabudování. [Software splňující podmínky RIV] 2024.
- RYJÁČEK, P. a kol. Specializovaná mapa mostu ve formě BIM se zobrazením vad a poruch. [Specializovaná mapa s odborným obsahem (do RIV)] 2024.
- RYJÁČEK, P. a J. ŠTĚPÁN. Aplikace HFMI na nový svarový spoj. [Ověřená technologie] 2024.
- RYJÁČEK, P. a J. ŠTĚPÁN. Aplikace HFMI na opravený svarový spoj. [Ověřená technologie] 2024.
- RYJÁČEK, P. a kol. Specializovaná databáze vad a poruch pro automatizovanou detekci. [Specializovaná veřejná databáze (do RIV)] 2024.
- RYJÁČEK, P.; K. GOLUBIATNIKOV a kol. Metodický postup kritériálního hodnocení emisní hlučnosti mostních závěrů po zabudování. [Uplatněná metodika schválená (do RIV)] 2024.

Citace

CÁBOVÁ, K.	19
DOLEJŠ, J.	9
ELIÁŠOVÁ, M.	66
JANDERA, M.	43
JÁRA, R.	1
KOŽICH, M.	3
KUKLÍK, P.	4
KUKLÍKOVÁ, A.	2
KUŘÍKOVÁ, M.	10
MACHÁČEK, J.	41
MAREŠ, J.	14
RYJÁČEK, P.	54
SOKOL, Z.	20
STANČÍK, V.	6
ŠEJNA, J.	4
VELEBIL, L.	6
VŮJTĚCH, J.	26
WALD, F.	126
ŽIDLICKÝ	1

Řešitelé grantů

- CÁBOVÁ, K. Únosnost a tažnost šroubovaných smykem namáhaných spojů pomocí styčnickových plechů z normálních a vysokopevnostních ocelí, GAČR 23-06961K, 2023-2025.
- DOLEJŠ, J. Výzkum a vývoj pontonového hydraulického modulárního systému a univerzálního systému elektropohonu pro pontonový systém, TAČR FW06010741, 2023-2025.
- ELIÁŠOVÁ, M. Povrchová úprava skla a její vliv na spolehlivost lepených spojů pro skleněné konstrukce za zvýšené teploty, GAČR 23-06016S, 2023-2025.
- ELIÁŠOVÁ, M. Open GLASSroom, ERASMUS+, 2022-1-DE01-KA220-HED-000089750, 2022-2025.
- RYJÁČEK, P. Kritériální metoda hodnocení hlučnosti mostních závěrů po zabudování, TAČR CK02000304, 2021-2024.

- RYJÁČEK, P. Zvyšování únavové odolnosti exponovaných svařovaných detailů z vysokopevnostních ocelí pro nové mosty, opravy a mostní provizoria, TAČR CK03000162, 2022-2025.
- RYJÁČEK, P. Pokročilý cloudový systém pro monitoring mostních konstrukcí za pomoci optických vláken, TAČR CK03000219, 2022-2024.
- RYJÁČEK, P. Identifikace a monitoring progresivní korozní i nekorozní degradace ocelových mostů pomocí platformy IoT, TAČR CK04000042, 2023-2025.
- RYJÁČEK, P. Inteligentní monitorovací systém pro železniční infrastrukturu, TAČR TM05000045, 2024-2025.
- WALD, F. Zuhelnatění dřeva při plně rozvinutém přirozeném požáru – stochastické modelování, GAČR 21-30949K, 2021-2024.
- WALD, F. Materiálová a konstrukční odezva na dynamická zatížení za požáru, GAČR 24-14577L, 2024-2026.
- WALD, F. Mezní poměrné přetvoření pro pokročilé modelování ocelových konstrukcí – deterministické a pravděpodobnostní řešení, MŠMT LUAUS23114, 2023-2027.
- WALD, F. Accompanying measure for Dissemination, Valorisation and Collaborative Exploitation of circularity of constructional steel products, RFCS 101112269, 2023-2025.
- WALD, F. Fire and Seismic performances of Hybrid fire WALLs in case of single-storey industrial and commercial steel buildings, RFCS 101034083, 2021-2024.
- WALD, F. Design of steel portal frames made of web tapered members with and without openings at normal temperature and fire conditions, RFCS 101157799, 2024-2027.
- WALD, F. Machine Learning – based Design Optimization of Steel Connections, MADESCO ID 3197, 2023-2026.

Hospodářská činnost

JANDERA, M.	HS 830-8302404A036	Kovové profily
	HS 830-8302404A068	ArcelorMittal
	HS 830-8302404A131	ArcelorMittal
	HS 830-8302404A194	FK PRO SYSTEMS
	HS 830-8302404A196	FK PRO SYSTEMS
DOLEJŠ, J.	HS 830-8302404A002	NTK
	HS 830-8302404A063	Olympic Festival
	HS 830-8302404A080	Biskupství plzeňské
	HS 830-8302404A117	ACO Industries
ELIÁŠOVÁ, M.	HS 830-8302404A008	AGC
	HS 830-8302404A167	Škoda Auto
RYJÁČEK, P.	HS 830-8302004A032	SŽDC
	HS 830-8302104A115	Správa železnic
	HS 830-8302304A038	Správa železnic
	HS 830-8302304A040	Správa železnic
	HS 830-8302304A108	Pontex
	HS 830-8302304A116	Správa železnic
	HS 830-8302304A137	CDV
	HS 830-8302304A151	Kloknerův ústav
	HS 830-8302404A008	TESIA speciální technické práce
	HS 830-8302404A020	TechTest
	HS 830-8302404A023	IKEA

	HS 830-8302404A026	Správa železnic
	HS 830-8302404A027	BM Construction
	HS 830-8302404A049	TOP CON SERVIS
	HS 830-8302404A054	TSK
	HS 830-8302404A055	Metrostav TBR
	HS 830-8302404A082	IKEA
	HS 830-8302404A085	CDV
	HS 830-8302404A086	CDV
	HS 830-8302404A089	Správa železnic
	HS 830-8302404A108	Správa železnic
	HS 830-8302404A116	Správa železnic
	HS 830-8302404A119	N+N KONSTRUKCE A DOPR. STAVBY
	HS 830-8302404A126	Správa železnic
	HS 830-8302404A139	Magistrát ČB
	HS 830-8302404A143	Pontex
	HS 830-8302404A145	Kloknerův ústav
	HS 830-8302404A152	Metrostav TBR
	HS 830-8302404A197	TESIA speciální technické práce
	HS 860-8602413A000	FIRESTA-Fišer
	HS 860-8602441A000	OHLA ŽS
	HS 860-8602459A000	STRABAG
	HS 860-8602473A000	EUROVIA
SOKOL, Z.	HS 830-8302404A093	JEREMI
ŠEJNA, J.	HS 830-8302404A044	Staviař – požární bezpečnost staveb
	HS 830-8302404A061	UCEEB
	HS 830-8302404A072	Staviař – požární bezpečnost staveb
AKCE K134	HS 820-8202404A000	Odborný seminář v rámci TODS

Celkový objem hospodářské činnosti katedry byl **14 744 396,- Kč**.

Další činnost

- DOLEJŠ, J. and M. VEVERKA, eds. Informace, novinky a zajímavosti z oboru lešení 2024. Praha: ČESKOMORAVSKÁ KOMORA LEŠENÁŘŮ, z. s., 2024.
- KOMLEV, V. and J. MACHÁČEK. Analysis of Cable-nets for Glass Facades. In: Sustainable Civil Engineering at the Beginning of Third Millennium. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2024. s. 355-363. ISSN 2366-2565. ISBN 978-981-97-1780-4. DOI 10.1007/978-981-97-1781-1_33.
- KUKLÍK, P. Požární bezpečnost vícepodlažních dřevostaveb. In: KUKLÍK, P., M. BERÁNEK a R. ONDRUCH, eds. Dřevostavby: Nová éra udržitelných staveb. Praha: Studio Perspektiv, s.r.o., 2024.
- KUKLÍK, P., M. BERÁNEK a R. ONDRUCH, eds. Dřevostavby: Nová éra udržitelných staveb. Praha: Studio Perspektiv, s.r.o., 2024.
- STUDNIČKA, J. a I. PRAJZLEROVÁ, eds. Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2024. ČVUT, 2024-02-05/2024-09-20. Praha: ČVUT FSv. Katedra

- ocelových a dřevěných konstrukcí, 2024. ISBN 978-80-01-07318-6.
- ŠEJNA, J. a L. VELEBIL. Dřevostavby pohledem požární bezpečnosti: Zamyšlení nad limitní výškou nebo možnostmi použití požárně inženýrského přístupu – 1. část. Dřevařský magazín. 2024, ISSN 1338-371X.
- ŠEJNA, J. a L. VELEBIL. Dřevostavby pohledem požární bezpečnosti: Zamyšlení nad limitní výškou nebo možnostmi použití požárně inženýrského přístupu – 2. část. Dřevařský magazín. 2024, ISSN 1338-371X.
- ŠEJNA, J. a L. VELEBIL. Dřevostavby pohledem požární bezpečnosti. Zamyšlení nad limitní výškou nebo možnostmi použití požárně inženýrského přístupu. Ekolist.cz. 2024, ISSN 1802-9019.
- TÝDEN OCELI, DŘEVA A SKLA: Akce pro studenty a odbornou veřejnost, 04/2024, Fakulta stavební. DOLEJŠ, J.: Soutěž ve virtuálním svařování; Lešenářský kamzík. WALD F., M. JANDERA, M. KOŽICH, P. RYJÁČEK a J. DOLEJŠ: Blok 1 - Ocelové konstrukce. ELIÁŠOVÁ, M., M. NETUŠIL, V. STANČÍK, P. KUKLÍK a K. MIKEŠ: Blok 2 – Skleněné a dřevěné konstrukce; odborný seminář (ČKAIT).
- EXKURZE KATEDRY: Prohlídka technických objektů a památek s odborným výkladem, Most a Bílina, 06/2024.

Práce členů katedry v normalizačních komisích

CÁBOVÁ, K.

CEN/TC 250/SC 1/WG 4 k přípravě EN 1991-1-2 (člen)

CEN/TC 250/SC 1/WG 4 EN 1991-1-2: zatížení konstrukcí při požáru (členka pracovní skupiny)

ECCS/TC 10 Task Group: Design of Gusset Plates (členka pracovní skupiny)

DOLEJŠ, J.

CEN TC 250/SC4 – Composite Structures (národní řešitel)

TNK 92 Lešení (člen)

ELIÁŠOVÁ, M.

CEN/TC 250/SC 11/WG 1 Design of Glass Structures (člen)

JANDERA, M.

CEN/TC250/SC 3/WG 3 EN 1993-1-3: Cold-Formed Members and Sheeting (člen pracovní skupiny)

CEN/TC250/SC 3/WG 4 EN 1993-1-4: Stainless Steels (člen pracovní skupiny a referenčního týmu)

CEN/TC250/SC 3/WG 22 EN 1993-1-14 Design Assisted by FEA (člen pracovní skupiny a ref. Týmu)

ECCS TC7 – Cold-Formed Thin-Walled Sheet Steel in Buildings (člen)

KUKLÍK, P.

Mezinárodní:

CEN/TC 250/SC 5 Structural Eurocodes/Timber structures (zástupce za ČR)

CEN/TC 250/SC 5/WG 2 Timber concrete composite – zástupce za ČR CEN/TC 250/SC 5 – WG4 Structural Fire Design (zástupce za ČR)

CEN/TC 124 Timber Structures (zástupce za ČR)

ISO/TC 165 Timber Structures (zástupce za ČR)

FSUW – Fire Safe Use of Wood (zástupce za ČR)

Národní:

TNK 27 Požární bezpečnost staveb (člen)

TNK 34 Dřevěné konstrukce (předseda)

TNK 38 Spolehlivost stavebních konstrukcí (člen)

TNK 135 Dřevo a výrobky na bázi dřeva (člen)

Odborný poradní orgán MŠMT „Rada programu COST CZ“ (člen)

Česká dřevařská společnost ČSSI (předseda)

ROTTER, T.

Komise pro mosty na MD (řešitel)

Pracovní skupina pro mosty na ŘSD

Přípravný výbor konference Mosty

Autorizační komise pro Mosty a inženýrské konstrukce při ČKAIT

Hodnotící komise soutěže Železniční mosty pod Vyšehradem

Redakční rada časopisu Silnice železnice

RYJÁČEK, P.

Mezinárodní:

CEN/TC 250/SC 3/WG 9 WG09 Evolution and Maintenance of EN 1993-1-9 (člen)

CEN TC 250/SC 1/WG 3 TG Dynamic Interface between Bridges and Rolling Stock (DIBRST) (člen)

CEN/TC 250/SC 3/AHG Re-use “Design of Seclaimed Steel Components for re-use” (člen)

CEN/TC 250/SC 3/AHG Existing Iron and Steel Structures (člen)

ECCS, PMB – Promotional Management Board, BC – Bridge Committee (člen)

Národní:

Komise pro mosty Ministerstva dopravy

TNK 35 – Ocelové konstrukce

WALD, F.

Mezinárodní:

ECCS/TC3 Fire Safety of Steel Structures (člen)

CEN/TC 250/SC 3/WG 2 Fire Safety of Steel Structures (člen)

ECCS/TC4 Fire Safety of Composite Steel and Concrete Structures (člen)

CEN/TC 250/SC 4/WG 2 Fire Safety of Composite Steel and Concrete Structures (člen)

ECCS/TC10 – Structural Connections (člen)

CEN/TC 250/SC 3/WG 10 – Structural Connections (člen)

ECCS/TC22 – Design by Finite Elements (člen)

CEN/TC 250/SC 3/WG 22 – Design by Finite Elements (člen)

DIN Deutsche Normungspanel (DNP) (člen)

Národní:

ČAS Normalizační výbor (člen)

ČAS TNK 35 Ocelové konstrukce (člen)

ŽIDLICKÝ, B.

ECCS TC 14 – Sustainability and Eco-Efficiency of Steel Construction (člen)

Vědecká a doktorandská výchova

CÁBOVÁ, K.: Vopatová, K.

DOLEJŠ, J.: Bek, P., Ornstová, P., Povolný, Š., Štefanovičová, N., Werunský, M.

ELIÁŠOVÁ, M.: Mareš J., Zikmundová, M.

JANDERA, M.: Bartůšek, P., Feber, N., Chovanec, A., Jůza, J., Macháčová, D., Šorf, M.

KUKLÍK, P.: Jochman, J., Meretuková, M.

MACHÁČEK, J.: Komlev, V., Vijayakumar, M.

ROTTER, T.: Jehlička, P., Kramoliš, F., Stejskal, J.

RYJÁČEK, P.: Dejmek T., Dynybyl V., Kramoliš, F., Štěpán, J., Vůjtěch, Jakub, Vůjtěch Jan.

SOKOL, Z.: Hoang, T. L., Zdražilová, M.

WALD, F.: Der, B., Ghimire, A., Golubiatnikov, K., Gregorová, A., Hřebenářová, E., Kalmykova, S., Kožich, M., Šejna, J.

Obhájené doktorské práce (Ph.D.)

- Ghimire A., - Wald (školitel): Numerical Calculation of Welds in Structures from High-Strength Steel. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Golubiatnikov K., - Wald (školitel): Únavová životnost styčníků metodou konečných prvků s komponentami. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Jehlička P., - Rotter (školitel): Vliv svaru na únosnost styčnicku hranatých uzavřených průřezů. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Kožich M., - Wald (školitel): Připoj styčnickového plechu na pruty kruhových uzavřených průřezů z vysokopevnostních ocelí. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Ornstová P., - Dolejš (školitel): Prostorová tuhost systémových fasádních lešení: Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Šorf M., - Jandera (školitel): Lateral-Torsional Buckling of Welded Stainless Steel Slender I-Section Beams. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Vůjtěch J., - Ryjáček (školitel): Využití na mokro kladených uhlíkových kompozitů pro prodloužení zbytkové životnosti ocelové konstrukce s únavovou trhlinou. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.

Obhájené diplomové práce (Ing.)

- Antoni R., - Kuklíková (vedoucí): Administrativní budova. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Bartůšek P., - Jandera (vedoucí): Zimní stadion. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Dynybyl V., - Ryjáček (vedoucí): Stanovení a analýza útlumu mostů. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Flax T., - Dolejš (vedoucí): Lávka přes Vltavu v Českých Budějovicích. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Horák V., - Kuklík (vedoucí): Nosná dřevěná konstrukce zimního stadionu. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Hozman L., - Jandera (vedoucí): Dvoulodní skladovací hala s mostovými jeřáby. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Jonáš O., - Židlický (vedoucí): Průmyslový komplex s administrativním zázemím. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Kačírek J., - Cábová (vedoucí): Modelování ocelového nosníku při požáru v peci. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Kalenský D., - Židlický (vedoucí): Návrh ocelového komínu. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Klofcová S., - Ryjáček (vedoucí): Přepočet a průzkum železničního mostu v Jihlavě. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Konvička J., - Kuklík (vedoucí): Dřevěná konstrukce sportovní haly. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Koppová J., - Velebil (vedoucí): Dřevobetonový spřažený nosník za požáru. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Matiukhov M., - Jandera (vedoucí): Ocelový zásobník. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Mitrenga A., - Ryjáček (vedoucí): Alternativní návrh spřaženého dálničního mostu u Nitry. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Opatrná J., - Velebil (vedoucí): Bytový dům. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Peukert M., - Jandera (vedoucí): Šestilodní skladovací hala s mostovými jeřáby. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Pour R., - Ryjáček (vedoucí): Analýza monitoringu interakce most-kolej na železničním mostě. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Procházka M., - Kuklíková (vedoucí): Dřevěná konstrukce zastřešení plaveckého bazénu. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Průšová K., - Cábová (vedoucí): Vývoj trhlin v zuhelnatělé vrstvě deskových materiálů ze dřeva při termomechanickém namáhání. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.

- Schejbalová J., - Ryjáček (vedoucí): Dvorecký most – analýza externích vlivů a poškození. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Štraus D., - Cábová (vedoucí): Zuhelnatělá vrstva dřevěných masivních prvků pomocí pravděpodobnostních postupů. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.

Obhájené bakalářské práce (Bc.)

- Bečka O., - Wald (vedoucí): Analýza litinového sloupu za zvýšené teploty při rekonstrukci papírny v Plzni. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Břenková A., - Dolejš (vedoucí): Svarové spoje vysokopevnostních ocelí. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Češka K., - Velebil (vedoucí): Základní škola Bubeneč. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Dufková K., - Velebil (vedoucí): Polyfunkční dům Petřiny. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Flohr S., - Dolejš (vedoucí): Prohlídka technologické lávky v Kralupech nad Vltavou. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Havíř J., - Ryjáček (vedoucí): Analýza porušení železničního mostu v Kojetíně. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Heran M., - Ryjáček (vedoucí): Prohlídka a posouzení železničního mostu v Plzni. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Hlásek F., - Kuklík (vedoucí): Dřevěná konstrukce sportovního a kulturního centra. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Janda P., - Jandera (vedoucí): Mendelův skleník. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Konvalina P., - Kožich (vedoucí): Skladovací hala. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Kotalík A., - Ryjáček (vedoucí): Technologie montáže mostního provizoria ŽM16. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Kulhavá M., - Kožich (vedoucí): Zahradní centrum Plantex. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Kvasnička F., - Židlický (vedoucí): Tenisová hala se zázemím. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Lazorik L., - Eliášová (vedoucí): Multifunkční kulturní centrum. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Mareš L., - Kožich (vedoucí): Výrobní hala. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Mašková T., - Kožich (vedoucí): Dílny Opatov. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Míka Š., - Židlický (vedoucí): Průmyslová výrobní hala. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Mikeš O., - Dolejš (vedoucí): Moderní dřevěné rámové konstrukce ve stavebnictví. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Nejedlá M., - Jandera (vedoucí): Zastřešení nádvoří. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Panayi S., - Kuklík (vedoucí): CLT – Křížem vrstvené dřevo. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Patroch A., - Kožich (vedoucí): Hala s pultovou střechou. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Pelech V., - Ryjáček (vedoucí): Analýza porušení železničního mostu v Lužné. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Pospíšil R., - Židlický (vedoucí): Dočasná ocelová konstrukce letištního terminálu. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Pulcová K., - Velebil (vedoucí): Administrativní budova Wolf systém. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Roub R., - Velebil (vedoucí): Novostavba bytového domu „Příchovická chata“. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Rýdl Š. – Jandera (vedoucí): Podpůrné konstrukce zásobníku s technologickým mostem. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Říha A., - Židlický (vedoucí): Návrh ocelové rozhledny. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Šafka F., - Židlický (vedoucí): Multifunkční sportovní hala. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Šerík M., - Jandera (vedoucí): Autosalon. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Špaček Š., - Jandera (vedoucí): Ocelová konstrukce sportovní haly s obloukovým vazníkem. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Tranová T. H., - Jandera (vedoucí): Konstrukce kouřovodu. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.
- Valešová M., - Cábová (vedoucí): Požární scénáře v bytovém domě a jejich vliv na požární odolnost

konstrukce. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.

Valoušková E., - Kožich (vedoucí): Tenisová hala. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.

Verichová T. – Wald (vedoucí): Požární řešení konstrukce divadla v Trutnově. ČVUT, Fakulta stavební, 2024.