ANALÝZA EFEKTÍVNOSTI SPRIAHOVACÍCH LÍŠŤ V DREVOBETÓNOVÝCH KONŠTRUKCIÁCH

ANALYSIS OF EFFICIENCY OF PERFORATED STEEL STRIPS IN TIMBER-CONCRETE STRUCTURES

Adam Petřík^{*,1}

*adam.petrik@stuba.sk

¹Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra kovových a drevených konštrukcií, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

Abstrakt

Spriahovacie lišty ako alternatívny spôsob spriahovania ocelobetónových konštrukcií našli uplatnenie najmä v mostnom staviteľstve, no stále častejšie sa vyskytujú aj v objektoch pozemných stavieb, kde je potrebné prekonávať veľké rozpätia. Použitie spriahovacích lišt v drevoobetónových konštrukciách vzhľadom na absenciu komplexných poznatkov nedosahuje úroveň iných druhov spriahovacích prostriedkov. Numerickými simuláciami je možné analyzovať správanie sa takýchto konštrukcií, ako aj sledovať napätostné parametre jednotlivých prvkov. Na základe výsledkov z týchto simulácií je možné zhodnotiť potenciál takýchto konštrukcií, ako aj ďalšie smery výskumu drevoobetónových konštrukcií so spriahovacími lištami.

Klíčová slova

Drevoobetónové konštrukcie, spriahovacie lišty, numerické simulácie

Abstract

Perforated steel strips as an alternative coupling method of steel-concrete structures have found application mainly in bridge construction, but they are also increasingly used in building structures, where it is necessary to overcome large spans. Due to the absence of complex knowledge, the usage of perforated steel strips in timber-concrete structures does have not reached the level of other types of coupling methods. Numerical simulations can be used to analyse the behaviour of such structures, as well as monitor the stress parameters of individual elements. Based on the results of these simulations, it is possible to evaluate the potential of such structures, as well as other directions of research of timber-concrete structures with perforated steel strips.

Key words

Timber-concrete structures, perforated steel strips, numerical simulations

1 ÚVOD

Využívanie spriahovacích lišt ako spriahovacích prostriedkov betónu a ocele kontinuálne zvyšuje najmä v oblasti mostného staviteľstva, kde majú takéto konštrukcie vďaka kombinácii dobrých statických a únavových vlastností majú predpoklady spoľahlivo fungovať počas celej doby životnosti. Ocelobetónové prvky spriahnuté spriahovacími lištami sa však začínajú vyskytovať aj v objektoch pozemného staviteľstva, kde je možné vďaka týmto prvkom jednoduchšie prekonávať veľké rozpätia medzi podpernými konštrukciami a využívať výhodné únavové vlastnosti – jedná sa najmä o objekty parkovacích domov [1].

Výskum širšieho využitia spriahovacích lišt v drevoobetónových konštrukciách však stále absentuje, pričom jednou z výnimiek je použitie tenkých dierovaných lišt HBV® firmy TiComTec [2]. Používanie aj iných druhov spriahovacích lišt, ktoré by prispelo k zatraktívneniu využívania týchto druhov spriahnutých konštrukcií, zatiaľ nebolo skúmané.

Vzhľadom na absenciu základných poznatkov o možnom správaní spriahnutých drevoobetónových konštrukcií s použitými spriahovacími lištami, je vhodné využiť numerické simulácie na analýzu napätostných a deformačných parametrov týchto konštrukcií s cieľom získať informácie o správaní sa jednotlivých častí týchto konštrukcií pod vplyvom zvyšujúceho sa zaťaženia a tým vyhodnotiť prípadný potenciál týchto konštrukčných prvkov v budovách.

Príspevok sa zaoberá možnosťou využitia numerických simulácií pri analýze spriahnutých drevobetónových nosníkov prostredníctvom spriahovacích lišt, ako aj vplyv zaťaženia, materiálových vlastností a materiálových modelov jednotlivých prvkov modelov na statické a deformačné parametre konštrukcie.

2 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Spriahovacie lišty je možné po takmer štyridsiati rokoch výskumu v oblasti oceľobetónových konštrukcií považovať za bezpečnú a spoľahlivú alternatívu k bežne používaným spriahovacím prostriedkom, najmä tŕňom s hlavou, pričom často predstavujú alternatívu s vyššou únosnosťou a lepšími únavovými vlastnosťami. Pre niektoré typy spriahovacích lišt ako typ MCL či PZ boli na základe realizovaného výskumu vydané návrhové postupy a technické schválenie (Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-26.4-56 - Stahlverbundträger mit Verbunddübeln in Klothoiden- und Puzzleform) [3]. Jedná sa však len o lišty používané v oceľobetónových konštrukciách.

V prípade drevobetónových konštrukcií je možné považovať za spriahovacie lišty tenké perforované lišty HBV® firmy TiComTec [2], ktorých výskum bol ukončený vydaním technického schválenia (Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-557 - HBV-Schubverbinder aus Streckmetall und vorgefertigte Bauteile mit eingeklebten; HBV-Schubverbinder für ein Holz-Beton-Verbundsystem) [4]. Tieto lišty sú vlepuvané do vyfrézovaných drážok v drevených prvkoch (nosníkoch, CLT doskách). Následne sa uloží betonárska výstuž a dôjde k betonáži (obr. 1). Výhodou tohoto systému pre obytné budovy je možnosť viesť betonovou vrstvou elektroinštaláciu, rovnako aj ju vybaviť elektrickým podlahovým vykurovaním.

Obr. 1 Pričný rez drevobetónových nosníkov s lištami HBV® firmy TiComTec [4].

Podobnými perforovanými oceľovými lištami sa zaoberal aj výskum na Univerzite v A Coruña (Španielsko) [5]. Tie kombinovali aj s účinkom doplnkovej priečnej a pozdĺžnej betonárskej výstuže (obr.2). Výskum sa zameriaval na efektivitu prenosu pozdĺžnej šmykovej sily prostredníctvom spriahovacej lišty medzi drevenou a betonovou časťou prierezu ako laboratórnymi experimentami, tak aj numerickými simuláciami s cieľom definovať tuhostné parametre spojenia, ako aj verifikovať numerický model na skúmanie spriahnutia drevobetónových konštrukcií.

Obr. 2 Schémy drevobetónových nosníkov s použitými perforovanými oceľovými lištami [5].

3 NUMERICKÁ ANALÝZA

Pre uskutočnenie numerickej analýzy bol vytvorený 3D model proste podopretého drevobetónového nosníka v programe ANSYS 19 [6] (obr. 3), pričom boli využité obe osi symetrie modelu pre zrýchlenie výpočtu. Osová vzdialenosť podpier je 5,0 metra, rozmer prierezu drevenej časti (C24) je 200/100 mm, na ktorej je umiestnená betónová doska z betónu triedy C30/37 o hrúbke 100 mm so šírkou 650 mm. Zaťaženie pôsobilo rovnomerne plošne na horný povrch betónovej dosky a bolo zvolené o hodnote 15 kN/m². Ako typ spriahovacej lišty bol vybratý typ MCL [3] o hrúbke 5 mm (hrúbka je funkciou veľkosti lišty; hodnota vyplýva zo zvolenej veľkosti spriahovacej lišty podľa návrhového manuálu [3]) vo vzájomnej vzdialenosti 50 milimetrov z ocele S355. Kontakt medzi lištou a dreveným prierezom bol riešený ako tuhý, medzi lištou a betónom ako frikčný s frikčným koeficientom 0,3.

Obr. 3 3D model drevobetónového nosníka vstupujúceho do numerickej analýzy.

Analýza pozostávala z prvej simulácie drevobetónového prierezu bez spriahovacej lišty pre získanie referenčných výsledkov (napätia a deformácia) - kombinovaného prierezu bez účinku spriahnutia a plne spriahnutého prierezu. Materiálový model betónu a dreva bol počiatočne zvolený ako lineárny (L). Následne boli do prierezu pridané spriahovacie lišty typu MCL o hrúbke 5 mm (2 varianty – s lineárnym (L) a nelineárnym materiálovým modelom (NL)), pričom ich hrúbka postupne klesala na hodnotu 2 milimetre (modely s nelineárnou (NL) materiálnou charakteristikou ocele - skutočný diagram ocele). Pre porovnanie bol vyhodnotený aj variant s vpletenou lištou typu HBV® o hrúbke 2 milimetre.

Pre porovnanie výsledkov bol zmenený materiálový model betónu na nelineárny (Menetrey-William [7]), ako aj analyzovaný efekt po porušení dreveného prierezu na deformáciu a napätia v drevobetónovom nosníku – vytvorením prerušenia dreveného prierezu v strede nosníka.

V závere bola vytvorená aj parametrická štúdia, kde došlo k postupnému zvyšovaniu zaťaženia na limitnú hodnotu ťahových napätí krajných vlákien v drevenej časti prierezu (C14-C50), pričom boli analyzované napätia v lište a betóne, ako aj vplyv zaťaženia a triedy materiálu na deformáciu.

4 VÝSLEDKY

Výsledky pre kombinovaný prierez bez účinku spriahnutia (vzorka 1) a plne spriahnutý prierez (vzorka 2) sa nachádzajú v Tab. 1. Sú to referenčné hodnoty pre porovnanie s ostatnými analyzovanými modelmi a budú slúžiť pre interpretovanie výsledkov z ostatných simulácií.

Tab. 1 Výsledky numerickej simulácií pre kombinovaný prierez bez účinku spriahnutia a plne spriahnutý prierez.

№	Drevo	Betón	Max. σ	Max. $\sigma^{\oplus}$	Max. $\sigma^{\ominus}$	Max. zvislá deformácia [mm]
			drevo [MPa]	betón [MPa]	betón [MPa]	
			Max. σ v oceľovej lište [MPa]			
1	C24 (L)	C30/37 (L)	13,21	+19,9	-19,9	28,02
		-	-	-	-	
2	C24 (L)	C30/37 (L)	11,1	+5,75	-9,59	11,1
		-	-	-	-	

Následne bola do modelu pridaná dvojica spriahovacích lišt typu MCL o hrúbke 5 mm, pričom model bol plne materiálovo lineárny (vzorka 3) a následne bola materiálová charakteristika oceľovej lišty (vzorka 4) zmenená na nelineárnu – skutočný diagram ocele S355. Vplyv tenších lišt (mimo odporúčaného intervalu uvedeného v návrhovom postupe [3]) na parametre nosníka pod zaťažením bol analyzovaný na vzorkách 5 až 7, pričom pre porovnanie bola namodelovaná aj vzorka s osadenou lištou typu HBV® o hrúbke 2 mm (vzorka 8). Výsledky pre uvedené vzorky 3 až 8 sa nachádzajú v Tab. 2.

Tab. 2 Výsledky numerických simulácií pre spriahnutý prierez lištami typu MCL a HBV®.

№	Drevo	Betón	Max. σ	Max. $\sigma \oplus$	Max. $\sigma \ominus$	Max. zvislá deformácia [mm]
			drevo [MPa]	betón [MPa]	betón [MPa]	
	Oceľ		Max. σ v oceľovej lište [MPa]			
3	C24 (L)	C30/37 (L)	10,62	+5,67	-9,85	10,97
	S355 hr.5 mm (L)			60,25		
4	C24 (L)	C30/37 (L)	9,41	+4,78	-9,1	9,76
	S355 hr.5 mm (NL)			53,7		
5	C24 (L)	C30/37 (L)	9,48	+4,84	-8,84	9,84
	S355 hr.4 mm (NL)			54,42		
6	C24 (L)	C30/37 (L)	9,54	+4,99	-8,9	9,93
	S355 hr.3 mm (NL)			54,75		
7	C24 (L)	C30/37 (L)	9,63	+5,12	-8,95	10,05
	S355 hr.2 mm (NL)			54,96		
8	C24 (L)	C30/37 (L)	9,68	+4,94	-8,93	10,02
	S355 HBV® (NL)			221,38		

Obr. 4 Napätia v pravej polovici oceľovej spriahovacej lište HBV® v nosníku (vzorka 8).

Pre spresnenie výpočtu bol zmenený materiálový model betónu na nelineárny (vzorka 9), čím je možné zároveň porovnať tento vplyv s modelom s lineárnou charakteristikou betónu (vzorka 4). Nakoľko bola sledovaná aj situácia, keď dôjde k porušeniu dreveného prierezu, bol tento prípad namodelovaný, a to prostredníctvom oslabenia prierezu, resp. jeho prerušením uprostred rozpätia, kde sa predpokladá vznik porušenia prierezu (vzorka 10). Výsledky sú uvedené v Tab. 3.

Tab. 3 Výsledky numerických simulácií pre spriahnutý prierez lištami s nelineárnou charakteristikou betónu a prerušeným dreveným nosníkom.

№	Drevo	Betón	Max. σ drevo	Max. $\sigma \oplus$	Max. $\sigma \ominus$	Max. zvislá deformácia [mm]
			[MPa]	betón [MPa]	betón [MPa]	
	Oceľ		Max. σ v oceľovej lište [MPa]			
9	C24 (L)	C30/37 (NL)	9,86	+2,89	-8,17	10,3
	S355 hr.5 mm (NL)			55		
10	C24 (L)	C30/37 (NL)	6,12	+2,89	-26,74	18,43
	S355 hr.5 mm (NL)			371,88		

Obr. 5 Porovnanie napätia v pravej časti oceľovej spriahovacej lište s neporušeným dreveným prierezom (vzorka 9; hore) a s prerušeným dreveným prierezom uprostred rozpätia, pričom tmavé oblasti predstavujú oblasti s napätiami vyššími ako v prípade vzorky s neporušeným dreveným prierezom (vzorka 10; dole).

Na záver bola pripravená parametrická štúdia (vzorka 11-23), v ktorej sa menili materiálové parametre drevenej časti prierezu a zaťaženie tak, aby došlo k dosiahnutiu maximálneho ťahového napätia v spodných vláknoch dreveného prierezu. Sledoval sa rast napätí v celom drevobetónovom priereze, zvislá deformácia ako aj hodnota zaťaženia, pri ktorom maximálne napätie v drevenej časti nastalo. Výsledky sú uvedené v Tab. 4.

Tab. 4 Výsledky numerických simulácií pre spriahnutý prierez lištami s nelineárnou charakteristikou betónu a prerušeným dreveným nosníkom.

N _ž	Drevo	Betón	Max. σ drevo [MPa]	Max. σ^Θ betón [MPa]	Max. σ^Θ betón [MPa]	Zvislá deform. [mm]	Max. zaťaženie [kN/m ²]
	Oceľ						
11	C14 (L)	C30/37 (NL)	8,0	+2,89	-10,67	13,06	18,7
	S355 hr.5 mm (NL)			82,9			
12	C16 (L)	C30/37 (NL)	10,0	+2,89	-12,02	14,35	22,5
	S355 hr.5 mm (NL)			89,65			
13	C18 (L)	C30/37 (NL)	11,0	+2,89	-12,14	14,14	24,0
	S355 hr.5 mm (NL)			86,2			
14	C20 (L)	C30/37 (NL)	12,0	+2,89	-12,75	14,7	25,9
	S355 hr.5 mm (NL)			88,4			
15	C22 (L)	C30/37 (NL)	13,0	+2,89	-13,3	15,12	27,75
	S355 hr.5 mm (NL)			90,2			
16	C24 (L)	C30/37 (NL)	14,0	+2,89	-13,5	14,98	29,3
	S355 hr.5 mm (NL)			87,3			
17	C27 (L)	C30/37 (NL)	16,0	+2,89	-13,95	16,39	33,2
	S355 hr.5 mm (NL)			95,0			
18	C30 (L)	C30/37 (NL)	18,0	+2,89	-15,25	17,68	37,0
	S355 hr.5 mm (NL)			100,9			
19	C35 (L)	C30/37 (NL)	21,0	+2,89	-16,7	19,18	42,5
	S355 hr.5 mm (NL)			107,5			
20	C40 (L)	C30/37 (NL)	24,0	+2,89	-18,15	20,45	47,8
	S355 hr.5 mm (NL)			111,9			
21	C45 (L)	C30/37 (NL)	27,0	+2,89	-19,45	21,64	53,0
	S355 hr.5 mm (NL)			115,5			
22	C50 (L)	C30/37 (NL)	30,0	+2,89	-20,7	22,73	58,1
	S355 hr.5 mm (NL)			118,3			

5 DISKUSIA

Numerickými simuláciami sa potvrdil predpokladaný priaznivý vplyv spriahnutia drevenej a betónovej časti prierezu na hodnotu deformácie a napätí v skúmanom nosníku (vzorka 1 a 2). Pridaním spriahovacích lišt do modelu sa tiež potvrdila skutočnosť, že pridaním spriahovacích lišt dôjde v malej miere k zmenšeniu napätí v priereze, ako aj deformácie (vzorka 3). Spresnením materiálového modelu oceľovej lišty na nelineárny došlo v dôsledku spresnenia výpočtu k ďalšej redukcii napätí a deformácie (vzorka 4).

V prípade zmenšovania hrúbky spriahovacej lišty nedochádza k výraznému vzrastu hodnôt napätí a deformácie nosníka, čo je priaznivé pre úsporu materiálu, ako aj jednoduchšiu manipuláciu a montáž samotnej spriahovacej lišty (vzorky 5 až 7). Prekvapivým záverom je porovnanie vzoriek nosníka so spriahovacou lištou typu MCL hr. 2 mm (vzorka 7) a lištou HBV® (vzorka 8) - napätia v drevenej a betónovej časti prierezu, rovnako ako deformácia boli takmer totožné, no v prípade lišty typu HBV® sú napätia v lište výrazne vyššie, avšak vyššie hodnoty napätí sa nachádzajú najmä v časti lišty zapustenej v drevenej časti prierezu (obr.4).

Pre spresnenie výsledkov (najmä kvôli vyšším hodnotám ťahových napätí v betónovej časti prierezu) došlo k zmene materiálového modelu betónu na nelineárny (vzorka 9), čo sa prejavilo malým zväčšením deformácie (v porovnaní so vzorkou 4), no najmä korekcie napätí v betónovej časti prierezu. Nakoľko rozhodujúcou časťou prierezu z hľadiska odolnosti je na základe predchádzajúcich simulácií únosnosť drevenej časť, predpokladá sa, že primárne dôjde k porušeniu dreveného prierezu v strede rozpätia. Aby sa zachytil účinok porušenia drevenej časti, bol drevený prierez v strede nosníka oslabený vynechaním (vzorka 10). Došlo k výrazným napätostným zmenám v priereze – hodnota tlakových napätí v betóne sa stonásobila, výrazne sa zvýšilo a čiastočne aj

redistribuovalo napätie v oceľovej lište (obr.5). Maximálne napätie v drevenej časti prierezu sa nachádza približne v tretinách nosníka. Hodnota deformácie sa takmer zdvojnásobila, no stále dosahuje približne 74 percent limitnej hodnoty priehybu, čo je stále akceptovateľná hodnota.

V záverečnej parametrickej štúdii (vzorka 11 až 22) došlo k analýze vplyvu zvyšovania zaťaženia na limitnú hodnotu ťahových napätí v drevenej časti drevobetónového nosníka (podľa EN 338 [8]). Napriek násobnému zväčšovaniu napätí v drevenej časti, nárast deformácie bol podstatne nižší, podobne ako nárast napätí vo zvyšnom priereze. Z výsledkov je možné interpretovať skutočnosť, že všetky skúmané vzorky v rámci parametrickej štúdie (vzorka 11 až 22) splnili podmienku limitného priehybu (1/200 rozpätia) o hodnote 25 mm.

Záverom je možné tiež konštatovať, že spresnením materiálových modelov došlo k redukcii napätostných parametrov, ako aj deformácie. Vzhľadom na náročnosť plastického modelu dreva sa v tejto analýze uvažovalo len s lineárnym materiálovým modelom. V porovnaní s listou typu HBV® je lišta typu MCL podstatne menej namáhaná a k jej efektívnemu využitiu dochádza až v momente prípadného porušenia dreveného prierezu.

6 ZÁVER

Analýzou sa potvrdil potenciál využitia spriahovacích listů bežne používaných v prípade oceľobetónových konštrukcií, pričom ich primárny účel, a to prenos pozdĺžnych šmykových síl medzi drevenou a betónovou časťou prierezu, plnia spoľahlivo a účinne. Ich analýza v prostredí numerických simulácií je spoľahlivá aj v prípade použitia lineárnych materiálových modelov, čo rozširuje možnosti výskumu a analýzy aj do iných programov. Potvrdil sa predpoklad, že je možné modifikovať odporúčané geometrické intervaly listů, a to najmä pomer hrúbky a výšky - tenšie listů fungujú rovnako spoľahlivo bez vzniku miest s koncentraciami napätí, podobne ako listů HBV®, ktoré sa používajú v drevobetónových konštrukciách. Taktiež sa analyzoval aj stav pri porušení drevenej časti prierezu s cieľom podrobného zistenia redistribúcie napätí v priereze.

Parametrickou štúdiou sa potvrdil výrazný vplyv materiálových parametrov drevenej časti prierezu na maximálnu možnú zaťažiteľnosť, ako aj deformáciu. Rast napätí v spriahovacej lište bol nevýrazný a ich hodnota zďaleka nedosahovala medzi klzu ocele, čo predstavuje priestor na ich prípadnú optimalizáciu. Záverom je možné konštatovať, že spriahovacie listů vlepované do dreveného prierezu je možné považovať za bezpečnú a spoľahlivú alternatívu k iným spriahovacím prostriedkom používaných v drevobetónových konštrukciách. Je však potrebný podrobnejší výskum takýchto konštrukcií, ktorý by komplexne pokryl celú problematiku s cieľom vytvoriť spoľahlivý návrhový postup na zhotovovanie takýchto konštrukcií.

Použité zdroje

- [1] Springer, J., Reuke, H., Wolters, K., & Kopp, M. (2018). Besonderheiten der Stahlverbundkonstruktion des Parkhauses Coulinstraße in Wiesbaden. Stahlbau, 87(7), 695–703.
<https://doi.org/10.1002/stab.201810625>
- [2] TiComTec GmbH. (2014). Tragwerke in Holz-Beton-Verbundbauweise mit eingeklebten HBV ® - Schubverbindern.
- [3] Deutsches Institut für Bautechnik. (2018). Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-26.4-56 - Stahlverbundträger mit Verbunddübelleisten in Klothoiden- und Puzzleform.
- [4] Deutsches Institut für Bautechnik. (2020). Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-557 - HBV-Schubverbinder aus Streckmetall und vorgefertigte Bauteile mit eingeklebten; HBV-Schubverbindern für ein Holz-Beton-Verbundsystem.
- [5] Suárez-Riestra, F., Estévez-Cimadevila, J., Martín-Gutiérrez, E., & Otero-Chans, D. (2019). Perforated shear + reinforcement bar connectors in a timber-concrete composite solution. Analytical and numerical approach. Composites Part B: Engineering, 156, 138–147.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.074>
- [6] Software ANSYS 2019: User's Manual, Available on the internet: <<https://ansyshelp.ansys.com>>
- [7] DYNARDO GmbH. (2013). multiPlas Release 4.1.8 for ANSYS 14.5 - Elasto-plastic material models for ANSYS General multisurface plasticity - User's Manual.
- [8] Európsky výbor pre normalizáciu. (2016). STN EN 338: Konštrukčné drevo. Pevnostné triedy.