

CYKlickÉ ZATĚŽOVÁNÍ ZINKOVANÝCH SOUČÁSTÍ

M. Černý, J. Filípek, P. Mazal

Došlo: 20. září 2009

Abstract

ČERNÝ, M., FILÍPEK, J., MAZAL, P.: *Dynamic loading of galvanized parts*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2010, LVIII, No. 1, pp. 33–42

This work is divided into two parts: the theoretical part includes actual knowledge and points of view about degradation processes in construction materials, anticorrosion protection, zinc coat composition and high frequency fatigue. The laboratory part follow-up existing regulations contents Czech standards and formulate specifications for acquisition of objective information from acceleration laboratory tests in condensation chests, mechanical high frequency fatigue tests on pulsator machine and possibilities of evaluation of fatigue tests. Laboratory findings declare to fundamental types of damage of constructions with anticorrosion protection in real loading conditions with dynamic high frequency character. Laboratory tests were made in sulphide and chloride environments.

zinc coat, fatigue, corrosion

Samovolně probíhající nevratný a nežádoucí proces postupného rozrušování a znehodnocování materiálů následkem chemické, elektrochemické, případně biologické reakce s okolním prostředím je nazýván koroze (Porter, 1991). Znehodnocení je nevratné a není výsadní degradací jen kovových materiálů, ale i plastů a dalších biologických látek.

Slitiny železa na vlhkém vzduchu nebo ve vodě ztrácejí svůj lesk a pokrývají se žlutohnědým hydroxidem železitým. Žárové pokovení ponorem ocelových výrobků do roztaveného zinku je jedním z nejstarších a nejrozšířenějších způsobů vytváření kovových povlaků. Touto metodou lze vytvořit ochranné vrstvy proti korozi o dostatečně velkých tloušťkách a s malou pórovitostí povlaku. Se snižováním hmotnosti strojů a ocelových konstrukcí souvisí vzrůst napětí a deformací, ke kterému v částech těchto zařízení dochází. Tak např. proces únavy způsobuje vznik trhlin, porušení a celkové snížení životnosti namáhané části nebo konstrukce (Veles, 1985).

DEGRADAČNÍ PROCESY V KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLECH

Jednotlivé součástky i celé výrobní komplexy, jako např. linky v rámci petrochemie či jaderné elektrárny, jsou zpravidla podrobovány účinku napětí, tepelné a chemické degradace, což vede ke změnám ve struktuře použitých materiálů a následně i k nežádoucím změnám jejich vlastností. Z toho pramení ohrožení bezpečnosti a spolehlivosti nejen jednotlivých součástí, ale i celého strojního zařízení. Následkem může představovat i totální selhání funkce a ekonomické i společenské kolapsy.

Mezi nejčastěji se uplatňující degradační změny patří zkřehnutí materiálu, únavové poškození, nadměrné opotřebení, koroze apod. Zpravidla dochází k synergickému působení degradačních mechanismů.

Degradační procesy způsobené korozi

Mimo mechanického namáhání je konstrukční materiál vystaven i působení agresivního prostředí, jehož účinek se projevuje korozi. Se samovolností procesu koroze souvisí i pokles volné entalpie soustavy v důsledku probíhajících korozních reakcí. Podle charakteru, resp. mechanismu korozních dějů zpravidla rozlišujeme korozi chemickou a korozi elektrochemickou. V případě korozní únavy je vliv obou typů koroze degradujícím faktorem (Ptáček et al., 2002).

Zinkové ochranné povlaky

Zinek má měrnou hmotnost $7,13 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$, bod tání $419,5^\circ\text{C}$ a bod varu 906°C . Je odolný proti povětr-

nostním vlivům, přičemž na suchém vzduchu je poměrně stálý a na vlhkém vzduchu vytváří povlak zásaditého uhličitánu, který chrání zinek před další korozí. Kyselinám i zásadám odolává málo. Zinek zaujímá mezi kovovými povlaky dominantní postavení pro svou relativně nízkou cenu a dobré korozní vlastnosti. Poskytuje ocelovému podkladu protikorozi ochranu v běžných atmosférických podmínkách svým bariérovým efektem i elektrochemickým účinkem. Při korozí vznikající oxidy a soli vytvářejí na povrchu pasivační vrstvu utěsňující póry povlaku a zabráňující korozí základního materiálu. Díky svému anodickému charakteru poskytuje zinek při atmosférické korozí relativně dobrou ochranu střížným hranám ocelového plechu a při drobných mechanických poškozeních povrchu. Životnost zinkového povlaku je úměrná jeho tloušťce bez ohledu na způsob jeho přípravy a agresivitu atmosféry.

Ponorem oceli do roztaveného zinku při typických zinkovacích teplotách (450–490 °C) proběhne vzájemná reakce železa a zinku za vzniku tuhých roztoků a intermetalických fází:

- Fáze α – tuhý roztok zinku v železe
- Fáze γ – $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$
- Fáze δ_1 – FeZn_{10}
- Fáze ζ – FeZn_{13}
- Fáze η – v podstatě povlak čistého zinku.

S rostoucí teplotou a dobou ponoru narůstá i tloušťka povlaku. Tento nárůst se postupně zpomaluje. Výjimku tvoří pouze oceli s obsahem Si 0,06–0,12%, kde k tomuto zpomalení růstu nedochází. S rostoucí dobou ponoru dochází ke zvýraznění maxima vlivu obsahu křemíku na tloušťku povlaku (Jordan, Marder, 1997, Zmrzlý et al.; 2004).

Únava materiálů

Únava materiálu je postupná akumulace poškození vlivem mechanického, tepelného nebo mechanicko-tepelného zatěžování pulzního charakteru, které vede ke změnám vlastností, ke vzniku a růstu trhlin a k porušení materiálu. (Skálová et al., 2003).

Podle počtu kmitů je možno cyklické zatěžování, resp. únava rozdělit do následujících skupin.

- a) Opakované statické přetěžování – životnost do 10^2 kmitů.
- b) Nízkocyklová únava – životnost do 10^5 kmitů. Vzniká při opakovaném namáhání nad mezí kluzu v podmínkách, kdy dochází k výrazným opakovaným plastickým deformacím v makroobjemu materiálu. O životnosti součástí rozhoduje rychlost šíření únavové trhliny.
- c) Vysokocyklová únava – životnost nad 10^5 kmitů. Vzniká v podmínkách převážně elastických opakovaných deformací (pokluzech). Napětí je vždy pod mezí kluzu. Predikce životnosti ocelové součásti je tak úzce spjata s okamžikem vytvoření povrchového reliéfu, iniciací primární mikrotrhliny a jejím postupem podél skluzových rovin (cca 45° ke směru hlavního napětí). V okamžiku, kdy trhlinka dosáhne jisté velikosti, dojde ke změně směru jejího šíření (cca 90° k nominál-

nímu napětí) a následně k náhlému lomu tvárným, resp. křehkým porušením.

Podstata únavového poškození – každý materiál je nehomogenní a neizotropní. Konstruktivní materiály jsou složeny z malých zrn. Ani uvnitř zrna nejsou vlastnosti izotropní vlivem různé orientace krystalových rovin. Nehomogenita materiálu není způsobena jen strukturou hranic zrn, ale také shluky vakancí nebo přítomností intersticií, dislokacemi a vměstky. Několik fází a hranice mezi nimi nebo oblasti s různým chemickým složením také představují zóny nehomogenity. Oblasti, kde vlivem těchto nehomogenit dochází ke zvýšení napětí, jsou místa nukleace únavového porušování. U houževnatých materiálů, které mají vhodnou orientaci vzhledem k působícímu napětí v průběhu zatěžování, začínají v zrnech vznikat skluzové pásy jako projev lokalizace plastické deformace. Počet skluzových pásů roste s počtem zatěžovacích cyklů. Dochází k tzv. nasycení. Ve skluzových pásích se iniciují i mikrotrhliny, které rostou v rámci hostitelských zrn a postupným spojením přeroste jedna z nich v magistralní trhlinku. U materiálů, které mají omezenou houževnatost, je mikrostrukturální poškození méně rozšířené a má snahu se koncentrovat do okolí defektu. Malé trhliny se iniciují v okolí inkluzí skluzových pásů, hranic zrn nebo povrchových defektů. Velké magistralní trhliny rostou pak ve směru kolmém na hlavní napětí. Únavové chování materiálu je určeno akumulací cyklické plastické deformace, tedy typem nevratných změn, ke kterým v materiálech dochází v průběhu cyklického zatěžování.

V důsledku vzniku a akumulace cyklické plastické deformace se mění rozložení a hustota dislokací v materiálu. Materiál mění svoje mechanické vlastnosti, cyklicky se změkčuje nebo zpevňuje.

Stadium vzniku únavových trhlin – V důsledku pokračující akumulace cyklické plastické deformace dochází na povrchu vzorku ke koncentraci napětí a deformaci v okolí koncentrátorů napětí a ke vzniku prvních mikrotrhlin v těchto místech. Tento proces je omezený jen na malou část objemu vzorku.

Stadium šíření únavových trhlin – Vzniklé mikrotrhliny rostou, přičemž z důvodu nerovnoměrného rozložení napětí a deformací se z některé z nich stane řídící (magistralní) trhlinka. Při překročení statického napětí ve zbylé části vzorku nastane finální lom (Machek, Sodomka; 2001).

MATERIÁL A METODY

Zkušební vzorky

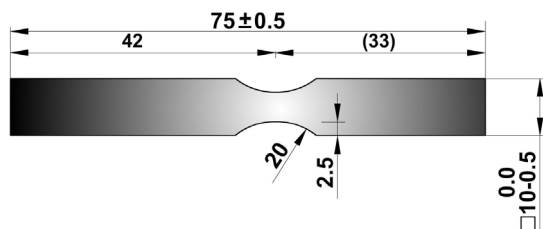
Zkušební vzorky byly vyrobeny z nelegované konstrukční oceli 11 373 (ČSN 41 1373). Ocel je vhodná na součásti konstrukcí a strojů menších tlouštěk i tavně svařovaných, namáhaných staticky i mírně dynamicky. Jako polotovary byla použita čtvercová tyč válcovaná za tepla se zvýšenou přesností o průřezu 10×10 mm (ČSN 42 5520).

Na vzorcích se vyfrézoval rádius pro usměrnění vzniku trhliny. Koncentrace napětí v zúženém prů-

I: Směrné chemické složení a mechanické vlastnosti oceli 11 373

I: Indicative chemical structure and mechanical properties of steel 11 373

Chemické složení			Mechanické vlastnosti		
C_{\max}	P_{\max}	S_{\max}	R_e	R_m	A_5
	%		MPa		
					%
0,17–0,20	0,045–0,05	0,045–0,05	235	360–470	26



1: Zkušební vzorek

1: Test sample



b – zkouška solnou mlhou

b – salt spray test

a – zkouška oxidem siřičitým
a – sulfur dioxide test

2: Kondenzační komory

2: Condensation chambers

řezu odpovídala přibližně 7%. Následně byl na vzorcích vytvořen povlak žárovým zinkováním tloušťky 50–70 μm (Obr. 1).

Korozní prostředí

Ocelové pozinkované zkušební vzorky byly exponovány ve dvou typech kondenzačních komor používaných k zjišťování odolnosti nátěrových hmot (Obr. 2).

Zkouška odolnosti vlhkým atmosféram s obsahem oxidu siřičitého (ČSN EN ISO 3221) je cyklická a zahrnovala:

- uložení zkušebních vzorků do stojanů v kondenzační komoře, naplnění komory 2 l demineralizované vody, uzavření zkušební komory, nadávkování oxidu siřičitého 0,2 l při atmosferickém tlaku, zapnutí vytápění (40 °C) po dobu 8 h, odvětrávání 4 h, po dalších 12 h se zkušební cyklus opakuje.

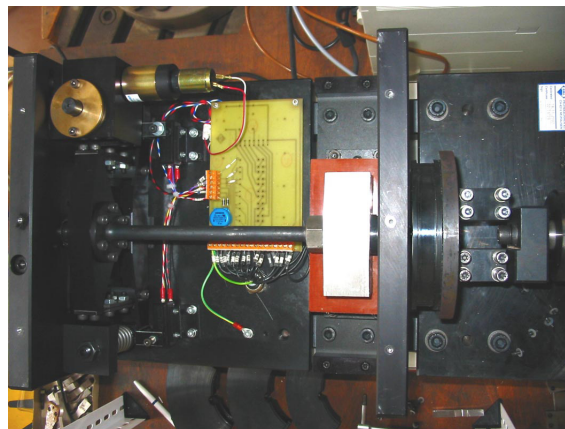
Zkouška odolnosti v neutrální solné mlze ČSN EN ISO 7253 je nepřetržitá a proběhla za těchto podmínek:

- teplota 35 °C, relativní vlhkost 100%, koncentrace solného roztoku 50 g/l, dávkování rozprášeného solného roztoku 0,5 l/h, úhel sklonu vzorků od kolmice 20°.

Doba expozice v obou kondenzačních komorách byla stanovena na 7, 14, 28 dní (168, 336, 672 hodin).

Únavové zkoušky

Základní únavové vlastnosti byly sledovány na elektrozonančním pulzátoru RUMUL Cracktronic (Obr. 3). Na tomto zařízení je možno určit po-



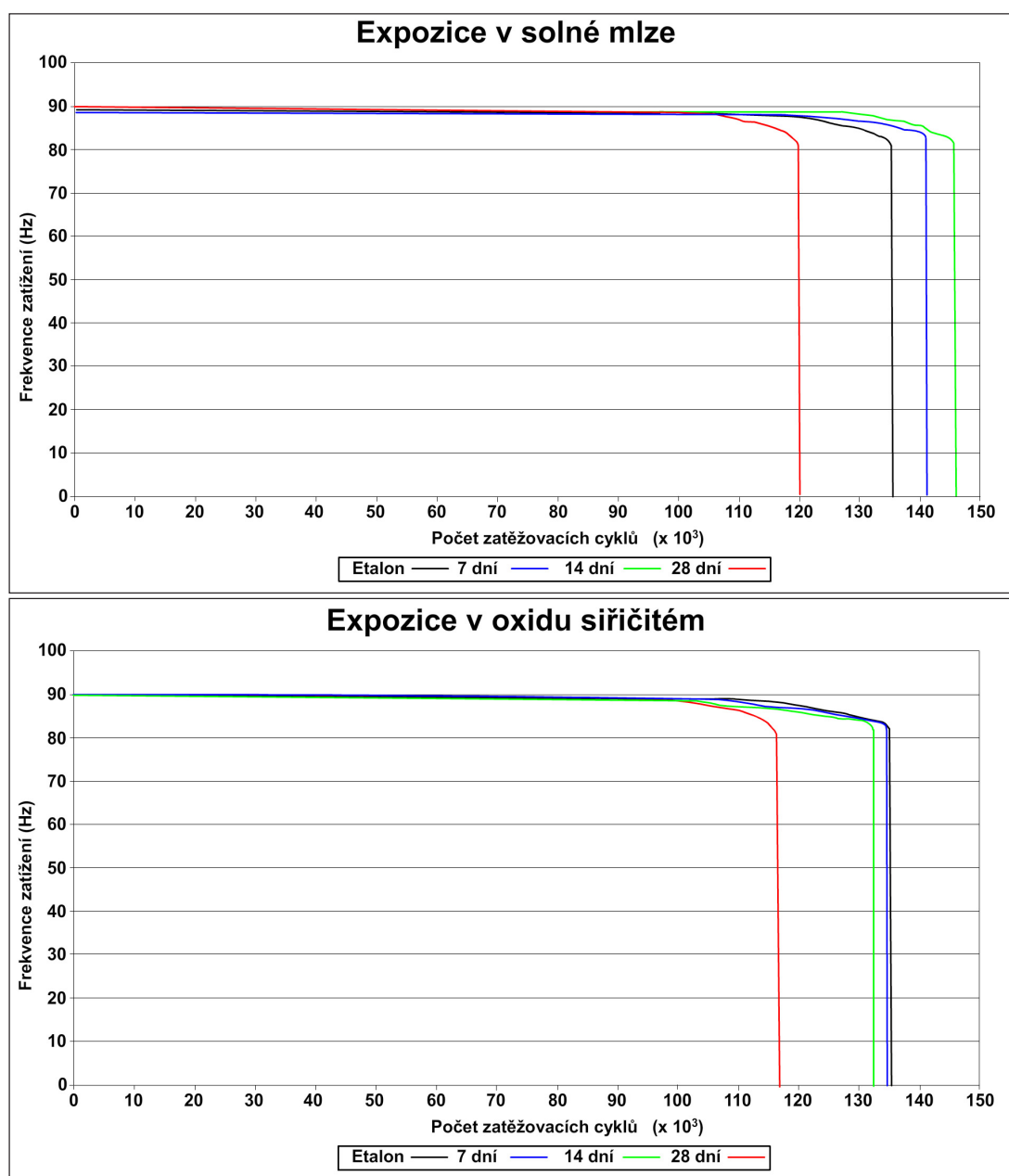
3: Elektrozonanční pulzátor

3: Electroresonant pulsator

čet cyklů do lomu a mez únavy materiálu. Pro detailnější popis únavových vlastností je nezbytné určit i okamžik vzniku mikrotrhlin a sledovat rozvoj šíření trhlin. Tento pulzátor pracoval v podmínkách plochého ohybu. Vzorky byly zatěžovány souměrným střídavým cyklem. Nejdříve bylo nutné zjistit optimální velikost ohybového napětí tak, aby nedošlo k příliš rychlému šíření trhliny. Malé zatížení zvýší počet zatěžovacích cyklů, zároveň však dojde k pomalejšímu růstu trhliny. Ohybové napětí bylo nastaveno na hodnotu 18 Nm (což odpovídá napětí max. 432 MPa), tedy 12 až 14% zatížení vzorků. Frekvence zatěžování vzorků se pohybovala v rozmezí 88–89 Hz.

VÝSLEDKY

U vysokocyklové únavy se výrazně zvyšuje význam nukleačního stadia na úkor druhého stadia, kterým je šíření trhliny. Hranici mezi oběma stadii lze ovlivnit amplitudou deformace nebo amplitudou napětí. Pro oba přístupy platí rozdílné popisy kumulace poškození. Volená hodnota zátěžné amplitudy napětí (ohybový moment –18 Nm) byla vybrána s ohledem na zdůraznění vzniku perzistentních skluzových pásem, ve kterých je iniciována mikrotrhlina. Ze závislosti frekvenčního zatížení a počtu zátěžových cyklů (Obr. 4) je vidět, že iniciace poškození je u obou korozních prostředí mírně odlišná. U vzorků degradovaných v prostředí solné



4: Únavové poškození vzorků v závislosti na době expozice a korozním prostředím

4: Fatigue damage of the samples depending on the period of the exposition and the corrosion environment

mlhy je po statickém vyhodnocení patrný nárůst odolnosti žárově zinkovaných povrchů. I když rozdíl v počtu zatěžných cyklů není výrazný, je zřejmý efekt pozdější iniciace trhliny u vzorků po sedmidenčním a čtrnáctidenním korozním působení. Následný pokles po delší exploataci (28 dní) je v porovnání s etalonem výraznější. U vzorků umístěných v kryptoprostředí s SO_2 se náchylnost k nukleaci mikrotrhliny zvyšuje s rostoucí dobou působení korozního prostředí. V porovnání s etalonem je na obr. 4 zřejmý mírný pokles počtu cyklů do okamžiku vzniku poškození, který se projevuje poklesem nastavené frekvence pulzátoru.

Vysvětlení uvedeného efektu je s použitím známů o průběhu zkoušky pouze spekulativní. Záznamy je nutné konfrontovat s výsledky pozorování vizuálního (makroskopického) a zvláště pak lomové plochy, resp. metalografických snímků.

Vizuální verifikace

Snímky zkušebních vzorků po jednotlivých odběrech 7, 14 a 28 dní (Obr. 5) vykazují typické degrační poškození zinkových povlaků. U vzorků z působení solné mlhy lze pozorovat nárůst složité směsi látek, které se zřejmě liší svojí rozpustností, vodivostí a kompaktností. Většinou se jedná o zpočátku ochranné bazické soli – chloridy, které při vysokých koncentracích a vlhkosti ztrácejí ochranné vlastnosti a svoji nerozpustnost. Rychlost koroze rychle stoupá a je srovnatelná s korozní rychlostí oceli. O hloubce průniku koroze svědčí porovnání odebraných a mechanicky očištěných vzorků (Obr. 5).

Vliv prostředí SO_2 je patrný z rostoucího zešednutí zinkového květu, které svědčí o zvýraznění reliéfu povrchu vzorku. V tomto případě není pozorován nárůst bílé koroze ani červené rzi jako u vzorků ze solné mlhy (Obr. 5).

Fraktografické pozorování

Dolomení vzorků s únavovými trhlinami v kapalném N_2 umožnilo fraktografické pozorování.

Makroskopické snímky lomové plochy v případě etalonu (Obr. 6) nepřinášejí nové poznatky o vlivu žárového povlaku na iniciaci únavové trhliny. K delaminaci zinkové vrstvy většinou nedochází (Obr. 6a). V ojedinělých případech (Obr. 6b) je ztráta přilnavosti v místech výskytu zhoršení struktury povrchu (stopy po nástroji). V těchto případech se vyskytuje méně pozorovatelný jev – nukleace a šíření dvou únavových trhlin. Etalon s tímto vzhledem lomové plochy byl z dalšího rozboru vyřazen.

Po delší expozici vzorku v SO_2 k iniciačním místům lze jednoznačně přiřadit poškození Zn povlaku v místech materiálových nehomogenit (Obr. 7). Delaminace nebyla pozorována.

Korozně agresivní prostředí NaCl se projevuje nejen eliminací efektu zinkové ochrany (povlak zinku je nesouvislý nebo chybí), ale i napadením povrchu vzorku (Obr. 8a). To může být příčinou částečné eliminace vlivu povrchu na nukleaci únavové trhliny. Po delší expozici byla pozorována iniciace mikrotrhliny v místech výskytu bílé (14 dní – obr. 8b)

a později červené koroze (kde již patrné místní korozní napadení vytváří podmínky pro rozvoj perzistence).

Hodnocení světelnou mikroskopií











Pro sledování makroskopického složení zinkové vrstvy se pozorování provedlo jen na leštěných površích bez naleptání.

To potvrdilo porušení přilnavosti zinkového povlaku téměř u všech snímků vzorků z NaCl. V prostředí SO_2 jde jen o snižování tloušťky vrstvy, která zůstává v adhezivním stavu (Obr. 9a, b). Rovněž pórovitost povlaku se zvyšuje s dobou expozice (Obr. 9).

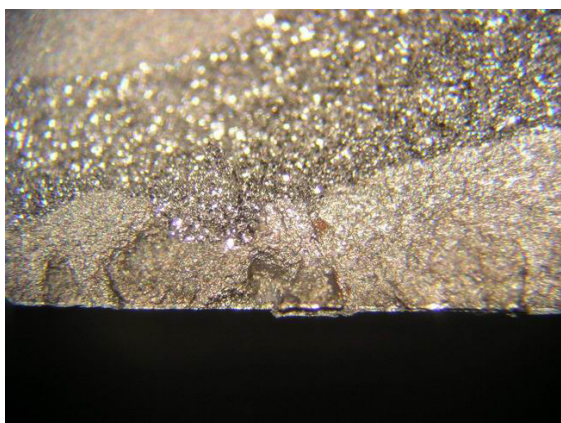
Zmíněná místní delaminace Zn v prostředí NaCl roste s výskytem chloridových vrstev. Ty jsou zpočátku kompaktní a patrně i odolné proti postupu koroze (Obr. 10a). S rostoucí délkou expozice nastává pokles odolnosti vrstev (bílá rez). Průnik koroze v důsledku působení agresivního prostředí mezi ocel a zinkový povlak rozvoji korozního napadení se projevuje první fází vyrovnáním povrchového reliéfu po obrábění (Obr. 10b). Po delší expozici (Obr. 10c – 28 dní) se již jedná o nukleaci únavové trhliny v oceli, u které mohou perzistence vznikat přímo v místech korozního napadení lokálním typem korozního poškození (Obr. 10c). Z obrázku je patrná jak tloušťka vrstvy rzi na zinkovém povlaku, tak i jeho separace a ztráta přilnavosti vlivem korozních produktů pod vrstvou Zn.

DISKUSE

Uvedené výsledky ukazují na základní typy poškození konstrukcí s antikorozním povlakem v podmínkách reálného zatěžování s dynamickým vysokocyklovým charakterem. Ve vlhkých prostředích s obsahem SO_2 není vliv předchozí, resp. postupné degradace povrchu natolik markantní jako u chloridového prostředí, ale růst výraznosti reliéfu přispívá ke snadnějšímu vytváření perzistentních skluzových pásů a tedy i k tvorbě intruzí, které jsou prvním krokem při nukleaci mikrotrhlin. U chloridů se projevuje aktivní přestup iontů Cl^- a zdánlivě pozitivní úloha úvodního korozního napadení. Tento efekt však záhy mizí a při dlouhodobější expozici vlivem místního napadení vytváří energetické podmínky pro rozvoj porušení konstrukce pod synergetickým působením koroze a únavy. Porušení degradovaného materiálu akceleruje zvláště v okamžiku adice stochastického dynamického namáhání, které rychle rozvine již existující mikroporušení do stadia šíření únavové trhliny a následně i možné fragmentace objektu.

<p style="text-align: center;">Etalon</p> 		
<p style="text-align: center;">Vzorky exponované v korozních komorách</p>		
<p style="text-align: center;">Zkouška solnou mlhou ČSN EN ISO 7253</p>		<p style="text-align: center;">Zkouška oxidem siřičitým ČSN EN ISO 3231</p>
<p style="text-align: center;">vzorky odebrané</p> 	<p style="text-align: center;">vzorky mechanicky očištěné</p> 	<p style="text-align: center;">vzorky odebrané</p> 
	<p style="text-align: center;">expozice 7 dní</p> 	
	<p style="text-align: center;">expozice 28 dní</p> 	

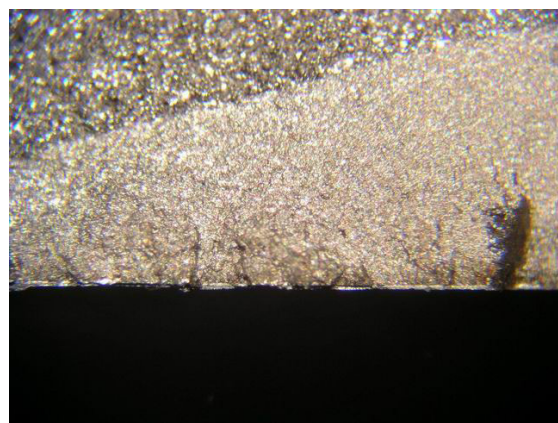
5: Vizuální verifikace korozního poškození zkušebních vzorků
5: Visual verification of the corrosion damage of the test samples



a – bez delaminace Zn povlaku
a – without the delamination of the Zn coating

6: Lomová plocha etalonu

6: Fracture surface of the standard

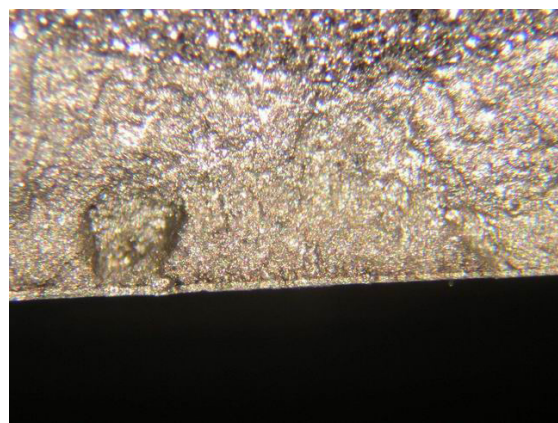


b – s delaminací Zn povlaku
b – with the delamination of the Zn coating



7: Lomová plocha vzorků exponovaných sedm dní v SO_2

7: Fracture surface of the samples exposed 7 days in the sulfur dioxide environment



SOUHRN

Předkládaná práce objektivně řeší problematiku synergického spolupůsobení únavy ocelového materiálu s antikoročním povlakem v podmínkách vlhkých agresivních prostředí chloridů a oxidů na bázi síry.

Práce je rozčleněna na část obecnou, která představuje kompilační syntézu stávajících poznatků v této, z celkového pohledu velmi interdisciplinární, oblasti a na část experimentální, ve které je nastíněn jeden z možných verifikačních postupů celé problematiky.

V úvodní části jsou přínosnými informacemi popisující:

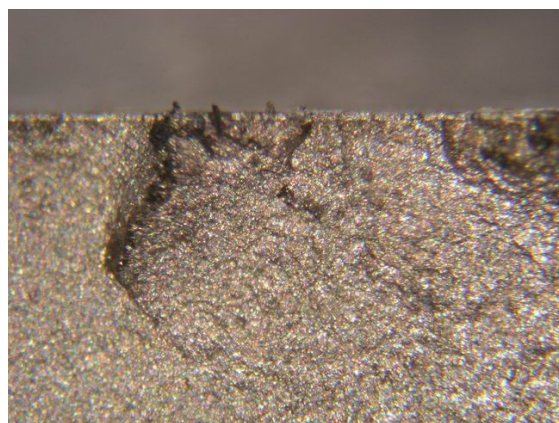
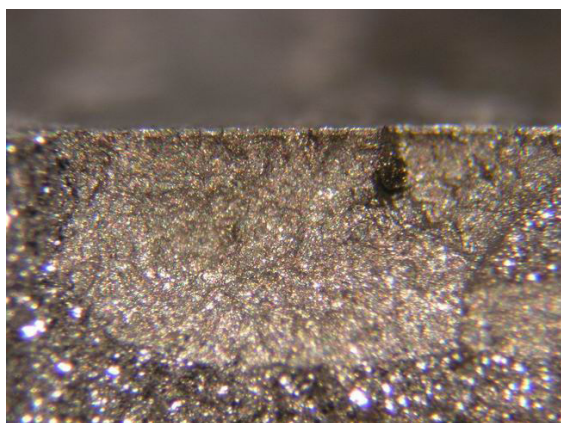
- degrační procesy z hlediska korozního napadení,
- detailní složení zinkových povlaků,
- zákonitosti při dynamickém namáhání materiálů.

Experimentální část práce vytváří podmínky pro získání objektivních údajů z:

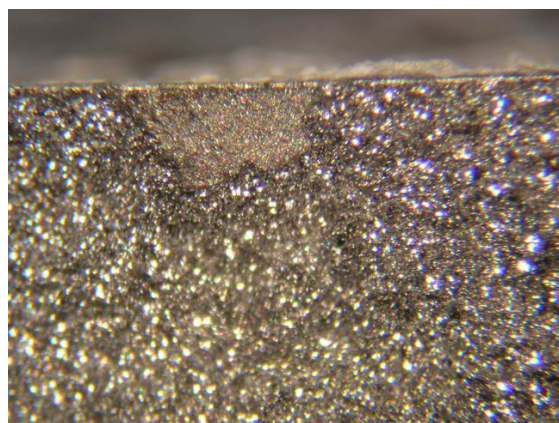
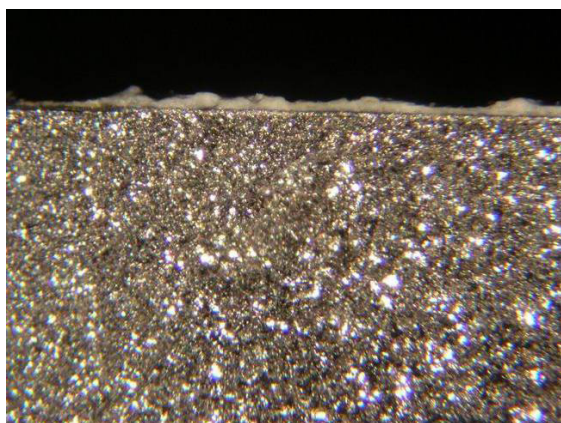
- urychlených laboratorních zkoušek v kondenzačních komorách se solnou mlhou a oxidem siřičitým u vzorků s netypickým tvarem z hlediska korozního hodnocení,
- mechanických zkoušek vysokocyklovou únavou na pulzačním stroji s napětovým působením v ohybu,
- možnosti vyhodnocení únavových zkoušek, aplikace vizuální verifikace výsledků mechanických zkoušek metodou praktické fraktografie a světelné metalografie s upozorněním na možnost vzniklých artefaktů.

Přínosem práce je poukázání na riziko akcelerace poškození strojních konstrukcí z pohledu synergie zdánlivě nesouvisejících degračních jevů vysokocyklové únavy a koroze.

zinkový povlak, únavu materiálu, koroze



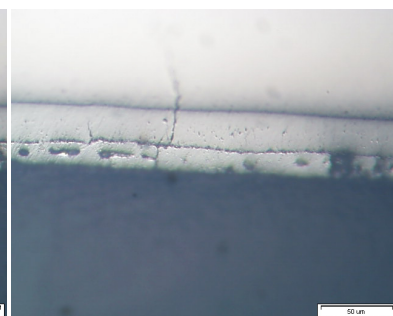
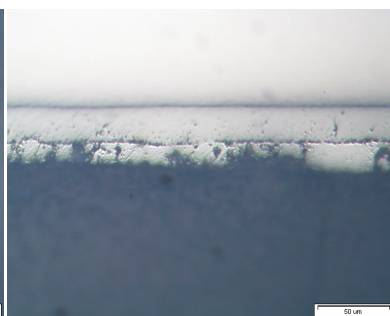
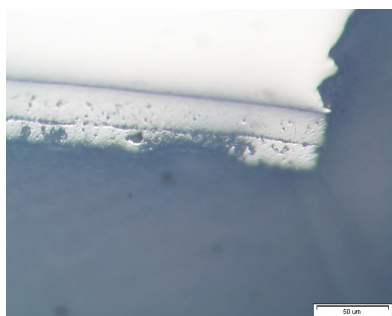
a – doba expozice 7 dní
a – 7 days period of the exposition



b – doba expozice 14 dní
b – 14 days period of the exposition

8: Lomová plocha vzorků exponovaných v NaCl

8: Fracture surface of the samples exposed in the NaCl environment



a – 7 dní
a – 7 days

b – 14 dní
b – 14 days

c – 28 dní
c – 28 days

9: Metallografický výbrus z prostředí s SO_2

9: Metallographic cross section in the SO_2 environment

SUMMARY

The work is objectively dealing with the problematic of synergetic co-acting of fatigue of the steel material with anti-corrosion coating in the wet and aggressive environment of sulphur based chlorides and oxides.

The work is divided into several parts. The general introducing part represents compiling synthesis of present state of knowledge in this highly interdisciplinary area. Experimental part outlines and ex-



a – 7 dní
a – 7 days

b – 14 dní
b – 14 days

c – 28 dní
c – 28 days

10: Metalografický výbrus z prostředí s NaCl

10: Metallographic cross section in the NaCl environment

plains one of the possible verification methods of this problematic. Introductory part contains summarizing information describing following topics:

- degradation processes resulting from corrosion attack,
- detailed description of zinc coats composition,
- rules of dynamic loading of materials.

Experimental part creates conditions for obtaining objective data and results from following experiments:

- accelerated laboratory tests for corrosion behavior of atypically shaped specimens exposed in the condensation chambers with salt aerosol and sulphur dioxide, mechanical tests including high cycle fatigue testing on the pulsating machine creating bending stress,
- possibilities of fatigue test evaluation and application of visual verification of mechanical tests results using practical fractography and light metallography with remarking of possibilities of artifacts development.

The work brings a valuable information and notice of risk of machine and construction parts damage acceleration evolved by apparently unrelated degradation effect such as high cycle fatigue and corrosion.

LITERATURA

- JORDAN, C. E., MARDER, A. R., 1997: Fe-Zn phase formation in interstitial-free steels hot-dip galvanized at 450°C, Part 1. *J MaterSci* 32.
- KLESNIL, M., LUKÁŠ, P., 1975: *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. 1. vyd. Praha: ACADEMIA, 222 s.
- MACHEK, V., SODOMKA, J., 2001: *Nauka o materiálu: kovy a kovové materiály – 1. část*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 207 s. ISBN 80-01-02424-5.
- PORTER, F. C., 1991: *ZINC HANDBOOK*, 1. vyd. NEW YORK: Marcel Dekker, s. 629. ISBN 0824783409.
- PTÁČEK, L., 2002: *Nauka o materiálu II*, 2. vyd. Brno: CERM, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R., BENEDIKT, V., 2003: *Základní zkoušky kovových materiálů*. 3. vyd. Plzeň: ZČU, 178 s. ISBN 80-7082-623-1.
- VELES, P., 1985: *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, s. 401.
- ZMRZLÝ, M., SCHWEISS, O., FIALA, J., HOU-BAERT, Y., 2004: Mössbauer spectroscopy of galvanized zinc coatings removed from substrate steel, proceedings of the 13th International Metallurgical and Materials Conference METAL 2004. Hradec nad Moravicí.

Adresa

doc. Ing. Michal Černý, CSc., Ústav techniky a automobilové dopravy, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika a Ústav konstruování Vysokého učení technického v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika, doc. Ing. Josef Filípek, CSc., Ústav techniky a automobilové dopravy, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, doc. Ing. Pavel Mazal, CSc., Ústav konstruování, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

