

Hodnocení dodatečně předpjatých vazníků střech průmyslových hal

Ing. Vladislav Bureš, Ph.D
Ing. Petr Pospíšil

Publikováno pro
JAGA GROUP, s.r.o.

Hodnocení dodatečně předpjatých vazníků střech průmyslových hal

Havárie dodatečně předpjatých konstrukcí

V nedávné minulosti rozvířily české sdělovací prostředky diskuzi o spolehlivosti (bezpečnosti) starších, předpjatých mostních konstrukcí. Tato diskuze byla vyvolána haváriemi dodatečně předpjatých mostů v zahraničí i v ČR. Nejznámějšími událostmi tohoto typu bylo zřícení Morandiho mostu v blízkosti Janova v Itálii v srpnu 2018 a zřícení Trojské lávky v Praze v prosinci 2017. Společným znakem těchto havárií byla koroze předpínací výztuže v kabelových kanálech.

Stejný jev ohrožuje i spolehlivost střech některých halových konstrukcí, u kterých byly použity dodatečně předpjaté střešní vazníky. V České republice došlo nejméně ke dvěma haváriím dodatečně předpjatých vazníků střechy průmyslové haly v západních Čechách v letech 2010 a 2018. Lze konstatovat, že i v oboru pozemního stavitelství v současné době čelíme problému systémové vady dodatečně předpjatých příhradových střešních vazníků,

kteří byly hromadně používány zhruba mezi lety 1960 až 1975. Byly původně navrženy pro použití u Průmyslových hal s rozpětím 18 nebo 24 m. Tedy z dnešního pohledu pro stavby ve třídě následků CC2 podle ČSN EN 1990.

Jde o systémovou vadu opakovaně používané stavební konstrukce, která má potenciál způsobit škody většího rozsahu, popřípadě i ztráty na životech, pokud nebude včas účinným způsobem řešena. Problém začal být studován po opakované havárii střešního vazníku průmyslové haly v srpnu 2018 a následně bylo v prosinci 2018 vydáno Upozornění ČKAIT [1]. Situace tohoto typu, kdy výskyt systémové vady ohrožuje nějakou část společnosti ve větším rozsahu, známe i z jiných oblastí – například z automobilového průmyslu. Čas od času se však s nimi setkáváme i ve stavebnictví. Příkladem mohou být opakované havárie hurdiskových stropů, které byly ve středu zájmu stavebních odborníků i odborné veřejnosti zhruba mezi roky 1995 až 2010, kdy došlo k celé řadě






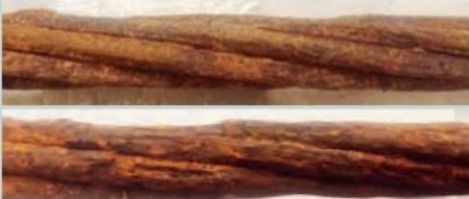
havárií stejného typu. Nepříjemným jevem, který se shodou okolností týká výše uvedeného případu hurdiskových stropů i aktuálně řešené problematiky dodatečně předpjatých příhradových vazníků je, že k selhání konstrukce může dojít náhle a bez předchozího varování. Tento způsob porušení konstrukce považujeme za nebezpečný a pokud je to možné, snažíme se mu obecně při navrhování konstrukcí vyhnout.

Koroze předpínací výztuže







Dodatečně předpínané vazníky na rozpětí 18 nebo 24 m byly z důvodů dopravy vyráběny ze tří nebo čtyř dílů délek zhruba 6 m a na stavbě byly dodatečně sepnuty v jeden celek předpínacími lany, provlečenými podélně skrz kabelové kanálky dolních a částečně i horních pasů vazníků. U vazníku na rozpětí 18 m s označením SPP 12-18/6 byla předpínací lana dolního pasu vazníku profilu 13Ø P4,5 uložena v kanálku průměru 29 mm. Po předepnutí lan měly být tyto kanálky dodatečně zainjektovány. Účelem injektáže byla především ochrana lana proti korozi jeho obetonováním. Systémová vada spočívá v tom, že kanálky se s technologií používanou v době výstavby podařilo kvalitně zainjektovat pouze v malém procentu případů a běžně se dnes setkáváme se skutečností, že nechráněná předpínací výztuž existujících vazníků je v různé míře napadena korozí. Situaci komplikuje skutečnost, že posoudit zodpovědně míru korozního napadení předpínacích lan

uložených v konstrukci je obtížné a zatím není k dispozici zcela vyhovující diagnostická metoda. Obvyklou diagnostickou metodou je endoskopické vyšetření kabelového kanálku s výztuží pomocí vrtu o průměru kolem 10 mm, kterým se kabelový kanálek opatrně navrtá. Nevýhodou této metody je problematické hodnocení stupně koroze výztuže ve stísněném prostoru vrtu, kdy je navíc omezený přístup k výztuži pouze z jedné strany. Jinou možností je vybourání větší sondy do oblasti předpínacího kanálku a přímé vizuální posouzení stavu kanálku a předpínací výztuže. S ohledem na malé rozměry průřezů prutů příhradového vazníku (typicky u pasů 160/300 mm) je však potřeba takové sondy provádět s citem a rozumem a ihned po jejich vyhodnocení je pečlivě opravit. Společnou velkou nevýhodou obou předchozích metod je ověření stavu výztuže pouze lokálně v místě sondy. Nelze tak postihnout případy lokální koroze výztuže mimo polohu sondy. Aby byla možnost provádět kvalitativní vizuální hodnocení rozsahu koroze předpínací výztuže, byla pracovníky Kloknerova ústavu ČVUT vytvořena škála rozsahu koroze - viz následující tabulka na Obr. 1, převzatá z článku [2].

Zatřídění konkrétního stavu výztuže do škály na Obr. 1 nemusí být vždy snadné, protože například rozdíl mezi korozním stavem 4 a 5 není na Obr. 1 příliš patrný. Někteří zpracovatelé průzkumů používají jinou (podobnou) hodnotící škálu, převzatou a upravenou podle [8].

Stupeň koroze	Ilustrativní fotografie korozního stupně	Popis
1		<ul style="list-style-type: none"> • Výztuž bez jakékoli známky koroze,
2		<ul style="list-style-type: none"> • výztuž se začínající lokalizovanou povrchovou korozí, • lze zaznamenat původní nekorodující povrch, • nemá vliv na změnu průřezu,
3		<ul style="list-style-type: none"> • plošně rozvinutá povrchová koroze výztuže bez odlupujících se korozních zplodin, • vliv na zmenšení plochy výztuže a mechanické parametry není významný,
4		<ul style="list-style-type: none"> • plošně rozvinutá povrchová koroze výztuže, • korozní zplodiny se odlupují, není však patrná zjevná změna tvaru průřezu a zmenšení plochy průřezu, • změna plochy však již nastává v úrovni %, • tento typ koroze je hraniční z hlediska míry negativního vlivu na mechanické vlastnosti výztuže,
5		<ul style="list-style-type: none"> • plošně rozvinutá povrchová koroze výztuže, • masivní odlupování korozních zplodin, • na povrchu drátů se tvoří rovnoměrná důlková struktúra typu „pomerančová kůra“, místy zjevná změna a zmenšení tvaru a průřezu drátu, • úbytek plochy je výrazný a dosahuje již řádu několika desítek % původní plochy,
6		<ul style="list-style-type: none"> • masivní odlupování korozních zplodin, • výrazná a zjevná změna tvaru drátů, některé mohou být i porušené nebo překorodované, • výrazné zmenšení plochy výztuže, • úbytek plochy na úrovni 50% i více z původní plochy.

Obr. 1 Hodnotící škála dle korozního napadení povrchu lana podle [2]

1	<p>No corrosion (Mass loss = 0.0%)</p> 	Bez koroze
2	<p>Light corrosion (Mass loss = 0.19%)</p> 	Mírná povrchová koroze, lokálně s projevy rozvoje koroze ve štěrbinách mezi patentovanými dráty Korozně oslabeno až 0,19 % průřezové plochy
3	<p>Pitting (Mass loss = 1.26%)</p> 	Středně rozvinutá koroze plošného charakteru Korozně oslabeno až 1,26 % průřezové plochy
4	<p>Heavy Pitting (Mass loss = 2.72%)</p> 	Intenzivnější koroze s přechodem k důlkové formě Korozně oslabeno až 2,72 % průřezové plochy
5	<p>Cross section loss (Mass loss = 8.38%)</p> 	Intenzivní koroze s tvorbou odlupujících se šupin Korozně oslabeno až 8,38 % průřezové plochy
6	<p>Fracture (Mass loss = 21.34%)</p> 	Výrazné oslabení s přerušením patentovaných drátů Korozně oslabeno až 21,34 % průřezové plochy

Obr. 2 Hodnotící škála dle korozního napadení povrchu lana podle [8]

Koroze výztuže u předpínacích lan je při porovnání s korozním ohrožením měkké výztuže z betonářských prutů mnohem nebezpečnější z následujících důvodů. Zaprvé, průřezová plocha lana, skládající se z 13 tenkých drátů, je přibližně 4× citlivější na korozní úbytek na povrchu drátu než jedna betonářská vložka stejné průřezové plochy. To ilustruje následující tabulka.

Zadruhé se v mezerách mezi jednotlivými dráty snadněji udržuje a šíří vlhkost. A za třetí, při korozním oslabení přes 5 % plochy průřezu způsobuje koroze také významný pokles mechanických vlastností oceli – hlavně meze kluzu. Problematika poklesu mechanických vlastností výztuže v důsledku koroze je podrobně rozebrána v článku [2].

Oslabení průřezové plochy %	Korozní úbytek v mm	
	Kruhová vložka Ø 15,58 mm	Předpínací lano 12 Ø P4,5
1 %	0,0390	0,0113
2 %	0,0780	0,0226
2,554 %	0,1000	0,0289
5 %	0,1970	0,0570
8,675 %	0,3458	0,100
10 %	0,3995	0,1155
20 %	0,8225	0,2376

Obr. 3 Vliv korozního úbytku na povrchu výztuže na průřezovou plochu

V následující tabulce, převzaté z článku [2], je ukázán celkový vliv koroze pro korozní stupeň 3 až 6 na únosnost lana. V posledním sloupci tabulky je „fiktivní zbývající plocha průřezu výztuže“ vypočtená za předpokladu původní pevnosti oceli 1700 MPa. Velký pokles „fiktivní zbývající plochy průřezu“ je způsobem současným zmenšením průřezové plochy v důsledku korozního oslabení v kombinaci s poklesem pevnosti výztuže. Ve sloupci tažnost je vidět dramatický pokles tažnosti oceli při vyšších stupních koroze, což způsobuje pokles plastické rezervy výztuže.

Hodnocení vlivu korozního oslabení předpaté výztuže na stav konstrukce není zahrnuto do žádného stavebního předpisu v oboru pozemních staveb. V přiměřené míře lze pro tento účel použít normu ČSN 73 6221 Prohlídky mostů pozemních komunikací.

Tato norma hodnotí stavební stav mostu v závislosti na stavu kabelových kanálků a oslabení předpínací výztuže korozí následujícím způsobem:

Stavební stav V – špatný, nebo VI – velmi špatný znamená, že obnovení spolehlivosti mostu bude nutno zajistit jeho rekonstrukcí (stavebními úpravami, modernizací). Koroze předpínací výztuže na úrovni překračující oslabení průřezové plochy o 5 % je hodnoceno jako havarijní stav. Havarijní stavební stav znamená okamžité uzavření mostu, nebo okamžité provizorní zajištění jeho spolehlivosti, například podepřením. Na základě porovnání Obr. 1 a Obr. 4 lze tedy konstatovat, že stupeň koroze 4 podle Obr. 1 je nutno považovat za limitní, stupeň koroze 5 už znamená havarijní stav konstrukce.

Korozní stupeň	Vzorek číslo	Plocha výztuže stanovená		Síla	Tažnost	Podíl plochy vzorku stanovené zvoleným způsobem ke jmenovité ploše	
		vážením	přepočtem z napětí 1700 MPa	F_m	A_{gt}	vážením	přepočtem z napětí 1700 MPa
		[mm ²]	[mm ²]	[kN]	[%]	[%]	[%]
6	P4/5	135,82	44,19	75,13	0,31	96,0	31,2
5	P6/3	136,54	108,01	183,62	0,87	96,5	76,3
4	L4/3	140,78	137,73	234,14	1,40	99,5	97,3
3	P4/13-14	145,11	143,29	243,60	4,41	102,5	101,2
Uvažované jmenovité hodnoty		141,54	-	240,60	4,00	-	-

Obr. 4 Vliv změny průřezové plochy při korozi výztuže podle [2].

Stavební stav mostu	Oslabení předpínací výztuže	Kabelové kanálky
V – špatný	do 1 %	částečně nezajinjektované
VI – velmi špatný	do 5 %	nezajinjektované

Obr. 5 Stavební stav mostu v závislosti na korozi výztuže podle ČSN 73 6221

Rizikové faktory

Obecně platí, že k mechanickému selhání prvku konstrukce dojde v případě, že účinky namáhání některého z průřezů prvku překročí jeho únosnost. V teorii mezních stavů platí, že návrhový účinek zatížení musí být vždy menší než návrhová odolnost prvku.

$$E_d \leq R_d$$

Jak namáhání (zatížení), tak únosnost (odolnost) průřezu prvku závisí na celé řadě faktorů, které mají charakter náhodně proměnných veličin. V některých případech je dominantní příčina selhání průřezu zřejmá, nemusí tomu tak ale být vždy. Problémy, zvyšující riziko selhání konstrukce, se vyskytují jak na straně odolnosti průřezu (korozní úbytky, pokles mechanických vlastností materiálu), tak na straně účinků zatížení.

Časté je přetížení existujících vazníků. Bývá způsobeno jednak příliš vysokou vlastní tíhou střešního pláště, která byla v minulosti nekontrolovaně navýšena různými problematickými úpravami střechy (další vrstvy krytiny včetně různých izolačních a vyrovnávacích vrstev, nasycení nefunkční tepelné izolace vodou). Střecha může být dodatečně přitížena technologií, osazenou na střešní plášť – dnes například fotovoltaickými panely.

Dále bývá přetížení konstrukce způsobeno různou dodatečně namontovanou technologií (někdy i již nefunkční), zavěšenou na spodní pasy vazníků. Samostatnou záležitostí je zatížení střechy sněhem. Do roku 1968 předepisovaly normy pro zatížení stavebních konstrukcí zatížení sněhem na ploché střeše jednotně hodnotou 0,75 kN/m² na celém území Československa s výjimkou horských oblastí s nadmořskou výškou nad 600 m. Většina dodatečně předpjatých spínaných vazníků byla navržena před rokem 1968 podle těchto předpisů. To vede na situace, kdy jsou

například v Jablonci nad Nisou takto navržené vazníky použité v VII. sněhové oblasti, ve které dnešní normy předepisují tíhu sněhem na zemi hodnotou 3,50 kN/m².

Problémy na straně odolnosti konstrukce plynou z problematicky navrženého systému injektáže výztuže v kanálcích o průměru 29 mm v kombinaci s nízkou úrovní tehdejší technologické a pracovní kázně. Pro ilustraci lze uvést vyjádření pamětníků, že „nepodařené vazníky, u kterých byly problémy s předpínáním a injektáží se používaly do štítů hal a jako zdvojené vazníky u dilatací hal“. Což z pohledu dnešních předpisů vypadá absurdně. Z toho plyne hlavní riziko, které představuje koroze předpjaté výztuže. Další rizika mohou plynout z nekvalitní výroby vazníků v případech, kdy byly vyráběny jako staveništní prefabrikáty, popřípadě z montáže konstrukce, při které nebyly dodržovány montážní tolerance.

Bohužel, zatím není k dispozici žádný univerzální postup a hodnocení konstrukce je nutno provést individuálně. Jak bylo výše popsáno, vlastní diagnostika (průzkum) a ohodnocení míry rizika na základě prohlídky a výsledků diagnostiky není snadnou záležitostí. Jsou však známy rizikové faktory na straně zatížení i na straně odolnosti konstrukce.

Lze vést diskuzi o pořadí nebezpečnosti jednotlivých rizikových faktorů. V tomto článku byla snaha řadit je od nejdůležitějších k méně důležitým, ale důležitost jednotlivých rizikových faktorů je vždy otázkou konkrétního případu.

Rizikové faktory zatížení konstrukce	Rizikové faktory odolnosti konstrukce
<ul style="list-style-type: none"> ● přetížení vazníku vlastní tíhou střechy (neodborně dodatečně navýšená); ● přetížení podhledu haly (zavěšená technologie); ● přetížení střešního pláště (fotovoltaika, technologie na střeše); ● realizace stavby ve vyšší sněhové oblasti, než na jakou byla navržena; ● použití střechy pro stavbu s třídou následků CC3; ● zvýšená korozní agresivita prostředí v hale; ● použití pro vícelodní haly s úžlabími mezi loděmi, riziková místa zatékání; ● kondenzace vlhkosti uvnitř haly, tepelné mosty na konstrukci. 	<ul style="list-style-type: none"> ● identifikace dodatečně předepnutých (spínaných) střešních vazníků; ● průzkumem diagnostikovaná koroze předpínací výztuže; ● rezavé stopy od korozních produktů výztuže na konstrukci; ● trhliny v betonu předpjatých tažených prutů příhradoviny; ● viditelný průhyb či jiná deformace vazníku; ● průzkumem diagnostikované nezainjektování kanálků; ● stopy po zatékání do konstrukce bez barevných skvrn od koroze; ● stopy po kondenzaci vody na konstrukci; ● neodborné zásahy do konstrukce (vysekané drážky, vrtání do prutů); ● výskyt trhlin nadměrné šířky na prutech vazníku s měkkou výztuží; ● vady při výrobě vazníků; ● vady při montáži haly (nedodržování tolerancí, imperfekce v uložení); ● poškození vazníků v minulosti (požár, náraz jeřábu apod.); ● statické poruchy haly způsobené jinými příčinami (sedání základů); ● degradace konstrukce – opotřebení stářím (obvyklá životnost je 50 let).

Obr. 6 Rizikové faktory zatížení a odolnosti konstrukce

Hodnocení spolehlivosti konstrukce

Hodnocení spolehlivosti existující konstrukce lze provést podle ČSN ISO 13822 a ČSN 73 0038, s přihlédnutím k ČSN 73 6221. Norma rozlišuje předběžné hodnocení a podrobné hodnocení.

Předběžné hodnocení lze provést na základě studia dostupných podkladů a předběžné prohlídky na místě. Z předběžného hodnocení mohou vyplynout rozhodnutí o okamžitých opatřeních, pokud jsou potřeba a doporučení pro podrobné hodnocení.

Podrobné hodnocení vychází z průzkumu konstrukce (například ověření skutečné skladby střechy, endoskopické vyšetření kabelových kanálků...) a z analýzy konstrukce – statický výpočet. Dnes máme většinou pro daný typ vazníku k dispozici archivní dokumentaci, která v kombinaci s průzkumem konstrukce umožní ověření konstrukce statickým výpočtem. Pokud se vypracovává statický výpočet, je ho nutno vždy vypracovat na základě aktuálních informací o vlastnostech použitých materiálů, o skutečné geometrii konstrukce a o skutečném zatížení konstrukce, ověřeném průzkumem. Statický výpočet je vždy nutno vypracovávat podle aktuálně platných norem pro zatížení a navrhování. Pokud je navrhováno zesílení konstrukce, musí být vždy ověřeno statickým výpočtem.

V případě, že nedochází ke změnám v uspořádání zatížení konstrukce oproti

předpokladům původního statického výpočtu (rovnoměrné zatížení střechy vlastní tíhou, sněhem a malé, rovnoměrně rozdělené technologické zatížení na podhledu soustředěné do styčníků vazníku), ani k žádným změnám v konstrukci vazníku a pokud na konstrukci nejsou zjištěny žádné statické poruchy, ani nadměrná degradace, lze statický výpočet omezit na porovnání účinků zatížení. Pokud účinky zatížení nepřevýší účinky, uvažované při návrhu vazníku, není nutno provádět statický výpočet vazníku.

U konstrukcí, které byly navrženy podle starších předpisů, umožňuje norma ČSN ISO 13822 v Kapitole 8 hodnocení konstrukce bez statického výpočtu na základě dřívější uspokojivé způsobilosti. Podle tohoto ustanovení lze konstrukci považovat za spolehlivou (bezpečnou) v případě, že:

- pečlivá prohlídka neodhalí žádné známky staticky významného poškození, přetížení nebo degradace;
- přezkoumá se konstrukční systém a prohlédnou se kritické detaily;
- konstrukce vykazuje uspokojivou způsobilost v průběhu dostatečně dlouhého časového období;
- predikovaná další degradace nemá vliv na trvanlivost;
- po dobu další plánované životnosti nenastanou změny, které by mohly zvýšit zatížení konstrukce nebo ovlivnit její trvanlivost.

Hodnocení spolehlivosti konstrukce podle této kapitoly (tedy prohlášení konstrukce za spolehlivou bez statického výpočtu) může v některých případech být jednou z možností (nebo i jedinou možností), jak prohlásit za vyhovující konstrukci, použitou ve vyšší sněhové oblasti, než na jakou byla navržena. Tento způsob hodnocení ale lze použít pouze v případě, že jsou splněny v normě uvedené podmínky. Především tedy, že nebylo zjištěno významné poškození předpínací výztuže korozí (degradace výztuže).

V případě, že konstrukci nelze považovat za spolehlivou, je nutno přijmout příslušná opatření k zajištění této spolehlivosti. Po omezenou dobu lze v některých případech konstrukci dále provozovat s využitím režimu řízení rizik. Tedy omezením rizik například omezením zatížení (shazování sněhu) a trvalým sledováním konstrukce a její odezvy na zatížení.

Pro trvalé zajištění předpjatých vazníků, u kterých nelze jinak zajistit dostatečnou spolehlivost, vyvinula firma Rada Building s.r.o. metodu zajištění (zesílení) vazníku dodatečně přidanou externí ocelovou konstrukcí. Nově přidaná konstrukce je navržena tak, aby sama přenesla celé zatížení tažených předpjatých prutů vazníku a spolehlivě zajistila bezpečnost konstrukce.

Ve výjimečném případě, kdy při odborné prohlídce nebo v rámci stavebně-technického průzkumu dojde ke zjištění havarijního stavu, který přímo

ohrožuje zdraví a životy osob, mělo by po seznámení vlastníka stavby s výsledky prohlídky následovat oznámení stavu příslušnému stavebnímu úřadu. V tomto případě je věcí stavebního úřadu uvážit možnost postupu podle paragrafů stavebního zákona, které umožňují nařídit vlastníkovi stavby bezodkladné provedení nutných zabezpečovacích prací k odvrácení hrozícího nebezpečí.

Použité podklady

- [1] Upozornění ČKAIT na riziko havárií betonových předpínaných vazníků z poloviny 20. století, ČKAIT, 5. 12. 2018
- [2] Kolísko, J., Vacek, V., Pokorný, P., Kostecká, M.: Vlastnosti předpínací výztuže ovlivněné korozí, článek v časopisu Beton TKS 6/2019, str. 3-9
- [3] Rada, S., Hejl, J.: Dodatečně předpjaté konstrukce střešních vazníků, článek v časopisu Stavebnictví 01-02/2021, str. 18-23
- [4] Rada, S.: Dodatečně předpjaté konstrukce střešních vazníků, 2. Díl, článek v časopisu Stavebnictví 03/2021, str. 18-23
- [5] Mynarčík, P.: Dodatečně předpjaté konstrukce střešních vazníků, 3. Díl, článek v časopisu Stavebnictví 04/2021, str. 20-24
- [6] Cieslar, S.: Koroze předpínací výztuže se týká i střešních konstrukcí hal. Celospolečenská závažnost problému je již vnímána. Řešení existuje, článek v časopisu Konstrukce 02/2021
- [7] Cejnar, J.: Havárie betonových předpjatých vazníků halových objektů – systémové řešení, článek v časopisu Konstrukce 03/2021
- [8] Farhidzadeh, A., Ebrahimkhanlou, A., Salamone, S.: Corrosion damage estimation in multi-wire steel strands using guided ultrasonic waves. Proceedings of SPIE – The international Society for Optical Engineering, 2015
- [9] ČSN 73 1310 Zatížení stavebních konstrukcí, vydaná 1958

Ing. Vladislav Bureš, Ph.D.

Katedra nosných konstrukcí
Fakulta umění a architektury
Technická univerzita Liberec
vladislav.bures@tul.cz

Ing. Petr Pospíšil

Rada Building s.r.o.
petr.pospisil@radabuilding.com

HavarieKonstrukci.cz



JAGA