



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTROTECHNOLOGY

ZHODNOCENÍ VYUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍ METODY AKUSTICKÉ EMISE NA MATERIÁLECH

EVALUATION OF THE USE OF NON-DESTRUCTIVE METHODS OF ACOUSTIC EMISSION ON MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER THESIS

AUTORPRÁCE

AUTHOR

Ing. et Bc. Simona VAŠÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš BINAR, Ph.D.

BRNO 2022



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Studentka: Ing. et Bc. Simona Vašíková

ID: 152297

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Zhodnocení využití nedestruktivní metody akustické emise na materiálech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Objasněte princip a využití nedestruktivní metody akustické emise v různých oblastech průmyslu. Experimentálním měřením vyhodnotte využití metody akustické emise pro hodnocení působení koroze v materiálech. Laboratorní výzkum doplňte metalografickou analýzou pro hodnocení šíření korozních trhlin v materiálu. V závěru uveďte doporučení pro další výzkum a případné návrhy pro experimentální měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 25.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá pojmem a jevem akustické emise a metodou nedestruktivního zkoušení kovových materiálů pomocí signálů akustické emise. Dále se zaměřuje na korozi kovových materiálů a její základní druhy podle několika hledisek. Rovněž jsou zde ve zkratce nastíněny základní možnosti ochrany kovových materiálů proti korozi a korozní zkoušky. Práce se také věnuje využití metody akustické emise u koroze různých kovových materiálů, a to na konkrétních praktických příkladech z oblasti automobilového, leteckého, potravinářského a výrobního průmyslu včetně stavebnictví. Experimentální část je zaměřena na kontinuální sledování koroze vzorků v kondenzační komoře po stanovenou dobu a rovněž se věnuje výběru a charakteristikám vybraného zkušebního materiálu (šedá litina), přípravě vzorků, metalografickému rozboru a akustické emisi včetně vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova

akustická emise, kontinuální měření, koroze materiálů, koroze litiny, metalografie, šedá litina, litina s lupínkovým grafitem.

Abstract

This master thesis is about acoustic emission itself and acoustic emission as a nondestructive method of testing materials. There are different types of metal materials corrosion too. In this thesis is possible also find corrosion protective methods. There are practical examples of use the acoustic emission method at metal materials corrosion from automotive, aviation, food processing and manufacturing industry with construction and civil engineering examples. The experimental part is focused on samples preparing and measuring the acoustic emission signals during continual corrosion process of grey cast iron in condensational corrosion chamber. These results are supported and completed with metallographic analysis.

Keywords

acoustic emission, continual measuring, material corrosion, cast iron corrosion, metallography, grey cast iron.

Bibliografická citace

VAŠÍKOVÁ, Simona. *Zhodnocení využití nedestruktivní metody akustické emise na materiálech* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142000>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Tomáš Binar.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Simona Vašíková
VUT ID studenta:	152297
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2021/2022
Téma závěrečné práce:	Zhodnocení využití nedestruktivní metody akustické emise na materiálech

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 18. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomáši Binarovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a připomínky při zpracovávání této práce.

V Brně dne: 18. května 2022

podpis autora

OBSAH

Úvod	11
1 Akustická emise	12
1.1 Akustická emise jako fyzikální termín	12
1.2 Metoda akustické emise	13
1.2.1 Základní pojmy a princip	13
1.2.2 Kaiserův a Fellicity jev	14
1.2.3 Základní rozdělení signálů AE	15
1.2.4 Fáze průběhu procesu měření akustické emise	16
1.2.5 Vyhodnocování signálů akustické emise	18
1.2.6 Rušivé zdroje AE	18
1.2.7 Výhody a nevýhody metody AE	19
2 Koroze v kovových materiálech	20
2.1 Koroze dle vnitřního mechanismu a druhu chemické reakce	20
2.1.1 Chemická koroze	20
2.1.2 Elektrochemická koroze	20
2.2 Koroze dle působícího prostředí	20
2.2.1 Atmosférická koroze	20
2.2.2 Koroze v kapalinách a půdní koroze	21
2.3 Koroze dle vlivu vnějších činitelů a fyzikálních podmínek	21
2.3.1 Koroze při mechanickém namáhání	21
2.3.2 Korozní únava	21
2.3.3 Vibrační koroze	21
2.3.4 Korozní praskání kovů	21
2.3.5 Koroze bludnými proudy (elektrokoroze)	21
2.4 Koroze dle jejího vzhledu	22
2.4.1 Koroze rovnoměrná	22
2.4.2 Koroze nerovnoměrná	22
2.5 Koroze dle typu nerovnoměrného napadení materiálu	22
2.5.1 Bodová koroze (pitting)	22
2.5.2 Selektivní koroze	22
2.5.3 Mezikrystalová a transkrystalová koroze	22
2.5.4 Štěrbínová koroze	23
3 Korozní ochrana	24

3.1 Legování a tepelné zpracování	24
3.2 Snížení agresivity prostředí a záměrné ovlivnění konstrukce	24
3.3 Kovové povlaky	24
3.4 Keramické povlaky.....	25
3.5 Plastové povlaky.....	25
3.6 Smalty.....	26
3.7 Nátěrové hmoty	26
3.8 Inhibitory koroze	26
3.8.1 Anodické inhibitory.....	27
3.8.2 Katodické inhibitory.....	27
3.8.3 Adsorpční inhibitory.....	27
3.8.4 Inhibitory VpCI.....	27
4 Korozní zkoušky.....	29
4.1 Vizualní zkouška	29
4.2 Zkouška ultrazvukem	30
4.2.1 Průchodová metoda	30
4.2.2 Odrazová metoda.....	30
4.3 Kondenzační zkouška.....	31
4.3 Zkouška v solné mlze	31
5 Akustická emise u koroze různých materiálů.....	33
5.1 Akustická emise v automobilovém a leteckém průmyslu	33
5.1.1 Akustická emise u koroze slitiny hořčíku	33
5.1.2 Akustická emise u koroze slitiny hliníku	34
5.1.3 Akustická emise u koroze litinových válců motoru	36
5.2 Akustická emise v průmyslu a potravinářství	36
5.2.1 Akustická emise u koroze ocelové tlakové láhve.....	36
5.2.2 Akustická emise u koroze klasické nerezové oceli	37
5.2.3 Akustická emise u koroze a creepu ocelového potrubí	39
5.3 Akustická emise ve stavebnictví	42
5.3.1 Akustická emise u koroze železobetonových pilířů	42
5.3.2 Akustická emise u koroze předepjatých betonových trubek	43
5.3.3 Akustická emise u koroze železobetonové konstrukce	45
5.4 Shrnutí a krátké rozšíření tematiky	47
5.4.1 Akustická emise u koroze nerezové oceli potrubí reaktoru	47
5.4.2 Akustická emise u abraze a koroze u nerezové oceli na tlakové lahve.....	47

5.4.3 Akustická emise u koroze martenzitické oceli	48
6 Experimentální část	49
6.1 Vybraný materiál ke zkoušení	49
6.1.1 Litiny obecně	49
6.1.2 Složení základní hmoty	49
6.1.3 Litina s lupínkovým grafitem	51
6.1.4 Základní druhy koroze v litině	53
6.2 Postup přípravy vzorků a měření	55
6.2.1 Příprava vzorků	55
6.2.2 Kondenzační komora	56
6.2.3 Nátěr pro korozní zkoušku	57
6.3 Základní vlastnosti vybrané litiny	58
6.3.1 Chemické složení	58
6.3.2 Struktura povrchu a drsnost	59
7 Výsledky experimentů	62
7.1 Metalografie	62
7.1.1 Příprava vzorků	62
7.1.2 Metalografický rozbor	62
7.1.3 Zhodnocení povrchu referenčních vzorků	62
7.1.4 Vzorky nechráněné nátěrem po korozním působení – obvod (bok)	65
7.1.5 Vzorky chráněné nátěrem po korozním působení – obvod (bok)	69
7.1.6 Vzorky nechráněné nátěrem po korozním působení – kruhová plocha (čelo) ..	72
7.1.7 Vzorky chráněné nátěrem po korozním působení – kruhová plocha (čelo)	77
7.1.8 Statistické hodnoty z měření hloubky korozního napadení	80
7.1.9 Statistické posouzení rozdílů z měření hloubky korozního napadení	81
7.1.10 Shrnutí a vyhodnocení	83
7.2 Akustická emise	84
7.2.1 Základní popis měřicího systému Dakel Xedo	84
7.2.2 Označení vzorků	85
7.2.3 Použitá sestava měřicího systému	85
7.2.4 Konfigurace diagnostického systému Dakel Xedo	85
7.2.5 Monitorované parametry	86
7.2.6 Výsledky měření	86
7.2.7 Shrnutí a vyhodnocení	91
8 Možné využití vzorků	92

8.1 Umístění materiálu	92
8.2 Výpočet ceny nátěru	94
Závěr.....	95
Seznam obrázků	97
Seznam tabulek.....	99
Seznam použitých zdrojů	100

ÚVOD

V dnešní době výrobní podniky čelí stále náročnějším požadavkům na kvalitu svých výrobků. Kromě implementace metod, které řídí průběh výroby a její spolehlivost a zlepšují výrobní procesy, firmy hledají i nové konstrukční a výrobní postupy. Jakost jednotlivých produktů a konstrukcí se sleduje nejen během jejich výroby, ale často také po celou dobu jejich životnosti [1].

V této oblasti je možné využívat destruktivní metody zkoušení a detekování nekvalitních produktů a případných vad, kterými lze zkoumat zejména mechanické vlastnosti materiálů. Destruktivní metody, jak už název napovídá, však vedou k porušení vzorků a výrobky jsou tak znehodnoceny. Jako příklad lze uvést zkoušku tahem, ohybem, rázem v ohybu, a dále pak zkoušky tvrdosti. Rovněž sem patří metalografické zkoušky, které zkoumají makroskopickou a mikroskopickou strukturu materiálů. Zde se vytvářejí tzv. metalografické vzorky odřezáním určité vybrané části daného vzorku a zkoumají se lupou či mikroskopem (makroskopická kontrola). U mikroskopické kontroly se daný vzorek ještě upravuje broušením, leštěním či leptáním a ke zkoumání struktury se využívá mikroskopů s mnohem větším zvětšením než u makroskopické metody [1].

Jako nezastupitelné se stále častěji ukazují nedestruktivní metody, díky kterým je možné zkoumat hotové výrobky bez jejich porušení a znehodnocení, a ihned tak odhalit jejich případné vady. Tyto metody byly původně pouze 4 základní, jimiž bylo prozařování, kapilární a magnetické metody a ultrazvuk. Až v poslední čtvrtině 20. století se tento obor rozvinul díky aplikacím nejnovějších poznatků vědy a techniky. Rovněž se zdokonalují způsoby a systémy vyhodnocování, přičemž se více využívá výpočetní technika. Mezi novější metody nedestruktivního zkoušení kupříkladu patří termografické metody a holografické zobrazovací systémy, neutronová radiografie, metoda vířivých proudů a také rychle se rozvíjející metoda snímání pomocí akustické emise (AE). Tyto nedestruktivní metody mohou s úspěchem sloužit jako zcela samostatné, ale k přesnějším výsledkům lze dojít spíše jak jejich vzájemnou kombinací, tak kombinací s metodami destruktivními [1].

1 AKUSTICKÁ EMISE

S pojmem akustické emise je možné se setkat ve formě fyzikálního termínu, od kterého se odvíjí zkoušení materiálů pomocí dnes stále častěji využívané nedestruktivní metody akustické emise.

1.1 Akustická emise jako fyzikální termín

Pojem akustická emise byl objeven ve fyzikálních laboratořích, které se zabývají studiem plastické deformace kovů. Jedná se o jev, kdy je průběh plastické deformace kovů doprovázen popraskáváním nebo akustickým šumem emitovaným uvnitř materiálu. Cílem zkoumání těchto šumů a popraskávání bylo získání informací o procesech a jejich charakteru vedoucích ke zdroji plastické deformace [2].

Akustická emise vzniká uvolněním energie při působení vnitřních nebo vnějších sil. Působením sil probíhají v materiálu nevratné dislokační a degradační děje, a to v jeho makro i mikrostruktuře. Dále se objevují kupříkladu kavitace v hydrodynamických systémech, turbulence únikem kapalin z potrubí a degenerace dielektrik [3].

Energie, která se uvolní, se přetransformuje na mechanický napěťový impulz. Tento impulz se pak šíří materiálem v podobě elastické napěťové vlny. Vlna může být buď podélná, nebo příčná. Dopadem na povrch tělesa s rozhraním se vzduchem se vlna částečně odrazí a z části se přetvoří v jednu modifikaci či více a dále se šíří například jako povrchová vlna (tj. *Rayleighova*), desková vlna (*Lambova*) apod. Jednotlivé druhy vln se šíří různě velkou rychlostí [3].

Názvosloví využívané pro akustickou emisi (AE) se nachází v normě ČSN EN 1330-9 (Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Část 9: Termíny používané při zkoušení akustickou emisí), která se zabývá specifikací pro zkoušení akustickou emisí a je rozdělena na 4 části dle termínů vztahujících se k [4]:

- fyzikálnímu jevu,
- detekci akustické emise,
- měřeným charakteristikám signálů,
- používání akustické emise.

Podle výše zmíněné normy je akustická emise definována jako elastické napěťové vlny, které jsou generovány dynamickým uvolňováním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa nebo procesem, jenž působí vznik elastických napěťových vln na povrchu tělesa (např. klepnutí) [2], [4].

Zatěžování materiálů vnitřními nebo vnějšími silami způsobuje dynamické procesy, které se projevují elastickým vlněním uvnitř daného materiálu. Akustická emise (AE) jako moderní metoda nedestruktivního zkoušení materiálů umožňuje sledování průběhu plastické deformace a případného kumulujícího se poškození materiálu včetně vzniku a šíření trhlin. Pomocí AE lze zkoumat i různé vady nacházející se uvnitř materiálu i jeho fázové transformace a korozní děje. Rovněž je možné tuto metodu využívat v celkovém hodnocení kvality, a to zejména u svařování, ale i například k monitorování proudění kapalin [1].

Nejedná se však o metodu zcela univerzální. U této nedestruktivní metody se totiž oproti ostatním výrazněji projevuje vliv typu konstrukce, daného materiálu, režimu měření, druhu provozu, provozních podmínek a zatížení. Z uvedeného vyplývá, že jakékoliv rušení signálu bude mít velký vliv na výsledky každého měření [2].

Mezi další normy ČSN, které se zabývají akustickou emisí, patří ČSN EN 13477-1 pro popis přístrojů, ČSN EN 13477-2 pro ověřování pracovních charakteristik a ČSN EN 13554 pro všeobecné zásady [2].

1.2 Metoda akustické emise

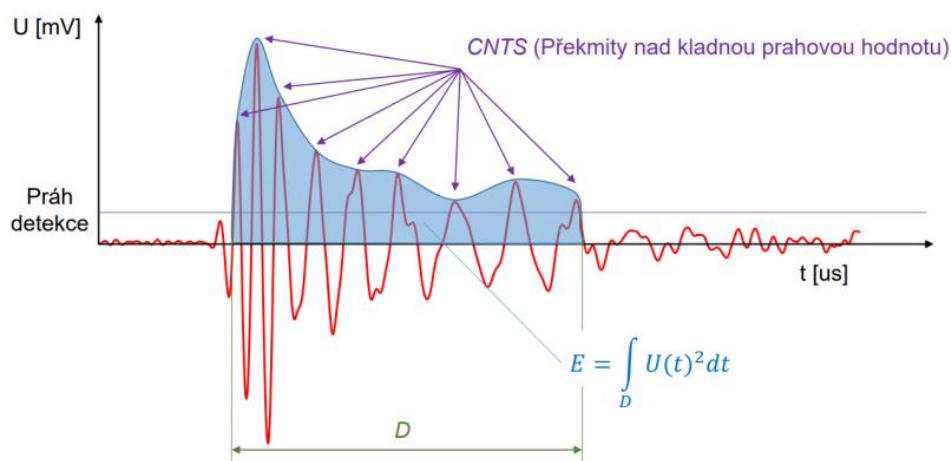
Jedná se o metodu, která dokáže detekovat akustickou emisi uvnitř materiálů pomocí signálu a ten následně elektronicky vyhodnocovat. První práce na zkoumání deformace materiálů touto metodou byly započaty v 50. letech 20. století a zabýval se jimi zejména německý fyzik *Joseph Kaiser*, podle kterého je nyní pojmenován jev reprezentující nevratnost procesů akustické emise. Od 60. let 20. století se tato metoda využívala i pro monitorování dalších procesů vedoucích ke vzniku akustické emise šířící se tělesem – například v oblastech porušování materiálů konstrukcí, netěsností a úniků tlakových médií, tření, obrábění, svařování, výrobních a technologických procesů [2].

1.2.1 Základní pojmy a princip

Fyzikální jev způsobující vznik akustické emise se nazývá **událost** akustické emise neboli *event* (tj. posun dislokací, dynamický vznik mikrotrhlin či „poprasknutí“). Jedna či více událostí pak tvoří **zdroj** akustické emise. Tím může být plastická deformace s poskoky dislokací, což jsou události tvořící akustickou emisi. Dále pak také unikající tlakové médium, které generuje turbulence a tlakové změny média ve štěrbině emitují akustický šum (tj. sykot). Zdrojem akustické emise může být rovněž eroze způsobená poklepy jednotlivých částic dopadajících na povrch, a to kupříkladu v ohybech potrubí. Za zdroj akustické emise je považováno i tření dvou povrchů [1], [2].

Mechanické vlnění materiálů se sleduje pomocí různých typů snímačů akustické emise, které se umísťují na povrch sledovaných vzorků i celých konstrukcí a toto vlnění pak transformují na elektrický signál, jenž je označován jako **signál akustické emise**. Ke snímání vln (a zejména jejich složek kolmých k povrchu tělesa) se běžně využívají širokopásmové piezoelektrické snímače pracující v oblasti 100 kHz až 4 MHz. Tyto senzory mají rezonanční frekvenci nad měřeným rozpětím akustické emise, nebo jsou citlivější a disponují více rezonancemi [1], [3].

Časově omezený signál překračující předem stanovenou hodnotu (*threshold*), který se následně vrátí do vymezených hodnot, se nazývá **hit** akustické emise. Mezi jeho parametry patří hlavně počet kmitů nad prahovou úroveň *CNTS*, amplituda signálu A [dB_{AE}], energie signálu akustické emise E [aJ], doba náběhu na maximální amplitudu R [μs] a doba trvání hitu D [μs]. Schéma hitu signálu akustické emise je na obrázku č. 1 [1], [5].



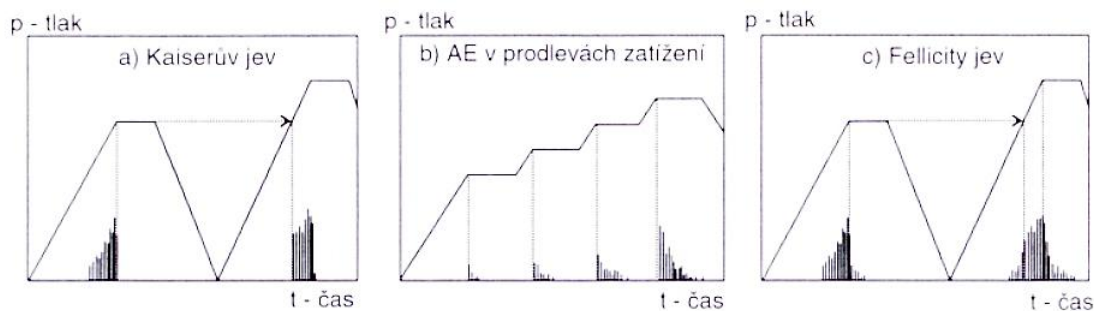
Obrázek č. 1: Schéma hitu signálu akustické emise [5]

Při vyhodnocování je možné sledovat buď počet překmitů s amplitudou překračující předem nastavenou úroveň zařízení označovaných jako *counts*, nebo počet emisních událostí v daném čase. Mezi hlavní charakteristiky patří tvar signálu (struktura zdroje AE), frekvenční spektrum (podstata zdroje AE) a četnost signálů akustické emise (stanovení rychlosti vzniku porušení). Další vlastnosti tvoří amplitudová distribuce signálů, kvadratická úroveň zjištěného signálu a jeho trendy, nebo stupeň deformace tvaru signálu [2].

1.2.2 Kaiserův a Fellicity jev

Kaiserův jev značí nevratnost procesů tvořících zdroj akustické emise. Spočívá v tom, že u prvního cyklu plastické deformace materiálu je detekována akustická emise do jeho maximálního zatížení. Po odlehčení a dalším zatížení je akustická emise detekována až po překročení maxima zatížení prvního či předchozího cyklu. To je typické zejména u AE, která je iniciována plastickou deformací materiálu se zpevněním (např. pevnostní stabilizace tvářeného materiálu) [2], [3].

Fellicity jev je označením pro porušení Kaiserova jevu u materiálů, kde je Kaiserův efekt pouze částečný. V tomto případě akustická emise v následných cyklech zatěžování probíhá na nižších úrovních, než je maximum předchozího zatížení. Při rychlejším zatěžování nastává **prodleva zatížení** a dochází k plastickému tečení materiálu k dosažení nutné relaxace. Akustická emise a plastická deformace v této prodlevě doznívá – toto doznívání je znakem zvýšené úrovně plastické deformace (čela defektů, trhlin apod.). Při delším doznívání akustické emise nebo výskytu Fellicity jevu má materiál konstrukce omezenou schopnost stabilizace zpevněním a nemůže zastavit rozvoj deformací a porušení. 3 základní projevy signálů akustické emise jsou na obrázku č. 2 [2], [3].



Obrázek č. 2: Projevy signálů akustické emise [2]

1.2.3 Základní rozdělení signálů AE

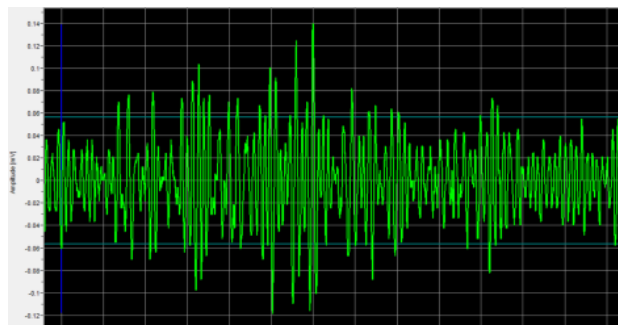
Ve velmi zjednodušeném měřítku lze signály akustické emise rozdělit na dva základní typy, a to spojité a nespojité [2], [5].

Spojité akustická emise

U spojité akustické emise není možné přesně definovat její začátek a konec. Je typická pro kavitace v kapalině, únik kapaliny trhlinou v nádobě či potrubí, plastickou deformaci povrchu kovů třením apod. Může být prováděno kontinuální monitorování provozu zařízení, kde je pravděpodobné, že by jejich neustálé namáhání mohlo způsobit defekty a nežádoucí opotřebení. Využívá se zejména ke sledování netěsností tlakových systémů či sledování opotřebovávání nástrojů a strojních součástí [2].

Tyto procesy ale způsobují mnoho událostí akustické emise současně. Akustické vlny se pak mohou v závislosti na čase překrývat, sčítat či superponovat a vzniká tak akustický šum charakterizující spojitou akustickou emisí (větší množství posunů dislokací s překrývajícími se rázovými vlnami nebo turbulence a akustický šum při trvale probíhajícím úniku tlakového média způsobující kolísání tlaku) [2].

Vzniklé vady jsou indikovány pomocí výkyvů, které převyšují běžné trendy analyzovaných provozních šumů a parametrů emisních událostí, jež převyšují běžná šumová pozadí. Schéma spojité akustické emise je na obrázku č. 3 [5].



Obrázek č. 3: Spojitá akustická emise [5]

U spojité akustické emise se vyhodnocují zejména následující charakteristiky [3], [5]:

- efektivní, střední a maximální hodnota i počet překmitů přes daný práh v čase,
- distribuční funkce amplitud včetně jejich histogramu (závislost počtu překmitů na napěťových úrovních v rozsahu amplitudy signálu),
- rozptyl a standardní odchylka i hustota výkonu v daném rozsahu,
- energie emisních událostí (druhá mocnina mechanického napětí materiálu).

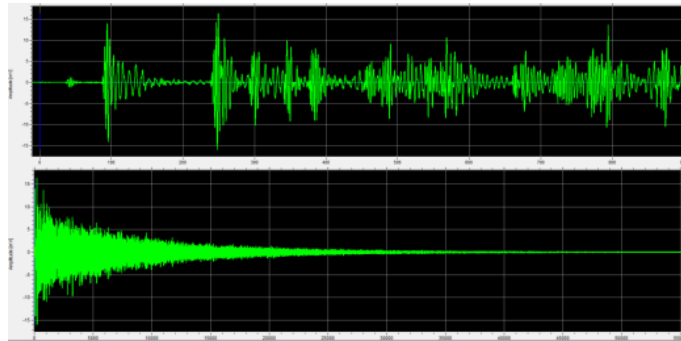
Prahová hodnota intervalu, tj. maximum, může být pevně daná nebo proměnná, tzv. *plovoucí*. Plovoucí hodnoty mohou být nastavovány automaticky podle úrovně šumu v signálu nebo podle signálové střední hodnoty, což je výhodné v proměnných podmínkách. Měření s pevně daným prahem je nutné provádět ve stejných provozních i okolních podmínkách [3].

Nespojitá akustická emise

Na základě definice dle normy ČSN EN 1330-9 je nespojitý signál akustické emise charakterizován *odděleným počátkem a koncem*. Je charakteristický pro fyzikální jevy v namáhaných materiálech, kde se při zatížení (nejčastěji mechanickém nebo tepelném)

samovolně uvolňuje lokálně akumulovaná energie šířící se na velké vzdálenosti ve formě rázových elastických napěťových vln [2].

Tento efekt se projevuje výrazně zejména v okolí nehomogenit materiálu, kterými mohou být různé defekty nebo svary. AE tvoří praskavý signál s charakterem časově rozlišitelných událostí (např. mění se trhlina v materiálu). Nespojité signály AE jsou na obrázku č. 4 [2], [3], [5].



Obrázek č. 4: Nespojité signály akustické emise [5]

U nespojité AE se vyhodnocuje zejména [3], [5]:

- počet událostí v daném časovém intervalu a překmitů přes stanovenou prahovou úroveň,
- doba prvního překročení prahu a doba trvání celé události,
- maximální hodnota a amplitudový rozsah signálu,
- doba od překročení prahu k maximální amplitudě signálu,
- energie impulzu a deformování tvaru impulzu v časově–frekvenční oblasti.

1.2.4 Fáze průběhu procesu měření akustické emise

Jak bylo řečeno výše, pomocí akustické emise (AE) je možné monitorovat napěťové vlny vznikající v materiálech, které jsou charakterizovány skokovými změnami energie. Tyto napěťové vlny se emitují například v pevných látkách při fázových transformacích, pohybu dislokací se vznikem vzniku trhlin, u kavitace v kapalinách a v průběhu korozních procesů [2], [3], [5].

AE nachází významné uplatnění při diagnostikování procesů porušování, a to zejména nádrží, tlakových nádob a potrubních systémů, dále při diagnostikování kavitace, studiu technologických procesů a mechaniky porušování těles, a také při experimentálním ověřování závěrů odvozených z teorie šíření elastických vln [2], [3], [5].

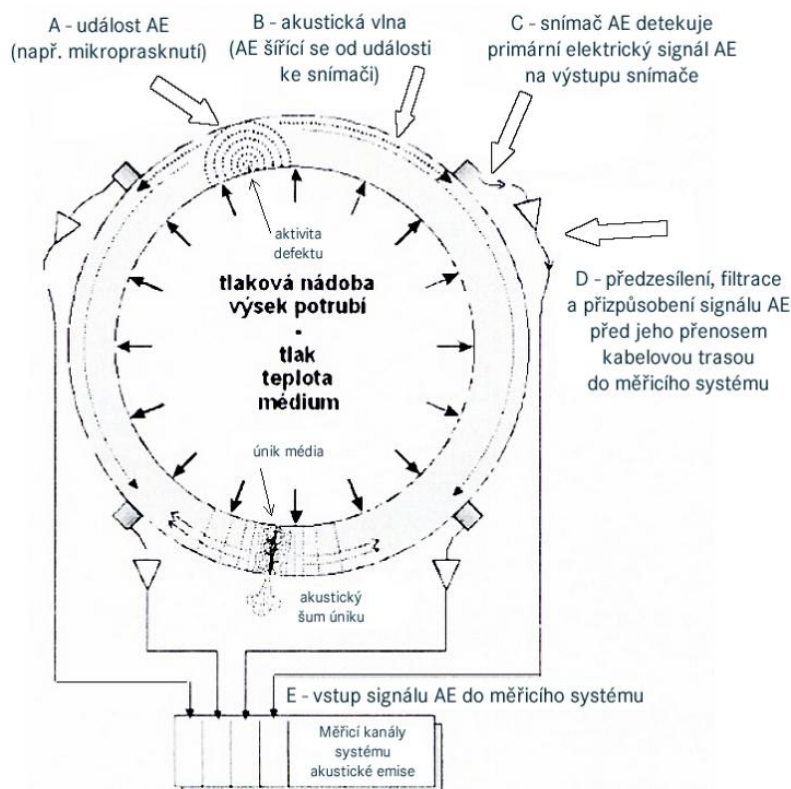
Při rychlém uvolnění většího množství energie elastické napjatosti (např. při diskretním skokovém zvětšení rozměru trhliny) je emitována napěťová vlna a signál AE měřený pomocí rezonančního snímače AE je ve formě tzv. události AE. Probíhají-li procesy téměř spojitě v čase, pozorujeme signál AE jako frekvenčně modulovaný šum. Výrazné události AE doprovází i korozní praskání [2], [3], [5].

Proces vzniku, detekce a vyhodnocení akustické emise se rozděluje na několik fází [2]:

- vznik události, přítomný zdroj a mechanismus vzniku akustické emise,
- šíření napěťových vln akustické emise od zdroje do místa detekce snímačem,
- detekování napěťových vln snímačem akustické emise na povrchu tělesa (tj. transformace akustické emise na povrchu tělesa v místě snímače na el. signál),
- analogové zpracování a vedení el. signálu akustické emise na vstup jeho vyhodnocení,

- vyhodnocení výsledného el. signálu akustické emise pomocí měřicího systému.

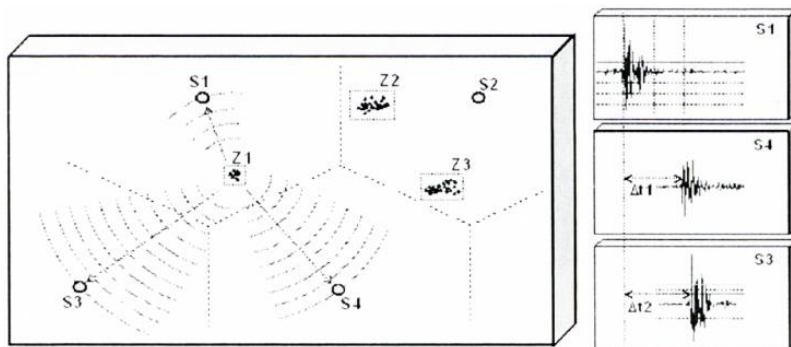
Princip metody průběhu měření akustické emise je na obrázku č. 5 [2].



Obrázek č. 5: Průběh měření akustické emise (přenosová trasa je A-B-C-D-E) [2]

K měření akustické emise se obvykle využívá více snímačů, které jsou rozmístěny po celém tělese či konstrukci a tvoří rozsáhlou měřicí síť. Tento typ měření akustické emise se nazývá **vícekanálová** a umožňuje odhalení všech míst se zvýšenou emisní aktivitou, tj. emisních zdrojů. Stejná událost je detekována ve více snímačích, ale díky rozdílnému šíření vln tělesem od zdroje k místu detekce je daná událost u každého snímače zaznamenána rozdílně [2].

Lokalizace defektů Δt u vícesnímačového měření se v daném čase odvozuje od zpoždění, se kterým signál detekují jednotlivé snímače měřicí sítě. Kvůli této lokalizaci vznikají shluky událostí v místech opakování aktivit AE. Tyto shluky tvoří body odhalující působení zdroje událostí. Měřicí síť akustické emise a princip rovinné Δt lokalizace pomocí snímačů je na obrázku č. 6 [2].



Obrázek č. 6: Měřicí síť akustické emise [2]

(působení zdroje událostí akustické emise je Z1–Z3 a zpoždění je ve snímačích S1, S3, S4)

1.2.5 Vyhodnocování signálů akustické emise

Vyhodnocování probíhá na základě stanovených parametrů, které se nastavují podle základních typů zdrojů AE. Základními vnějšími zdroji jsou Pen Test a klepnutí tyče nebo kuličky na povrch materiálu. Mezi základní vnitřní zdroje patří poskok defektu v materiálu, kterým kupříkladu mohou být odtržení dislokace, mikrotrhlina kvůli nahromaděným dislokacím v zatíženém materiálu, křehká mikrotrhlina, spojení mikrotrhlin v trhlinu nebo poskok trhliny [2].

Pen Test

Pen Test je základním kalibračním zdrojem snímačů akustické emise, se kterým se lze nejčastěji setkat ve formě zlomení tuhy v mikrotužce. Tuha tlačí na podložku pod úhlem 45° a po jejím ulomení se tato síla skokově sníží. To vytvoří relativně velkou energii v podobě ostrého pulzu akustické emise zahrnující rovnoměrné rozložení frekvencí až do desítek MHz o velmi krátké době trvání (maximálně 10 ns) [2].

Klepnutí tyče nebo kuličky

Tento test nemá takovou vypovídající hodnotu jako Pen Test a je spíše nevhodný, protože není reprodukovatelný a jeho délka bývá až několik ms, což přesahuje délku trvání Pen Testu až milionkrát, a frekvenční oblast se pohybuje pouze do 1 kHz. Vyšší frekvence jsou pak ovlivňovány řadou faktorů, mezi které patří charakteristika nárazu plochy vybraného předmětu na danou plochu, materiálové vlastnosti zkušební plochy a zkoušené plochy, nečistoty a nerovnosti povrchu v místě poklepu [2].

Vnitřní zdroje AE

Poskok neboli rychlý posuv defektu se v oboru akustické emise projevuje jako uvolnění elastické mechanické energie a napětí v zatěžovaném materiálu. Tato energie se spotřebovává na kinetickou a potenciální dynamickou, která je vyzařována ve formě akustické emise. Energie se v materiálu spotřebovává na vytváření nového povrchu trhliny nebo plastickou deformaci na čele vady a zbylá energie se projevuje dynamickým poskokem složeným z kinetické a potenciální energie vln napětí akustické emise. Zde hraje roli rychlost samotných těchto dějů a jejich průběhu. Čím pomalejší je posuv defektu, tím větší část energie je spotřebovávána na plastickou deformaci a tvorbu nového povrchu. Pomalejší defekty (plastické) proto vydávají menší poměrnou část uvolněné energie v podobě akustické emise než defekty rychlejší (křehké) [2].

1.2.6 Rušivé zdroje AE

Různé pochody a doprovodné jevy mohou u materiálů vykazovat i rušivou povahu signálů akustické emise. Jejich hlavní charakteristikou je to, že z nich není možné získat žádné užitečné informace o probíhajícím procesu, naopak mohou sledovanou aktivitu akustické emise překrývat a tím znehodnocovat výsledky [2].

Mezi typické představitele patří tření a vzájemné posuvy materiálů, které může vznikat již v čelistech mechanických zkušebních strojů a pokračovat až ke vzájemným pohybům jednotlivých dílů celých technologických sestav. Dalším příkladem jsou netěsnosti a turbulence v potrubí, které svým spojitým typem signálu významně ovlivňují, až zcela znemožňují měření. Ve venkovních prostranstvích je rovněž třeba eliminovat rušivé působení povětrnostních podmínek jako vítr nebo déšť [2].

Při každé zkoušce akustické emise je tedy nejprve vhodné identifikovat potenciální rušivé zdroje a jejich umístění a na tomto základě teprve umisťovat snímače, nastavovat zatěžovací režim a zvolit správnou metodiku měření a vyhodnocování. Tento proces je velmi obtížný zejména v průmyslovém prostředí za provozu nejrůznějších zařízení, které produkují otřesy, ale i třeba také u tlakových potrubí. V některých případech, pokud není možné eliminovat rušení signálů akustické emise, nemusí být toto měření zcela průkazné [2].

1.2.7 Výhody a nevýhody metody AE

Největší **výhodou** akustické emise tvoří poskytování globálních informací o stavu kontrolovaných zařízení, protože monitoruje skutečnou aktivitu v reálném čase. Podle výsledků měření je pak při jakémkoliv podezření na přítomnost komplexních podmínek, které by mohly vést k porušení materiálu, možné další defektoskopické metody směřovat do problémových oblastí s detekovanými emisními zdroji. Akustická emise zároveň výhodně indikuje při daném namáhání materiálu pouze takové defekty, které jsou nestabilní, a tím i nejnebezpečnější v reálných podmínkách zatížení se skutečnou velikostí a orientací defektů [1], [2], [6].

Naopak **omezením** této metody je zejména to, že nedokáže detekovat statické a neaktivní defekty včetně defektů s tichou aktivitou neprojevující se jakýmkoliv akustickým signálem. Další nevýhodou tvoří nutnost aplikace stimulů k iniciaci aktivity akustické emise, kterým je obvykle zatížení, změna teploty či tlaku konstrukce. Dané zatížení může rovněž způsobovat rušivou akustickou aktivitu, která přehluší akustickou aktivitu porušení, což komplikuje vyhodnocení měření a jeho závěry. Zároveň tuto zkoušku není možné opakovat, protože vykonaná aktivita defektů je nevratný jev [1], [2], [6].

2 KOROZE V KOVOVÝCH MATERIÁLECH

Koroze bývá definována jako „samovolné a postupné rozrušení kovů následkem jejich chemické nebo elektrochemické reakce s okolním prostředím“ dle [8], nebo také „souhrn nežádoucích fyzikálně–chemických interakcí materiálu s okolním prostředím“ dle [9]. Je způsobena tvorbou korozních produktů, které pak pokrývají materiál a uvolňují se do okolního prostředí. S tím je spojen následný úbytek materiálu [8], [9].

Koroze může probíhat jak v různých plynech včetně atmosféry a kapalinách, tak v chemických látkách a zeminách. Korodují prakticky všechny materiály (nejen kovy), které byly vystaveny vnějšímu prostředí. Pro každý takový materiál je důležitá rychlost postupu tohoto děje. S korozi materiálů se tak lze setkat kupříkladu i u skel, keramiky nebo polymerů.

Vzhledem k velkému rozsahu tématu a tomu, že se tato práce orientuje na korozi kovových materiálů, budou níže popsány pouze druhy koroze kovů. Koroze zejména u kovových materiálů působí v různých formách a lze ji rozdělit podle několika pohledů v závislosti na jejím mechanismu, druhu korozního prostředí a vnějších činitelů, nebo také dle typu korozního napadení neboli vzhledu. Korozi kovů a slitin je věnována norma ČSN EN ISO 8044, kde lze podrobně nalézt termíny vztahující se ke korozi včetně krátkých vysvětlivek.

2.1 Koroze dle vnitřního mechanismu a druhu chemické reakce

Podle vnitřního mechanismu se koroze dělí na chemickou a elektrochemickou [8], [9].

2.1.1 Chemická koroze

Kromě ztrát materiálu způsobuje chemická koroze tvorbu nežádoucích tvrdých povrchů a okují a nejčastěji se vyskytuje při ohřevu kovu (zejména oceli) a působením přehřáté páry, kde kromě oxidace kovu nastává i křehnutí oceli způsobené vodíkovou křehkostí (kvůli difúzi vodíku) zhoršující mechanické vlastnosti oceli [8], [9].

2.1.2 Elektrochemická koroze

Elektrochemická koroze probíhá v elektricky vodivých roztocích nebo taveninách (elektrolytech) rozrušováním kovů majících různý elektrický potenciál, při kterém vzniká elektrický proud měnící se v tepelnou energii a její mechanismus je obdobný dějům v galvanickém článku [8].

2.2 Koroze dle působícího prostředí

Obvyklými korozními prostředími jsou kapaliny, zeminy a ovzduší kolem strojních zařízení a součástí.

2.2.1 Atmosférická koroze

Atmosférická koroze má charakter elektrochemické koroze, probíhá pod tenkou vrstvou vody nasycenou složkami atmosféry (kromě klimatických podmínek, vlhkosti, teploty vzduchu zde rovněž působí znečištění vzduchu) a zásadní vliv má také kyslík a korozní vlastnosti daného prostředí, podle kterých lze atmosféry řadit do 5 stupňů korozní agresivity (C1–C5) [8], [9].

2.2.2 Koroze v kapalinách a půdní koroze

Tato korozní působení patří mezi nejčastější a nejvýznamnější činitel je zde voda. Koroze se tvoří v závislosti na množství rozpuštěných plynů a rychlosti proudění kapaliny, se kterou přicházejí do kontaktu stroje a zařízení, chladicí systémy, rozvodná potrubí, armatury a další součásti. Dalším hlediskem je oxidační schopnost roztoku a jeho hodnota pH (neutrální roztok má hodnotu pH 7, u kyselého se pohybuje od 0 do 6 a zásadité roztoky mají pH 8–14). Půdní koroze je zvláštní druh koroze v kapalné části půdy, čili vodě [8].

2.3 Koroze dle vlivu vnějších činitelů a fyzikálních podmínek

V korozním prostředí mají na stroje a jejich součásti kromě teploty vliv například také mechanické namáhání, únava, vibrace, ale i bludné proudy.

2.3.1 Koroze při mechanickém namáhání

Mechanické namáhání strojů a součástí a u materiálů tvářených zastudena zmenšuje elektrodový potenciál, protože je všechno napětí soustředěno na hranicích zrn nebo ve vrubech materiálu. Koroze tak proniká do velké hloubky, což rychle snižuje pevnost, aniž by to bylo patrné na povrchu kovu. Příkladem je poměrně rychlá koroze v ohybech trubek kotlů [8].

2.3.2 Korozní únava

Korozní únava je typická pro střídavé dynamické namáhání materiálu v korozním prostředí. Namáhaný materiál je porušován při menším napětí, než je stanovená mez únavy. Klasickou únavovou životnost při cyklickém zatěžování znázorňuje *Wöhlerova křivka*, která stanovuje počet cyklů do lomu. V korozním prostředí jí chybí vodorovná část [8], [10], [11].

2.3.3 Vibrační koroze

Vibrační koroze je charakteristická v korozních prostředích u vibračních pohybů oceli a dalších materiálů, kde zároveň probíhá i jejich vzájemné tření. To je typické kupříkladu pro ložiska vodních turbín. Tomuto druhu koroze lze částečně zabránit tuhými mazivy (*grafit* a MoO_2), fosfátováním a difúzním sírováním [8], [9], [10].

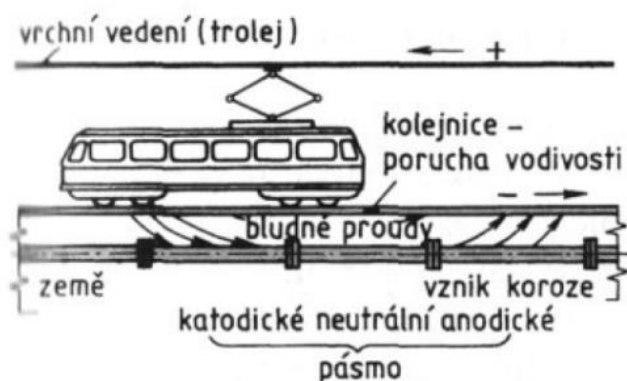
2.3.4 Korozní praskání kovů

Korozní praskání vzniká, pokud jsou kovové součásti v korozním prostředí namáhány napětím v tahu. Vznikají trhliny materiálu při nižší hodnotě, než je jeho lomová houževnatost. Trhliny jsou kolmé ke směru působení pnutí v tahu a bývají po hranách nebo plochách krystalů i smíšené. Korozní praskání se může projevat i na čelech defektů u napjatého materiálu. Jako příklad lze uvést praskání mosazí v prostředí s amoniakem. U ocelí lze zmínit vodíkovou korozi, která vzniká při vysokých tlacích a teplotách. Reakcemi vodíku s uhlíkem v tavenině vzniká plynný metan a dochází k místnímu oduhličení. Metan má vyšší tlak a vyvolává velká pnutí uvnitř materiálu způsobující trhliny a puchýře pod povrchem [8], [9], [10], [11].

2.3.5 Koroze bludnými proudy (elektrokoroze)

Bludné proudy se nejvíce vyskytují u elektrických drah a tratí, kde se kladný potenciál stejnosměrného proudu přivádí na trolejové dráty a záporný na koleje. Schéma rozložení

bludných proudů u elektrické dráhy je na obrázku č. 7. Vznikají zde 3 druhy oblastí (pásem) – **katodická** se vstupem proudu z okolní půdy do úložného zařízení, **anodická** s výstupem bludných proudů z úložného zařízení – velmi korozivně nebezpečná a **neutrální** v místech protékání bludných proudů úložným zařízením [8], [12], [13].



Obrázek č. 7: Schéma rozložení bludných proudů u elektrické dráhy [8]

2.4 Koroze dle jejího vzhledu

Podle finálního vzhledu koroze lze na ni pohlížet jako na rovnoměrnou a nerovnoměrnou.

2.4.1 Koroze rovnoměrná

Rovnoměrná koroze se vyskytuje po celé ploše materiálu, probíhá stejnou rychlostí a způsobuje stejnoměrný úbytek kovu [8], [9], [11].

2.4.2 Koroze nerovnoměrná

Nerovnoměrná koroze je mnohem nebezpečnější variantou než rovnoměrná, protože v některých místech materiálu mohou korozní děje probíhat velmi rychle a jiná místa jsou zcela bez napadení [8], [9], [11].

2.5 Koroze dle typu nerovnoměrného napadení materiálu

Tyto typy koroze jsou nejnebezpečnější a tvoří je různé formy, viz obrázek č. 8, který ukazuje i vybrané výše zmíněné druhy koroze [8].

2.5.1 Bodová koroze (pitting)

Jedná se o lokální napadení materiálu, které narůstá do hloubky a tvoří drobné zakulacené důlky. Patrná je zejména u korozivzdorných ocelí vlivem chloridových iontů v roztoku a u hliníkových slitin kvůli ušlechtilým kovům (zejména Cu) v roztoku [8], [9].

2.5.2 Selektivní koroze

Při selektivní korozi je napadána pouze jedna fáze či složka dané slitiny. Tento jev lze s úspěchem záměrně využít například pro získání tzv. houbovitě mědi z mosazi, kdy se ve vodě selektivně „odkoroduje“ zinek [8], [9].

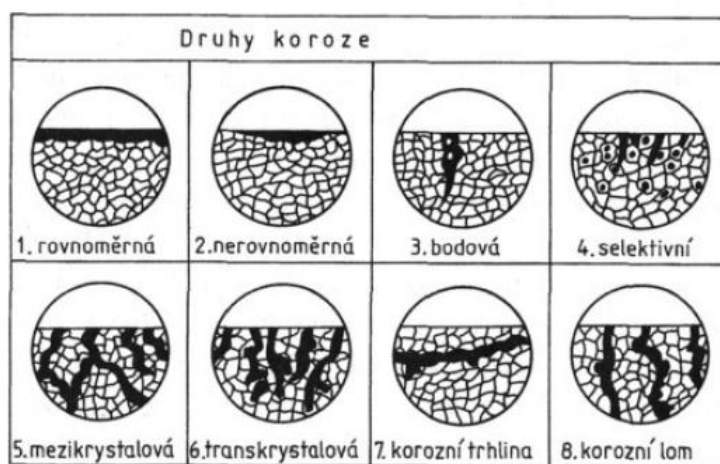
2.5.3 Mezikrystalová a transkrystalová koroze

Mezikrystalová koroze jde po hranicích zrn do hloubky materiálu a je charakteristická pro slitiny hliníku a korozivzdorné oceli (hlavně po místním ohřevu např. po svařování).

Transkrystalová koroze se podobá korozi mezikystalové, jen jsou zrna poškozována v příčném směru a do hloubky materiálu [8], [9].

2.5.4 Štěrbínová koroze

Tento druh koroze lze nalézt v úzkých místech s omezeným působením vodného prostředí na jeho okolí (např. prostory mezi matkou a šroubem, jemné trhliny na povrchu materiálu nebo těsnění, která jsou nasáklá nějakým roztokem) [9].



Obrázek č. 8: Schémata nerovnoměrných druhů koroze [8]

3 KOROZNÍ OCHRANA

Klasická ochrana proti korozi spočívá v zabránění přístupu vzduchu a vlhkosti k povrchu exponovaného materiálu. Vhodná ochrana proti korozi se obvykle volí na základě použitého materiálu, působícího prostředí a konstrukce, přičemž existuje celá řada metod. Konkrétně lze jmenovat kupříkladu legování, tepelné zpracování, ochranné povlaky kovové i nekovové (plasty, pryže, smalty), nátěry s inhibitory koroze nebo elektrochemické ochrany.

3.1 Legování a tepelné zpracování

Legují se zejména oceli a litiny, přičemž jako hlavní legující prvky se do jejich struktury přidávají chrom, nikl, molybden a měď. Co se týče tepelného zpracování, sem patří žíhání ke zjemnění struktury materiálu a dosažení jeho homogenní struktury. Díky tomu je odstraněno vnitřní pnutí v materiálu a hrubá struktura, což může významně přispívat ke tvorbě mezikrystalové koroze. Jako příklad lze uvést rozpouštěcí žíhání u austenitických ocelí [11].

Metody legování a tepelného zpracování materiál přímo ovlivňují, a to jak chemicky, tak i tepelně, a proto je nutné zvážit vhodnost použití daného materiálu do určitého prostředí. Rovněž se zde dostáváme k ekonomické části, protože jsou tyto metody často výrazně finančně náročnější. Je tedy obecně doporučováno, aby se k těmto metodám přistupovalo pouze v případech, kdy nelze využít metody levnější [11].

Co se týče snížení nebezpečí vodíkové koroze u ocelí, existují dva základní způsoby. Jednak je možné využít oceli s velmi malým obsahem uhlíku (do 3 tisícín objemu), nebo legování. Oceli z první varianty se vyznačují nízkými charakteristikami pevnosti, proto je vhodnější legování prvky, jež tvoří karbidické fáze nereagující s vodíkem. K těmto prvkům patří chrom, molybden, vanad, wolfram, titan nebo niob [11].

3.2 Snížení agresivity prostředí a záměrné ovlivnění konstrukce

Agresivní korozní prostředí lze eliminovat ochrannými atmosférami, snížením nebo úplným odstraněním kyslíku a inhibitory koroze. Budoucí korozní působení na konstrukci lze také ovlivnit již ve fázi vývoje. K základním pravidlům patří zabránění kontaktu kovů o různém elektrochemickém potenciálu (např. měděný plech nelze upevnit ocelovými nýty), vhodné tvary konstrukce bez možnosti hromadění vody a vlhkosti a snaha o zamezení eroze materiálu v turbulentním prostředí. Další vlivy zvyšující citlivost ke korozi tvoří některé technologické postupy výroby, k nimž patří svařování a nevhodné tepelné zpracování [11].

Do této kategorie lze například zařadit i tzv. metodu obětované anody, jejíž základ spočívá ve vodivém spojení exponovaného kovu s kovem méně elektrochemicky ušlechtilým. Jedná se o praktické využití anodické polarizace, přičemž se k ochraně předmětu a omezení jeho koroze využívají samostatné plátky nebo destičky z neželezných kovů jako *hliník*, *hořčík* nebo *zinek*. Tento způsob se využívá kupříkladu na úložných zařízeních v zemi [8], [9], [11], [30].

3.3 Kovové povlaky

Kovové povlaky se tvoří pomocí vrstvy z neželezných kovů. Některé neželezné kovy mají schopnost tvorby tenké nepropustné vrstvy oxidu o tloušťce 1–10 nm, která brání další oxidaci tohoto materiálu, a nazývá se pasivní vrstva. Jako příklad lze uvést měď a její zelenou patinu nebo matnou *hliníkovou* oxidační vrstvu. Schopností pasivace disponuje také *zinek*

a titan, jisté pasivační vlastnosti vykazují i korozivzdorné oceli (ty se však na povlakování nehodí) [8], [9].

Kovové povlaky se na povrchu materiálu tvoří například galvanickým vylučováním, žárovým nanášením, nanášením prášku elektrickým obloukem či plasmou nebo vakuovým napařováním a naprašováním. Také zde nastává tepelné a chemické ovlivnění materiálu, ale obvykle pouze povrchově. Kovové povlaky nabízí hned několik výhod – mohou zlepšovat mechanické vlastnosti materiálu, ze kterých je možné jmenovat tvrdost, ořezavzdornost, elektrickou vodivost, pájitelnost. Jejich zásluhou mají také povlakované součásti lepší celkový vzhled [11].

Další variantou je využití nátěrů s mikrolamelami hliníku a zinku, které po vytvrzení tvoří katodickou ochranu. To lze využít například na šrouby, matice, kování a pružiny. Za zmínku rovněž stojí tzv. povlakové superslitiny typu *NiCrAlY* nebo *CoCrAlY*. Disponují totiž zejména výbornou odolností proti korozi za vysokých teplot. Toho lze s úspěchem využít u nástřiku lopatek plynových turbín na rotorech a výrazně tak zvýšit jejich životnost [30].

3.4 Keramické povlaky

Keramické povlaky mají široké spektrum využití. Jejich hlavní úlohou je zvýšení odolnosti součástí proti mechanickému opotřebení. Dalším úkolem je zvýšení odolnosti proti chemickým agresivním látkám. Zde lze jmenovat například oxid chromitý nebo hlinitý. V dnešní době se keramické povlaky využívají i v lékařství, a to v podobě bioaktivní keramiky, která na kostních a kloubních implantátech reaguje se živou kostní tkání a vytváří tak pevnější spojení [30].

Z pohledu ochrany proti korozi je asi nejpodstatnější funkcí keramiky vytvoření tepelné bariéry u vysokoteplotních aplikací. Jedná se o snížení přestupu tepla do součástí, kde by mohla vznikat koroze za vysokých teplot. K tomu se využívá kupříkladu oxid zirkoničitý s mezivrstvou v podobě slitiny *NiCrAlY* (případně *CoCrAlY*), který je možný využít i pro ochranu proti agresivním oxidům vanadičným nebo siřičitým ve spalínách, což ovlivňuje zejména části spalovacích motorů (např. dna pístů, spalovací prostor hlavy válců nebo povrch výfukových ventilů) [30].

3.5 Plastové povlaky

Nejčastější nekovové povlaky jsou zhotovovány z plastů a pryží, a to v podobě prášků k roztavení a přilnutí k povrchu. Plastové práškové povlaky se nanášejí nástřikem v elektrostatickém poli o vysokém napětí (desítky až tisíce V) a vypalují se při teplotách okolo 200°C, přičemž lakovaný předmět se uzemní a částice prášku elektricky nabijí. Vzniklá elektrostatická síla je dostatečně přitažlivá, aby na lakovaném předmětu došlo k vytvoření a udržení dostatečné vrstvy prášku, dokud se vypalováním v peci neroztaví a nepřilne k povrchu [30].

Tyto práškové hmoty jsou zejména epoxidové, polyesterové, polyuretanové nebo akrylátové. Zatímco epoxidové jsou určeny spíše pro interiéry, polyesterové, polyuretanové a akrylátové mají dobré vlastnosti i pro využití venku (dobrá odolnost povětrnostním vlivům a korozi). Těmto povrchovým úpravám se rovněž říká komaxitování a tvoří pevný jednolitý a stejnoměrný povlak i v těžko dostupných místech, nevýhodou je jejich obtížná opravitelnost při poškození. Jsou vhodné zejména pro ocel a hliník, ale také pro dřevovláknité desky [30].

Do této skupiny lze zařadit například i fluoropolymerové povlaky, které se skládají z pojiva v podobě nosné pryskyřice a teflonového prášku (*PTFE*), vypalované při teplotě 400°C. Spíše než pro ochranu proti korozi se ale využívají pro vytváření nepřilnavých povrchů, odolných chemickému působení a UV záření, a forem pro zpracování plastů a pryží [30].

3.6 Smalty

Nejvýznamnějšími vlastnostmi smaltů jsou právě velká korozní odolnost proti kyselinám (proti zásadám už tolik ne) a povětrnostním vlivům. Zároveň zlepšují odolnost proti teplotním šokům a výrazně zvyšují tvrdost (až 5x vyšší než u oceli). Se smalty je možné se setkat nejen v domácnostech (nádobí), ale i v zemědělství (nádrže na odpady a chemická hnojiva), stavebnictví (obklady stěn tunelů), energetice (součásti pecí a spalovací turbíny), nebo u výměníků tepla a kouřovodů [30].

Smalty lze definovat jako křemičité sklokeramické povlaky, které se nanášejí žárově, nebo jako skla modifikovaná tak, aby dobře přilnula k povrchu. Jejich základ tvoří *tetraedry* (SiO_4)⁴⁻ s dalšími prvky. Smalty se skládají ze sklotvorných oxidů (křemen, borax, kaolin, živec, uhličitan) a pomocných surovin (přídržné oxidy, kalidla, barvidla, oxidační látky). Základní hmota se i s přísadami roztaví, rozstříknou do vody a vzniklé kuličky se namelou na jemný prášek, který se smíchá s vodou a jílem do kašovitě hmoty (tzv. břěčka). Ta se na kovový povrch nanáší máčením, poléváním či stříkáním a nechá se vysušit. Poté se vypaluje při teplotách mezi 800 a 900 °C. Smalty mohou být buď jednovrstvé (konstrukčně složitější výrobky, ekonomičtější), nebo mají základní a krycí vrstvu. Základní vrstva se natavuje přímo na kov a má za úkol pevné spojení a úlohou krycího smaltu jsou požadované chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti a případný barevný odstín [30].

3.7 Nátěrové hmoty

Různé nátěry a ochranné vrstvy z oleje či vazelíny tvoří poněkud levnější variantu korozní ochrany. Nátěrové hmoty se řadí mezi organické povlaky a mohou tvořit až 80 % celkových povlaků. Mohou být jak s barevnými pigmenty, tak transparentní. Svůj ochranný význam mají zejména ve venkovním prostředí, zatímco uvnitř se jedná spíše o dekorativní charakter. Z pohledu ochrany proti korozi povětrnostním podmínkám dobře odolávají olejové a syntetické nátěry ředitelné benzínem nebo epoxidové pryskyřice. Nátěry lze nanášet štětkami, válečky a stěrkami, a také namáčením a nástříky [30].

3.8 Inhibitory koroze

Jak je uvedeno výše, inhibitory patří do skupiny úpravy prostředí, kde by mohl probíhat korozní děj, a snížení jeho agresivity. Protože se jedná o poměrně velkou skupinu různých látek, je zde uvedena odděleně. Inhibitor obecně je látka, která zpomaluje, nebo úplně zamezuje určité chemické reakci. Při dostatečné koncentraci inhibitorů koroze v daném prostředí se snižuje korozní rychlost, v opačném případě může být naopak urychlována [31], [32].

Z chemické stránky lze inhibitory rozdělit na anodické, katodické a adsorpční. Rovněž závisí na druhu roztoku, ve kterém se aplikují (kyselé, neutrální a zásadité roztoky). Působení inhibitoru závisí na koncentraci prostředí, teplotě a druhu korozního systému. Použití

inhibitorů je výhodné zejména pro systémy s více kovy, nebo u různých druhů inhibitorů k doplnění nebo zesílení jejich účinku [32].

Různí výrobci navíc mívají svoje vlastní řady inhibitorů koroze, které mohou být nejen ve formě nátěrů, ale například i prášků, rozpustných aditiv, obalů (fólií a papírů). Jako příklad byl v praktické části vybrán komplexní systém inhibitorů koroze *VpCI* od firmy *Cortec Corporation* [33].

3.8.1 Anodické inhibitory

Jak napovídá název, anodické inhibitory zpomalují anodickou korozní reakci, a to zejména v neutrálních roztocích. Jako příklad lze uvést fosforečnany, dusitany, chromany, křemičitany nebo benzoany. Díky nim se na povrchu materiálu vytvoří vrstva nerozpustných produktů, které jej chrání před pokračováním koroze. U tohoto druhu je třeba nejvíce dbát na správnou koncentraci, protože v nedostatečném množství mohou způsobovat nerovnoměrné poškození povrchu [32].

3.8.2 Katodické inhibitory

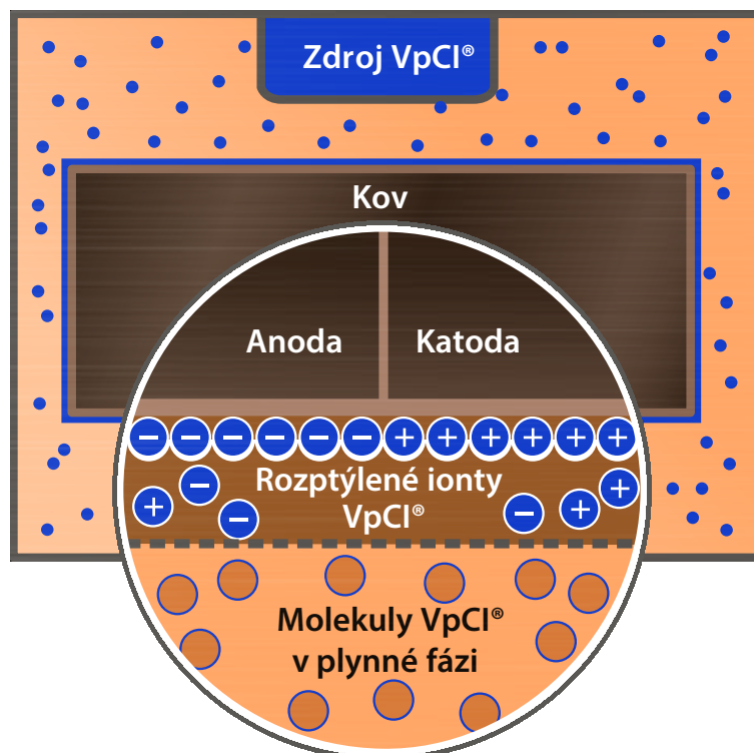
U katodických inhibitorů naopak dochází ke zbrzdění katodických depolarizačních reakcí. Je možné je využívat zejména v neoxidačních kyselých a neutrálních roztocích. U kyselin kupříkladu pomáhají zpomalovat vylučování vodíku u koroze sloučenin antimonu a arsenu. U neutrálních roztoků se hodí pro brzdění kyslíkové depolarizace tvorbou vápenatých a zinečnatých iontů spolu s produkty korozní vrstvy [32].

3.8.3 Adsorpční inhibitory

Adsorpční inhibitory mohou zpomalovat anodické i katodické korozní děje, protože adsorbují na povrchu kovu a vytváří ochrannou vrstvu. Toho se s úspěchem využívá například u moření kovů. V některých případech lze mezi inhibitory zařazovat prostředky, které slouží k odstraňování nežádoucích příměsí z roztoku (tzv. destimulátory – např. *hydrazin*) [32].

3.8.4 Inhibitory VpCI

Inhibitory koroze *VpCI* (*Vapor phase Corrosion Inhibitors*) jsou částice mikroskopické velikosti, které se po opuštění zdroje rozptýlí v daném prostředí. Přitahují je všechny kovové povrchy, takže na nich mohou vytvářet tenké ochranné vrstvy i v nepřístupných místech. Princip vzniku ochranné vrstvy pomocí inhibitorů *VpCI* je na obrázku č. 9 [34].



Obrázek č. 9: Princip vzniku ochranné vrstvy pomocí inhibitorů VpCI [34]

Inhibitory koroze *Cortec VpCI* mají různé nosiče v pevném, kapalném i plynném skupenství. Mezi zástupci pevného skupenství lze jmenovat polyetylenové fólie, papír, konzervační prášky nebo impregnované polyuretanové pěny. Prostředky v kapalném stavu jsou vodou a rozpouštědly ředitelné koncentráty, konzervační oleje nebo voskové nátěry. V plynném skupenství lze nalézt technické plyny kupříkladu pro parovody nebo plynovody. Výrobce slibuje jednoduchou aplikaci a eliminaci následků koroze (odstraňování, odmašťování, čištění, úprava povrchu a další ochrana), a to již od výroby, přes skladování a přepravu až po konečné užívání [34].

4 KOROZNÍ ZKOUŠKY

K hodnocení průběhu a stavu koroze materiálů se používají různé korozní zkoušky. Lze je charakterizovat dle délky expozice materiálu, a to na dlouhodobé a krátkodobé. Z pohledu místa provádění jsou laboratorní (obvykle urychlené) a provozní [16], [17].

Za základní laboratorní korozní zkoušky je považován kondenzační test a zkoušení v solné mlze. Není stanovena žádná univerzální korozní zkouška, vybraný způsob zkoušení se vztahuje k danému materiálu a podmínkám, ve kterých se nachází nebo bude nacházet. Rovněž je možné využít metodu vizuální, která by obecně měla předcházet všem ostatním zkouškám a zkoušku ultrazvukem [16], [17].

4.1 Vizuální zkouška

Vizuální kontrolou, též *Visual Testing (VT)*, se provádí zkoušení materiálů a výrobků pohledem pověřeného pracovníka, který splňuje požadavky stanovené normami. Tato metoda se obvykle používá jako první před všemi ostatními nedestruktivními zkouškami. Vizuální kontrola se z pohledu provedení dělí na přímou a nepřímou [2].

U **přímé** metody se pozorování provádí pouhým okem, případně s pomůckami typu zrcadel, lup nebo endoskopů. To znamená, že pomyslná optická dráha mezi okem a objektem není přerušena. Tento způsob se využívá hlavně pro místní zběžnou kontrolu. Kontrolovaný povrch by měl mít menší vzdálenost než 600 mm od oka pozorovatele a úhel nejméně 30°, přičemž musí být osvětlen minimální intenzitou 500 luxů. Tuto metodu lze využít i pro celkové hodnocení povrchu, kdy celková vzdálenost povrchu od oka je více než 600 mm a osvětlení o minimální intenzitě 160 luxů. Navíc musí mít oči pracovníka dobrou schopnost vidění na blízko i na dálku a rozlišování jednotlivých barev, tj. musí nejen dobře vidět, ale mít i dobrý barvocit [2].

Pokud není možné provést přímou metodu, přistupuje se k metodě **nepřímé**. To může nastat kvůli nepřístupnosti daného povrchu zejména u tlakových nádob nebo potrubních systémů, nebo z hlediska bezpečnosti u ionizujícího záření apod. Nepřímá vizuální kontrola ke zkoumání využívá videoscropy, fotografie, přístroje s optickými vlákny i automatizované systémy [2].

Vizuální zkoušky nejvíce ovlivňují vlastnosti materiálu, stav povrchu a jeho čistota, barva a intenzita dopadajícího světla, textura povrchu (velmi hladký může oslňovat, hodně drsný zase potřebuje speciální osvětlení) i únava pracovníka provádějící testování. Hodnocení vad se u vizuálních kontrol provádí buď prohlížením a porovnáváním podle etalonů a katalogů, nebo prohlížením a měřením parametrů vad na základě normami a předpisy daných pravidel [2].

Vizuální kontrola se provádí například u svarových spojů, odlitků a tlakových zařízení nebo skladovacích nádob z pohledu korozního napadení. Kontrola ploch napadených korozi se obvykle provádí bez optických pomůcek, ale při dostatečně intenzivním osvětlení. Hlavní zásadou je dokonalé očištění povrchu, odstranění starých nátěrů i rzi a ostatních cizích látek. Na místech s korozi se měří hloubka napadení pomocí vhodných hloubkoměrů. Rovněž se zjišťuje zbytková tloušťka stěny nádob nebo potrubních systémů mechanickými nebo digitálními měřidly. U nedostupných nebo neprůlezných nádob se může využít i měření ultrazvukem. U nerovnoměrné koroze lze k jejímu zviditelnění využít fluorescenční látky. V laboratorních podmínkách je možné sledovat také hmotnostní úbytky materiálu [2].

V praxi se také objevuje termín „stupeň zrezavění“. Tyto stupně jsou celkem 4 a definuje je norma ISO 8501-1. Jednotlivé stupně jsou zde slovně popsány včetně vyobrazení vzorů na fotografiích. Tato norma kromě jiného stanovuje i způsoby přípravy ocelových povrchů před nanášením nátěrů a vizuální vyhodnocení čistoty povrchu [2], [35].

4.2 Zkouška ultrazvukem

Ultrazvuk je zvukové vlnění s frekvencí vyšší, než je slyšitelnost lidského ucha (tj. asi 20 kHz). Toto vlnění by mělo být alespoň částečně elastické a každá vlna se v prostředí šíří určitou rychlostí. Ultrazvukové vlny lze dle jejich pohybu prostředím rozdělit na podélné a příčné [2].

Zatímco **podélné** vlny kmitají ve směru jejich šíření, **příčné** vlny kmitají kolmo ke směru jejich postupu. V prostředích se šířícími se podélnými vlnami vznikají tlakové a tahové síly. Příčné vlny způsobují smykové síly a mohou se šířit pouze v pevných látkách [2].

Akustický tlak šířící se vlny se se vzdávající vzdáleností od zdroje zmenšuje. Energie vlny se rozděluje v prostoru a je tlumena materiálem. Tlumení může způsobovat rozptyl na mikroskopických rozhraních zrn a absorpce energie vnitřním třením kmitajících částic. V defektoskopii to znamená, že s rostoucí vzdáleností ultrazvukové vlny v materiálu od zdroje klesá zjistitelnost defektů. Na přesnost hodnocení chyb má velký vliv kvalita povrchu zkoumaného materiálu (není vhodný ani příliš hladký, ani příliš drsný povrch) a tvar zkoušené součásti, která může tvořit tzv. falešná echa a indikace [2].

Ultrazvukem není možné zjistit přesný rozměr vady, ale jen pouze přibližný – a to formou „malá nebo velká“ na základě velikosti echa. Zjistit je možné pouze tvar chyby (u bublin se UZ vlny odrážejí v širokém prostorovém úhlu a zpět do sondy se vrací pouze jejich malá část), její povrch, poloha a orientace vůči ultrazvukovému svazku [2].

Zkouška ultrazvukem je univerzální a lze ji použít kupříkladu pro testování odlitků, výkovek a vývalků a svarů. Z pohledu materiálů, které jsou vystaveny koroznímu působení je ultrazvuk vhodný zejména k měření tloušťky stěn a drsnosti povrchu. Jako příklad lze jmenovat tlakové nádoby, zásobníky, potrubí, nádrže a různé výlisky. Pro zkoušení materiálů ultrazvukem existují dvě hlavní metody – průchodová a odrazová [2].

4.2.1 Průchodová metoda

Přístroj u této metody disponuje dvěma ultrazvukovými sondami, které jsou umístěny naproti sobě (jedna pro vysílání a druhá pro přijímání). Metoda se zakládá na tom, že při průchodu ultrazvuku materiálem se jeho signál zeslabí. Výhodou je, že signál není zeslaben tolik jako u odrazové metody, a proto se tato metoda může využívat na zkoušení materiálů jinak těžce ultrazvukem zkoumatelných (např. guma). Nevýhodou je možnost použití jen na součásti s vhodným protilehlým povrchem a průřez přijímací sondy musí být větší než průřez ultrazvukového svazku [2].

4.2.2 Odrazová metoda

Obvykle se používá stejná sonda pro vyslání ultrazvukového signálu i jeho příjem, k čemuž postačuje jeden dostupný povrch materiálu. Její dráha je však dvakrát delší, než u průchodové metody s vysílací a přijímací sondou, a navíc zde existuje tzv. mrtvé pásmo omezující zjištění chyb v blízkosti zkoušeného povrchu. Tato metoda se proto moc nehodí pro zkoušení tenkých plechů. Rozlišitelnost defektů u této metody lze zvýšit dvojitou sondou,

kteřá do určité míry může eliminovat mrtvé pásmo. Tímto způsobem se zkoumají echa a výchylky, které způsobují chyby v materiálu, a na velikosti jejich amplitudy závisí velikost nalezených chyb [2].

4.3 Kondenzační zkouška

Tato zkouška je jednou ze dvou klasických metod korozního zkoušení materiálů. Je poměrně jednoduchá a využívá se také pro hodnocení účinnosti konzervačních nátěrů a prostředků a povrchových úprav obecně. Vzorky jsou exponovány mírně zvýšené teplotě, tj. asi 40 °C, a téměř 100% relativní vlhkosti. Zkouška může probíhat buď konstantně, nebo cyklicky vždy po určitou dobu. Cyklické zkoušky s měnícími se parametry mají lepší výsledky v předpovídání chování materiálů ve skutečných podmínkách [17], [18].

K simulaci průmyslového prostředí a u materiálů s požadavky na vyšší korozní odolnost se využívá stimulace zkušební atmosféry oxidem siřičitým. Kondenzační zkouška, stejně jako následující zkouška v solné mlze, jsou označovány jako zrychlené zkoušky atmosférické koroze. Příklad kondenzační komory *Elcometer 1200* je na obrázku č. 10 [17], [18], [19].



Obrázek č. 10: Kondenzační komora Elcometer [19]

4.3 Zkouška v solné mlze

Jedná se o nejstarší a nejrozšířenější zkoušku korozní odolnosti. Je oblíbená pro svoji jednoduchost, rychlost a poměrně nízkou cenu provedení. Zkoušený díl nebo materiál je umístěn do uzavřeného zkušebního prostoru, nejčastěji komory. Speciální tryskou je dovnitř neustále vháněn roztok chloridu sodného, přičemž se tvoří velmi jemná mlha. Průběh zkoušky může být buď kontinuální, nebo cyklický, stejně jako u předchozí metody [17], [18].

Roztok $NaCl$ (základní zkouška *NSS*) může být různě modifikován, stejně jako zkušební teploty nebo hodnoty pH . Do postupu zkoušky je zařazeno i vymrazování, vysoušení nebo kondenzace. Roztok chloridu sodného také může být pozmeněn kyselinou octovou (zkouška *ASS*) nebo se přidává chlorid měďnatý (zkouška *CASS*). Zkouška solnou mlhou se hodí pro materiály a výrobky z kovů a jejich slitin, a také na kovové i organické povlaky na kovovém podkladu. Solná mlha s přidavkem kyseliny octové a chloridem měďnatým

se využívají ke zkoušení dekorativních povlakových systémů z mědi, niklu a chromu, a také pro povlakovaný hliník. [17], [18].

Příklad solné korozní komory *Ascott Atmosfär* je na obrázku č. 11. Kromě jiného disponuje bohatým příslušenstvím, kam patří například ruční pH metr, teplotní a vlhkostní sonda, dále elektronický zapisovač dat do grafu včetně softwaru, záznamník teploty a vlhkosti, nebo sonda pro měření spotřeby solného roztoku a signalizace jeho nízké hladiny [20].



Obrázek č. 11: Solná korozní komora Ascott Atmosfär [20]

5 AKUSTICKÁ EMISE U KOROZE RŮZNÝCH MATERIÁLŮ

Metoda akustické emise je v dnešní době běžně využívanou nedestruktivní zkouškou, protože ji lze využít v mnoha praktických oblastech. Vzhledem k tomu, že se tato práce orientuje na korozi kovových materiálů, byly vybrány příklady z této oblasti a reprezentují je následující podkapitoly. Akustická emise korozních dějů spolehlivě ukazuje okamžitou rychlost postupu koroze a přidružených procesů. Výhodné je zejména využití více snímačů akustické emise, což může velmi přesně lokalizovat korodující části konstrukce zejména v nepřístupných místech a u vnitřních druhů koroze.

5.1 Akustická emise v automobilovém a leteckém průmyslu

Tato oblast je jednou z nejrozšířenějších, kde se dá ke zkoumání materiálů využít metoda akustické emise. Jako příklad zajímavých materiálů byla vybrána letecká slitina hliníku a slitina hořčíku. Dalším materiálem, kde by se mohla uplatnit metoda akustické emise, je litina s lupínkovým grafitem.

5.1.1 Akustická emise u koroze slitiny hořčíku

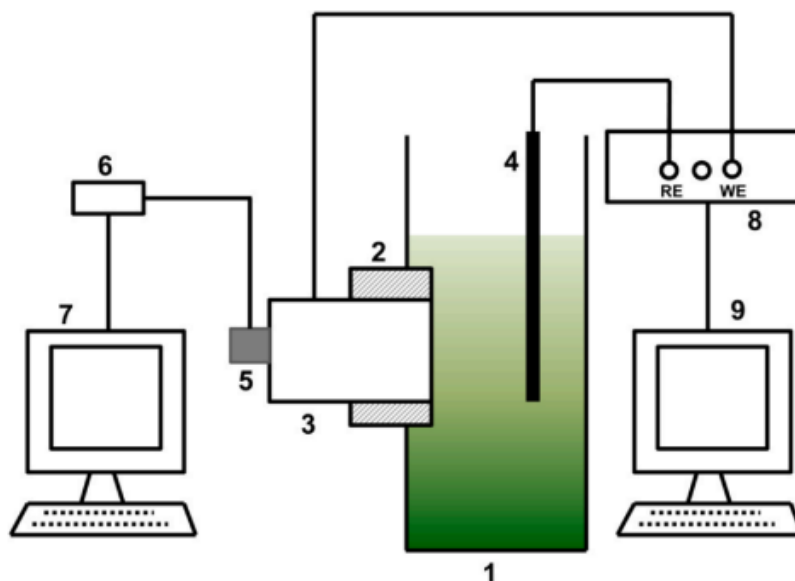
Předmětem zkoumání v tomto příkladu byly slitiny hořčíku, které se používají zejména v automobilovém průmyslu a letectví. Díky biokompatibilitě je možné tyto materiály využívat i v medicíně. Při styku s elektrolytem, který obsahuje chloridové anionty, se však na této slitině objevuje bodová koroze (*pitting*) [21].

Zkoumání hořčíkových slitin pomocí elektrochemického šumu prováděl například Z. Zhang a kolektiv. Slitina AZ91D byla ponořena do alkalického chloridového roztoku a zkoumána pomocí metody elektrochemického šumu. Díky analýze časových záznamů bylo možné jasně rozlišit tři korozní stupně včetně anodického procesu rozpouštění spojeného s růstem, absorpcí a desorpcí vodíkových bublin, důlkovou korozi a inhibičním procesem [21].

Dalším byl Wang a kolektiv, který sledoval *pitting* u slitiny AZ31 ve 4 simulovaných roztocích pomocí vlnové analýzy signálů elektrochemického šumu. Zjistili, že místní proces vývoje koroze ve všech čtyřech prostředích lze rozdělit do dvou fází a prostředí elektrolytů může ovlivnit dominantní korozní jevy v každé fázi [21].

Hořčíkové slitiny studoval i Kim se svým kolektivem, který se věnoval AZ31 Mg pod potencio-dynamickou polarizací. Zjistili, že izolované vodíkové bubliny produkované katodickou reakcí a bubliny vzniklé hydrolyzou u důlkové koroze tvořily zdroje AE. Z tohoto důvodu bylo při zkoumání využito i zapojení metody akustické emise. Sledované parametry elektrochemického šumu a akustické emise byly vykazovány a souvisely s různými stupni koroze. Základní informace o tomto experimentu jsou stručně popsány níže [21].

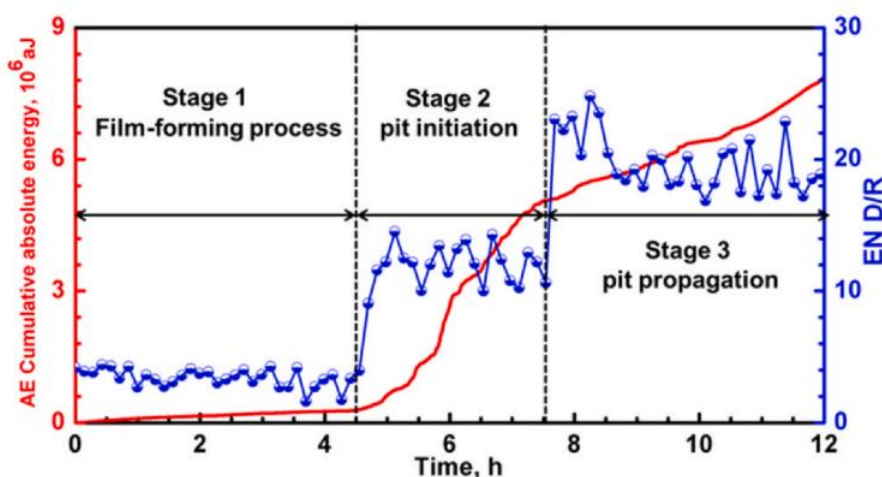
Vzorek byl o rozměrech 15 x 15 x 20 mm a jeho funkční povrch byl upevněn v epoxidové pryskyřici broušené mřížkovým papírem z karbidu křemíku s 2 000 mřížkou, následně vyčištěn ultrazvukem v etanolu a zkontrolován rastrovacím elektronovým mikroskopem. Elektrolyt byl připraven z roztoku chloridu sodného v deionizované vodě při pokojové teplotě. Systém, který byl vytvořen pro monitorování elektrochemického šumu v kombinaci s akustickou emisí, je na obrázku č. 12 [21].



Obrázek č. 12: Systém pro měření akustickou emisí a elektrochemického šumu [21]

(1-korozní člunek, 2-epoxidová pryskyřice, 3-pracovní elektroda AZ31, 4-nasycená kalomelová elektroda, 5-širokopásmový diferenciální snímač AE, 6-předzesilovač 2/4/6, 7-počítač pro sběr dat akustické emise s konektorem PCI-2, 8-elektrochemická pracovní stanice Gamry Reference 600+, 9-počítač pro sběr dat elektrochemického šumu)

Vzorkovací frekvence elektrochemického šumu byla 4 Hz po dobu 12 hodin. Signály akustické emise byly detekovány senzory s pracovní frekvencí $125\text{--}1\,000\text{ kHz}$. Ke zvýšení přilnavosti mezi senzorem a povrchem vzorku byla použita vazelína. *Threshold* amplitudy byl nastaven na 25 dB , čas *peaku* $200\text{ }\mu\text{s}$, čas *hitu* $800\text{ }\mu\text{s}$ a čas pauzy $1\,000\text{ }\mu\text{s}$. Kombinovaný výstup absolutní energie akustické emise a parametru *RQA* elektrochemického šumu vzorku z hořčíkové slitiny AZ31 po vystavení působení roztoku chloridu sodného je na obrázku č. 13 [21].

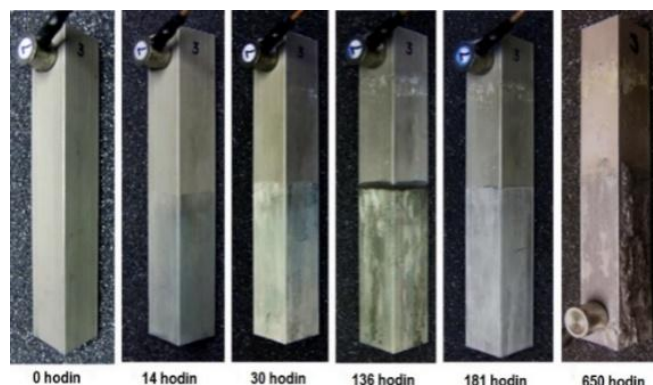


Obrázek č. 13: Výstup měření akustické emise a elektrochemického šumu [21]

5.1.2 Akustická emise u koroze slitiny hliníku

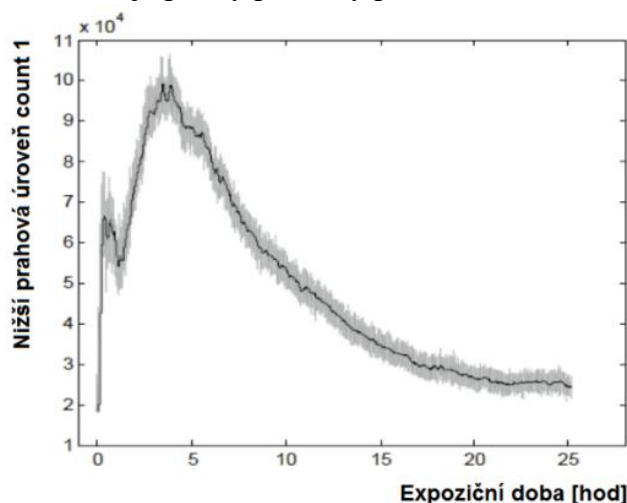
Zde byl zkoumán postup koroze na hliníkové slitině pro letecké plechy. Zrychlenou korozní zkouškou tohoto materiálu se zabývali například *J. Kober* a *Z. Převorovský* z AV ČR. Měli k dispozici 2 vzorky ve tvaru L-profilu, které byly nejdříve exponovány 140 hodin

ve slabších roztocích mořské soli s kyselinou chlorovodíkovou a dusičnou, a poté v silnějších roztocích asi dalších 500 hodin. Vzorky měly délku 100 mm a šířku bočních stran 15 mm. Jejich povrch byl zcela bez úprav, až na drobné oxidační produkty typické pro tento materiál. Korozní poškození vzorků v různých fázích zkoušky je na obrázku č. 14 [22].



Obrázek č. 14: Korozní poškození vzorků při korozní zkoušce [22]

Horní polovina vzorků byla od korozního prostředí izolovaná a disponovala snímači akustické emise *Dakel IDK-09*, přilepenými kyanoakrylátovým lepidlem. Analyzátor *Dakel XEDO* zaznamenal počty emisních překmitů přes 2 prahové úrovně (*count 1* blízko šumové hranice a *count 2* pro asi polovinu rozsahu) a efektivní hodnotu signálu akustické emise přímo na místě korozních zkoušek. Na obrázku č. 15 je průběh překmitů přes prahovou úroveň *count 1* v závislosti na čase, kde je patrný podobný průběh u obou vzorků [22].



Obrázek č. 15: Průběh překmitů přes prahovou úroveň *count 1* v čase [22]

První vrchol trval asi 2 hodiny a odhaduje se, že odpovídal rychlé tvorbě pasivační vrstvy na povrchu vzorků po přerušení zkoušky a očištění části korozní vrstvy. Druhý vrchol měl dobu trvání asi 5 hodin a v čase pak vždy klesal, i když se jeho výška během zkoušky měnila. Tak může vypadat průběh postupu koroze a tvorbě různých důlků, puchýřů nebo trhlin. Ze zmiňovaného poklesu je rovněž možné odhadnout opětovnou pasivaci povrchu korozními produkty a možné vyčerpání agresivity roztoku. Akustická emise zde tak odhalila mechanismus korozního poškození, ale k jeho přesnému určení bylo třeba ještě sestavit daný korozní model pomocí doplňkových fyzikálně-chemických analýz. K tomu bylo v tomto případě využito měření nelineární ultrazvukovou metodou *NWMS* několikrát v průběhu korozní zkoušky [22].

5.1.3 Akustická emise u koroze litinových válců motoru

Zajímavým příkladem, kde by se také dala využít metoda akustické emise, je problematika koroze a jejích dopadů na životní cyklus litinových válců motoru armádního vozidla *Tatra 815 6x6 VVN* o chemickém složení dle tabulky č. 1, kterou se například zabýval *T. Binar* a kolektiv pod záštitou Ministerstva obrany ČR. Pokud je vložka válce zasažena korozí, mohou být zasaženy i písty, jejich kroužky a čep, je proto nutné následně vyměnit vše, což znamená vysoké náklady [23].

Tabulka č. 1: Chemické složení dané litiny [23]

Jednotlivé prvky	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
Množství v litině [v %]	2,870	0,794	1,453	0,292	0,055	0,082	0,050	0,147

Vzorky byly nejprve podrobeny korozi v kondenzační komoře a následně bylo provedeno studium charakteristik plastické deformace, křehkých lomů, vrubové houževnatosti Charpyho kladivem při teplotách -80 až +100 °C a měření mikrotvrdosti podle Vickerse (přístroj *Shimadzu HMV-2T*) v závislosti na vytvořené korozní degradaci. Rovněž byla využita mikroskopie, metalografie (mikroskop *Neophot 32* a fotoaparát *Olympus C-5050*) a chemická analýza spektrometrií *GDOS* (spektrometr *LECO SA-2000*) ke studiu struktury. K měření teploty, relativní vlhkosti a rosného bodu byl využit přístroj *Voltcraft DL-121TH USB* [23].

Vzorky byly řezány elektrojiskrovým strojem *Sodick AQ 400L*, protože tato technologie působí na materiálu jen zanedbatelnou tepelně ovlivněnou oblast. Metalografické analýzy ukázaly složení litiny s lupínkovým grafitem, jemným perlitem a ostrůvky eutektického fosfidu a feritu. Část vzorků byla vždy zcela bez ochrany a část zabalena do speciální fólie s korozními inhibitory. Bylo provedeno celkem 54 korozních cyklů, které odpovídaly přibližně stanovené reálné době ve skutečných podmínkách zaparkovaného vozidla venku. Jedna zkouška v komoře trvala 24 hodin a jednotlivé cykly byly rozvrženy následovně [23]:

- 9 cyklů odpovídajících době přibližně jednoho roku,
- 18 cyklů odpovídajících době asi 2–3 roky,
- 27 cyklů odpovídajících době asi 5 let [23].

Výše zmíněné metody se mohou vzájemně doplňovat s měřením metodou akustické emise, díky které je možné snímat průběh celého procesu koroze v korozní komoře pomocí nalepených snímačů na jednotlivých vzorcích. Rovněž je takto možné sledovat chování materiálu dle průběhu signálů akustické emise při prováděných destruktivních zkouškách. Právě litina s lupínkovým grafitem byla vybrána jako předmět praktické části této práce [23].

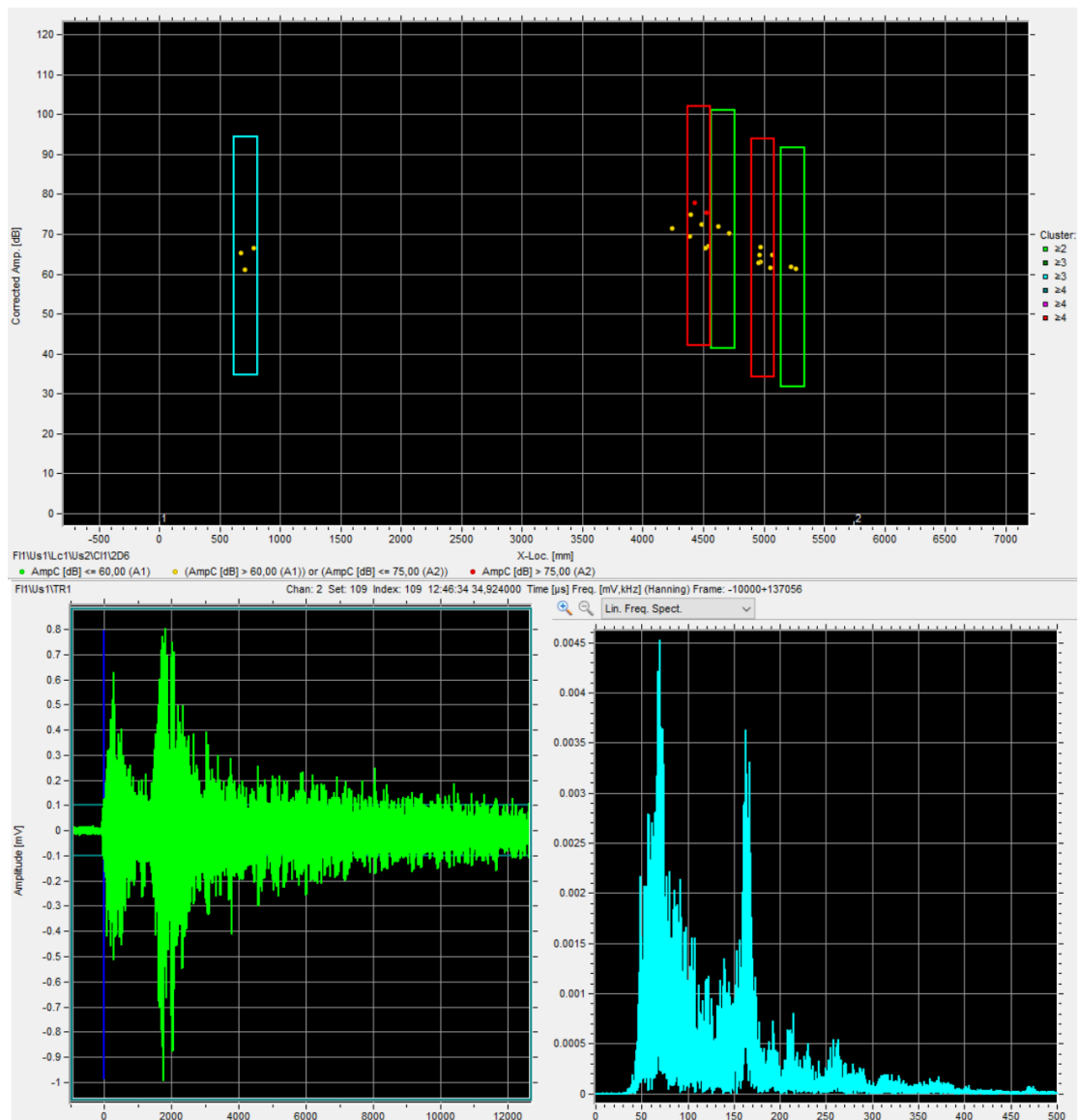
5.2 Akustická emise v průmyslu a potravinářství

Další velkou oblastí využití akustické emise je potravinářský průmysl, přeprava paliv a plynů, kde dominují oceli a nerezové oceli.

5.2.1 Akustická emise u koroze ocelové tlakové láhve

Příkladem může být i měření akustické emise koroze ocelové tlakové nádoby pro přepravu zemního plynu. Povrchová vrstva korozních produktů je zde velmi křehká. Drolí se, odlamuje se od podkladu a ztrácí pevnost při jakékoliv plastické deformaci nebo vibracích. To je u tohoto typu výrobků velmi nebezpečné. Vzhledem k tomu, že koroze zde také tvoří

zdroj akustické emise, je možné sledovat průběh na jejích signálech. Příklad průběhu signálů akustické emise při detekci koroze na tlakové láhvi je na obrázku č. 16 [24].

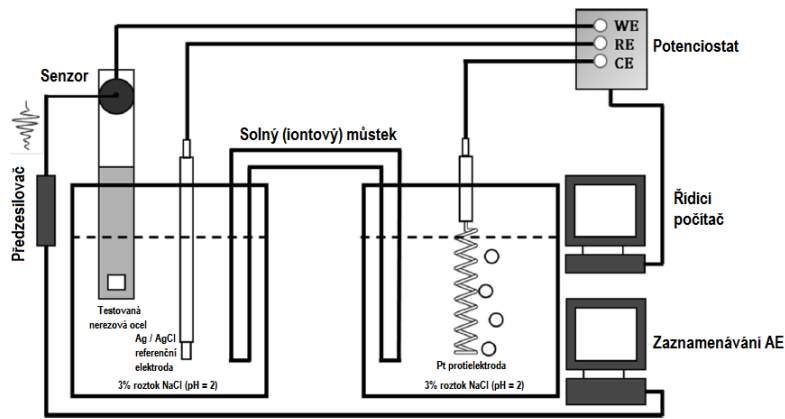


Obrázek č. 16: Průběh signálů akustické emise koroze tlakové láhve [24]

5.2.2 Akustická emise u koroze klasické nerezové oceli

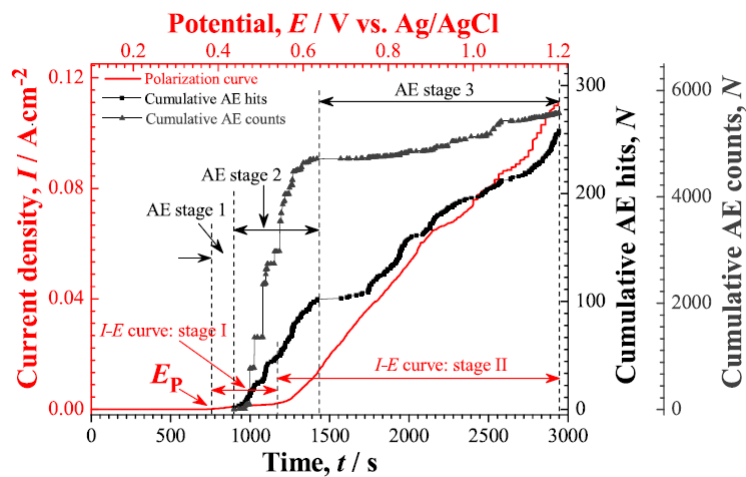
Nerezová ocel často bývá mylně považována za korozi zcela rezistentní materiál. Oproti klasickým materiálům je její korozní odolnost však pouze zvýšená díky vlastnostem přísadových prvků, kterými bývá zejména chrom a nikl. Při vystavení tohoto materiálu působení agresivního prostředí, kterým mohou být kyseliny nebo solné lázně, lze nalézt korozní produkty i zde. Například nerezová ocel s označením ČSN 17240 / AISI 304, která byla předmětem následujícího zkoumání, se běžně využívá hlavně v potravinářství a při vystavení působení kyselin se u ní objevuje bodová koroze neboli pitting [25].

Zkoušením se například zabýval *W. Kaige* a *K. Jae-Yeon*. Koroze za pokojové teploty zde byla urychlena anodickou polarizací v roztoku chloridu sodného s přidavkem kyseliny chlorovodíkové na pH 2. Schéma měření je na obrázku č. 17 [25].

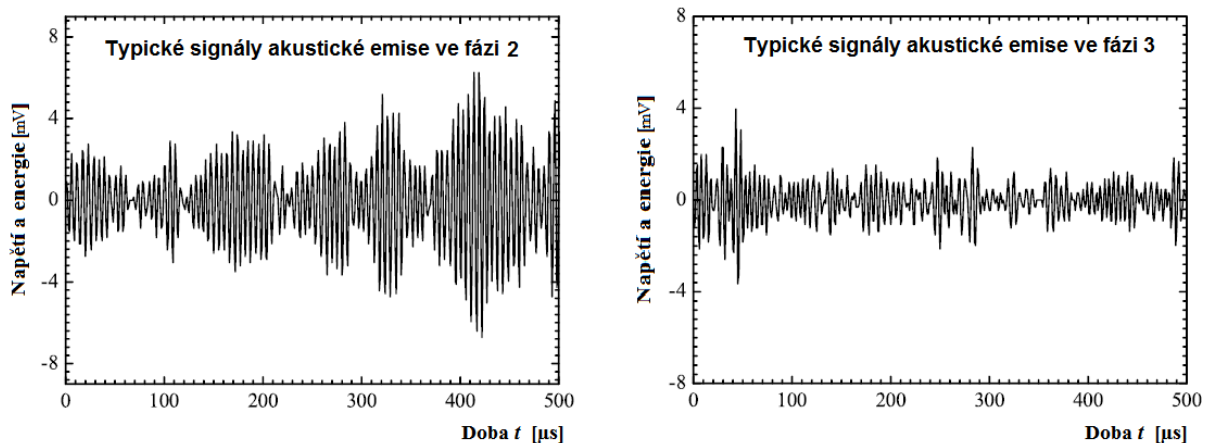


Obrázek č. 17: Schéma polarizačního článku [25]

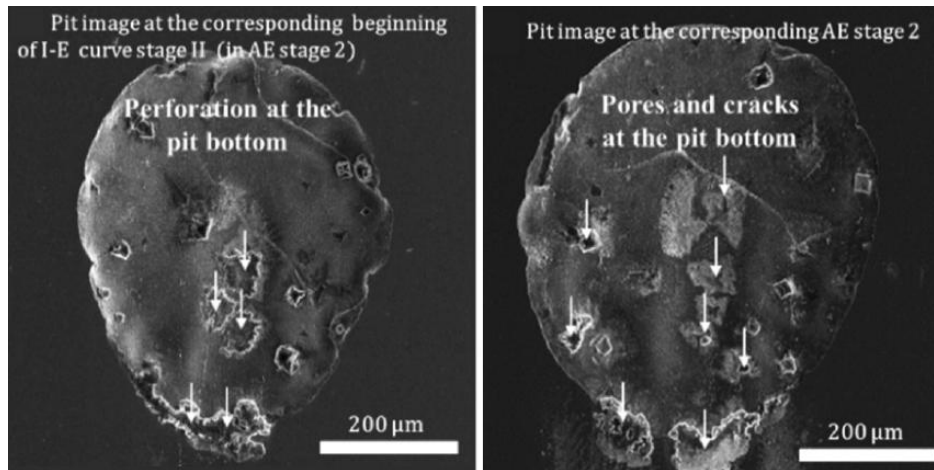
Měření akustické emise probíhalo od počáteční polarizace po celou dobu zkoušky. V křivce akustické emise jsou zaznamenány kumulativní *hits* a *counts* a tato křivka vykazuje charakteristiky s postupným vývojem, který ji rozděluje na 3 fáze: *fáze 1* – krátké zpoždění před výskytem AE kvůli době do vyrovnání potenciálové energie, *fáze 2* a *3* – výrazné zvýšení akustické emise způsobené postupující tvorbou důlkové koroze. Grafické znázornění je na obrázku č. 18, typické signály AE ve fázi 2 a 3 na obrázku č. 19 a rozvoj koroze ve fázi 2 pod mikroskopem na obrázku č. 20 [25].



Obrázek č. 18: Signály kumulativních hitů a countů AE s polarizační křivkou [25]



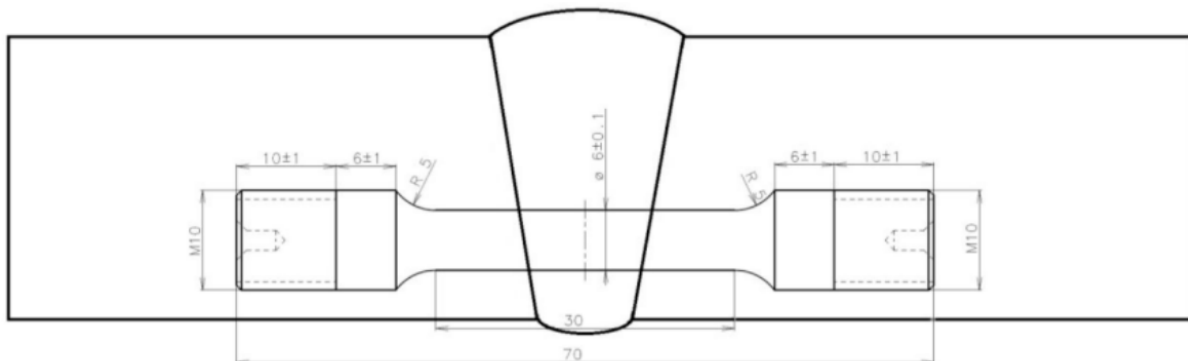
Obrázek č. 19: Typické signály AE ve fázi 2 a 3 [25]



Obrázek č. 20: Rozvoj koroze ve fázi 2 [25]

5.2.3 Akustická emise u koroze a creepu ocelového potrubí

Tímto tématem se zabýval *L. Nohál* a kol. z FSI VUT a *M. Svobodová* z UJP Praha. Materiálem bylo v tomto případě vysokotlaké potrubí bojleru *K3* v opatovické elektrárně z oceli *ČSN 15 128.5 (DIN 14MoV6-3)* o rozměrech $273 \times 25 \text{ mm}$. Vzorek byl pořízen po 213,5 hodinách při teplotě 528 °C a tlaku $9,6 \text{ MPa}$. Transmisní a ultrazvuková zkouška ukázala poruchy svaru, které nedovolovaly další používání potrubí. Vzorek a z něj připravená zkušební tyč napříč svarem je na obrázku č. 21 [26].



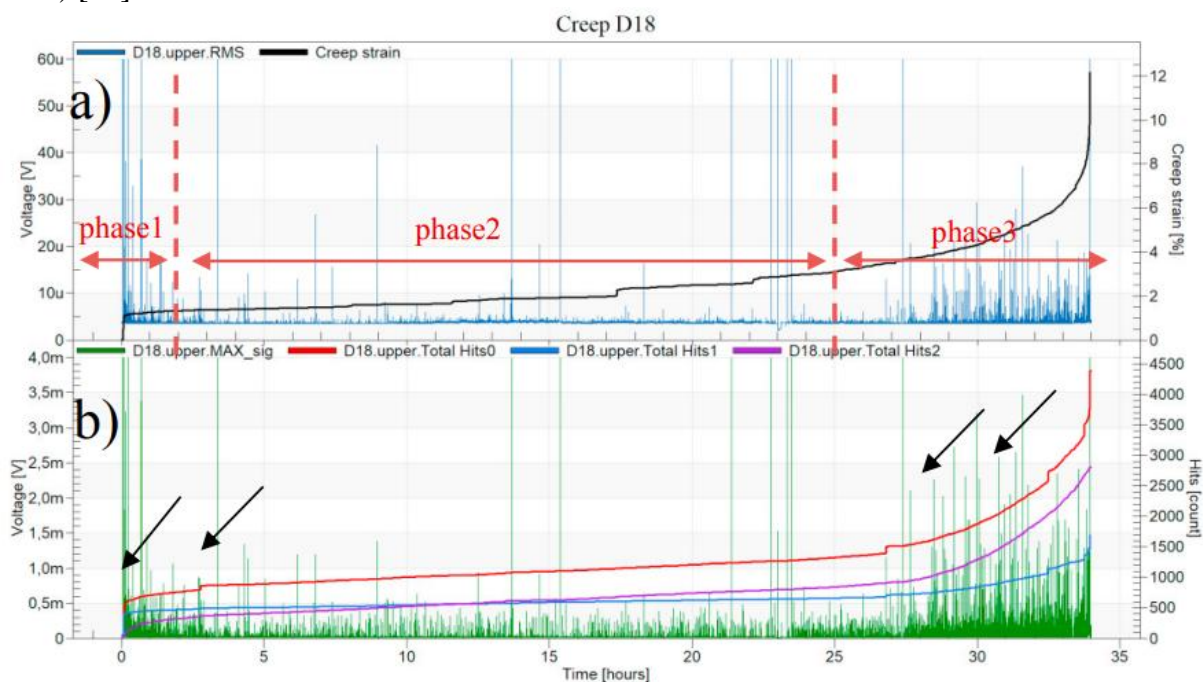
Obrázek č. 21: Orientace a rozměry vzorku (ocel 15 128.5) [26]

Creepové zkoušky byly zrychleny a prováděny na 3pozicovém stroji *Zst 2/3* od firmy *Veb Werkstoff Prufmaschinen Leipzig* (viz obrázek č. 22). Akustická emise během creepu byla měřena systémem *Dakel-Zedo* se vzorkovací frekvencí 2 MHz . Signál byl monitorován pomocí piezoelektrických magnetických měničů *MDK-13*. Čidlo mělo integrovaný předzesilovač a detekce probíhala od 10 dB v rozsahu frekvencí $50\text{--}100 \text{ kHz}$ [26].



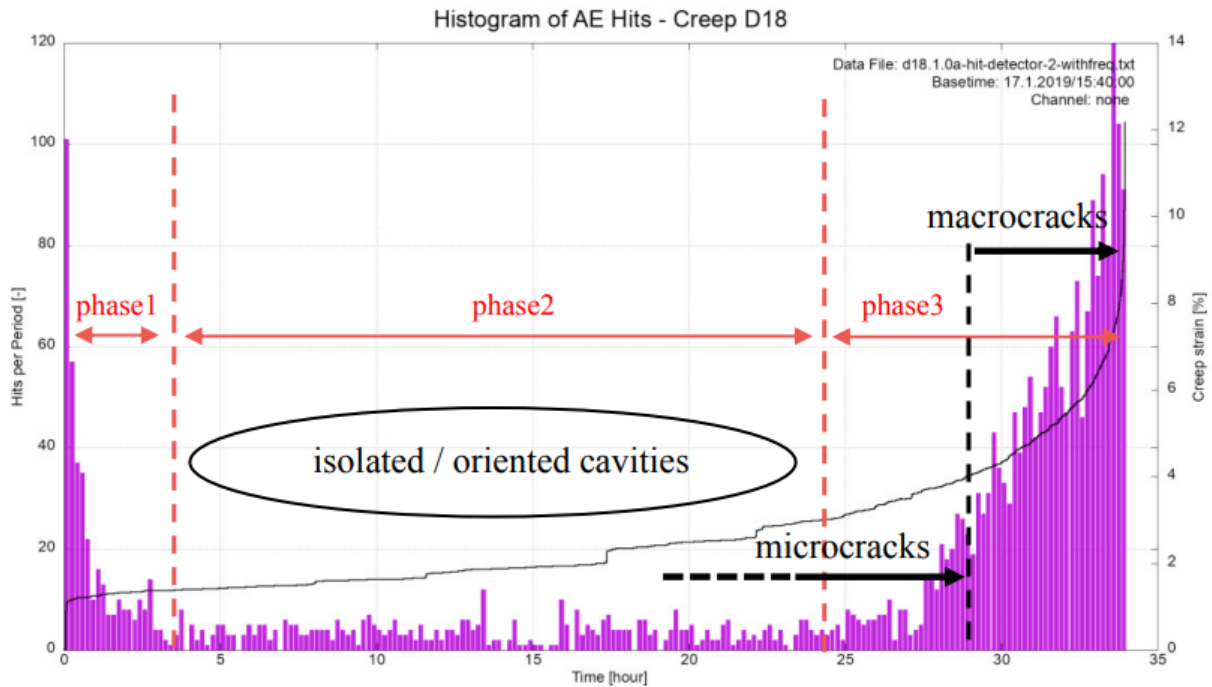
Obrázek č. 22: 3pozicový stroj pro creepovou zkoušku Zst 2/3 [26]

Signál akustické emise ukázal, že vysoká aktivita probíhala v první fázi, druhá fáze byla klidnější a závěrečná třetí fáze měla opět silný průběh. Systém AE detekoval hity (detektor 0, 1, 2) na třech nastavitelných úrovních *thresholdů*. Detektory 0 a 1 byly nastaveny na fixní hodnotu 0,31 a 0,63 % rozsahu a detektor 2 na variabilní hodnotu 200% úrovně. Jako ukázka typického průběhu akustické emise při creepovém testu byl vybrán vzorek označen číslem 18. *Peaky* creepové křivky korespondovaly s 3fázovým degradačním mechanismem (viz obrázek č. 23) [26].

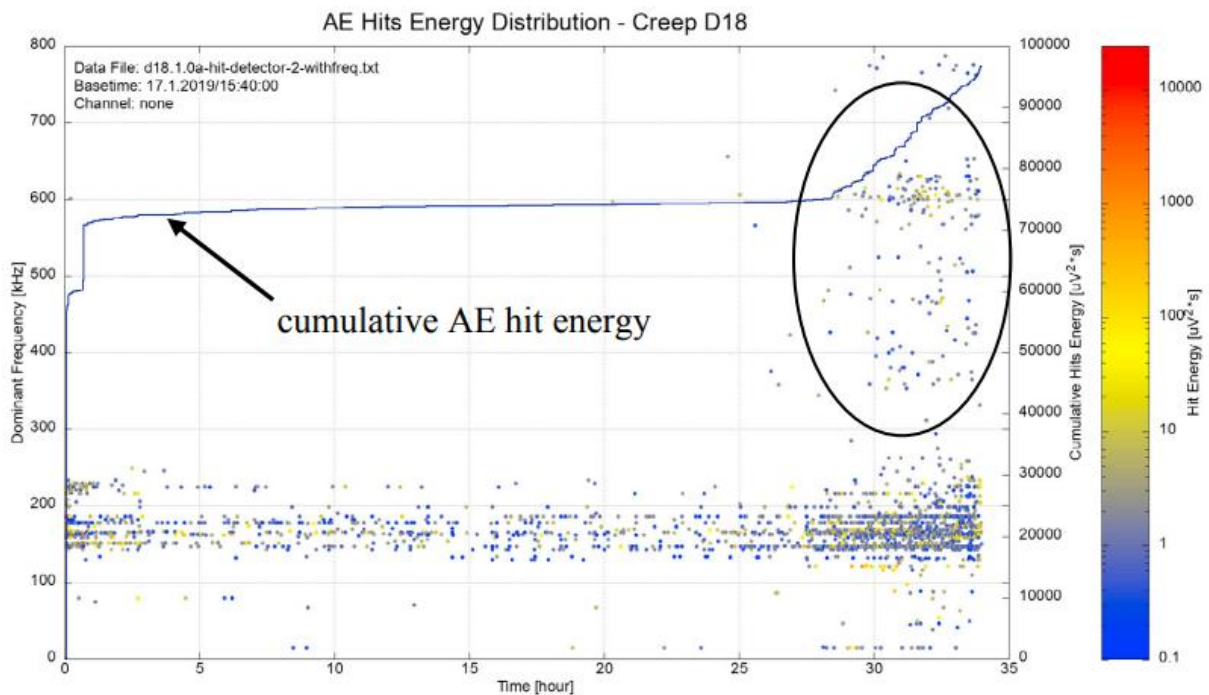


Obrázek č. 23: Průběh akustické emise při creepovém testu na vzorku č. 18 [26]

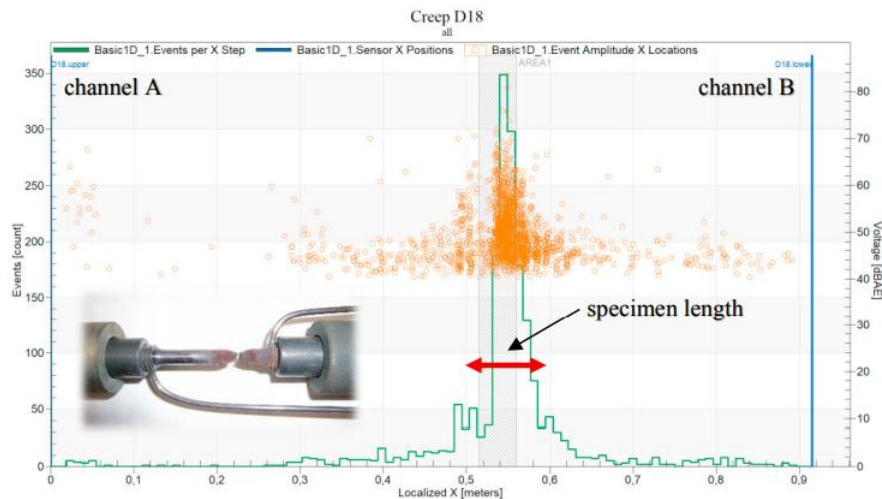
V poslední fázi se *hity* AE objevovaly zejména ve vyšších frekvencích 160 kHz. Pro lokalizování bylo třeba vyfiltrovat nesouvisějící signály a šum - zde byly využity dva nemagnetické dráty z nerezové oceli *AISI 316L*. Na převod signálu akustické emise byla využita Fourierova transformace. Histogram *hitů* akustické emise je na obrázku č. 24, kumulativní energie *hitů* je na obrázku č. 25 a detekované poškození vzorku na obrázku č. 26 [26].



Obrázek č. 24: Histogram *hitů* akustické emise [26]



Obrázek č. 25: Kumulativní energie *hitů* vzorku č. 18 [26]



Obrázek č. 26: Detekované poškození vzorku [26]

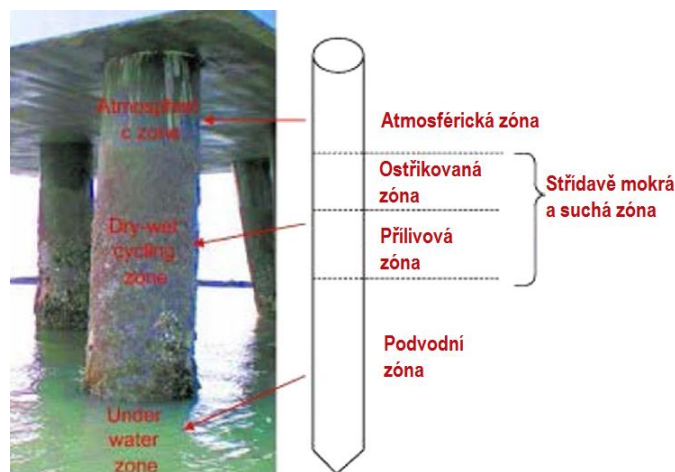
5.3 Akustická emise ve stavebnictví

Stavebnictví je další velkou skupinou, kde lze provádět zkoumání průběhu akustické emise při degradaci materiálů korozním působením.

5.3.1 Akustická emise u koroze železobetonových pilířů

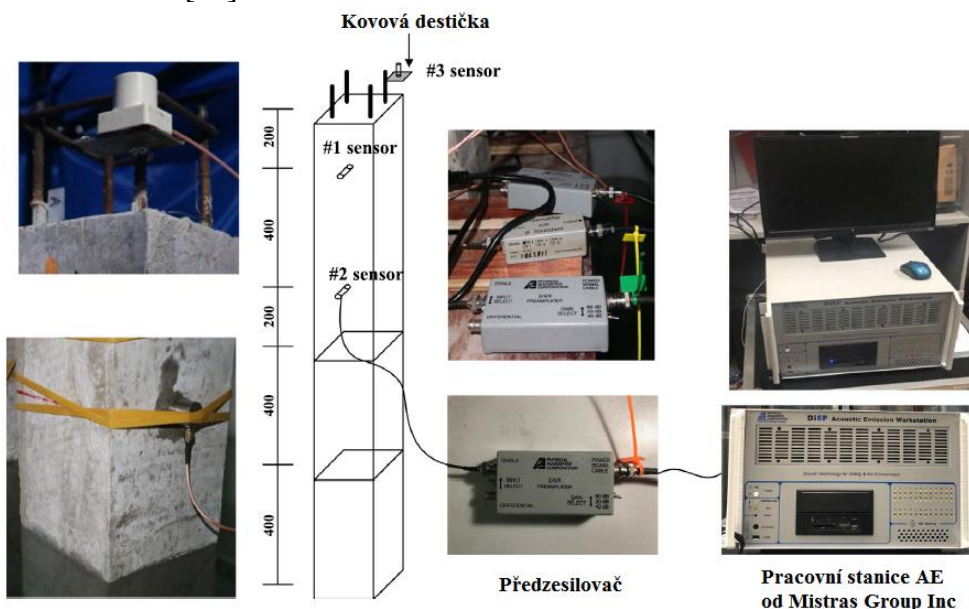
V železobetonových pilířích vzniká lokální koroze, která výrazně ovlivňuje jejich stabilitu, a je proto nutné ji odhalit co nejdříve. K tomu může posloužit také metoda akustické emise. V tomto případě se jedná o pilíře, které jsou navíc vystaveny působení agresivnímu mořskému prostředí. Zkoušení tohoto typu materiálů se věnoval například Y. Zhenga a kol. Vzorky byly podrobeny zrychlené korozní zkoušce s podvodními a přílivovými vlnami v simulovaném prostředí plastové nádrže, což je znázorněno na obrázku č. 27 [27].

Vzhledem k tomu, že na signál akustické emise má velké dopady, byl pro tyto účely navržen nový filtr *ADPF*. Měření AE bylo prováděno pomocí 9 piezoelektrických senzorů (tři na každý zkoumaný vzorek) s rezonanční frekvencí 150 kHz a pracovní frekvencí 50–400 kHz. Po celou dobu koroze byly kromě analýzy signálů akustické emise zkoumány i rozměry trhlin. Takto mohlo být lokalizováno korozní poškození bez ohledu na umístění senzorů [27].



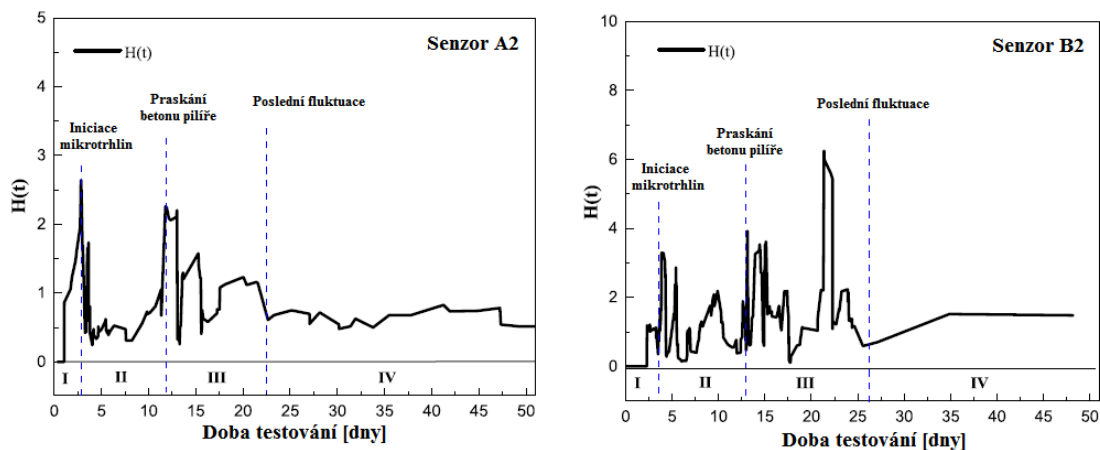
Obrázek č. 27: Pilíře s různými zónami v mořském prostředí [27]

Zkoumané pilíře byly zhotovené speciálně jen pro tuto zkoušku, protože zkouška probíhala do úplného poškození betonové konstrukce. Jejich složení tvořila standardní betonová směs. Jejich průřez byl čtvercový o hraně 150 mm a jejich délka činila 1 600 mm. Na začátku zkoušky již měly různý stupeň koroze – 5 % s označením LA_1 a LA_2 , 10 % s označením LA_2 a LB_2 a 20 % jako A a B . Vzorky A a B byly dále vystaveny různým dobám působení zkoušky. Pro porovnání byl testován jeden pilíř s označením C , zcela bez koroze. Schéma umístění snímačů akustické emise a měřicí přístroje jsou na obrázku č. 28 [27].



Obrázek č. 28: Umístění snímačů a měřicí zařízení AE [27]

Průběhy zkoušky u pilířů A a B zaznamenaných senzory číslo 2 jsou na obrázku č. 29 [27].

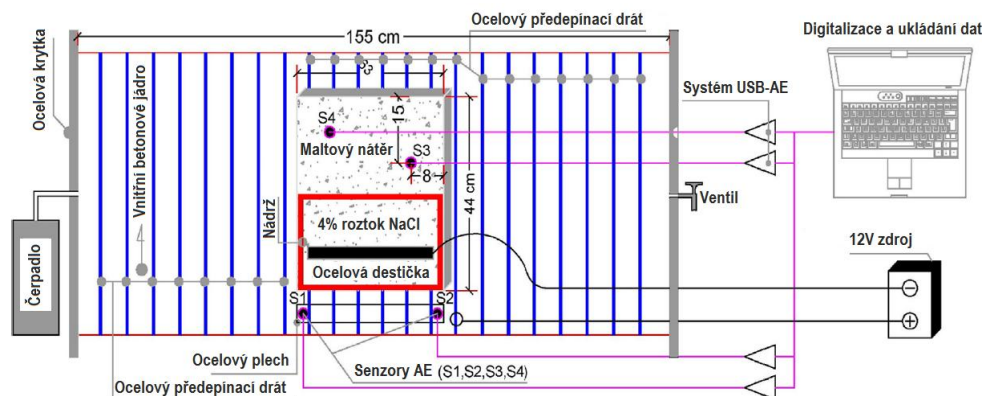


Obrázek č. 29: Průběhy zkoušky u pilířů A a B zaznamenané senzory č. 2 [27]

5.3.2 Akustická emise u koroze předepjatých betonových trubek

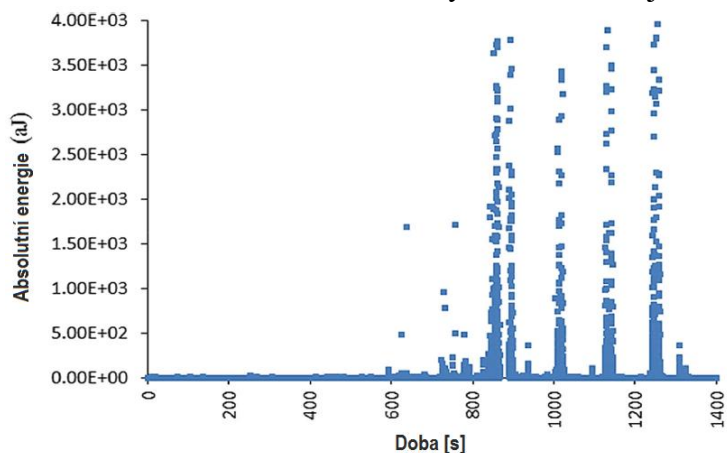
Předepjatý beton disponuje vyšší pevností v tahu a využívá se zejména pro stavby mostů, trubek, tlakových nádob, přehrad, ochranných plášťů jaderných reaktorů, železničních pražců nebo pilířů. Trubky mívají ocelové spirálové výztuhy, kde lze rovněž pozorovat vznik a postup koroze. Vlivem koroze na tyto výztuhy v předepjatých betonových trubkách a jeho zkoumání pomocí AE se kupříkladu zabýval *R. Goldaran* a kol. Bylo zde využito zrychlené korozní zkoušky ve 4% roztoku chloridu sodného, a navíc se změnami tlaku vody

z 0 na 2, 4, 6 a 8 barů po dobu 1 týdne. Po dobu dalších 4 dnů probíhala zkouška za sucha. Schéma zapojení je na obrázku č. 30 [28].



Obrázek č. 30: Schéma zapojení betonové trubky pro měření AE [28]

Trubka z betonu o pevnosti v tlaku 50 MPa měla vnitřní průměr 300 mm a vnější 420 mm . Výztuhové spirálové tyče měly pevnost $1\,670\text{ MPa}$, průměr 7 mm a délku $3\,000\text{ mm}$. Vlivem velké délky tyčí byl pod ně nainstalovaný plech k zabránění útlumu proudu v katodické ochraně. Aparát pro měření akustické emise se skládal ze systému *USB-AE 1283* se 4 kanály, softwaru *AEwin* a 4 piezoelektrických senzorů *PK-151* s rezonanční frekvencí 150 kHz . Dva senzory (S_1 a S_2) byly připevněny na kovovou destičku a dva (S_3 a S_4) přímo na beton. Průběh změny energie akustické emise v čase při změnách tlaku je na obrázku č. 31 a viditelná koroze na konci testu, kde došlo k 25% úbytku materiálu, je na obrázku č. 32 [28].



Obrázek č. 31: Průběh energie AE při změnách tlaku v čase [28]

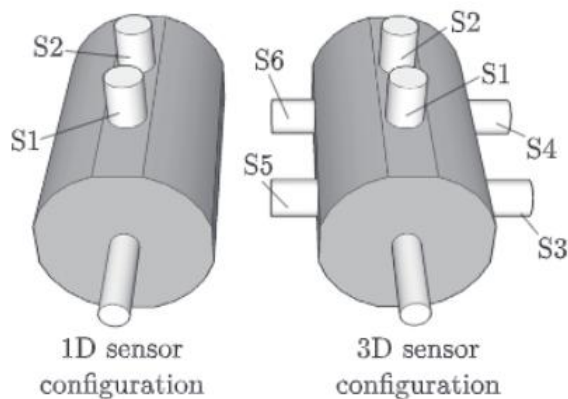


Obrázek č. 32: Korozní stav spirálových tyčí [28]

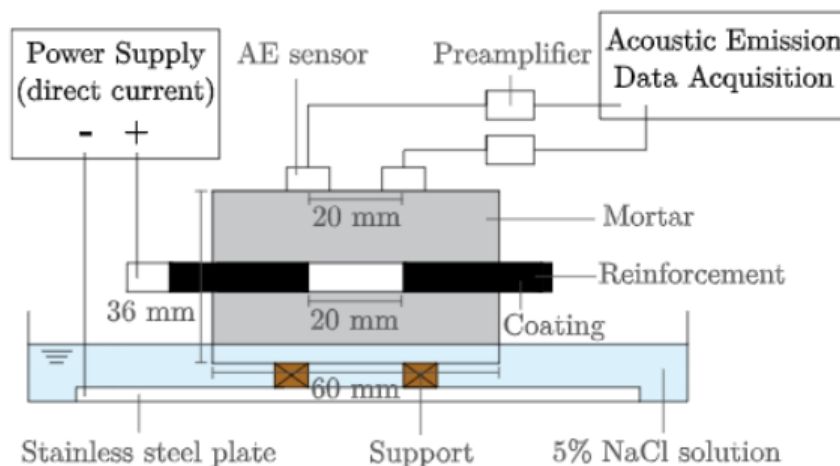
5.3.3 Akustická emise u koroze železobetonové konstrukce

Tímto jevem se zabývali *Ch. Van Steen* a kol. z KU Leuven a *L. Pahlavan* z TU Delft v Belgii. Tyto konstrukce se zkoušejí přímo na místě určení, a proto vyžadují pokročilé nedestruktivní metody jako měření potenciálu, polarizačního odporu, galvanostatickou pulzní a odporovou metodu apod. To zvyšuje poptávku po kalibraci prováděnou společně s jinými metodami. K tomu se nabízí metoda akustické emise, která je zde doplněna skenováním počítačovou tomografií (mikro-CT) [29].

Válcové betonové vzorky o průměru 36 mm a výšce 60 mm byly vyrobeny ve formě vyrobené 3D tiskem. Boky měly zploštělé kvůli lepšímu přilnutí senzorů akustické emise. Byly vyrobeny vzorky s ocelovou výztuží a pro porovnání i bez výztuže. Ocelovou výztuž tvořily tyče o průměru 6 mm. Konce byly natřeny antikorozií barvou, kromě prostřední části o délce 20 mm. Šest vzorků bez výztuže bylo po dobu 28 dní podrobena pevnostnímu testu a na závěr 3 vzorky i korozní zkoušce, a to 24 hodin v 5% roztoku chloridu sodného. Urychlená korozní zkouška pomocí stejnosměrného proudu o proudové hustotě $100 \mu A/cm^2$ začala 29. den experimentu. Sensory byly nalepeny buď v konfiguraci 1D nebo 3D (viz obrázek č. 33) a sestava pro zkoušení s 1D konfigurací senzorů je na obrázku č. 34 [29].



Obrázek č. 33: 1D a 3D konfigurace lepení čidel AE [29]

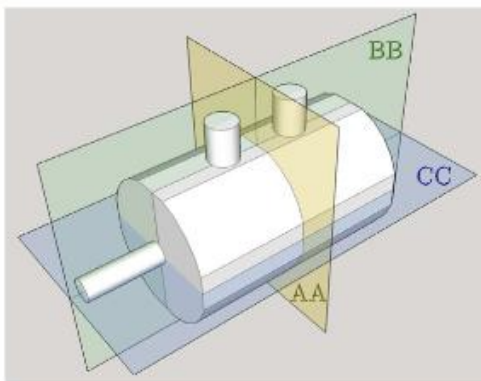


Obrázek č. 34: Sestava pro zkoušení s 1D konfigurací senzorů AE [29]

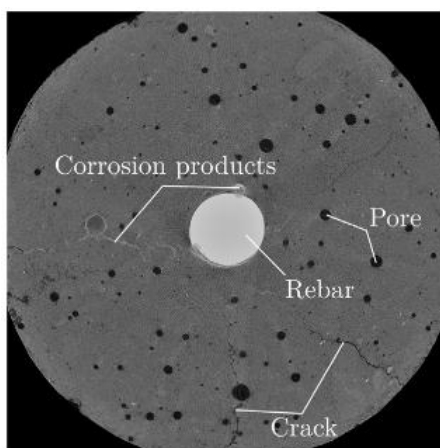
Akustická emise vzorky monitorovala průběžně. Piezoelektrické senzory měly frekvenční rozsah 50–2 000 kHz a přichyceny byly tekutým lepidlem a páskou. Díky předzesilovačům, které byly připojené k systému měření akustické emise se 6 kanály *Vallen AMSY-6*, bylo možné detekovat 34 dB. Aby bylo možné eliminovat vliv odrazů, frekvenční spektrum bylo

nastaveno na vyšší hodnoty v rozmezí 230–850 kHz. K záznamu dat v reálném čase byl využit software *Visual AE*, k dalšímu zpracování pak *Matlab* a k vyhodnocení *Dataviewer*. *Threshold* byl nastaven na 38,5 dB a dva vzorky byly průběžně monitorovány a jeden byl určen jako "falešný" ke zjištění, jestli docházelo k registracím vlivů prostředí, absorpci chloridu sodného nebo smáčení betonu [29].

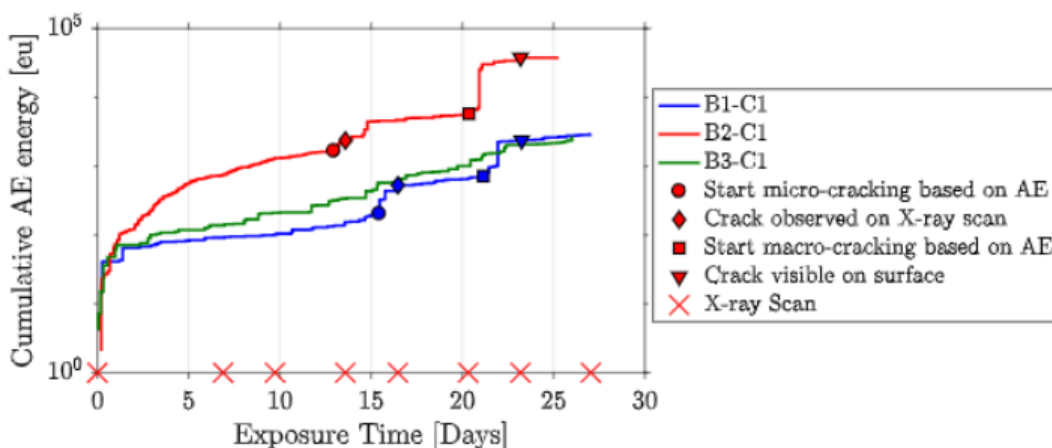
Pomocí mikro-CT byly provedeny 3 virtuální řezy materiálem vzorku (AA, BB, CC - viz obrázek č. 35). Například v řezu AA byly objeveny praskliny, póry a korozní produkty, jak ukazuje obrázek č. 36. Energie akustické emise v průběhu času a tvorba poškození je zachyceno v grafu na obrázku č. 37 [29].



Obrázek č. 35: 3 roviny mikro-CT řezů vzorkem [29]



Obrázek č. 36: Řez AA [29]



Obrázek č. 37: Vyhodnocení měření v průběhu času [29]

5.4 Shrnutí a krátké rozšíření tematiky

Z výše uvedeného vyplývá, že metoda akustické emise je dnes velmi rozšířená a z pohledu korozního působení se s jejím měřením lze setkat u materiálů pro automobilový a letecký průmysl (litina, slitiny hliníku a hořčíku), v průmyslové výrobě a potravinářství (oceli a nerezové oceli), ale také ve stavebnictví (železobetonové konstrukce). Z dalších příkladů článků, které se zabývají podobnou tematikou lze vybrat následující.

5.4.1 Akustická emise u koroze nerezové oceli potrubí reaktoru

Článek od čínských autorů *Jian Xu, Xinqiang Wu a En-Hou Han (Acoustic emission response of sensitized 304 stainless steel during intergranular corrosion and stress corrosion cracking)* se zabývá odezvou akustické emise při mezikrystalové a transkrystalové korozi válcovaného plechu z oceli s označením dle normy *AISI 304 (ČSN 17 240)*, který se využívá jako konstrukční materiál chladicího potrubí reaktorů v jaderných elektrárnách. Vzhledem k tomu, že se v provozu nachází proudící kapalina o vysoké rychlosti a tlaku, je detekce akustické emise velmi obtížná [36].

V laboratorních podmínkách bylo zjištěno, že proces tvorby mezikrystalové koroze může generovat signály AE o nízké amplitudě. Dalšími zdroji signálů mohou být rozpady kovových vazeb, desorpce meziproductů a depozice korozních produktů během polarizace. Aktivita AE se liší v závislosti na rozdílu potenciálů. Při procesu korozního praskání se počet hitů AE plynule zvyšuje, signály jsou spíše kontinuální a lze je rozeznávat podle amplitudy. Po procesu korozního praskání je na materiálu možné nalézt dva typy lomů – mezikrystalové a transkrystalové. Zatímco u procesu tvorby mezikrystalových lomů může detekovatelné signály akustické emise vyvolat pouze plastická deformace, u tvorby transkrystalových lomů může signály vyvolat jak plastická deformace, tak šíření trhlin [36].

5.4.2 Akustická emise u abraze a koroze u nerezové oceli na tlakové lahve

Článek *A study of abrasion–corrosion of AISI 304L austenitic stainless steel in saline solution using acoustic emission technique* od autorů z Francie (*F. Ferrer, H. Idrissi, H. Mazille, P. Fleischmann a P. Labeeuw*) se věnuje studiu vlivu abraze na korozi u austenitické nerezové oceli s označením *AISI 304L (ČSN 17 249)*. Abrazivní testy probíhaly v roztoku síranu sodného kvůli zajištění elektrické vodivosti prostředí, abrazivně–korozní testy v roztoku chloridu sodného. Abrazivem byly drobné částice karbidu křemíku, které byly rozptýleny v proudící kapalině. Z testů plynou dva hlavní závěry - vliv abraze na korozi a vliv koroze na abrazi [37].

Co se týče vlivu abraze na korozi, dopadající částice lokálně zvyšují aktivitu povrchu a jeho drsnost. Tím se také zvětšuje plocha kovu, která je v kontaktu s elektrolytem, a rychlost koroze. Abraze tvoří lokální heterogenity v šíření napětí a elektrochemických vlastností povrchu – zejména silně ovlivněné oblasti mají vyšší elektrochemickou aktivitu. To může vést k rozvoji galvanického článku mezi těmito oblastmi a sousedními pasivními méně namáhanými zónami, což by mohlo být příčinou anodického rozpouštění [37].

Pro vliv koroze na abrazi bylo zjištěno, že nárazy částic při malém úhlu tvoří vločky, které jsou více nakloněné, vzájemně zploštělé a stále tvoří pasivní vrstvu. U velké rychlosti dopadu částic není pozorovatelný rozdíl v úhlu dopadajících částic kvůli vysoké abrazi [37].

U nižších rychlostí je mechanismus abraze podobný kování, kdy se na povrchu tvoří místa o různém napětí v závislosti na úhlu dopadu. Pod malým úhlem dopadu jsou vločky

na povrchu silně nakloněné a hrozí jejich utrnutí častěji, než při kolmém dopadovém úhlu. Stejně mechanické poškození ale tvoří právě kolmý dopadový úhel abrazivních částic dopadajících vyšší rychlostí. To může způsobovat korozi pod napětím, lokální praskání a odtrhování vloček. Ovlivnění otěru korozi je tedy větší při dopadovém úhlu 90° [37].

5.4.3 Akustická emise u koroze martenzitické oceli

Následující studie od autorů z Japonska, *A Comparative Study of Localized Corrosion and Stress Corrosion Cracking of 13Cr Martensitic Stainless Steel Using Acoustic Emission and X-ray Computed Tomography* (Kaige Wu, Kaita Ito, Ippei Shinozaki, Pornthep Chivavibul a Manabu Enoki), porovnává lokalizaci koroze u oceli s obsahem 13 % chromu metodou akustické emise a rentgenovou počítačovou tomografií. Martenzitická nerezová ocel se 13 % chromu odpovídá označení *AISI 420* (ČSN 17 022 nebo ČSN 17 024) a využívá se jako konstrukční hlavně ve stavebnictví, jaderných elektrárnách, ropném a plynovém průmyslu [38].

Byla provedena zátěžová korozní zkouška pod tenkou vrstvou neutrálního roztoku *NaCl* (ekvivalent atmosférické koroze) u vzorku ohnutého do tvaru „U“. Zkouška byla doplněna monitorováním AE a pozorováním pomocí optické mikroskopie. Vzorky měly různou úpravu (zahřívání a chlazení). K demonstraci korozní morfologie byla u obou případů použita 3D RTG počítačová tomografie [38].

Ze závěrů vyplynulo, že korozní odolnost závisí na mikrostruktuře (tvořící se karbidy $M_{23}C_6$ zvyšují citlivost k mezikrystalové, důlkové a šěrbinové korozi) a zbytkovém napětí v důsledku fázové transformace během kalení. U vzorku *B* (pouze kalen – vysoké zbytkové napětí a nízká houževnatost) byla iniciace a šíření korozních trhlin byla výrazně rychlejší. Lokalizovaná koroze se vyznačovala nepravidelnými důlky s trhlínami a usazenými korozními produkty. Korozní praskání je iniciováno z korozního důlku a šíří se ve formě 3D klikaté a nespojitě morfologie, která by mohla být oddělována některými dutinami [38].

V obou případech byly na vzorcích detekovány signály AE. U lokalizované koroze byly rozpoznány 2 shluky o různé úrovni frekvencí (nízkofrekvenční AE může pocházet z praskání v korozních produktech, vysokofrekvenční shluk by mohl být spojen s tvorbou vodíkových bublin). U šíření trhlin byly detekovány 3 shluky AE. Kromě vysokofrekvenčního vývoje vodíkových bublin lze pro rozpoznání plastické deformace a praskání využít rozdílné amplitudy signálu AE. Signály AE doprovázející lokalizaci koroze a šíření trhlin mohou být využívány pro lokální sledování různých zařízení, zabraňování předčasným haváriím a poruchám [38].

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část se skládá z výběru a teoretických předpokladů daného materiálu, přípravy vzorků, výběru a aplikace ochrany povrchu u jedné skupiny vzorků, kontinuální korozní zkoušky v kondenzační komoře, měření akustické emise během korozního působení, měření drsnosti povrchu referenčních vzorků, metalografického hodnocení a vyhodnocení naměřených dat z akustické emise.

6.1 Vybraný materiál ke zkoušení

Pro zkoušení koroze pomocí akustické emise v praktické části byla vybrána litina s lupínkovým grafitem *LLG / GJL* neboli šedá litina. Byly zvažovány dvě varianty dostupných vyráběných litin, a to nejméně korozně odolná varianta s označením *GJL-300* a nejvíce korozně odolná varianta s označením *GJL-250MnCuCr* pro porovnání. Z časových důvodů testování probíhalo jen na prvním zmíněném materiálu, navíc byla zapojena ochrana antikoročním nátěrem.

6.1.1 Litiny obecně

Litina obecně je slitinou železa, uhlíku a dalších prvků. Uhlík se nejčastěji vylučuje ve formě čistého volného grafitu s hexagonální krystalovou mřížkou (tj. grafitické litiny), případně s vázaným grafitem ve formě karbidu železa Fe_3C s orthorombickou krystalovou mřížkou (tj. bílé litiny). V obou případech musí být obsah uhlíku nad 2,08 %. Volný grafit může být v litině ve tvaru lupínků (*GJL*), kuliček (*GJS*), červíků (*GJV*), vloček (*GJM*), případně jejich nedokonalé kombinace. Grafit bývá uspořádán rovnoměrně, růžicovitě, smíšeně nebo mezidendriticky (usměrněně a neusměrněně) [39].

Obdobně jako oceli jsou litiny nelegované a legované. K nízkolegovaným patří litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem. Vysokolegované litiny se vyrábějí jako žáruvzdorné, korozivzdorné, ořevzdorné a litiny se zvláštními vlastnostmi (tepelná roztažnost, magnetické vlastnosti nebo elektrická vodivost). Ve většině sléváren se litiny taví v kuplovnách a elektrických indukčních pecích [39].

6.1.2 Složení základní hmoty

Nelegované litiny tvoří *ferit*, *perlit* nebo *ledeburit*. Strukturu základní kovové hmoty lze ovlivnit chemickým složením (legováním), rychlostí tuhnutí a chladnutí, krystalizačními zárodky a tepelným zpracováním. Pak lze získat také *austenit*, *martenzit*, *bainit* a komplexní karbidy. Hlavní složky grafitických litin jsou *ferit* (nižší pevnost) a *perlit* (vyšší pevnost). Na základě podílu těchto složek jsou grafitické litiny označovány jako feritické, perlitické nebo feriticko–perlitické [39], [40].

Austenit

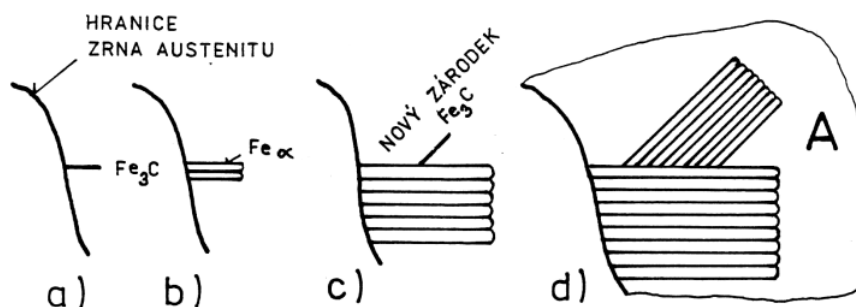
Za normálních teplot se stabilní austenit vyskytuje pouze v legovaných litinách (zejména niklem) nebo jako zbytkový austenit po tepelném zpracování a je stabilizován zejména křemíkem. Je měkký, výborně tvárný, korozivzdorný a odolný vysokým teplotám. Jeho mřížka je kubická plošně centrovaná (*FCC*), je též nazýván jako *železo γ* a je paramagnetický [39], [40].

Ferit

Ferit vzniká zejména při pomalém ochlazování, je též nazýván jako *železo α* . Vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního systému ($Fe-C$) a má kubickou prostorově centrovanou mřížku (BCC). Je měkký, tvárný a dobře obrobitelný. Má nízkou pevnost a způsobuje houževnatost litin. Houževnatost zvyšují některé legury, například *nikl, chrom* nebo *mangan* a naopak ji snižuje kupříkladu *křemík*. Do teploty $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tzv. *Curieova teplota*) je ferit magnetický, nad touto teplotou se chová paramagneticky [39], [40].

Perlit

Perlit vzniká při eutektoidním rozpadu austenitu podle metastabilního systému ($Fe-Fe_3C$). Hlavní fází je tedy cementit a vedle něj vznikají lamely feritu. Perlit může tvořit *lamelární* strukturu feritu a cementitu paralelně vedle sebe, nebo *globulární* strukturu, kdy se lamely perlitu sbalí (např. při žhání nebo pomalém ochlazování). Globulární perlit zvyšuje obrobitelnost. Schéma vzniku perlitu je na obrázku č. 38 [39], [40].



Obrázek č. 38: Schéma vzniku perlitu [31]

Perlit litinám zajišťuje vyšší pevnost, tvrdost a ořezavost, naopak zhoršuje plastické vlastnosti a obrobitelnost. Výsledné vlastnosti závisí na hustotě perlitu, která je dána vzdáleností dvou sousedních lamel feritu - čím je perlit hustější, tím lepší má mechanické vlastnosti [39], [40].

Cementit

Cementit se vyskytuje hlavně u nelegovaných litin ve formě karbidu železa a má krystalovou rhombickou mřížku. Pokud se ve struktuře nacházejí legury (například *mangan, chrom, wolfram, vanad* nebo *molybden*), mohou se atomy železa nahrazovat atomy těchto prvků, a tak vznikají komplexní karbidy $(FeX)_3C$ [39], [40].

Cementit je velmi tvrdý (komplexní karbidy i více) a křehký - při vyšším obsahu cementitu se litina stává neobrobitelnou. V litinách je cementit ve třech formách [39], [40]:

- **primární** - hrubé jehlice v nadeutektických bílých litinách (vzniká výjimečně),
- **sekundární (eutektický)** - součást metastabilního *eutektika* ledeburitu, způsobuje velkou tvrdost, křehkost a neobrobitelnost bílé litiny,
- **terciární (perlitický)** - součást *eutektoidu* perlitu, zvyšuje pevnost a snižuje plastičnost litiny.

Ledeburit

Ledeburit je eutektikum v metastabilní soustavě o obsahu 4,3 % uhlíku. Tvoří jej austenit a ledeburitický cementit. Ledeburit tvoří jednu ze složek bílých litin a v grafitických litinách vzniká v místech s rychlým odváděním tepla jako zákalka [39], [40].

Martenzit

Martenzit je přechlazená struktura, která vzniká rozpadem austenitu při kalení legovaných i nelegovaných litin (v legovaných někdy i hned v litém stavu). Martenzit je velmi tvrdý a křehký [39], [40].

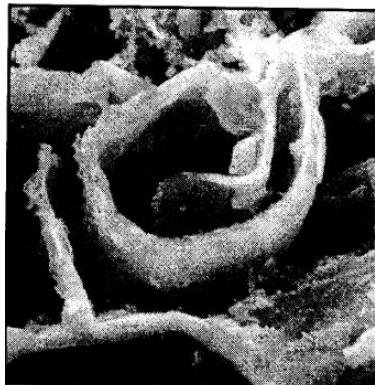
Bainit

Bainit je struktura, kterou při lití podporuje hlavně nikl a molybden. Vzniká i při tepelném zpracování. Poskytuje litinám velkou tvrdost a pevnost a zároveň dobré plastické vlastnosti [39], [40].

6.1.3 Litina s lupínkovým grafitem

Litina s lupínkovým grafitem se vyrábí nejčastěji, protože pro tento tvar grafitu není potřeba téměř žádný metalurgický zásah. Grafit je ve tvaru lupínků s ostrými hranami, které mohou tvořit prostorové útvary podobné zelným hlávkám. Litina s lupínkovým grafitem poskytuje nejlepší útlum vibrací ze všech litin (zejména feritové litiny), takže je možné ji využít kupříkladu i u stojanů obráběcích strojů [39].

Litinám s lupínkovým grafitem je věnována norma ČSN EN 1561: Slévárenství - Litiny s lupínkovým grafitem. Tato evropská norma určuje vlastnosti nelegovaných a nízkolegovaných litin s lupínkovým grafitem na odlitky odlévaných převážně do pískových forem. Struktura litiny s lupínkovým grafitem je na obrázku č. 39 a 40 [39], [41], [42].



Obrázek č. 39: Lupínky grafitu [40]



Obrázek č. 40: Standardní perlitická LLG [41]

Základní prvky ve struktuře a jejich vliv

Základní prvky charakterizují tvar grafitu, strukturu, mechanické a další vlastnosti litiny.

- **Uhlík**

Uhlík má velký vliv na strukturu a vlastnosti litin. Podporuje grafitizaci (tj. vyloučení uhlíku v podobě grafitu) a mírně snižuje pevnost a tvrdost. Pokud se vyloučí větší množství uhlíku ve formě grafitu, jsou zlepšeny útlumové vlastnosti a zmenšeno stahování litiny při tuhnutí. Kvůli velkému obsahu uhlíku však grafit hrubne [39], [40].

- **Křemík**

Křemík je druhý nejdůležitější prvek v litinách a zároveň nejdůležitější prvek pro grafitizaci. Při tuhnutí rovněž snižuje sklon ke tvorbě zákalky. Křemík zvyšuje tvrdost feritu a zároveň snižuje jeho rázovou houževnatost i tažnost. Větší množství křemíku působí feritotvorně, a tím se snižuje celková tvrdost a pevnost litiny. Zejména u litin s kuličkovým grafitem podporuje vliv křehkých lomů [39], [40].

- **Mangan**

Mangan má na grafitizaci malý vliv, při obsahu nad 0,5 % působí spíše opačně a při obsahu nad 1 % může způsobovat vznik nežádoucího přechlazeného grafitu. Při pomalém tuhnutí se u tlustých stěn mohou tvořit v litině rovněž nežádoucí karbidy. Mangan zejména u litiny s kuličkovým grafitem stabilizuje a zjemňuje perlit. Dále mangan zvyšuje pevnost, tvrdost a ořezavost litiny. U litiny s lupínkovým grafitem mangan váže síru [39], [40].

- **Fosfor**

Fosfor mírně podporuje grafitizaci, ale během tuhnutí tvoří tvrdé a křehké fosfidické síťoví (*steadit*) na hranicích zrn a zvyšuje křehkost litiny, navíc tuhne až jako poslední. To podporuje přítomnost *molybdenu*, *chromu*, *wolframu* a *vanadu* ve struktuře. U takto legovaných litin je tedy třeba udržovat obsah fosforu co nejnižší. U litiny s lupínkovým grafitem jeho obsah okolo 0,5 % zvyšuje pevnost, tvrdost a ořezavost (při vyšším obsahu naopak pevnost litiny snižuje). Výhodný může být zejména u tenkostěnných odlitků a uměleckých děl, protože jeho vyšší obsah (až 1 %) zvyšuje zabíhavost litin [39], [40].

- **Síra**

Síra je v litinách nežádoucí, protože tvoří sulfidy železa, a pokud není vázána manganem, způsobuje ve větším obsahu křehkost litiny a zabraňuje grafitizaci. Do litiny se síra může dostat například ze vsázkových surovin nebo koksu. Obsah síry by měl být v litině co nejmenší, protože velmi zvýrazňuje případné nepříznivé grafitizační podmínky [39], [40].

Legující prvky ve struktuře a jejich vliv

Chrom stabilizuje perlit a zvyšuje mechanické vlastnosti za normálních a vyšších teplot. **Měď** rovněž stabilizuje perlit a zvyšuje mechanické vlastnosti a navíc kompenzuje karbidotvorné účinky chromu. **Cín** stabilizuje grafit zejména u litin s lupínkovým grafitem. **Hořčík** ovlivňuje zejména tvar grafitu a je více důležitý u litin s kuličkovým grafitem, a to v množství 4–8 setin % [39], [40].

Molybden zvyšuje pevnost, stabilizuje strukturu a mechanické vlastnosti při vyšších teplotách. **Nikl** má obdobné funkce jako měď a navíc zlepšuje prokalitelnost. **Hliník** omezuje vznik zákalky, zvyšuje pevnost a korozivzdornost u litin s lupínkovým grafitem. **Vanad**

zvyšuje pevnost, tvrdost a otěruvzdornost litiny. **Titan** u litin s lupínkovým grafitem zvyšuje otěruvzdornost [39], [40].

Mechanické charakteristiky litiny s lupínkovým grafitem

Výše zmíněná norma ČSN předepisuje i mechanické charakteristiky, jejichž přehled je v tabulce č. 2. Tento materiál je vhodný pro tlustostěnné odlitky, norma předepisuje tloušťku stěny v rozmezí 15–100 mm [39], [42].

Tabulka č. 2: Mechanické charakteristiky litiny GJL-300 dle normy ČSN EN 1561 [42]

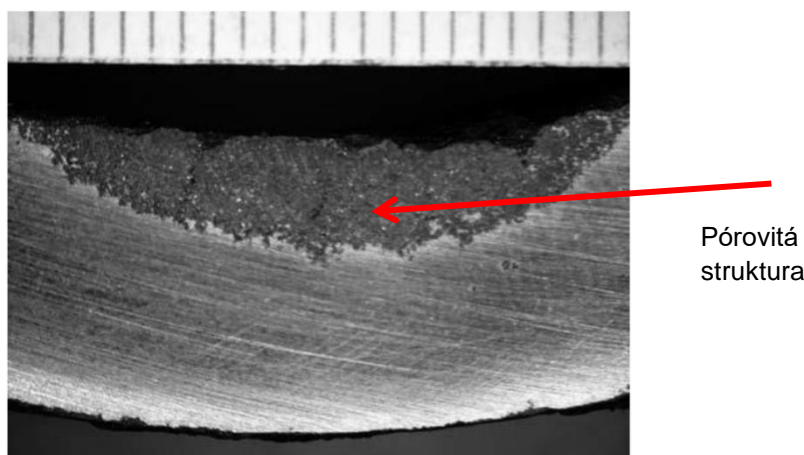
Litina	Mechanické charakteristiky				
GJL-300	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,1}$ [MPa]	Pevnost v tlaku R_d [MPa]	Modul pružnosti E [105 MPa]	Tvrdost podle Brinella (HB) [-]
	300 – 400	195 – 260	960	1,08 – 1,37	260

6.1.4 Základní druhy koroze v litině

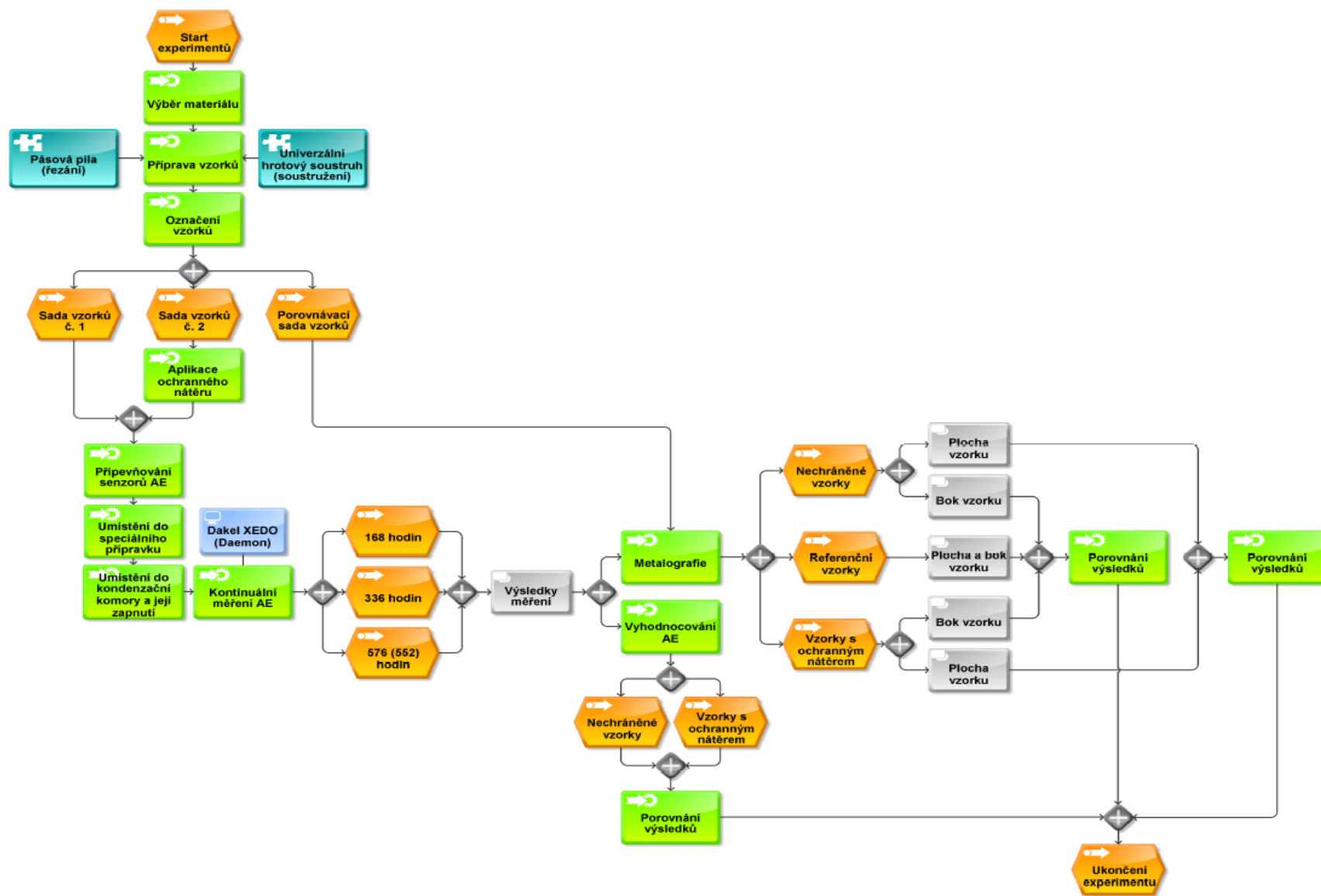
Litiny obecně bývají více odolné korozi než litiny, protože se na jejich povrchu tvoří ochranná vrstva z oxidů železa a grafitu. Korozivzdornost litiny je navíc příznivě ovlivňována vyšším obsahem křemíku a legováním mědi, molybdenem a niklem. Přípustné jsou rovněž pasivační povrchy založené na chromu, křemíku a hliníku. Z prvků má v litině naopak nepříznivý vliv na korozivzdornost síra. Dalšími vlivy jsou prostředí (prach, ovzduší a přítomnost např. oxidu siřičitého) a relativní vlhkost (zejména nad 70 %) [50], [51].

Jednou z forem typické koroze šedé litiny je spongióza neboli grafitická koroze. Jedná se o selektivní korozi, která je v litině oproti jiným kovům nežádoucí. Probíhá anodickým rozpouštěním železa a degraduje tak jeho matici. Tvar předmětu bývá zachován, ale tvoří jej pouze grafitový skelet. Tvoří se tak nehomogenní pórovitá (houbovitá) struktura, která přetváří litinové díly ve velmi křehké součásti. Příklad spongiózy je na obrázku č. 41 [50], [51].

Dále je možné setkat se s galvanickou korozi. Ta vzniká, pokud je ušlechtilý kov vodivě spojen nebo se dotýká kovu méně ušlechtilého. Při konstrukci a montáži je třeba dbát na vhodné kombinace materiálů, u oceli a litin je nutné se vyhnout např. kontaktu s Cu či Al [50], [51].



Obrázek č. 41: Pórovitá struktura grafitické koroze (spongiózy) šedé litiny [50]



Obrázek č. 42: Schéma postupu experimentu [vlastní tvorba]

6.2 Postup přípravy vzorků a měření

Experimentální část se skládala z výroby vzorků, korozní zkoušky v kondenzační komoře, metalografie a vyhodnocování akustické emise. Náhled postupu přípravy vzorků, měření, vyhodnocení a dalších částí experimentu je z důvodu přehlednosti uveden ve schématu na obrázku č. 42 na předchozí straně. Schéma bylo vytvořeno v programu *Aris Express 2.4d*.

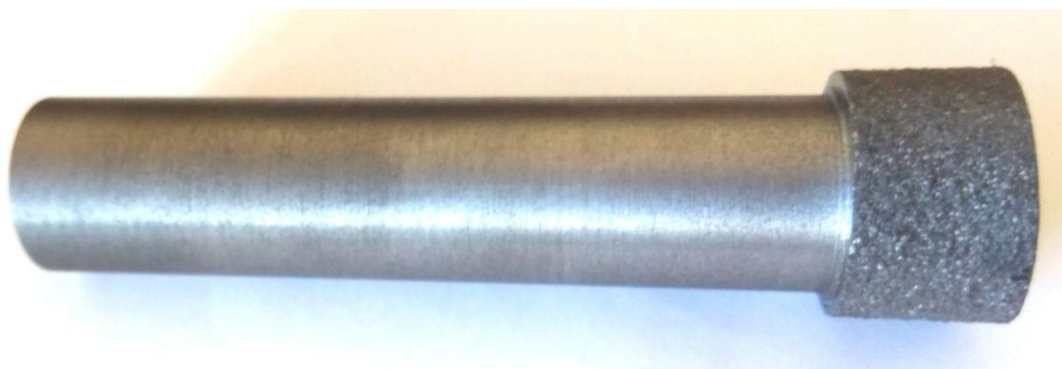
6.2.1 Příprava vzorků

Odlitky z vybraného materiálu měly tvar nepravidelného, pouze opískovaného válce (viz obrázek č. 43), a proto bylo nejdříve nutné vyrobít vzorky o vhodném tvaru. Tím byly špalíčky o kruhovém průřezu s průměrem 3 cm a tloušťce 1 cm.



Obrázek č. 43: Původní opískovaný vzorek materiálu [vlastní foto]

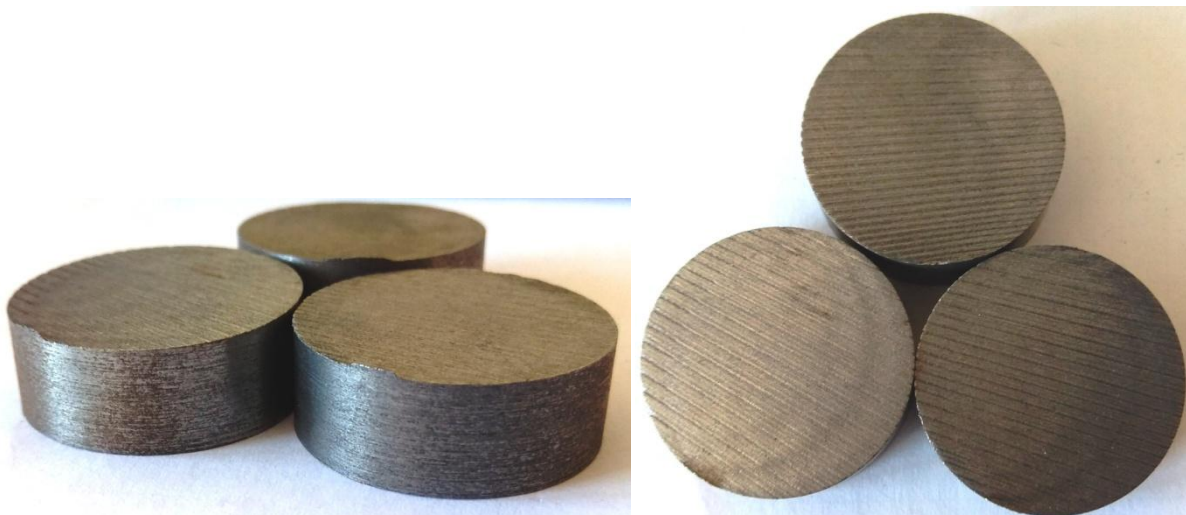
K obrábění válcového tvaru posloužil univerzální hrotový soustruh. Následovalo dělení materiálu na požadovanou tloušťku. Z důvodu požadavku na co nejmenší tepelně ovlivněnou oblast bylo zvažováno řezání vodním paprskem. Vzhledem ke tvaru polotovaru typu kruhové tyče a dané malé velikosti výsledných vzorků se tato technologie ukázala jako nevhodná. Bylo by totiž třeba polotovar umístit do vhodného přípravku pro řezání a zabezpečit, aby řezané vzorky nepropadávaly do vany s odpadem. To by bylo zbytečně časově i finančně náročné. Z tohoto důvodu byla zvolena jiná technologie, a to řezání pásovou pilou s chladicím zařízením. Pásové pily se vyznačují nejmenší ztrátou děleného materiálu (tzv. prořezem) z těchto strojů a vysokou kvalitou plochy řezu. Aby byl zajištěn požadavek na neovlivnění řezané oblasti teplem, řezání probíhalo pod řeznou kapalinou, která u třískového dělení a obrábění materiálu obvykle slouží nejen ke chlazení materiálu, ale pomáhá i při odvodu třísek. Vzorek po obrábění na soustruhu je na obrázku č. 44.



Obrázek č. 44: Vzorek materiálu po obrábění na soustruhu [vlastní foto]

Připravené vzorky s patrnou strukturou zvolených technologií jsou na obrázku č. 45. Již ze samotného pohledu na připravené vzorky je zřejmé, že tyto dvě zcela odlišné

technologie obrábění materiálu mají velký vliv na výslednou strukturu a drsnost povrchu vzorku a je velmi pravděpodobné, že se podle toho bude vyvíjet i různé korozní napadení.



Obrázek č. 45: Připravené vzorky pro korozní zkoušku [vlastní foto]

Výše popsaným způsobem bylo vytvořeno 6 sad vzorků po 3 kusech a jedna porovnávací sada vzorků, která korozní zkoušce podrobena nebyla a sloužila jako zdroj původních vlastností daného materiálu. Pro umístění materiálu do kondenzační komory byl navržen a pomocí 3D tiskárny vytvořen speciální přípravek k uchycení vzorků, který je na obrázku č. 46. Na vzorky bylo rovněž nutné připevnit senzory akustické emise.



Obrázek č. 46: Přípravek pro umístění vzorků do kondenzační komory (vlevo rozložený, vpravo s upnutým vzorkem) [vlastní foto]

6.2.2 Kondenzační komora

K dispozici byla kompaktní kondenzační komora *Liebisch Constanco* určená do malých laboratoří, kterou kromě jiného dodává firma *Labimex CZ*. Jedná se o stolní komoru s objemem 300 litrů, jež lze ovládat manuálně nebo je možné ji naprogramovat pro automatický chod. Je vhodná pro zkoušky buď v čisté kondenzační atmosféře, nebo pro zkoušky s užitím oxidu siřičitého (tzv. *Kesternich* zkoušky), v rozmezí teplot od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro zkoušky s oxidem siřičitým může být volitelně vybavena manuálním nebo automatickým externím dávkovačem plynného SO_2 s možností dávkování 200–2000 ml plynu na objem komory. Zároveň se hodí i pro solné zkoušky při teplotách do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [43].

Korozní působení na vzorky probíhalo v této komoře kontinuálně, a to po dobu 168, 336 a 576 hodin (7, 14 a 24 dní) pro nechráněné vzorky a 168, 336 a 552 hodin

(7, 14 a 23 dní) pro vzorky s ochranným nátěrem. V komoře byla udržována stálá relativní vlhkost 100 %, vytvořená destilovanou vodou, a konstantní teplota 50 °C. Po celou dobu této zkoušky byla zaznamenávána data akustické emise díky sensorům, které byly připevněny na vzorcích. Náhled na vzorky umístěné v kondenzační komoře je na obrázku č. 47 [43].



Obrázek č. 47: Vzorky umístěné v kondenzační komoře [vlastní foto]

6.2.3 Nátěr pro korozní zkoušku

Korozním vlivům byly nejdříve vystaveny vzorky bez korozní ochrany a následně s korozní ochranou v podobě vybraného nátěru s inhibitory koroze pod označením **VpCI-368D** od společnosti *Cortec Corporation*. Nátěry byly poskytnuty výhradním zastoupením *Cortec Corporation* pro Českou republiku a Slovensko, brněnskou firmou *Tart, s.r.o.*, která se rovněž zabývá i obalovým materiálem.

Nátěr **VpCI-368** je dočasný konzervační nátěr poskytující antikorozi ochranu různým druhům kovů (uhlíková a nerezová ocel, měď, hliník a litina) ve venkovních klimatických podmínkách. Je postaven na rozpouštědlové bázi a tvoří ochranu v podobě pevného voskového povlaku, který má být odolný proti poškrábání. Lze jej odstranit běžnými rozpouštědly (např. *VpCI-414*, což je „čisticí a odmašťovací prostředek určený na odstraňování dočasných ochranných nátěrů z kovových povrchů, může se používat také na odstraňování vosku, oleje, maziv a obtížně odstranitelných znečišťujících látek.“). Verze **VpCI-368D** je již z výroby naředěná předchozí varianta výše zmíněného nátěru (písmeno *D* za číselným označením je odvozeno od anglického výrazu „diluted“) vhodná zejména k aplikaci stříkáním. Vybrané základní vlastnosti nátěru **VpCI-368D** z prospektu jsou uvedeny v tabulce č. 3 [33].

Tabulka č. 3: Základní vlastnosti vybraného nátěru **VpCI-368D** [33]

Teoret. spotřeba	Doporuč. vrstva	Manipulovatelnost	Zaschnutí nátěru	Obsah sušiny	Měrná hmotnost	Obsah VOC	Teplotní odolnost
5–6 m ² /litr	75 μm	0,1–1 hod	12–24 hod	43–50 %	0,87–0,91 kg/litr	271,3 g/litr	do 200 °C

Pozn.: VOC jsou těkavé organické látky mající negativní vliv na lidské zdraví.

Natírání probíhalo pomocí plochého štětce, a to v jedné vrstvě, která odpovídá tloušťce nátěru cca 25 μm. Navzdory teoretické době schnutí max. 24 hodin, ani po uplynutí této doby

však nebyla barva úplně vytvrzená. Z časových důvodů proto nebylo možné aplikovat 2 nebo 3 vrstvy nátěru dle doporučení výrobce. Během natírání a schnutí nátěru za pokojové teploty tedy zřejmě došlo k nějakému pochybení (např. vyšší vlhkost nebo nedostatečné větrání), které bude mít jistě vliv na výsledky korozní zkoušky. Jedná se zejména na délku korozní ochrany oproti předpokládaným teoretickým hodnotám v kondenzační komoře > 2500 hodin, které uvádí výrobce. Z časových důvodů ale nebylo možné korozní experiment dále odkládat.

6.3 Základní vlastnosti vybrané litiny

K základním vlastnostem, které ovlivňují korozi materiálu, patří zejména jeho chemické složení, struktura a drsnost povrchu.

6.3.1 Chemické složení

Chemické složení základních prvků litiny *GJL-300* v procentech objemu, které se v materiálu vyskytují, jsou v tabulce č. 4. Litina byla odlévána do pískové formy z furanové formovací směsi. Použité očkovaadlo bylo *SRF75*, což je očkovaadlo s aktivním prvkem stroncium. Stroncium zvyšuje rychlost rozpouštění očkovaadla, a to i při nízkých teplotách kovu, takže je očkovací účinek dlouhodobý a velmi dobrý [30].

Očkování je vnášení látek do taveniny, které podporují vznik zárodků pro krystalizaci grafitu a zvětšování jejich počtu (není to přímé vnášení zárodků, ty vznikají vzájemnou interakcí mezi aktivními prvky v očkovaadle a prvky v tavenině litiny). Větší počet aktivních zárodků tvoří lepší podmínky pro vytváření a růst grafitu, díky čemuž má litina jemnější grafit a jeho rovnoměrné vyloučení včetně menšího sklonu ke vzniku zákalky. Jemná struktura litiny je žádaná zejména z toho důvodu, že její zásluhou litina disponuje lepšími mechanickými vlastnostmi [39], [40].

Tabulka č. 4: Chemické složení vybrané litiny *GJL-300*

Litina	Základní prvky litiny [v %]				
	C	Si	Mn	P	S
GJL-300	3,061	1,833	0,971	0,073	0,079

V litině se dále vyskytují i legující prvky, které jsou uvedeny v tabulce č. 5. Kromě těchto legujících prvků se ve složení nachází v množství tisícín procent (méně než 0,005 %) také kupříkladu *wolfram*, *zinek*, *olovo*, *bor*, *antimon*, *bismut*, *kobalt*, *niob* nebo *selen*. Ve vzorcích litiny o dané pevnosti se očekává perlitická struktura (viz obrázek č. 40) [39], [40], [41].

Tabulka č. 5: Legující prvky vybrané litiny *GJL-300*

Litina	Legující prvky [v tisícínách %]								
	Cr	Cu	Sn	Mg	Mo	Ni	Al	V	Ti
GJL-300	111	132	15	< 5	15	38	3	8	8

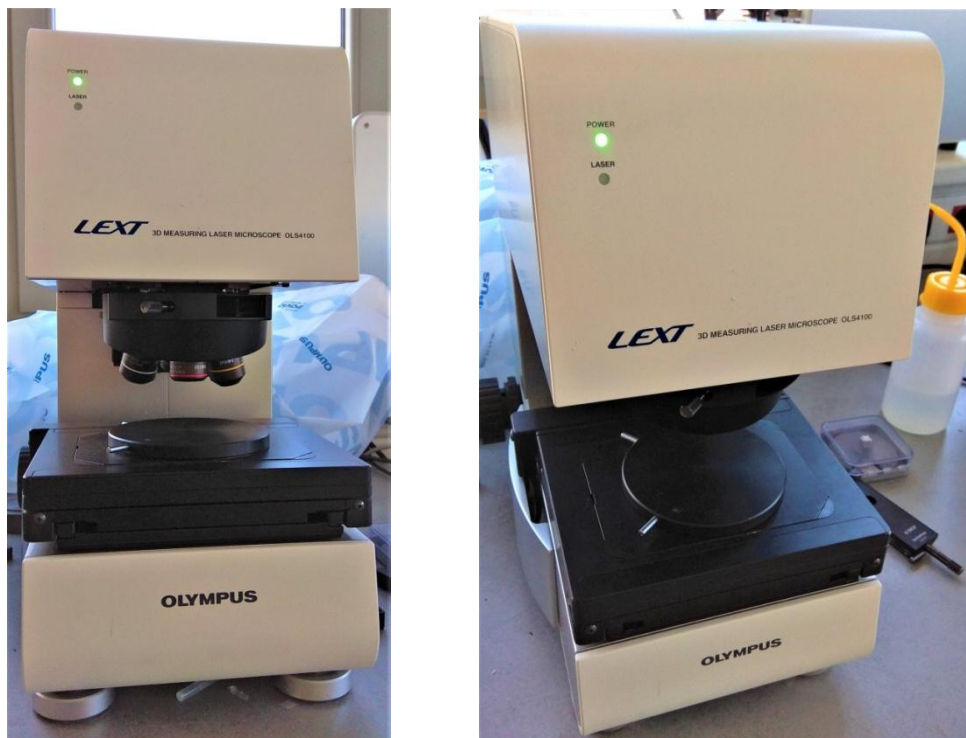
6.3.2 Struktura povrchu a drsnost

Geometrickým požadavkům na povrch materiálu včetně důležitých termínů, definic a parametrů struktury povrchu je věnována norma ČSN EN ISO 4287. Z pohledu funkce plochy a koroze je podstatná velikost i tvar nerovností na povrchu materiálu. Mezi parametry, které mají podstatný vliv na korozní odolnost, patří zejména liniový výškový parametr R_a , který nese asi největší vypovídající hodnotu o stavu povrchu. Parametr R_a je dle výše zmíněné normy definován jako „průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu“, čili aritmetický průměr hodnot výstupků a přilehlých prohlubní profilu. Měří se v rovině kolmé na rovinu souběžnou s profilem povrchu [44].

Jak již bylo řečeno výše, k výrobě vzorků byly využity dvě technologie obrábění – obrábění válcové plochy na univerzálním hrotovém soustruhu a řezání pásovou pilou pod chladicí emulzí pro dělení jednotlivých vzorků. Je zřejmé, že každá technologie obrábění poskytuje odlišné hodnoty výsledné drsnosti povrchu u daného materiálu. U klasického soustružení, kde kvalita povrchu závisí hlavně na řezné rychlosti a posuvu, se hodnoty R_a pro hrubování pohybují nejčastěji okolo 6,3 a 12,5 μm a u dokončování 1,6 a 3,2 μm . U řezání pásovou pilou se hodnoty drsnosti R_a obvykle bývají okolo 10–15 μm . Určení konkrétních hodnot při daných parametrech se věnují různé studie.

Litina s lupínkovým grafitem disponuje malou rázovou houževnatostí a jejím obráběním se tvoří malé řezné síly. Její obrobitelnost je tedy možné považovat za velmi dobrou. Ke snížení obrobitelnosti však může vést legování některými prvky (zejména chromem) ke zlepšení mechanických vlastností. Obecně ale šedá litina vykazuje nejlepší hodnoty obrobitelnosti oproti dalším druhům litin [39], [40].

Drsnosti povrchů byly v tomto případě měřeny u referenčních, tj. čistých a nezkorodovaných, vzorků. K tomu posloužil 3D optický laserový skenovací mikroskop *Olympus Lext OLS4100* s revolverovými objektivy *MPlanApo N* v rozsahu zvětšení 20x a 50x, viz obrázek č. 48.



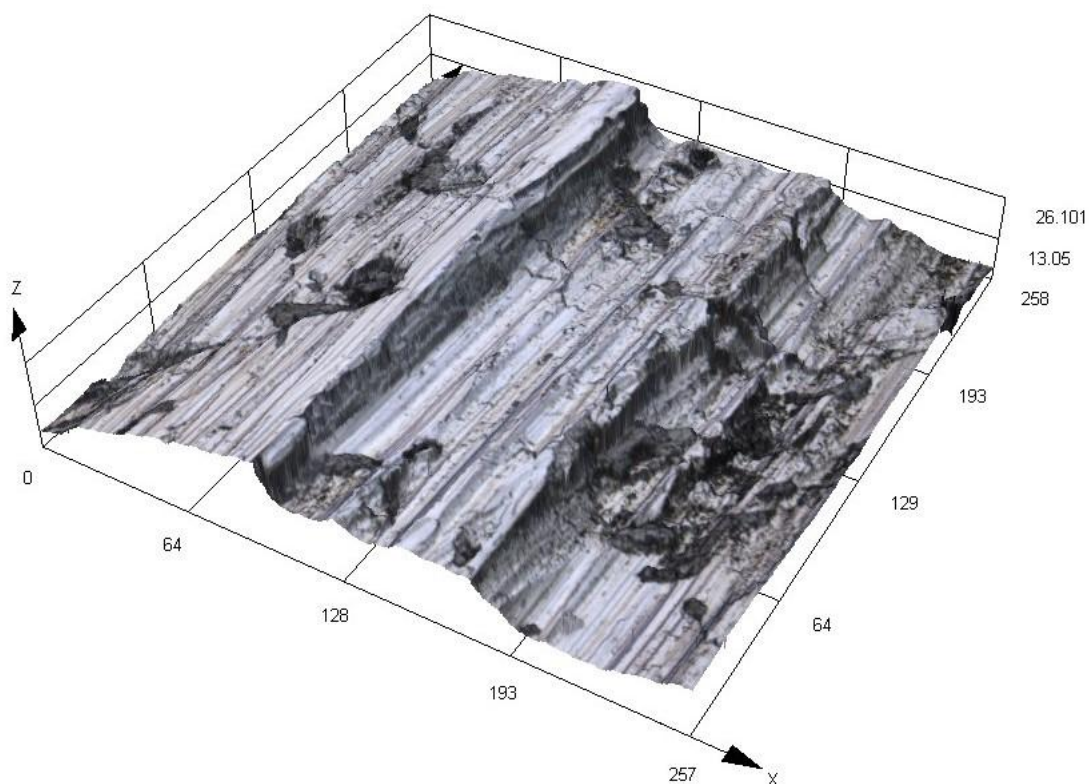
Obrázek č. 48: 3D optický laserový skenovací mikroskop Olympus Lext OLS4100 [vlastní foto]

Měřené délky skenovaného povrchu byly vzhledem k rozměrům vzorků stanoveny na 8 mm pro kruhovou plochu (čelo) a 5 mm pro válcovou plochu (bok) vzorku. Výsledky měření byly zpracovávány v softwarovém programu *Olympus LEXT* a jejich průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 6.

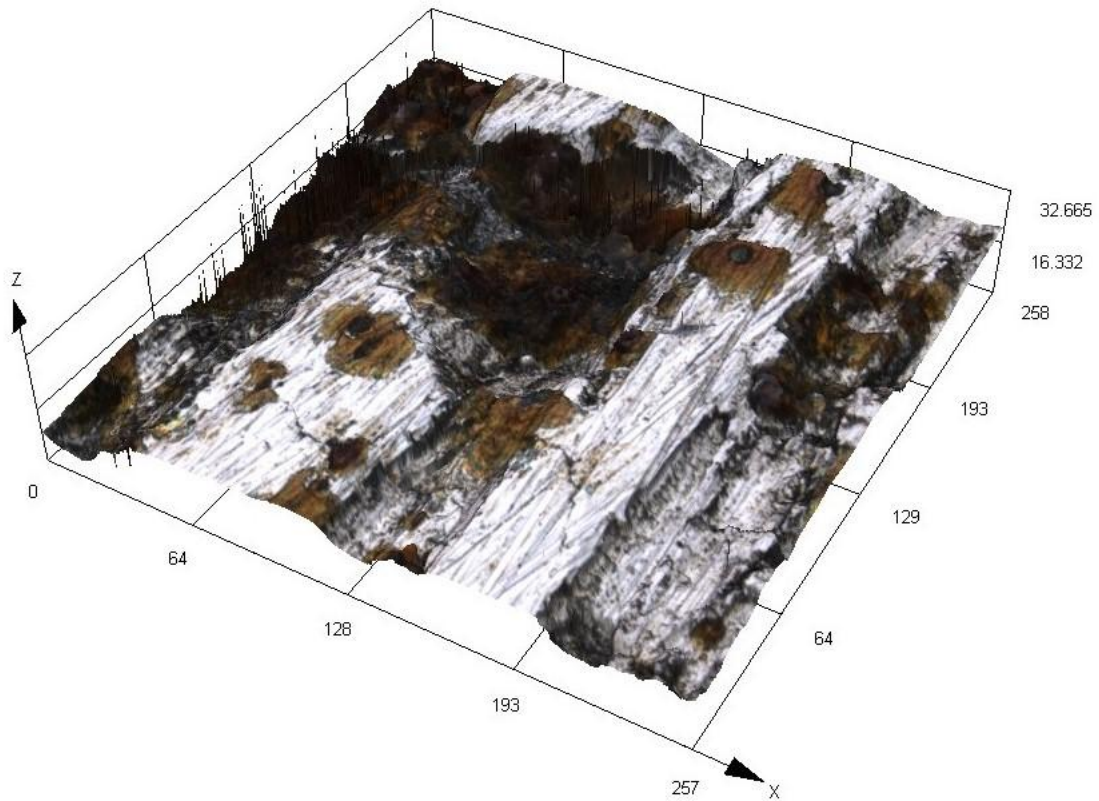
Tabulka č. 6: Průměrné hodnoty výškového parametru Ra na měřených plochách (v μm)

Druh plochy vzorku	Výškový parametr Ra [μm]	
	Zvětšení 20x	Zvětšení 50x
Kruhová plocha (čelo)	14,027	13,601
Válcová plocha (bok)	3,534	3,687

Všechny hodnoty se nacházejí v teoreticky předpokládaném rozsahu. Vzhledem k tomu, že soustružení probíhalo bez výkresových požadavků na přesnost povrchu, i tyto hodnoty jsou pro měření postačující. Představu o vzhledu a struktuře povrchu je možné si udělat z obrázku č. 49, kde je 3D snímek části rovinné kruhové plochy (čela), a obrázku č. 50, kde je zachycena válcová plocha (bok) referenčního vzorku. Obě plochy jsou vyfoceny při 50násobném zvětšení.



Obrázek č. 49: 3D snímek povrchu kruhové plochy (čela) referenčního vzorku [vlastní zdroj]



Obrázek č. 50: 3D snímek válcové plochy (boku) referenčního vzorku [vlastní zdroj]

Jak je patrné z 3D fotografií povrchu, rovinná plocha má velmi nepravidelný zvlněný reliéf s výraznými nerovnostmi, který bude hrát svoji úlohu při následné korozi. Válcová plocha sice nevykazuje takové zvlnění, je o něco méně členitý, nicméně již na první pohled je zde patrná bodová koroze referenčního vzorku, který byl uchováván při pokojové teplotě o standardní vlhkosti vzduchu. Při testování v náročných podmínkách lze předpokládat další rozvoj korozního poškození vzorků. Na fotografii se rovněž vyskytují ostré špičaté výběžky, které mohou být způsobeny nepřesnostmi obrábění, nebo nepřesnostmi při optickém měření.

7 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

Výsledky experimentů jsou rozděleny na část metalografickou a na akustickou emisi.

7.1 Metalografie

Vzorky, které byly vystaveny koroznímu působení v kondenzační komoře, byly nadále postoupeny k metalografické analýze. Pro účely této analýzy byly k dispozici dvě skupiny vzorků, zcela bez nátěru a s ochranným nátěrem obsahujícím inhibitory koroze od firmy *Cortec Corporation* (ozn. *VpCI 368D*). Dále byla analýze podrobena skupina referenčních vzorků. Pro metalografickou analýzu byly všechny vzorky dále upravovány dle potřeb.

Válcová část (bok) vzorku byl poměrně hladce obroben soustružením, řezané plochy (čela) byly naopak poměrně hrubé s okem patrnými rýhami po řezání pásovou pilou. Pro korozní zkoušku byly vzorky uchycené ve speciálním přípravku, kde jedna strana plochy (čelo) byla vystavena kondenzaci a na druhé straně bylo připevněno čidlo akustické emise.

7.1.1 Příprava vzorků

Vzorky pro metalografickou analýzu byly rozříznuty přibližně v polovině kruhové plochy, v kolmém směru na hrubé rýhy po řezání, a k hodnocení byla vždy použita jedna polovina řezu. U vzorků nechráněných nátěrem vznikla na jejich povrchu oxidická vrstva, kvůli které nebylo možné vzorky dobře zalisovat.

Oxidická vrstva se vydrolovala a způsobovala vyvzlínávání leštících smáčedel z mezer po vydrolení, takže ji bylo nutné nejdříve odmořit. K tomu byl namíchán roztok o složení 3,5 g prášku *hexametyléntetramínu* (neboli také *urotropinu* či *hexaminu*), 500 ml kyseliny chlorovodíkové a 500 ml vody, přičemž doba moření byla asi 2 minuty. Poté bylo možné vzorky zalisovat do plastické hmoty a standardně vybrousit a vyleštit.

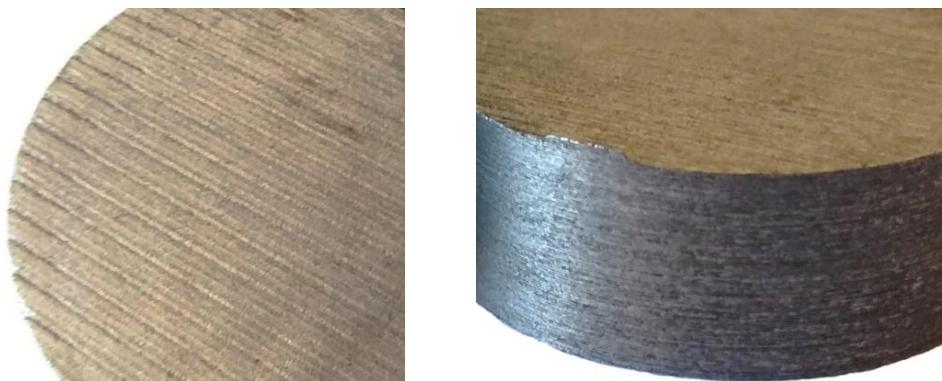
7.1.2 Metalografický rozbor

Při metalografickém rozboru byla rovněž měřena hloubka korozního napadení vzorků počítačím modulem při 200x zvětšení. Výsledky měření byly statisticky zpracovány pomocí softwaru STADAT, kde byly vzájemně srovnatelné parametry vzorků porovnány pomocí testu pro dvojici souborů (F–test pro rozptyly a T–test pro střední hodnoty).

K pozorování a fotodokumentaci byl použit metalografický mikroskop *Neophot 32* a digitální fotoaparát *Canon EOS 4000D*. Výše zmíněné typy řezných ploch byly hodnoceny odděleně. Hodnocení povrchu je provedeno jak pro referenční vzorky, tak pro vzorky vystavené koroznímu působení, a to zcela nechráněné i opatřené ochranným nátěrem.

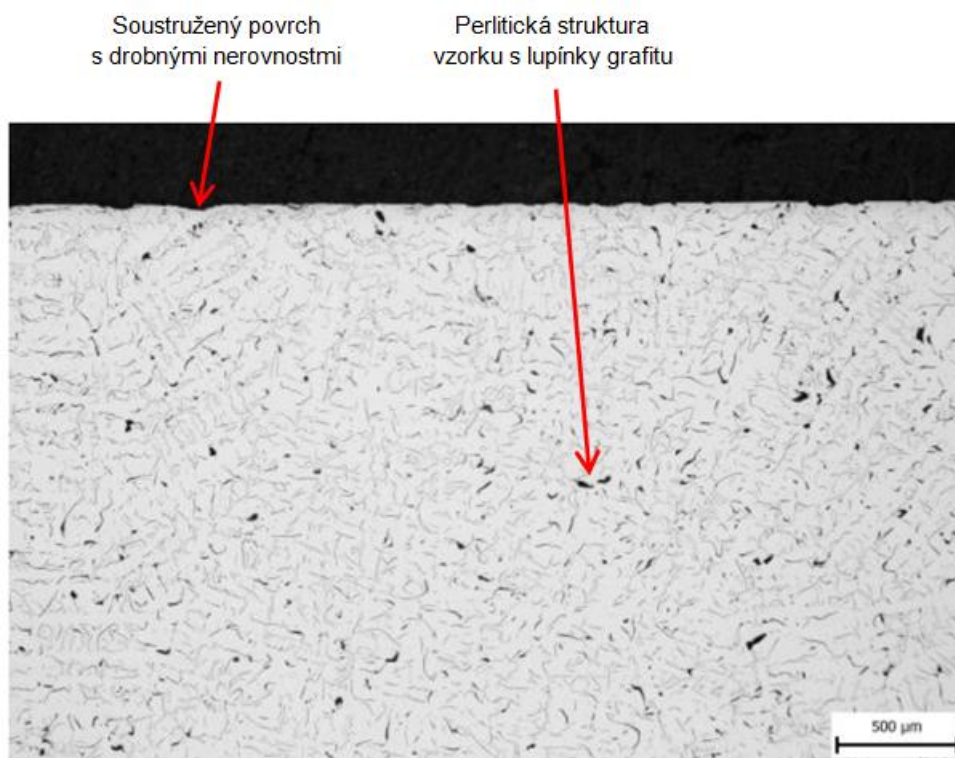
7.1.3 Zhodnocení povrchu referenčních vzorků

Vzorky v původním stavu jsou referenční a mají označení 0, a jejich povrchová struktura je vidět na obrázku č. 51.

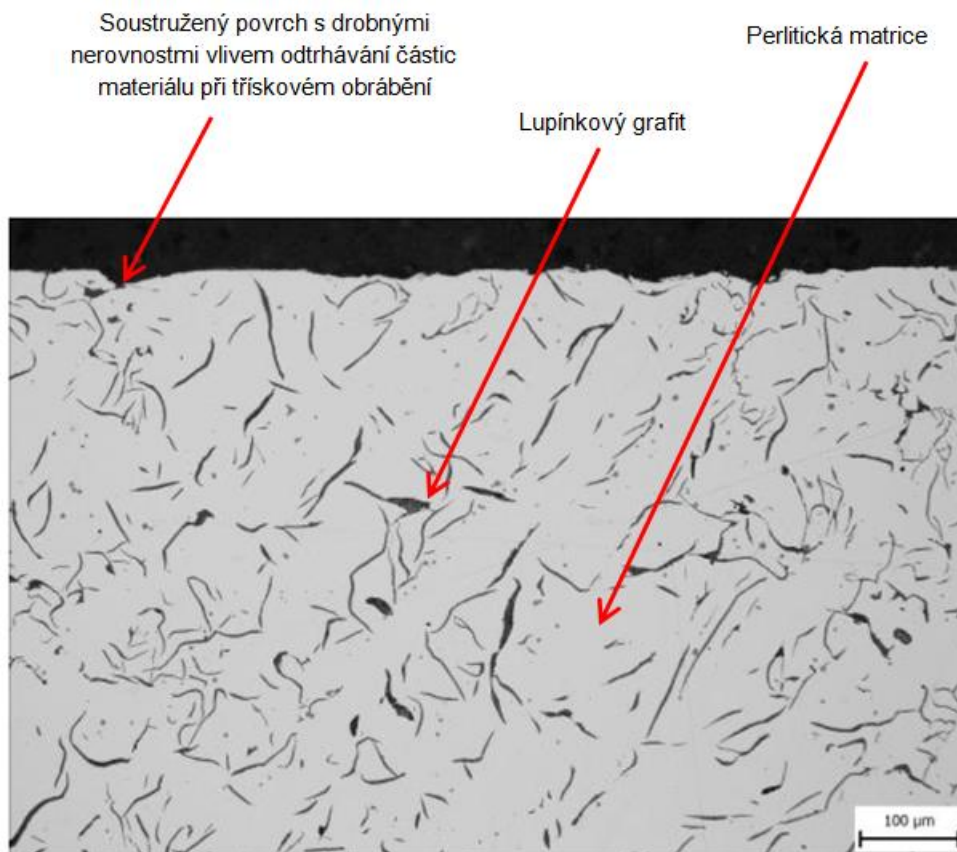


Obrázek č. 51: Povrchová struktura vzorků (kruhová plocha vlevo, bok vpravo) [vlastní foto]

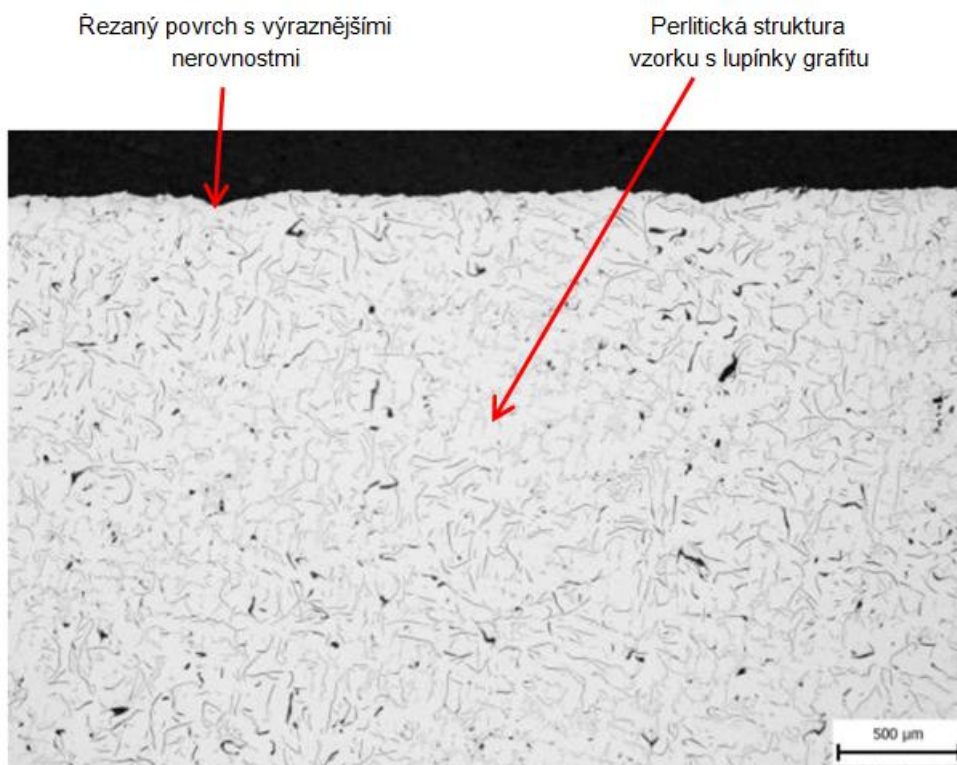
První dvojice metalografických snímků (viz obrázek č. 52 a 53) dokumentuje povrchové nerovnosti na válcovém obvodu (boku) soustruženého vzorku bez korozní zátěže. Druhá dvojice (viz obrázek č. 54 a 55) pak ukazuje kruhový povrch s hrubšími příčnými řezy (čelo). Pro účely zkoumání a vyhodnocení koroze budou fotografie rozděleny podle druhu plochy (kruhová, válcová), protože každá z nich byla vyrobena jinou technologií a disponuje odlišnými hodnotami drsnosti.



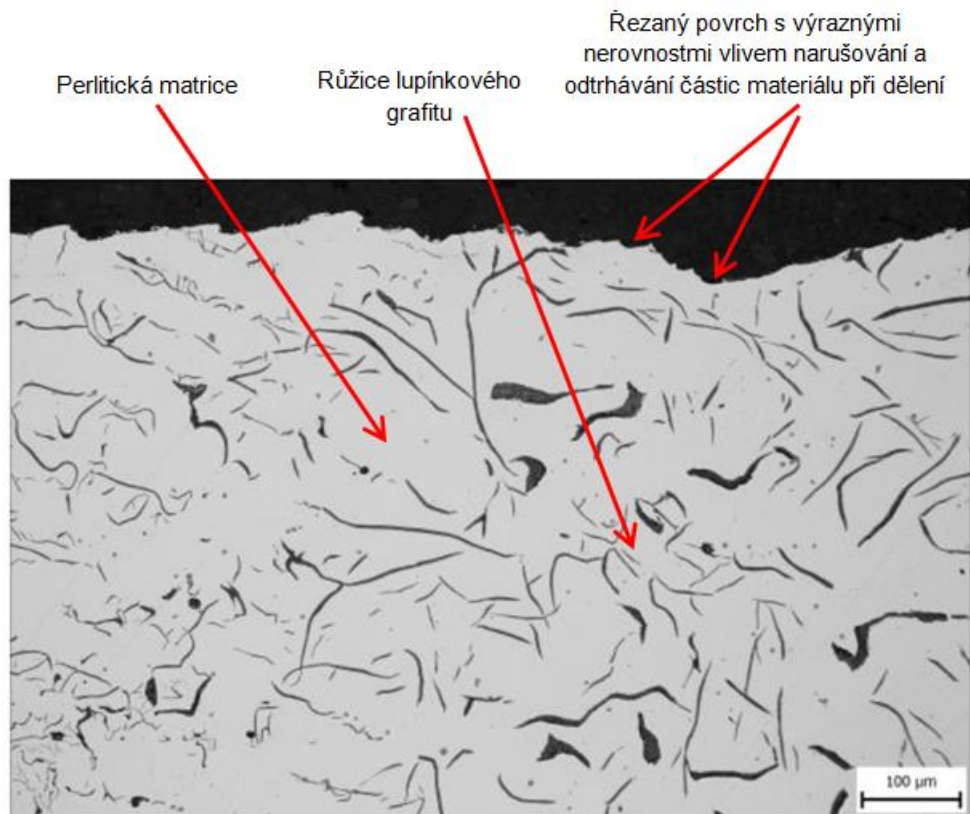
Obrázek č. 52: Povrch referenčního vzorku 0 na válcové ploše (obvodu)



Obrázek č. 53: Povrch referenčního vzorku 0 na válcové ploše (obvodu)



Obrázek č. 54: Povrch referenčního vzorku 0 na kruhové ploše (čele)



Obrázek č. 55: Povrch referenčního vzorku 0 na kruhové ploše (čele)

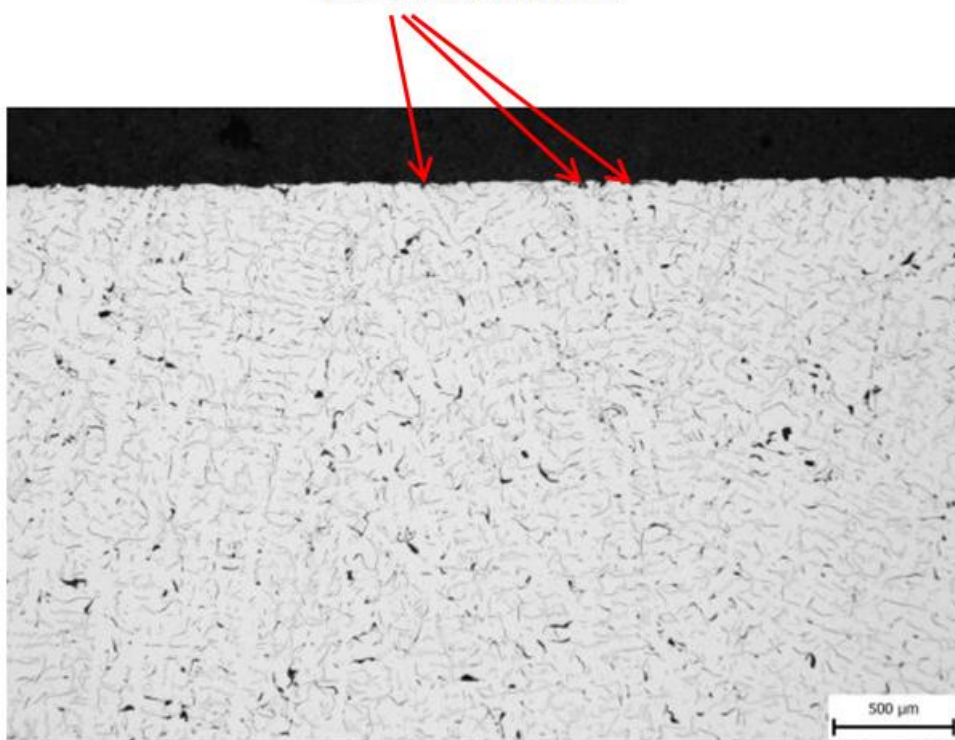
7.1.4 Vzorky nechráněné nátěrem po korozním působení – obvod (bok)

Vzorky nechráněné nátěrem byly vystaveny koroznímu působení na dobu 7, 14 a 24 dní. Plochy vzorků jsou vzhledem k různým technologiím jejich tvorby podle nich také rozděleny na válcovou část (bok) a kruhovou část (čelo) vzorku.

7denní expozice

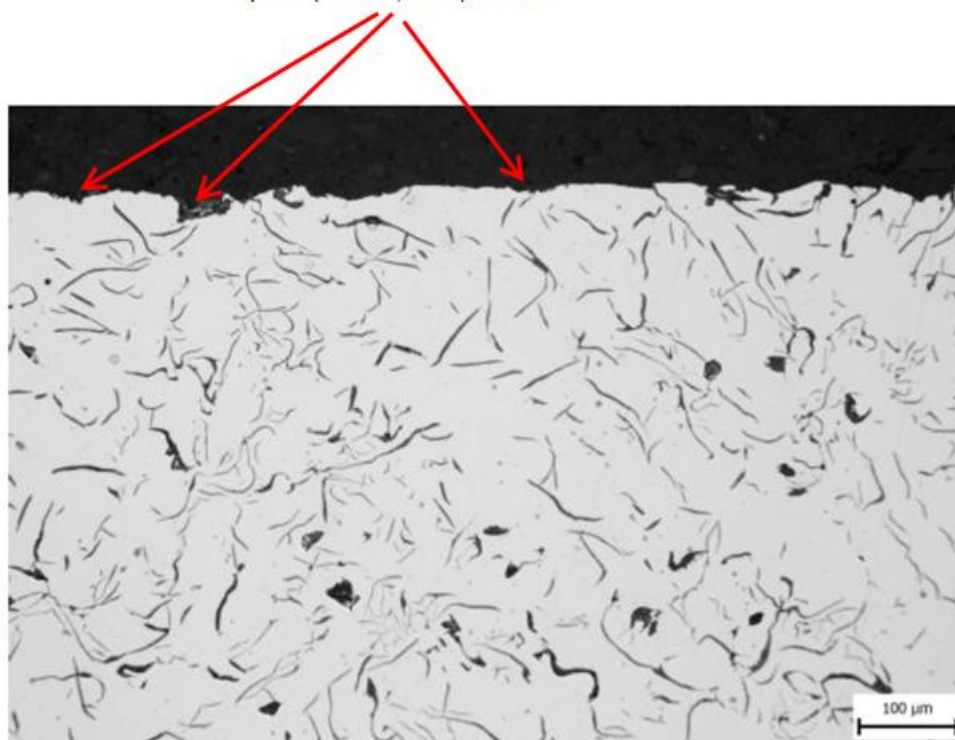
Po uplynutí této doby bylo na obvodu (boku) vzorků patrný mírný nárůst místního výskytu povrchových nerovností, které lze přirovnat k bodové korozi např. u korozivzdorných ocelí (viz obrázek č. 56 a 57).

Místní korozní produkty na válcové ploše (obvodu, boku) vzorku



Obrázek č. 56: Povrch obvodu (boku) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1-o)

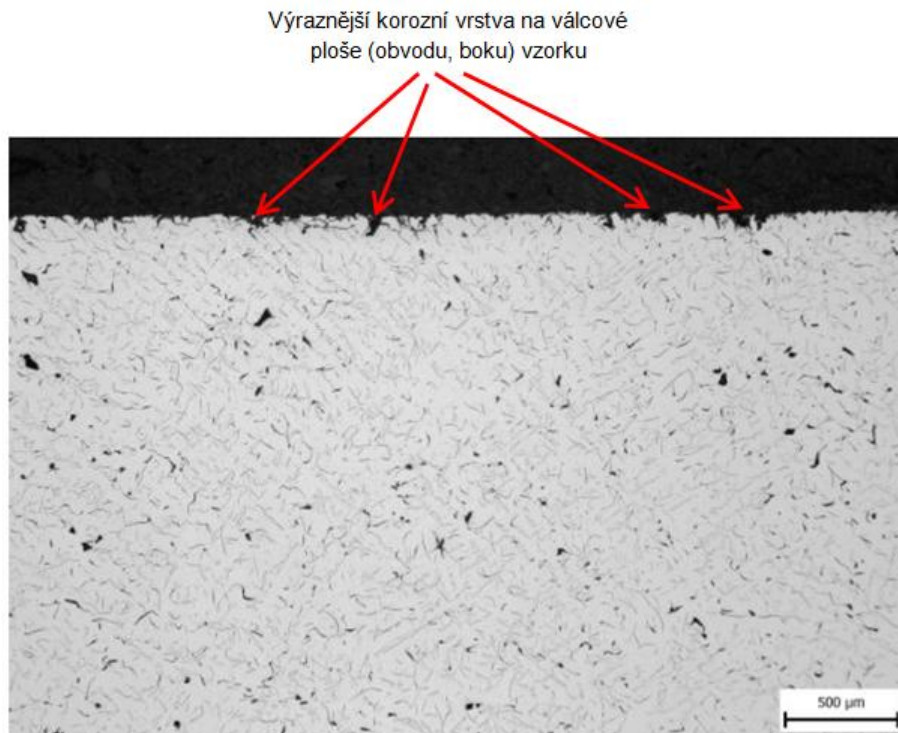
Místní korozní produkty na válcové ploše (obvodu, boku) vzorku



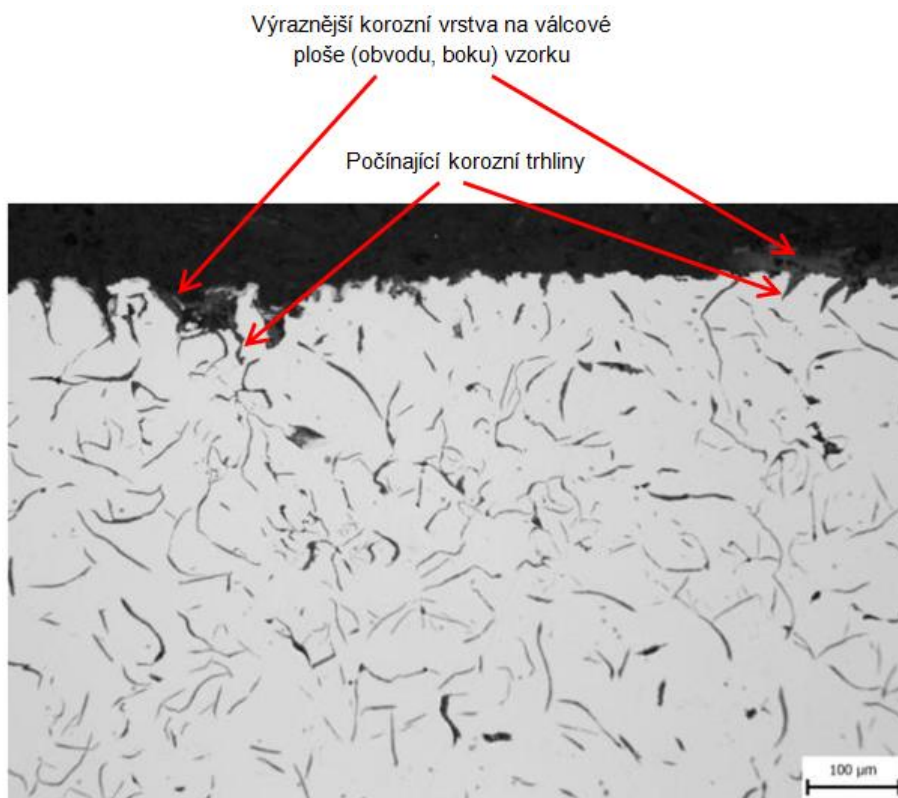
Obrázek č. 57: Povrch obvodu (boku) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1-o)

14denní expozice

S prodloužením korozní zátěže na 14 dní se rozsah korozního napadení dále zvyšuje. Na původně hladším válcovém povrchu (obvodu, boku) vzorku se objevuje zřetelnější korozní vrstva (viz obrázek č. 58 a 59).



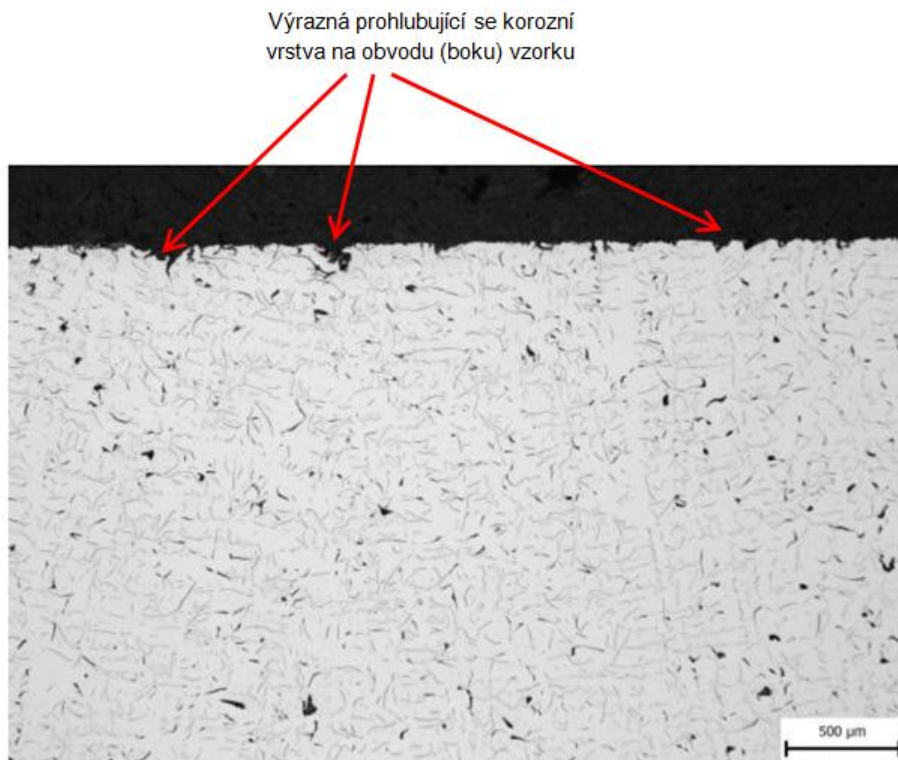
Obrázek č. 58: Povrch obvodu (boku) vzorku po 14denní expozici (ozn. 3-o)



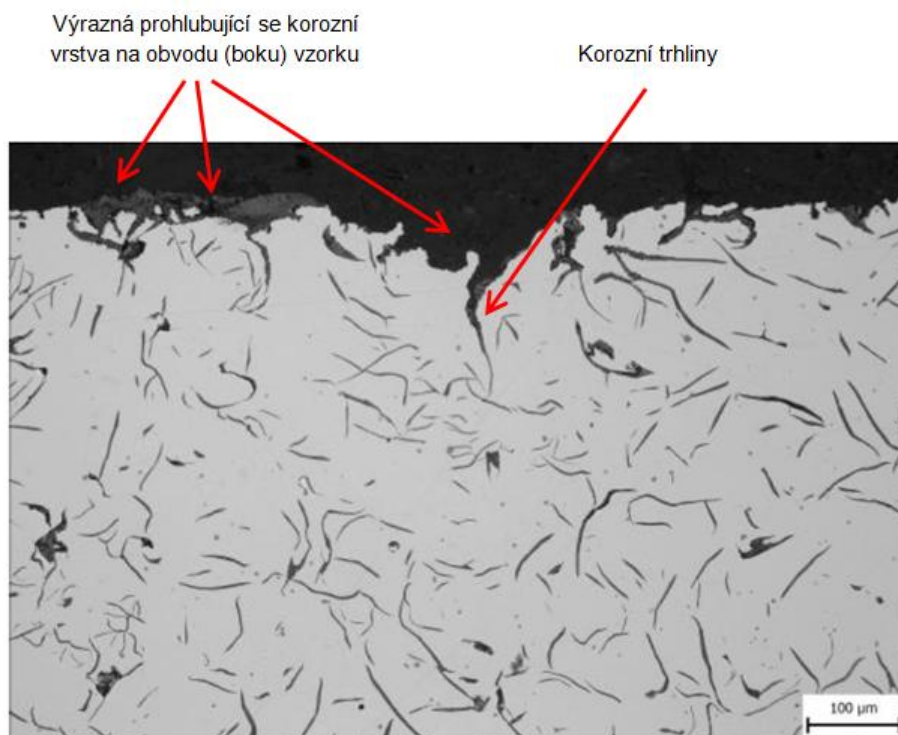
Obrázek č. 59: Povrch obvodu (boku) vzorku po 14denní expozici (ozn. 3-o)

24denní expozice

Dalším prodloužením korozní zátěže, na 24 dní, se korozní napadení ještě více prohlubuje a zvětšuje, jak je vidět na obrázcích č. 60 a 61 pro obvod (bok) vzorku.



Obrázek č. 60: Povrch obvodu (boku) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-o)



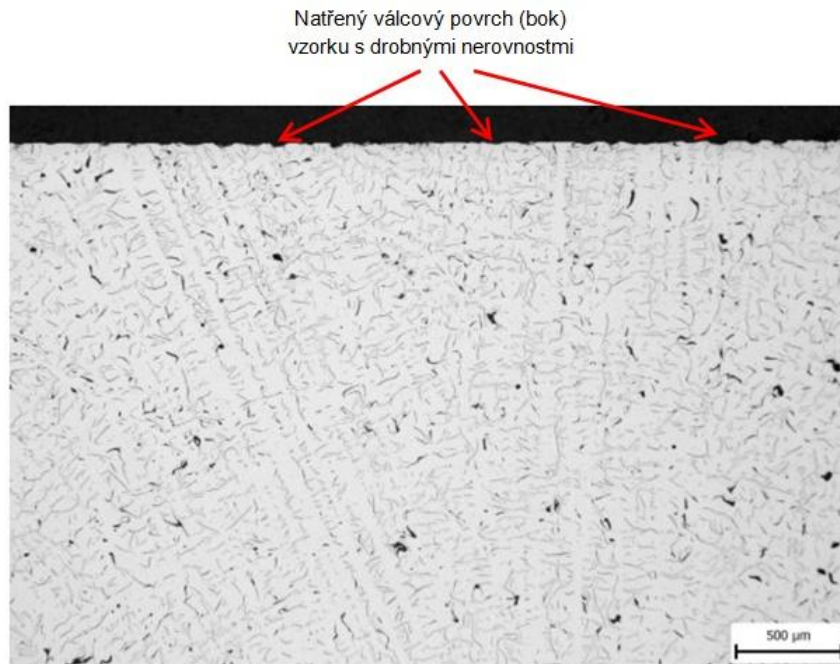
Obrázek č. 61: Povrch obvodu (boku) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-o)

7.1.5 Vzorky chráněné nátěrem po korozním působení – obvod (bok)

Vzorky chráněné nátěrem byly vystaveny koroznímu působení na dobu 7, 14 a 23 dní. Plochy vzorků jsou vzhledem k různým technologiím jejich tvorby podle nich také rozděleny na válcovou část (bok) a kruhovou část (čelo) vzorku. Lze předpokládat, že vzorky opatřené nátěrem s inhibitory koroze budou korozi méně ovlivněné než vzorky nechráněné.

7denní expozice

Analýza ukázala, že vzorky opatřené ochranným nátěrem mají po 7 dnech korozního působení obdobný stav povrchu jako výchozí vzorky. To dokládají obrázky č. 62 a 63.



Obrázek č. 62: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1N-o)

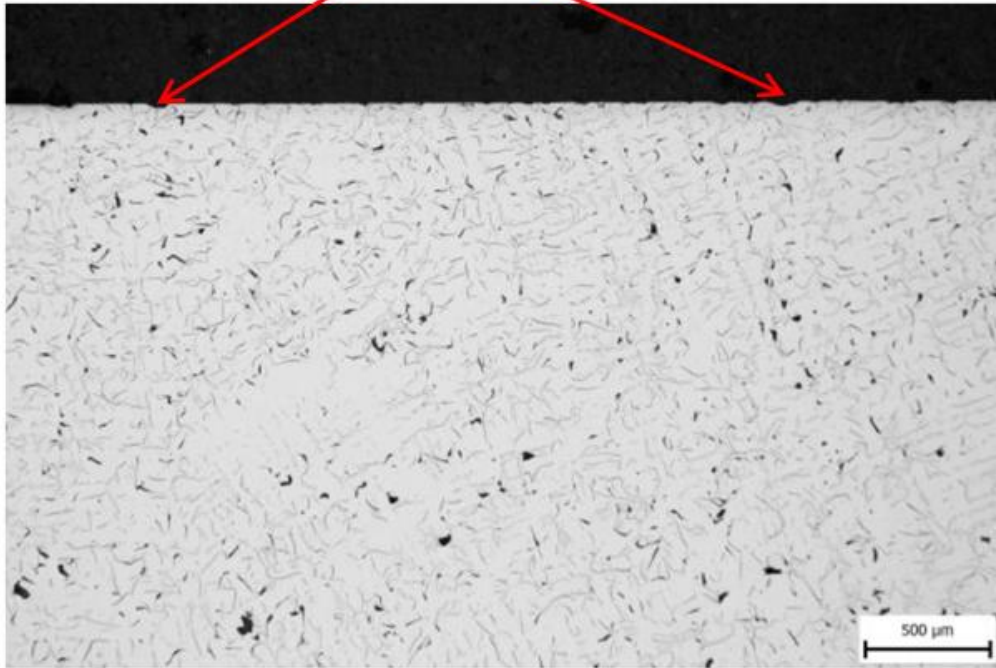


Obrázek č. 63: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1N-o)

14denní expozice

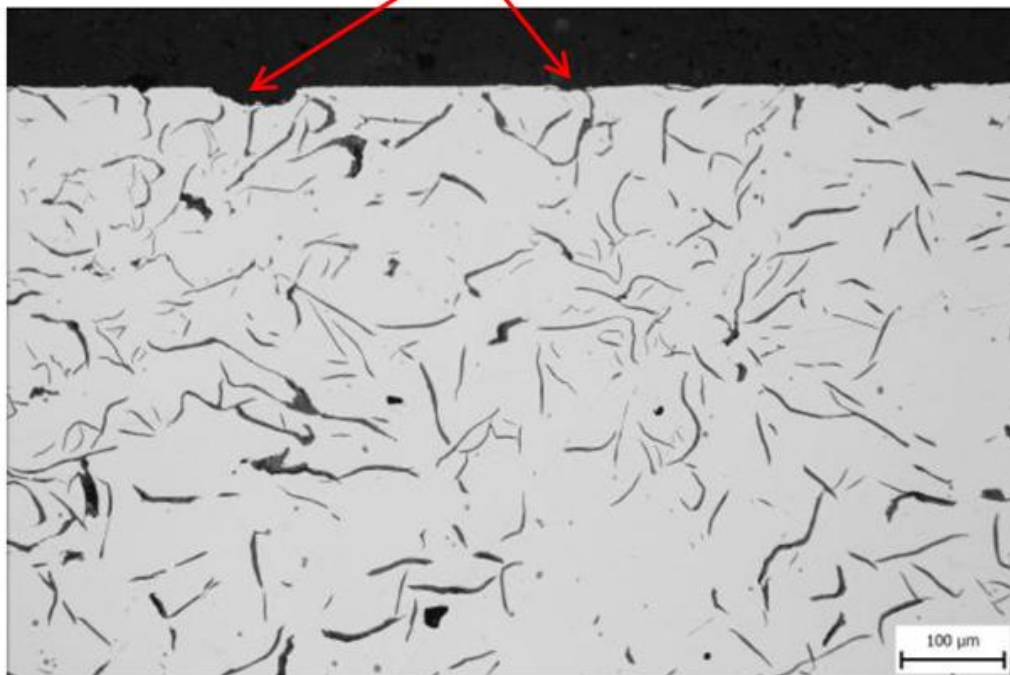
U 14denní expozice je rovněž stav povrchu vzorků podobný stavu povrchu referenčního vzorku, viz obrázek č. 64 a 65.

Natřený válcový povrch (bok)
vzorku s drobnými nerovnostmi



Obrázek č. 64: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 14denní expozici (ozn. 2N-o)

Natřený válcový povrch (bok)
vzorku s drobnými nerovnostmi

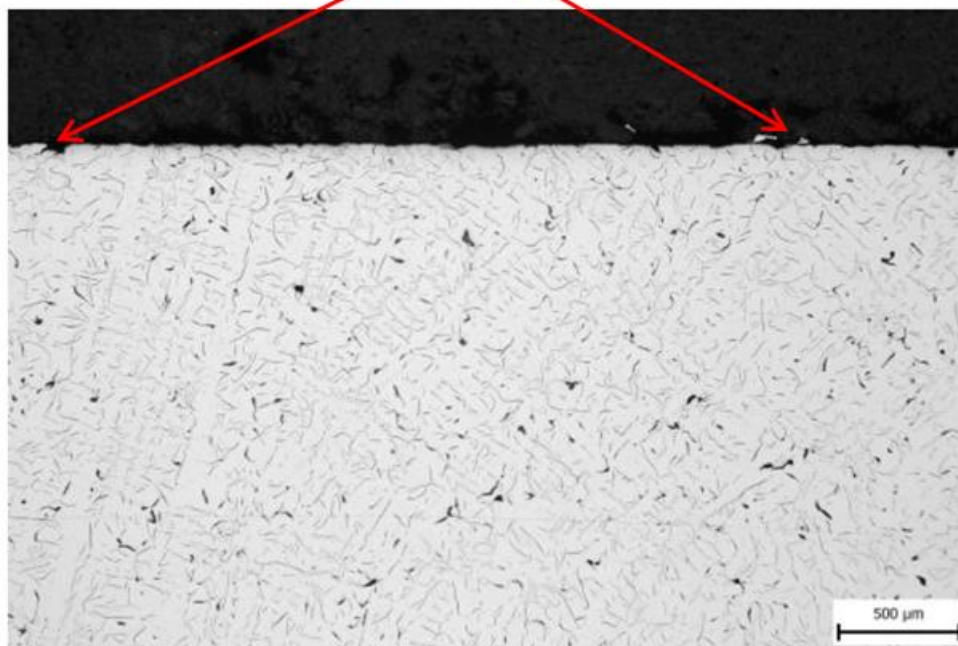


Obrázek č. 65: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 14denní expozici (ozn. 2N-o)

23denní expozice

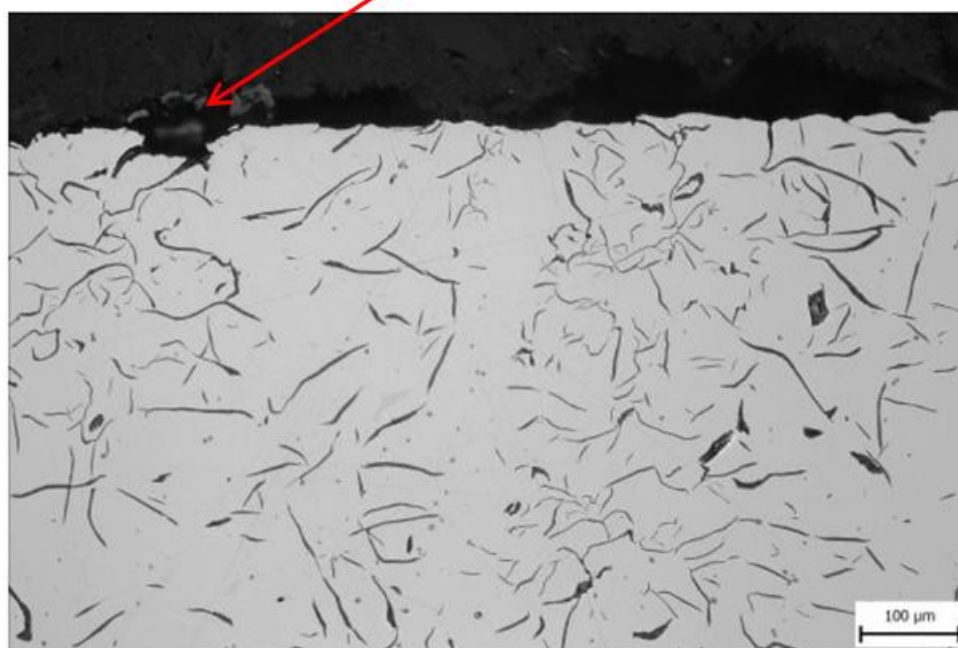
Po 23denní expozici začínají být na obvodu (boku) vzorku patrné známky místního korozního napadení, obdobné bodové korozi u korozivzdorných ocelí, jak je patrné na obrázcích č. 66 a 67.

Natřený válcový povrch (bok) vzorku
s počátečními známkami místní koroze



Obrázek č. 66: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 23denní expozici (ozn. 3N-o)

Natřený válcový povrch (bok) vzorku
s počátečními známkami místní koroze



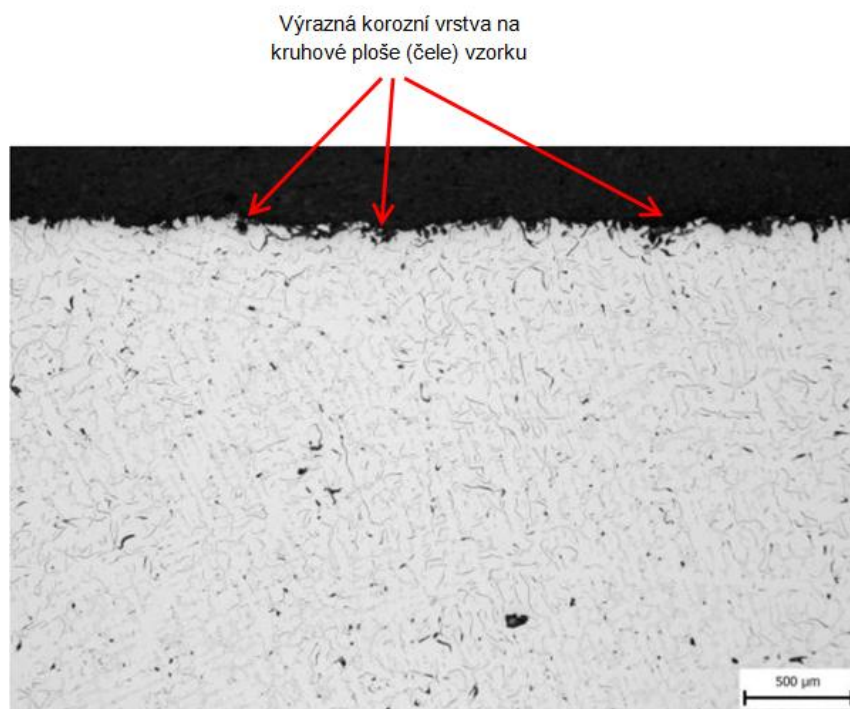
Obrázek č. 67: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 23denní expozici (ozn. 3N-o)

7.1.6 Vzorky nechráněné nátěrem po korozním působení – kruhová plocha (čelo)

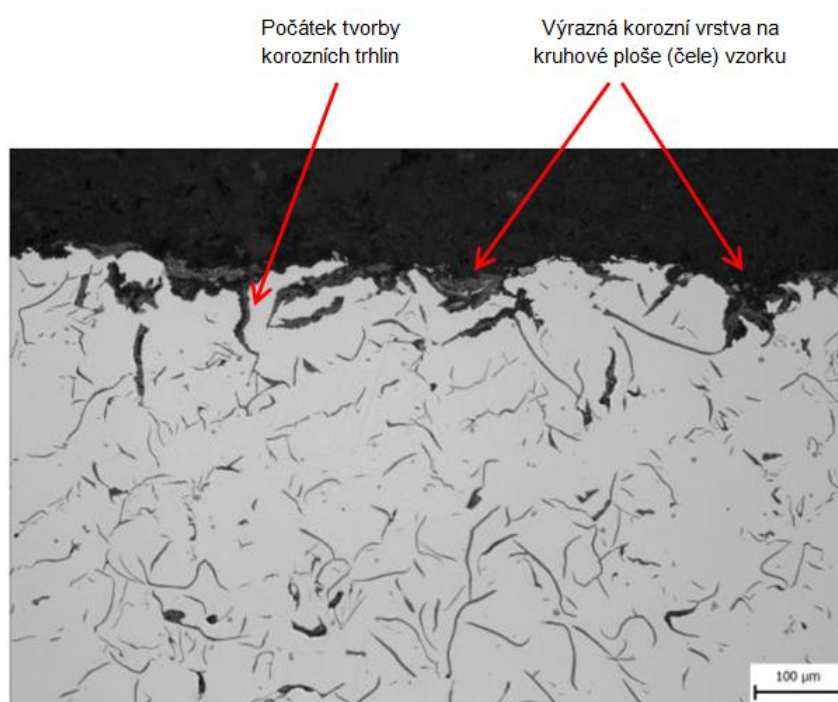
Vzorky nechráněné nátěrem byly vystaveny koroznímu působení na dobu 7, 14 a 24 dní. Plochy vzorků jsou vzhledem k různým technologiím jejich tvorby podle nich také rozděleny.

7denní expozice

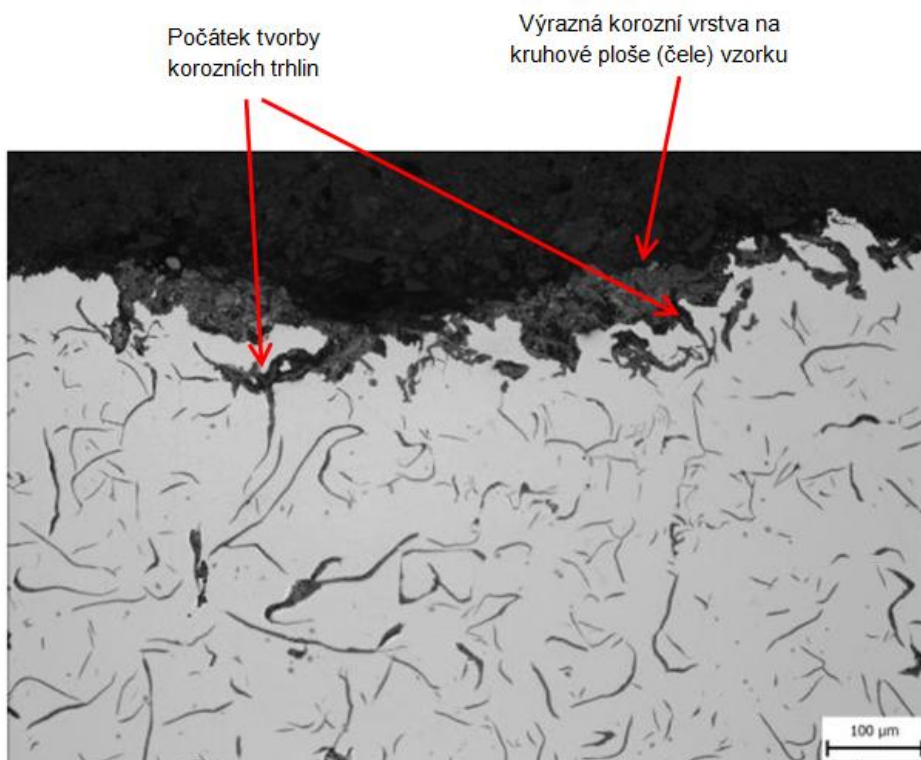
Po 7 dnech byla na řezané kruhové ploše (čele) vzorku jasně viditelná velká koncentrace a hloubka korozního napadení (viz obrázek č. 68, 69 a 70).



Obrázek č. 68: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1-p)



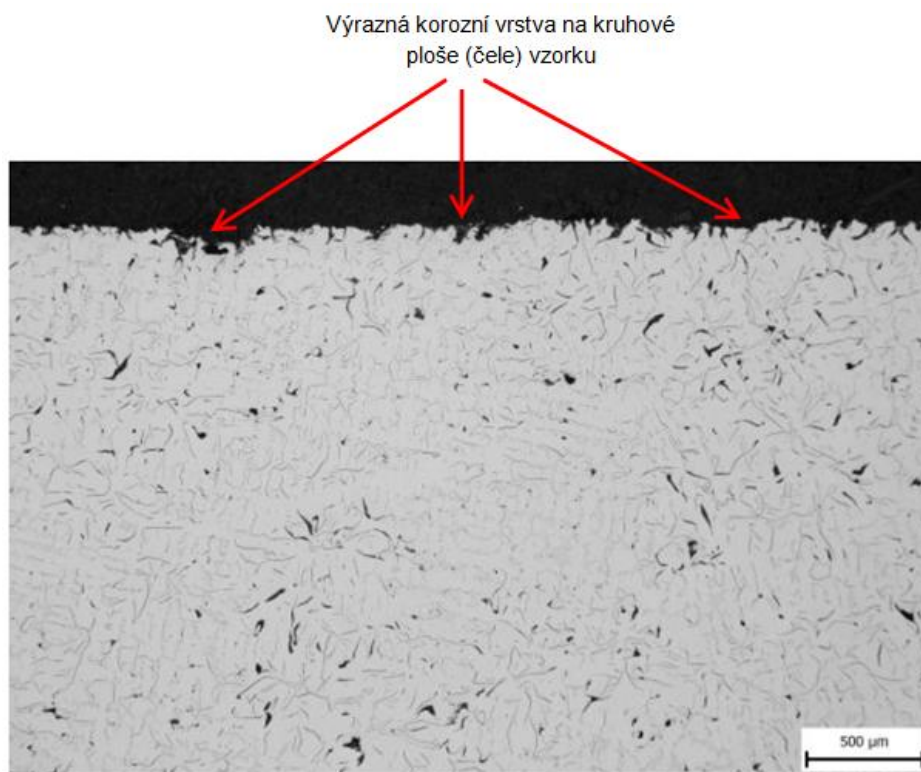
Obrázek č. 69: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1-p)



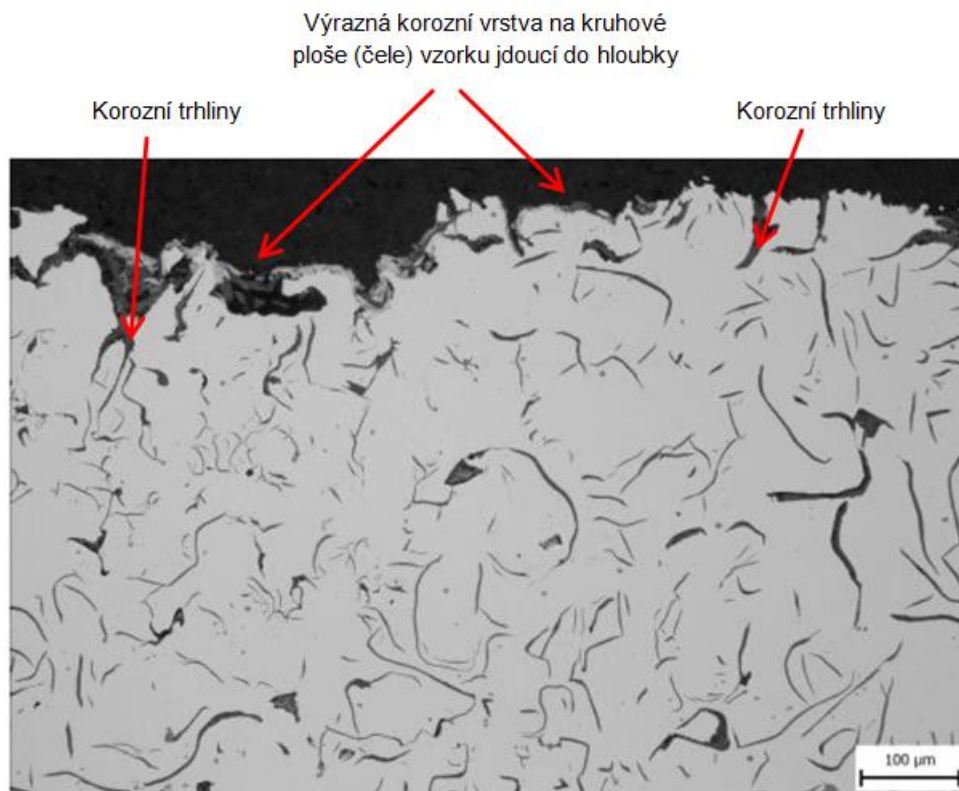
Obrázek č. 70: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1-p)

14denní expozice

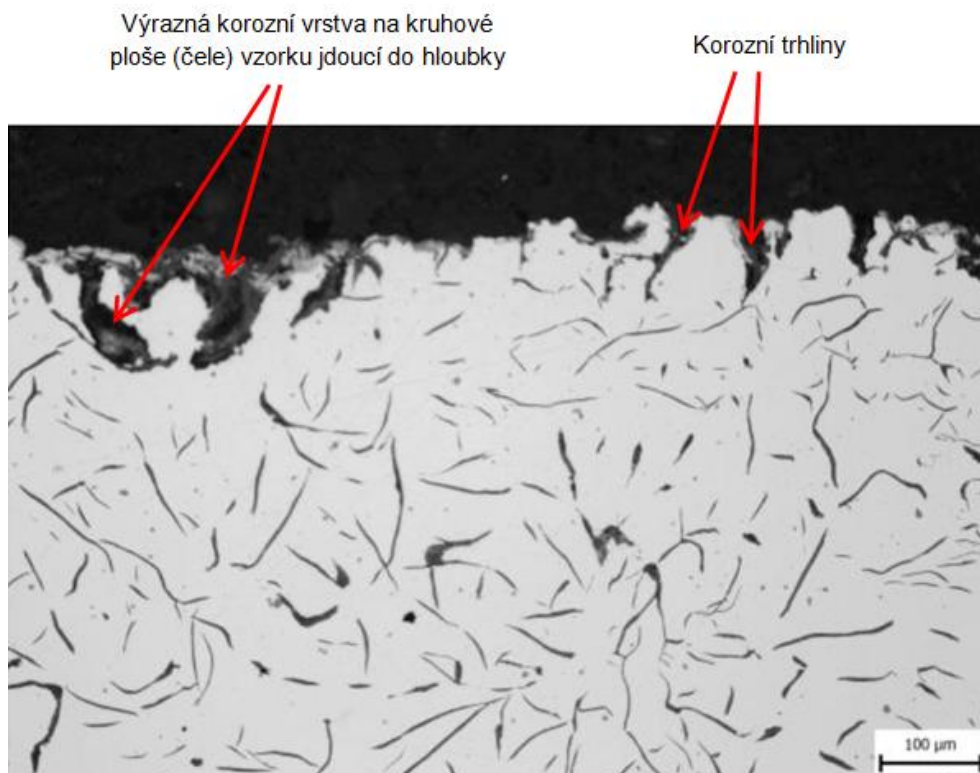
U prodloužené korozní zátěže na 14 dní se i zde rozsah korozního napadení dále zvyšuje. Hrubý řezaný kruhový povrch (čelo) vzorku vykazuje ještě výraznější korozní vrstvu než v předchozím případě, jak je patrné na obrázku č. 71, 72 a 73.



Obrázek č. 71: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 14denní expozici (ozn. 3-p)



Obrázek č. 72: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 14denní expozici (ozn. 3-p)

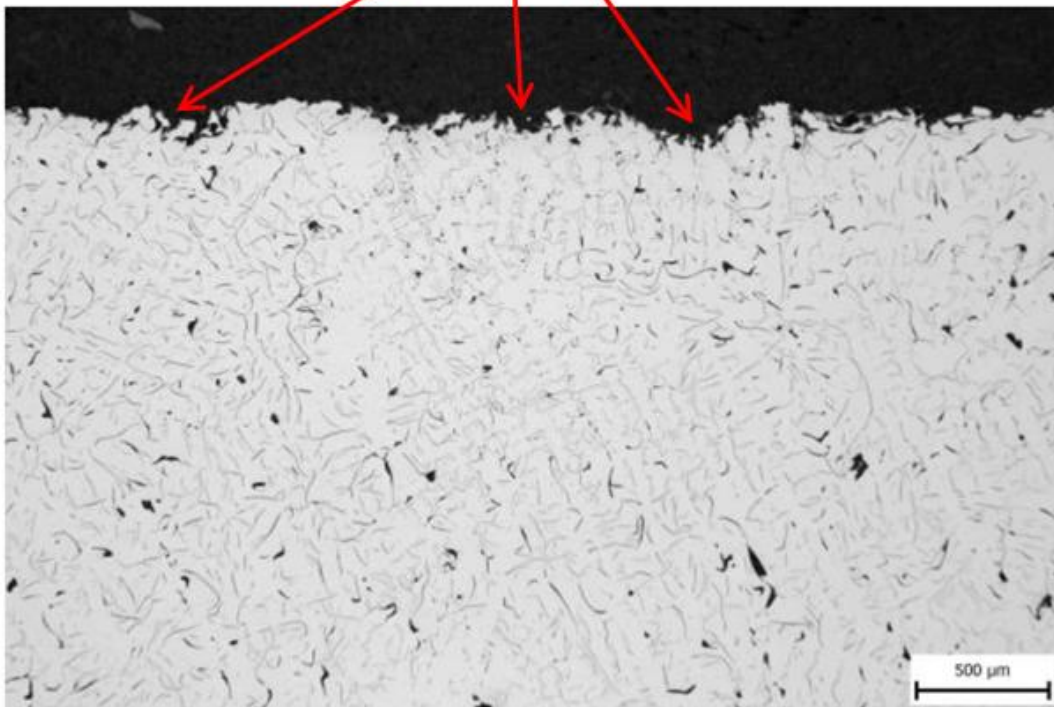


Obrázek č. 73: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 14denní expozici (ozn. 3-p)

24denní expozice

24denní korozní zátěž i v tomto případě korozní napadení ještě více prohlubuje a zvětšuje, viz obrázky č. 74–77 pro řezanou plochu (čelo) vzorku.

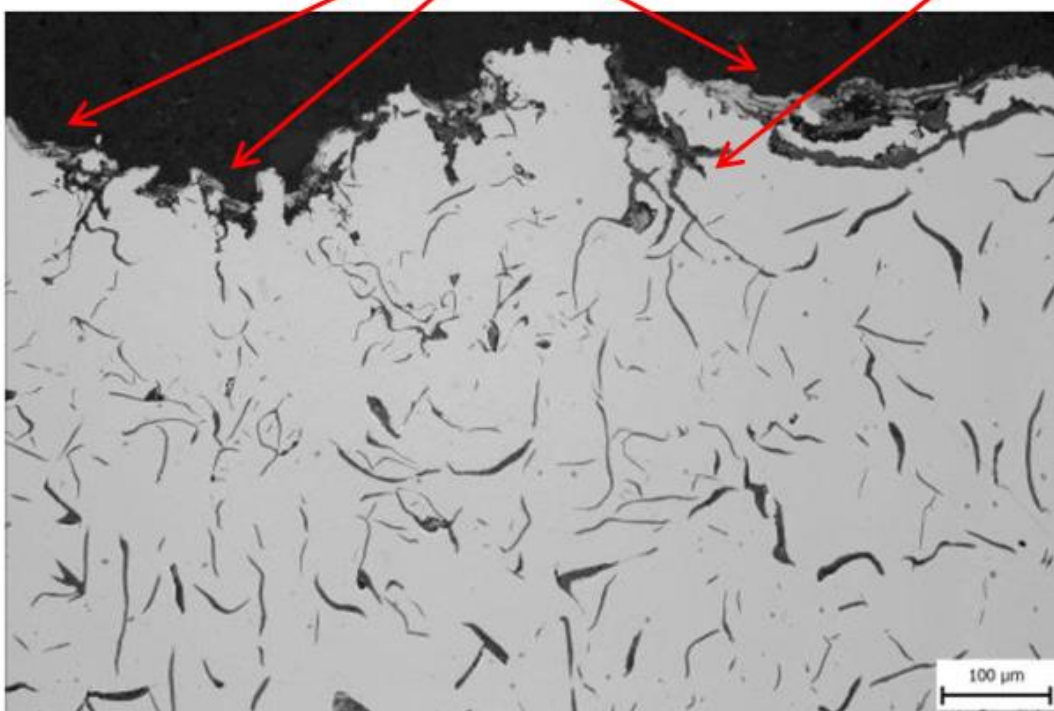
Výrazná prohlubující se korozní vrstva
na kruhové ploše (čele) vzorku



Obrázek č. 74: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-p)

Výrazná prohlubující se korozní vrstva na kruhové
ploše (čele) vzorku s velkými nerovnostmi

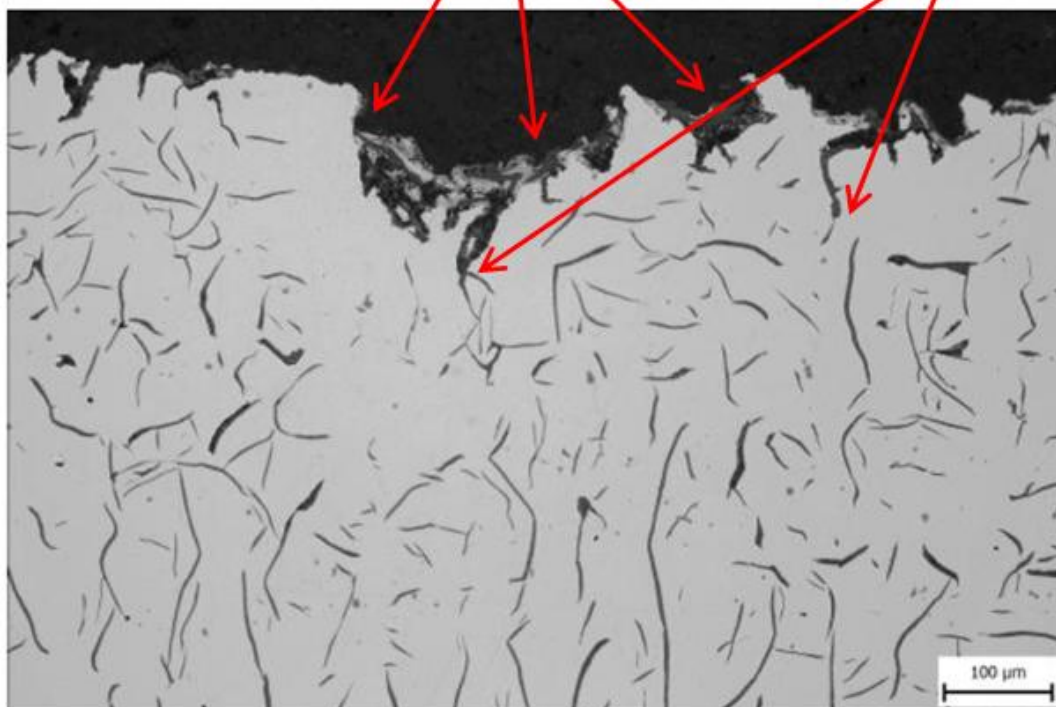
Korozní trhliny



Obrázek č. 75: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-p)

Výrazná prohlubující se korozní vrstva na kruhové ploše (čele) vzorku s velkými nerovnostmi

Korozní trhliny

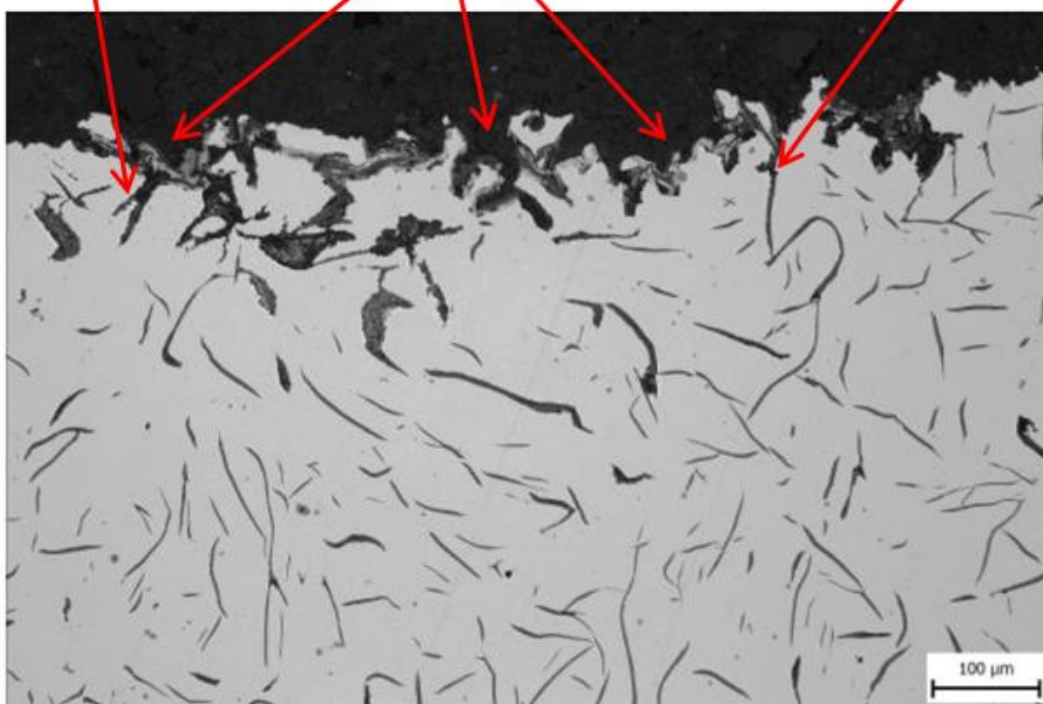


Obrázek č. 76: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-p)

Výrazná prohlubující se korozní vrstva na kruhové ploše (čele) vzorku s velkými nerovnostmi

Korozní trhliny

Korozní trhliny



Obrázek č. 77: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-p)

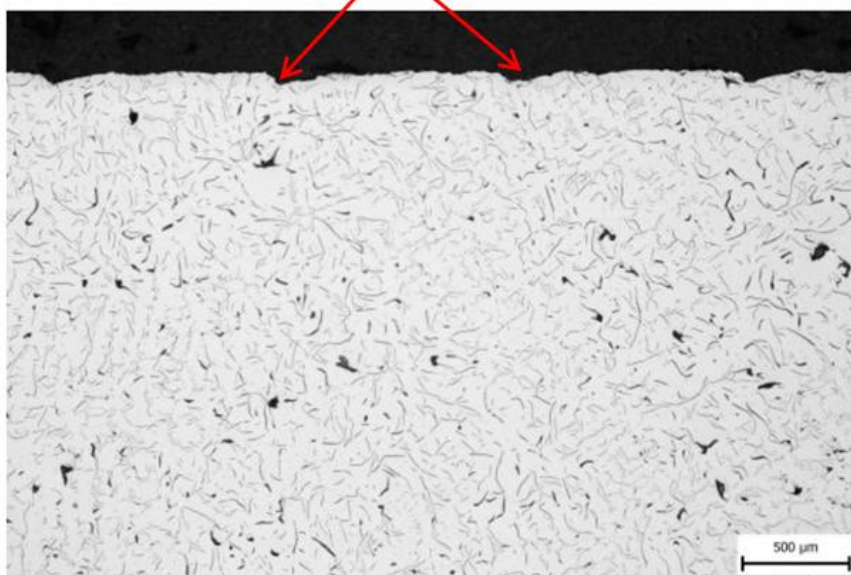
7.1.7 Vzorky chráněné nátěrem po korozním působení – kruhová plocha (čelo)

Vzorky chráněné nátěrem byly vystaveny koroznímu působení na dobu 7, 14 a 23 dní. Plochy vzorků jsou vzhledem k různým technologiím jejich tvorby podle nich také rozděleny na válcovou část (bok) a kruhovou část (čelo) vzorku. I přes hrubší strukturu povrchu lze i v tomto případě předpokládat, že vzorky opatřené nátěrem s inhibitory koroze budou korozi méně ovlivněné než vzorky nechráněné.

7denní expozice

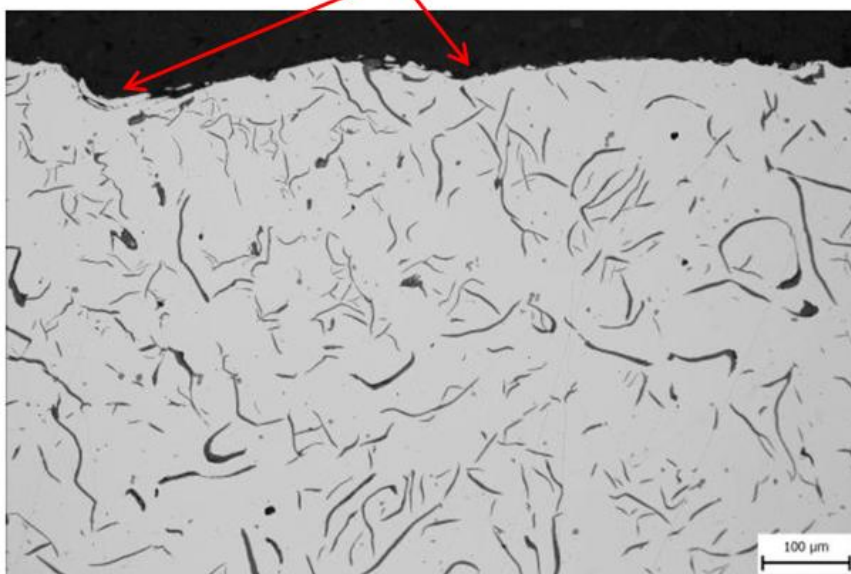
Po 7denní korozní expozici natřených vzorků je stav povrchu obdobný jako u vzorku ve výchozím stavu, což je patrné na obrázcích č. 78 a 79.

Natřený kruhový povrch (čelo) vzorku s výrazně zvlněným povrchem po dělení (řezání) bez známek koroze



Obrázek č. 78: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1N-p)

Natřený kruhový povrch (čelo) vzorku s výrazně zvlněným povrchem po dělení (řezání) bez známek koroze

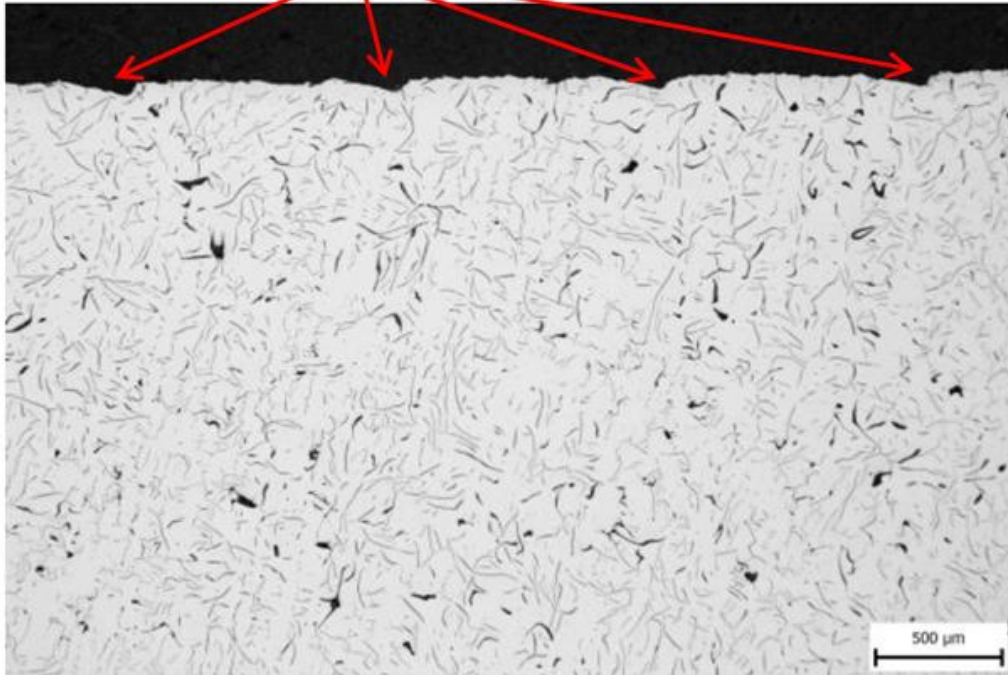


Obrázek č. 79: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1N-p)

14denní expozice

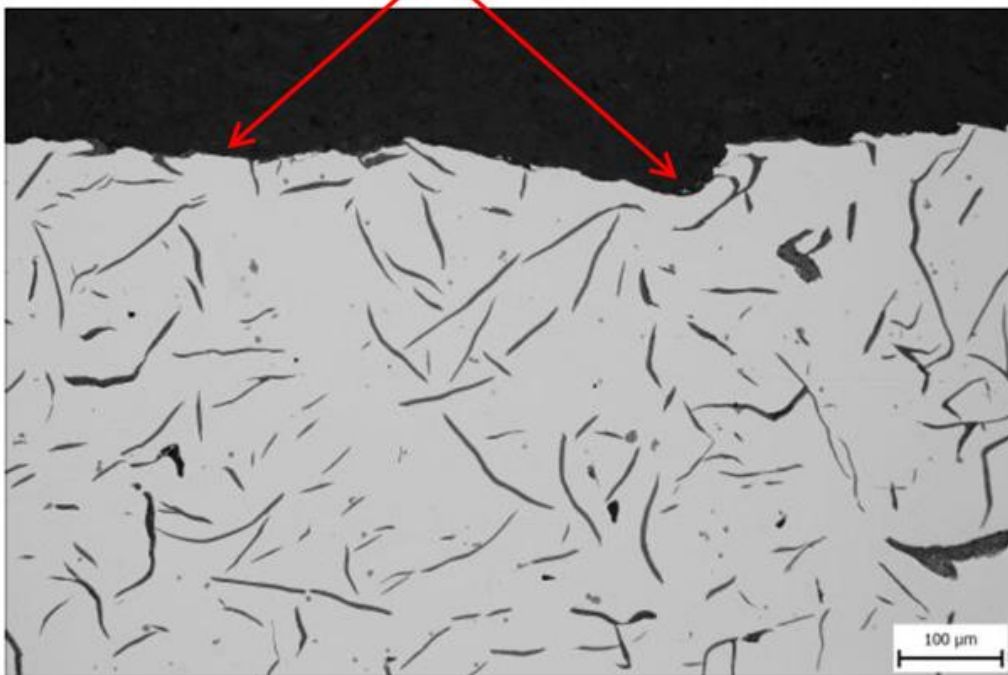
Ani po 14 dnech v korozním prostředí není u natřených vzorků viditelná koroze a jejich povrch zůstává obdobný jako u vzorku ve výchozím stavu, což je patrné na obrázcích č. 80 a 81.

Natřený kruhový povrch (čelo) vzorku s výrazně zvlněným povrchem po dělení (řezání) bez známek koroze



Obrázek č. 80: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 14denní expozici (ozn. 2N-p)

Natřený kruhový povrch (čelo) vzorku s výrazně zvlněným povrchem po dělení (řezání) bez známek koroze

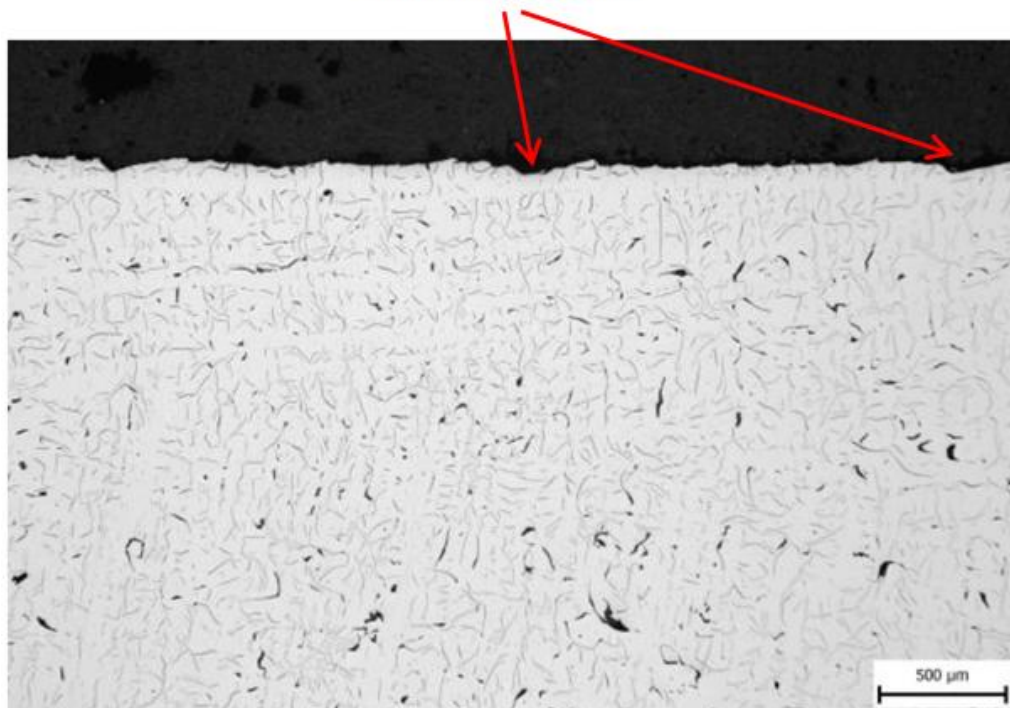


Obrázek č. 81: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 14denní expozici (ozn. 2N-p)

23denní expozice

I v tomto případě povrchu začínají být vidět známky místního korozního napadení až po 23 dnech vystavení vzorku koroznímu působení (viz obrázky č. 82 a 83).

Natřený kruhový povrch (čelo) vzorku s počínajícími
známkami místní koroze



Obrázek č. 82: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 23denní expozici (ozn. 3N-p)

Natřený kruhový povrch (čelo) vzorku s počínajícími
známkami místní koroze



Obrázek č. 83: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 23denní expozici (ozn. 3N-p)

7.1.8 Statistické hodnoty z měření hloubky korozního napadení

Hloubka korozního napadení byla náhodně měřena v okolí několika lamel (krátkých a mělkých i dlouhých a hlubokých) v místech vyššího korozního napadení (shluků lamel) a u všech ojediněle se vyskytujících lamel.

Hloubka korozního napadení u problematických míst na obvodu vzorku

V tabulce č. 7 jsou uvedeny některé vybrané číselné parametry problematických míst v hodnocených vzorcích na válcovém povrchu (obvodu, boku) vzorku.

Tabulka č. 7: Hloubka koroze u problematických míst na obvodu vzorku

Ozn. vzorku	Počet míst s korozním napadením	Minimum [μm]	Medián [μm]	80% kvantil	Maximum [μm]	Variační koeficient [%]	$\bar{x} \pm s_x$
0	16	9,8	17,1	19,5	24,4	22,9	17,4 \pm 4,0
1-o	36	14,6	39,0	73,2	102,5	54,4	47,8 \pm 26,0
3-o	23	29,3	68,3	73,2	107,3	27,8	64,1 \pm 17,8
2-o	42	24,4	58,5	87,8	146,4	37,6	68,8 \pm 25,9
1N-o	-	-	-	-	-	-	-
2N-o	-	-	-	-	-	-	-
3N-o	14	9,8	22,0	24,4	48,8	44,3	23,3 \pm 10,3

Hloubka korozního napadení u problematických míst na ploše vzorku bez snímače

Je zřejmé, že v místě přiloženého snímače akustické emise, bude koroze probíhat jinak než na zcela volném povrchu vzorku. Tabulka č. 8 popisuje hloubku korozního napadení na volné ploše bez snímače AE.

Tabulka č. 8: Hloubka koroze u problematických míst na volné ploše vzorku

Ozn. vzorku	Počet míst s korozním napadením	Minimum [μm]	Medián [μm]	80% kvantil	Maximum [μm]	Variační koeficient [%]	$\bar{x} \pm s_x$
0	23	34,2	48,8	58,5	68,3	16,0	51,1 \pm 8,2
1-p	28	48,8	100,1	122,0	175,6	29,4	100,7 \pm 29,6
3-p	32	68,3	92,7	122,0	146,4	23,5	98,5 \pm 23,2
2-p	55	58,5	126,8	156,1	219,5	29,8	124,5 \pm 37,1

1N-p	-	-	-	-	-	-	-
2N-p	-	-	-	-	-	-	-
3N-p	18	9,8	14,6	19,5	48,8	64,8	17,9 ± 11,6

Hloubka korozního napadení u problematických míst na ploše vzorku se snímačem

Dosedající čidlo AE částečně chrání povrch nátěrem neošetřeného vzorku (hloubka korozního napadení je nižší než u zcela volného povrchu) a naopak u nátěrem chráněného povrchu sonda narušuje ochranný nátěr a stopy koroze byly zjištěny i při kratších dobách expozice než u zcela volného povrchu. Číselné hodnoty jsou v tabulce č. 9.

Tabulka č. 9: Hloubka koroze u problematických míst na čidlem chráněné ploše vzorku

Ozn. vzorku	Počet míst s korozním napadením	Minimum [μm]	Medián [μm]	80% kvantil	Maximum [μm]	Variační koeficient [%]	$\bar{x} \pm s_x$
0	23	34,2	48,8	58,5	68,3	16,0	51,1 ± 8,2
1-ps	11	53,7	78,1	97,6	146,4	29,5	86,1 ± 25,4
3-ps	9	34,2	53,7	68,3	87,8	31,2	58,5 ± 18,2
2-ps	26	39,3	61,0	87,8	131,7	34,8	68,7 ± 23,9
1N-ps	8	9,8	17,1	53,7	107,3	96,3	37,2 ± 35,8
2N-ps	6	7,3	12,2	14,6	19,5	35,4	12,6 ± 4,5
3N-ps	25	4,9	14,6	24,4	48,8	51,9	17,8 ± 9,2

7.1.9 Statistické posouzení rozdílů z měření hloubky korozního napadení

Statistické rozdíly popisují, jak se změnila střední hodnoty hloubky u vzorků bez nátěru a s nátěrem. Jsou zvláště porovnávány hodnoty týkající se obvodu (boku) a plochy (čela) vzorku.

Statistický rozdíl problematických míst na obvodu vzorků bez nátěru a s nátěrem

Tabulka č. 10 je věnována statistickému posouzení rozdílů problematických míst na obvodu vzorků bez nátěru a s nátěrem. Uváděný rozdíl středních hodnot porovnávaných dvojic souborů je jak v příslušných jednotkách (μm), tak v % vztažených k hladině „prvního souboru“, se kterým se porovnává „druhý soubor“.

Tabulka č. 10: Statistický rozdíl problematických míst na obvodu vzorků bez nátěru a s nátěrem

Srovnávané vzorky	Rozdíl středních hodnot		F a T test (IS 95%) pro střední délku problematických oblastí	
	[μm]	[%]	Rozptyl	Střední hodnota
0 a 1-o	-30,4	-174,7	Liší se	Liší se
0 a 3-o	-46,7	-268,4	Liší se	Liší se
0 a 2-o	-51,4	-295,4	Liší se	Liší se
0 a 3N-o	-5,9	-33,9	Liší se	Neliší se
1-o a 3-o	-16,3	-34,1	Liší se	Liší se
1-o a 2-o	-21,0	-43,9	Neliší se	Liší se
3-o a 2-o	-4,7	-7,3	Liší se	Neliší se
2-o a 3N-o	45,5	66,1	Liší se	Liší se

Statistický rozdíl problematických míst na volné ploše vzorků bez nátěru a s nátěrem

Tabulka č. 11 je věnována statistickému posouzení rozdílů problematických míst na volné ploše vzorků bez nátěru a s nátěrem. Uváděný rozdíl středních hodnot porovnávaných dvojic souborů je jak v příslušných jednotkách (μm), tak v % vztažených k hladině „prvního souboru“, se kterým se porovnává „druhý soubor“.

Tabulka č. 11: Statistický rozdíl problematických míst na volné ploše vzorků bez nátěru a s nátěrem

Srovnávané vzorky	Rozdíl středních hodnot		F a T test (IS 95%) pro střední délku problematických oblastí	
	[μm]	[%]	Rozptyl	Střední hodnota
0 a 1-p	-49,6	-97,1	Liší se	Liší se
0 a 3-p	-47,4	-92,8	Liší se	Liší se
0 a 2-p	-73,4	-143,6	Liší se	Liší se
0 a 3N-p	-33,2	-65,0	Liší se	Liší se
1-p a 3-p	2,2	2,1	Neliší se	Neliší se
1-p a 2-p	-23,8	-23,6	Neliší se	Liší se

3-p a 2-p	-26,0	-26,4	Neliší se	Liší se
2-p a 3N-p	106,6	85,6	Liší se	Liší se

7.1.10 Shrnutí a vyhodnocení

Z výsledků měření korozního napadení pro oblast obvodu (boku) vzorku je patrné, že:

- ve výchozím stavu jsou po obvodu vzorku asi 3x mělčí nerovnosti oproti hrubšímu řezu,
- na obvodu nechráněných vzorků dochází s rostoucí dobou expozice k výskytu míst s korozi, jejichž hloubka je ve srovnání s výchozím stavem vyšší u všech expozic a s rostoucí dobou expozice dále stoupá (mezi 14 a 24 denní expozicí ale již není tak statisticky významný rozdíl),
- u vzorků chráněných nátěrem bylo korozní napadení na obvodu zjištěno až u 23denní expozice, ale jeho hloubka je ještě srovnatelná s výchozím stavem (střední hodnoty se statisticky významně neliší),
- výraznější rozdíly v hloubce korozního napadení vychází při porovnání nejdelších dob expozice nechráněného a chráněného povrchu obvodu vzorku, a to dle předpokladů ve prospěch chráněného vzorku.

Výsledky měření korozního napadení pro oblast plochy řezu (čela) vzorku bez umístěného čidla AE ukázaly, že:

- na hrubší řezné ploše nechráněných vzorků došlo k výraznému koroznímu napadení už po nejkratší 7 denní zátěži,
- hloubka korozního napadení vzhledem k očištěnému a odmořenému povrchu je i tak výrazně vyšší než u původních hlubokých rýh po obrábění u výchozího stavu (viz statistické testy),
- u vzorků chráněných nátěrem bylo korozní napadení na řezné ploše zjištěno také až u 23denní expozice a jeho hloubka je v tomto případě naopak nižší než původní rýhy ve výchozím stavu (střední hodnoty se statisticky významně liší ve prospěch korozního napadení),
- ještě větší rozdíly v hloubce korozního napadení (střední hodnoty) pak vyjdou při porovnání nejdelších dob expozice u nechráněného a chráněného povrchu řezu (nechráněný cca 125 μm vs. chráněný pod cca 20 μm).

Korozní napadení postupuje do hloubky materiálu podél rozhraní grafitu a perlitu a největší hloubky dosahuje v místech zvýšené koncentrace grafitických lamel, což je nejspíše možné spojovat se segregací přísad.

Z provedených rozborů vyplývá, že použitý ochranný nátěr výrazně chrání povrch litinového vzorku proti korozní zátěži v kondenzační komoře (při 7 a 14denní expozici u něj nedošlo ani ke koroznímu napadení na povrchu řezu, ani obvodu vzorku, a u 23denní expozice je rozsah korozního napadení výrazně nižší než u nechráněného vzorku.

7.2 Akustická emise

Zrychlené korozní zkoušky byly monitorovány diagnostickým nástrojem akustické emise (AE). Měření bylo provedeno pomocí diagnostického nástroje akustické emise od společnosti *DAKEL* typ *XEDO*. Měřicí systém je vybaven celkově 6 kanály. Vznik korozně únavové trhliny v litině je doprovázen mírně zvýšenou aktivitou AE. S rostoucím počtem kmitů, tj. s růstem trhliny, se četnost událostí AE a jejich amplituda zvětšuje.

7.2.1 Základní popis měřicího systému Dakel Xedo

Hardwarová část díky nastavení vhodných kombinací měřicích kanálů umožňuje sestavení různých konfigurací dle požadavků (lze sestavovat jak malé laboratorní přístroje, tak velké průmyslové diagnostické systémy). Měřicí jednotky jsou seřazeny do měřicích rámců (boxů) a připojeny spolu s komunikačními jednotkami na společnou sběrnici. Propojení libovolného počtu boxů (zde je k dispozici *SEDO 13*, typ *SEDO-BOX B16*) s jakýmkoliv počtem počítačů zajišťuje standardní komunikační rozhraní *ethernet 10 Base 2*. Snímače systému mohou plnit také funkci vysílačů nebo budičů a pro jejich připojení slouží konektor *BNC*. Tento systém je na obrázku č. 84 [45].

Softwarovou část tvoří program *Daemon*, který slouží pro zaznamenávání parametrů měření akustické emise a dalších fyzikálních veličin (například teplota nebo tlak) včetně vzorkování signálů na každém kanálu. Rovněž může být vybaven elektronickým generátorem vhodných pulsů pro simulaci emisních událostí. To umožňuje jednoduchou kontrolu funkce snímačů a autokalibrace zařízení [45].

Druhou částí softwarového vybavení je program *DaeShow*, který je určen k převodu binárních výstupů z programu *Daemon* do lépe čitelných a zpracovatelných formátů jinými aplikacemi (např. *MatLab*, *GnuPlot*, *Grapher*, *Maple* apod.). *DaeShow* zároveň dokáže vytvářet časové grafy veličin *count*, napětí přepočítávaného na uživatelské veličiny a frekvence. Dále umožňuje zpracování signálů vzorkovaných jednotkami AE (k dispozici je několik transformací signálů včetně spektrální analýzy a navíc má uživatel možnost přidávat vlastní transformace signálů napsané v libovolném programovacím jazyce prostřednictvím knihoven *DLL*). Disponuje základními lineárními metodami lokalizace událostí AE a prostřednictvím knihoven *DLL* lze přidávat i vlastní. Grafické výstupy lze vkládat jako obrázky (*Windows metafile*) do jednoduchého textového editoru (podobném standardnímu programu *WordPad*), který se pak ukládá na disk ve formátu *Rich Text Format*, nebo pomocí *schránky* do libovolného jiného programu (*MS Word*, *Excel*, *PowerPoint* aj.) [46].



Obrázek č. 84: Systém pro měření akustické emise Dakel Xedo

7.2.2 Označení vzorků

Zkušební vzorky byly rozděleny do dvou skupin (s ochranným nátěrem a bez ochranného nátěru). Jednotlivé vzorky v příslušných skupinách byly očíslovány.

Zkušební vzorky bez ochranného nátěru:

- Vzorek 1 – doba expozice 168 hodin (7 dnů)
- Vzorek 2 – doba expozice 576 hodin (24 dnů)
- Vzorek 3 – doba expozice 336 hodin (14 dnů)

Zkušební vzorky s ochranným nátěrem:

- Vzorek 1N – doba expozice 168 hodin (7 dnů)
- Vzorek 2N – doba expozice 552 hodin (23 dnů)
- Vzorek 3N – doba expozice 336 hodin (14 dnů)

7.2.3 Použitá sestava měřicího systému

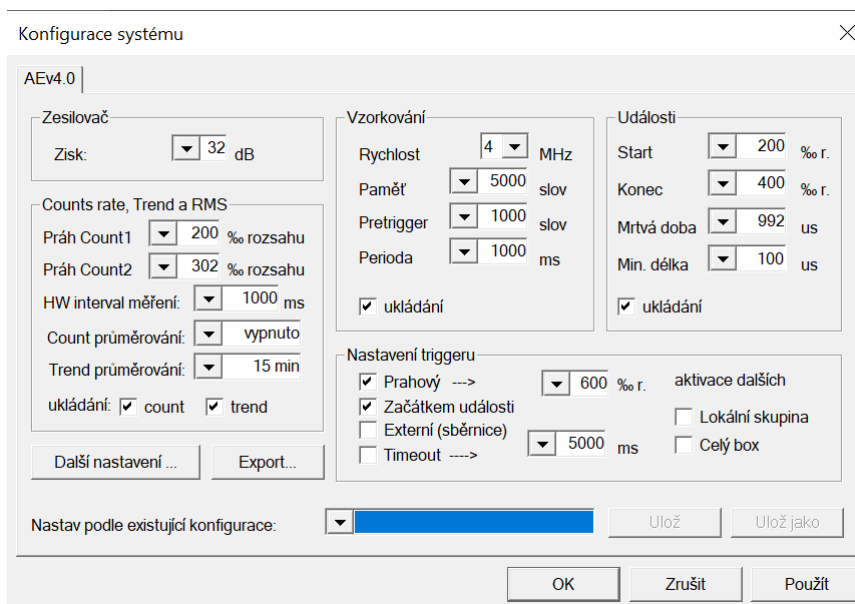
Použitá sestava diagnostického systému akustické emise (AE) se konkrétně skládala z následujících částí:

- 3x piezoelektrický snímač typu MTR-15
- 3x předzesilovačů 35 dB
- 3x prodlužovací kabeláž snímačů
- Diagnostický systém DAKEL Xedo
- Notebook (propojení se zařízením Xedo kabelem typu LAN)

Piezoelektrické snímače byly ke zkušebním vzorkům (1, 2, 3 a 1N, 2N a 3N) připevněny pomocí speciálního přípravku vybaveným šroubovým spojem (viz Obrázek č. 46 výše na straně 62). Mezi zkušební vzorek a kontaktní plochu piezoelektrického snímače byla použita speciální silikonová pasta pro přenos signálů AE ze vzorků do snímače.

7.2.4 Konfigurace diagnostického systému Dakel Xedo

Konfigurace a nastavení parametrů diagnostického systému pro měření je vidět na obrázku č. 85.



Obrázek č. 85: Konfigurace a nastavení měřicího systému AE

7.2.5 Monitorované parametry

Naměřená data z diagnostického systému akustické emise byla vyhodnocena z celkem 3 snímačů. K vyhodnocení signálů akustické emise byly monitorovány následující parametry:

- **Count 1 (c1)** – počet překmitů přes nastavenou prahovou úroveň vyjádřený v logaritmické stupnici (levá osa y) za stanovený časový interval
- **Count 2 (c2)** – počet překmitů přes nastavenou prahovou úroveň vyjádřený v logaritmické stupnici (levá osa y) za stanovený časový interval
- **RMS (Root Mean Square)** – střední kvadratická úroveň detekovaného signálu v mV (pravá osa y)

7.2.6 Výsledky měření

Naměřená data byla vyhodnocena ze všech 6 zkušebních sad vzorků. Vzhledem k tomu, že se jedná o širokou oblast vyhodnocování dat, jsou v této práci prezentována data pouze ze zkušebních vzorků označených číslem 2, resp. 2N, kde je zachycen celý průběh měření.

Jedná se o zkušební vzorky, které byly exponovány po dobu celkem 24 dní (576 hodin) bez korozní ochrany – *snímač 2* a 23 dní (552 hodin) s korozní ochranou – *snímač 3*. Vzorky bez korozní ochrany jsou vyhodnocovány po cyklech 2x 7 dní a 10 dní (celkem 24 dní). Vzorky s korozní ochranou jsou vyhodnocovány po cyklech 2x 7 dní a 9 dní (celkem 23 dní).

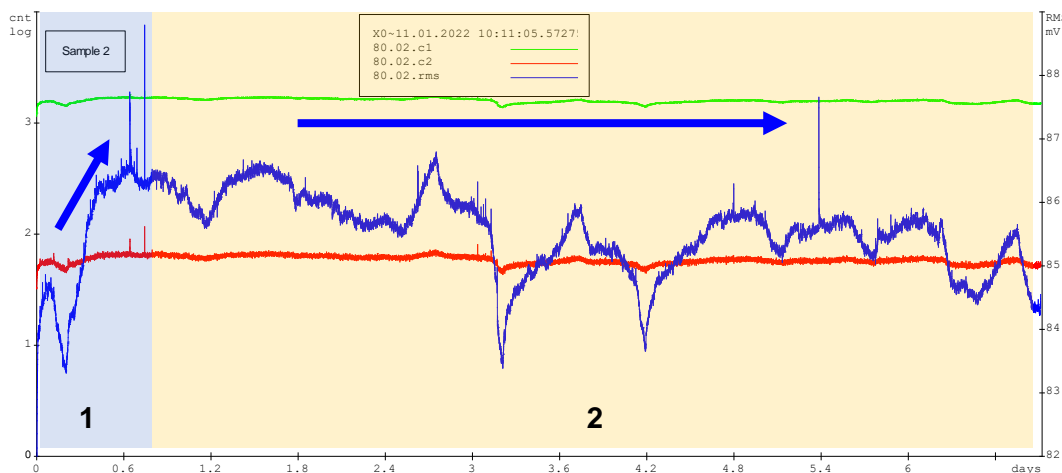
Akustická emise u vzorků bez korozní ochrany (snímač 2)

- **prvních 7 dní**

Na obrázku č. 86 je vyhodnocený grafický záznam akustické emise (AE) zkušebního vzorku 2 bez protikorozní ochrany po prvních 7 dnech měření. V první fázi (vyznačené v grafu číslem 1) můžeme pozorovat okamžité zvýšení aktivity AE vyjádřené střední kvadratickou úrovní signálu značenou jako RMS, a to během prvních 12 hodin testování.

Druhá fáze (vyznačená v grafu číslem 2) vyjadřuje průběh záznamu akustické aktivity typický pro vylučování grafitu a vznik lokální grafitické koroze ve formě lupínek a pittingu. Oduhličením je doprovázeno reakcí železa s vodou, kdy vzniká oxid železitý ve formě rovnoměrné koroze.

Lze tedy předpokládat, že šumový signál akustické emise je způsoben reakcí Fe s H_2O za vzniku $FeOH_2 \cdot 2H_2O$ a nespojitý signál AE je způsoben lokální grafitickou korozi, šupinkováním a vznikem pittingu. V tomto je signál u litiny odlišný kupříkladu od signálu při korozi oceli, neboť u oceli bychom získali signál pouze spojitěho charakteru. Tyto korozní mechanismy nám prokazují i výsledky metalografických rozborů.



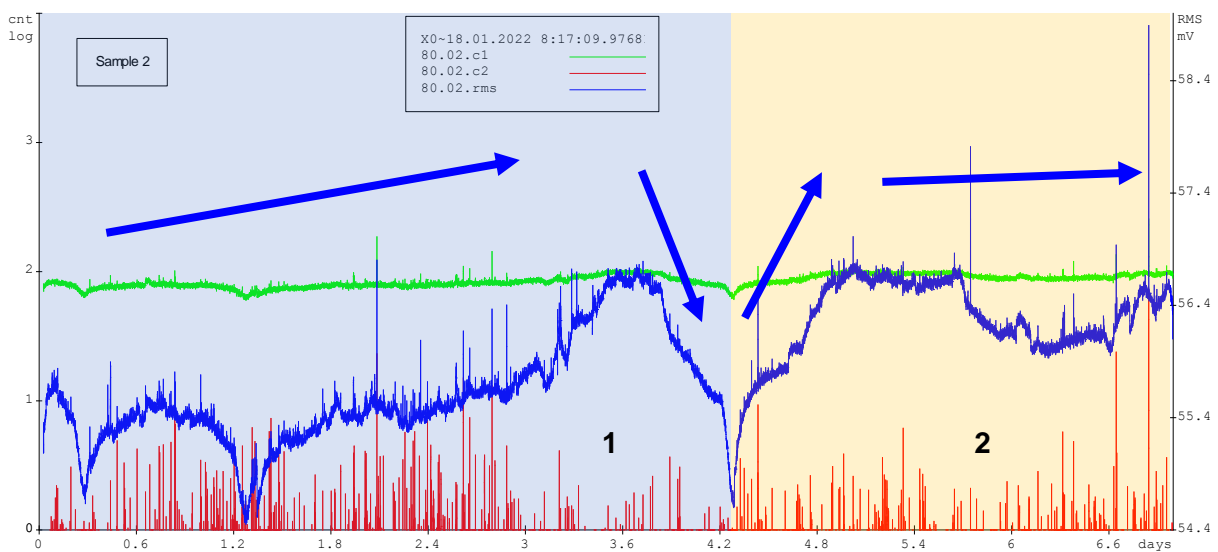
Obrázek č. 86: AE vzorku bez protikorozní ochrany po prvních 7 dnech (snímač 2)

- **dalších 7 dní**

Na obrázku č. 87 je vyhodnocený grafický záznam akustické emise (AE) zkušebního vzorku 2 bez protikorozní ochrany po dalších 7 dnech měření. V grafu je patrný řádový pokles u všech měřených parametrů.

V první fázi (vyznačené v grafu číslem 1) můžeme pozorovat pokračující trend z fáze 2 u předchozího případu, ovšem v jednotkách o řád nižších. Lze předpokládat jistou stagnaci procesu koroze, která následuje po vytvoření rovnoměrné korozní vrstvy. Ke konci této 1. fáze nastává opět mírný nárůst a prudký pokles mezi dny 3 a 4. To lze nejspíše připsat ustalování korozní vrstvy.

Ve druhé fázi (vyznačená v grafu číslem 2) dochází mezi dnem 4 a 5 k opětovnému nárůstu aktivity, který se v řádu stovek drží poměrně stabilní až do konce této fáze. Tento proces může naznačovat další rozvoj koroze a její prohloubení, což opět dokládají metalografické výsledky.

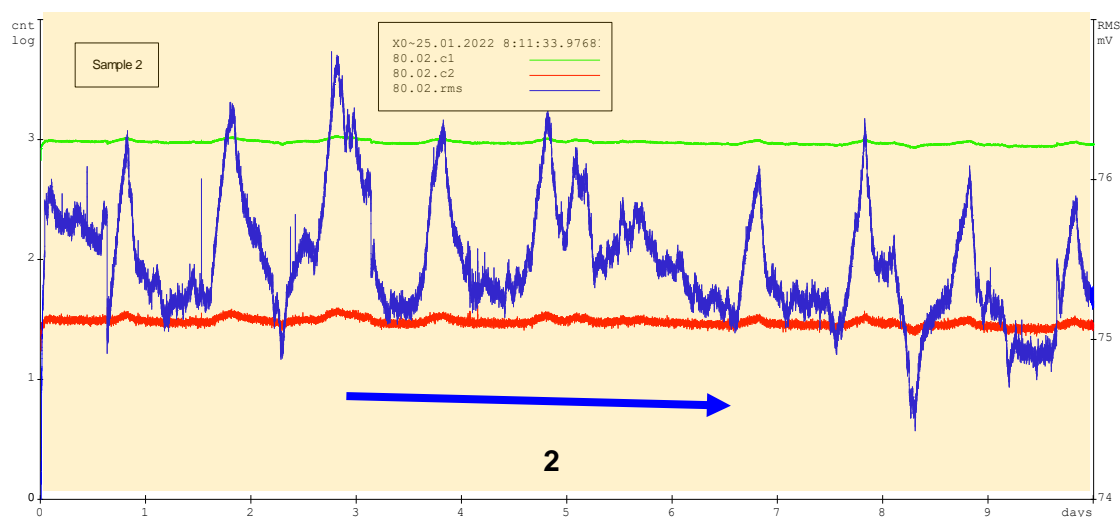


Obrázek č. 87: AE vzorku bez protikorozní ochrany po dalších 7 dnech (snímač 2)

- **závěrečných 10 dní**

U třetí finální fáze korozního působení se graf na obrázku č. 88 již vyznačuje pouze fází číslo 2. To naznačuje, že čím déle je zkušební vzorek bez protikorozní ochrany vystaven zrychleným korozním zkouškám v kondenzační komoře, tím více koroduje, až je znatelná pouze fáze číslo 2.

V této fázi se stále opakuje náhlé zvyšování a snižování aktivity AE u parametru *RMS*, které kmitá v řádech stovek až tisíců. U pozorovaných parametrů *c1* a *c2* rovněž došlo k opětovnému výraznému zvýšení hodnot. Lze tedy předpokládat možné porušování horní části korozní vrstvy a postup koroze hlouběji do materiálu. Výsledky jsou opět srovnatelné s metalografickými závěry.



Obrázek č. 88: AE vzorku bez protikorozní ochrany po závěrečných 10 dnech (snímač 2)

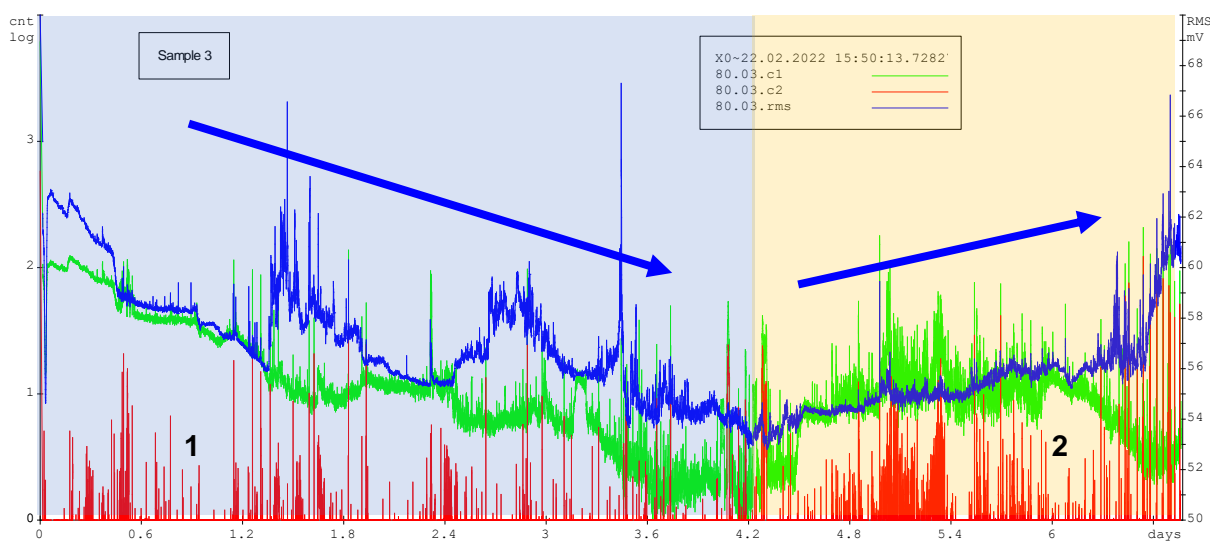
Akustická emise u vzorků s korozní ochranou (snímač 3)

- **prvních 7 dní**

Na obrázku č. 89 je znázorněný grafický záznam AE zkušební vzorku 2 s protikorozní ochranou ve formě nátěru po prvních 7 dnech korozního působení.

V první fázi vyznačené v grafu číslem 1 lze pozorovat pozvolný pokles aktivity akustické emise u hodnot *RMS* a překmitů přes nastavený práh, označených jako *count 1*. V porovnání se vzorkem bez protikorozní ochrany je průběh aktivity AE v této pozorované oblasti obrácený. Tento jev lze přiřadit tomu, že prvotní významnější korozní děje nastávají až po porušení protikorozní vrstvy. Vzhledem k tomu, že „každá protikorozní vrstva je jen tak účinná, jako je její nejslabší část“, je v rámci reálných podmínek nutné vždy ověřit, kde se nacházejí kritické body s minimální tloušťkou vrstvy. Mohou to být zejména hrany a záhyby, což i v tomto případě potvrzují výsledky metalografických zkoušek.

Ve druhé fázi označené číslem 2 dochází ke zvýšení aktivity AE, které vyjadřuje prvotní porušení protikorozní vrstvy, což zatím není patrné na metalografických fotografiích. Dochází k tzv. podkorodování, jenž má svá specifika – z pohledu litiny nastává pod protikorozní vrstvou grafitická selektivní spongióza, která je umocněna přítomností stopového množství síry v litině. Vzniká pórovitá struktura grafitu a dochází k selektivnímu rozpouštění železa.



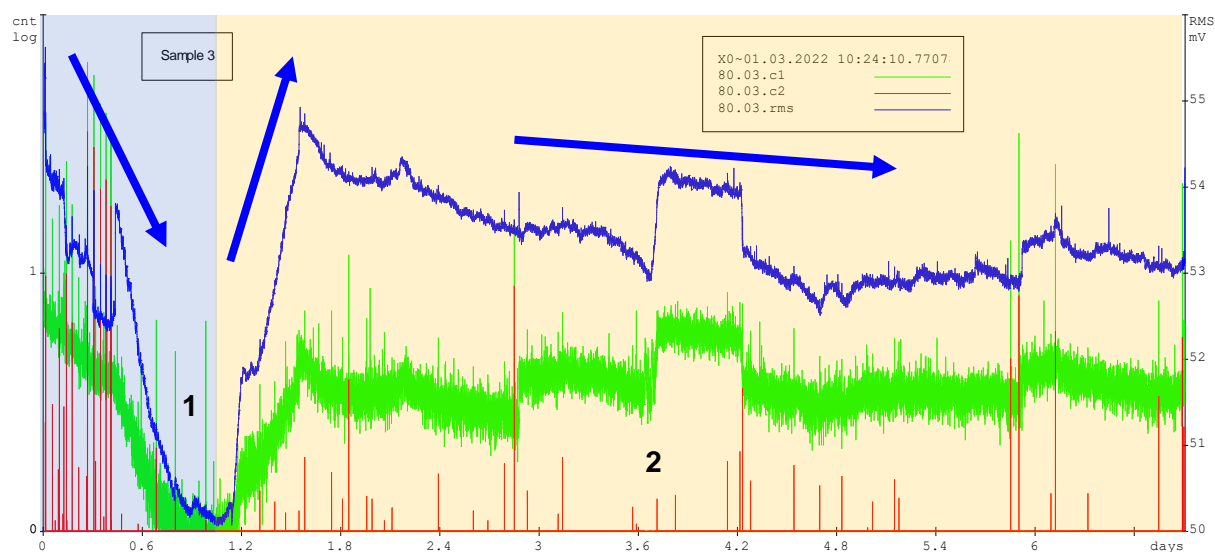
Obrázek č. 89: AE vzorku s protikorozní ochranou po prvních 7 dnech (snímač 3)

- **dalších 7 dní**

Na obrázku č. 90 je vyhodnocený grafický záznam akustické emise (AE) zkušebního vzorku 2 bez protikorozní ochrany po dalších 7 dnech měření.

Graf se vyznačuje krátkou první fází o délce 1 den, kterou lze délkou přirovnat k fázi 1 pro prvních 7 dní u nechráněných vzorků. Zde je ale naopak na konci prvního dne patrný výrazný pokles aktivity, téměř až k nulovým hodnotám u všech měřených parametřů. Pokles aktivity zřejmě značí dokončení procesu selektivního rozpouštění železa z předchozí fáze.

Ve druhé fázi nastává opět prudký nárůst aktivity u parametřů *RMS* a *count I*, který trvá asi půl dne. Ve zbývajícím čase aktivita pokračuje mírným rozvojem koroze s klesáním na hodnotách v řádech několika desítek jednotek, což je řádově méně než u nechráněných vzorků. Z pohledu metalografie stále nejsou na površích vzorků patrné projevy povrchové koroze.



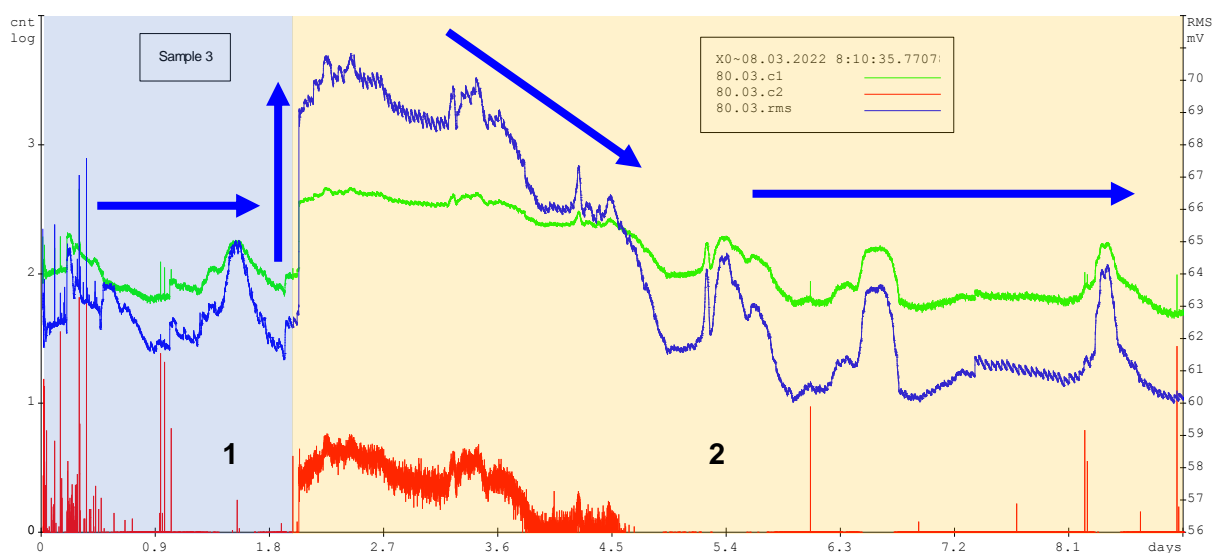
Obrázek č. 90: AE vzorku s protikorozní ochranou po dalších 7 dnech (snímač 3)

- **závěrečných 9 dní**

Závěrečných 9 dní zkoušky ukazuje graf na obrázku č. 91. Oproti nechráněným vzorkům se v této závěrečné etapě nachází fáze 1, která trvá asi 2 dny. Je zde vidět relativně stabilní aktivita postupného rozvoje koroze, která přechází z fáze 2 v předchozí etapě. Na přelomu fáze 1 a 2 dochází k vysokému skokovému nárůstu aktivity u všech měřených parametřů, což nejspíše naznačuje větší porušení ochranné vrstvy a vypuknutí koroze patrné i na površích vzorků.

Fáze 2 se po dobu prvních asi 2,5 dní vyznačuje vysokou aktivitou u všech měřených parametřů a následně nastává mírný pokles. V dalších dnech stále pokračuje aktivita v podobě náhlých poklesů a nárůstů v řádech stovek jednotek u parametru *RMS* a *count I*, která si udržuje relativně stabilní charakter. To lze připsat rozšiřování koroze a dalšímu narušování korozní ochrany.

Závěrečných 9 dní zkoušky u vzorků s korozní ochranou tedy ukázalo, že čím déle je zkušební vzorek s protikorozní ochranou vystaven zrychleným korozním zkouškám v kondenzační komoře, tím více je tato vrstva narušena a tím více a rychleji koroze prostupuje skrz vzorek. Prostupnost koroze skrz vzorek probíhá zejména na hranách či záhybech zkušebních vzorků. U metalografických záznamů již začíná být vidět místní koroze na površích vzorků.

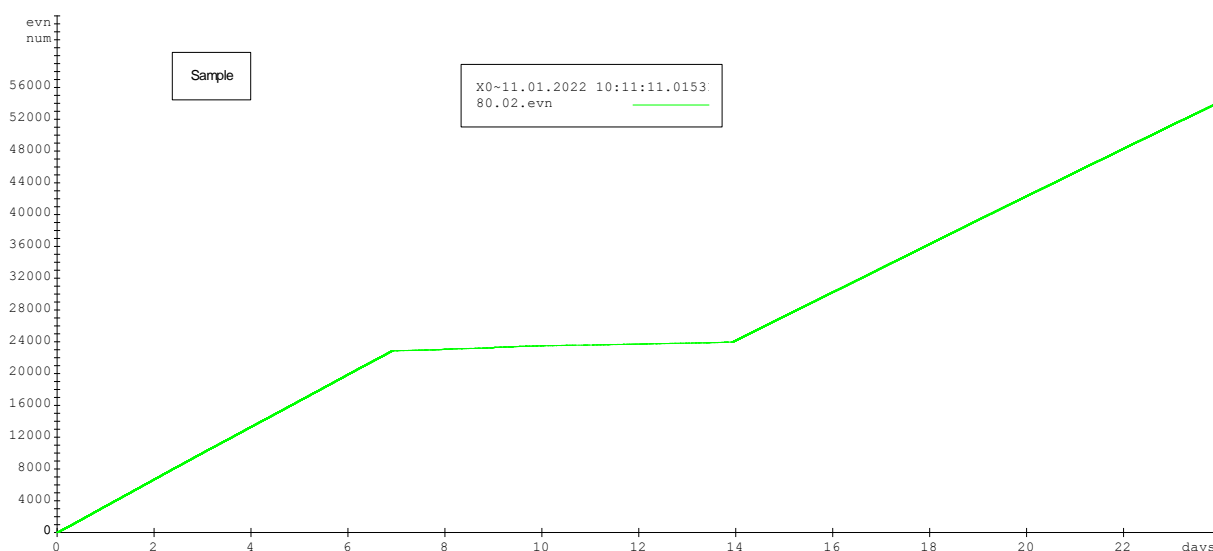


Obrázek č. 91: AE vzorku s protikorozní ochranou po závěrečných 9 dnech (snímač 3)

Počet událostí akustické emise

Pro zajímavost jsou níže uvedeny grafy týkající se počtu událostí akustické emise, kde lze opět porovnat vzorky bez korozní ochrany a s korozní ochranou.

Z grafu pro počet událostí u vzorků bez korozní ochrany, který je na obrázku č. 92 je patrné, že počet událostí AE je u těchto vzorků řádově v desetitisících a jsou poměrně ostře ohraničené jednotlivé fáze korozního procesu, kdy prvních 7 dní má křivka lineární průběh, dalších 7 dní nastává v podstatě konstantní průběh a závěrečná fáze se opět vyznačuje lineárním průběhem, avšak s o něco málo strmější směrnici.

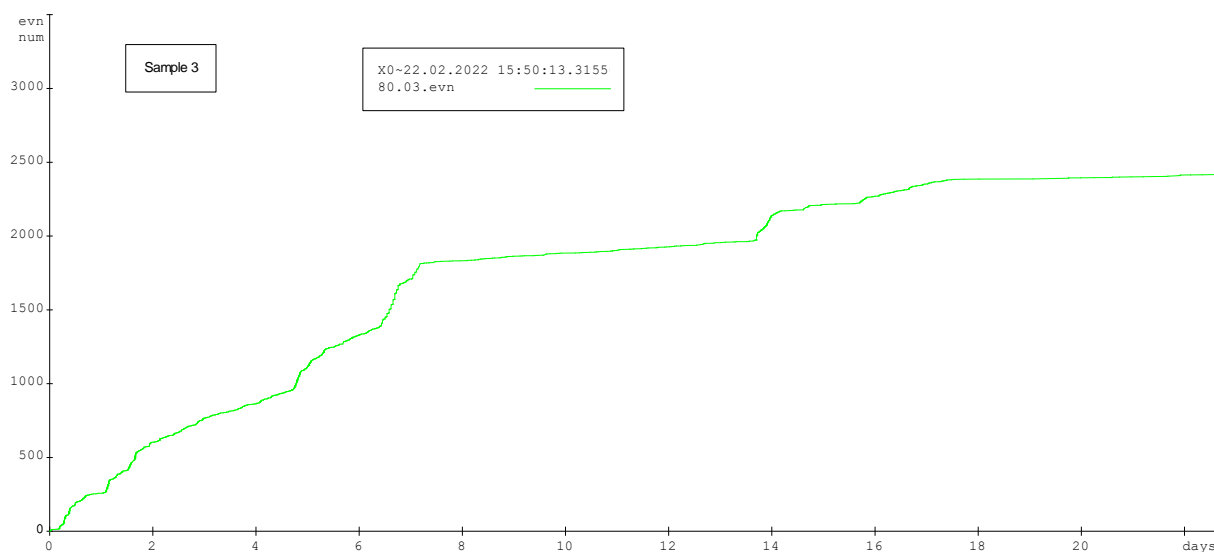


Obrázek č. 92: Počet událostí AE u zkušební vzorku bez protikorozní ochrany (snímač 2)

Z grafu pro počet událostí u vzorků s korozní ochranou, který je na obrázku č. 93, je patrné, že počet událostí AE je u těchto vzorků oproti předchozímu případu řádově pouze v tisících a původní poměrně ostře ohraničené jednotlivé fáze korozního procesu vykazují tvar poněkud jiný.

U prvních 7 dní má křivka charakter lineárního průběhu s drobnými odchylkami. Stejně jako v předchozím případě nastává pro dalších 7 dní v podstatě konstantní průběh (je zde patrnější mírný lineární nárůst z důvodu změny řádu jednotek). Závěrečná fáze se však

oproti nechráněným vzorkům nevyznačuje výrazným lineárním průběhem, ale pouze mírným lineárním se spíše konstantními prvky.



Obrázek č. 93: Počet událostí AE u zkušebního vzorku s protikorozní ochranou (snímač 3)

7.2.7 Shrnutí a vyhodnocení

Je zcela zřejmé, že u korozně nechráněných vzorků vystavených zrychleným korozním zkouškám v kondenzační komoře bude koroze postupně narůstat již od počáteční fáze korozní zkoušky. V poslední fázi cyklu je v grafu patrná pouze fáze číslo 2, která naznačuje závěrečný vývoj a postup koroze na vzorcích. Počet událostí v řádech desetitisíců ukazuje prudký lineární nárůst v etapě procesu 1 a 3 s relativně konstantní etapou 2, která může značit tvorbu „pasivační vrstvy“. Na metalografických snímcích je rovněž patrná koroze od prvního dne a je zdokumentován její postupný nárůst. U nechráněných vzorků tedy dochází ke „shodě“ mezi výsledky obou metod.

U korozně chráněných vzorků se již dvě použité metody zkoumání koroze poněkud rozcházejí. Co se týče počtu událostí akustické emise, u chráněných vzorků jsou hodnoty pouze v řádech tisíců. Navíc i zde v etapě 1 je možné nalézt poměrně lineární nárůst a etapa 2 opět vykazuje relativně konstantní průběh. Velký rozdíl nastává u etapy 3, která vykazuje spíše mírný až konstantní, než prudce lineární narůstající charakter. Zatímco akustická emise odhalila korozní aktivitu u chráněných vzorků již v první a druhé fázi, kdy se koroze může dostat pod chráněný povrch v místě jeho oslabení (tj. hrany nebo štěrbin) a následně se může šířit pod ochranným povrchem, u metalografie jsou korozní produkty na povrchu u chráněných vzorků vidět až v závěrečné fázi korozní zkoušky.

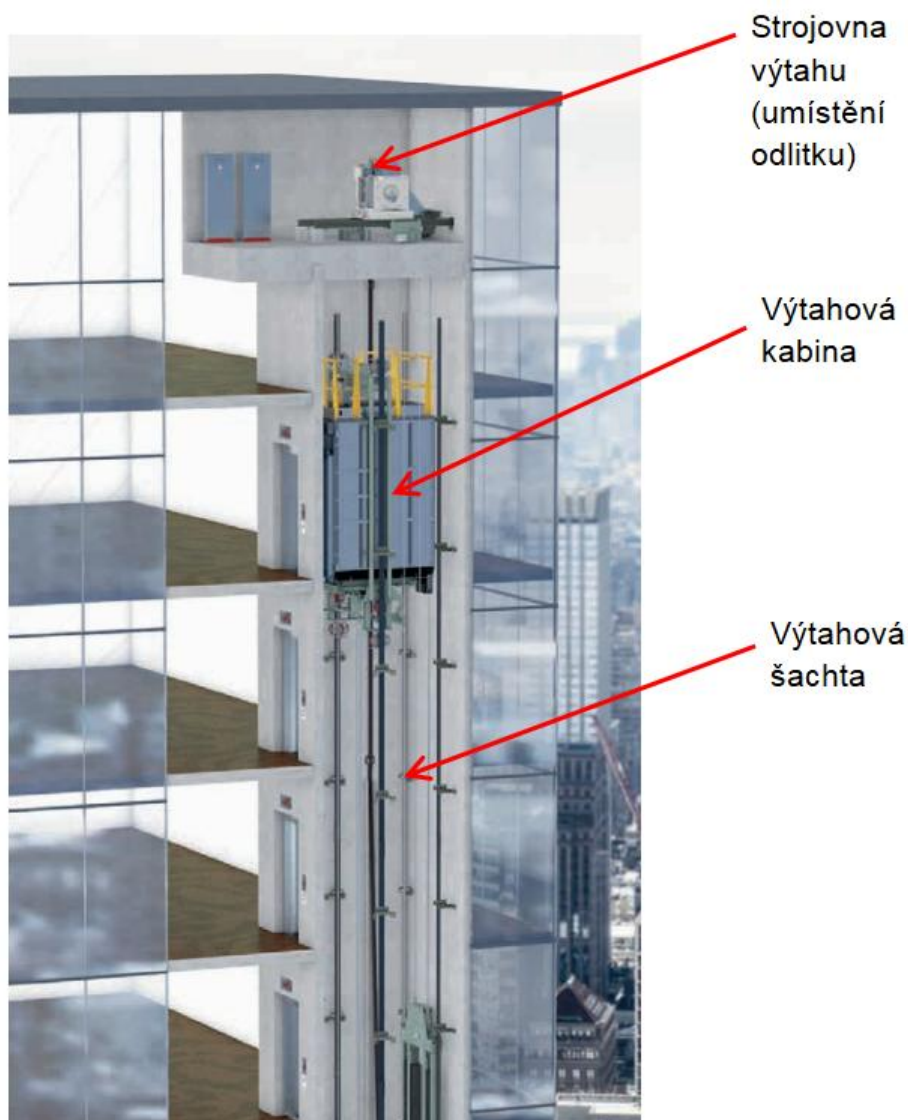
Z metalografie však vyplynuly ještě další zajímavé závěry týkající se korozního napadení, které akustická emise nedokázala zaznamenat. Jedná se o rozdílný postup koroze na površích vzorků, kde bylo umístěno čidlo AE, s povrchy zcela nechráněnými.

8 MOŽNÉ VYUŽITÍ VZORKŮ

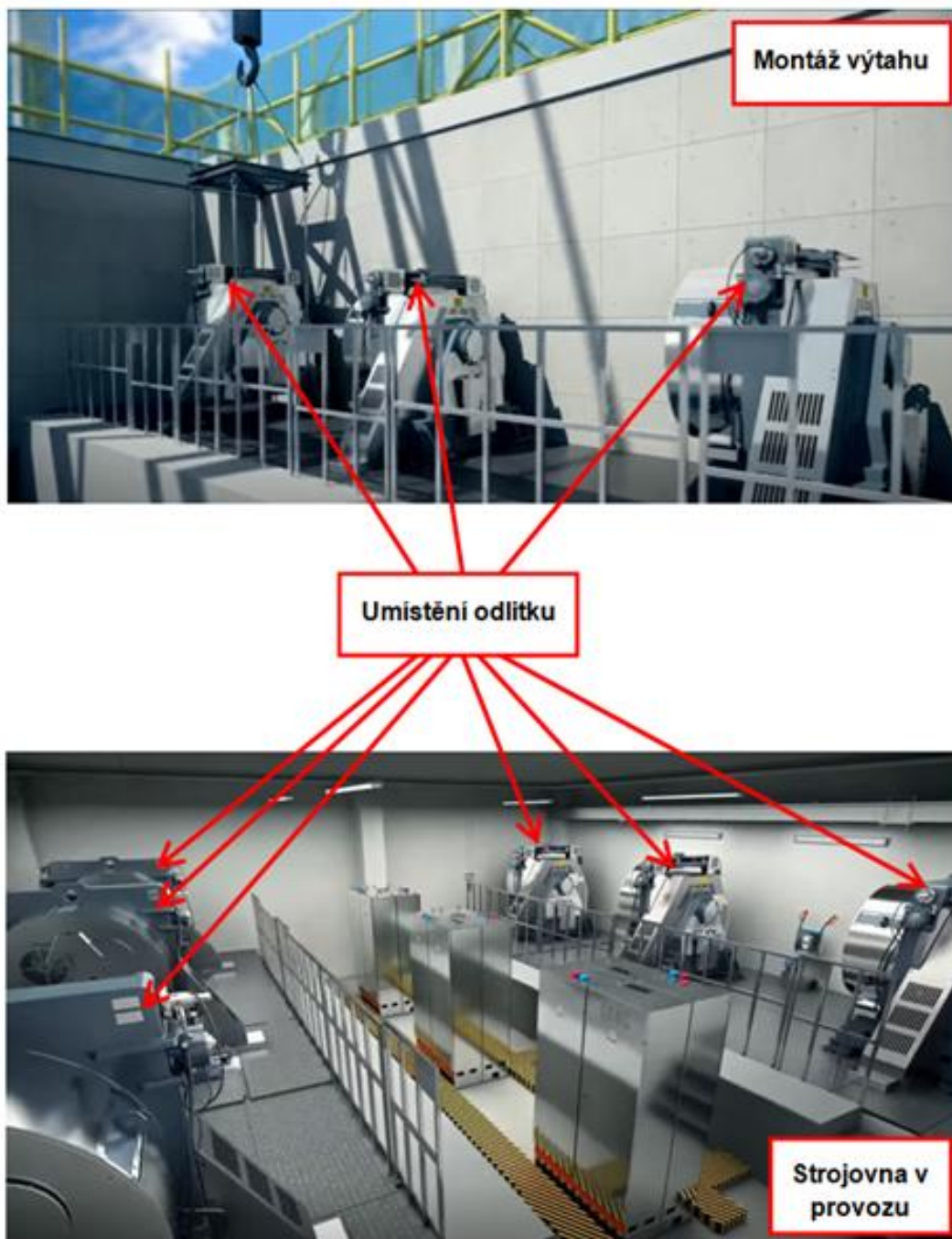
Vybraný materiál, šedou litinu o daném složení, je možné kupříkladu využít při konstrukci opěrných částí výtahů ve výškových budovách. Konkrétně jej lze nalézt jako odlitek sloužící jako kostra (tj. jedna z více zatížených opěr), ve které je uložena lanovnice. Vzhled a tvar tohoto odlitku je znázorněn na obrázku č. 97 níže ve formě 3D modelu z programu SolidWorks [47], [48].

8.1 Umístění materiálu

Vzhledem k tomu, že se výtahy dodávají do různých zemí po celém světě, lze i přes ochranu nátěrem a umístění v uzavřené strojovně předpokládat působení různých klimatických podmínek (teplo, chladno, vlhkost apod.). Umístění odlitku v sestavě výtahu je vidět na fotografii na obrázku č. 94 a detail strojovny pak na fotografiích na obrázku č. 95 [47], [49].

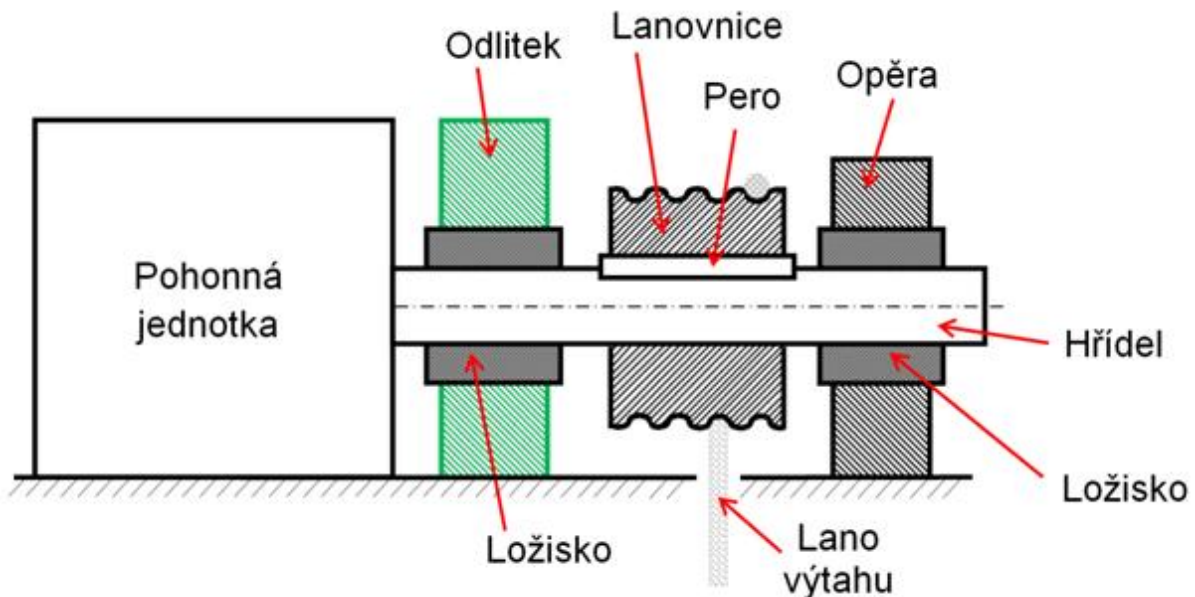


Obrázek č. 94: Sestava výtahové šachty [49]



Obrázek č. 95: Detail strojovny výtahu (nahore stavba, dole v provozu) [47]

Na základě dostupných informací bylo rovněž vytvořeno orientační zjednodušené schéma uložení daného odlitku, který slouží jako jedna z opěr a je na obrázku č. 96 vyznačen zelenou barvou.

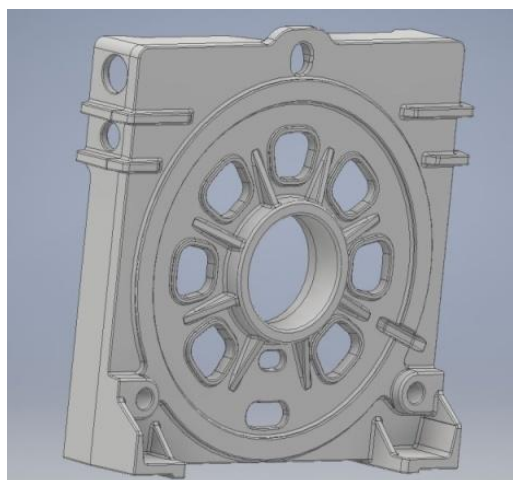


Obrázek č. 96: Zjednodušené schéma uložení odlitku v sestavě [47]

8.2 Výpočet ceny nátěru

Vzhledem k tomu, že měření prokázalo jasné zpomalení nástupu koroze v materiálu u nátěru s inhibitory koroze, bylo by vhodné uvést alespoň základní představu o ceně nanesení vybraného nátěru. Přesné rozměry nejsou veřejně dostupnou informací, protože se jedná o know-how každé konkrétní výrobní firmy.

K dispozici byly pouze přibližné hodnoty rozměrů a výpočet plochy odlitku z programu SolidWorks, který činí 5,2 mil. mm² (tj. 5,2 m²). Na základě této hodnoty, hodnot teoretické spotřeby (5–6 m² na litr barvy) při doporučené tloušťce nátěru (75 μm) z prospektu výrobce a přibližné ceny za 1 litr nátěru dle výrobcova ceníku (cca 350,- Kč/litr) byla vypočítána průměrná cena nanesení barvy pro 1 kus odlitku. Jednoduchou matematikou lze dojít k závěru 350,- Kč za jeden natřený kus odlitku.



Obrázek č. 97: Vzhled a tvar odlitku opěrné části konstrukce [47]

ZÁVĚR

První kapitola se věnuje fyzikálnímu pojmu akustické emise a jeho vzniku včetně zmínky o názvosloví dle normy ČSN EN 1330-9 o terminologii akustické emise. Dále jsou zde popsány základní pojmy a princip metody akustické emise, důležité jevy doprovázející akustickou emisí, základní rozdělení signálů AE, průběh měření a jeho fáze, vyhodnocování a základní zdroje akustické emise včetně rušivých zdrojů a závěr kapitoly tvoří výhody a nevýhody této moderní nedestruktivní metody. Metoda akustické emise poskytuje přehled o stavu materiálů monitorováním v reálném čase a indikuje pouze takové defekty, které jsou nejnebezpečnější pro dané podmínky zatížení. Lze ji vhodně doplnit pomocí dalších metod zkoušení, jež pak postačuje směřovat do problémových oblastí s detekovanými emisními zdroji. Tato metoda sama o sobě nedokáže detekovat statické a neaktivní defekty, protože se neprojevují žádným akustickým signálem. Vzhledem k tomu, že postupující aktivita defektů je nevratný děj, zkoušku nelze opakovat. Měření akustické emise postupujících degradačních dějů v materiálu je velmi přesné a přínosné, aplikace by měla probíhat zejména u materiálů pro náročné aplikace.

Druhá část práce je věnována různým druhům koroze v kovových materiálech, které jsou rozděleny dle vnitřního mechanismu a druhu chemické reakce (chemická, elektrochemická), dle působícího prostředí (atmosférická, v kapalinách a půdě), dle vlivu vnějších činitelů a fyzikálních podmínek (mechanické namáhání, únava, vibrace, korozní praskání, a koroze bludnými proudy), dle jejího vzhledu (rovnoměrná, nerovnoměrná) a dle typu nerovnoměrného napadení materiálu (bodová, selektivní, mezikrystalová a transkrystalová, a také štěrbinová).

Třetí kapitola ve zkratce popisuje druhy korozní ochrany kovových materiálů. Z těch lze jmenovat legování a tepelné zpracování, ovlivnění konstrukce a snížení agresivity prostředí, kovové, keramické a plastové povlaky, smalty a nátěrové hmoty. Jako korozní ochranu lze vnímat i různé výrobky (prášky, obaly, aditiva nebo nátěry) s inhibitory koroze, které mají za úkol snižovat korozní rychlost.

Další kapitola navazuje na dvě předchozí v podobě přehledu korozních zkoušek. Postupuje od nejzákladnější vizuální zkoušky, přes zkoušku ultrazvukem, až ke zkoušce v solné a kondenzační komoře, která je i součástí experimentálního měření.

Pátá část se věnuje praktickému využití metody akustické emise u koroze různých kovových materiálů prostřednictvím vybraných příkladů z vědeckých experimentů a článků. Kapitola je rozdělena na sekci automobilového a leteckého průmyslu (hliník, hořčík a litina), výrobního a potravinářského průmyslu (speciální oceli a nerezové oceli) a stavebnictví (železobetonové trubky a konstrukce).

Předposlední kapitolu tvoří experimentální část. Je zde popsán vybraný materiál ke zkoušení (šedá litina, GJL-300), jeho charakteristiky a mechanismy vzniku koroze. Dále je věnováno několik odstavců postupu přípravy vzorků soustružením a řezáním z opískovaného odlitého polotovaru. Takto bylo zhotoveno 6 sad vzorků po 3 kusech (3 sady pro zkoušení nechráněných vzorků a 3 sady pro vzorky opatřené ochranným nátěrem) a jedna sada referenčních vzorků pro porovnávání původních vlastností. Zkoušení vzorků probíhalo kontinuálně po dobu 168, 336 a 576 (resp. 552) hodin při 100% vlhkosti a teplotě 50 °C. Nechybí zde ani popis a vlastnosti vybraného nátěru včetně aplikace pro korozní zkoušku, ani popis a základní charakteristiky vybrané kondenzační komory. Následuje chemické složení daného materiálu a hodnocení drsnosti obráběných ploch na výškovém parametru Ra.

Další částí kapitoly je metalografická analýza, která je rozdělena nejen podle ochrany povrchu vzorků (s nátěrem a bez nátěru), ale i podle druhu jejich ploch (kruhová – čelní a válcová – boční). Zároveň je doplněna statistickými údaji z porovnávání zjištěných vlastností testovaných vzorků. Z analýzy vyplynulo, že dle předpokladů ochranný nátěr výrazně chránil povrch vzorků. Po 168 ani 336 hodinách v kondenzační komoře nedošlo ke koroznímu napadení povrchu a po 552 hodinách bylo korozní napadení výrazně nižší a méně hluboko než u nechráněných vzorků. Při aplikaci barvy nebo jejím schnutí však zřejmě došlo k pochybení, a tak nebyla před startem zkoušky zcela vytvrzená. Z časových důvodů nebylo možné zkoušku dále odkládat, takže účinek její korozní ochrany byl oproti dostupným datům od výrobce výrazně snížen. Ještě je vhodné uvést, že povrch s umístěným čidlem akustické emise byl u nechráněných vzorků více chráněn než volná plocha vzorků. Drobnou zajímavostí je, že u barvou natřených vzorků se naopak na ploše vzorku s umístěným čidlem vyskytovalo více korozních produktů než u volné plochy. Vzhledem k ne zcela vytvrzenému nátěru byla zřejmě jeho vrstva poškozena při upevňování čidla AE.

Závěrečnou částí této kapitoly je měření akustické emise při kontinuálním korozním působení v kondenzační komoře po dobu 576 hodin u nechráněných vzorků a 552 hodin u vzorků s ochranným nátěrem. Vyhodnocování probíhalo po každém týdnu (etapa 1, 2 a 3) u obou skupin vzorků. U nechráněných vzorků signály AE ukázaly postupný nárůst koroze již od počáteční fáze. Počet událostí AE byl v řádech desetitisíců, což značí prudký nárůst korozní vrstvy po prvním týdnu a v závěrečné části experimentu. Ve druhém týdnu byly zaznamenány relativně konstantní hodnoty, které mohou značit jistou pasivaci materiálu před rozvojem další koroze. U chráněných vzorků jsou hodnoty akustické emise pouze v řádu tisíců s mírným lineárním nárůstem po prvním týdnu korozní zkoušky. Druhá etapa je opět relativně konstantní jako v předchozím případě. V závěrečné etapě zkoušky se průběh liší poměrně výrazně - oproti předchozímu měření vykazuje mírně narůstající charakter. Akustická emise odhalila korozní aktivitu u chráněných vzorků již ve fázi 1 (potažmo 2), zatímco u metalografie byla koroze vidět až ve třetí fázi. To znamená, že koroze mohla vniknout pod chráněný povrch v místě jeho oslabení a následně se pod tímto povrchem šířit. Nicméně i akustická emise odhalila výrazné změny u chráněných a nechráněných vzorků ve prospěch těch s korozní ochranou.

Poslední kapitola této práce je věnována možnému využití zkoušeného materiálu. Literatura uvádí jako možné využití například konstrukce opěrných částí lanovnic výtahů na výškových budovách, které jsou zhotovené z odlitků šedé litiny. V kapitole je ukázán příklad umístění takového odlitku na fotografiích a na zjednodušeném schématu uložení je vyznačen zelenou barvou. Z 3D modelu odlitku byla zjištěna přibližná plocha, na kterou je nutné aplikovat barvu. Přibližná cena nátěru byla zjištěna z ceníku výše zmíněného distributora ochranných nátěrů a doporučená vrstva z příslušného prospektu. Na základě těchto údajů bylo možné vypočítat orientační cenu nátěru jednoho kusu daného odlitku. U větších sérií a balení lze předpokládat výraznější množstevní slevy.

Co se týče dalšího výzkumu, bylo by zajímavé kupříkladu porovnat zde testovanou litinu s původně zamýšlenou více korozně odolnou variantou litiny legovanou chromem, případně se pokusit zjistit, jaký vliv by měl tvar grafitu (např. kuličkový vs. lupínkový) na korozní odolnost litiny. Dále je možné do testování zapojit další mechanické zkoušky (např. tahovou nebo vrubovou houževnatost), a jak jejich výstupy ovlivní koroze dané litiny. Dnes se rovněž využívají elektrochemické zkoušky, které by bylo možné rovněž přidat k prováděným experimentům.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1: Schéma hitu signálu akustické emise [5]	14
Obrázek č. 2: Projevy signálů akustické emise [2]	14
Obrázek č. 3: Spojitá akustická emise [5]	15
Obrázek č. 4: Nespojité signály akustické emise [5].....	16
Obrázek č. 5: Průběh měření akustické emise (přenosová trasa je A-B-C-D-E) [2].....	17
Obrázek č. 6: Měřicí síť akustické emise [2]	17
Obrázek č. 7: Schéma rozložení bludných proudů u elektrické dráhy [8]	22
Obrázek č. 8: Schémata nerovnoměrných druhů koroze [8]	23
Obrázek č. 9: Princip vzniku ochranné vrstvy pomocí inhibitorů VpCI [34]	28
Obrázek č. 10: Kondenzační komora Elcometer [19]	31
Obrázek č. 11: Solná korozní komora Ascott Atmosfär [20].....	32
Obrázek č. 12: Systém pro měření akustickou emisí a elektrochemického šumu [21].....	34
Obrázek č. 13: Výstup měření akustické emise a elektrochemického šumu [21].....	34
Obrázek č. 14: Korozní poškození vzorků při korozní zkoušce [22].....	35
Obrázek č. 15: Průběh překmitů přes prahovou úroveň count 1 v čase [22]	35
Obrázek č. 16: Průběh signálů akustické emise koroze tlakové láhve [24]	37
Obrázek č. 17: Schéma polarizačního článku [25].....	38
Obrázek č. 18: Signály kumulativních hitů a countů AE s polarizační křivkou [25].....	38
Obrázek č. 19: Typické signály AE ve fázi 2 a 3 [25]	38
Obrázek č. 20: Rozvoj koroze ve fázi 2 [25].....	39
Obrázek č. 21: Orientace a rozměry vzorku (ocel 15 128.5) [26].....	39
Obrázek č. 22: 3pozicový stroj pro creepovou zkoušku Zst 2/3 [26].....	40
Obrázek č. 23: Průběh akustické emise při creepovém testu na vzorku č. 18 [26].....	40
Obrázek č. 24: Histogram hitů akustické emise [26]	41
Obrázek č. 25: Kumulativní energie hitů vzorku č. 18 [26].....	41
Obrázek č. 26: Detekované poškození vzorku [26]	42
Obrázek č. 27: Pilíře s různými zónami v mořském prostředí [27]	42
Obrázek č. 28: Umístění snímačů a měřicí zařízení AE [27].....	43
Obrázek č. 29: Průběhy zkoušky u pilířů A a B zaznamenané senzory č. 2 [27]	43
Obrázek č. 30: Schéma zapojení betonové trubky pro měření AE [28].....	44
Obrázek č. 31: Průběh energie AE při změnách tlaku v čase [28].....	44
Obrázek č. 32: Korozní stav spirálových tyčí [28].....	44
Obrázek č. 33: 1D a 3D konfigurace lepení čidel AE [29]	45
Obrázek č. 34: Sestava pro zkoušení s 1D konfigurací senzorů AE [29]	45
Obrázek č. 35: 3 roviny mikro-CT řezů vzorkem [29]	46
Obrázek č. 36: Řez AA [29].....	46
Obrázek č. 37: Vyhodnocení měření v průběhu času [29].....	46
Obrázek č. 38: Schéma vzniku perlitu [31].....	50
Obrázek č. 39: Lupínky grafitu [40].....	51
Obrázek č. 40: Standardní perlitická LLG [41].....	51
Obrázek č. 41: Pórovitá struktura grafitické koroze (spongiózy) šedé litiny [50]	53
Obrázek č. 42: Schéma postupu experimentu [vlastní tvorba].....	54
Obrázek č. 43: Původní opískovaný vzorek materiálu [vlastní foto]	55
Obrázek č. 44: Vzorek materiálu po obrábění na soustruhu [vlastní foto].....	55

Obrázek č. 45: Připravené vzorky pro korozní zkoušku [vlastní foto]	56
Obrázek č. 46: Přípravek pro umístování vzorků do kondenzační komory	56
Obrázek č. 47: Vzorky umístěné v kondenzační komoře [vlastní foto].....	57
Obrázek č. 48: 3D optický laserový skenovací mikroskop Olympus Lext OLS4100 [vlastní foto]	59
Obrázek č. 49: 3D snímek povrchu kruhové plochy (čela) referenčního vzorku [vlastní zdroj]	60
Obrázek č. 50: 3D snímek válcové plochy (boku) referenčního vzorku [vlastní zdroj]	61
Obrázek č. 51: Povrchová struktura vzorků (kruhová plocha vlevo, bok vpravo) [vlastní foto]	63
Obrázek č. 52: Povrch referenčního vzorku 0 na válcové ploše (obvodu)	63
Obrázek č. 53: Povrch referenčního vzorku 0 na válcové ploše (obvodu)	64
Obrázek č. 54: Povrch referenčního vzorku 0 na kruhové ploše (čele)	64
Obrázek č. 55: Povrch referenčního vzorku 0 na kruhové ploše (čele)	65
Obrázek č. 56: Povrch obvodu (boku) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1-o)	66
Obrázek č. 57: Povrch obvodu (boku) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1-o)	66
Obrázek č. 58: Povrch obvodu (boku) vzorku po 14denní expozici (ozn. 3-o)	67
Obrázek č. 59: Povrch obvodu (boku) vzorku po 14denní expozici (ozn. 3-o)	67
Obrázek č. 60: Povrch obvodu (boku) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-o)	68
Obrázek č. 61: Povrch obvodu (boku) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-o)	68
Obrázek č. 62: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1N-o).....	69
Obrázek č. 63: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1N-o).....	69
Obrázek č. 64: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 14denní expozici (ozn. 2N-o)....	70
Obrázek č. 65: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 14denní expozici (ozn. 2N-o)....	70
Obrázek č. 66: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 23denní expozici (ozn. 3N-o)....	71
Obrázek č. 67: Chráněný povrch obvodu (boku) vzorku po 23denní expozici (ozn. 3N-o)....	71
Obrázek č. 68: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1-p).....	72
Obrázek č. 69: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1-p).....	72
Obrázek č. 70: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1-p).....	73
Obrázek č. 71: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 14denní expozici (ozn. 3-p).....	73
Obrázek č. 72: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 14denní expozici (ozn. 3-p).....	74
Obrázek č. 73: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 14denní expozici (ozn. 3-p).....	74
Obrázek č. 74: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-p).....	75
Obrázek č. 75: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-p).....	75
Obrázek č. 76: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-p).....	76
Obrázek č. 77: Povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 24denní expozici (ozn. 2-p).....	76
Obrázek č. 78: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1N-p).....	77
Obrázek č. 79: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 7denní expozici (ozn. 1N-p).....	77
Obrázek č. 80: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 14denní expozici (ozn. 2N-p).....	78
Obrázek č. 81: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 14denní expozici (ozn. 2N-p).....	78
Obrázek č. 82: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 23denní expozici (ozn. 3N-p).....	79

Obrázek č. 83: Chráněný povrch kruhové plochy (čela) vzorku po 23denní expozici (ozn. 3N-p).....	79
Obrázek č. 84: Systém pro měření akustické emise Dakel Xedo.....	84
Obrázek č. 85: Konfigurace a nastavení měřicího systému AE.....	85
Obrázek č. 86: AE vzorku bez protikorozní ochrany po prvních 7 dnech (snímač 2).....	86
Obrázek č. 87: AE vzorku bez protikorozní ochrany po dalších 7 dnech (snímač 2).....	87
Obrázek č. 88: AE vzorku bez protikorozní ochrany po závěrečných 10 dnech (snímač 2) ...	88
Obrázek č. 89: AE vzorku s protikorozní ochranou po prvních 7 dnech (snímač 3).....	88
Obrázek č. 90: AE vzorku s protikorozní ochranou po dalších 7 dnech (snímač 3).....	89
Obrázek č. 91: AE vzorku s protikorozní ochranou po závěrečných 9 dnech (snímač 3).....	90
Obrázek č. 92: Počet událostí AE u zkušební vzorku bez protikorozní ochrany (snímač 2).....	90
Obrázek č. 93: Počet událostí AE u zkušební vzorku s protikorozní ochranou (snímač 3).....	91
Obrázek č. 94: Sestava výtahové šachty [49].....	92
Obrázek č. 95: Detail strojovny výtahu (nahore stavba, dole v provozu) [47].....	93
Obrázek č. 96: Zjednodušené schéma uložení odlitku v sestavě [47].....	94
Obrázek č. 97: Vzhled a tvar odlitku opěrné části konstrukce [47].....	94

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1: Chemické složení dané litiny [23].....	36
Tabulka č. 2: Mechanické charakteristiky litiny GJL-300 dle normy ČSN EN 1561 [42].....	53
Tabulka č. 3: Základní vlastnosti vybraného nátěru VpCI-368D [33].....	57
Tabulka č. 4: Chemické složení vybrané litiny GJL-300.....	58
Tabulka č. 5: Legující prvky vybrané litiny GJL-300.....	58
Tabulka č. 6: Průměrné hodnoty výškového parametru Ra na měřených plochách (v μm)	60
Tabulka č. 7: Hloubka koroze u problematických míst na obvodu vzorku.....	80
Tabulka č. 8: Hloubka koroze u problematických míst na volné ploše vzorku.....	80
Tabulka č. 9: Hloubka koroze u problematických míst na čidlem chráněné ploše vzorku.....	81
Tabulka č. 10: Statistický rozdíl problematických míst na obvodu vzorků bez nátěru a s nátěrem.....	82
Tabulka č. 11: Statistický rozdíl problematických míst na volné ploše vzorků bez nátěru a s nátěrem.....	82

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Výroba a technologie – Trendy / Měření: Diagnostika metodou akustické emise. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 12. 06. 2002, (6) [cit. 2021-4-27]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/diagnostika-metodou-akusticke-emise>
2. KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
3. KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.
4. ČSN EN 1330-9: *Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Část 9: Termíny používané při zkoušení akustickou emisí*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
5. ŠOFER, Michal. *Přednáška č. 1: Metoda akustické emise* [online]. Ostrava-Poruba: VŠB-TUO FS – Katedra aplikované mechaniky [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <http://michalsofer.cz/files/EMvM/p11.pdf>
6. Akustická emise (AE). *Středisko technické diagnostiky – DAKEL* [online]. Zemědělské družstvo Rpety se sídlem ve Rpetech, 2021 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.dakel.cz/index.php?pg=ae>
7. ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4., rozš. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 978-80-7300-190-2.
8. HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. *Strojírenská technologie 2*. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-245-6.
9. VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.
10. Strojírenství: Druhy koroze dle vnějších činitelů. *Studentske.cz: Vše co student potřebuje vědět* [online]. [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/druhy-koroze-dle-vnjch-initel.html>
11. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
12. NOVÁK, P. Věda a výzkum: Druhy koroze kovů [online]. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra materiálu: Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KPU/koroze%20druhy%20vscht.PDF
13. KOUDELKA, Ctírad. *Bludné proudy* [online]. Ostrava-Poruba: VŠB-TUO FEI – Katedra obecné elektrotechniky [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/TZB/bludne_proudy.pdf
14. ROHANOVÁ, Dana. Koroze a degradace skel. In: *DOCPLAYER* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Ústav skla a keramiky [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12127952-2-2-koroze-a-degradace-skel.html>

15. KLOUŽKOVÁ, Alexandra. Korozie a degradace keramiky. In: *DOCPLAYER* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Ústav skla a keramiky [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6116772-2-3-korozie-a-degradace-keramiky.html>
16. ČSN EN ISO 8501-1: Příprava ocelových podkladů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků. Vizuální vyhodnocení čistoty povrchu. Část 1: Stupně zarezavění a stupně přípravy ocelového podkladu bez povlaku a ocelového podkladu po úplném odstranění předchozích povlaků. Český normalizační institut, 2007.
17. HRUŠOVSKÝ, Karel. Urychlené korozní zkoušky [online]. VŠCHT Praha – Technopark Kralupy, 2018 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.technopark-kralupy.cz/korozni-zkousky>
18. VALEŠ, Miroslav. Výzkum, vývoj a inovace, Výroba a technologie – Povrchové úpravy / Normy a měření: Zkoušení povrchových úprav a ochran. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 13. 04. 2011 [cit. 2021-4-27]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zkouseni-povrchovych-uprav-a-ochran>
19. Kondenzační komora Elcometer 1200. *Gamin* [online]. Omega Design, 2021 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: https://www.gamin.cz/fileadmin/user_upload/Elcometer_1200_01.pdf
20. Korozní komora Ascott Atmosfär. *Gamin* [online]. Omega Design, 2021 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: https://www.gamin.cz/fileadmin/user_upload/AA_AtmosfarLite.pdf
21. ZHEN, Zhang, Zhao ZHANYONG, Bai PEIKANG, Li XIAOFENG, Liu BIN a Wu XINQIANG. In-situ monitoring of pitting corrosion of AZ31 magnesium alloy by combining electrochemical noise and acoustic emission techniques. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2021, 13. 05. 2021, (878), 7 [cit. 2021-12-25]. ISSN 0925-8388. Dostupné z: doi:160334
22. KOBER, Jan a Zdeněk PŘEVOROVSKÝ. Hodnocení průběhu korozního poškození metodami akustické emise a nelineární ultrazvukové spektroskopie. *Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT: Ústav termomechaniky AV ČR* [online]. NDE for Safety / DEFEKTOSKOPIE 2011, Harmony Club Hotel, Ostrava – Czech Republic: Czech Society for Nondestructive Testing, 2011 [cit. 2021-4-28].
23. BINAR, Tomáš, Jiří ŠVARC, Petr DOSTÁL, Michal ŠUSTR a Jan TIPPNER. The Spread of Corrosion in Cast Iron and its Effect on the Life Cycle of Transportation Vehicle. *ACTA UNIVERSITATIS AGRICULTURAE ET SILVICULTURAE MENDELIANAE BRUNENSIS* [online]. Brno, 2017, 65(2), 383-389 [cit. 2021-12-25]. ISSN 0925-8388. Dostupné z: doi:10.11118/actaun201765020383
24. ŠOFER, Michal. *Přednáška č. 1: Metoda akustické emise* [online]. Ostrava-Poruba: VŠB-TUO FS – Katedra aplikované mechaniky [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: <http://michalsofer.cz/files/EMvM/p11.pdf>
25. WU, Kaige a Jae-Yeon KIM. Acoustic emission monitoring during open-morphological pitting corrosion of 304 stainless steel passivated in dilute nitric acid. *Corrosion Science* [online]. ScienceDirect (Elsevier B.V.), 2021, (Volume 180) [cit. 2021-12-25]. ISSN 0010-938X. Dostupné z: doi:109224
26. NOHÁL, Libor, Pavel MAZAL, František VLAŠIC a Marie SVOBODOVÁ. Acoustic Emission Response to Erosion-Corrosion and Creep Damage in Pipeline Systems. *Procedia Structural Integrity* [online]. Brno, 2019, 19. 02. 2020, (23), 227-232 [cit. 2021-12-25]. ISSN 2452-3216. Dostupné z: doi:10.1016/j.prostr.2020.01.091

27. ZHENG, Yonglai, Yujue ZHOU, Yubao ZHOU, Tanbo PAN, Limin SUN a Don LIU. Localized corrosion induced damage monitoring of large-scale RC piles using acoustic emission technique in the marine environment. *Construction and Building Materials* [online]. ScienceDirect (Elsevier B.V.), 2020, (Volume 243) [cit. 2021-12-25]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:118270
28. GOLDARAN, Reza, Ahmet TURER, Mehdi KOUHDARAGH a Kezban OZLUTAS. Identification of corrosion in a prestressed concrete pipe utilizing acoustic emission technique. *Construction and Building Materials* [online]. ScienceDirect (Elsevier B.V.), 2020, (Volume 242) [cit. 2021-12-25]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:118053
29. VAN STEEN, Charlotte, Lotfollah PAHLAVAN, Martine WEVERS a Els VERSTRYNGE. Localisation and characterisation of corrosion damage in reinforced concrete by means of acoustic emission and X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, 10. 02. 2019, (197), 21-29 [cit. 2021-12-25]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.159
30. KUBÍČEK, Jaroslav. RENOVACE A POVRCHOVÉ ÚPRAVY. *FSI UST: Ústav strojírenské technologie, odbor svařování a povrchových úprav* [online]. VUT v Brně, 11. 12. 2006 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hrp_renovace_a_povrchove_upravy_kubicek.pdf
31. Rejstřík pojmů: Inhibitor. *Národní zdravotnický informační portál* [online]. Praha: Ministerstvo zdravotnictví ČR a Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR, 2022 [cit. 2022-05-14]. ISSN 2695-0340. Dostupné z: <https://www.nzip.cz/rejstrikovy-pojem/1911>
32. Inhibitory koroze kovů. *VŠCHT Praha: Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství* [online]. Praha, 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://1url.cz/UrKSj>
33. Vysoce účinné VpCI nátěry: VpCI-368, 368D. *Cortec Corporation: Minnesota (USA)* [prospekt]. Brno - Černovice: TART, s.r.o. [cit. 2022-05-14].
34. Divize antikoročních materiálů Cortec: Katalog. *Cortec Corporation* [online]. Brno - Černovice: TART [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.cortecvci.cz/docs/katalog-Cortec-CZ-2018.pdf>
35. ČSN EN ISO 8501-1: Příprava ocelových podkladů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků. *Vizuální vyhodnocení čistoty povrchu. Část 1: Stupně zarezavění a stupně přípravy ocelového podkladu bez povlaku a ocelového podkladu po úplném odstranění předchozích povlaků*. Český normalizační institut, 2007.
36. XU, Jian, Xinqiang WU a En-Hou HAN. Acoustic emission response of sensitized 304 stainless steel during intergranular corrosion and stress corrosion cracking: Katalog. *Corrosion Science* [online]. Elsevier, 2013, 17. 4. 2013, 2013(73), 262-273 [cit. 2022-05-14]. ISSN 0010-938X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.corsci.2013.04.014
37. FERRER, F., H. IDRISSE, H. MAZILLE, P. FLEISCHMANN a P. LABEEUW. A study of abrasion–corrosion of AISI 304L austenitic stainless steel in saline solution using acoustic emission technique: Katalog. *NDT & E International* [online]. Elsevier, 2013, 14. 12. 1999, 2000(33), 351-438 [cit. 2022-05-14]. ISSN 0963-8695. Dostupné z: doi:10.1016/S0963-8695(99)00061-4
38. WU, Kaige, Kaita ITO, Ippei SHINOZAKI, Pornthep CHIVAVIBUL a Manabu ENOKI. A Comparative Study of Localized Corrosion and Stress Corrosion Cracking of 13Cr

- Martensitic Stainless Steel Using Acoustic Emission and X-ray Computed Tomography. *Materials* [online]. Basel, Switzerland: MDPI, 2019, 12. 8. 2019, **16**(12), 351-438 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: doi:10.3390/ma12162569
39. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
40. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno. Přepřacovaný učební text.
41. ODEHNALOVÁ, D. *Litiny* [přednáška]. In: . s. 46 [cit. 2021-12-26].
42. ICS 77.080.10. ČSN EN 1561 (420953): *Slévárství - Litiny s lupínkovým grafitem*. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2012.
43. Laboratoře - Produkty - Korozní komory LIEBISCH: ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ KOMOR LIEBISCH. *LABIMEX CZ* [online]. Praha [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://labimexcz.cz/laboratore/produkty/korozni-komory-liebisch/zakladni-rozdeleni-komor-liebisch/>
44. ČSN EN ISO 4287: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 03/1999. Praha: Český normalizační institut, 1999.
45. *Systém akustické emise DAKEL: XEDO - Daemon* [online]. [cit. 2021-12-26]. Informace a návod k použití.
46. *Systém akustické emise DAKEL: XEDO - DaeShow* [online]. [cit. 2021-12-26]. Informace a návod k použití.
47. *Schindler 7000: Neoptimálnější řešení pro vaše výškové budovy* [online]. 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.schindler.com/cz/internet/cs/mobilni-reseni/produkty/vytahy/schindler-7000.html>
48. VRZAL, Bedřich a kol. *Strojnické tabulky*. SNTL, 1972.
49. High-rise solutions – Maintain.: Revolutionizing performance with intelligent engineering. *Schindler* [online]. Schindler Elevator [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://1url.cz/ErK0e>
50. Druhy koroze kovů. In: *AV EQUEN: ... více než čekáte* [online]. AV EQUEN, 2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.av-equen.cz/wp-content/uploads/2020/09/Druhy-koroze.pdf>
51. KROUŽIL, Martin, Martin MRÁZEK a Alena SELUCKÁ. *METODICKÝ MATERIÁL: PRŮZKUM A OŠETŘENÍ PŘEDMĚTŮ Z LITINY* [online]. In: Brno: Technické muzeum v Brně, Metodické centrum konzervace, 2018 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://mck.technicalmuseum.cz/wp-content/uploads/2017/12/Litina.pdf>