

## Analýza chování hybridních nosníků ze skla a oceli

Ing. Tomáš FREMR  
doc. Ing. Martina ELIÁŠOVÁ, CSc.  
ČVUT v Praze – Fakulta stavební

Článek popisuje experimentální analýzu hybridních nosníků složených z ocelových pásnic a dělené skleněné stojiny. Na základě výsledků zkoušek byl ověřen analytický model těchto nosníků založený na analogii s příhradovým nosníkem.

### Analysis of hybrid glass-steel beams

The article describes the experimental analysis of hybrid beams composed of steel flange and discontinuous glass webs. The analytical model of hybrid beams based on truss analogy was verified by experimental results.

### Úvod

Intenzivní vývoj a výzkum v poslední době výrazně posunul možnosti využití skla jako materiálu pro nosné konstrukce; především se používá tepelně upravované sklo, které má lepší mechanické vlastnosti.

Nevýhodou skla je malá pevnost v tahu a možné porušení křehkým lomem, které nastává náhle, bez předchozího varování. Naopak výhodou je kromě transparentnosti relativně vysoká pevnost v tlaku. Snaha o zvýšení pevnosti v tahu skleněného nosného prvku vede k výzkumu hybridních prvků, ve kterých je tah přenášen jiným materiálem, jako je např. ocel, vyztužený beton, dřevo, uhlíková vlákna. Další významnou výhodou těchto hybridních konstrukcí je vyšší zbytková únosnost prvku, a tím i vyšší míra bezpečnosti celé konstrukce, neboť po porušení skleněných tabulí je hybridní nosný prvek schopen alespoň částečně přenášet minimální zatížení. Spojením skla s jiným materiálem je tak možné vytvořit nový konstrukční prvek s vyšší tuhostí a únosností v porovnání s čistě skleněnými nosnými prvky, přičemž je zachována transparentnost [1], [2].

Předložený článek představuje výsledky experimentálního výzkumu hybridních nosníků průřezu I se skleněnou dělenou stojinou a ocelovými pásnicemi. Chování hybridního nosníku při zatížení popisuje analytický model založený na analogii s příhradovým nosníkem. Model představuje zjednodušenou metodu použitelnou pro návrh hybridních nosníků, která umožňuje stanovit maximální přípustný ohybový moment, deformaci a maximální smykové napětí v lepené vrstvě, která spojuje skleněnou stojinu s ocelovými pásnicemi.

### Experimentální výzkum

Bylo vyrobeno šest hybridních nosníků, lišících se typem spoje mezi ocelovými pásnicemi a skleněnou stojinou, počtem skleněných tabulí, ze kterých byla stojina nosníku sestavena, typem spojení jednotlivých skleněných tabulí mezi sebou a druhem použitého lepidla. Nosníky byly vyrobeny v laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze. Pro lepený spoj mezi ocelovými pásnicemi a skleněnou stojinou bylo na základě předchozích zkoušek vybráno akrylátové a polyuretanové lepidlo. Před aplikací lepidla byl povrch obou materiálů (skla, oceli) zbaven mechanicky hrubých nečistot, odmaštěn a vysušen. Povrchová úprava ocelových pásnic z výroby byla odstraněna broušením. K jemnému dobroušení byl použit brusný pás. Před samotným nanášením lepidla bylo třeba povrch ocelové pásnice i skleněné stojiny aktivovat nátěrem vybraným podle doporučení výrobce lepidel.

### Varianty hybridního nosníku

Vyzkoušeny byly dvě varianty přípoje mezi pásnicemi a stojinou. Přípoj č. 1 (*obr. 1a*) byl vytvořen přilepením skleněné stojiny přímo k ocelové pásnici 10 x 100 mm (ocel S235). Skleněná stojina byla z třívrstvého tepelně zpevněného skla tl. 3 x 8 mm. Lepidlo bylo nanášeno po celé délce ocelové pásnice. Požadovaná tloušťka lepidla byla zajištěna dřevěnými distančními vložkami o tl. 3 mm.

Přípoj č. 2 (*obr. 1b*) byl sestaven z ocelové pásnice 10 x 100 mm doplněné přivařeným profilem U 40/35/4 ohýbaným za studena (ocel S235). Do drážky, kterou profil U vytvořil, byl vložen polyamidový distanční pásek tl. 8 mm, na který byla ustavena skleněná tabule stojiny. Pásek slouží k oddělení skla a oceli a omezuje vznik lokálních špiček napětí ve skle v oblasti podpor a v místech působícího zatížení. Skleněná stojina byla z dvouvrstvého tepelně zpevněného skla tl. 2 x 12 mm. Lepidlo bylo nanášeno po celé délce podélných spár (z obou stran), které vznikly mezi skleněnou stojinou a ocelovým profilem U. Tloušťka lepidla byla vzhledem k imperfecím ocelového profilu i skleněné stojiny po ustavení a vymezení spár 2–4 mm (*obr. 1*).

Pět nosníků mělo sestaveno skleněnou stojinu z pěti panelů, u jednoho nosníku byla stojina tvořena třemi panely (*tab. 1*). Stykování skleněných tabulí po délce nosníku bylo buď pouze na sraz s mezerou 12,5 mm, nebo pomocí přeplátování, tj. styk na pero a drážku.



a)

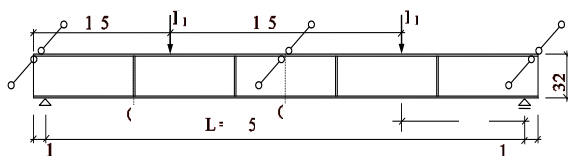
b)

Obr. 1, Příčný řez nosníkem  
a – přímý spoj, b – spoj s profilem U

### Schéma zkoušek

V Experimentálním centru FSv ČVUT bylo odzkoušeno celkem šest zkušebních hybridních nosníků. Nosníky o celkové délce 4,25 m se vzdáleností podpor 4,05 m byly zatíženy dvojicí osamělých sil (*obr. 2*). Uprostřed rozpětí a v místě podpor byl nosník přičně držěn proti ztrátě příčné a torzní stability. Působíště osamělých břemen bylo zvoleno s ohledem na stykování skleněných tabulí stojiny tak, aby břemena ne-

působila v místě spáry. Nosníky byly zatěžovány plynule až do porušení, tj. do vzniku první praskliny v některé ze skleněných tabulí stojiny. Následně byla určena zbytková únosnost nosníků a popsán rozvoj trhlin ve skleněné stojině. V průběhu zkoušek byla zaznamenávána působící síla, svislá deformace uprostřed rozpětí a pod působícími břemeny. K nepřímému měření napětí ve skleněné stojině a v ocelových pásnicích byly použity tenzometry typu LY11-10/120.



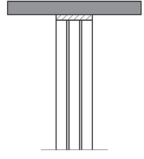
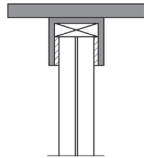
Obr. 2. Statické schéma nosníku

Vzhledem k průběhu chování nosníků při zatěžování bylo na nosníky dodatečně osazeno zařízení snímající postupně natáčení skleněných tabulí stojiny. K měření byla použita víceskanálová měřicí technika značky Dewetron, na kterou byla napojena i vysokofrekvenční kamera, snímající průběh jednotlivých zkoušek rychlostí 100 snímků za vteřinu paralelně s ostatními měřeními veličinami. Záběry z kamery propojené s časovou osou a s průběhem napětí nebo deformace pomohly při vyhodnocení experimentů zejména s určením počátku vzniku praskliny ve skleněné stojině a jejím rozvojem v průběhu dalšího zatěžování.

### Výsledky zkoušek

Vyhodnocení naměřených veličin bylo provedeno v řezech a „ viz obr. 2, tzn. uprostřed rozpětí a v místě rozhraní prvního a druhého panelu stojiny. Ve všech případech, bez ohledu na typ přípoje (přímý spoj mezi stojinou a ocelovými pásnicemi nebo spoj s pomocným profilem U) a provedení styku mezi skleněnými tabulemi stojiny, docházelo v průběhu zatěžování k natáčení skleněných tabulí a deformaci ocelových pásnic. Rotace tabulí je způsobena posouvající silou, resp. narůstajícím smykovým tokem mezi ocelovými pásnicemi a skleněnou stojinou. K porušení hybridního nosníku s dělenou stojinou nedošlo v místě s maximálním momentem, jako by tomu bylo u hybridních nosníků s celistvou stojinou. Celkový souhrn naměřených veličin pro všechna zkušební tělesa je uveden v tab. 1.

Tab. 1. Výsledky zkoušek

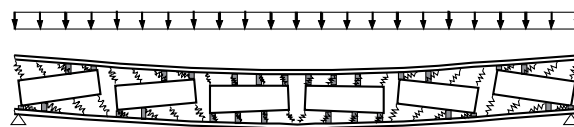
Průřez	Značení	Lepidlo	$M_{\max}$ [kNm]	$w_{\max}$ [mm]
	ND1	akrylát	20,5	6,9
	ND2		35,8 <sup>1</sup>	12,1 <sup>1</sup>
	ND3	poly- uretan	21,0	24,0
	ND4		23,3	30,6
	ND5	akrylát	85,3	33,3
	ND6		96,2 <sup>2</sup>	32,3 <sup>2</sup>

<sup>1)</sup> vzájemné spojení skleněných tabulí realizováno využitím suchého spoje na pero a drážku

<sup>2)</sup> stojina nosníku sestavena ze tří stejně dlouhých skleněných panelů

### Analytický model – příhradová analogie

Při zkouškách bylo pozorováno, že hybridní nosník s netuhým smykovým spojem mezi dělenou stojinou a pásnicemi se při zatížení chová spíše jako příhradová konstrukce na rozdíl od nosníků, jejichž stojina je celistvá [3]. V důsledku elastického smykového spojení pásnic se stojinou a nespojitě skleněné stojiny dochází k nerovnoměrnému rozdělení napětí, což má za následek rotaci jednotlivých skleněných panelů. Na základě zkoušek, z mechanismu porušení zkušebních nosníků a z jejich celkové deformace byl analytický model vyšetřovaných nosníků založen na příhradové analogii. Hybridní nosník byl převeden na idealizovanou pružnou prutovou soustavu, ve které představují ocelové pásnice horní a dolní pás příhradového nosníku a skleněné panely jsou nahrazeny tlačnými diagonálami (obr. 3). Takto zjednodušená konstrukce umožňuje snadné určení vnitřních sil mezi jednotlivými prvky hybridního nosníku (ocelové pásnice, dělená skleněná stojina). Model byl publikován v [4].



Obr. 3. Analytický model – idealizovaná pružná konstrukce [4]

### Vnitřní síly

Idealizovaná příhradová soustava byla zatížena stejným způsobem jako zkoušené nosníky. Následující postup výpočtu vnitřních sil byl odvozen pro nosníky s pomocným profilem U (obr. 1b). Maximální ohybový moment a posouvající sílu na prostém nosníku vypočteme známým způsobem:

- maximální ohybový moment

$$M_{Ed} = P_{Ed} \cdot a ; \quad (1)$$

- posouvající síla

$$V_{Ed} = P_{Ed} ; \quad (2)$$

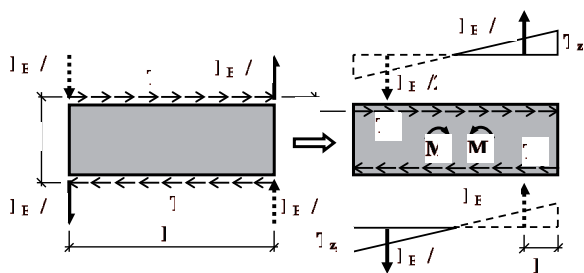
kde  $P_{Ed}$  je zatížení,  $a$  vzdálenost mezi podporou a působištem zatížení.

Z ohybového momentu lze vyjádřit normálovou silu působící v pásnici (v úseku mezi břemeny)

$$N_f = \frac{M_{Ed}}{h} ; \quad (3)$$

kde  $h$  je vzdálenost těžišť ocelových pásnic.

Smykový tok mezi stojinou a pásnicemi roste s narůstajícím zatížením. Vodorovný smykový tok  $T_x$  způsobuje moment ve skleněné stojině, ale nevyvolává opačný moment ve spoji mezi stojinou a pomocnými profilem. Z důvodu přídavných smykových napětí ve vrstvě lepidla dochází na okrajích skleněných tabulí k tahu, resp. k tlaku, v protilehlých rozích tabule. Předpokládané výsledné rozdělení napětí na hybridním nosníku je znázorněno na obr. 4 [4].



Obr. 4. Analytický model  
– převod vnějších sil na skleněném panelu [4]

### Napětí v lepené vrstvě

Lepený spoj, jak zkoušky prokázaly, je nejslabší komponentou hybridního nosníku, proto je chování této části věnováno nejvíce prostoru. Největší napětí v tomto spoji je v místě maximální posouvající síly, tj. v průřezu ②, viz obr. 2.

Výsledné smykové napětí, působící na vrstvu lepidla, je závislé na typu průřezu, resp. použité variantě připoje. Lepený spoj je namáhán rovnoběžným smykovým napětím a kolmým smykovým napětím. V průřezu s profilem U působí obě tyto složky napětí v rovině lepidla, kdežto v průřezu s přímým spojením jde o prostorové namáhání.

Rovnoběžný smykový tok mezi pásnicí a stojinou lze vypočítat podle vztahu

$$T_x = \frac{P_{Ed}}{h} \cdot \frac{a}{L_p}, \quad (4)$$

kde  $L_p$  je délka skleněných panelů.

Svislý smykový tok mezi pásnicí a stojinou předpokládá lineární rozdělení napětí (obr. 3) a lze ho vypočítat jako

$$T_{z,V} = \frac{2 \cdot P_{Ed}}{L_p}. \quad (5)$$

Jelikož normálová síla v pásnici a rovnoběžný tok v lepené vrstvě působí v jiné vzdálenosti od těžiště, vzniká přídatný moment  $M_e$ , který můžeme vypočítat jako

$$M_e = -T_x \cdot L_p \cdot e. \quad (6)$$

Druhý přídatný moment je způsoben posunem smykové síly  $V_{Ed}$  do vzdálenosti  $L_p/6$  od okraje panelu stojiny, kdy

$$M_a = P_{Ed} \cdot L_p / 6. \quad (7)$$

Součtem obou momentů je dán celkový moment  $M_{ecc}$  plynoucí z excentricity

$$M_{ecc} = M_e + M_a. \quad (8)$$

Tento moment způsobuje přídatný kolmý smykový tok  $T_{z,M}$  ve vrstvě lepidla, který může být vyčíslen jako

$$T_{z,M} = \frac{4 \cdot M_{ecc}}{L_p (L_p - 2 \cdot a)}. \quad (9)$$

Celkový kolmý smykový tok vznikne součtem obou hodnot svislých smykových toků

$$T_z = T_{z,V} + T_{z,M}. \quad (10)$$

Celkový smykový účinný tok  $T_{R,Ed}$  ve vrstvě lepidla je součtem obou smykových toků  $T_x$ ,  $T_z$ . V průřezu s pomocným profilem U můžeme provést úhlový součet složek smykového toku

$$T_{R,Ed} = \sqrt{T_x^2 + T_z^2}. \quad (11)$$

Smykové napětí ve vrstvě lepidla lze vypočítat v závislosti na typu průřezu. Obecně lze definovat napětí jako podíl smykového toku a výšky lepené vrstvy. Ve spoji s profilem U je výška lepené vrstvy rovna hloubce zapuštění skleněné stojiny v profilu U, tedy

$$\tau_{R,Ed} = \frac{T_{R,Ed}}{2 \cdot h_{lepení}}, \quad (12)$$

kde  $h_{lepení}$  je výška lepené vrstvy.

### Napětí v kontrolovaných průřezích

Kontrolované průřezy jsou vyznačeny na obr. 2 číslem ① a ②. V průřezu ① působí největší ohybový moment a nulová posouvající síla, v průřezu ② působí největší posouvající síla a příslušný moment.

Uprostřed nosníku (průřez ①) lze napětí v oceli vypočítat přímo z normálové síly určené ze vztahu (1), a to jako

$$\sigma_{x,s,1} = \frac{N_f}{A}, \quad (13)$$

kde  $A$  je plocha pásnice.

Skleněná stojina uprostřed nosníku přenáší pouze případný moment  $M_e$  definovaný podle vztahu (6)

$$M_{g,1} = M_e. \quad (14)$$

Z momentu vypočítáme napětí ve skle

$$\sigma_{x,g,1} = \frac{M_{g,1}}{W_g}, \quad (15)$$

kde  $W_g$  je průřezový modul skleněné stojiny.

Na rozhraní prvního a druhého panelu stojiny je druhý kontrolovaný průřez. Zde je maximální napětí v lepidle a také ve skle. Nejdříve vypočítáme ohybový moment v místě průřezu ②, tj.

$$M_{Ed,2} = P_{Ed} \cdot L_p. \quad (16)$$

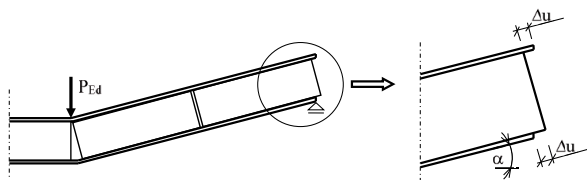
Z ohybového momentu  $M_{Ed,2}$  je možné vyjádřit normálovou sílu  $N_{f,2}$  působící v pásnici pomocí vztahu (3). Napětí v oceli  $\sigma_{x,s,2}$  pak lze stanovit stejně jako v průřezu ①, podle (13). Moment působící na stojinu je ovlivněn excentrickým připojením, a tudíž momentem  $M_{ecc}$ . Bezpečně však je možné uvažovat pouze s působením většího z momentů, a to přídatným momentem  $M_e$  definovaným podle vztahu (6)

$$M_{g,2} = M_e. \quad (17)$$

Napětí ve skle u tohoto průřezu poté můžeme vypočítat pomocí vztahu (15).

### Svislá deformace

Svislý průhyb hybridního nosníku se skládá ze dvou složek. První část je  $\Delta w_1$ , která je způsobena smykovým posunem  $\Delta u$  mezi pásnicemi a stojinou a způsobuje zkosení  $\alpha$  na části nosníku mezi podporou a působištem zatěžovací síly (obr. 5).



Obr. 5. Svislé průhyby způsobené smykovou deformací  $\Delta u$  [4]

Vodorovné smykové deformace  $\Delta u$  se vypočítají ze smykového toku mezi pásnicí a stojinou a z geometrických a mechanických vlastností vrstvy lepidla [4] jako

$$\Delta u = \frac{T_x \cdot d_{\text{lepení}}}{2 \cdot h_{\text{lepení}} \cdot G}, \quad (18)$$

kde  $d_{\text{lepení}}$  je tloušťka lepené vrstvy,  $G$  proměnný smykový modul lepidla.

Výpočet svislého průhybu  $\Delta w_1$  lze stanovit podle vztahu

$$\Delta w_1 = \frac{2 \cdot \Delta u \cdot L}{3 \cdot h}, \quad (19)$$

kde  $L$  je rozpětí nosníku,  $h$  vzdálenost těžišť ocelových pásnic.

Tato první složka svislého průhybu je závislá na smykovém modulu  $G$  lepidla ve spoji mezi pásnicemi a stojinou. Poddajné akrylátové lepidlo SikaFast 5211, která bylo použito při výrobě nosníků, má nelineární pracovní diagram [5]. Pro potřeby analytického výpočetního modelu bylo potřeba modifikovat smykovou tuhost lepidla, která se mění podle napjatosti lepené vrstvy, a to podle vztahu (20), viz [3],

$$G = \frac{\tau}{\tan \gamma}. \quad (20)$$

Z pracovního diagramu lepidla ve smyku byly odvozeny mocninné rovnice metodou nejmenších čtverců a postupnou iterací. Rovnice byly odvozeny pro každý typ průřezu, jelikož napětí i chování je pro každý typ průřezu jiné, tzn. představují vztah napjatosti a tuhosti pro určitý lepený spoj. Mocninnou rovnici lze zapsat v obecném tvaru

$$G = x \cdot \gamma^y. \quad (21)$$

Rovnice nelineární smykové tuhosti lepené vrstvy  $G$  průřezu s profilem U byla na základě experimentů pro použité lepidlo odvozena jako

$$G = 8,5 \cdot \gamma^{-0,61}. \quad (22)$$

Obdobně pro průřez s přímým spojem platí

$$G = 6,1 \cdot \gamma^{-0,61}. \quad (23)$$

Druhou část svislého průhybu  $\Delta w_2$  je možné určit podle ohybové tuhosti nosníku skládajícího se ze dvou ocelových

pásnic s dokonalou smykovou tuhostí, tzn. bez skleněné stojiny. Průhyb je odvozen pro prostý nosník s břemeny ve čtvrtinách rozpětí jako

$$\Delta w_2 = \frac{11 \cdot P_{Ed} \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot I}. \quad (24)$$

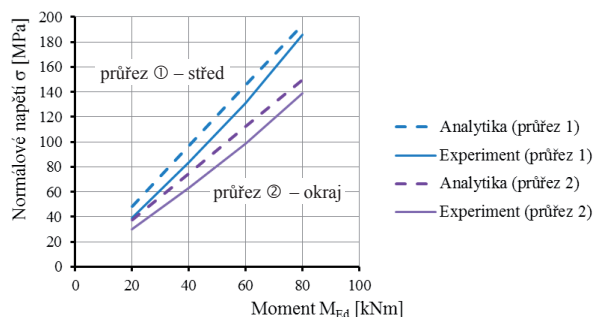
Celková svislá deformace je součtem obou složek

$$\Delta w = \Delta w_1 + \Delta w_2. \quad (25)$$

### Porovnání výsledků analytického modelu s experimenty

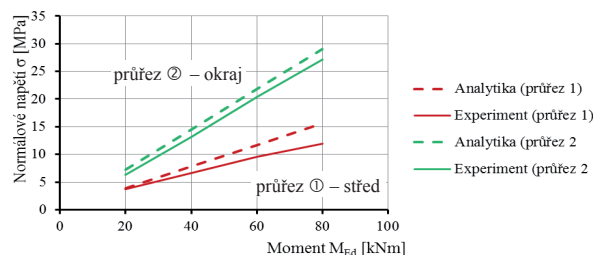
Porovnání normálového napětí a svislých deformací s hodnotami vypočtenými na základě zmíněného analytického modelu bylo provedeno samostatně pro nosník s přímým spojem a se spojem pomocí profilu U vždy ve dvou rozhodujících řezech – uprostřed rozpětí v řezu ① a v místě řezu ②, na obr. 2. Vzhledem k chování nosníků při zatížení byly pro porovnání použity pouze hodnoty normálového napětí a svislé deformace naměřené do vzniku první trhliny ve skle či do porušení lepeného spoje mezi pásnicí a stojinou.

Závislost napětí na ohybovém momentu pro ocelovou pásnici v řezu ① a v řezu ②, pro nosník se spojem pomocí profilu U je znázorněna obr. 6. Z grafů vyplývá, že modifikovaný analytický model s uvažováním nelineární smykové tuhosti lepidla zachycuje s bezpečnou rezervou (12 %) chování nosníku.



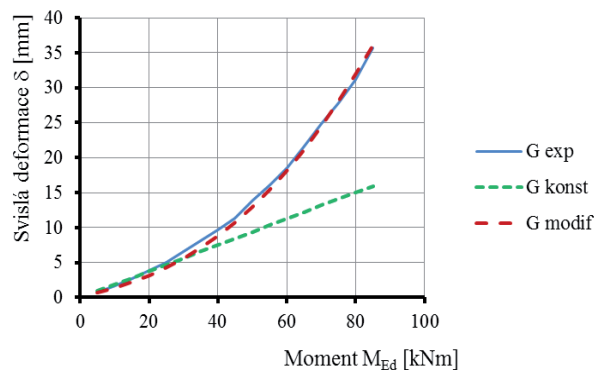
Obr. 6. Závislost napětí na ohybovém momentu v ocelové pásnici nosníku se spojem pomocí profilu U

Napětí ve skle je výrazně větší v krajním poli (průřez ②), což odpovídá teorii příhradové analogie, na které byl výpočet vnitřních sil založen. Modifikovaný analytický model je méně přesný uprostřed nosníku, kde vypočtené napětí je větší než naměřené o 24 %. Největší napětí je podle modelu vypočteno s dostatečnou přesností (rozdíl do 7 %), (obr. 7).



Obr. 7. Závislost napětí na ohybovém momentu ve skleněné stojině nosníku se spojem pomocí profilu U

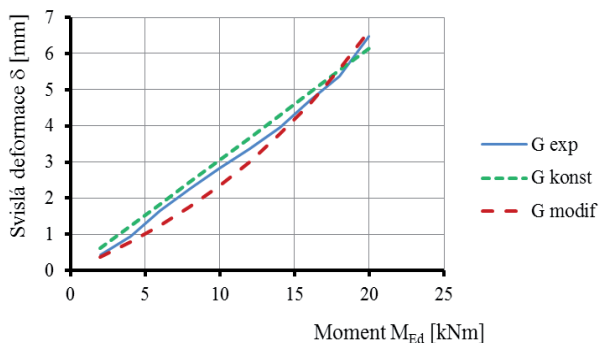
Porovnání závislosti svislé deformace na ohybovém momentu hybridního nosníku se spojem pomocí profilu U pro hodnoty vypočtené pomocí neupraveného a modifikovaného analytického modelu (tj. konstantní modul ve smyku  $G$  a proměnný smykový modul  $G$  lepidla) a hodnotami deformace naměřenými při experimentech je na *obr. 8*.



*Obr. 8. Závislost svislé deformace na ohybovém momentu pro nosník se spojem pomocí profilu U*

Svislá deformace, vypočtená pomocí modifikovaného analytického modelu s uvažováním nelineární smykové tuhosti, je v průměru o 2,1 % vyšší než experimentálně stanovená svislá deformace. Vypočtený smykový modul pro maximální ohybový moment je  $G = 6,2$  MPa. Rozdíl mezi průhybem vypočteným s konstantním smykovým modulem  $G = 28$  MPa a průhybem naměřeným je 124 %.

Podobně je na *obr. 9* porovnána závislost svislé deformace na ohybovém momentu nosníku s přímým spojem, opět pro konstantní modul lepidla ve smyku  $G$ , modifikovaný analytický model s proměnným smykovým modulem a hodnotami deformace z experimentů.



*Obr. 9. Průřez s přímým spojem – průhyb nosníku*

Průhyb vypočtený podle modifikovaného analytického modelu s uvažováním nelineární smykové tuhosti je v průměru o 2,4 % vyšší než průhyb naměřený v průběhu experimentu. Vypočtený smykový modul pro maximální ohybový moment je  $G = 23,2$  MPa. Smykový modul je řádově větší než u předchozího přípoje, je to způsobeno rozdílným namáháním. Podélná napjatost lepené vrstvy reprezentuje pouze rovnoběžný smykový tok, který je výrazně menší než tahový smykový tok. Pro tento přípoj v běžné inženýrské praxi není potřeba modelovat mocinný průběh smykového modulu, postačí výpočet s konstantním modulem ( $G = 28$  MPa). Rozdíl mezi průhybem vypočteným s konstantním smykovým modulem a průhybem naměřeným je 11 % (*obr. 9*).

## Závěr

V článku byly shrnuty výsledky zkoušek hybridních nosníků s ocelovými pásnicemi a dělenou skleněnou stojinou. Byly experimentálně ověřeny dvě varianty připojení ocelové pásnice ke skleněné stojině (přímý spoj a spoj s pomocným profilem U) a dva druhy stykování jednotlivých panelů stojiny po délce nosníku. Na základě mechanismu porušení byl ověřen analytický model založený na příhradové analogii. Z porovnání analytického řešení s výsledky zkoušek vyplývá, že model je použitelný pro zjednodušený předběžný návrh hybridních nosníků.

Hybridní nosníky z oceli a skla představují nový typ nosného konstrukčního prvku, který splňuje požadavky současné architektury na transparentnost a lehkost současně s dostatečnou únosností, zbytkovou únosností a bezpečností návrhu. Rozsáhlý experimentální výzkum, který byl proveden v Experimentálním centru FSv ČVUT, prokázal rovněž vhodnost použití polymerových lepidel na spoj mezi ocelovými pásnicemi a skleněnou stojinou, který zajišťuje spolupůsobení obou materiálů. Vzhledem k malé pevnosti skla v tahu pak tuhá pásnice v systému funguje jako výtuzný prvek. Po vzniku prvních trhlin ve skleněné stojině, které se šíří vždy na tažené straně nosníku, dokáže ocelová pásnice částečně pohlcovat lomovou energii a bránit tak rychlejšímu šíření trhlin ve skle.

**Článek vznikl za podpory projektu GA ČR č. 14-17950S „Spolupůsobení skleněných desek spojených polymerní vrstvou“.**

## Literatura

- [1] Special Issue on Structural Glass. HERON, vol. 52, no. 1/2. ISBN 0046-7316
- [2] Abeln B and Preckwinkel E (2011) Entwicklung hybrider Stahl-Glass-Träger. Stahlbau 80(4), Ernst&Sohn. ISSN 0038-9145 A6449: 218-225
- [3] Netušil, M. – Eliášová, M.: Design of the composite steel-glass beams with semi-rigid polymer adhesive joint. In: Journal of Civil Engineering and Architecture. 2012, vol. 57, no. 6, pp. 1059-1069. ISSN 1934-7359
- [4] Feldmann, M. et al.: Development of optimum hybrid steel-glass-beams in respect to structural and architectural criteria. Annex, Final report, RWTH, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, Aachen, Germany, 2007.
- [5] Machalická, K. – Eliášová, M. – Netušil, M.: Smykem namáhané lepené spoje konstrukcí ze skla. Stavební obzor, 20, 2011, č. 10, s. 297-301. ISSN 1210-4027