Hodnocení korozní odolnosti nízkolegované oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi s 3 % Ni

Evaluation of corrosion resistance of weathering steel with 3 % Ni

Kreislová K.¹, Křivý V.²

¹ SVÚOM s.r.o., Praha

² VŠB – TU Ostrava

E-mail: kreislova@svuom.cz

V článku je porovnáváno korozní chování různých typů patinujících ocelí s novým typem oceli se zvýšeným obsahem niklu exponovaných na atmosférických stanicích v České republice a ve zrychlených laboratorních testech. Korozní úbytky po 1, 2 a 4 letech expozice v atmosférických podmínkách byl porovnán efekt obsahu SO₂ a depozice chloridů s výsledky modifikovaných zrychlených korozních testů. Rovněž byly provedeny analýzy korozních produktů. Byla hodnocena ochranná účinnost vzniklých patin.

The paper presents the comparison of corrosion behaviour of different types of weathering steels including weathering steel with higher content of nickel exposed on the atmospheric tests in Czech atmospheric test sites and in accelerated laboratory tests. The corrosion losses after 1, 2 and 4 years of atmospheric exposure are given together with results from modified accelerated tests with the effect of SO₂ and chloride. The analysis of corrosion product layers were performed too. The protective ability index (PAI) of patina layers was calculated from analysis results.

ÚVOD

První patinující ocel byla patentována v roce 1933 v USA. Patinující oceli (ocel se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi, weathering steel) jsou nízkolegované oceli obsahující malé množství Cr, Cu, Ni, P a dalších legujících prvků. Obsah legujících prvků běžně nepřesahuje 2 %.

Základní specifickou vlastností patinujících ocelí je jejich schopnost tvořit za vhodných atmosférických podmínek postupně na svém povrchu vrstvu korozních produktů - patinu, která významně zpomaluje rychlost koroze. Oceli se využívají dlouhodobě zejména pro střední a těžké ocelové konstrukce, kde možnost aplikace bez protikorozní ochrany přináší řadu technologických a ekonomických výhod a povrch s vrstvou korozních produktů není na závadu. Rozsah publikovaných prací o korozním chování těchto materiálů v různých atmosférických podmínkách je rozsáhlý a zahrnuje různé charakteristiky korozních vrstev [1].

Jelikož základní užitnou vlastností patinujících ocelí je jejich zvýšená korozní odolnost v atmosférických podmínkách, byl vývoj těchto ocelí vždy doprovázen realizací atmosférických korozních zkoušek [2-4]. Dlouhodobé expozice vzorků patinujících ocelí (Atmofix,

Corten) byly v ČR sledovány v letech 1968-1988, kdy byla korozní agresivita prostředí ještě vysoká v důsledku vysokých koncentrací SO₂ v ovzduší [5-6]. Dále byly vzorky patinujících ocelí exponovány v letech 1986-1995, kdy se na některých evropských lokalitách již projevilo snížení znečištění ovzduší SO₂ [7]. V rámci projektu FT-TA5/076-2009 byly na atmosférických stanicích SVÚOM (Praha, Kopisty, Kašperské Hory a Ostrava) v roce 2008 exponovány vzorky patinujících ocelí Atmofix, Corten i oceli Nippon Steel s 3 % niklu [8-10]. Srovnání různých typů patinujících ocelí bylo provedeno také v různých urychlených laboratorních zkouškách modelujících současné úrovně korozního namáhání ocelových konstrukcí v ČR.

Vývoj nových typů patinujících ocelí

Patinující oceli byly použity od 70. let minulého století na celou řadu staveb, především mostních konstrukcí na celém světě, ale v průběhu jejich expozice bylo zjištěno, že vznikly případy, kdy se nedostatečně projevil ochranný účinek vrstvy korozních produktů - patiny. Příčinami bylo nevhodné konstrukční řešení nebo specifické působení korozních stimulatorů - nejčastěji se jednalo o výraznou depozici chloridů (přímořské sa-

linitu). Proto pokračoval vývoj nových typů těchto ocelí, který se ubíral dvěma směry [11-14]:

- Vyšší legování oceli - z důvodu zvýšené odolnosti proti působení chloridů byly ve světě vyvinuty patinující oceli obsahující vyšší koncentrace niklu (zejména pro ocelové konstrukce v přímořských a pobřežních oblastech). Nikl v oceli však zásadním způsobem zvyšuje její cenu a komplikuje její recyklování. Na základě analýzy termodynamické stability různých typů koroze (systémů Fe-X) bylo zjištěno, že v metalurgii běžné prvky Si a Al mají potenciál vytvářet stabilní, komplexní oxidy s Fe. Navíc Si a Al neznemožňují recyklaci oceli.
- Změna mikrostruktury - mikrostruktura konvenčních patinujících ocelí (např. Corten, S355J2W, aj.) je feriticko-perlitická. Oceli s feriticko-perlitickou mikrostrukturou však mají poměrně nízkou pevnost. Proto

se pro náročnější konstrukce silničních a železničních komunikací začaly používat nízkouhlíkové bainitické oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Atmosférické korozní zkoušky

Od roku 2008 byly na atmosférických stanicích SVÚOM (Praha, Kopisty, Kašperské Hory a Ostrava) exponovány vzorky patinující oceli Atmofix 52 B, Corten A i oceli Nippon Steel s 3 % niklu. Jako referenční vzorky byly na stanicích umístěny i vzorky nelegované uhlíkové oceli 11 373. Rozměry vzorků jsou $150 \times 100 \times 3$ mm, resp. $150 \times 70 \times 7$ mm. Chemické složení exponovaných patinujících ocelí je uvedeno v Tab. 1.

Expozice vzorků byla realizována podle ČSN ISO 8565 na volné atmosféře na stojanech (Obr. 1). Na stanicích byly po celou dobu zkoušek měřeny environmentální údaje – Tab. 2.

V průběhu expozice byly vzorky vizuálně hodnoceny každých 6 měsíců a odběry vzorků byly realizovány po 1, 2 a 4 letech expozice. U odebraných vzorků byly stanoveny základní parametry vrstev korozních produktů (makrostruktura, tloušťka, chemické složení) a korozní úbytky stanovené podle ČSN ISO 8407 intervalovým mořením v inhibované zředěné HCl.

Urychlené laboratorní zkoušky

K porovnání korozního chování nově vyvinutého typu patinující oceli byly provedeny i urychlené laboratorní zkoušky s různými režimy:

- *režim 1* - modifikovaná zkouška s nízkou koncentrací SO_2 (ČSN 03 8131)
 - 16 h expozice v korozní komoře v podmínkách (23 ± 2 °C), 100% relativní vlhkost, 0,002 obj. % SO_2 ($47,5 \mu\text{g m}^{-3}$),
 - 8 h expozice vzorků v laboratorních podmínkách,
 - doba zkoušky 30 cyklů – po každém 7 cyklu oplach vzorků pod tekoucí vodou,
 - porovnání korozní agresivity urychlené cyklické korozní zkoušky s nízkou koncentrací SO_2 s korozní rychlostí v atmosférických prostředích ČR ~ korozní úbytek uhlíkové oceli po 30 cyklech je cca 7 μm

Tab. 1. Chemické složení vzorků patinujících ocelí / *Chemical composition of weathering steel specimens*

prvek	obsah (hm.%)		
	Atmofix 52 B	Corten A	Nippon Steel
C	0,146	0,110	0,070
Mn	1,400	0,370	0,850
Si	0,360	0,430	0,160
P	0,020	0,077	0,008
S	0,010	0,001	0,003
Cu	0,300	0,360	0,330
Ni	0,030	0,160	2,920
Cr	0,500	0,770	0,014
Mo	0,005	0,020	0,004
V	0,040	0,007	0,003
Ti	0,003	0,019	0,009
Al	0,033	0,041	0,030
N	0,006	0,007	–
Nb	–	0,001	0,012
Ce	–	0,360	–
B	–	–	–
W	–	–	0,005
Co	–	–	0,003

Tab. 2. Průměrné roční klimatické údaje a koncentrace znečištění v období 2008/2013 / *Average annual environmental data of period 2008/2013*

stanice	teplota (°C)	RV (%)	množství srážek (mm)	pH	SO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	O_3 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Cl^- (mg l ⁻¹)
Praha - Holešovice	9,6	72	650,9	6,1	7,3	41,1	38,5	8,8
Kopisty	9,0	80	542,8	5,0	15,9	30,9	44,9	9,1
Kašperské Hory	7,0	75	823,9	5,5	6,4	18,4	–	9,6
Ostrava – koksovna	9,3	78	717,7	–	29,6	44,9	–	–

(roční korozní úbytek v prostředích se stupněm korozní agresivity C2 podle ČSN EN ISO 9223).

- **režim 2** - modifikovaná zkouška CH.R.L. (ČSN EN ISO 11130)
 - 10 min. ponor do roztoku 5% rozmrazovací soli o pH 9,1, teplotě $(25 \pm 2)^{\circ}\text{C}$,
 - 50 min. vysychání při relativní vlhkosti $45 \pm 6\%$ a teplotě $(25 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ (Obr. 2),
 - doba zkoušky 3000 hodin,
 - porovnání korozní agresivity urychlené cyklické korozní zkoušky CH.R.L. s korozní rychlostí v atmosférických prostředích ČR ~ korozní úbytek uhlíkové oceli po 3000 h je cca 110 μm (roční korozní úbytek v prostředích se stupněm korozní agresivity C5 podle ČSN EN ISO 9223, resp. korozní úbytek po 15 až 20 letech v prostředích se stupněm korozní agresivity C2 podle ČSN EN ISO 9224).
- **režim 3** - zkouška v neutrální solné mlze (ČSN EN ISO 9227)
 - trvalá expozice, v korozní komoře v podmínkách $(35 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, 100% relativní vlhkost, spad 5% roztoku NaCl s pH 6,5-7,1,
 - doba zkoušky 1000 hodin,
 - porovnání korozní agresivity urychlené korozní zkoušky NSS s korozní rychlostí v atmosférických prostředích ČR ~ korozní úbytek uhlíkové oceli po 1000 h je cca 175 μm (roční korozní úbytek v prostředích se stupněm korozní agresivity C5 podle ČSN EN ISO 9223, resp. korozní úbytek po 15 až 20 letech v prostředích se stupněm korozní agresivity C2 podle ČSN EN ISO 9224).

a) Kopisty

b) Kašperské Hory

Tab. 3. Korozní úbytky patinujících ocelí (μm) / Corrosion mass losses of weathering steels (μm)

atmosférická stanice	doba expozice (roky)		
	1	2	4
<i>patinující ocel Atmofix 52B</i>			
Praha	10,6	14,5	17,6
Kopisty	21,4	29,3	35,1
Kašperské Hory	8,7	11,9	15,4
Ostrava koksovna	31,4	–	–
<i>patinující ocel Corten A</i>			
Praha	10,7	–	15,9
Kopisty	17,3	24,3	32,4
Kašperské Hory	11,3	–	16,9
Ostrava koksovna	18,6	47,0	57,0
<i>patinující ocel Nippon Steel (3% Ni)</i>			
Praha	9,8	–	14,5
Kopisty	17,3	24,1	30,7
Kašperské Hory	4,3	7,9	9,1
Ostrava koksovna	28,7	–	–

Obr. 1. Expozice vzorků na atmosférické stanici Kopisty a Kašperské Hory

Fig. 1. Exposure of specimens on atmospheric test sites Kopisty and Kasperske Hory

Obr. 2. Zkušební zařízení pro zkoušku střídavým ponorem – režim 2

Fig. 2. Test equipment for cyclic immersion test – regime 2

VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Výsledky atmosférických zkoušek

Na odebraných vzorcích po 1, 2 a 4 letech expozice byla měřena tloušťka vrstvy korozních produktů, hodnocena makrostruktura vrstvy korozních produktů metodou otisků na exponovaném povrchu (vrchní strana vzorku) (Obr. 3 a 4) a dále stanoveny korozní úbytky (Tab. 3).

Roční korozní úbytky (Obr. 5) ukazují, že výraznější korozní odolnost patinující oceli typu Corten A byla zjištěna pouze ve specifickém průmyslovém prostředí Ostravy (koksovny). Vyšší korozní agresivita této lokality je také zřejmá z korozních úbytků referenční uhlíkové oceli. Se snížením SO_2 v ovzduší ČR je tvorba ochranné patiny zpomalena a rozdíl po prvním roce expozice mezi běžnou uhlíkovou ocelí a patinující ocelí

je zanedbatelný, jak předpokládají i predikční modely uvedené v ČSN EN ISO 9224 a i jiné modely. Výrazně nižší korozní úbytky patinující oceli Nippon Steel s 3 % Ni ve srovnání s ostatními typy těchto ocelí byly zjištěny ve vlhkém a chladném prostředí Kašperských Hor (Šumava).

Z porovnání korozních úbytků po 1 až 4 letech expozice je zřejmé, že korozní úbytky patinující oceli Nippon Steel s 3 % Ni jsou nižší než u ostatních dvou typů patinujících ocelí v celém rozsahu běžných atmosférických prostředí ČR (Obr. 5 a 6). Rozdíl mezi jednotlivými typy patinujících ocelí je nízký – cca 5 μm . I po 4 letech expozice se výrazně projevilo, že na atmosférické stanici Kašperské Hory jsou korozní úbytky oceli Nippon Steel výrazně nižší než u ostatních dvou typů patinujících ocelí.

Obr. 3. Vrstva korozních produktů patinující oceli (10× zvětšení) a makrostruktura po 1 roce expozice vzorků

Fig. 3. Corrosion products layer on weathering steel (10x magnitude) and their macrostructures after 1 year of exposure

Obr. 4. Vrstva korozních produktů patinující oceli (10× zvětšení) a makrostruktura po 4 letech expozice vzorků
Fig. 4. Corrosion products' layer on weathering steel (10x magnitude) and their macrostructures after 4 years of exposure

Obr. 5. Porovnání ročních korozních úbytků patinujících ocelí v různých typech atmosférického prostředí ČR
Fig. 5. Comparison of annual corrosion mass losses of weathering steels after exposure at different atmospheric environments of CR

Obr. 6. Porovnání korozních úbytků patinujících ocelí v různých typech atmosférického prostředí ČR
Fig. 6. Comparison of corrosion mass losses of weathering steels after exposure at different atmospheric environments of CR

Ze vzorků byla mechanicky sejmuta vrstva korozních produktů. Výsledky rtg. difrakční analýzy jsou uvedeny v Tab. 5 s vypočtenými hodnotami indexu ochranného účinku patiny (PAI, protective ability index) [15]:

$$PAI_{\alpha} = \alpha/\gamma^*$$

kde $\gamma^* = \gamma + \beta + s$, zahrnuje hmotnostní koncentraci α -FeOOH (α), γ -FeOOH (γ), β -FeOOH (β) a Fe_3O_4 (s). Jestliže je poměr $\alpha/\gamma^* > 1$, vrstva patiny je ochranná a korozní rychlost je nižší než $10 \mu m \cdot r^{-1}$. V případě, že poměr $\alpha/\gamma^* < 1$, je nutné vypočítat 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):

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

Horní a dolní křivka v grafu na Obr. 6 je daná rozptylem hodnot korozních úbytků exponovaných vzorků v jednotlivých typech atmosférického prostředí a plocha mezi křivkami vyjadřuje pravděpodobnou hodnotu korozního úbytku.

Roztyp hodnot PAI_{α} je ovlivněn tím, že po 4 letech expozice nejsou patiny ještě zcela ochranné – doba do stabilizace ochranných vlastností patin u těchto ocelí je cca 5-8 let v závislosti na podmínkách expozice.

Výsledky urychlených laboratorních zkoušek

V Tab. 5 jsou uvedeny korozní úbytky patinujících ocelí různého typu ve srovnání s nelegovanou uhlíkovou ocelí. Nižší korozní úbytek oceli Nippon Steel byl zjištěn jak ve zkoušce s nízkou koncentrací SO_2 , tak i v modifikované zkoušce CH.R.L.

V literatuře [16] jsou vedeny výsledky hodnocení korozního napadení patinujících ocelí po 17 letech expozice v atmosférických podmínkách s vysokým vlivem

a) Atmofix

b) Nippon Steel

Obr. 7. Důlkové napadení patinujících ocelí po zkoušce s režimem 3 (3000 h, CH.R.L.)

Fig. 7. Pitting corrosion of weathering steels after test with regime 3 (3000 hrs, CH.R.L.)

Tab. 4. Složení korozních produktů po 4 letech expozice na atmosférických stanicích / Composition of corrosion products after 4 years of exposure at atmospheric test sites

vzorek	fázové složení	PAI_{α}	PAI_{β}
<i>Praha</i>			
Corten A	dominuje lepidokrokrit, zřetelný goethit	0,48	–
Nippon Steel	dominuje lepidokrokrit, zřetelný goethit	1,05	–
uhlíková ocel	dominuje lepidokrokrit, zřetelný goethit	0,73	–
<i>Kopisty</i>			
Corten A	silný goethit a lepidokrokrit	1,33	–
Nippon Steel	silný goethit a lepidokrokrit	2,72	–
uhlíková ocel	dominuje lepidokrokrit, zřetelný goethit	0,75	–
<i>Kašperské Hory</i>			
Corten A	silný lepidokrokrit, zřetelný goethit, magnetit, hematit	0,31	0,52
Nippon Steel	silný goethit a lepidokrokrit	1,19	–
uhlíková ocel	dominuje lepidokrokrit, zřetelný goethit	0,55	–

depozice chloridů – hloubka důlkové koroze byla cca trojnásobkem rovnoměrné koroze. V podmínkách urychlených laboratorních zkoušek se významné důlkové napadení projevilo pouze v urychlené laboratorní korozní zkoušce s režimem 2 (cyklické ponorové zkoušky CH.R.L.), a to již po 500 h expozice. Na rozvoj tohoto typu korozního poškození nemá vliv jen koncentrace chloridů, ale také dostatečný přístup kyslíku. V podmínkách zkoušky s režimem 3 (zkouška NSS) ke vzniku důlků nedošlo, přestože korozní úbytky jsou po 1000 h cca 2,5krát vyšší než v podmínkách ponorové cyklické zkoušky CH.R.L. Nejnižší hloubka důlků byla zjištěna u oceli Nippon Steel s 3 % Ni (200 μm) – Obr. 7.

Složení korozních produktů po urychlených laboratorních zkouškách je uvedeno v Tab. 6. Složení korozních produktů po zkoušce s nízkou koncentrací SO_2 se blíží jejich složení po 4 letech expozice v průmyslovém prostředí stanice Kopisty, ale hodnota PAI_a je výrazně vyšší. Složení korozních produktů z urychlené zkoušky NSS (režim 3) je velmi odlišné i od složení korozních produktů vznikajících v reálných podmínkách dopravních komunikací (výskyt akaganeitu). Tato zkouška není pro reprezentativní pro takovéto prostředí.

Tab. 5. Korozní úbytky v urychlených korozních zkouškách / *Corrosion mass losses after exposure at accelerated corrosion tests*

ocel	korozní úbytek (μm)		
	režim 1	režim 2	režim 3
Atmofix 52B	–	126,0	166,4
Corten A	6,4	–	–
Nippon Steel 3%Ni	4,3	45,8	166,4
uhlíková ocel	6,3	110,2	175,0

Tab. 6. Složení korozních produktů po urychlených laboratorních zkouškách / *Composition of corrosion products after accelerated laboratory tests*

vzorek	fázové složení	PAI_a	PAI_b
<i>režim 1</i>			
Corten A	dominuje goethit, slabý lepidokrokit	6,23	0,001
Nippon Steel	dominuje goethit, slabý lepidokrokit, stopy akaganeitu	1,87	1,00
uhlíková ocel	dominuje goethit, silný lepidokrokit	5,12	-
<i>režim 2</i>			
Atmofix 52B	dominuje magnetit, zřetelný lepidokrokit, slabý goethit	0,017	0,95
Nippon Steel	dominuje magnetit, zřetelný akaganeit, slabý lepidokrokit, goethit	0,10	0,94
uhlíková ocel	dominuje magnetit, zřetelný goethit, lepidokrokit a kalcit	-	-
<i>režim 3</i>			
Atmofix 52B	dominuje magnetit, zřetelný goethit a lepidokrokit, slabý halit	0,10	0,91
Nippon Steel	dominuje magnetit, zřetelný goethit a lepidokrokit	0,22	0,89
uhlíková ocel	dominuje magnetit, silný goethit, zřetelný lepidokrokit a halit	0,58	0,84

ZÁVĚR

Korozní chování nízkolegovaných ocelí se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi je ve SVUOM dlouhodobě sledováno jak na vzorcích na atmosférických stanicích, tak na reálných konstrukcích.

Běžné atmosférické prostředí ČR není ovlivněno depozicí chloridů, ale prostředí v okolí dopravních komunikací - vozovek - je významně ovlivněno posypem solí a zvýšená korozní agresivita se projeví nejen v zimním období, ale i v jiných obdobích, kdy se chloridy deponují na povrchu konstrukcí vlivem sekundární prašnosti. U konstrukcí pozemních komunikací je riziko zvýšeného korozního namáhání specifickým znečištěním vyšší pro konstrukce na úrovni nebo nad úrovní vozovky; v případě mostních konstrukcí pod úrovní mostovky je depozice chloridů nižší.

Korozní úbytky různých typů nízkolegovaných ocelí s vyšší odolností proti atmosférické korozi (patinujících ocelí) po 4 letech expozice v různých atmosférických prostředích ČR vykazují rozdíl v závislosti na legování niklem. Vliv niklu na snížení korozních rychlostí se výrazně projevil na atmosférické stanici Kašperské Hory.

Složení korozních produktů nízkolegovaných ocelí s vyšší odolností proti atmosférické korozi (patinujících ocelí) po 4 letech expozice v různých atmosférických prostředích ČR není vyšším přídavkem niklu významně ovlivněno. Vrstvy korozních produktů po 4 letech expozice ještě nemají ochranné složení – z vyššího podílu goethitu ve vrstvách korozních produktů na atmosférických stanicích Kopisty (průmyslové prostředí), a tedy i vyšší hodnoty PAI , je patrný příznivý vliv vyšších koncentrací SO_2 na vývoj ochranných vlastností patin. Atmosférické zkoušky dále pokračují – plánované jsou odběry po 10 letech expozice.

V podmínkách urychlených laboratorních zkoušek se významné důlkové napadení projevilo pouze v cyklické ponorové zkoušce CH.R.L., a to již po 500 h expozice. Na rozvoj tohoto typu korozního poškození nemá vliv jen koncentrace chloridů, ale také dostatečný přístup kyslíku. V podmínkách zkoušky NSS ke vzniku důlků nedošlo, přestože korozní úbytky jsou po 1000 h cca 2,5krát vyšší než v podmínkách ponorové cyklické zkoušky CH.R.L.

Poděkování

Publikované výsledky jsou součástí řešení projektů MPO FT-TA5/076-2009, TA ČR 02021165 a GAČR 13-16124P.

LITERATURA

1. M. Morcillo, B. Chico, I. Díaz, H. Cano, D. de la Fuente: Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review, *Corrosion Science* **2013**, 77, 6-24.
2. P.H. Copson: A Theory of the mechanism of Rusting of Low Alloys Steels in the Atmosphere, proceedings ASTM 45, 1945, pp. 554-81.
3. C.P. Larrabee: Corrosion resistance of High-Strength, Low-Alloy Steels As influenced by Composition and Environment, *Corrosion* **1953**, 259-271.
4. J.B. Horton: Rusting of low-alloyed steel in the atmosphere, reg. Tech. Meet. Am. Iron Steel Inst., 1965, p. 171.
5. D. Knotková et al., UN ECE ICP Report No 22: Corrosion attack on weathering steel, zinc and aluminium. Evaluation after 8 years of exposure, zpráva SVÚOM, 1998.
6. J. Gulmann, D. Knotková, V. Kučera, P. Swartling, J. Vlček: Weathering steels in building – cases of corrosion damage and their prevention (booklet), Swedish Corrosion Institute, National Institute for Protection of Materials, Stockholm, 1985.
7. V. Kučera, P. E. Augustsson, D. Knotková, L. Rozlívka: Experience with the use of weathering steels in constructions in Sweden and in the Czech Republic, International workshop on atmospheric corrosion and weathering steels, Sept. 2004, Cartagena de Indias (Colombia).
8. Kreisllová, K. et al.: Vliv environmentálních a konstrukčních podmínek na korozní chování konstrukcí z ocelí se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi. *Konstrukce* **2010**, 9 (6), 41-45.
9. Kreisllová, K., Křivý, V., Rozlívka, L., Knotková D.: *Směrnice pro používání ocelí se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi*, SVÚOM.Praha, 2010, ISBN 978-80-87444-05-4.
10. K. Kreisllová, D. Knotková: Použití patinujících ocelí v architektuře, ISBN 978-80-87444-10-8, SVÚOM.Praha, 2011.
11. X. H. Chen, J. H. Dong, E. H. Han, W. Ke: Effect of Ni on the ion-selectivity of rust layer on low alloy steel. *Material Letters* **2007**, 61, 4050-4053.
12. A. Tahara, T. Shinohara: Influence of the alloy element on corrosion morphology of the low alloy steels exposed to the atmospheric environments, *Corrosion Science* **2005**, 47, 2589-2598.
13. C. L. Zhang, D. Y. Cai, B. Liao, T. C. Zhao, Y. C. Fan: A study on the dual-phase treatment of weathering steel 09CuPCrNi, *Material Letters* **2004**, 58, 1524-1529.
14. T. Nishimura: Rust formation and corrosion performance of Si- and Al-bearing ultrafine grained weathering steel; *Corrosion Science* **2008**, 50, 1306-1312.
15. T. Kamimura, S. Hara, H. Miuyki, M. Yamashita, M. Uchida, Composition and protective ability of rust layer formed on weathering steel exposed to various environments, *Corrosion Science* **2006**, 48, 2799-2812.
16. Application of Weathering Steel to Bridges, The Japan Iron and Steel Federation and the Japan Bridge Association, 2003.