



49. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií

4. – 5. jún 2026, Hotel Park****, Dolný Kubín

K ODOLNOSTI NITOVANÝCH POZDĹŽNIKOV S KORÓZIU V PRÍPADE DOSLUHUJÚCICH MOSTOV V PREVÁDZKE

B. Vavák - J. Odrobiňák - M. Farbák - V. Černý *

Abstrakt

Železničné mosty predstavujú neoddeliteľnú súčasť každej dopravnej cesty. Na väčšie rozpätia sa v 20. storočí používali oceľové mosty s prvkovou mostovkou. Najsubtílnejším článkom a zväčša najviac kritickým je pozdĺžnik. Najčastejšie na dosluhujúcich mostoch je nitovaný, tvorený z valcovaných plechov a profilov. Oceľ ako taká podlieha degradácii – korózii. Obsiahnutá problematika je koncipovaná z pohľadu plošnej korózie na pozdĺžniku, s dopadom na jeho odolnosť. Meraním reálnych konštrukcií, bol zistený skutkový stav a porovnaný s nominálnym stavom z projektu. Výsledky naznačujú pomerne veľkú plusovú toleranciu pri výrobe valcovaním v tej dobe. V neposlednom rade bola spracovaná štúdia dopadu korózie na 25. reálnych pozdĺžnikov stávajúcich mostov napadnutých nerovnomerne veľkou plošnou koróziou.

1 ÚVOD

Oceľové železničné mosty na väčšine európskych tratiach postavených v 20. storočí nie sú majoritné z hľadiska početnosti, no z pohľadu dôležitosti sú často kľúčovým prvkom každého traťového úseku. Spravidla najviac namáhaným prvkom oceľových mostov s prvkovou mostovkou je pozdĺžnik. Často je preto tým najkritickejším prvkom z pohľadu zaťažiteľnosti či prechodnosti. Jedným z hlavných degradačných činiteľov, ktorý môže ovplyvniť odolnosť oceľového prierezu je samozrejme korózia, [1,2]. V zásade je možné tento nežiadúci proces významne eliminovať správnou a pravidelnou dohliadacou činnosťou a adekvátnou údržbou, ktorej nespornou súčasťou musí byť aj obnova systému protikoróznej ochrany. Je však zrejmé, že početnosť mostov, obmedzené investičnej zdroje a čoraz častejšie aj nedostatok odborníkov vedú k zanedbávaniu či opomínaniu týchto procesov. Teda na našich tratiach sa vyskytujú aj konštrukčné prvky, ktoré trpia koróznym napadnutím, [3]. Teraz nemáme na mysli lokálne kritické miesta, ale plošnú koróziu, ktorou je napadnutá väčšia časť plochy prierezu, prvku, či celej nosnej konštrukcie, obr. 1.

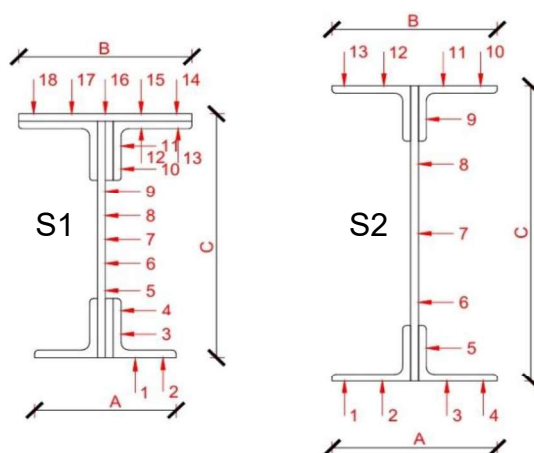
* Branislav Vavák, Ing. PhD., Železnice Slovenskej republiky, VVÚŽ, Hviezdoslavova 31, Hviezdoslavova 31, 010 02 Žilina, Vavak.Branislav@zsr.sk
Jaroslav Odrobiňák, doc. Ing., PhD. Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, Univerzitná 8215/1, 010 026 Žilina, jaroslav.odrobinak@uniza.sk
Matúš Farbák, Ing. PhD., Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, Univerzitná 8215/1, 010 026 Žilina, matus.farbak@uniza.sk
Vít Černý, doc. Ing. Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, ČR, vit.cerny@vut.cz



Obr.1 Most s celoplošnou miernou koróziou

2 MIERNA PLOŠNÁ KORÓZIA VS. TOLERANCIE VO VALCOVANÝCH HRÚBKACH

Pri prierezoch je pomerne veľká plusová tolerancia, pri ich výrobe valcovaním, [4]. Pri historických mostoch to platí obzvlášť. Je teda veľmi dobre možné, že kladné rezervy v hrúbkach prierezov môžu jednoducho kompenzovať menšie korózne úbytky. Za týmto účelom sa uskutočnili merania na existujúcich dvoch mostoch, ktoré boli napadnuté iba veľmi slabou plošnou koróziou. Jednalo sa spolu o 16 pozdĺžnikov dvoch rôznych prierezov, obr. 2. Najskôr boli zmerané aj základné rozmery ako šírka horného a spodného pásu, výška celého prierezu pozdĺžnika apod. Rozmery konštrukcie boli merané kalibrovaným posuvným meradlom Insize s rozsahom 0-500 mm s presnosťou 0,01 mm. Následne sa zamerali hrúbku jednotlivých plechov a ramien uholníkov a o v troch rezoch: uprostred rozpätia a pri prípoji na priečniky. Merania sa realizovali nedeštruktívnou metódou, klasickým bodovým meraním pomocou merania hrúbok prístrojom Coda (Innerspec), ktorý pracuje na báze EMAT (Electromagnetic Acoustic Transducer).

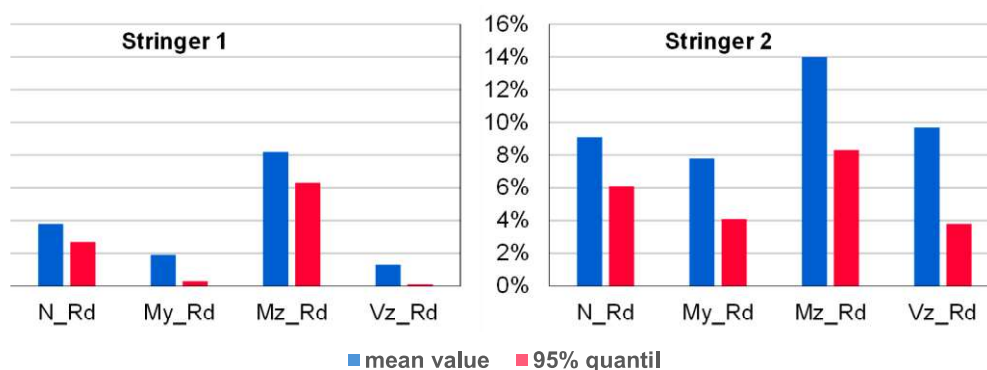


Obr. 2 Prierezy pozdĺžnikov podrobne vyšetrované na skutočné rozmery a hrúbky s vyznačením bodov pre meranie hrúbky a rozmerov

Výsledky týchto meraní boli zoradené a štatisticky spracované do Gausovho rozdelenia. Následne tieto štatistické hodnoty slúžili ako vstupné parametre pre simuláciu zložiek odolnosti prierezu. Zúžitkovali sme vyvinutý program na báze metódy Monte Carlo, [5,6,7]. Hrúbka a rozmery boli definované štatistickými hodnotami pre každú časť

prierezu rozdeleného na jednotlivé časti. Výstupom je nasimulovaných 30 000 rôznych prierezov so vstupnými štatistickými hodnotami pre každú časť prierezu. Hrúbka a rozmer bol ohraničený strednou hodnotou a smerodajnou odchýlkou. Zo získaných prierezových charakteristík bola stanovená odolnosť prierezu. Na základe odporúčaní súčasných noriem ale aj smerníc pre prepočty existujúcich mostov sme uvažovali v prípade týchto nitovaných prierezov, že ich odolnosť na normálové napätia σ_x je možné stanoviť len z pružnej odolnosti, teda postupy overenia sme uvažovali ako pre prierez triedy 3. Taktiež je potrebné uviesť, že v prípade ťahových normálových napätí boli v príslušnej časti prierezu zohľadňované otvory pre nity, pokiaľ sa tam nachádzali. Nakoľko nebola meraná pevnosť materiálu a ani jeho variabilita, po prierezoch bola medza klzu stanovená pre všetky prierezy rovnaká, aj súčiniteľ spoľahlivosti materiálu bol rovnaký, tak aby neovplyvňoval výpočet.

Výsledky sumarizuje obrázok 3, kde je prezentovaný percentuálny nárast jednotlivých zložiek odolnosti oproti nominálnej hodnote vyčíslennej z rozmerov predpokladaných v dobovej projektovej dokumentácii. Je evidentné, že prierezy vykazujú vždy vyššiu odolnosť, než ak by bola stanovená na základe nominálnych hrúbok. Pri pozdĺžniku S2 tento nárast, resp. rezerva v zložkách odolnosti, predstavoval pri stredných hodnotách od 7,8% do 14,0 %. Aj v prípade hodnôt odpovedajúcich 95% kvantilu sa tieto čísla pohybovali na nie zanedbateľných hodnotách a to od 3,8% pri odolnosti vo zvislom šmyku $V_{z,Rd}$ až do 8,3% pri odolnosti vo vodorovnom ohybe $M_{z,Rd}$. Podobne, zvislý ohyb $M_{y,Rd}$ vykazoval nárast o 7,8% resp. 4,1%. Nárasty v zložkách odolnosti u pozdĺžnika S1 boli podstatne nižšie, rovnako však vždy plusové. V prípade hodnôt odpovedajúcich 95% kvantilu sa pohybovali od 0,1% pri $V_{z,Rd}$ do 6,3% pri $M_{z,Rd}$. Navyše je potrebné dodať, že obidva prierezy boli počas vstupných meraní napadnuté plošnou koróziou odhadovanej intenzity do 0,15 mm. Napriek tomu je zrejmé, že výrobné tolerancie sa preukázali ako dominantnejšie (samozrejme pri takto malej korózii).



Obr. 3 Rezerva v odolnosti prierezu pozdĺžnikov pri zohľadnení reálnych meraní

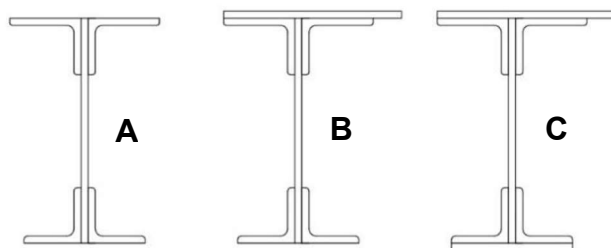
3 POKLES ZLOŽIEK ODOLNOSTI PRIEREZU VPLYVOM RÔZNE ROZMIESTNENE KORÓZIE

Ďalej bola spracovaná štúdia zaoberajúca sa simuláciami rôznych rozdelení korózie po obvode prierezu a ich dopad na zložky odolnosti prierezov pozdĺžnikov. Bol spracovaný simulačný výpočet tak, aby sa mohol uvažovať rôzne korózne modely, ktoré môžu byť takmer akékoľvek, samozrejme vždy sú závislé od času. Predpokladom simulácií je stochastický vstup geometrických parametrov – konkrétne hrúbok jednotlivých konštrukčných komponentov a za zrejme zvolený korózný model.

Pre ďalšie analýzy na preukázanie vplyvu plošnej korózie na odolnosť sa vytipoval súbor 25 reálnych nitovaných mostov, na ktorých sa nachádzajú pozdĺžniky rôznej výšky a prierezu (od 300 mm až do 900 mm). Tabuľka 1 uvádza zoznam častí, z ktorých sa daný prierez skladá. Tento súbor 25 rôznych pozdĺžnikov je reprezentovaný tromi charakteristickými typmi prierezu, ktoré sú označené na obrázku 4 označeniami A, B, C.

Tab. 1 Vytipované pozdĺžniky pre štúdiu

Pozdĺžnik č.	Výška	Plech steny	Plech hornej pásnice	Horné krčné uholníky	Dolné krčné uholníky	Plech dolnej pásnice	Typ prierezu
01	300	300x12		100x75x10	100x75x10		A
01	320	300x12		100x75x10	100x75x10		A
02	330	320x11		70x100x11	70x100x11		A
03	340	320x10	220x10	100x80x10	80x80x10		B
04	370	330x10	240x10	80x80x8	80x80x8		B
05	382	360x10	245x10	80x80x10	80x80x10		B
06	390	370x12	250x12	80x80x10	80x80x10		B
08	400	400x10		100x80x10	100x80x10		A
09	400	390x10	240x10	100x100x12	100x100x12		B
10	406	396x12	240x10	80x80x10	100x100x12		B
11	420	400x8	250x10	70x70x10	70x70x10	190x10	C
12	444	420x10	280x12	100x100x12	100x100x12	220x12	C
13	460	440x8	220x10	70x70x10	70x70x10	160x10	C
14	470	450x10	260x10	90x90x10	90x90x10	200x10	C
15	512	500x12	280x12	80x80x10	80x80x10		B
16	520	510x10	250x10	100x100x10	100x100x10		B
17	522	510x12	290x12	100x75x10	100x75x10		B
18	538	530x10	220x8	100x100x12	100x100x12		B
19	610	600x10	240x10	90x90x9	90x90x9		B
20	612	600x12	325x12	120x80x12	120x80x12		B
21	650	640x12	240x10	70x70x10	70x70x10		B
22	730	720x12	280x10	100x100x12	150x100x12		B
23	770	750x10	190x10	80x80x10	80x80x10	190x10	C
24	774	750x14	360x12	130x90x12	130x90x12	300x12	C
25	900	900x10		90x120x12	90x120x12		A

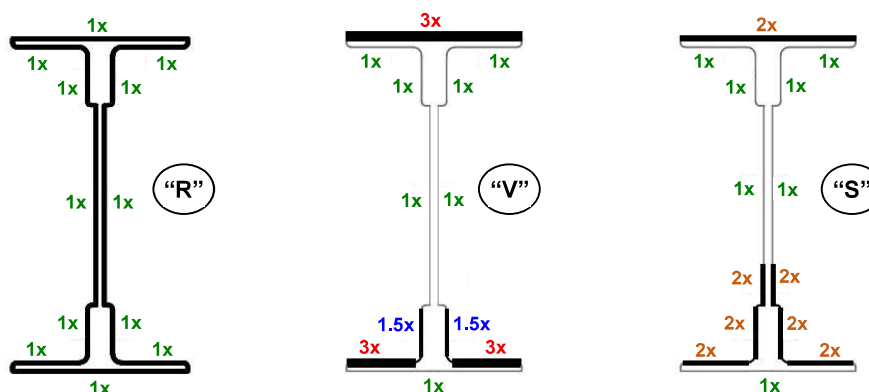


Obr. 4 Typy prierezu označených v poslednom stĺpci tabuľky 1

Bol vypracovaný výpočtový algoritmus, ktorý umožňuje po zadaní stredných hodnôt a smerodajných odchýlok určiť pomocou simulácií prierezové charakteristiky resp.

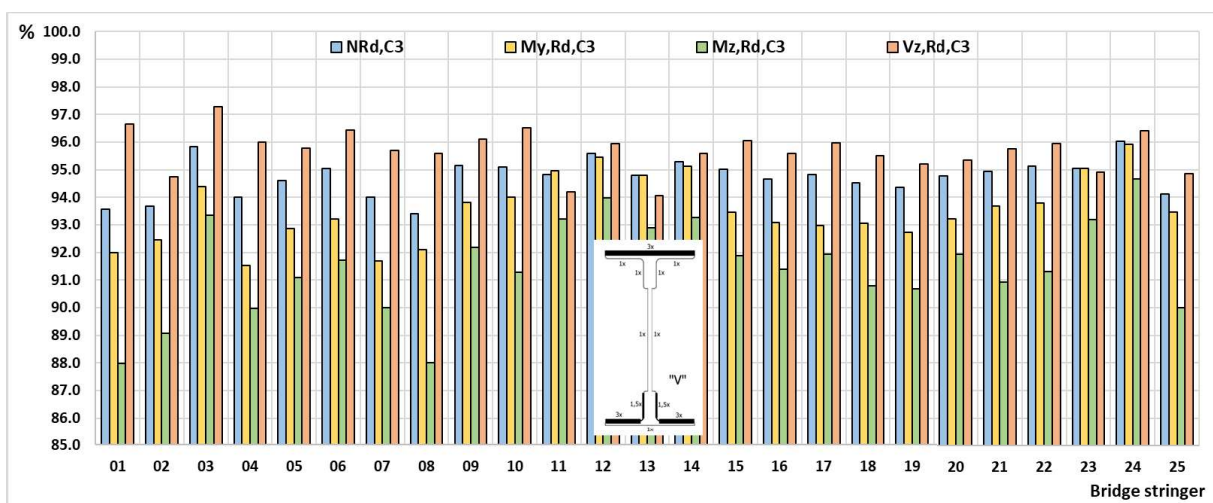
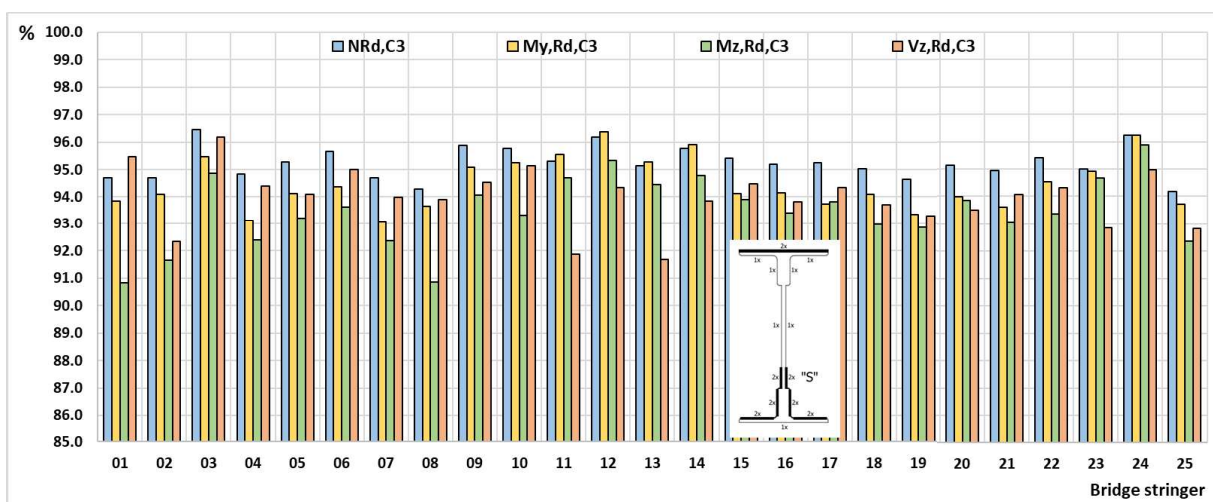
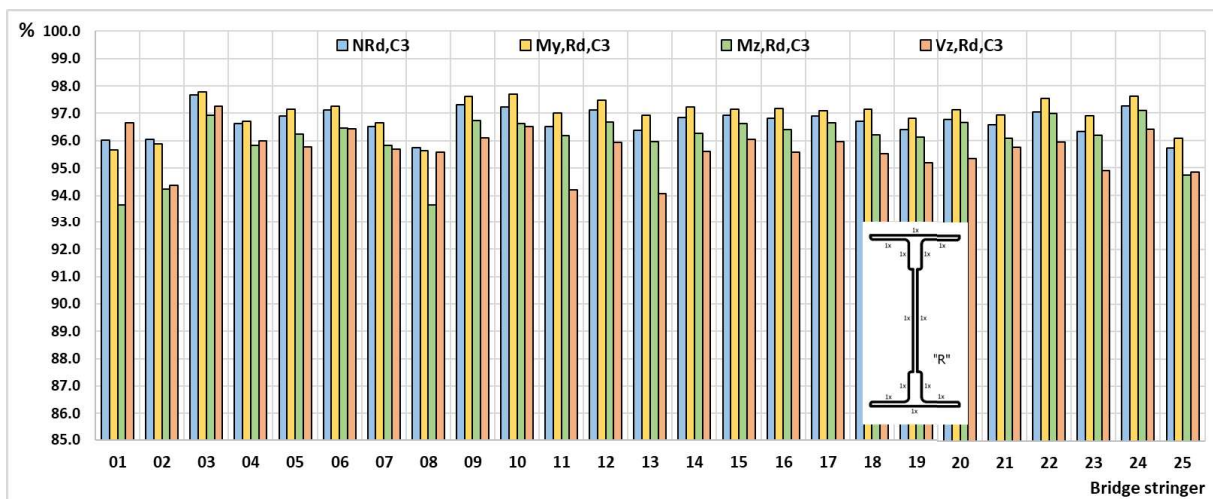
zložky odolnosti prierezu v ľubovoľnom čase a pre takmer akýkoľvek korózný model. Navyše, vyvinutý simulačný postup je schopný pre tieto tri typy nitovaných prierezov generovať vplyv korózných strát na osovú, ohybovú a šmykovú únosnosť prierezu v ľubovoľnom čase pre tri rôzne varianty rozdelenia strát koróziou po priereze. Uvažovali sa teda rôzne rýchlosti korózie po priereze vyobrazené na obrázku 5 vychádzajúce z pozorovaní na reálnych konštrukciách [8,9]. Ide o typy ktoré sú v ďalej označené ako:

- „R“ – rovnomerná korózia, kedy všetky povrchy prierezu korodujú rovnako rýchlo;
- „V“ – korózia, pri ktorej vrchné vodorovné plochy, teda vrchná plocha hornej pásnice (v prípade prierezu A je to vrchná plocha horných krčných uholníkov) a vrchné plochy dolných krčných uholníkov korodujú 3x rýchlejšie ako ostatné časti prierezu, avšak korózia zvislých častí dolných krčných uholníkov sa uvažuje akcelarovaná 1,5 násobne;
- „S“ – vrchná plocha hornej pásnice (v prípade prierezu A je to vrchná plocha horných krčných uholníkov), plochy dolných krčných uholníkov a časť steny nad nimi (1/5 výšky steny) korodujú 2x rýchlejšie ako ostatné časti prierezu.



Obr. 5 Typu rozmiestnenie korózie/korózne rýchlosti po priereze

Sú spracované dáta pre rôzne korózne modely opísané v [10-13]. V prezentovanom článku však pre názornosť uvádzame výsledok štúdie pre koróznú rýchlosť prevzatú z definície korózneho prostredia C3 podľa EN 1993. Toto prostredie pomerne dobre vystihuje lokácie železničných ocelových mostov nad vodnými tokmi s hustým porastom v okolí, v mestskom znečistenom prostredí, avšak bez výrazného vplyvu posypových solí z prípadných okolitých cestných komunikácií [14,15]. Grafy na obrázkoch 6 až 8 zobrazujú percentuálny zostatok zložiek odolnosti prierezu od troch rôznych typov usporiadania korózneho napadnutia. Nakoľko sa predpokladá, že dôjde k obnove systému PKO na starých mostoch maximálne po 20 rokoch od prvých príznakov korózie, nižšie zobrazené výsledky tak predstavujú percentuálne hodnoty príslušných zložiek odolnosti prierezov pozdĺžnikov po 20 ročnej eksploatacii (po 20 rokoch pôsobenia korózie). Zobrazené sú už návrhové hodnoty získané 5000 simulácií v každom type hrúbok. Typ korózie „V“ sa javí ako najhorší z pohľadu odolnosti prierezu vo vodorovnom ohybe M_z , kedy moment odolnosti klesá na úroveň 88 až 93% z pôvodnej koróziou neovplyvnenej hodnoty. Z pohľadu dominantného zvislého ohybu M_z a osovej sily N sú alternatívy korózie „S“ a „V“ veľmi podobné. Kým u typu „V“ nadobúdala pokles hodnôt v osovej odolnosti hodnôt 4-7 % a v ohybovej odolnosti M_y , 3-6%, tak v prípade korózie typu „S“ to bolo v opačnom garde a síce, osová odolnosť klesala menej na úroveň 93-97%, zatiaľ čo ohybová odolnosť zmenšila svoju hodnotu na 92-95%.



Pri rovnomerne rozdelenej korózii po priereze ("R") je redukcia v zložkách odolnosti najnižšia a oveľa rovnomennejšia. V prípade zložiek N_{Rd} a $V_{z,Rd}$ dostávame prakticky vždy o cca 1% vyššie odolnosti než u typu korózie "V". Ostatné zložky odolnosti sa pohybujú v hodnotách o 1% až 3% vyšších než je typ korózie "V".

Z uvedeného je zrejmé, že typ rozmiestenia korózie zohráva pri posúdení zaťažiteľnosti dôležitú úlohu, [16]. Nakoľko percentný pokles v odolnosti môže znamenať zníženie zaťažiteľnosti pod úroveň požadovanej prechodnosti železničných vozidiel danej trate [9,17]. Aj pri cestných mostoch môže nastať pokles aktuálnej zaťažiteľnosti a tým skomplikovanie ťažkej dopravy.

4 PRÍKLAD POKLESU CELKOVEJ ODOLNOSTI PRIEREZU

Samozrejme v reálnom prepočte existujúceho mosta je prvok namáhaný kombinovaným namáhaním, nielen osovou silou alebo zvislým momentom. Predstavíme si preto výsledky simulácií, ako by vyzeral dopad korózie v prípade prierezu namáhaného na kombinované namáhanie, konkrétne namáhanie osovou silou a dvojosovým ohybom, ktoré najčastejšie rozhoduje o dimenziách pozdĺžnikov. Teda uvažovali sme overenie v tvare (1).

$$\eta = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (1)$$

Vzorec pre stupeň využitia η (2) je možné zjednodušiť a v limitne hodnote pre hľadanú hodnotu zaťažiteľnosti upraviť na tvar (2).

$$\eta = \eta_N + \eta_{My} + \eta_{Mz} = 1 \quad (2)$$

Pretože nie je známe zaťaženie, nie je tak možné presne stanoviť čiastkové stupne využitia prierezu η_N , η_{My} a η_{Mz} . Preto, na základe skúseností z prepočtov mostov a dostupnej literatúry [8,18,19] boli zvolené hodnoty využitia prierezu jednotlivými zložkami namáhania v nasledovných medziach:

$$\begin{aligned} \eta_N &= 0,05 - 0,25 \quad \dots \text{ stupeň využitia prierezu osovou silou} \\ \eta_{My} &= 0,30 - 0,90 \quad \dots \text{ stupeň využitia prierezu v ohybe k osi y} \\ \eta_{Mz} &= 0,05 - 0,50 \quad \dots \text{ stupeň využitia prierezu v ohybe k osi z} \end{aligned}$$

Za predpokladu, ak by sa nemenili zložky zaťaženia, môžeme potom vykonať výpočet pre krajné hodnoty využitia prierezu jednotlivými zložkami namáhania. Ako príklad výpočtu uvádzame prierez pozdĺžnika č. 08 (pozri tabuľku 1). Časové úbytky odolnosti prierezu boli odčítané uvažované pre typ oslabenia typu „V“ a 20 ročný interval pôsobenia korózie. Uvádzame pri tomto type pozdĺžnika výsledky pre prostredie C4. Hraničné výsledky takéhoto výpočtu udáva tabuľka 2, z ktorej sú zrejmé nárasty využitia uvažovaného prierezu s postupujúcou koróziou pri rôznych konšteláciách namáhania. Predpoklad prekročenia odolnosti tohto pozdĺžnika (prierez č. 08 v tabuľke 1) po 20 rokoch exploatácie v prostredí C4 pri korózii rozmiestnenej po obvode prierezu typu "V" v zmysle obrázku 5, je možné predpokladať v rozmedzí okolo 15-19%. Je zjavné, že toto už je hodnota, ktorá môže byť užitočným vodíkom v rozhodovacom procese a to dokonca aj bez znalosti skutočného namáhania.

Tab. 2 Súčiniteľ využitia prierezu po 20 rokoch (pros. C4, korózia „V“, pozdĺžnik č. 08)

η_N	η_{My}	η_{Mz}	η	$\eta_{20rokov}$
0,25	0,90	0,05	1,00	1,145
0,05	0,90	0,05	1,00	1,150
0,25	0,30	0,45	1,00	1,182
0,05	0,45	0,50	1,00	1,192
0,25	0,25	0,50	1,00	1,187
0,02	0,30	0,50	1,00	1,188

5 ZÁVER

Na záver možno konštatovať, že výsledky naznačujú, že pri prierezoch ovplyvnených nízkou úrovňou rovnomernej korózie môžu kladné výrobné tolerancie valcovaných profilov - najmä pri historických prvkoch - čiastočne kompenzovať úbytky hrúbky spôsobené koróziou. Vo väčšine analyzovaných prípadov skutočná odolnosť prevyšovala (aspoň mierne) menovité hodnoty odvodené z pôvodnej projektovej dokumentácie.

Parametrická štúdia ďalej potvrdila, že rozloženie korózie je jedným z kľúčových faktorov ovplyvňujúcich odolnosť prierezu. Nerovnomerná korózia, najmä ak je sústredená v najviac namáhaných oblastiach, ako sú horné pásnice alebo dolné krčné uholníky, vedie k výraznejšiemu zníženiu ohybovej odolnosti, pričom ako najkritickejší bol identifikovaný typ korózie „V“. Naopak, rovnomerne rozložená korózia spôsobuje menšie a konzistentnejšie poklesy. Tieto zistenia zdôrazňujú význam uvažovania realistických korózných scenárov, keďže zjednodušené predpoklady rovnomernej korózie môžu viesť k nepresným posúdeniam konštrukcie.

Komplexná štúdia, ktorej časť je prezentovaná v tomto článku, potvrdila, že vyvinutý stochastický simulačný rámec je účinným nástrojom na zachytenie variability geometrických parametrov a účinkov korózie. Jeho flexibilita umožňuje zohľadniť ľubovoľné, časovo závislé modely korózie a poskytuje realistický odhad odolnosti pozdĺžnikov v čase. Pre získanie relevantných výstupov je však nevyhnutné použiť vstupné údaje získané z meraní in situ. V procese rozhodovania o tom, ktoré prvky je potrebné podrobiť podrobným meraniam a analýzám a ktoré sú ovplyvnené iba zanedbateľnou miernou koróziou bez vplyvu na únosnosť, je možné využiť moderné nástroje vrátane umelej inteligencie [20].

POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla s podporou Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaM SR a SAV (VEGA) v rámci projektu 1/0472/24.

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Interreg Slovensko – Česko 2021 - 2027 pre projekt: Environmentálne efektívne stavebníctvo ako nástroj pre zmiernenie klimatickej zmeny v cezhraničnom regióne, 403201DPP8, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.