

Analýza spolehlivosti mostů z patinujících ocelí

1 Autoři

doc. Ing. Miroslav Sýkora, Ph.D., ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, 721 709 387, miroslav.sykora@cvut.cz

Ing. Kateřina Kreislová, Ph.D., SVÚOM Praha, 775 179 552, kreislova@svuom.cz

doc. Ing. Jana Marková, Ph.D., ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, 605 584 929, jana.markova@cvut.cz

Ing. Jan Mlčoch, Ph.D., ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, 739 159 581, jan.mlcoch@cvut.cz

2 Abstrakt

Koroze patinujících ocelí ve venkovních podmínkách je sledována od prvních aplikací těchto ocelí ve stavebnictví v 60. letech 20. století. Mění se podmínky životního prostředí jako klesající koncentrace SO_2 a změny teploty a relativní vlhkosti vzduchu ovlivňují vznik a rozvoj ochranné vrstvy korozních produktů na povrchu těchto ocelí. V příspěvku jsou porovnány dlouhodobé korozní rychlosti patinujících ocelí podle ČSN EN ISO 9224 s naměřenými rychlostmi pro různá prostředí v ČR i zahraničí se zaměřením na prostředí se zvýšenými koncentracemi chloridů z posypových solí. Uvažované modely korozní rychlosti poskytují odhady v širokém rozmezí a měření in-situ mohou výrazně zlepšit předpovědi korozních úbytků. Spolehlivost a životnost mostů z patinujících ocelí je při dobře vyvinuté ochranné vrstvě ovlivněna korozi nevýznamně. V kritických detailech však může být ochranná vrstva patiny nedostatečně účinná například v důsledku zatékání.

3 Úvod

V ČR jsou provozovány silniční i železniční mosty z patinujících ocelí a několik lávek, další jsou pak v projektové přípravě. Jsou užívány bez povrchové úpravy (základní výhoda těchto materiálů), takže sledování a vyhodnocení stavu patiny je klíčové pro predikci životnosti a zajištění spolehlivosti mostní konstrukce. Cílem příspěvku je analyzovat spolehlivost vybraných průřezů nosných mostních prvků s ohledem na vliv rozvíjející se koroze. Korozní model zohledňuje nová měření získaná autory v rámci projektu TA ČR CK03000125 a porovnává je s dostupnými ISO modely a s databází měření na konstrukcích z patinujících ocelí.

4 Pravděpodobnostní model pro korozní rychlost patinujících ocelí

Patinující oceli obsahují malé množství legujících prvků (Cr, Cu, Ni, P a Mo), které běžně nepřesahují 2 %. Některé nově vyvíjené patinující oceli mají obsah legujících prvků vyšší. První patinující ocel byla patentována v r. 1953 v USA pod označením CORTEN. V Československu byla v 70. letech vyvinuta nízkolegovaná ocel s obdobnými vlastnostmi pod označením Atmofix.

Model pro korozní rychlosti patinujících ocelí může vycházet z modelu pro uhlíkovou ocel podle ČSN EN ISO 9223 a 9224 (dále zjednodušeně „ISO 9223“ a „ISO 9224“) a zároveň zohledňovat specifické vlastnosti slitin pro patinující oceli, odlišné chemické složení a povrchové vlastnosti. Model umožňuje zohlednit korozní agresivitu prostředí a účinky změn prostředí během životnosti mostních konstrukcí.

ISO 9224 uvádí pro různé kategorie korozní agresivity prostředí rychlosti koroze kovů a slitin vystavených atmosférické expozici v závislosti na čase. Rychlost koroze běžně klesá s dobou expozice, t_{exp} , a to v důsledku hromadění korozních produktů na povrchu, které zpomalují postup koroze. Celkový korozní úbytek D (rovnoměrná koroze) lze pravděpodobnostně modelovat pomocí vztahu:

$$D = \theta \times r_{\text{corr}} \times t_{\text{exp}}^b \quad (1)$$

kde θ označuje modelovou nejistotu, t_{exp} se uvádí v letech, r_{corr} označuje rychlost koroze v prvním roce expozice a b je exponent časové závislosti specifický pro kombinaci kov-prostředí.

4.1 Modelová nejistota

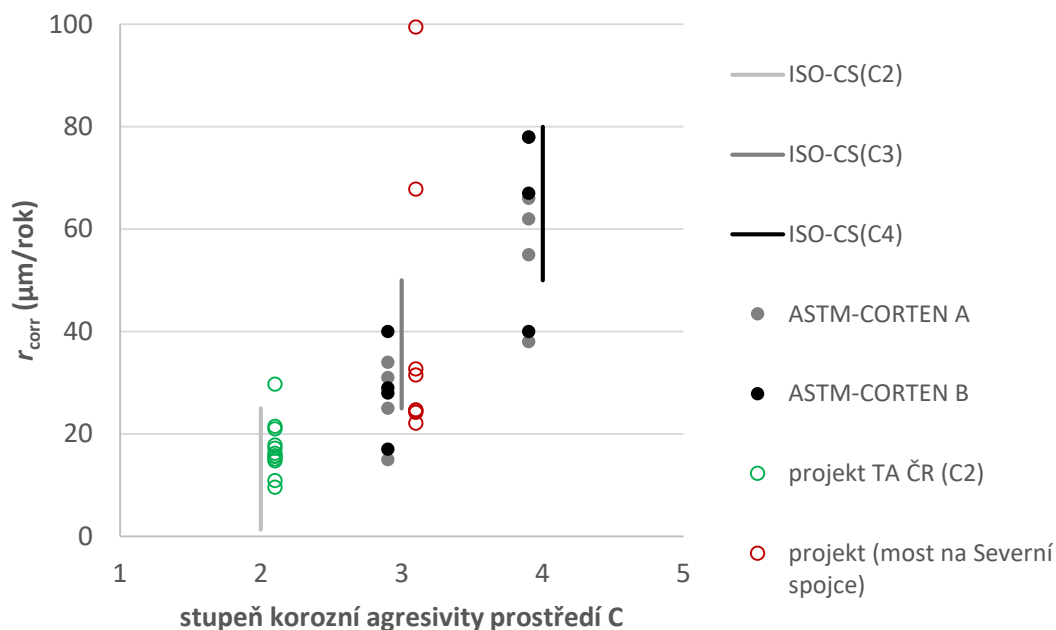
Podle příručky JCSS pro pravděpodobnostní modelování [1] lze modelovou nejistotu θ uvažovat jako náhodnou veličinu popisující například:

- vlivy zjednodušené klasifikace stupňů agresivity prostředí,
- zanedbání vedlejších vlivů působících na rozvoj koroze, jako jsou teplota, vlhkost nebo solární záření,
- zjednodušení matematického modelu pro rozvoj koroze (dvou a více parametrické modely nebo typy regresního vztahu) atd.

Obvykle se uvažuje, že modelovou nejistotu lze odhadnout z multiplikativního vztahu $D_{\text{skutečný}} \approx \theta D_{\text{model}}$, kde $D_{\text{skutečný}}$ značí skutečný (měřený) celkový korozní úbytek a D_{model} je celkový korozní úbytek stanovený modelem, tj. $D_{\text{model}} = r_{\text{corr}} \times t_{\text{exp}}^b$. Statistické charakteristiky modelové nejistoty θ lze odhadnout porovnáním měření s predikcemi korozního modelu. Předchozí studie (většina měření pro CORTEN A, stupně korozní agresivity prostředí C2 až C5) naznačují, že se hodnota variačního koeficientu pro modelovou nejistotu V_θ pohybuje okolo 10 % (a je tedy nepatrně nižší hodnota než pro uhlíkovou ocel 12,5 %); viz tab. 1.

Tab. 1 – Indikativní statistické charakteristiky základních veličin pro stanovení korozního úbytku D pro různé stupně agresivity prostředí a různé typy patinujících ocelí (*hodnoty pro uhlíkovou ocel vyznačeny kurzívou*)

Stupeň korozní agresivity prostředí	Modelová nejistota θ		Korozní rychlost r_{corr}		Exponent b	
	Průměr μ	variační koeficient V	μ ($\mu\text{m/rok}$)	V	μ	V
C2	1	10 % (12,5 %)	20	27,5 %	CORTEN A 0,32	25 %
C3			35	15 %	Atmofix 52A 0,39	35 %
C4			65		CORTEN B 0,45	50 %
C5			100		<i>uhlíková ocel 0,56</i>	



Obr. 1: Rychlost koroze v prvním roce, r_{corr} v $\mu\text{m/rok}$ – rozsahy pro uhlíkové oceli podle ISO 9223, měření uvedená v ASTM a měření v projektu pro stupeň korozní agresivity prostředí C2 a na mostě na Severní spojnici

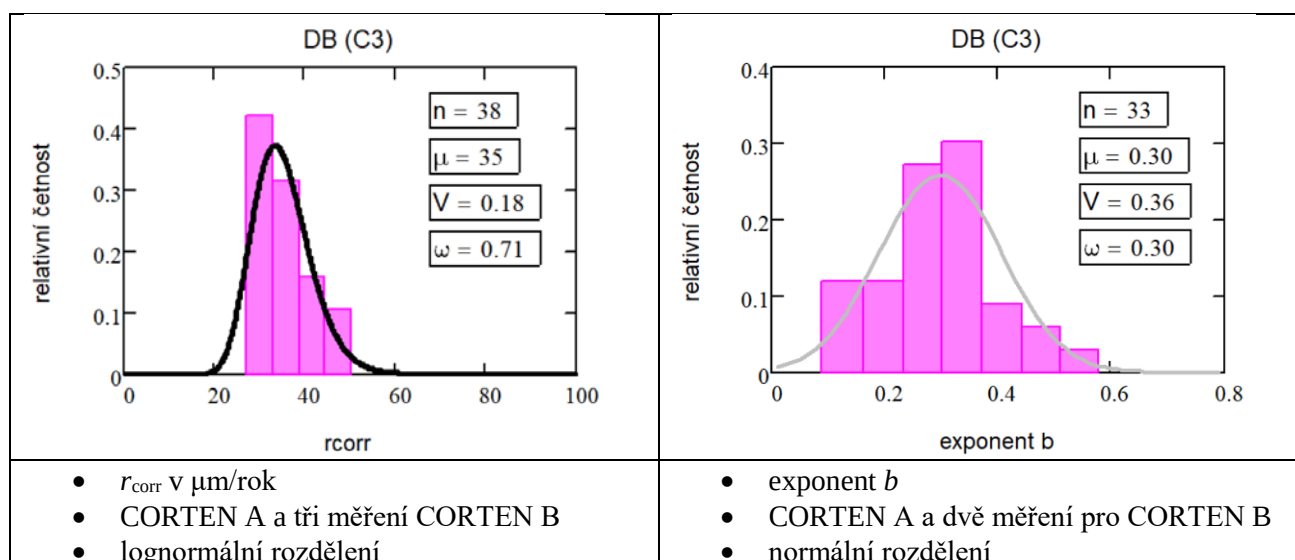
4.2 Rychlost koroze v prvním roce expozice

Počáteční rychlost koroze r_{corr} lze odhadnout podle ISO 9223 pro různé kovové konstrukční materiály a korozní agresivitu prostředí. Obr. 1 ukazuje dostupné informace o r_{corr} :

- rozsahy pro uhlíkové oceli podle ISO 9223,
- měření uvedená v ASTM G101-04:2015 pro atmosférickou korozi patinujících ocelí („ASTM“) a
- měření v projektu pro patinující oceli v prostředí C2 a na dálničním mostě na Severní spojnici, Ostrava, pro Atmofix 52A.

Z obr. 1 vyplývá, že rozsahy r_{corr} uvedené v ISO 9223 pro uhlíkové oceli dobře odpovídají r_{corr} pro patinující oceli. Typy prostředí uvažované v ASTM a v mezinárodních studiích a stupně korozní agresivity prostředí podle ISO 9223 si dobře odpovídají – venkovské (rural) v ASTM odpovídá C3 v ISO 9223 a městské (urban) odpovídá C4. Prostředí mostu na Severní spojnici zřejmě odpovídá prostředí C3. Nejsou také pozorovány významné rozdíly v r_{corr} mezi CORTEN A a B a Atmofix 52A.

V rámci projektu byla provedena detailní analýza a byly stanoveny statistické charakteristiky r_{corr} ; viz tab. 1 a obr. 2. Ukazuje se, že zatímco průměrná hodnota $\mu_{r_{\text{corr}}}$ roste s agresivitou prostředí, variační koeficient $V_{r_{\text{corr}}}$ je konstantní s výjimkou prostředí C2. Vyšší variabilita korozních rychlostí pro toto prostředí může být důsledkem nesprávné klasifikace prostředí v databázi. Vzhledem k zanedbatelnému vlivu prostředí C2 na spolehlivost mostů se tento výsledek dále podrobněji neanalyzuje. Podrobná analýza dat dále naznačuje, že počáteční korozní rychlosti r_{corr} nezávisí významně na typu patinující oceli. Korozní úbytky r_{corr} závisí také na orientaci exponované plochy. Předběžné výsledky měření naznačují přibližně dvojnásobné korozní úbytky především pro horní povrch spodní pásnice a dolní povrch horní pásnice.



Obr. 2: Histogram a statistické charakteristiky r_{corr} a exponentu b pro prostředí C3 z databáze předchozích studií (n – rozsah souboru, μ – průměr, V – variační koeficient, ω – šikmost)

4.3 Časový vývoj koroze

Exponent b ve vztahu (1) zohledňuje časový průběh rozvoje koroze a může být odhadnut z chemického složení materiálu (ISO 9224) nebo může být stanoven na základě vyhodnocení dlouhodobých expozic. Obr. 2 ukazuje histogram a statistické charakteristiky exponentu b z databáze předchozích studií pro stupeň korozní agresivity prostředí C3. Z dostupných měření lze učinit následující předběžné závěry o hodnotách exponentu b :

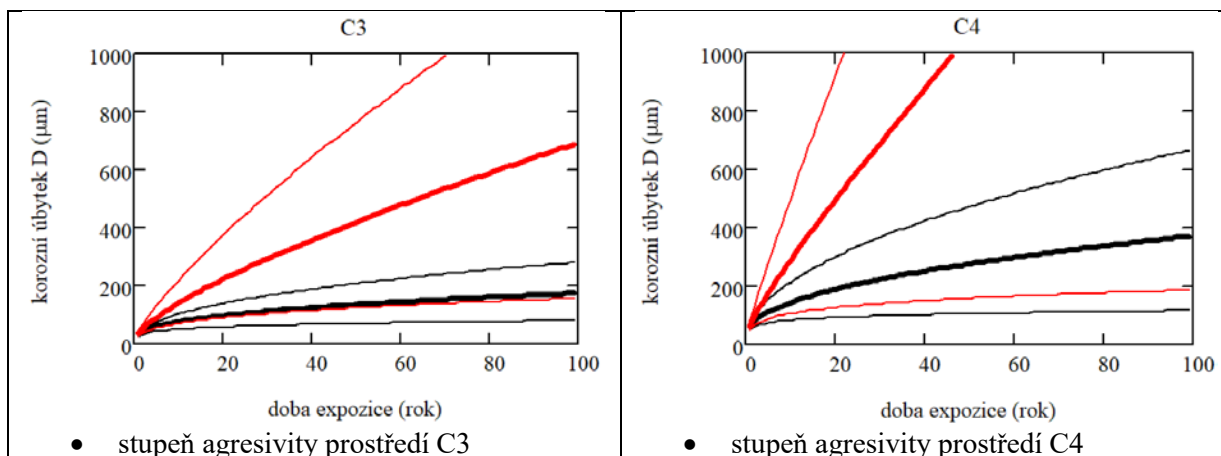
- Průměrné hodnoty μ_b jsou téměř nezávislé na stupni agresivity prostředí, hodnoty stanovené z databáze s převažujícími měřeními pro CORTEN A odpovídají hodnotám podle ISO 9224 pro tuto ocel.
- Variační koeficient V_b je vysoký (25-50 %) a roste se stupněm agresivity prostředí. Odhad exponentu pro konkrétní most v prostředích C3 až C5 může být výrazně zpřesněn měřeními.

Indikativní statistické charakteristiky exponentu b jsou pro různé stupně agresivity prostředí uvedeny v tab. 1. Odhady je možné využít pouze pro předběžná hodnocení, u detailních rozborů může být potřebné hodnotu exponentu aktualizovat pro konkrétní podmínky posuzované konstrukce. Porovnání s měřeními v databázi předchozích studií naznačuje, že postup podle ISO 9224 (zohledňující obsah C, S a legující prvky – Cr, Cu, Ni, P a Mo) poskytuje dobrý odhad průměru μ_b .

4.4 Pravděpodobnostní modelování korozních úbytků

Základní veličiny ve vztahu (1) se uvažují jako statisticky nezávislé. Tab. 1 poskytuje indikativní statistické charakteristiky základních veličin pro stanovení celkového korozního úbytku D pro různé stupně agresivity prostředí a různé typy patinujících ocelí. Pro θ a r_{corr} se uvažuje dvouparametrické lognormální rozdělení a pro exponent b normální rozdělení. Obr. 3 ukazuje nejistoty v rovnoměrném korozním úbytku D , je znázorněn průměr a hranice 75 % konfidenčního intervalu v závislosti na době expozice t_{exp} pro stupně agresivity prostředí C3 až C4, CORTEN A a uhlíkovou ocel. Z obrázku vyplývá, že nejistoty v odhadu korozních úbytků vzrůstají s rostoucím stupněm agresivity prostředí i s klesající odolností ocelí vůči atmosférické korozi. Z pravděpodobnostní analýzy dále vyplývá, že:

- uhlíková ocel vykazuje vyšší korozní úbytky než všechny analyzované patinující oceli, nejnižší korozní úbytky jsou predikovány pro CORTEN A,
- z patinujících ocelí jsou nejvyšší korozní úbytky predikovány pro CORTEN B, u kterého korozní úbytky při expozici v prostředí C4 přibližně odpovídají úbytkům uhlíkové oceli v prostředí C3,
- u CORTEN A není významný rozdíl mezi průměrnými korozními úbytky v prostředích C2 a C3 (s ustálenou korozní rychlostí $\leq 2 \mu\text{m/rok}$), v prostředí C4 vzrůstá korozní rychlost na $\approx 4 \mu\text{m/rok}$ a v prostředí C5 na $\approx 6 \mu\text{m/rok}$,
- u uhlíkové oceli je variační koeficient korozního úbytku V_D vyšší než u všech analyzovaných patinujících ocelí, kde nejnižší variační koeficient korozního úbytku V_D je predikován pro CORTEN A,
- u všech typů ocelí roste variační koeficient V_D se stupněm agresivity prostředí,
- pro dlouhodobé expozice, $t_{\text{exp}} \geq 20$ let, je například u CORTEN A variační koeficient V_D velmi vysoký - vyšší než 40 % - předpokládá se, že měření na konkrétním mostu s jednoznačně definovanými účinky prostředí tyto nejistoty významně sníží.



Obr. 3: Rovnoměrný korozní úbytek D v μm v závislosti na době expozice pro stupně agresivity prostředí C3 a C4 (průměr tučně, 75% konfidenční interval tenké; CORTEN A černě, uhlíková ocel červeně)

Pravděpodobnostní citlivostní analýza pro delší expozice ($t_{\text{exp}} > 20$ let) ukazuje:

- v prostředích C3 až C5 jsou rozhodující nejistoty v exponentu b , význam nejistot v počáteční korozní rychlosti r_{corr} je střední a význam nejistot v θ je spíše menší,
- pouze v prostředí C2 je vliv nejistot v exponentu b a v počáteční korozní rychlosti r_{corr} porovnatelný,
- vliv nejistot v exponentu b dále vzrůstá s klesající odolností materiálu vůči korozi.

Předběžné výsledky dále naznačují, že rozvoj koroze je často ovlivněn:

- orientací exponované plochy (s nepříznivými hodnotami pro východní a severní orientaci),
- lokálními podmínkami v rámci průřezu – dolní pásnice a spodní části stěn korodují více než horní části stěn a horní pásnice,
- použitím rozmrazovacích látek a souvisejícími zvýšenými koncentracemi chloridů.

Například TP 197 [2] uvádějí pro městskou atmosféru a nejexponovanější místa na mostech ustálené korozní rychlosti (přibližně po sedmi letech) 75 - 100 $\mu\text{m}/\text{rok}$, v nejnepříznivějších případech až 125 - 150 $\mu\text{m}/\text{rok}$. Tyto indikativní hodnoty výrazně překračují maximální hodnoty v databázi předchozích studií (s maximem 30 $\mu\text{m}/\text{rok}$) a naznačují významný vliv lokálních podmínek (zatékání nebo chloridy). Tyto vlivy jsou předmětem dalšího výzkumu.

5 Předběžná analýza spolehlivosti korodujících průřezů z patinující oceli

Vzhledem k významným nejistotám by vliv koroze na spolehlivost konstrukce měl být analyzován pomocí pravděpodobnostní analýzy [1], [3], [4], kdy se zohlední náhodnost účinků zatížení a odolnosti. V rámci prvních studií se provedla zjednodušená analýza spolehlivosti založená na polopravděpodobnostním přístupu, viz například ČSN EN 1990 a ČSN ISO 2394. Návrhová hodnota odolnosti, R_d , zohledňuje variabilitu pevnosti materiálu, geometrických veličin a nejistotu modelu odolnosti [4]:

$$R_d = \mu_R \exp(-\alpha_R \beta V_R) \quad (2)$$

kde μ_R a V_R označují střední hodnotu odolnosti a variační koeficient odolnosti; $\alpha_R = 0,8$ je součinitel citlivosti pro odolnost a $\beta = 3,8$ je směrná hodnota indexu spolehlivosti podle ČSN EN 1990 a ČSN ISO 13822 pro referenční dobu 50 let, mezní stavy únosnosti a střední následky poruchy. Podle ČSN 73 0038 pro hodnocení existujících konstrukcí se hodnota V_R pro ocelové konstrukce nezasazené korozi pohybuje v intervalu 3,3-8,7 %, jako reprezentativní hodnota se v této předběžné studii uvažuje 5 %.

Dále se předpokládá, že návrhová odolnost nezkorodovaného průřezu je rovna návrhovému účinku zatížení, E_d , který se v průběhu času nemění. Pro prvky zasažené korozi lze tedy rovnici (2) rozšířit jako:

$$R_d = \mu_R \exp(-\alpha_R \beta V_R) = E_d = R_d'(t_{\text{exp}}) = \mu_R \delta(t_{\text{exp}}) \exp(-\alpha_R \beta' V_R') \quad (3)$$

kde $\delta(t_{\text{exp}})$ je degradační funkce a symbol „‘“ označuje aktualizovanou hodnotu pro zkorodovanou konstrukci. Dále se uvažuje nosník I-průřezu namáhaný na tah, ohyb nebo smyk. Degradaci funkce je potřebné specifikovat zvlášť pro každý uvažovaný způsob poruchy. Následující vztahy uvádějí příklady pro rovnoměrnou korozi působící na všech površích (bez uvážení vzájemných interakcí těchto způsobů koroze):

$$\begin{aligned} \text{tah:} \quad \delta(t_{\text{exp}}) &= \frac{A_{\text{deg}}(t_{\text{exp}})}{A} \\ \text{oheb:} \quad \delta(t_{\text{exp}}) &= \frac{W_{\text{deg}}(t_{\text{exp}})}{W} \\ \text{smyk:} \quad \delta(t_{\text{exp}}) &= \frac{A_{\text{vz,deg}}(t_{\text{exp}})}{A_{\text{vz}}} \end{aligned} \quad (4)$$

kde $A_{\text{deg}}(t_{\text{exp}})$ označuje plochu profilu zmenšenou vlivem koroze pro dobu expozice t_{exp} , A je plocha nezkorodovaného profilu, $W_{\text{deg}}(t_{\text{exp}})$ průřezový modul zmenšený vlivem koroze, W původní průřezový modul,

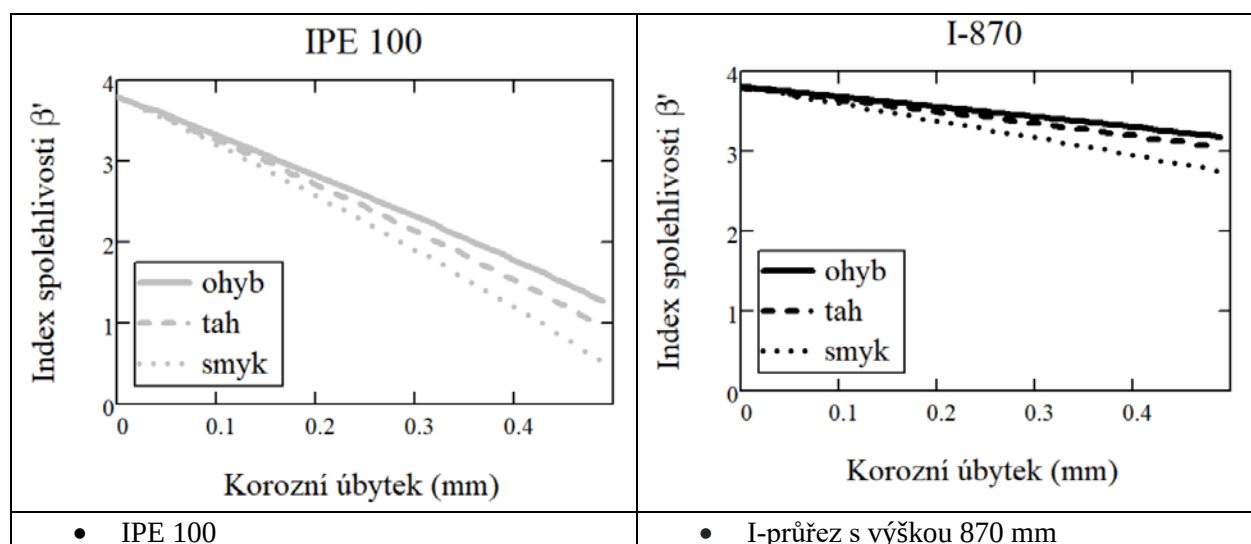
$A_{vz,deg}(t_{exp})$ označuje účinnou plochu, která přenáší smyk ve směru osy z zmenšenou vlivem koroze a A_{vz} je původní plocha.

V předběžné analýze se zanedbává vliv důlkové koroze. Pro známou deградаční funkci δ lze index spolehlivosti pro konstrukci zasaženou β' korozí získat z rovnice (3):

$$\beta' = [\ln \delta(t_{exp}) + \alpha_R \beta V_R] / (\alpha_R V_R') \quad (5)$$

Variační součinitel odolnosti V_R zkorodované konstrukce by měl zohledňovat také nejistotu korozního úbytku. S ohledem na výše uvedené výsledky se očekává, že nejistoty korozního úbytku D mohou být vzhledem k nejistotě v odolnosti zanedbatelné pro velké profily (například hlavní mostní nosníky s velkou tloušťkou stěny a pásnici) a naopak významné pro malé profily (vedlejší nosné prvky, prvky příhradových mostů). V následujícím příkladu se analyzují I-průřezy s výškou $h = 100$ až 870 mm (IPE 100, IPE 500 a svařovaný I-profil s výškou 870 mm – podélník železničního mostu, dále „I-870“). Uvažuje se $V_R' \approx 10\%$ se zohledněním nejistot v celkovém korozním úbytku D .

Obr. 4 ukazuje index spolehlivosti β' v závislosti na průměrném rovnoměrném korozním úbytku D – porovnání pro malý průřez (IPE 100 – vedlejší nosné prvky, prvky v příhradových konstrukcích) a vysoký průřez (I-870 – hlavní nosné prvky). Uvažuje se D v intervalu 0-0,5 mm. Z obrázku je patrné, že spolehlivost malého průřezu je mnohem výrazněji ovlivněna korozí, a to pro všechny sledované způsoby porušení – index spolehlivosti může klesnout až k velmi nízkým hodnotám, $\beta' \approx 1$. I u vysokého profilu může však být pokles úrovně spolehlivosti významný. Vliv koroze je především závislý na tloušťce pásnic pro ohyb ($t_{f,IPE 100} = 5,7$ mm a $t_{f,I-870} = 25$ mm) a tloušťce stěny pro smyk ($t_{w,IPE 100} = 4,1$ mm a $t_{w,I-870} = 12$ mm). K nejnepríznivějšímu poklesu dochází u smykové odolnosti.

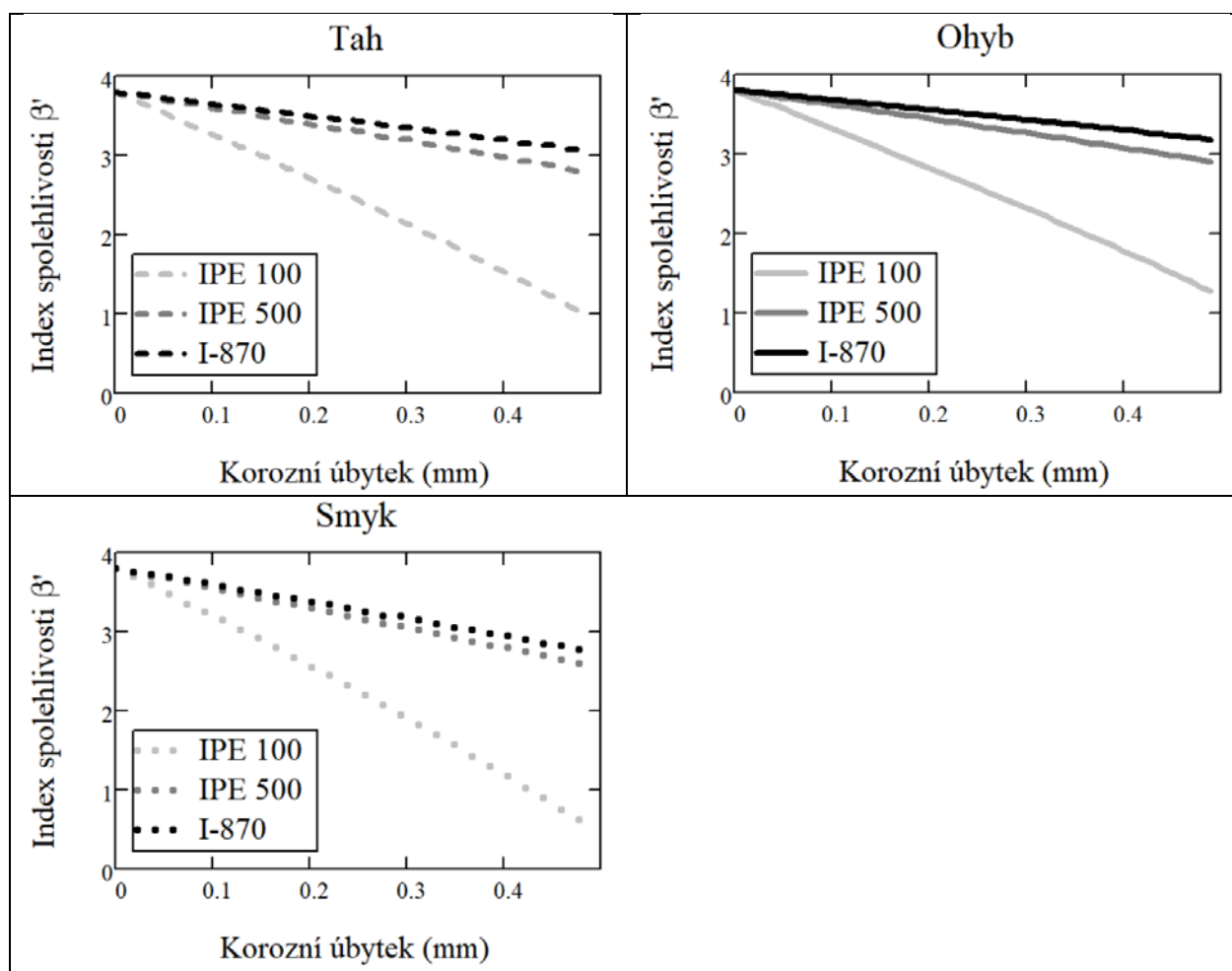


Obr. 4: Index spolehlivosti β' v závislosti na průměrném rovnoměrném korozním úbytku D (mm) pro tahovou, ohybovou a smykovou odolnost průřezu

Obr. 5 ukazuje index spolehlivosti β' v závislosti na průměrném rovnoměrném korozním úbytku D – porovnání pro tahovou, ohybovou a smykovou odolnost pro tři vybrané průřezy. Potvrzují se pozorování z obr. 4 – je patrný velmi nepříznivý vliv na IPE 100, rozdíl mezi IPE 500 a I-870 je malý.

6 Závěry

Studie naznačuje, že modely korozní rychlosti poskytují odhady korozních úbytků v širokém rozmezí. Měření na konstrukci mohou výrazně zpřesnit předpovědi korozních úbytků u patinujících ocelí. Pravděpodobnostní analýza průřezů vystavených ohybu (uprostřed rozpětí), smyku (v blízkosti podpěr) nebo tahu ukazuje, že spolehlivost a životnost mostů z patinujících ocelí není při dobře vyvinuté ochranné vrstvě významně ovlivněna.



Obr. 5: Index spolehlivosti β' v závislosti na průměrném rovnoměrném korozním úbytku D (mm) pro analyzovaný způsob porušení – porovnání pro IPE 100, IPE 500 a svařovaný I-průřez s výškou 870 mm

V kritických detailech se však spolehlivost může výrazně snížit. Provedené rozbory ukazují, že spolehlivost malých průřezů je mnohem výrazněji ovlivněna korozními úbytky a index spolehlivosti může klesnout až k velmi nízkým hodnotám. I u vysokého profilu může však být pokles úrovně spolehlivosti významný. Vliv koroze je především závislý na tloušťce pásnic a tloušťce stěny, a to podle způsobu namáhání. K nejnepříznivějšímu poklesu dochází u smykové odolnosti.

Předložená studie je součástí výzkumného projektu zaměřeného na vývoj nedestruktivních metod průzkumu a hodnocení spolehlivosti mostů z patinující oceli. Výstupy projektu pomohou zabránit koroznímu poškození konstrukčních prvků a jejich spojů, a tím snížit celkové náklady na životní cyklus těchto mostů. Získané poznatky a vyhodnocená data poskytnou podklady pro revizi TP 197 „Mosty a konstrukce pozemních komunikací z patinujících ocelí“ a tvorbu norem připravovaných technickou komisí ISO/TC 156/WG 4 „Atmosférické korozní zkoušky a klasifikace korozní agresivity atmosféry“.

7 Poděkování

Príspevek vznikl v rámci řešení projektu CK03000125 podporovaného Technologickou agenturou ČR.

8 Literatura

- [1] JCSS (2023). JCSS Probabilistic Model Code, < jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code >
- [2] Technické podmínky TP 197 Mosty a konstrukce pozemních komunikací z patinujících ocelí (2008). Praha: Ministerstvo dopravy ČR
- [3] Sýkora, M., Kreislová, K., & Pokorný, P. (2020). Corrosion of historic grey cast irons: indicative rates, significance, and protection. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 8(2), 162-174
- [4] Sýkora, M., Holický, M., Marková, J., & Šenberger, T. (2016). Probabilistic Reliability Assessment of Existing Structures: Focused on Industrial Heritage Buildings. Czech Technical University.