

■ Předpjaté ocelové konstrukce

Projekt zastřešení Sazka (nyní O₂) arény, kdy jsme poprvé použili táhla s možností napínání na volné délce a tenzometrická měření při vnášení předpětí, předznamenal výrazný nástup předpjatých ocelových konstrukcí v mnoha dalších našich projektech. Rozšíření těchto teoreticky a technologicky náročných konstrukcí i mimo mostní stavby je umožněno rozvojem výpočetní techniky a dostupností materiálů, výrobků a metod měření předpětí v táhlech. Příspěvek přináší stručný souhrn problematiky a specifik navrhování konstrukcí s předpjatými táhly s několika příklady projektů a realizací.

PROČ JE VÝHODNÉ POUŽÍVAT PŘEDPJATÉ KONSTRUKCE

- Předpjaté konstrukce často přinášejí výrazný architektonický akcent stavby, umožňují splnit představy architekta.
- Oproti standardním řešením znamená vnesení předpětí, tam kde je to vhodné, výrazné úspory hmotnosti a ceny, zejména u staveb s velkým rozpětím (Hangár Mošnov).
- Předpjaté konstrukce mohou přinést snížení provozních nákladů. Konstrukční systém umožní snížit kubaturu objektu a plochu opláštění (ZS Chomutov).
- Předpjaté táhlo se chová ve statickém schématu jako tlačení i tažený prvek i při vysokých štíhlostech.
- Předpětím lze zvýšit tuhost konstrukce. Jednoduchým demonstrativním příkladem je křížové ztužidlo zatížené vodorovnou silou. Pokud se táhla předepnou, má ztužidlo dvojnásobnou tuhost. Výsledné vnitřní síly jsou při tom obdobné.



- Předpětím konstrukce lze dosáhnout velice jednoduchým způsobem nadvýšení konstrukce a upravit tvar (palác Křižák, ČSOB Radlice)
- Předpětím lze dosáhnout příznivé redistribuce vnitřních sil (ZS Košutka, ZS Chomutov)
- Předpjatý prvek nepotřebuje žádný další prvek zajišťující jeho stabilitu
- Předpjaté konstrukce uvolňují prostor nosné konstrukce stavby pro další technologie (Sazka aréna, ZS Chomutov).

SPECIFIKA NAVRHOVÁNÍ A REALIZACE PŘEDPJATÝCH OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ

Při volbě koncepce stavby je třeba provést vyhodnocení výhod použití předpětí. Volba předpjaté konstrukce může znamenat významné úspory, nebo splnit požadavky architekta. Naopak v některých případech je volba předpjaté konstrukce nevhodná.

Dlouhá předpjatá táhla mohou při nedostatečném předpětí vykazovat nelineární vlastnosti vlivem průvěsu vlastní hmotností.

Pokud možno se doporučuje tento problém eliminovat volbou dostatečného předpětí, nebo vyvážením a srovnáním štíhlých prvků před aktivací. Pokud vlivem průvěsu vzroste nelineární složka tuhosti táhla nad zanedbatelnou mez (cca 5 %), je nutno ji zohlednit nelineárním výpočtem.

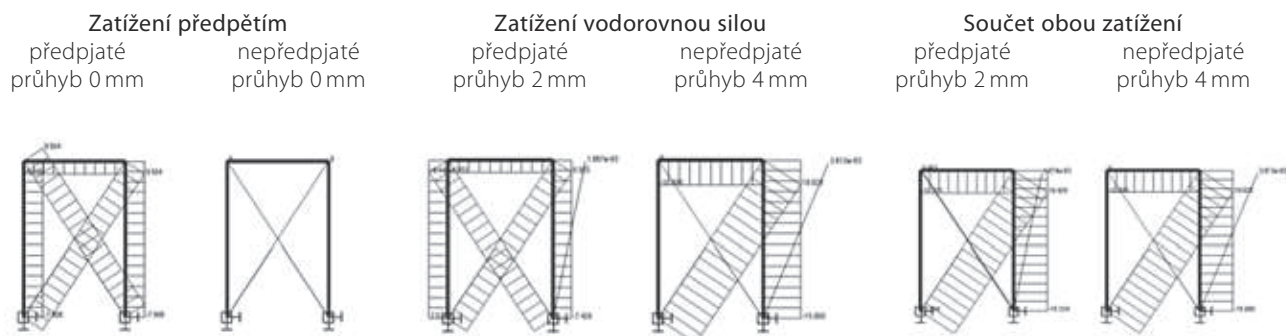
Při návrhu je nutno zvolit vhodný předpínací postup, který je součástí postupu výstavby. Návrh a posouzení předpjaté konstrukce musí respektovat zvolený postup výstavby, neplatí princip superpozice zatěžovacích stavů. Síly vnášené do táhla na provizorně podepřené konstrukci se liší od teoretických předpínacích sil uvažovaných na spuštěném modelu.

Táhla se instalují s použitím montážních pomůcek nebo speciálními montážními postupy. Předpětí lze vnášet mnoha způsoby. Standardně lze předpínat v hodnotách do cca 15 t řetězovými klíči přes napínákovou matici, vyšší hodnoty se vnáší hydraulickým zařízením na volné délce táhla přes napínákovou matici a konické krytky. Předpínat lze také nepřímo paralelním lanem (River city, Nile-House), dále deformováním nosné konstrukce před instalací táhla (stanice metra Střížkov), předpínání vlastní hmotností a dalšími způsoby.

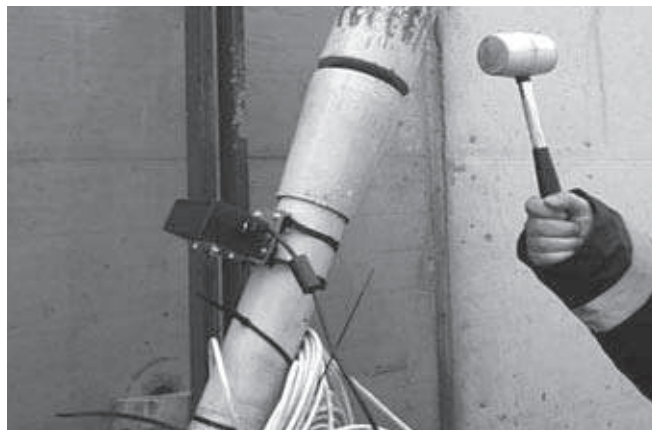
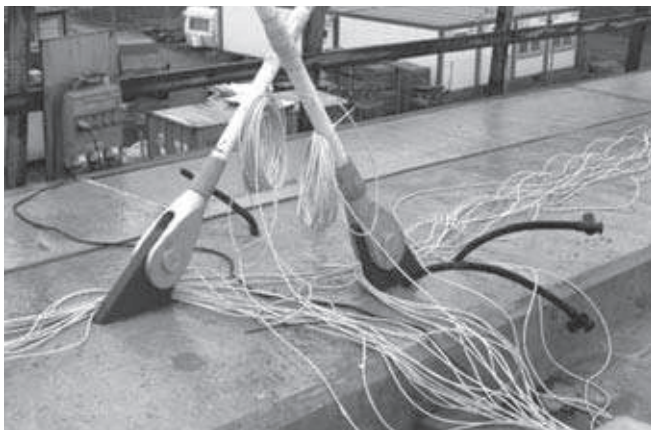
První informací o vnesené předpínací síle lze získat v průběhu předpínání přímo na hydraulickém zařízení. Pro přesnější určení síly



Obr. 2 – Hydraulické zařízení technotensioner poprvé u nás použité na Sazka aréně



Obr. 1 – Předpjaté křížové ztužidlo



Obr. 3 – Tenzometrická (Třinec-Baliny) a frekvenční měření (ZS Chomutov)

se nejčastěji používá tenzometrické měření. Použití měřících ústředěn, do kterých jsou připojeny plné tenzometrické můstky 6ti vodičovými kabely s napájením střídavým napětím, umožňuje měřit sílu na všech táhlech současně. Síly v táhlech jsou vyhodnocovány přímo na připojeném PC. Pro přenos naměřených údajů online se na rozsáhlé stavby využívá WiFi připojení na pomocné PC (notebook, PDA). Nevýhodou tenzometrických měření je, že absolutní hodnota síly v táhle je podmíněna měřením od nulového stavu a při případném poškození tenzometru v průběhu měření nelze již absolutní hodnotu síly tenzometricky zjistit.

Frekvenční metoda umožňuje měření sil na již předepnuté konstrukci. Záznam získaný z akcelerometrů se iniciuje rázem a je převeden do frekvenčního spektra FFT metodou. Ze spektra je pak odvozena síla v táhle analyticky.

Ze získaného frekvenčního spektra lze získat sílu v táhle ze vztahů pro kmitající strunu:

$$F = \left(4f_{ntum}^2 - \frac{k^2}{\pi^2} \right) \frac{\mu l^2}{n^2}, n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

Pro kloubově uložený štíhlý prut platí:

$$F_n = \frac{4l^3 \rho A}{n^2} \left(f_n^2 - \frac{n^4 EJ \pi^2}{4l^4 \rho A} \right)$$

Pro vetknutý štíhlý prut platí:

$$F_n = \frac{(\sqrt{l^2 - 4yz} \pm t)^2}{4y^2}$$

kde:

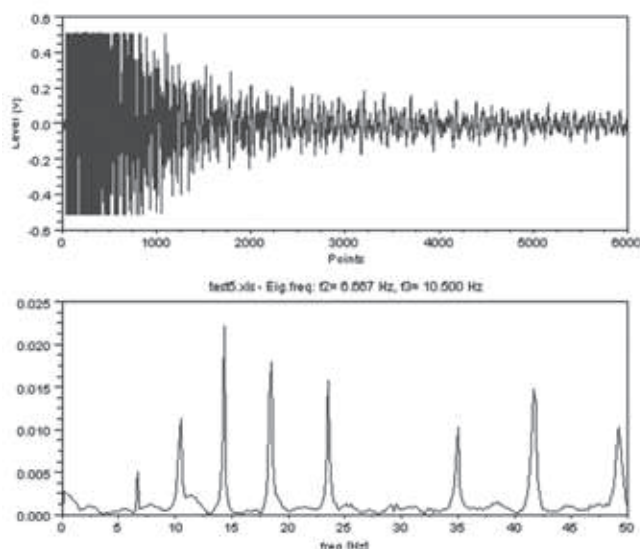
$$t = f_n - \frac{n}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}}$$

$$y = \frac{n}{2l} \frac{l}{\sqrt{\rho A}}$$

$$z = \frac{n}{2l} \frac{l}{\sqrt{A}} \left(4 + \frac{n^2 \pi^2}{2} \right) \frac{EJ}{l^2}$$

Výhodou frekvenční metody je možnost zjištění síly v již nainstalované táhle, nevýhodou je nemožnost sledování všech táhel najednou a nejistota ve správnosti analytického rozboru frekvenčního spektra. Proto se doporučuje kalibrace, nebo kontrola s měřením tenzometrickým.

Při návrhu je nutno uvážit tolerance při vnášení předpětí. Tolerance závisí na nepřesnostech při vnášení předpětí a možnosti dosáhnout požadovaného předpětí předpínacím postupem. Důležité je zahrnout dosažitelnou přesnost měření předpětí. Ta závisí



Obr. 4 – Záznam kmitání táhla a frekvenční spektrum

sí na volbě způsobu měření předpětí, výrobních odchylkách táhla, vlastnostech tenzometrů a dalších faktorech. Předpoklad přesnosti měření lze procentuálně vyčíslit.

V každém případě se doporučuje zajistit spolehlivé měření vnášených sil nejlépe dvěma nezávislými metodami (např. v napínacím zařízení, tenzometry nebo na základě deformace konstrukce při předpínání).

U většího množství táhel v konstrukci nelze zpravidla předpětí vnášet do všech najednou. Vlivem pružnosti konstrukce se táhla při postupném vnášení předpětí vzájemně ovlivňují. Teoretický předpínací postup určuje postupné vnášení sil do táhel, které však budou posléze změněny při napínání táhel dalších. To lze teoreticky popsat symetrickou maticí popisující vzájemné ovlivňování sil. Po předepnutí konstrukce se výsledek zpravidla dost výrazně liší od hodnot předpokládaných ve statickém výpočtu. S ohledem na vzájemné ovlivňování táhel by byl náhodný postup hledání optima zdlouhavý a nemusel by ani vést k cíli. Optimální postup ke změně hodnot naměřených k teoretickým lze vyjádřit matematicky s použitím metod lineárního programování. Přitom je nutno definovat okrajové podmínky procesu. Jedná se zejména o maximální hodnotu vnášené síly, maximální a minimální hodnoty v ostatních táhlech a přípustnou odchylku výsledku. V praxi používáme program Ladička s využitím SW Scilab a tabulkového procesoru, který dává z výsledků analýzy pokyny pro nejkratší postup úprav předpětí. Zvolená velikost maximálně přípustné odchylky výrazně ovlivňuje počet kroků při úpravách předpětí.

PŘÍKLADY REALIZOVANÝCH KONSTRUKCÍ**Konzolové přístřešky**

Předpjatá konzolová přístřešení přinášejí vylehčený vzhled bez klasických sloupů. U vstupní pergoly budovy televize na Kavčích horách bylo do čtyř předpjatých táhel vneseno kontrolované předpětí tak, aby nedošlo v žádné zatěžovací kombinaci k jeho vymizení. Kotevní plech u spodních táhel byl uzpůsoben pro vložení tlakového dynamometru. Obdobně je řešeno zastřešení atria Pragobanky Praha.

Předpjatá vzpínadla prosklených střech

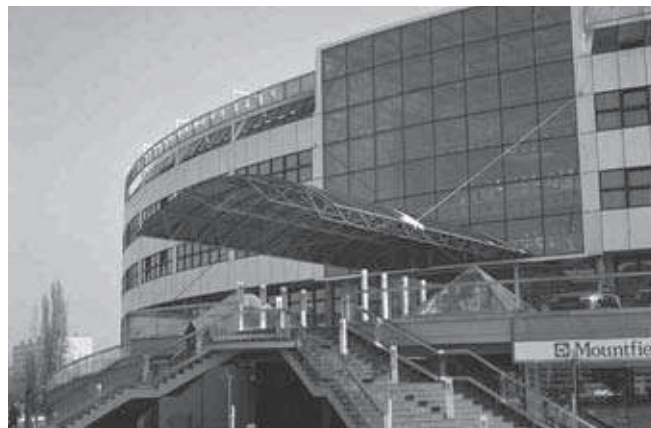
Konstrukce atria paláce ČSOB v Radlicích tvoří odlehčená konstrukce vazníků ve tvaru předpjatého vzpínadla na rozpětí 32 m. Vlastní vazník má horní pas z tuhého profilu HEB pro uložení prvků

zasklení. Konstrukce je předepnuta táhlem Macalloy ve spodním pasu, jehož tvar vymezují štíhlé trubkové vzpěry. Konstrukce vyniká svou lehkostí, jednoduchostí výroby a rychlostí montáže. Vazníky byly sestaveny naležato a pak předepnuty přes napínakovou matici s geometrickou kontrolou nadvýšení vynuceného předpětím.

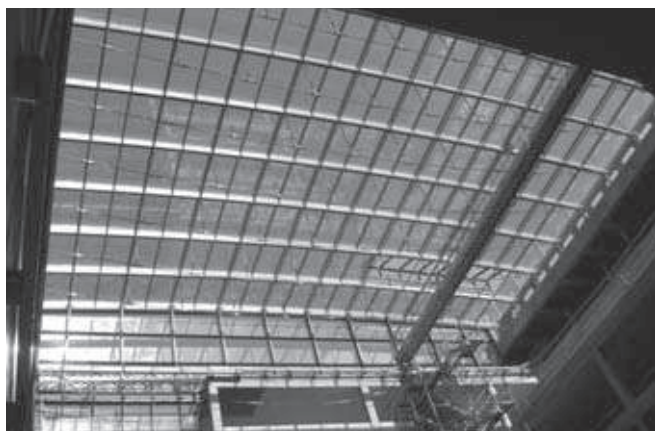
Stěnové fasády jsou zde řešeny dvěma systémy vzpínadel s táhly předepnutými v obou směrech na zajištění sání i tlaku větru. Předpjatá vzpínadla je použito i v paláci Křížík na Smíchově.

Arény a stadiony

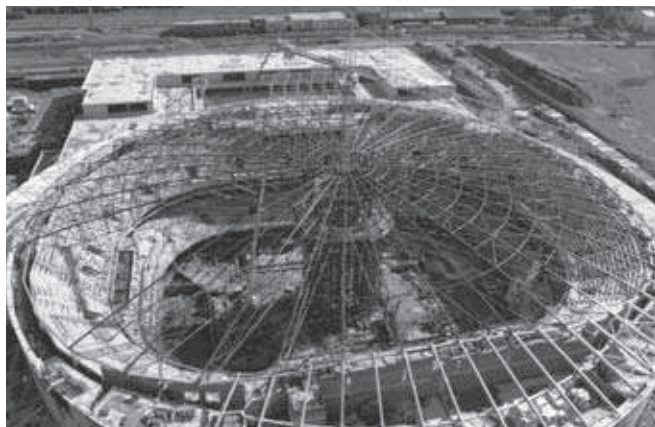
Ocelová konstrukce zastřešení Sazka Arény tvaru kulového vrchlíku o průměru 135 m a vzezření 9 m byla řešena radiálně-kruhovým uspořádáním prostorového vzpínadla s 36 trubkovými příhradovými vazníky s předpjatými táhly, které se sbíhají na centrálním válcovém



Obr. 5 – Zastřešení atria Pragobanka a vstupní pergola TV Kavčí hory Praha



Obr. 6 – Zastřešení atria vzpínadly – ČSOB Radlice



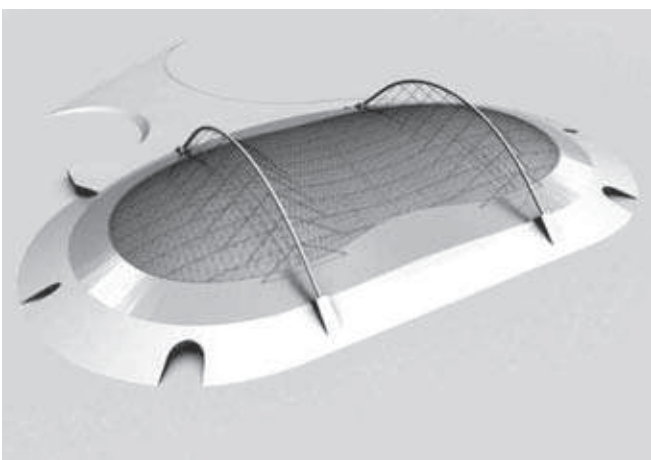
Obr. 7 – Zastřešení Sazka (O₂) arény



Obr. 8 – Zimní stadion Chomutov



Obr. 9 – Tělocvična Univerzity Parubice; štíhlá betonová konzola nesena táhly ve stěnách



Obr. 10 – Bruslařský stadion Velký Osek

tubusu. Zvolená varianta optimálně splnila požadavky na přenesení extrémních excentrických zatížení při zavěšení břemen při koncertech a jiných akcích. Tvar střechy umožnil umístění unikátní divadelní technologie v uvolněném prostoru mezi vazníky a táhly.

V nedávno dokončené konstrukci zastřešení zimního stadionu v Chomutově splnil tvarovou představu architekta střední předpjatý oblouk v podélném směru nad střechou zakřivenou ve dvou směrech. Při rozpětí 70 m bylo možno použít příhradové vazníky o výšce 2 m. Předností řešení je uvolněný vnitřní prostor arény, úspora provozních nákladů s ohledem na zmenšení vytápěného prostoru a fasádních ploch. Zajímavou úlohou zde byla optimalizace vzepětí oblouku, velikosti předpětí a způsobu montáže.

Předpětí bylo využito i v konstrukcích zastřešení tréninkové haly ZS Chomutov kde je navržen bezvaznicový systém s nosnými obloukovými vazníky s táhlem. V ZS Lanškroun přenáší vodorovné síly od střechy ve tvaru lamelové skořepiny předepnutá táhla. V zimním stadionu Košutka v Plzni bylo dosaženo vložení předpjatého táhla do obloukových plnostěnných vazníků

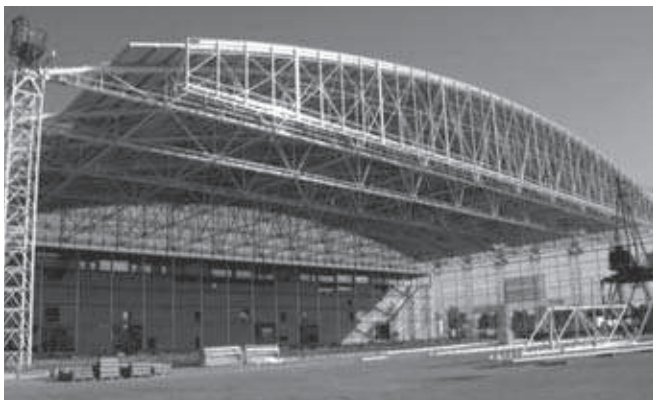
redistribuce vnitřních sil a tím i výrazných úspor hmotnosti konstrukce. Ve všech předchozích případech je nelinearita táhel řešena vyvěšením táhel do hlavní nosné konstrukce.

Při návrhu nosné konstrukce tělocvičny na univerzitě v Pardubicích byl požadavek architekta na extrémně štíhlou betonovou konzolu konstrukce podlahy řešen jejím zavěšením do ocelových konstrukcí stěn s předpjatými táhlovými ztužidly.

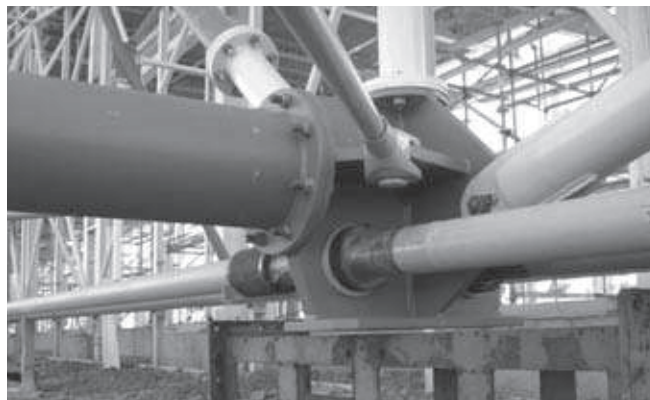
Návrh velkorozponového zastřešení arény pro rychlobruslení ve Velkém Oseku využívá dvou obloukových superkonstrukcí pře-depnutých táhly proti příčným průvlakům podélným vazníkům na rozpětí tvarovaným ve smyslu návrhu architekta. Opět vyniká úsporou vnitřního prostoru a plochy opláštění.

Hangáry

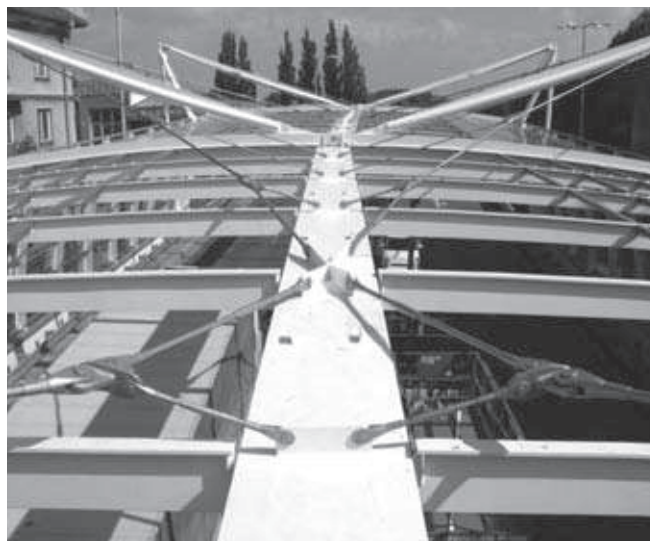
U některých hangárů jsou s ohledem na variabilitu vnitřního uspořádání požadovány extrémní rozpětí na plnou šířku hangárových vrat. Realizační projekt ocelové konstrukce a opláštění nového hangáru v Mošnově jsme zpracovali na základě požadavku generálního



Obr. 11 – Hangár Mošnov, styčnick spodního pasu vazníku



Obr. 12 – Protihlukový tunel Hradec Králové



Obr. 13 – Mosty Třinec-Baliny a Nitra

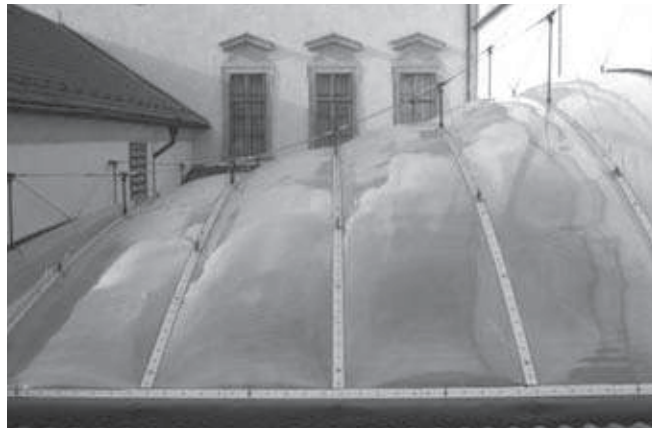


dodavatele optimalizovat konstrukci z hlediska hmotnosti a ceny při významném zjednodušení montáže a zkrácení doby výstavby. Úspory cca 400 t oproti původnímu standardnímu řešení bylo dosaženo použitím technologie předpjatých táhel Macalloy, pro dolní pasy obloukových příhradových vazníků na rozpětí 143,5 m, horizontálních ztužidel střechy hangáru a křížových ztužidel ve stěnách hangáru. Zajímavým řešením zde je styk dvojice táhel Macalloy M100 se zbylými prvky vazníku.

Projekt hangáru v Praze-Ruzyni, který se nerealizoval, počítal se superkonstrukcí – obloukovým nosníkem se spodním pasem sestávajícím ze skupiny předpjatých táhel.

Protihlukové tunely

Protihlukové tunely jsou štíhlé konstrukce nad vozovkami, zpravidla s prosklenými stěnami. Také zde znamená použití předpjatých táhel významnou úsporu hmotnosti. Hlavním nosným prvkem ocelové konstrukce protihlukového tunelu v Hradci Králové je páteřní nosník, který je podepřen osmi hlavními příčnými vazbami ve vzdálenosti cca 23 m. Sedm mezilehlých vazeb v každém ze sedmi polí spolu s vaznicemi a pažďíky tvoří osnovu pro uložení skleněných desek. Systém předpjatých táhel je tvořen hlavními obloukovými řetězci kotvenými vždy ve vrcholu sloupu a ve středu rozpětí na páteřním nosníku a táhly spojujícími vrcho-



Obr. 14 – Baldachýn pro sv. otce v Brně – Tuřanech a zastřešení atria Nosticova paláce

ly hlavní řetězovky s páteřním nosníkem v každé osmině rozpětí. Systém táhel podporuje průběžně páteřní nosník a umožňuje provést nadvýšení konstrukce předpětím a nahrazuje zavětrovací prvky. Téměř 200 táhel bylo předpínáno ve třech etapách podle připraveného předpínacího postupu.

V právě budovaném tunelu nad dálnicí poblíž obce Vchýnice zajistilo vnesení předpětí předpjatými táhly a redistribucí sil v příhradových obloucích 20% úsporu hmotnosti konstrukce.

Mosty

Táhla s možností předpínání na volné délce se u nás stále častěji používají na významných mostních konstrukcích. V poslední době se jedná zejména o mosty se síťovou strukturou táhel v Třinci Balinách (projekt MMD). Táhla byla aktivována na podporách a po spuštění předepnuta vlastní hmotností konstrukce. Po spuštění a po dalších krocích postupu výstavby jako je např. předpínání mostovky byly síly v táhlech korigovány na projektovaný stav s použitím technotensionerů spolu s tenzometrickým měřením. Dalším příkladem z poslední doby je a most s dvěma nezávislými oblouky v Nitře (projekt SHP Brno).

Membrány a speciální konstrukce

Velké možnosti uplatnění mají předpjatá táhla v membránových konstrukcích, které jsou zpravidla předepnuta ve svém tvaru dvou křivostí. Výjimkou byla konstrukce pro návštěvu papeže na brněnském letišti v Tuřanech, kde měla membrána tvar baldachýnu. Stabilitu tenké, podle přání architekta neviditelné ocelové konstrukce nad membránou zajišťovaly síly od čtyř dvojic předpjatých táhel v rozích konstrukce.

Pneumatiké membrány v zastřešení atria Nosticova paláce jsou kotveny na štíhlých obloucích nesených síťovinou předpjatých lanek.

ZÁVĚR

Předpjaté ocelové konstrukce přinášejí projektantovi zcela novou úlohu. Projektant přímo ovlivňuje a většinou i částečně přímo řídí postup výstavby ve fázích předpínání a korekce předpětí. Předpjaté konstrukce přinesly potřebu návrhu nových detailů, a teoretických postupů. Ocelové konstrukce s předpjatými táhly se s rozvojem metod a předpínání stávají stále více součástí

běžné praxe, jsou atraktivní a přinášejí mnoho výhod pro investora. O tom svědčí i častá ocenění předpjatých konstrukcí v poslední době (Sazka arena, hangár Mošnov, stanice metra Střížkov, Protihlukový tunel Hradec Králové, most Třinec – Baliny).

Ing. Vladimír Janata, CSC,
janata@excon.cz,
EXCON, a. s.

*Příspěvek byl prezentován
na konferenci KONSTRUKCE 2010.*

LITERATURA:

- [1] V. Janata (2005), "Sazka Arena, Prague, Czech republic", *Structural Engineering International* Vol. 15, Number 1, 40–43
- [2] V. Janata, J. Beran, Š. Bém (2010), "Ocelová konstrukce zastřešení zimního stadionu v Chomutově", *Stavebnictví* 05/2010, 14–17
- [3] V. Janata, D. Jermoljev, P. Koupný (2009), "Baldachýn pro svatého otce v Brně, Tuřanech", *Konstrukce* 05/2009, 28–29
- [4] D. Jermoljev, V. Janata (2009), "Zastřešení hospodářského dvora Nosticova paláce na Malé Straně", *Stavebnictví* 08/2009, 20–23
- [5] V. Janata, M. Lukeš (2009), "Aplikace táhel ve velkorozponové konstrukci hangáru v Mošnově", *Stavebnictví* 04/2009, 64–67
- [6] V. Janata, (2009), "Konstrukce protihlukového tunelu na městském okruhu v Hradci Králové", *Stavebnictví* 03/2009, 22–27
- [7] Š. Bém, J. Štolc (2009), "Ocelové konstrukce areálu zimního stadionu Plzeň-Košutka", *Konstrukce* 01/2009, 34–35
- [8] V. Janata, M. Lukeš, D. Gregor, D. Jermoljev (2007), "Ocelová konstrukce hangar na letišti Ostrava-Mošnov", *Konstrukce* 04/2007, 74–76
- [9] J. Lahodný, V. Janata, (2006), "Předepnuté ocelové stěny tělocvičen university Pardubice v netradiční roli", *Konstrukce* 06/2006, 23–24
- [10] J. Včelák, V. Janata, (2006), "Ocelové konstrukce nad atrii", *ABS* 05/2006, 92–93
- [11] J. Beran, V. Janata, (2005), "Zastřešení víceúčelové sportovní haly s ledovou plochou v Lanškrouně", *Konstrukce* 01/2005, 92–93
- [12] V. Janata, (2004), "Ocelová konstrukce střechy pro Sazka Arénu", *Stavební obzor* 03/2004, 65–70
- [13] M. Nečas, (2010), "Měření napětí v táhlech pomocí vlastních frekvencí", *Bakalářská práce FEL Praha*

Pre-stressed Steel Structures

The project of roofing of Sazka (now O₂) arena, when we first used the tie bars with possibility of stretching along the free length and tensiometric measurements in the introduction of pre-stressing, was a huge step in use of pre-stressed steel structures in many other of our projects. Expansion of these theoretically and technologically demanding structures also outside the bridge constructions has been enabled by development of computer technology and availability of materials, products and methods of measurements of pre-stress in the tie bars. This article presents a brief summary of issues and specific points of structures design with pre-stressed bars with a few examples of projects and their executions.