

David MIKOLÁŠEK¹, Oldřich SUCHARDA², Jiří BROŽOVSKÝ³

NUMERICKÁ ANALÝZA PROLAMOVANÉHO NOSNÍKU

NUMERICAL ANALYSIS OF CASTELLATED BEAM

Abstrakt

Příspěvek se zabývá modelováním chování prolamovaného nosníku. Ve výpočtech je zohledněna imperfekce. Výpočty zahrnují konečněprvkové modely a normový výpočet. Hlavním cílem příspěvku je provedení případové studie pro určení součinitelů klopení a popis průběhu napětíových stavů na profilu.

Klíčová slova

Prolamovaný nosník, klopení, metoda konečných prvků, výpočetní modely.

Abstract

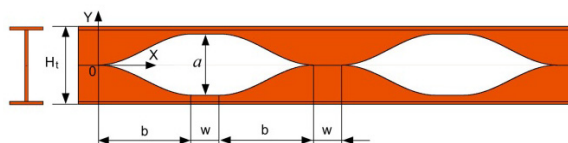
This paper deals with modeling of the behavior of castellated beam. The calculations also take into account the imperfections. The solution incorporates finite element models and standardized calculation. The main contribution is to undertake case studies to determine the coefficients of lateral-torsional buckling and description of the stress state of the profile.

Keywords

Castellated beam, lateral-torsional buckling, finite element analysis, computational model.

1 ÚVOD

V dnešní době nových technologických možností ve výrobě ocelových profilů je možné vytvářet rozmanité tvary ocelových nosníků. Toto vede k značným odlišnostem v přístupech k výpočtu těchto nově vzniklých nosných prvků, protože norma neposkytuje plný popis chování těchto ocelových profilů. Samotné problematice numerického modelování, zejména pak pomocí metody konečných prvků, se věnuje celá řada autorů [12, 13, 14].



Obr. 1: Obecná geometrie prolamovaného nosníku Angelina [1]

¹ Ing. David Mikolášek, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 32 1391, e-mail: david.mikolasek@vsb.cz.

² Ing. Oldřich Sucharda, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 391, e-mail: oldrich.sucharada@vsb.cz.

³ Doc. Ing. Jiří Brožovský, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 321, e-mail: jiri.brozovsky@vsb.cz.

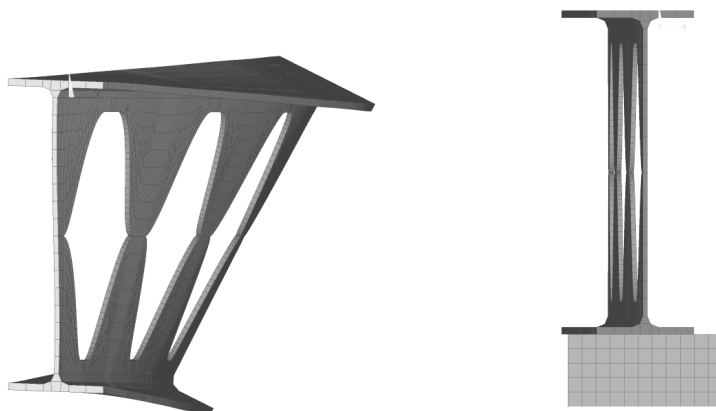
Dále se modelováním a analýzou distorze prolamovaných nosníků zabývá [15]. Používají se také dřevěné prolamované nosníky [6]. Pružnoplastické analýze prolamovaných nosníků se věnuje [10], v některých případech je možné při analýze využít také neuronové sítě [5]. Z těchto důvodů je vhodné využít numerické analýzy. Příspěvek má za cíl stanovit pro vybraný prolamovaný nosník [8] hodnoty součinitelů klopení a najít způsob modelování atypických prolomených nosníků tak, aby bylo možno tyto vztahy a doporučení použít pro širší spektrum nestandardních ocelových prolamovaných nosníků. Provedené modely jsou počítány pouze numericky a kontrolovány normovými postupy [2, 3, 4] a pomoci základních vztahů pružnosti a statiky.

2 POPIS PROLAMOVANÝCH OCELOVÝCH NOSNÍKŮ

Prolamovaný nosník zobrazený na obr. 1 byl řešen jako staticky určitá konstrukce prostého nosníku. V případě testování vzájemného spolupůsobení ohybového momentu a posouvající síly jako konzola. Tento prolamovaný nosník vychází z výrobní řady firmy ArcelorMittal a jeho hlavní výhodou je velikost prostupů ve stojině nosníku. Tato skutečnost je výhodná zejména pro rozvod instalací pod stropní konstrukcí. Pro numerické modely a jejich modifikace byl vybrán jeden typ tvaru výřezu ve stojině a jeden původní válcovaný profil IPE 270 oceli S235 tvořící základní hmotu prolamovaného nosníku.

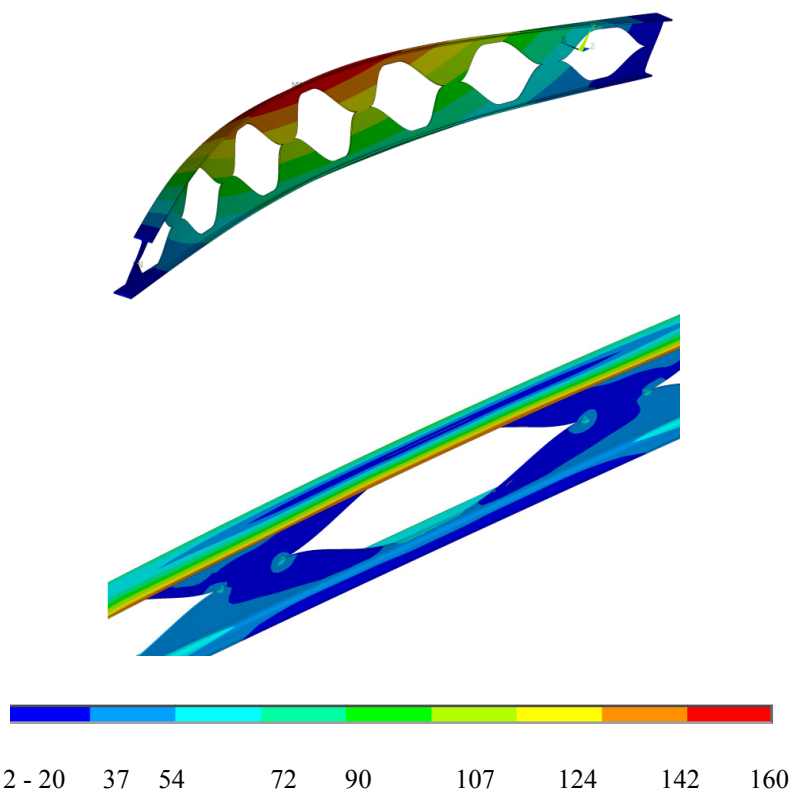
3 NUMERICKÝ VÝPOČET

Prostorový výpočetní model prolamovaného nosníku tvoří 3D objemové konečné prvky SOLID45 v konečně-prvkovém softwaru ANSYS [7], kdy výpočetní model má celkově 21 907 konečných prvků a 34 319 uzlů pro konzolu a 18 027 konečných prvků a 37 432 uzlů pro nosník. Při výpočtech je zohledněna geometrická, fyzikální a konstrukční nelinearita. Použité kontaktní prvky u modelů zohledňující konstrukční nelinearitu jsou použity CONTA174 a TARGE170 [7]. Fyzikální nelinearita je zohledněna u oceli pružnoplastickým modelem s lineárním zpevněním. Výpočetní model konzoly prolamovaného nosníku pro konečně-prvkovou analýzu je patrný z obr. 2 a 3. Obdobně byl vytvořen také prostorový výpočetní model v programu SCIA [11], kdy konečné prvky byly skořepinové.



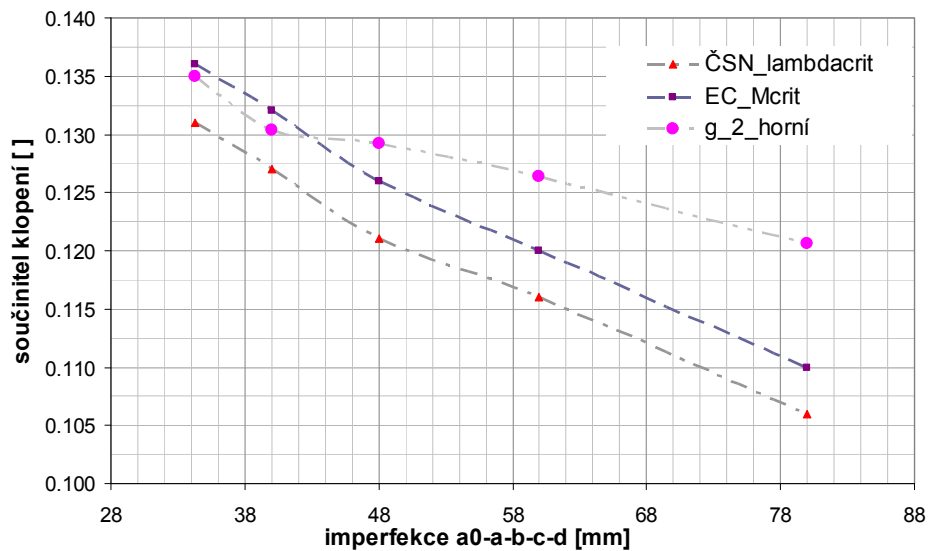
Obr. 2: Imperfektní výpočetní modely prolamovaného nosníku typ Angelina

Na obrázku 2 je k nahlédnutí imperfektní geometrie prolamovaného nosníku. Tato geometrická imperfekce, levý obrázek 2, byla zvolena jako první vlastní stabilitní tvar od spojitěho destabilizujícího zatížení na horní pás po délce nosníku. Tento tvar vybočení nezajištěné tlačené pásnice odpovídá tvaru klopení vidlicově uloženého prostého nosníku otevřeného průřezu. Na druhém obrázku 2 vpravo je imperfekce geometrie volena jako půlvlna funkce sinus.



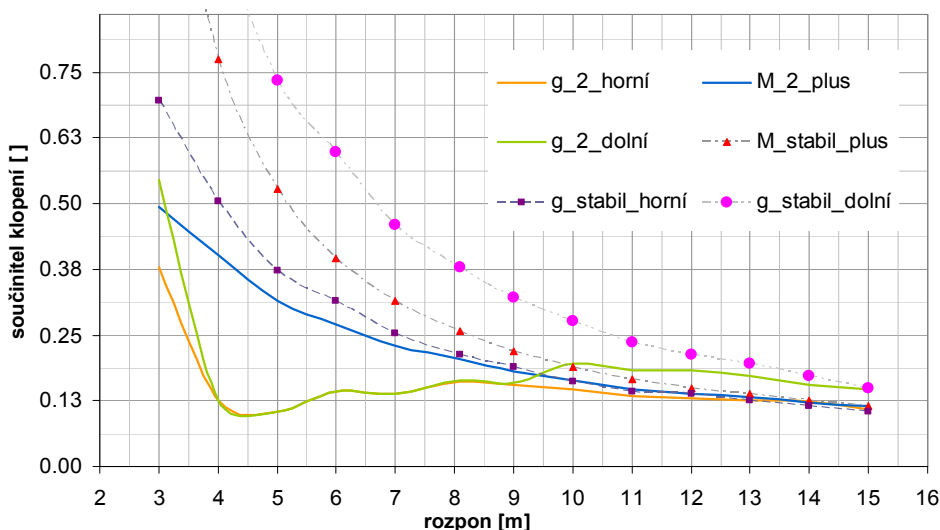
Obr. 3: Napětí von Misses [MPa]

Geometrie prostorového výpočetního modelu nosníku je zobrazena na obr. 3, kdy barevná stupnice zobrazuje napětí von Misses, pro výpočet zohledňující 2. řád, pro destabilizující zatížení na horní pásnici. K vybočení dojde při 160 MPa. Horní obrázek znázorňuje deformaci při klopení.



Obr. 4: Součinitel klopení prolamovaného nosníku pro rozpětí 12 m ($\gamma_{M1}=1$)

Výsledné hodnoty součinitele klopení byly spočteny pro různé hodnoty návrhové imperfekce ve tvaru počátečního prohnutí e_0/L na obr. 4. V grafu jsou křivky pro normový výpočet a numerický výpočet u prolamovaného nosníku délky 12 m. Rozdíl jednotlivých výpočtů je malý. Normový postup je v převážné části výpočtu mírně konzervativnější než numerický výpočet.



Obr. 5: Součinitel klopení prolamovaného nosníku v závislosti na volné délce

Výsledné hodnoty součinitele klopení pro jednotlivé varianty výpočtu u nosníku dlouhého 12 m jsou zobrazeny v tab. 1. Dále je na obr. 5 zobrazen graf součinitele klopení pro různé délky (rozpětí) nosníku. V tomto případě je proveden výpočet v programu SCIA [11]. Pro krátké délky prolamovaného nosníku nedochází ke ztrátě stability tlacené pásnice, ale dojde k překročení limitního napětí v místech výřezů v blízkosti podpor. Je to způsobeno posouvající silou, která způsobuje ohybový moment v zúžené části prolamovaného nosníku.

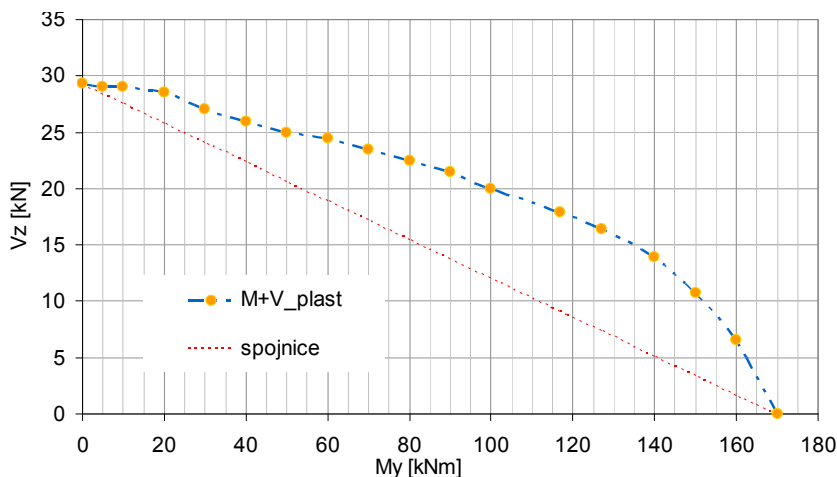
Tab. 1: Součinitele klopení pro nosník délky 12 m

Angelina_12 m	M_stabil_plus	g_stabil_horní	g_stabil_dolní	M_2_plus	g_2_horní	g_2_dolní
scia_angelina	0,149	0,138	0,213	0,138	0,129	0,184
ansys_angelina	0,180	0,162	0,241	0,168	0,126	0,213
scia_celý	0,161	0,138	0,230	0,160	0,149	0,201
ansys_celý	0,190	0,179	0,260	0,177	0,175	0,236

sání tažený pás TS_vítr		g_stabil_horní	g_stabil_dolní		g_2_horní	g_2_dolní
scia_angelina		0,362	0,144		0,246	0,141
ansys_angelina		0,439	0,181		0,305	0,162
scia_celý		0,414	0,176		0,299	0,171

reálné uložení					g_2_horní	g_2_dolní
ansys_real					0,136	0,220

Pro dokreslení výstížnosti provedených výpočtů je provedeno vyhodnocení interakce ohybového momentu a posouvající síly na obr. 6, kde výpočetní model konzoly je ze systému ANSYS [7]. Tento typ prolamovaného nosníku Angelina je citlivý na posouvající sílu. Důvodem je jeho malá účinná výška stojiny, což vede k malé únosnosti ve smyku a tím k celkovému snížení únosnosti vlivem kombinace smyku a ohybu ve výřezech ve stojině.



Obr. 6: Interakce ohybového momentu a posouvající síly: Angelina 270 (S235)

4 ZÁVĚR

Příspěvek se zabývá určením součinitelů klopení pro vybraný prolamovaný nosník Angelina, kdy numerické výpočty provedené v programech ANSYS [7] a SCIA [11] byly doplněny o výpočet podle normy. Pro vybraný případ prolamovaného nosníku Angelina byla zjištěna dobrá shoda mezi numerickými modely a normovým výpočtem. U prolamovaného nosníku byly sledovány také napětěvé stavy v oblastech výřezů, kde dochází ke koncentracím napětí. Při modelování konstrukce, u které je cílem zjistit její odezvu na různorodé zatížení a okrajové podmínky uložení, je nutné stanovit správné počáteční imperfekce, velikost konečněprvkové sítě a korektnost vnějších vazeb. Pro stanovení počáteční imperfekce je možné použít normové postupy. Samotný výpočet je u většiny softwarů obdobný a také výsledky jsou velmi podobné. Při řešení komplexní únosnosti ocelových profilů je třeba výpočtový model volit jako skořepinový, protože tak je možné dosáhnout chování bližší reálné konstrukci (prutové modely nejsou schopny ve výpočtu postihnout ztrátu stability vlivem klopení ani torzní ztrátu stability).

Budoucí práce se zaměří na rozšíření studie o další typy nosníku Angelina a na modelování těchto nosníků ve stropních konstrukcích ve spojení s betonem nebo dřevem. Další možný směr výzkumu, který autoři chtějí použít do numerické analýzy je zahrnutí pravděpodobnostního přístupu, podobně jako [9].

Je možné konstatovat, že numerické modelování pomocí komerčního software je vhodnou pomůckou pro zjišťování chování a únosnosti atypických profilů. Norma ne vždy dává vhodný postup pro nalezení reálných součinitelů klopení a vzpěru u atypických průřezů a kombinací materiálů a okrajových podmínek uložení. Proto je zde prostor pro numerické modely, ovšem doplněné o fyzikální testy, které potvrdí správnost těchto matematických modelů a dají konstruktérům určitou jistotu v modelování nestandardních prvků a konstrukcí.

PODĚKOVÁNÍ

Práce byly podporovány z prostředků koncepčního rozvoje vědy, výzkumu a inovací přidělených VŠB-TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky pro rok 2013.

LITERATURA

- [1] Angelina TM, ArcelorMittal [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupný z WWW: <http://www.constructalia.com/english/products/structures/steel_sections_and_merchant_bars/cellular_and_castellated_sections/angelina_tm_castellated_steel_beam_with_sinusoidal_openings>.
- [2] ČSN EN 1993-1-5, Eurokod 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-5: Boulení stěn. Praha: Český normalizační institut, 56 s., 2008.
- [3] ČSN EN 1993-1-6, Eurokod 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí. Praha: Český normalizační institut, 88 s., 2008.
- [4] ČSN EN 1993-1-7, Eurokod 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-7: Deskostěnové konstrukce příčně zatížené. Praha: Český normalizační institut, 44 s., 2008.
- [5] GHOLIZADEHA S., PIRMOZB A., ATTARNEJADB R., Assessment of load carrying capacity of castellated steel beams by neural network. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 67, Iss. 5, 2011, Pp. 770–779.
- [6] HARTE A.M., BAYLOR G., Structural evaluation of castellated timber I-joists. *Engineering Structures*, Vol. 33, Iss. 12, December 2011, Pages 3748–3754.
- [7] Documentation for ANSYS, Release 11, SAS IP, INC., 2007.
- [8] PROCHÁZKA, F. A KOL., *Prvky kovových konstrukcí*, Praha: SNTL, 1972.
- [9] KRIVÝ V., MAREK P., Probabilistic design of steel frame structures, [Zur Probabilistischen Bemessung von Stahlrahmen]. *Stahlbau*, Vol. 76, Iss. 1, January 2007, pp. 12-20.
- [10] LI J., XIANG. J. W., Elastic-Plastic Analysis of the Circle-Castellated Steel Beam Using Finite Element Method. *Advanced Materials Research*, Vol. 422, pp. 854-857, 2011, DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.422.854.
- [11] Scia Engineer [online]. 2012 [cit. 2012-01-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.scia-online.com>>.
- [12] SHOWKATI, H., GHANBARI GHAZIJAANI, T., NOORI, A. and ZIRAKIAN, T., Experiments on elastically braced castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 77, pp. 163-172.
- [13] SOLTANI, M.R., BOUCHAÏR, A., MIMOUNE, M., Nonlinear FE analysis of the ultimate behavior of steel castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 70, pp. 101-114.
- [14] WANG, H.-., SHAO, X.-. and LIU, C., Experiment on bearing capacity of steel-concrete composite castellated beams with reinforced rib. *Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport*, Vol. 26, Iss. 2, pp. 110-118.
- [15] ZIRAK T., SHOWKATI H., Distortional buckling of castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, 2006, 863–871.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Martin Psotný, PhD., Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta, STU v Bratislave.

Doc. Ing. Eva Kormaniková, PhD., Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta, TU v Košiciach.