Program experimentálních atmosférických korozních zkoušek patinujících ocelí

Program of experimental atmospheric corrosion tests of weathering steels

Křivý V.¹, Kreislová K.², Urban V.¹, Vavrušová K.¹

¹ VŠB-TU Ostrava

² SVÚOM, s.r.o.

E-mail: vit.krivy@vsb.cz

Článek shrnuje výsledky experimentálních atmosférických korozních zkoušek patinujících ocelí. Program je navržen jako dlouhodobý projekt. Pozornost je věnována studiu korozních procesů na různých mostních konstrukčních prvcích. V rámci experimentálního programu jsou měřeny korozní úbytky a průměrné tloušťky korozních produktů. Ochranná schopnost korozních produktů je hodnocena pomocí rentgenové difrakční analýzy. V článku jsou uvedeny výsledky korozních testů po jednom roce expozice korozních vzorků. Z výsledků vyplývá, že patinující oceli jsou významně ovlivněny pozicí a umístěním exponovaného povrchu na konstrukci.

This article presents the program of experimental atmospheric corrosion test of weathering steels. This program is designed as a long-term project. Attention is paid to study of corrosion processes at different structural elements of supporting structures of bridges. Measurements of corrosion losses and average thicknesses of corrosion products are carried out within this experimental program. Protective ability of corrosion products is evaluated using X-ray diffraction analysis. The article presents results of corrosion tests after one year of exposure of corrosion specimens. It results from the tests that corrosion losses of weathering steels are significantly conditioned by position and location of exposed surface within the structure.

ÚVOD

Oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi, tzv. patinující oceli, jsou nízkolegované oceli, které obsahují malé množství chromu, mědi, niklu, fosforu a dalších legujících prvků. Obsah legujících prvků obvykle nepřesahuje 2 hmotnostní procenta. Důležitá je vyváženost jednotlivých legujících prvků, především kombinace mědi, fosforu a chromu. Za vhodných atmosférických podmínek se na povrchu prvku navrženého z patinující oceli vytváří ochranná vrstva korozních produktů, tzv. patina, která významně zpomaluje rychlost koroze.

Historický vývoj patinujících ocelí je podrobně popsán v [1]. Specifické korozní vlastnosti ocelí obsahujících větší množství mědi byly systematicky pozorovány již v roce 1910 [2]. První patinující ocel byla patentována v USA v roce 1933. Ocel pod obchodní značkou USS Cor-Ten byla používána hlavně k výrobě kolejových vozidel. Uplatnění našla především pro dopravní prostředky vystavené zvýšené abrazi, nejčastěji pak pro výrobu vagónů přepravujících uhlí

[3]. V pozemním stavitelství byla patinující ocel použita až v roce 1961 - architekt Eero Saarinen použil patinující ocel pro fasádní prvky správní budovy společnosti John Deere v Moline v Illinois. První mostní konstrukce z patinující oceli byly postaveny v roce 1964 v Michiganu a v New Jersey [4]. V Evropě se patinující oceli začaly využívat pro nosné stavební konstrukce od konce 60. let (obchodní značky Corten, Patinax, Coraldur, Intradur, Resista, Indaten). V České republice se patinující oceli vyráběly pod obchodní značkou Atmofix.

V současné době se patinující oceli využívají především v mostním stavitelství. Použití patinujících ocelí je v mnoha případech ekonomicky výhodné. Náklady na výrobu a montáž konstrukce jsou v porovnání s konstrukcemi chráněnými tradičními systémy protikoroze ochrany obvykle o 2 až 10 % nižší [5-7]. Hlavní ekonomickou výhodou použití patinujících ocelí je eliminace nákladů spojených s opravami či obnovou systému protikoroze ochrany. Při použití patinujících ocelí se rovněž výrazně redukuje rozsah ekologicky náročných výrobních operací souvisejících s realizací ochranných protikoroze nátěrových systémů.

Základní užitnou vlastností patinujících ocelí je jejich zvýšená korozní odolnost v atmosférických podmínkách. Rozsah publikovaných prací o korozním chování těchto materiálů v různých atmosférických podmínkách je rozsáhlý a zahrnuje různé charakteristiky korozních vrstev [8,9]. Vývoj patinujících ocelí byl vždy doprovázen prováděním rozsáhlých atmosférických korozních zkoušek [10,11]. Dlouhodobé expozice korozních vzorků byly realizovány především za účelem studia korozních procesů v závislosti na korozní agresivitě prostředí, včetně vyhodnocení konkrétních vlivů, jako je například koncentrace SO_2 či depozice chloridů [12]. Atmosférické korozní zkoušky byly rovněž realizovány za účelem vyhodnocení různého chemického složení patinujících ocelí [13].

V předkládaném článku jsou uvedeny výsledky experimentálních atmosférických korozních zkoušek prováděných na mostních konstrukcích navržených z patinujících ocelí. V rámci experimentálního programu se testují vlivy různých konstrukčních parametrů na korozní rychlosti patinujících ocelí. Sledovány jsou především následující lokální činitele ovlivňující tvorbu korozních produktů na povrchu konstrukcí:

- vliv polohy a umístění plochy na konstrukci (typické povrchy konstrukcí – horní a dolní pásnice, stěny hlavních nosníků, deska ortotropní mostovky atp.);
- vliv expozice (přímo smáčené povrchy, nepřímě ovhčované povrchy);
- vlivy plynoucí z chybného návrhu, realizace či zanedbané údržby konstrukcí (především poruchy vývoje patiny od zatékání z netěsného systému odvodnění mostů).

V rámci programu experimentálních atmosférických korozních zkoušek se sleduje také závislost mezi korozními úbytky stanovenými podle ČSN ISO 8407 a průměrnou tloušťkou korozních produktů.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Program experimentálních atmosférických korozních zkoušek byl připraven především za účelem zpřesnění predikčního modelu pro výpočet návrhové hodnoty korozních úbytků patinujících ocelí [14]. Aby bylo možno vyhodnotit konkrétní lokální činitele ovlivňující tvorbu korozních produktů na povrchu konstrukcí z patinujících ocelí, bylo potřeba instalovat korozní vzorky na dostatečný počet povrchů různých konstrukcí navržených z patinující oceli. Ke konci roku 2014 byly korozní vzorky instalovány na 10 konstrukcí, na kterých je testováno celkem 97 specifických povrchů (Tab. 1, Obr. 1-3).

Korozní vzorky jsou umísťovány na vybrané povrchy testovaných ocelových konstrukcí (Obr. 4). Vzorky bylo potřeba na příslušné povrchy umístit takovým způsobem, aby co nejvěrohodněji simulovaly skutečné podmínky konkrétního povrchu mostní konstrukce. Pro experimentální testování byly zvoleny standartní vzorky používané pro atmosférické korozní zkoušky podle ČSN ISO 8407 – ploché panely o rozměrech 100×150 mm tloušťky 1,5 mm. Vzorky byly vyrobeny z plechu jakosti S355J2WP (Corten A) používaného obvykle pro opláštění stavebních objektů [15,16]. Aby bylo možno vyhodnotit korozní působení na plochu vzorků exponovanou atmosférickým podmínkám, je zadní strana korozních vzorků, tj. strana přilehlá k ocelové konstrukci, maskována. Korozní vzorky jsou uchyceny k ocelové konstrukci pomocí jednoduchých přítlačných prvků z korozivzdorné oceli (Obr. 5). Tento způsob uchycení zajišťuje těsný kontakt mezi korozním vzorkem a zkoumaným povrchem ocelové konstrukce. Kontaktní plocha mezi přítlačným prvkem a korozním vzorkem je minimální, takže nedochází k ovlivnění ve vývoji korozních produktů na exponovaném povrchu a vzorky kopírují tepelnou setrvačnost hmotného objektu [17].

Tab. 1. Konstrukce testované v rámci programu experimentálních korozních zkoušek / Structures tested within the program of experimental corrosion tests

Testovaná konstrukce	Rok výroby	Rok osazení vzorků	Počet testovaných povrchů
01 - Silniční most přes řeku Ostravici ve Frýdku-Místku	1986	2011	8
02 - Železniční most v Praze - Motole	1981	2012	8
03 - Silniční most přes trať ČD na silnici II/456 v Ostravě	2008	2013	16
04 - Silniční most přes řeku Odru na silnici II/456 v Ostravě	2008	2013	8
05 - Silniční most přes trať ČD na silnici I/56 v Ostravě	2008	2013	9
06 - Silniční most na ulici Opavské přes dálnici D1 v Ostravě	2001	2014	12
07 - Silniční most na ulici Opavské přes trať ČD v Ostravě	1983	2014	6
08 - Železniční most přes řeku Opavu v Krnově	1979	2014	10
09 - Televizní vysílač Tlustá Hora u Zlína	1980	2014	9
10 - Obslužná lávka vodní nádrže Slušovice	1975	2014	11

01

03

04

05

06

07

Obr. 1. Testované silniční mosty (01 – silniční most přes řeku Ostravici ve Frýdku-Místku; 03 – silniční most přes trať ČD na silnici II/456 v Ostravě; 04 – silniční most přes řeku Odru na silnici II/456 v Ostravě; 05 – silniční most přes trať ČD na silnici I/56 v Ostravě; 06 – silniční most na ulici Opavské přes dálnici D1 v Ostravě; 07 – silniční most na ulici Opavské přes trať ČD v Ostravě)

Fig. 1. Monitored road bridges (01 – Road bridge over the river Ostravice in Frydek-Mistek; 03 – Road bridge over the railway line on the road II/456 in Ostrava; 04 – Road bridge over the river Odra on the road II/456 in Ostrava; 05 – Road bridge over the railway line on the road I/56 in Ostrava; 06 – Road bridge in Opavska street over the highway D1 in Ostrava; 07 – Road bridge on Opavska street over the railway line in Ostrava)

02

08

Obr. 2. Testované železniční mosty (02 – železniční most v Praze - Motole; 08 – železniční most přes řeku Opavu v Krnově)
Fig. 2. Monitored railway bridges (02 – Railway bridge in Prague; 08 – Railway bridge over the river Opava in Krnov)

09

10

Obr. 3. Další testované konstrukce (09 – televizní vysílač Tlustá Hora u Zlína; 10 – obslužná lávka vodní nádrže Slušovice)
Fig. 3. Another monitored structures (09 – Transmission tower Tlustá Hora; 10 – Access footbridge of water reservoir Slušovice)

a)

b)

Obr. 4. Instalace korozních vzorků na železničním mostu v Praze – Motole
Fig. 4. Installation of corrosion specimens on the railway bridge in Prague

Obr. 5. Uchycení korozního vzorku pomocí přitlačného prvku z korozivzdorné oceli

Fig. 5. Attachment of corrosion specimen using the pressure element made of stainless steel

Na každý ze zkoumaných povrchů byly nasazeny 3 korozní vzorky. V době instalace korozních vzorků byly zjištěny statistické charakteristiky tloušťky korozních produktů zkoumaného povrchu. Tloušťky byly měřeny magneticko-indukční metodou, u každého povrchu bylo provedeno celkem 30 měření. Plánovaná doba experimentálního měření je 10 let. Tloušťka korozních produktů na povrchu vzorků je měřena v ročních intervalech. Odběr korozních vzorků pro stanovení korozních úbytků podle ČSN ISO 8407 je plánován po 1, 3 a 10 letech expozice. U vybraných korozních vzorků je provedena prvková analýza korozních produktů, rentgenová difrakční analýza korozních vrstev a rovněž jsou stanoveny hodnoty PA indexů [18,19].

VÝSLEDKY ZKOUŠEK

V následující kapitole jsou uvedeny výsledky experimentálního měření po 1 roce expozice korozních vzorků. Výsledky jsou vyhodnoceny z 5 mostních konstrukcí, u kterých proběhla instalace korozních vzorků v rozmezí let 2011 až 2013. Pozornost je věnována:

- srovnání vývoje korozních produktů na typických plochách mostních konstrukcí;
- vyhodnocení vlivu orientace plochy;
- vývoji korozních produktů na plochách ovlivněných zatékáním z netěsného systému odvodnění;
- vyhodnocení závislosti mezi průměrnou tloušťkou korozních produktů a korozními úbytky po jednom roce expozice;
- analýze korozních produktů.

Vývoj korozních produktů na typických plochách mostních konstrukcí

Korozní vzorky jsou nasazeny na typické povrchy, které jsou charakteristické pro většinu mostních konstrukcí. Všechny mostní konstrukce jsou navrženy jako trámové s hlavními svařovanými I nosníky a horní mostovkou. Při hodnocení vývoje patiny se rozlišuje mezi vnějšími a vnitřními povrchy a dále mezi povrchy vodorovnými a svislými. Vodorovné povrchy jsou rozčleněny na povrchy exponované shora (horní plochy dolních pásnic nosníků) a povrchy exponované zdola (podhledové plochy). Zjištěné hodnoty průměrných tloušťek korozních produktů a korozních úbytků po jednom roce expozice jsou uvedeny v Tab. 2. Vývoj korozních produktů není ovlivněn specifickými činiteli, jako je například zatékání z netěsného systému odvodnění či koncentrace usazených nečistot.

Hodnocené mostní konstrukce jsou situovány v různých lokalitách. Pro vyhodnocení vlivu polohy na průběh korozních procesů proto není příliš vhodné srovnávat absolutní hodnoty experimentálně zjištěných údajů z různých konstrukcí. Vhodným srovnávacím kritériem jsou poměrové veličiny vztažené k vhodné referenční ploše. Za referenční plochu byla zvolena vnější stěna hlavních nosníků.

Největší hodnoty tloušťky korozních produktů a korozních úbytků byly zjištěny na horním vnějším povrchu dolních pásnic hlavních nosníků. Průměrná hodnota ročního korozního úbytku je 2,7krát vyšší ve srovnání s korozním úbytkem vnější stěny hlavního nosníku (variační koeficient uvedeného poměru je $v = 0,23$). Při porovnání tloušťek korozních produktů vychází obdobné hodnoty (průměrná hodnota $m = 2,7$; variační koeficient $v = 0,22$).

Obr. 6. Vizuálně odlišný pruh korozních produktů na vnější stěně hlavního nosníku v blízkosti dolní pásnice (železniční most v Praze – Motole)

Fig. 6. Visually different strip of corrosion products on the outer web of main girder close to the bottom flange (Railway bridge in Prague)

Tab. 2. Výsledky korozních zkoušek po 1 roce expozice – typické plochy konstrukce / The results of corrosion tests after one year of exposure – typical surfaces of the structure

Plocha	Testovaná konstrukce				
	01	02	03	04	05
Průměrné tloušťky korozních produktů po 1 roce expozice (μm)					
Vnější stěna hlavního nosníku	46,5	25,4	24,8	32,5	19,4
Vnější stěna hlavního nosníku v oblasti nad dolní pásnicí	51,5	29,1	26,0	35,4	–
Vnitřní stěna hlavního nosníku	41,6	23,7	26,6	36,1	10,5
Horní vnější povrch dolní pásnice hlavního nosníku	87,5	87,4	76,8	70,4	51,8
Horní vnitřní povrch dolní pásnice hlavního nosníku	66,9	54,1	52,2	77,0	44,2
Podhledová plocha horní pásnice hlavního nosníku	–	39,4	32,5	36,6	16,9
Podhledová plocha dolní pásnice hlavního nosníku	–	31,0	40,7	36,8	18,0
Korozní úbytky po 1 roce expozice ($\mu\text{m r}^{-1}$)					
Vnější stěna hlavního nosníku	7,8	6,0	4,2	6,4	7,7
Vnější stěna hlavního nosníku v oblasti nad dolní pásnicí	7,5	5,7	4,9	6,0	–
Vnitřní stěna hlavního nosníku	5,5	4,5	4,7	7,0	6,0
Horní vnější povrch dolní pásnice hlavního nosníku	17,2	19,1	15,3	13,7	17,4
Horní vnitřní povrch dolní pásnice hlavního nosníku	10,7	9,3	9,3	11,9	10,7
Podhledová plocha horní pásnice hlavního nosníku	–	9,1	5,4	5,6	7,1
Podhledová plocha dolní pásnice hlavního nosníku	–	6,3	5,9	7,2	7,4

Označení konstrukcí: 01 - silniční most přes řeku Ostravici ve Frýdku-Místku; 02 - železniční most v Praze - Motole; 03 - silniční most přes trať ČD na silnici II/456 v Ostravě; 04 - silniční most přes řeku Odru na silnici II/456 v Ostravě; 05 - silniční most přes trať ČD na silnici I/56 v Ostravě

Korozní úbytky a tloušťky patiny horních povrchů vnitřních pásnic jsou ve srovnání s vnějšími pásnicemi menší. Při srovnání s referenční vnější stěnou hlavního nosníku jsou průměrné korozní úbytky vnitřních pásnic 1,7krát vyšší (variační koeficient uvedeného poměru je $v = 0,21$). Mírně vyšší poměr byl zjištěn na základě srovnání tlouštěk korozních produktů (průměrná hodnota $m = 2,1$; variační koeficient $v = 0,16$).

Na povrchu vnějších stěn v blízkosti dolních pásnic se obvykle vytvoří vizuálně odlišný (tmavší) pruh korozních produktů (Obr. 6). Tento jev nastává pouze na vnějších stěnách a je vyvolán odlišným způsobem ovlhčování oproti běžným plochám stěn hlavních nosníků. Na přilehlé dolní pásnici se zadržuje více vlhkosti, nečistot a v zimním období také sněh. Z provedených měření vyplývá, že korozní úbytky na stěně v blízkosti dolních pásnic se neliší od hodnot změřených na běžném povrchu stěny. Požadavek [20] na ochranu těchto ploch pomocí nátěrových systémů se jeví jako zbytečný.

Z porovnání korozních procesů na vnějších a vnitřních stěnách hlavních nosníků vyplývá, že roční korozní úbytky vnitřních stěn jsou průměrně 0,9násobkem úbytků na vnějších stěnách (variační koeficient uvedeného poměru je $v = 0,20$). Obdobné charakteristiky byly změřeny také u průměrných tlouštěk korozních produktů (průměrná hodnota $m = 0,9$; variační koeficient $v = 0,22$).

Roční korozní úbytky na podhledové ploše horní pásnice 1,2krát převyšují korozní úbytky na vnější stěně

hlavního nosníku (variační koeficient uvedeného poměru je $v = 0,23$). Při porovnání tlouštěk korozních produktů vychází obdobné hodnoty (průměrná hodnota $m = 1,2$; variační koeficient $v = 0,21$).

U podhledových ploch dolních pásnic byly změřeny obdobné hodnoty jakou u horních pásnic. Roční korozní úbytky jsou 1,2krát vyšší ve srovnání s vnější stěnou hlavního nosníku (variační koeficient uvedeného poměru je $v = 0,16$). Pro tloušťky korozních produktů byla získána průměrná hodnota násobku $m = 1,2$ a variační koeficient $v = 0,21$.

Vyhodnocení vlivu orientace plochy

U čtyř mostů byly korozní vzorky osazeny na vnější stěny obou krajních hlavních nosníků. Mosty jsou orientovány ve směru z východu na západ, vnější stěny hlavních nosníků jsou proto orientovány buď na sever, či na jih. Průměrné hodnoty tlouštěk korozních produktů a hodnoty ročních korozních úbytků jsou pro severní a jižní svislé vnější povrchy hlavních nosníků uvedeny v Tab. 3.

Z hodnot uvedených v Tab. 3 vyplývá, že rozdíly mezi sledovanými veličinami na severních a jižních stěnách hlavních nosníků jsou minimální. Dosažené výsledky jsou ve shodě s dříve provedenými experimenty [21]. Mírně vyšší průměrné hodnoty korozních tlouštěk byly pozorovány na plochách s jižní orientací. Je vhodné

Tab. 3. Výsledky korozních zkoušek po 1 roce expozice – vliv orientace ploch / The results of corrosion tests after one year of exposure – the influence of surface orientation

Plocha	Testovaná konstrukce				
	01	02	03	04	05
Průměrné tloušťky korozních produktů po 1 roce expozice (μm)					
Vnější stěna severního hlavního nosníku	–	25,4	21,2	28,7	18,1
Vnější stěna jižního hlavního nosníku	–	30,5	24,8	32,5	19,4
Korozní úbytky po 1 roce expozice ($\mu\text{m r}^{-1}$)					
Vnější stěna severního hlavního nosníku	–	6,0	4,2	4,9	6,0
Vnější stěna jižního hlavního nosníku	–	5,7	4,2	5,9	7,7

Označení konstrukcí: 01 - silniční most přes řeku Ostravici ve Frýdku-Místku; 02 - železniční most v Praze - Motole; 03 - silniční most přes trať ČD na silnici II/456 v Ostravě; 04 - silniční most přes řeku Odru na silnici II/456 v Ostravě; 05 - silniční most přes trať ČD na silnici I/56 v Ostravě

podotknout, že vývoj patiny na posuzovaných plochách je, mimo jiné, ovlivněn horní mostovkou, která je příčně vykonzolená za osu krajních hlavních nosníků a částečně zastihuje posuzované plochy.

Vývoj korozních produktů na plochách ovlivněných zatékáním

U silničního mostu přes řeku Ostravici ve Frýdku-Místku a u silničního mostu přes trať ČD na silnici II/456 v Ostravě byly korozní vzorky instalovány také na povrchy, které jsou ovlivněny zatékáním z netěsného systému odvodnění. Pro korozní zkoušky byly vybrány povrchy konstrukce s objemnými korozními vrstvami, které však zůstávají kompaktní a jsou dostatečně přilnavé (Obr. 7). Testování těchto povrchů je důležité, neboť představují typickou poruchu mostních konstrukcí způsobenou menšími nedostatky v systému odvodnění mostů. Ze zkušenosti s reálným provozem mostních konstrukcí vyplývá, že příčiny drobného, avšak pravidelného ovlhčování konstrukce z prvků odvodnění mostu

Obr. 7. Detail testované plochy s objemnými korozními vrstvami (silniční most přes řeku Ostravici ve Frýdku-Místku)

Fig. 7. Detail of the tested surface with bulky corrosion products (Road bridge over the river Ostravice in Frydek-Mistek)

jsou odstraňovány s velkou časovou prodlevou. Je proto důležité získat dostatek experimentálních údajů, aby bylo možno predikovat reálné poškození takto zasažených povrchů.

Aby bylo možno vyhodnotit nepříznivé vlivy související se zatékáním ze systému odvodnění, byly korozní vzorky osazeny rovněž na typově stejné plochy s příznivým vývojem patiny. Vizualní rozdíly ve vývoji korozních produktů na dvou srovnatelných plochách jsou demonstrovány na Obr. 8. Experimentálně změřené údaje (průměrné tloušťky vrstev korozních produktů a korozní úbytky po jednom roce expozice vzorků) jsou uvedeny v Tab. 4-6.

Je zřejmé, že zatékání z netěsného systému odvodnění negativně ovlivňuje vývoj korozních procesů na zasažených prvcích nosné konstrukce. U zkoumaných povrchů došlo vlivem zatékání k výraznému nárůstu korozních úbytků. Největší rozdíly v experimentálně změřených korozních charakteristikách po jednom roce expozice byly zaznamenány u vnitřní stěny mostu v Ostravě (hodnoty ročních korozních úbytků na povrchu zasaženém zatékáním jsou 4,8krát vyšší ve srovnání s typově stejným povrchem s příznivým vývojem patiny; průměrná tloušťka korozních produktů na povrchu ovlivněném zatékáním je 3,8krát vyšší). Nejmenší rozdíly pak byly identifikovány na mostu ve Frýdku-Místku, kde vlivem zatékání z netěsného mostního závěru došlo k 1,9násobnému nárůstu ročních korozních úbytků a 1,5násobnému nárůstu průměrné tloušťky korozních produktů.

Na základě experimentálně změřených výsledků uvedených v Tab. 4-6 nelze učinit obecnější závěry o průměrném očekávaném nárůstu korozních úbytků vlivem zatékání. Průběh korozních procesů totiž závisí na míře, pravidelnosti a způsobu ovlhčování konstrukce z příslušného prvku odvodnění mostu. Z dosavadních výsledků však vyplývá, že nelze vyloučit až 5násobný nárůst korozních úbytků po jednom roce expozice. Relativní rozdíly průměrných tloušťek korozních produktů po jednom roce expozice nejsou tak velké jako relativní rozdíly korozních úbytků.

a) po 6 měsících expozice

b) po 1 roce expozice

Obr. 8. Vliv zatékání z netěsného mostního závěru na vývoj korozních produktů (silniční most přes řeku Ostravici ve Frýdku-Místku; vlevo – stěna příčnicku ovlivněná zatékáním; vpravo – vnitřní stěna hlavního nosníku neovlivněná zatékáním)

Fig. 8. The influence of leakage from bridge expansion joint on the development of corrosion products (Road bridge over the river Ostravice in Frydek-Mistek; on the left – web of the cross girder influenced by leaking; on the right – inner web of the main girder not influenced by leaking)

Tab. 4. Vliv zatékání z netěsného systému odvodnění – silniční most přes řeku Ostravici ve Frýdku-Místku (experimentálně změřená data na stěnách vnitřních nosných prvků) / Influence of leaking from bridge drainage system – Road bridge over the river Ostravice in Frydek-Mistek (experimentally measured data on webs of inner load-bearing elements)

Měřená veličina	Zkoumaný povrch	
	vnitřní stěna příčnicku ovlivněná zatékáním	vnitřní stěna hlavního nosníku bez vlivu zatékání
Průměrná tloušťka korozních produktů na konstrukčním prvku (po 26 letech expozice)	439,0 μm	76,9 μm
Průměrná tloušťka korozních produktů na korozním vzorku (po 1 roku expozice)	62,7 μm	41,6 μm
Korozní úbytek po 1 roku expozice	10,6 μm	5,5 μm

Tab. 5. Vliv zatékání z netěsného systému odvodnění - silniční most přes trať ČD na silnici II/456 v Ostravě (experimentálně změřená data na stěnách vnitřních nosných prvků) / Influence of leaking from bridge drainage system - Road bridge over the railway line on the road II/456 in Ostrava (experimentally measured data on webs of inner load-bearing elements)

Měřená veličina	Zkoumaný povrch	
	vnitřní stěna hlavního nosníku ovlivněná zatékáním	vnitřní stěna hlavního nosníku bez vlivu zatékání
Průměrná tloušťka korozních produktů na konstrukčním prvku (po 5 letech expozice)	190,3 μm	87,6 μm
Průměrná tloušťka korozních produktů na korozním vzorku (po 1 roku expozice)	102,8 μm	26,6 μm
Korozní úbytek po 1 roku expozice	22,7 μm	4,7 μm

Tab. 6. Vliv zatékání z netěsného systému odvodnění - silniční most přes trať ČD na silnici II/456 v Ostravě (experimentálně změřená data na horních plochách dolních pásnic vnitřních hlavních nosníků) / Influence of leaking from bridge drainage system - Road bridge over the railway line on the road II/456 in Ostrava (experimentally measured data on upper surfaces of bottom flanges of inner main girders)

Měřená veličina	Zkoumaný povrch	
	dolní pásnice ovlivněná zatékáním	dolní pásnice bez vlivu zatékání
Průměrná tloušťka korozních produktů na konstrukčním prvku (po 5 letech expozice)	204,3 μm	121,1 μm
Průměrná tloušťka korozních produktů na korozním vzorku (po 1 roku expozice)	98,5 μm	52,2 μm
Korozní úbytek po 1 roku expozice	26,0 μm	9,3 μm

Závislost mezi tloušťkou korozních produktů a korozními úbytky

U všech vyšetřovaných povrchů byla po jednom roce expozice korozních vzorků změřena také průměrná tloušťka korozních produktů. Z experimentálně zjištěných výsledků vyplývá významná korelační závislost mezi průměrnou hodnotou tloušťky korozních produktů a korozními úbytky po jednom roce expozice vzorků (Obr. 9). Korelační součinitel mezi oběma veličinami je $\rho = 0,88$. Ze změřené hodnoty průměrné tloušťky korozních produktů po jednom roce expozice ($t_{\text{corr},1}$), tak lze poměrně výstižně odhadnout korozní úbytek ($k_{t,1}$), podle vztahu:

$$k_{t,1} = 0,19 t_{\text{corr},1} + 0,665 \text{ (}\mu\text{m)} \quad (1)$$

Výše uvedený vztah byl stanoven lineární regresní analýzou. Zjištěnou závislost lze využít pro sledování vývoje patiny. Vztah je platný pouze pro první rok expozice povrchu. V delším časovém horizontu totiž dochází k ustálení tloušťky korozních produktů, korozní úbytky se však i nadále zvyšují.

Měření tloušťky korozních produktů s využitím přenosných tloušťkoměrů je snadno a rychle prove-

ditelné, a může tak sloužit jako jednoduchý a přitom poměrně výstižný postup ke stanovení reálných hodnot počátečních korozních rychlostí patinujících ocelí. Zjištěnou závislost je tak možné využít jako jedno z kritérií hodnocení vývoje patiny na provozovaných konstrukcích.

Obr. 9. Závislost mezi průměrnou tloušťkou korozních produktů a korozními úbytky po 1 roce expozice

Fig. 9. Dependence between the average thickness of the corrosion products and corrosion losses after 1 year of exposure

Analýza korozních produktů

Složení vrstvy patiny se mění v závislosti na době a podmínkách expozice posuzované plochy [22]. Korozní sloučeniny se mohou vyskytovat současně v krystalické i částečně amorfni fázi. Fáze mohou podléhat transformacím a složení patiny se může měnit v tloušťce vrstvy.

Hlavní složky korozních produktů oceli jsou:

- goethit α -FeOOH - nejstabilnější fáze - přispívá k ochranným vlastnostem povrchové vrstvy, a jestliže je přítomen ve formě malých částic, zabraňuje pronikání vody, kyslíku a chloridových iontů do spodních vrstev korozních produktů a k povrchu oceli;
- akaganeit β -FeOOH - typický pro prostředí s chloridy;
- lepidokrokrit γ -FeOOH - nestabilní sloučenina, která podléhá transformaci na magnetit nebo maghemit γ -Fe₂O₃ v prostředí obsahujícím kyslík;
- magnetit Fe₃O₄ - typická složka vrstevnatých korozních produktů vznikajících v místech dlouhodobé zadržky vlhkosti nebo ve spárách;
- amorfni a nestechiometrické sloučeniny.

Na základě porovnání poměru jednotlivých sloučenin ve vrstvě patiny byl definován index ochranného účinku patiny (PAI_{α} , Protective Ability Index) [18,19]:

$$PAI_{\alpha} = \alpha / \gamma^* \quad (2)$$

kde $\gamma^* = \gamma + \beta + s$, zahrnuje hmotnostní koncentraci α -FeOOH (α), γ -FeOOH (γ), β -FeOOH (β) a Fe₃O₄ (s).

Jestliže je poměr $PAI_{\alpha} > 1$, vrstva patiny je ochranná a korozní rychlost je nižší než 10 $\mu\text{m r}^{-1}$. V případě, že poměr $PAI_{\alpha} < 1$, je nutné vypočítat index PAI_{β} pro stanovení dalšího kritéria ochranného účinku vrstvy ($PAI_{\beta} < 0,5$ – vrstva korozních produktů bez ochranných vlastností; nebo $PAI_{\beta} > 0,5$ – částečně ochranná patina):

$$PAI_{\beta} = (\beta + s) / \gamma^* \quad (3)$$

Rentgenová difrakční analýza korozních produktů byla provedena po jednom roce expozice u vybraných korozních vzorků instalovaných na vybraných silničních mostech v Ostravě, tj. na silničním mostu přes trať ČD a na silničním mostu přes řeku Odru (oba mosty na silnici II/456). Výsledky provedené analýzy jsou uvedeny v Tab. 7. Z analýzy je zřejmé, že se jedná o korozní produkty z počátečního období tvorby ochranné patiny (dominantní fázi je lepidokrokrit). Protože se jedná o „mladé“, nedostatečně vytvořené korozní vrstvy po 1 roce expozice, jsou hodnoty indexu PAI_{α} nižší než 1 a patiny ještě nemají ochranný charakter.

Výskyt akaganeitu byl zjištěn téměř na všech plochách, na tvorbě korozních produktů se tedy podílí i chloridy. Nejvyšší koncentrace chloridů ve vrstvě korozních produktů byla zjištěna u povrchu (03-E), který je ovlivněn zatékáním z netěsného systému odvodnění mostu. Zvýšená koncentrace chloridů byla rovněž zjištěna u horních ploch dolních pásnic hlavních nosníků.

Tab. 7. Analýza vrstev korozních produktů po jednom roce expozice korozních vzorků / Analysis of corrosion products layers after one year of corrosion specimens' exposure

poloha expozice	fázová analýza	Cl (hmot. %)	PAI_{α}	PAI_{β}
03-A	zřetelný lepidokrokrit a goethit	0,17	0,58	–
03-B	zřetelný lepidokrokrit, goethit a akaganeit, velmi slabý SiO ₂	1,08	0,24	0,69
03-C	zřetelný lepidokrokrit, goethit a akaganeit, stopy SiO ₂	0,42	0,36	0,76
03-D	zřetelný lepidokrokrit, goethit a akaganeit, stopy SiO ₂	0,55	0,34	0,63
03-E	zřetelný lepidokrokrit, goethit a akaganeit	1,14	0,52	0,84
04-A	zřetelný lepidokrokrit, velmi slabý goethit	0,17	0,15	–
04-B	zřetelný lepidokrokrit, velmi slabý goethit, akaganeit a SiO ₂	0,70	0,14	0,67
04-C	zřetelný lepidokrokrit, velmi slabý goethit a akaganeit	0,23	0,16	0,65

Značení expozic:

03 – Silniční most přes trať ČD na silnici II/456 v Ostravě

03-A – podhledová vnější plocha horní pásnice hlavního nosníku

03-B – horní vnější povrch dolní pásnice jižního hlavního nosníku

03-C – horní vnitřní povrch dolní pásnice hlavního nosníku

03-D – horní vnější povrch dolní pásnice severního hlavního nosníku

03-E – vnitřní stěna hlavního nosníku ovlivněná zatékáním ze systému odvodnění mostu

04 – Silniční most přes řeku Odru na silnici II/456 v Ostravě

04-A – podhledová vnější plocha horní pásnice hlavního nosníku

04-B – horní vnější povrch dolní pásnice jižního hlavního nosníku

04-C – vnější stěna hlavního nosníku

ZÁVĚR

Program experimentálních atmosférických korozních zkoušek patinujících ocelí je koncipován jako dlouhodobý projekt. Komplexní výsledky programu budou k dispozici až po 10 letech expozice korozních vzorků. Pro vytvoření obecných závěrů o korozních procesech na typických plochách ocelových konstrukcí bylo potřeba osadit korozní vzorky na dostatečný počet ploch. Ke konci roku 2014 byly korozní vzorky nasazeny na 97 površích.

Hlavním cílem programu je upřesnění analytického predikčního modelu pro výpočet návrhové hodnoty korozních úbytků [14] na základě statistického vyhodnocení naměřených dat. Predikční modely pro výpočet korozních úbytků se v praxi využívají především při návrhu nosných konstrukcí stavebních objektů, kdy se na základě predikovaných korozních úbytků určuje staticky potřebná hodnota korozních přídavek [23]. Výsledky experimentů bude možno využít také pro vyhodnocení časově závislé spolehlivosti konstrukcí s využitím pravděpodobnostních metod [24–26]. Je vhodné podotknout, že při aktuální environmentální situaci jsou ve všech lokalitách České republiky korozní úbytky patinujících ocelí výrazně nižší než v 70. a 80. letech, kdy byly některé ze sledovaných stavebních objektů realizovány. U všech kovových materiálů dochází prakticky bez časové prodlevy ke snížení korozních úbytků při snížení environmentálního namáhání. Tato skutečnost se projevila na všech sledovaných plochách ocelových konstrukcí.

Z výsledků experimentálních korozních zkoušek vyplývá, že korozní úbytky patinujících ocelí jsou významně podmíněny umístěním exponované plochy v rámci konstrukce. Ačkoliv jsou zatím k dispozici pouze výsledky po jednom roce expozice vzorků, lze i na základě těchto výsledků jednoznačně usuzovat na skutečnost, že lokální vlivy, jako například poloha a orientace plochy v konstrukci, nezanedbatelně ovlivňují průběh korozních procesů na konstrukcích navržených z patinujících ocelí. Důležitou součástí experimentálního měření je rovněž vyhodnocení korozních procesů na plochách ovlivněných zatížením z netěsných prvků odvodnění mostů. Výsledky experimentu bude možno využít při vyhodnocení vlivu korozního poškození na únosnost a životnost konstrukce.

Jednoduché uchycení korozních vzorků na vyhodnocovaných plochách konstrukce může sloužit jako ekonomicky nenáročný, přitom však prokazatelný a prakticky nezpochybnitelný postup (například ve srovnání s vizuálním hodnocením patiny) k vyhodnocení korozních procesů na příslušné ocelové konstrukci. Požadavek na prokázání příznivého vývoje patiny často vyžaduje investor stavby.

K výstižnému odhadu korozních rychlostí v prvních letech expozice může sloužit také měření tloušťek

korozních produktů. Měření je velmi jednoduché – provádí se pomocí přenosného tloušťkoměru bez potřeby jakkoliv zasahovat do konstrukce. Z dosavadních výsledků experimentálního měření vyplývá, že mezi průměrnou hodnotou tloušťky korozních produktů a korozními úbytky existuje významná korelační závislost. Rovnice (1) určená lineární regresí je však platná pouze pro první rok expozice povrchu. Jedním z očekávaných výstupů korozních zkoušek bude popsání závislosti mezi oběma měřenými veličinami pro delší dobu expozice (po vyhodnocení většího počtu exponovaných vzorků budou odvozeny lineární rovnice s odlišnými parametry). Důležité bude rovněž určení hraničních hodnot (časových i z hlediska tloušťky korozních produktů), kdy začíná docházet ke zpomalení nárůstu tloušťky korozních produktů ve srovnání s nárůstem korozních úbytků.

Analýza vrstev korozních produktů může sloužit jako vhodné doplňkové kritérium k hodnocení vývoje patiny a k pochopení korozních procesů v průběhu životnosti konstrukcí. Zvýšená pozornost je věnována vlivu depozice chloridů na korozní procesy typických ploch konstrukce mostů. Lokální zvýšení korozní agresivity v okolí pozemních komunikací nenastává pouze v období použití posypových solí, ale vlivem sekundární prašnosti také v dalších obdobích roku. Z výsledku analýz vrstev korozních produktů po 1 roce expozice vyplývá, že hodnoty PA indexů nejsou koncentrací usazených chloridů ovlivněny. Reálné ovlivnění vrstev korozních produktů, především hodnoty PAI_{β} , nastává až po delší době expozice [22].

Poděkování

Příspěvek byl vypracován za finanční podpory Grantové agentury České republiky, registrační číslo projektu 13-16124P. V článku byly využity také výstupy projektu IP 9/2014 řešitelského pracoviště SVÚOM, s.r.o.

LITERATURA

1. P. Albrecht, T.T. Hall: Atmospheric corrosion resistance of structural steels, *Journal of Materials in Engineering* **2003**, 15, pp. 2–24.
2. D.M. Buck: Copper in Steel - The Influence on Corrosion, *Industrial & Engineering Chemistry* **1913**, 5 (6), pp. 447–452.
3. G.B. Godfrey: *The use of weathering steels in composite bridges* **1988**, London: Imperial College of Science and Technology, UK.
4. R.L. Nickerson: *Performance of weathering steel in highway bridges A third Phase Report* **1995**, Washington: American Iron and Steel Institute, USA.
5. M. Fischer: *Merkblatt 434: Wetterfester Baustahl* **2004**, Düsseldorf: Stahl-Informations-Zentrum, Deutschland.
6. R. Kogler: *Weathering Steel and Painted Steel: Complementary corrosion protection solutions for Highway Bridges*,

- Journal of Protective Coatings and Linings* **2005**, 22 (1), pp. 68-73.
7. J.P. Lebet, T.P. Lang: *Brücken aus wetterfestem Stahl* **2001**, Lausanne: ICOM Construction Métallique, Switzerland.
8. M. Morcillo et al.: Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review, *Corrosion Science* **2013**, 77, pp. 6-24.
9. M. Morcillo et al.: Weathering steels: From empirical development to scientific design. A review, *Corrosion Science* **2014**, 83, pp. 6-31.
10. P.H. Copson: A Theory of the mechanism of Rusting of Low Alloys Steels in the Atmosphere, *proceedings ASTM* **1945**, pp. 554-81.
11. J.B. Horton: The Rusting of low-alloyed steel in the atmosphere, Pittsburgh regional technical meeting of the American Iron and Steel Institute **1965**, pp. 1-24.
12. J. Tidblad: Effects of Air Pollution on Materials and Cultural Heritage: ICP Materials Celebrates 25 Years of Research, *International Journal of Corrosion* **2012**, pp. 1-16.
13. C.P. Larrabee, S.K. Coburn: The Atmospheric Corrosion of Steels as Influenced by Changes in Chemical Composition, *Proceedings of the First International Congress on Metallic Corrosion*. London **1962**.
14. V. Křivý et al.: Bestimmung der Dickenzuschläge für wetterfesten Stahl im Brückenbau, *Stahlbau* **2013**, 8 (8), pp. 583-588.
15. M. Helzel: *Dokumentation 585: Fassaden aus wetterfestem Baustahl* **2014**. Düsseldorf: Stahl-Informations-Zentrum, Deutschland.
16. K. Kreislová, D. Knotková: *Použití patinujících ocelí v architektuře* **2011**. Praha: SVÚOM, s.r.o.
17. V. Křivý, K. Kreislová, V. Urban: Experimental Corrosion Tests on Weathering Steel Bridges, *Solid State Phenomena* **2015**, 227 (2015), pp. 537-540.
18. T. Kamimura et al.: Composition and protective ability of rust layer formed on weathering steel exposed to various environments, *Corrosion Science* **2006**, 48 (9), pp. 2799-2812.
19. S. Hara et al.: Taxonomy for protective ability of rust layer using its composition formed on weathering steel bridge, *Corrosion Science* **2007**, 49 (3), pp. 1131-1142.
20. M. Pošvářová: Technické podmínky TP 197: Mosty a konstrukce pozemních komunikací z patinujících ocelí **2008**, Praha: Ministerstvo dopravy ČR.
21. C.P. Larrabee: Corrosion resistance of high strength low alloy steels as influenced by composition and environment, *Corrosion* **1953**, 9 (8), pp. 259-271.
22. K. Kreislová, V. Křivý: Evaluation of corrosion resistance of weathering steel with 3 % Ni, *Koroze a ochrana materiálů* **2014**, 58 (1), pp. 11-18.
23. V. Křivý: Design of corrosion allowances on structures from weathering steel, *Procedia Engineering* **2012**, 40, pp. 235-240.
24. N. Damgaard et al.: *Prediction and Prolongation of the Service Life of Weathering Steel Highway Structures* **2009**, Waterloo: University of Waterloo, Canada.
25. A.A. Czarnecki, A.S. Nowak: Time-variant reliability profiles for steel girder bridges, *Structural Safety* **2008**, 30 (1), pp. 49-64.
26. J.R. Kayser, A.S. Nowak: Reliability of corroded steel girder bridges, *Structural Safety* **1989**, 6 (1), pp. 53-63.