

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Studium vlivu zbytkových napětí na korozní vlastnosti

Autor: **Petr MONHART**  
Vedoucí práce: **Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž**

Akademický rok 2014/2015

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

Katedra materiálů a strojírenské metalurgie

Akad. rok: 2014/2015

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

**Jméno a příjmení:** Petr Monhart  
**Studijní program:** B2301 Strojní inženýrství  
**Studijní obor:** Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Téma bakalářské práce:

**Studium vlivu zbytkových napětí na korozní vlastnosti**

Zásady pro vypracování:

1. *Korozní vlastnosti kovů.*
2. *Druhy koroze a zkoušení korozních vlastností.*
3. *Zbytková napětí a jejich měření.*
4. *Návrh experimentu – vhodného korozního testu.*
5. *Vyhodnocení experimentů*
6. *Diskuse výsledků*
7. *Závěr.*

**Rozsah bakalářské práce:**

Rozsah grafických prací:  
Rozsah pracovní zprávy:  
Forma zpracování bakalářské práce :

fotodokumentace, obrázky  
30-40 stran formátu A4  
tištěná/ elektronická

## Seznam odborné literatury:

- Jones, D.A.: Principles and prevention of corrosion. Prentice Hall, New York 1996
- Multimediální výukový projekt Korozní inženýrství. [online] [cit 24-9-2014].  
Dostupné z:  
[http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni\\_inzenyrstvi\\_se/koroze/s\\_ipro](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/s_ipro)
- Integrita povrchu
- Nazarov, A., Thierry, D.: Application of Volta potential mapping to determine metal surface defect. Electrochimica Acta, 52 (2007), 7689-7696
- Kolařík, K.: Difrakční studium fyzikálních technologií obrábění oceli. Dizertační práce, ČVUT, 2010

**Vedoucí bakalářské práce:**

Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

**Konzultant bakalářské práce:**

Ing. Ondřej Chocholatý, Ph.D.  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

**Ostatní konzultanti:**

Ing. Kamil Kolařík, Ph.D.  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

**Datum zadání bakalářské práce:**

22. září 2014

**Termín odevzdání bakalářské práce:**

26. června 2015

L.S.

Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan

Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne: 22. září 2014

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Monhart	Jméno Petr	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2301 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Doc. Dr. Ing. Kříž	Jméno Antonín	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Studium vlivu zbytkových napětí na korozní vlastnosti		

<b>FAKULTA</b>	strojí	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2015
----------------	--------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	72	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	41	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	
---------------	----	---------------------	----	----------------------	--

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Cílem této bakalářské práce je ověřit teorii, že zbytková či vložená napětí mají přímý vliv na rozsah koroze materiálu/lů a nastítnit metody, způsoby nebo doporučení, jak tuto teorii v laboratorních podmínkách realizovat, prokázat.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Koroze, druhy koroze, korozní vlastnosti, vložená napětí, zbytková napětí, korozní komora, rentgenový difraktometr, potenciostat</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Monhart	Name Petr	
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2301 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Dr. Ing. Kříž	Name Antonín	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Investigation of the residual stress impact to the material corrosion conditions		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Materials Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2015
----------------	------------------------	-------------------	-----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	72	<b>TEXT PART</b>	41	<b>GRAPHICAL PART</b>	
----------------	----	------------------	----	-----------------------	--

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The goal of this bachelor work is to verify the theory that the residual or inset stress have a direct impact to corrosion extend of materials and outline the methods, ways or recommendations to implement and prove this theory in the laboratory conditions.
<b>KEY WORDS</b>	Corrosion, types of corrosion, corrosion quality, inset stress, residual stress, corrosion chamber, X-ray diffraction meter, potentiostat

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu práce panu Doc. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, konzultantům panu Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D. a panu Ing. Kamilu Kolaříkovi, Ph.D. a ostatním zaměstnancům ZČU FST KMM za čas, který mi věnovali, cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěli k vypracování této bakalářské práce.

## Obsah

Obsah.....	1
1 Úvod.....	4
2 Korozní vlastnosti kovů .....	4
2.1 Vnik koroze kovů.....	4
2.2 Projevy koroze .....	4
2.3 Protikorozní ochrana materiálů volbou vhodného materiálu .....	4
2.3.1 Kovové materiály .....	5
2.4 Protikorozní ochrana materiálů povlakováním, ochrannými nátěry.....	6
2.5 Protikorozní ochrana materiálů úpravou prostředí .....	6
2.6 Protikorozní ochrana materiálů konstrukčními zásahy.....	7
2.7 Protikorozní ochrana materiálů elektrochemickou ochranou .....	7
3 Druhy koroze a zkoušení korozních vlastností .....	7
3.1 Druhy koroze .....	7
3.1.1 Chemická koroze .....	7
3.1.2 Elektrochemická koroze .....	10
3.1.3 Rovnoměrná koroze.....	12
3.1.4 Nerovnoměrná koroze .....	12
3.1.5 Důlková koroze.....	12
3.1.6 Bodová koroze ( pitting ).....	12
3.1.7 Štěrbinová koroze .....	13
3.1.8 Mezikrystalová koroze .....	13
3.1.9 Porušování koroze za napětí.....	13
3.1.10 Selektivní koroze .....	14
3.2 Korozní činitelé.....	14
3.3 Korozní prostředí .....	15
3.3.1 Voda.....	15
3.3.2 Půda .....	15
3.3.3 Atmosféra .....	16
3.4 Zkoušení korozních vlastností .....	17
3.4.1 Korozní zkoušky.....	17
3.4.2 Metodika zkoušení koroze.....	17
3.4.2.1 Expoziční metody .....	17
3.4.2.1.1 Dlouhodobé atmosférické zkoušky .....	18
3.4.2.1.2 Zkouška úplným ponorem (Bac Ford Test).....	18
3.4.2.1.3 Zkouška v solné komoře.....	18
3.4.2.1.4 Zkouška v kondenzační komoře .....	19
3.4.2.2 Elektrochemické metody .....	19
3.4.2.2.1 Metoda polarizačního odporu .....	19
3.4.2.2.2 Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS).....	19
3.4.2.2.3 Galvanostatické zkoušky .....	20
3.4.2.2.4 Potenciostatické zkoušky.....	20
3.4.2.2.5 Potenciodynamické zkoušky .....	20
4 Zbytková napětí a jejich měření .....	21
4.1 Napětí mechanická.....	21
4.2 Typy napjatosti.....	21
4.3 Základní druhy namáhání .....	23
4.3.1. Tah, Tlak.....	23
4.3.2. Smyk, Střih .....	24
4.3.3 Krut.....	24



4.3.4 Ohyb .....	25
4.4 Druhy zatížení .....	25
4.5 Vložená a zbytková napětí .....	26
4.5.1 Zbytková napětí 1. druhu, makroskopická .....	26
4.5.2 Zbytková napětí 2. druhu, mikroskopická .....	26
4.5.3 Zbytková napětí 3. druhu, submikroskopická .....	26
4.6 Příčiny vzniku zbytkových napětí .....	27
4.6.1 Nerovnoměrné plastické deformace .....	27
4.6.2 Nerovnoměrný ohřev a ochlazování .....	29
4.6.3 Nerovnoměrné změny struktury .....	30
4.7 Vybrané metody měření zbytkových napětí .....	31
4.7.1 Nedestruktivní metody měření zbytkových napětí .....	31
4.7.1.1 Rentgenová difrakce .....	31
4.7.1.2 Barkhausenův šum .....	33
4.7.1.4 Magnetické metody .....	34
4.7.1.5 Ultrazvukové metody .....	35
4.7.2 Semidestruktivní a destruktivní metody měření zbytkových napětí .....	35
4.7.2.1 Odvrtávací metody .....	35
4.7.2.2 Odstraňování vrstev .....	36
5 Návrh experimentu a vhodného korozního testu .....	39
5.1. Teoretický základ experimentů pro napětí a zbytková napětí .....	39
5.1.1. Stanovení korozní rychlosti, korozního potenciálu a polarizačního odporu elektrochemickými metodami .....	39
5.2. Návrhy experimentů .....	42
5.2.1. Experiment č.1 _upínací přípravek, korozní komora, rentgenový difraktometr .....	42
5.2.1.1. Vzorky materiálu experimentu č. 1 .....	42
5.2.1.2. Zatěžování a měření napětí a zbytkových napětí ve vzorcích materiálu před korozním testem .....	43
5.2.1.3. Kondenzační korozní test experimentu č. 1 .....	45
5.2.1.4. Chemické složení vzorků materiálu pro experimenty č. 1 až č. 3 .....	49
5.2.1.5. Velikost zrna vzorků materiálu pro experimenty č. 1 až č. 3 .....	49
5.2.2. Experiment č. 2 – trhací stroj, potenciostat, rentgenový difraktometr .....	51
5.2.2.1. Vzorky materiálu experimentu č. 2 .....	51
5.2.2.2. Zatěžování vzorků materiálu trhacím strojem před měřením na potenciostatu... ..	51
5.2.2.3. Popis měření korozního potenciálu $E_{kor}$ , korozní rychlosti a polarizačního odporu $R_d$ na potenciostatu .....	52
5.2.3.4. Měření zbytkových napětí ve vzorku po zatížení na trhacím stroji na rentgenovém difraktometru .....	54
5.2.3. Experiment č. 3 – rentgenový difraktometr, korozní komora .....	56
5.2.3.1. Kondenzační korozní test experimentu č. 3 .....	56
6 Vyhodnocení experimentů .....	58
6.1. Experiment č. 1 .....	58
6.1.1. Závislost mezi vloženým napětím a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu .....	58
6.1.2. Závislost mezi zbytkovým napětím a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu .....	59
6.3. Experiment č. 2 .....	61
6.2.1. Závislost mezi skutečným zatížením z trhacího stroje, ev. zbytkovým napětím ve vzorku a korozním potenciálem $E_{kor}$ , korozní rychlostí $j$ a polarizačním odporem $R_d$ měřeným na potenciostatu ve vzorku materiálu .....	61

6.3. Experiment č. 3 .....	65
6.3.1. Závislost mezi zbytkovým napětím ve vzorku a rozsahem zkorodované plochy ve vzorku materiálu .....	65
7 Diskuze výsledků .....	66
7.1 Experiment č. 1 .....	66
7.1.1. Závislost mezi vloženým napětím a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu .....	66
7.1.2. Závislost mezi zbytkovým napětím a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu .....	66
7.2 Experiment č. 2 .....	67
7.2.1. Závislost mezi zbytkovým napětím ve vzorku materiálu a korozním potenciálem $E_{kor}$ , korozní rychlostí $j$ a polarizačním odporem $R_d$ .....	68
7.3 Experiment č. 3 .....	69
7.3.1. Závislost mezi zbytkovým napětím a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu .....	69
8 Závěr .....	70
Seznam použité literatury: .....	71

## 1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je ověřit teorii, že zbytková či vložená napětí mají přímý vliv na rozsah koroze materiálu/lů a nastínit metody, způsoby nebo doporučení, jak tuto teorii v laboratorních podmínkách realizovat, prokázat.

## 2 Korozní vlastnosti kovů

### 2.1 Vnik koroze kovů

Slovo koroze pochází z latinského slova *corrodere* a v překladu znamená ohlodávat či okusovat. Koroze je schopnost kovu přecházet do stabilnější sloučeniny, ve které se vyskytuje i v přírodě. Koroze je obecně chápána jako samovolná a postupná degradace materiálů. Koroze znehodnocuje jak kovové, tak nekovové organické i anorganické materiály např. degradace plastů, horniny. Koroze probíhá v atmosféře i v plynech, ve vodě i v kapalinách, zeminách, půdách a v ostatních chemických prostředích, které jsou s materiálem ve styku. Tato postupná degradace materiálu se může projevovat rozdílně a to: změnou vzhledu až po úplný rozpad integrity materiálu. U kovů a slitin kovů, kovových předmětů, koroze začíná obvykle na povrchu předmětu a postupuje dovnitř materiálu. Dříve hladký povrch součásti je drsný. Schopnost odolávat korozi je daná povahou kovu nebo složením slitiny kovu, prostředím a jeho chemickým složením, teplotou, vlhkostí. [\[1\]](#) [\[7\]](#)

### 2.2 Projevy koroze

Projevy koroze rozumíme změnu jakékoliv složky korozního systému, tzn. změnu kteréhokoliv z kovu nebo kovů tvořících korozní systém a jakékoliv složky korozního prostředí. Korozní projev obecně zhoršuje funkci kovu, zhoršuje prostředí nebo technický systém, jehož je kov součástí.

Viditelnými projevy koroze jsou, korozní produkty (zplodiny), rez a okuje. Rez se převážně skládá z hydratovaných oxidů železa. Okuje vznikají za vysokých teplot jako vrstva korozních produktů usazená na povrchu materiálu.

Dalšími projevy koroze je hloubka průniku koroze a rychlost koroze. Hloubka průniku koroze je vzdálenost mezi původním povrchem kovu a bodem na povrchu kovu napadeného korozi. Rychlost koroze je přírůstek hloubky koroze za jednotku času anebo hmotnost kovu změněného na korozní zplodiny. [\[13\]](#)

### 2.3 Protikorozní ochrana materiálů volbou vhodného materiálu

Obecně se volí takový druh materiál, který musí splnit kritéria konstrukce z hlediska funkce zařízení, vhodnosti konstrukce zařízení, pevnosti a tuhosti zařízení, z hlediska prostředí, v kterém bude zařízení použito, z hlediska ceny atd. Hlavním kritériem je pevnost konstrukce zařízení (tah, tlak, smyk, ohyb, krut), které je v zásadě dosaženo vhodnou volbou materiálu. Tento materiál musí splňovat podmínku přenesení tzv. maximálních nebo dovolených napětí, které se u staticky namáhaných materiálů dají vyjádřit vztahem:  $\sigma = R / k$   $\leq \sigma_{\max}$ , kdy  $R$  jsou pevnostní charakteristiky ( $R_e$  mez kluzu,  $R_{0,2}$  smluvní mez kluzu,  $R_m$  mez pevnosti),  $k$  je koeficient bezpečnosti volený podle druhu a způsobu namáhání a ohledem na jeho životnost. Dále do volby materiálu zahrnujeme i stavy kdy materiál je zatěžovaný proměnlivým napětím nebo pracuje za nízkých či vysokých teplot. [\[4\]](#)

### 2.3.1 Kovové materiály

Koroze a degradace postihuje prakticky všechny materiály. Mezi nejpoužívanější materiály se řadí zejména slitiny na bázi Fe a C, které jsou známy jako oceli a litiny. Nejvíce se obecně v technické praxi používají materiály na bázi Fe. Fe ve spojení s C tvoří slitiny známé jako ocel a litina. Oceli jsou slitiny Fe s C do 2,14% podle metastabilní diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C a litiny jsou slitiny Fe s C od 2,11% koncentrace uhlíku podle stabilního diagramu Fe-C. [18] Tato práce se bude dále zabývat v převážné míře korozi ocelí, kdy ostatní materiály, jako jsou neželezné kovy a jejich slitiny, nekovové anorganické materiály a polymerní materiály jsou uvedeny v odkazu [4].

#### Nelegované a nízkolegované oceli

Mezi nelegované oceli patří oceli konstrukční, obvyklé jakosti, ušlechtilé, kam řadíme oceli třídy 10 – 12. Třídu 12 označujeme jako ocel uhlíkovou, kdy podle obsahu uhlíku tyto oceli dělíme na nízkouhlíkové do 0,25%, středně uhlíkové od 0,25% do 0,6% a vysokouhlíkové nad 0,6%. [18]

Mezi nízkolegované oceli patří oceli konstrukční, obvyklé jakosti, ušlechtilé, slitinové, kam řadíme oceli třídy 13 – 16, se součtem legovacích prvků do 2,5% ( středně legované součet legovacích prvků od 2,5% do 5%, výše legované součet legovacích prvků od 5% do 10% a vysoce legované součet legovacích prvků více než 10% ). [18]

Rychlost a intenzita postupu koroze je u těchto ocelí dána především agresivitou korozivního prostředí, kde se tyto materiály vyskytují. Tyto oceli je v převážné míře nutné chránit před stykem s korozivním prostředím a to prostřednictvím ochranných nátěrů, úpravou prostředí, v kterých se nalézají, katodickou ochranou, metalizací. Výjimkou jsou v tomto případě nízkolegované oceli třídy 15 (15217 Atmosfix A, 15127 Atmosfix B), které mají zvýšenou korozivzdornost dosaženou vhodnou kombinací přísad prvků mědi, chromu a niklu s vyšším obsahem fosforu. Základní specifickou vlastností těchto ocelí se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi (tzv. patinujících ocelí) je jejich schopnost tvořit za vhodných atmosférických podmínek postupně na svém povrchu vrstvu oxidů (patiny), která významně zpomaluje rychlost koroze. Počáteční korozní rychlost patinujících ocelí je přibližně stejná jako u běžných konstrukčních uhlíkových ocelí, vyšší odolnost proti atmosférické korozi se projeví až po určité době. Tvorba ochranné vrstvy korozních produktů, patiny, je podmíněna cyklickým působením mokrých a suchých period. [4] [8]

#### Vysoce legované korozivzdorné oceli

Korozivzdorné oceli je možno rozdělit na oceli martenzitické, feritické, feriticko-austenitické a austenitické. Korozivzdorné oceli v sobě mohou, podle přísadových prvků, zahrnují i další zlepšené vlastnosti v podobě vyšší odolnosti proti vysoké teplotě, žáruvzdornosti, vysoké teplotě při zaručené pevnosti, žáru pevnosti, odolnosti proti kyselinám a zásadám. Tato vlastnost je dosažena vytvořením ochranné tzv. pasivní vrstvy daných přísadových prvků, která značně zpomaluje či zcela zamezuje korozi materiálu a to za předpokladu, že tato vrstva je po celém objemu materiálu nepoškozená a kompaktní a za předpokladu respektování podmínek stability pasivní vrstvy.

Pro dosažení optimální **korozivzdornosti** jsou používány tyto přísadové prvky a jejich kombinace chrom, nikl molybden, mangan.

**Chrom** je základním přídavným prvkem pro zabezpečení korozivzdorných vlastností materiálu a to vytvořením pasivní vrstvy na povrchu materiálu. Při obsahu chromu o větším

množství než 12% se tyto slitiny považují již za korozivzdorné. Prakticky je aplikováno 17 až 20% množství chromu event.. 29% množství chromu, což vede ke zvýšení stability pasivní vrstvy a tím ke zlepšení korozivzdornosti. Další zvyšování množství chromu vede ke zhoršení mechanických vlastností, ke zhoršení svařitelnosti, ke zhoršení obrobitelnosti. [4]

**Nikl** přispívá ke korozivzdornosti ocelí hlavně v redukujících se vodných prostředích, silných anorganických kyselinách. Pro spolehlivou odolnost proti porušení korozním praskáním se považuje množství niklu kolem 30%. Zvyšuje mez kluzu, houževnatost a korozní odolnost v redukujících kyselinách. [4]

**Molybden** v kombinaci s chromem zlepšuje vlastnosti pasivující vrstvy a to hlavně u vodných roztoků typu chladících směsí, obsahujících chloridové ionty. Vliv přísad molybdenu se projevuje zlepšením korozní ochrany proti bodové a štěrbinové korozi. Při větších množstvích molybdenu stoupá riziko vzniku heterogenních struktur, které vede ke snížení korozní odolnosti. Tuto negativní vlastnost částečně potlačujeme přísadou dusíku. [4]

**Mangan** má při množství 5 – 10% podobný účinek jako nikl, ale ve spojení se sírou vznikají nebezpečné sulfidy, které korozivzdornost naopak snižují. [4]

## 2.4 Protikorozní ochrana materiálů povlakováním, ochrannými nátěry

Hlavní funkcí **ochranného nátěru** je vytvořit ochrannou vrstvu samotného materiálu vystaveného korozivnímu prostředí. Tohoto je dosaženo těmito účinky, bariérovým, inhibičním a elektrochemickým. **Bariérový** účinek je vytvořen aplikací nátěrové hmoty na povrch materiálu, kdy podstatná je správná příprava povrch materiálu, tak aby se vytvořila souvislá a kompaktní vrstva nátěrové hmoty. Tím dosáhneme účinného oddělení materiálu a korozního prostředí. Pro zvýšení účinků nátěru se například přidávají vhodné pigmenty (slída). **Inhibiční** účinek (inhibitor = zpomalovač) je založen na principu fungování vhodných inhibitorů, zpomalovačů koroze na rozhraní nátěr-kov. Těmito inhibitory mohou být například sloučeniny olova, chromanové pigmenty, chroman barnatý, olovnatý atd. **Elektrochemický** účinek je tvořen směsí nátěru a v něm přimíseného zinkového prášku, který po případném poškození nátěru působí jako galvanická ochrana.

**Povlakování** můžeme rozdělit podle typu povlaků na kovové a aplikace pryžových povlaků. Jako opryžované povlaky se používá tvrdá pryž, přírodní pryž, nebo přírodní a syntetické polymery. Pro aplikaci kovových povlaků se v průmyslovém měřítku používají metody galvanického a autokatalytického pokovování z elektrolytů, žárové povlakování, depozice ve vakuu, plátování válcováním nebo výbuchem. Běžně se používají hliníkové povlaky, zinkové povlaky, měděné povlaky, chromové povlaky, cínové povlaky, atd.. [4]

## 2.5 Protikorozní ochrana materiálů úpravou prostředí

Dalším způsobem jak zabránit anebo výrazně zpomalit korozní děj je úprava korozního prostředí ve styku s korodovatelným materiálem. Rozeznáváme tyto možnosti: destimulaci, změnu fyzikálních parametrů prostředí, inhibice.

**Destimulace** znamená odstranění hlavních korozivních složek z prostředí, které je ve styku s korozivním materiálem. Destimulace se používá v těch případech, kdy agresivní složka není nutná v technologickém procesu a samotná destimulace není příliš finančně nákladná. Takovým případem je například fyzikální odstranění kyslíku z vody například varem, vakuem nebo probubláváním inertním plynem. Chemicky se kyslík odstraňuje reakcí se siřičitanem nebo hydrazinem. Destimulací je i odstranění vlhkosti a tím i odstranění vodného elektrolytu, čímž se zabrání vzniku makročlánku, galvanickému ději, a oxidaci kovu.

Demineralizace je také druhem destimulace například odstranění  $\text{Cl}^-$  z vody na iontoměničích. [4]

**Inhibice** je proces, který je založen na zamezení katodického či anodického děje a to pomocí chemických látek, které výrazně snižují korozní rychlost a to záměrným vznikem tenkých ochranných vrstev. Na základě tohoto rozeznáváme inhibitory anodické, zpomalení anodického děje, dusitany, chromany, inhibitory katodické, zpomalení katodického děje, které tvoří například vrstvy s hydroxidem vápenatým nebo s hydroxidem zinečnatým. Dále známe inhibitory difuzní, které na rozhraní kovu a korozního prostředí tlumí difuzi iontů, molekul (křemičitany, želatina). [4] [8]

**Změnou fyzikálních parametrů prostředí** je myšlena hlavně změna teploty a změna rychlosti korozního prostředí. Změna teploty, snížení teploty, v některých případech i zvýšení teploty, může zapříčinit zapasivování povrchu materiálu a tím ke snížení rychlosti korozního děje. [4]

## 2.6 Protikorozní ochrana materiálů konstrukčními zásahy

Koroznímu ději můžeme zabránit vhodnými konstrukčními zásahy a to ve formě vhodného tvaru součásti a vhodného způsobu spojení součástí. Například mezi dvě spojované součásti vložíme izolant zabraňující vzniku korozního článku, odvedením kondenzace pryč ze systému konstrukce, zabránit vzniku možné rozdílné koncentrace roztoku v nádobě a přiváděného roztoku do nádoby, konstrukčnímu zamezení vzniku míst, kde se mohou hromadit nečistoty, kaly, vlhkost, atd.. [8]

## 2.7 Protikorozní ochrana materiálů elektrochemickou ochranou

Elektrochemickou ochranu dělíme na anodickou a katodickou. Obě metody se vhodně doplňují. Katodická ochrana se používá v málo vodivých prostředích a do malých hloubek. Anodická ochrana se používá v prostředích s velkou vodivostí a do velkých hloubek. Katodická ochrana je obvykle levnější na pořizovací náklady a dražší na provozní náklady. U anodické ochrany je tomu naopak. Více rozšířenou a používanou metodou je katodická metoda. Podstatou katodické ochrany je vytvoření elektrického okruhu, kde katodou je chráněné zařízení, kdy anoda se rozpouští, anebo další možností je vytvoření galvanického článku, kde chráněné zařízení, katoda, je vodivě spojena s anodou s negativnějším elektrickým potenciálem. Anoda je korozně aktivnější, rozpouští se, což je i důvodem vzniku elektrického proudu. Tato anoda se nazývá protektor nebo také obětovaná anoda. Vyrábí se z hliníku, zinku nebo manganu. [8]

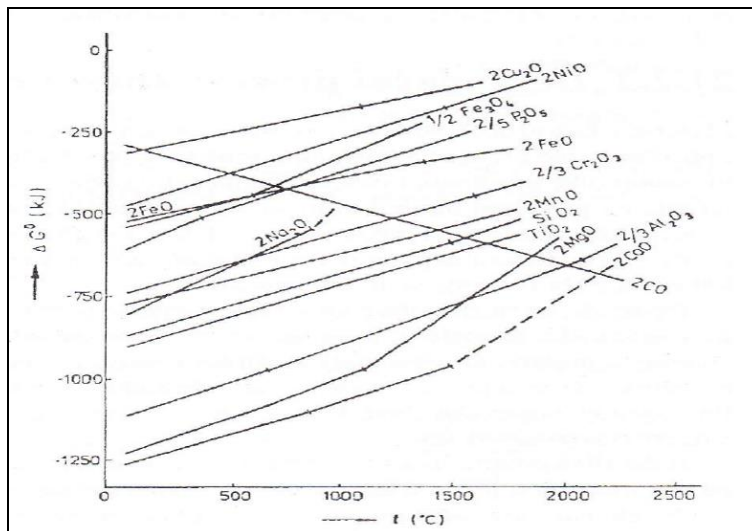
# 3 Druhy koroze a zkoušení korozních vlastností

## 3.1 Druhy koroze

### 3.1.1 Chemická koroze

Chemická koroze je schopnost kovového povrchu součástky vstupovat do přímé chemické reakce s elektricky nevodivým prostředím, v kterém se nalézá. U většiny kovů probíhá samovolně. K chemické korozi dochází v plynech a v atmosféře za normálních i zvýšených teplot a v elektricky nevodivých kapalných prostředích. Produkty koroze jsou

přímo v místě, kde k chemické reakci došlo. O korozní chemické reakci, při které vznikají korozní produkty nejnázorněji vypovídají tzv. Ellinghamovy diagramy, Obr. č.1. Tyto diagramy jsou znázorněním změn volné entalpie  $\Delta G$  (Gibsonova energie značená písmenem G, která popisuje chemické děje za podmínek konstantního tlaku, konstantní teploty a konstantních látkových množství) v závislosti na teplotě. [1]



Obr.č.1: Ellinghamův diagram reakce vybr. kovů s 1 molem kyslíku [1]

Rychlost chemické koroze je dána především charakterem korozních zplodin a je poměrem mezi molárním objemem korozních zplodin  $V_M$  a atomovým objemem kovu  $V$ . Význam tohoto poměru je vyjádřen tzv. Pilling - Bedworthovým číslem ( **PBC** ), které stanoví ochranný účinek korozní vrstvy tzn. zabránění přístupu korozní složky prostředí k povrchu součásti, Obr. č. 2. Pakliže: **PBC** =  $V_M / V < 1$  vrstva nemá žádný ochranný charakter,

**PBC** =  $V_M / V \geq 1$  vrstva má ochranný charakter, **PBC** =  $V_M / V \gg 1$  vrstva je nestabilní s vnitřním pnutím v důsledku čehož dochází k popraskání ochranné vrstvy na povrchu součásti a tím i k znehodnocení ochranné vrstvy.

Kov	Oxid	PB číslo	Kov	Oxid	PB číslo
Na	Na <sub>2</sub> O	0,55	Ni	NiO	1,65
Li	Li <sub>2</sub> O	0,58	Ti	TiO <sub>2</sub>	1,73
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,28	Fe	FeO	1,80
Pb	PbO	1,31	Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,14
Zn	ZnO	1,55	Cr	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,07
Cu	Cu <sub>2</sub> O	1,64	Mo	MoO <sub>3</sub>	3,30

Obr.č.2: Hodnoty Pilling - Betworthova čísla vybraných kovů [1]

V případě vzniku korozních produktů, které jsou plynné, kapalně nebo tuhé korozní produkty nemají ochrannou schopnost, pak koroze probíhá při konstantní teplotě a konstantní rychlosti. Tento děj můžeme vyjádřit vztahem:  $m = k_1 \times \tau$ , kdy  $m$  je korozní změna [mm/rok],  $k_1$  je teplotní konstanta a  $\tau$  je čas.

V případě, že tuhé korozní vrstvy mají alespoň částečnou ochrannou schopnost probíhá rychlost koroze za vyšších teplot podle vztahu:  $m^n = k_2 \times \tau$ , kde  $n = 1,5 - 2,8$ .

V případě přechodu mezi korozi za vysokých teplot a nízkých teplot probíhá rychlost koroze podle vztahu:  $m^3 = k_2 \times \tau$ .

V případě nízkých teplot a vzniku tenkých vrstev reakčních produktů probíhá korozní rychlost podle logaritmického vztahu:  $m = k_4 \times (\ln k_5 + k_6 \tau)$ .

Konstanta  $k$  se určuje z tzv. Arrheniova vztahu, kdy:  $k = A \exp(-E/RxT)$ ,  $A$  je frekvenční faktor,  $E$  je aktivační energie (obvykle konstantní).

Na rychlost koroze má tudíž rozhodující vliv korozní prostředí, v kterém se součástka nachází, kdy toto prostředí ovlivňuje charakter korozních zplodin. Dále má vliv na rychlost koroze stoupající teplota, která podporuje rychlost difuze a podporuje zvýšení vodivosti produktů koroze.

Chemickou korozi dále můžeme rozdělit na korozi mezi kovy a plynným prostředím (atmosférou) a to jako: A) korozi v oxidačně působících plynech (kyslík, vzduch oxid sírový, oxid siřičitý aj.),

B) korozi v redukčně působících plynech (vodík, amoniak, metam aj.)

[1]

### **A) Koroze v oxidačně působících plynech**

Při oxidaci látka elektrony uvolňuje a její oxidační číslo se zvyšuje tzn., že je to děj, při kterém reaktant (např. kov Me) ztrácí valenční elektrony podle vztahu:  $Me \rightarrow Me^{n+} + ne^-$

(např.  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ ). Pro samotné navození chemické reakce = koroze je potřeba tzv. oxidačního činidla tj. látky, která při oxidačně-redukční reakci vyvolává oxidaci jiné látky a sama se při tom redukuje. Například v případě koroze železa podle chemické rovnice  $4Fe + 3O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3$  je oxidačním činidlem kyslík, který se redukuje v podobě oxidu železitého. V případě iontů kyslíku a železa, které mají vysokou difuzní pohyblivost a to hlavně při vysokých teplotách dochází u běžných konstrukčních ocelí k rychlé oxidaci povrchů součástek z této oceli. Pro zvýšení odolnosti proti oxidaci se do ocelí přidávají legovací prvky v podobě přísad a to hlavně přísad křemíku, hliníku a chromu (důvody vyšší odolnosti proti korozi viz. 2.4.1.). Koroze sirnými složkami je další příčinou degradace kovových materiálů, kdy kovy reagují s těmito složkami za vzniku sulfidů. K chemické korozi je přitom dostačující obsah těchto složek v plynném prostředí v řádu setin až desetin procent. Sulfidy mají horší ochranné vlastnosti než oxidy, s větším množstvím strukturních poruch a horší přilnavostí k povrchu kovového materiálu. Tento způsob koroze může být navíc urychlen degenerativními účinky uvolňujícího se vodíku v případě sloučení sirovodíku a kovu (př.  $Me + H_2S \rightarrow MeS + H_2$ ). [1]

### **B) korozi v redukčně působících plynech**

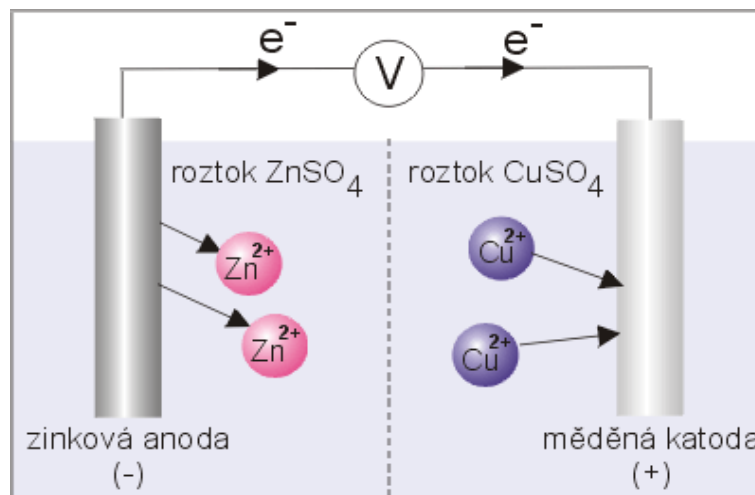
Při redukci látka elektrony přijímá a její oxidační číslo se snižuje tzn., že je to děj, při kterém reaktant (např. kov Me) přijímá valenční elektrony podle vztahu:  $Me^{n+} + ne^- \rightarrow Me$  (např.  $Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$ ). Pro samotné navození chemické reakce = koroze je potřeba tzv. redukčního činidla tj. látky, která při oxidačně-redukční reakci vyvolává redukci jiné látky a sama se při tom oxiduje. Nejvíce rozšířená je vodíková koroze, která se vyskytuje v redukčních prostředích, kde je přítomen vodík. Při vysokých teplotách a tlacích dochází k chemické reakci vodíku s cementitickým uhlíkem za vzniku metanu podle chemických



rovnic :  $4\text{H} + \text{C} \rightarrow \text{CH}_4$  ,  $4\text{H} + \text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{Fe}$ . V důsledku čehož dojde k oduhličení materiálu a ke vzniku methanu. Tento metan v oceli nedifunduje a soustředí se po hranicích zrn materiálu. Metan vyvolává v těchto místech svým působením vysoké tlaky, která způsobují vysoká vnitřní pnutí. Z tohoto důvodu je materiál křehký s nebezpečím vzniku trhlin. Vodíkové korozi se nejčastěji zabraňuje legováním ocelí pomocí chromu, molybdenu nebo vanadu event.. wolframem, titanem, niobem a zirkoniem, které tvoří karbidické struktury, které nereagují s vodíkem. [1]

### 3.1.2 Elektrochemická koroze

Elektrochemická koroze vzniká v důsledku tvorby elektrického proudu ve vodivém prostředí, elektrolytu (roztoky zásad, solí a kyselin). Je to chemická oxidačně-redukční reakce, která probíhá mezi anodou (oxidace ) a katodou ( redukce ) a to podobně jako v galvanickém článku, tzn., že galvanický článek bude pracovat tak dlouho, dokud se zinková anoda úplně nerozpustí anebo koncentrace  $\text{Cu}^{2+}$  iontů nebude rovna nule, Obr. č. 3. Na podobném principu probíhá i elektrochemická koroze tzn., že anoda je zdrojem elektronů a katoda tyto elektrony přijímá a to: 1.vybýjením iontů vodíkem (depolarizace vodíková), 2. redukcí kyslíku, který je rozpuštěný v elektrolytu (depolarizace kyslíková). Obě reakce se podmiňují a probíhají současně, když kovem neprotéká elektrický proud. [1]



Obr.č.3: Galvanický článek [5]

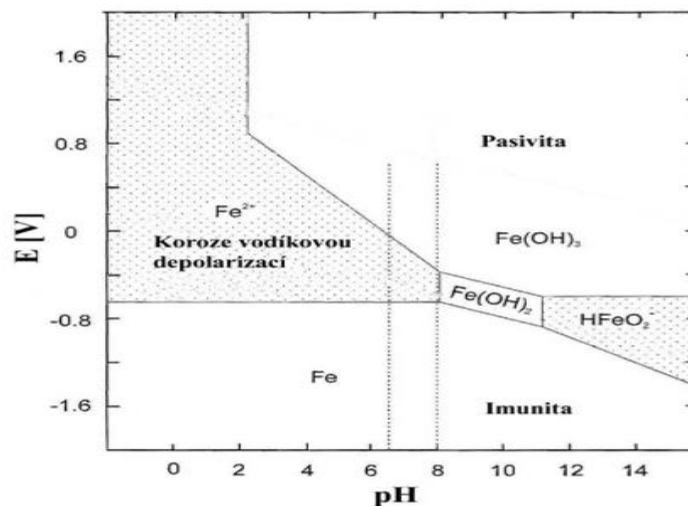
Základem elektrochemické koroze je tedy anodické rozpouštění, které můžeme vyjádřit chemickou rovnicí :  $\text{Me} \rightarrow \text{Me}^{n+} + n\text{e}^-$ . Rovnovážný děj elektrochemické koroze lze vyjádřit pomocí Nerstovy rovnice, která charakterizuje tzv. rovnovážný potenciál  $E_R$  vztahem:  $E_R = E_0 + (RT/zf) \ln a_{\text{Me}^{n+}}$ ,  $E_0$  je standardní potenciál daného kovu (elektrody), který charakterizuje elektrochemickou ušlechtilost kovu,  $F$  je Faradayova konstanta (96487 C/mol),  $n$  je valence,  $a_{\text{Me}^{n+}}$  je aktivita iontu kovu,  $z$  je počet elementárních nábojů na jednom kationtu. Elektrochemická ušlechtilost kovu je dána tzv. **Beketovovou řadou kovů**, která řadí kovy podle hodnot jejich standardního elektrodového potenciálu (vztaženého k vodíkové elektrodě, platina sycená vodíkem), avšak skutečná korozní odolnost zcela neodpovídá elektrochemické ušlechtilosti kovů a to z různých příčin např. vzniku na povrchu materiálu tuhých nerozpustných korozních zplodin, které brzdí oxidaci kovů a tím zpomalují korozi, Obr. č. 4. [1]

Korozní ušlechtilost		Korozní odolnost	Korozní ušlechtilost		Korozní odolnost
$E_0$ [mV]	kov	kov	$E_0$ [mV]	kov	kov
+1,5	Au	Au	-0,403	Cd	Ni
+1,2	Pt	Pt	-0,440	Fe	Pb
+0,987	Pd	Pd	-0,740	Cr	Al
+0,799	Ag	Zr	-0,763	Zn	Sn
+0,337	Cu	Ti	-1,18	Mn	Fe
-0,126	Pb	Ag	-1,53	Zr	Cd
-0,136	Sn	Mo	-1,63	Ti	Zn
-0,20	Mo	Cr	-1,66	Al	Mg
-0,25	Ni	Cu	-2,37	Mg	Mn

Obr.č.4: Elektrochemická ušlechtilost a korozní odolnost kovů (  $T = 25^\circ\text{C}$  ) [6]

Elektrodový potenciál je významný z hlediska průběhu elektrodové reakce. Je-li potenciál elektrody  $E_0$  roven rovnovážnému elektrodovému potenciálu  $E_R$ , je reakce v dynamické rovnováze a rovnice běží oběma směry totožnou rychlostí. Pokud je  $E_R \neq E_0$ , reakce probíhá ve směru oxidace ( $\eta > 0$ ) nebo ve směru redukce ( $\eta < 0$ ). Přepětí  $\eta$  je hnací silou elektrodové reakce vyjádřené rovnicí:  $E_R - E_0 = \eta \neq 0$ . Přepětí  $\eta$  je úměrné změně Gibbsovy volné entalpie vyjádřené rovnicí:  $\Delta G = nF(E_R - E) = nF\eta$ . Kde  $F$  značí Faradayovu konstantu a  $n$  počet přenesených elektronů. [2]

Vliv pH na průběh korozních dějů nejlépe popisují diagramy, které poprvé zpracoval Marcel Pourbaix v roce 1938. Tyto mapy poukazují na oxidační sílu v elektrochemických polích rovnovážného potenciálu  $E_R$  a pH. Tyto diagramy ohraničují ty části mapy, v kterých se předpokládá koroze, pasivita (viz.2.4.5.) a nebo imunita materiálu, Obr. č. 5.



Obr.č.5 : Pourbaixův diagram pro Fe [2]

Diagram na Obr. č. 5 ukazuje, že koroze železa je možná ve velkém rozsahu pH. Při zvýšených hodnotách elektrodového rovnovážného potenciálu se vytváří pasivační vrstva  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , případně  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

Vztah pro výpočet rychlosti probíhající reakce můžeme vyjádřit elektrickým proudem a je dán Faradayovým vztahem :  $m = \frac{AQ}{nF} = \frac{Ait}{nF} \rightarrow \frac{m}{t} = \frac{Ai}{nF}$  , kde  $m$  je množství zreagované látky,  $A$  je relativní atomová nebo molekulová hmotnost reagované látky,  $Q$  je prošlý elektrický náboj,  $i$  je proud a  $t$  je čas. Rychlost reakce ( $\frac{m}{t}$ ) je tedy přímo úměrná procházejícímu proudu.

Podle velikosti elektrod korozního článku rozlišujeme makročlánky, mikročlánky a submikročlánky. Makročlánky vznikají spojením dvou různě ušlechtilých kovů v korozním prostředí (rozpuští se ten méně ušlechtilý – anodová reakce př. spoj hliníkové slitiny s bronzovým šroubem ve vodě). Mikročlánky vznikají nestejnorodostí kovů a slitin v chemickém složení a struktuře. Submikročlánky jsou vyvolané napěťovými poli v okolí dislokací, vakancí. Průběh korozních a tedy elektrochemických reakcí ovlivňuje řady vnější i vnitřních faktorů. Vnější faktory jsou například pH elektrolytu, inhibitory, teplota. Vnitřní faktory jsou například stav povrchu materiálu, vnitřní pnutí v materiálu, chemické složení a mikrostruktura materiálu. [\[1\]](#) [\[4\]](#) [\[8\]](#)

### 3.1.3 Rovnoměrná koroze

Při styku kovu a korozivního prostředí se začne na jednotlivých zvláště aktivních místech projevovat korozní děj. Tento děj se postupně rozšiřuje po celém povrchu materiálu a rovnoměrně rozpouští celý povrch materiálu stejnou rychlostí a při stejném úbytku kovu. Projevem je korozní úbytek materiálu a znehodnocení povrchu materiálu korozními zplodinami, Obr. č. 7. [\[1\]](#) [\[4\]](#)

### 3.1.4 Nerovnoměrná koroze

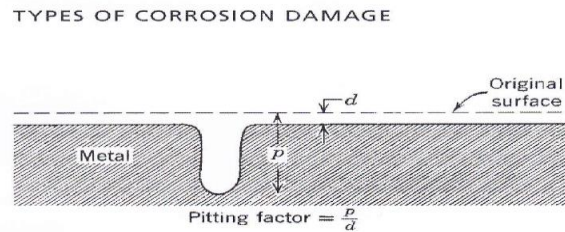
Vzniká jako důsledek nehomogenity materiálu nebo nehomogenity korozního prostředí. Vzniká na některých místech kovu anebo napadá jen některé struktury kovu. Průběh koroze v postižených místech a strukturách je většinou různou rychlostí. [\[1\]](#) [\[4\]](#)

### 3.1.5 Důlková koroze

Vzniká jako poškození pasivní vrstvy, u snadno pasivovatelných kovů nebo korozivzdorných ocelí, v určitém místě kovu v důsledku čehož se toto poškození projeví vytvořením korozního epicentra. K tomuto poškození obvykle dochází v korozivním prostředí obsahujícím ionty  $Cl^-$  nebo oxidy kyslíku. Hloubka i šířka napadeného místa je přibližně stejná, Obr. č. 7. Důležitým ukazatelem proti důlkové koroze nerezové oceli v prostředí s chlorem je tzv. PRE, ev. PREN číslo. Velikost tohoto čísla je ovlivněna hlavně složením nerezové oceli. Důležitými legovacími prvky jsou chrom, molybden, dusík, ev. wolfram. Vztah pro výpočet PREN je:  $PREN = 1 \times \% Cr + 3,3 (\% Mo + 0,5 \times \% W) + 16 \times \% N$ . Dále obecně platí, že čím vyšší je číslo PREN, tím vyšší je odolnost nerezové oceli proti důlkové korozi. [\[1\]](#) [\[4\]](#) [\[14\]](#)

### 3.1.6 Bodová koroze ( pitting )

Podobný proces vzniku jako u důlkové koroze, ale podstatnou odlišností je to, že hloubka korozního napadení je podstatně větší než šířka napadení. Z tohoto důvodu je tato koroze nebezpečnější. U bodové koroze se uvádí i tzv. činitel bodové koroze, což je poměr mezi nejhlubším místem napadení  $p$  ku průměrnému zeslabení  $d$  viz. Obr. č. 6, Obr. č. 7 [\[1\]](#) [\[4\]](#) [\[11\]](#)



Obr.č.6: Činitel bodové koroze [11]

### 3.1.7 Štěrbínová koroze

K štěrbinové korozi dochází v úzkých místech štěrbinách a kapilárách kovových materiálů, kde je malé množství elektrolytu odděleno od vnějšího zbylého elektrolytu. Kyslík, který je obsažen v elektrolytu uzavřeném ve štěrbině je depolarizační reakcí spotřebován čímž se s povrchu štěrbin stává anoda, kde dochází k samotné oxidaci, korozi kovu. Štěrbínová koroze vzniká zpravidla nevhodným řešením šroubových spojů, u bodových svarů, u nýtových spojů, pod podložkami, aj., Obr. č. 7. [1] [4]

### 3.1.8 Mezikrystalová koroze

Mezikrystalová koroze je nejvýraznějším příkladem vlivu strukturních změn kovu na jeho korozní odolnost. Její příčinou je strukturní a chemická heterogenita kovu na hranicích zrna, kdy hranice zrna korodují podstatně rychleji než samotné zrno. Materiál korodující mezikrystalově ztrácí mechanické vlastnosti, ztrácí soudržnost, aniž by došlo k pozorovatelné vzhledové změně. Mezikrystalová koroze se projevuje nejčastěji u korozivzdorných ocelí po tepelném zpracování (např. svařování). Příčiny mezikrystalová koroze se odvíjejí od charakteru korozních prostředí a jednotlivých slitin. Mezi tyto příčiny patří : vznik precipitátu na hranici zrn, který je chudší o složku odolávající korozi (např. chrom ), vzniklý precipitát vytváří velké pnutí, které přenáší do okolního prostředí, vyloučená fáze na hranicích zrn má rozdílnou korozní odolnost než samotná zrno, Obr. č. 7. [3] [1] [4]

### 3.1.9 Porušování korozi za napětí

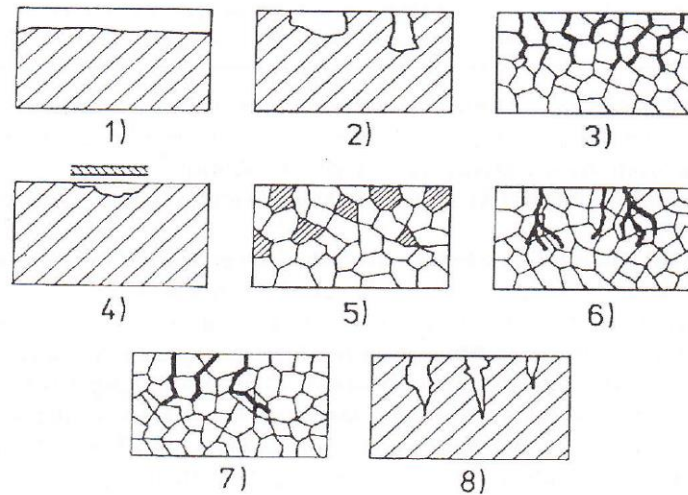
Vniká současným působením napětí a styku materiálu s korozivním prostředím. Původ napětí v materiálu může být různý : z vnějších příčin, zatížení prvku statickou silou či dynamickými silami, přičemž nás zajímá jen tahová složka napětí, z vnitřních příčin jako zbytková pnutí po tváření za studena, svařování, nevhodné tepelné zpracování, aj.. V případě kombinace působení korozivního prostředí a statického namáhání na materiál dochází k tzv. **koroznímu praskání**. V případě kombinace působení korozivního prostředí a dynamického namáhání na materiál dochází k tzv. **korozní únavě**.

**Korozní praskání** je způsobeno napětím v materiálu, tím vzniknu trhlín v materiálu, které vedou k porušení integrity materiálu a tím k jeho prasknutí. Samotné trhlíny působí jako koncentrátor napětí a ve spojení s korozivním prostředím dojde k šíření těchto trhlín, které vedou po hranicích zrn, mezikrystalově a nebo přes jednotlivá zrna, transkrystalově, Obr. č. 6.

**Korozní únava** je způsobena dynamickým namáháním materiálu a to hlavně její tahovou složkou. Porucha celistvosti povrchu materiálu vede ke tvorbě trhlín, které se šíří transkrystalicky a to hlavně z nehomogenit na povrchu materiálu (vruby, vměstky, hranice zrn). Ze spojení korozního prostředí a dynamického namáhání nejde určit mez únavy materiálu, ale je možno určit pouze tzv. časovou mez únavy! [4]

### 3.1.10 Selektivní koroze

Selektivní koroze je spojena s přednostním rozpouštěním některé fáze nebo složky slitiny, Obr.č.7. [1]



Obr.č.7: Schéma typů koroze kovových materiálů ( 1-rovnoměrná, 2- bodová, důlková, 3-mezikrystalová, 4-štrbinová, 5-selektivní, 6-transkrystalické korozní praskání, 7-interkrystalické korozní praskání, 8-korozní únava [1]

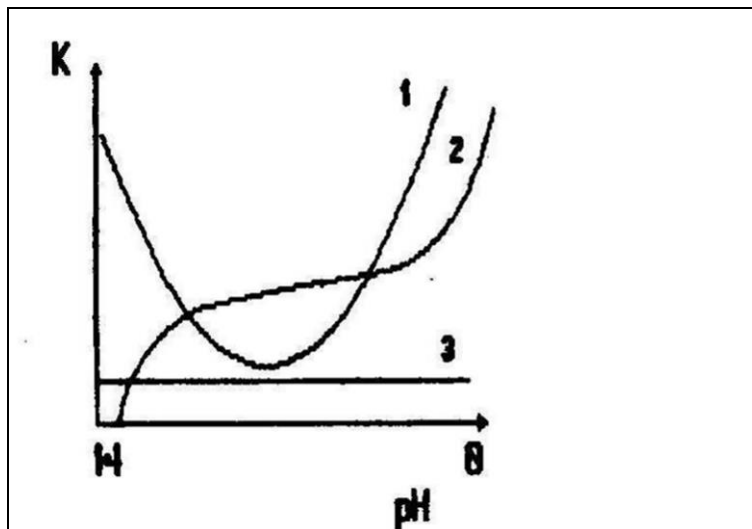
### 3.2 Korozní činitelé

Na průběhu koroze má vliv řada faktorů, které označujeme jako činitele korozního procesu:

Činitelé materiálu jsou jeho chemické složení materiálu, struktura materiálu, nesterodnost (nehomogenita) složení a struktury materiálu, přítomná vnitřní pnutí v materiálu, stupeň a druh znečištění materiálu, a také jakost a čistota povrchu materiálu.

Činitelé předmětu jsou jeho materiálová skladba, kdy předmět je sestaven z jednoho či více materiálů, utváření předmětu, zda-li je jednoduchý, má hladký tvar nebo tvarově členitý tvar s obtížně přístupnými místy s možným ukládáním nečistot, vlhkosti atd..

Činitelé prostředí jako je nehomogenita prostředí, teplota a teplotní změny v prostředí, pH prostředí, charakter proudění prostředí, na korodující povrch spolupůsobí přítomná tuhá fáze a její fyzikální a chemický charakter, a také přítomné látky korozi podporující, stimulatory (síra, čpavek, dusík, chlor) anebo potlačující, inhibitory, Obr. č. 8. [8]



Obr.č.8: Závislost korozní rychlosti vybraných kovů na pH prostředí : 1) hliník, zinek, olovo, 2) nikl, železo mangan, kadmium, 3) zlato, platina [8]

### 3.3 Korozní prostředí

#### 3.3.1 Voda

Pojmem voda se myslí jednak voda chemicky čistá, ale i voda, která v průběhu koloběhu v přírodě obsahuje i slabé příměsi různých látek. Přírodní vody lze rozdělit na vody, mořské, sladké, minerální a na vody brakické (sladké vody znečištěné mořskou vodou). Průmyslové vody můžeme rozdělit na vody pro energetické účely, které jsou vždy upravené, vody chladicí, které jsou upravené i neupravené, vody technologické, které jsou přidávány do technologických roztoků a na vody odpadní. Agresivita vody je ovlivněna obsahem kyslíku i dalších agresivních plynů, množstvím a typem rozpuštěných solí, přítomností organických látek a mikroorganismů, pH, teplotou, rychlostí proudění a obsahem pevných částic. Působení čisté, odvzdušněné, vody má na průběh koroze jen minimální vliv. Dalším důležitým činitelem, který zvyšuje agresivitu vody je oxid uhličitý, který způsobuje pokles pH a znehodnocuje inhibiční účinky  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{HCO}_3^-$ . Dále, oxid siřičitý také způsobuje pokles pH, sulfidy a amoniak způsobují korozní praskání. Soli, které jsou rozpuštěné ve vodě, mění hydrolyzou pH vody, zvyšují její vodivost, ovlivňují tvorbu vrstev na povrchu kovu a mohou být příčinou nerovnoměrných forem koroze. Příkladem vody o vysoké koncentraci rozpuštěných solí je mořská voda, až 4% roztoků solí, s dobrou elektrickou vodivostí. Největšího podílu v této vodě dosahují chloridy solí, které svou přítomností zapříčiňují vznik rovnoměrné koroze a mají i podstatný podíl na vzniku bodové a štěrbinové koroze. [4] [8]

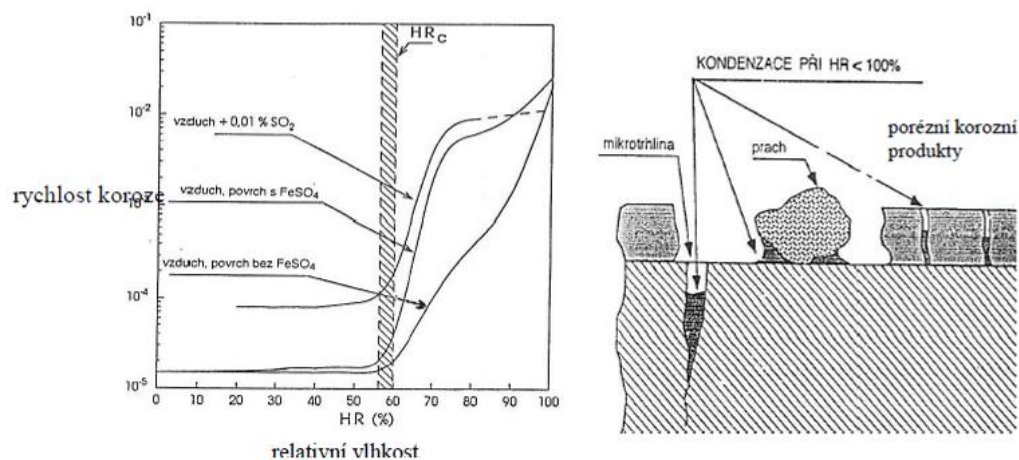
#### 3.3.2 Půda

Půda je jedním z nejsložitějších korozních systémů. V půdě se vyskytuje pevné fáze, plynná fáze i kapalná fáze. Spojením kapalně fáze a plynné fáze vzniká elektrolyt s depolarizační schopností díky plynům, které se v půdě vyskytují. Půdní koroze je elektrochemickou korozi (viz. 3.1.2.). Půdní korozi můžeme dále dělit na prostou půdní korozi, elektrochemickou korozi, na biologickou korozi a na korozi bludnými proudy. Průběh a agresivita půdní koroze je závislá na typu půdy, na schopnosti půdy zadržovat vodu a na chemických látkách v půdě obsažené, na provzdušnění půdy na pH půdy a v neposlední řadě i na teplotě půdy. Mezi nejagresivnější korozní půdní prostředí můžeme řadit jílovou půdu.

Tato půda zadržuje množství vody a zároveň při vysoušení praská, čímž do ní vstupuje množství vzduchu, následkem čehož, za přispění vyšší teploty a „kyselého“ pH, dojde k vytvoření ideálního prostředí pro tvorbu elektrochemické koroze. Opakem je půda písčitá, které nezadržuje vodu a je hodně provzdušněná, tím dochází k provětrávání půdy, k odvádění vlhkosti a k podstatnému omezení korozních dějů. Ochrana proti bludným proudům je využívána v závislosti na důležitosti zařízení, ale obecně se aplikují některé druhy elektrochemické ochrany (viz. 2.4.5.) a izolací zařízení polymerními povlaky. [4] [8]

### 3.3.3 Atmosféra

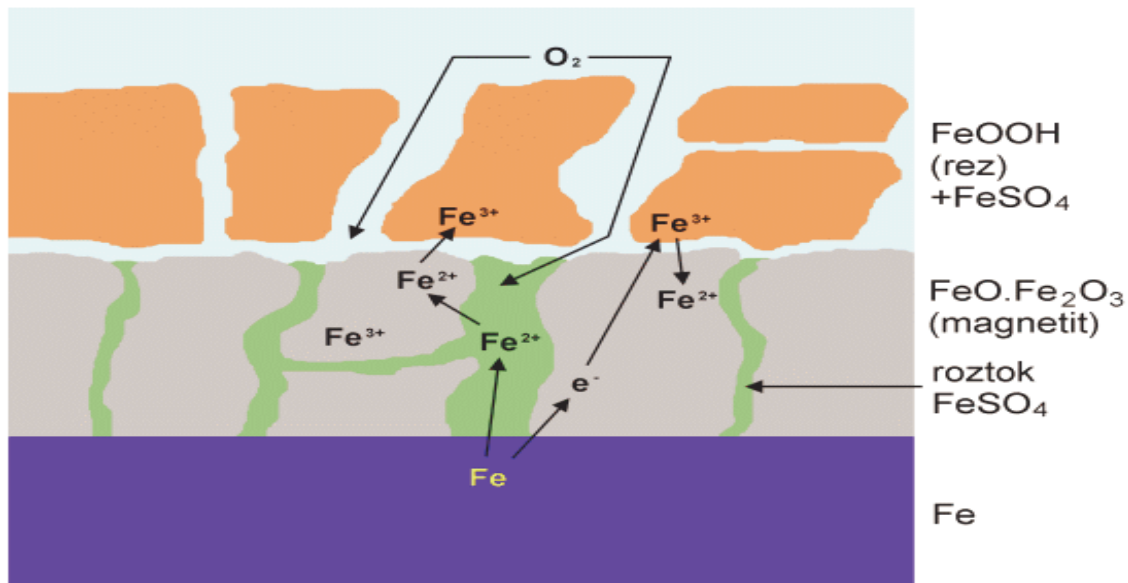
Koroze v prostředí atmosféry je primárně způsobena vzdušnou vlhkostí a tím tvorbou elektrolytu, kterým proniká kyslík jako katalyzátor koroze. Sekundárními zdroji koroze je samotná míra znečištění atmosféry oxidem uhelnatým, oxidem siřičitým, chlorovodíkem, amoniakem a aerosoly, dále je to teplota a pH prostředí. Tvorba elektrolytu o tloušťce 50 – 150 mikrometrů a přítomnost kyslíku spouští katodické děje s probíhající kyslíkovou depolarizací, kdy důsledkem tohoto pochodu je vznik elektrochemické koroze. Praktický vznik vrstvy elektrolytu o tloušťce, která již zaručuje vznik elektrochemické reakce je dán tzv. kritickou relativní vlhkostí. Tato kritická relativní vlhkost je podmíněna jednak různými chemickými látkami (např.  $\text{CO}_2$ ) rozpustnými ve vodě a jednak nerovnostmi, velmi malými póry a znečištěními na povrchu materiálu. Tyto okolnosti vedou ke snížení hodnoty kritické relativní vlhkosti a tím k tvorbě dostatečné tloušťky vrstvy elektrolytu dostačující k aktivaci elektrochemického děje, elektrochemické koroze, Obr. č. 9. Jako kritická relativní vlhkost se uvádí vlhkost 60-70%. [4] [8]



Obr.č.9: Vliv relativní vlhkosti a  $\text{SO}_2$  na atmosférickou korozi;  $\text{HR}_c$ -kritické hodnoty relativní vlhkosti; místa snadnější kondenzace vlhkosti a vzniku elektrolytu. [8]

Podle korozní agresivita rozdělujeme atmosféry do šesti stupňů : C1, velmi nízká, atmosféry uzavřených, klimatizovaných místností, v nichž nedochází ke kondenzaci vody, C2, nízká, které se vztahuje na prostory, v nichž dochází k občasné kondenzaci, C3, střední, která odpovídá suchým klimatům, C4, vysoká, která odpovídá vlhkým oblastem za působení atmosférických nečistot průmyslových měst, přístavů, C5, velmi vysoká, CX, extrémní, která odpovídá prostředím s extrémní vlhkostí nebo velmi vysokým průmyslovým znečištěním. V České republice je agresivita atmosféry střední, C3. Významným znečišťovatelem atmosféry je oxid siřičitý, který ulpívá na povrchu kovů a spolu s jeho schopností rozpouštět se ve vodě vzniká slabí roztok kyseliny sírové. Dalšími chemickými reakcemi vznikají

sulfidy, síran železnatý a síran železitý, což vede ke značnému napadání železa a jeho slitin, Obr. č. 10. Dalšími znečišťovateli atmosféry jsou oxid uhelnatý, chlorovodík, amoniak a aerosoly. [4] [11]



Obr.č.10: Průběh atmosférické koroze železa v atmosféře s obsahem SO<sub>2</sub> [11]

Vliv teploty na korozi je dvojnásobný. V případě zvýšení teploty, kdy následkem je odvlhčení materiálu tzn. snížení relativní vlhkosti a odpaření elektrolytu, se rychlost atmosférické koroze snižuje. V případě snížení teploty, kdy nedojde ke snížení relativní vlhkosti materiálu, se naopak atmosférická koroze urychluje. [4]

## 3.4 Zkoušení korozních vlastností

### 3.4.1 Korozní zkoušky

V současné době existuje mnoho způsobů zkoušení korozní odolnosti materiálů. Množství těchto zkoušek je poplatné množství druhů existujících, zkoušených materiálů, kdy tyto materiály se primárně zkoušejí na korozní odolnost aplikovaných povrchových nátěrů a povlaků.

Nejlepší vypovídající hodnotu o korozním chování materiálů mají zkoušky prováděné dlouhodobým provozem za reálných podmínek a to bez jakéhokoliv urychlení, tzv. **provozní zkoušky**. Z důvodu časové deprivace je standardním postupem provádění, převážně v laboratořích, tzv. **zrychlených zkoušek**. Zrychlené zkoušky jsou zkoušky, kdy simulujeme, tzn. nejméně napodobíme, provozní zkoušky a to upravením, zesílením, hlavních vlivů na průběh korozního děje, čímž tento děj v čase urychlíme.

### 3.4.2 Metodika zkoušení koroze

#### 3.4.2.1 Expoziční metody

Principem expoziční metody je simulace korozního prostředí, se zesílením hlavních korozních činitelů (teplota, ev. koncentrace prostředí) vyskytujících se v korozním systému.



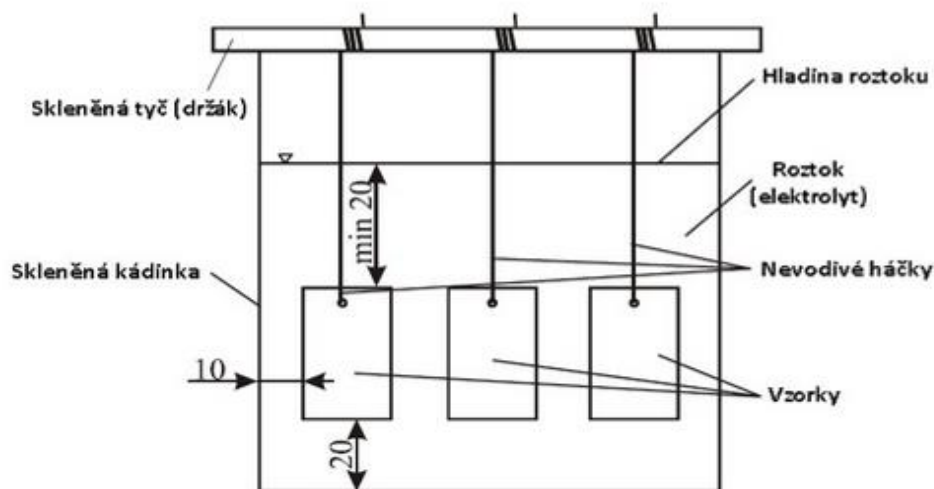
Tímto uměle vytvořeným dějem zrychlujeme průběhy experimentů. Délka experimentu se dá odhadnout ze vztahu:  $\tau = 5 / v$ , kde  $\tau$  je délka testu v hodinách a  $v$  je korozní rychlost vyjádřená v mm/rok (neplatí v případech inhibice, pasivity). Všeobecné podmínky pro provádění korozních zkoušek se řídí normou ČSN ISO11845 Korozie kovů a slitin – Všeobecné zásady pro korozní zkoušky. [12] [13]

### 3.4.2.1.1 Dlouhodobé atmosférické zkoušky

Dlouhodobou zkouškou je rozuměno vystavení zkoušeného vzorku materiálu po dobu expozice minimálně 6 - ti měsíců, lépe však alespoň po dobu 3 roků. Tyto vzorky jsou ploché a zavěšují se v nerezových rámečcích pod určitým úhlem sklonu, v místech korozního prostředí např. v městském prostředí aj.. Zkoušky je možné provádět i jako zrychlené viz. 3.4.1. Kromě atmosférického prostředí lze pro tyto testy využít i vodu, roztoky solí, roztoky kyselin, roztoky alkálií, atd.. [12] [13]

### 3.4.2.1.2 Zkouška úplným ponorem (Bac Ford Test)

Zkouška úplným ponorem je nejjednodušší expoziční metodou pro zjišťování korozní odolnosti materiálu. Probíhá tak, že přesně definovaný vzorek materiálu, o dané exponované ploše materiálu, zavěsíme na nevodivé, skleněné háčky a tyto ponoříme do korozního prostředí. Současně lze do zkušební nádoby umístit zkoumané zkušební vzorky ze stejného materiálu, event. stejného materiálu a stejného povlaku či nátěru. Vzdálenosti mezi vzorky, vzdálenost ode dna nádoby, výška hladiny roztoku atd. jsou stanoveny normou. Obr. č. 11. Doba expozice vzorku je v řádu dnů. [12] [13]



Obr.č.11: Schéma umístění vzorku ve zkušební nádobě v průběhu zkoušky úplným ponorem [12]

### 3.4.2.1.3 Zkouška v solné komoře

Parametry zkoušky v solné komoře jsou upraveny normou ČSN EN ISO 9227 Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou. Zkouška se provádí v, korozním prostředí, v mlze neutrálního roztoku chloridu sodného (NSS), v mlze okyseleného roztoku chloridu sodného (AASS) a v mlze okyseleného chloridu sodného a chloridu měďnatého (CASS). Pro zkoušku jsou navrženy speciální korozní komory, které musejí zajistit podmínky homogenity a rovnoměrného rozložení solné mlhy a to tak, aby kapky rozprašovaného roztoku, které kondenzují na povrchu zkoušeného vzorku, nestékaly zpět na ostatní zkoušené vzorky. [12] [13]

### 3.4.2.1.4 Zkouška v kondenzační komoře

Parametry zkoušky v kondenzační komoře jsou upraveny normou ČSN 03 8131 Korozní zkouška v kondenzační komoře. Používá se primárně pro zjišťování korozní odolnosti v atmosférách, kdy vzorek je vystaven simulaci průmyslově znečištěné atmosféry nebo i pro simulaci v atmosféře znečištění oxidem siřičitým. Zkušební zařízení není normalizováno, ale musí být u něj zaručeno nekapávání kondenzátu ze stěn zkušebního zařízení zpět na zkušební vzorky a musí být vyrobeno z nekorozivního materiálu. [12] [13]

### 3.4.2.2 Elektrochemické metody

Elektrochemické metody souhrnně vycházejí z principů elektrochemické koroze ve vodivém prostředí, kdy využívají závislosti korozního potenciálu a proudu procházejícího přes kovový povrch a jejich změny v čase. Při průchodu proudu přes kovový povrch se mění potenciál a na základě této změny můžeme určit korozní rychlost. [12] [13]

#### 3.4.2.2.1 Metoda polarizačního odporu

Měření polarizačního odporu je jednou z nejběžnějších a v praxi nejčastěji používaných metod zjišťování korozní rychlosti. Je to metoda nedestruktivního zkoušení a trvá pouze několik minut. Principem metody je ta skutečnost, že v oblasti polarizační křivky se nalézá lineární křivka, v lineárních souřadnicích, v okolí polarizačního potenciálu, Obr. č. 12. Převrácená hodnota směrnice této lineární části udává polarizační odpor  $R_p$ .

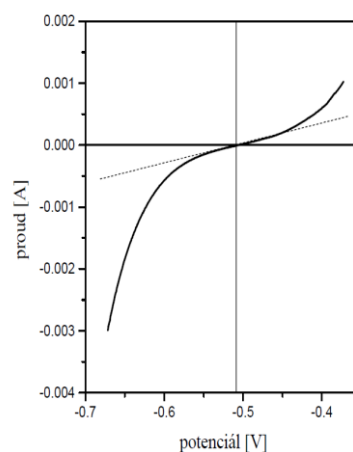
$$R_p = [d\epsilon / di]_{\epsilon \rightarrow 0} = \beta_a \beta_k / 2,303 j_{kor} (\beta_a + \beta_k) = B / j_{kor}$$

$\beta_a, \beta_k$  – sklony Tafelových oblastí,

$j_{kor}$  – korozní proudová hustota při korozním potenciálu  $E_k$ , kdy  $j=0$ ; ukazatel korozní rychlosti,

$B$  – konstanta úměrnosti; určována experimentálně.

Z rovnice vyplývá, že polarizační odpor je nepřímo úměrný korozní rychlosti. [10] [4]



Obr.č.12: Lineární úsek na polarizační křivce v lineárních souřadnicích [4]

#### 3.4.2.2.2 Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS)

Tato metoda je využitelná v případech, kdy měření provádíme na vzorcích s elektricky nevodivým nátěrem nebo na materiálech, které v testovaném prostředí vytvářejí pasivní

vrstvu s velkým polarizačním odporem. Toto metodu dále můžeme využít v elektrolytech s malou vodivostí. Podstatou této metody je přivedení střídavého napětí o dané frekvenci, poté provedeme měření impedance, tzn. velikosti potenciálu a proudové hustoty a jejich vzájemný fázový posun. Výsledkem měření EIS je logaritmická frekvenční charakteristika korozního systému. [12] [13]

### 3.4.2.2.3 Galvanostatické zkoušky

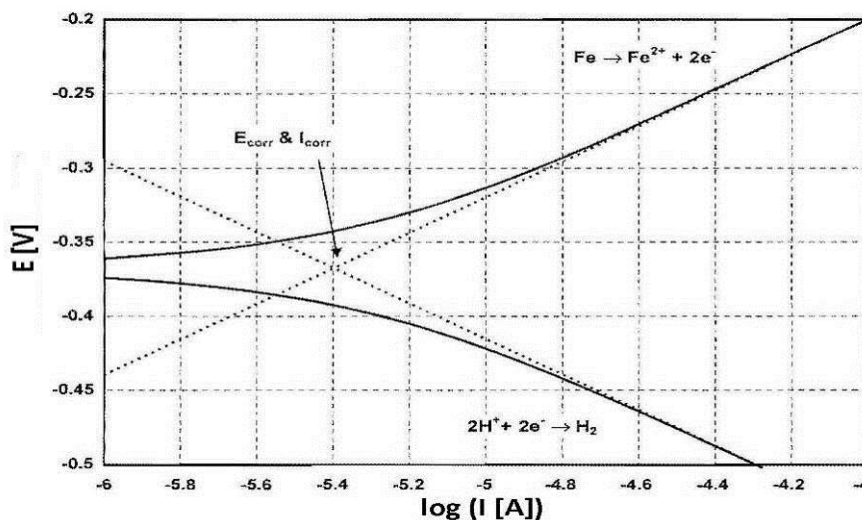
Podstatou galvanostatické zkoušky je měření potenciálu zkoumaného vzorku materiálu vůči referenční elektrodě. V průběhu zkoušky je udržována konstantní proudová hustota, která vzorek zkoumaného materiálu katodicky nebo anodicky polarizuje. Po dosažení konstantní proudové hustoty průběžně zaznamenáváme potenciál zkoumaného vzorku materiálu v závislosti na čase. Po ustálení potenciálu zkoumaného vzorku materiálu nám tato hodnota určuje velikost polarizace. [12] [13]

### 3.4.2.2.4 Potenciostatické zkoušky

Podstatou potenciostatické zkoušky je měření proudové hustoty vůči referenční elektrodě, přičemž elektrodový potenciál je udržován na konstantní hodnotě. [12] [13]

### 3.4.2.2.5 Potenciodynamické zkoušky

Podstatou potenciodynamické zkoušky je měření závislosti proudové hustoty zkoumaného vzorku materiálu vůči referenční elektrodě. Potenciál je postupně měněn a vzorek se chová jako anoda i jako katoda. Vynesením závislosti proudové hustoty na vloženém potenciálu získáme tzv. potenciodynamickou polarizační křivku, Obr. č. 13. Tato zkouška se používá především na vzorcích bez povrchové úpravy a v dobře vodivých elektrolytech, a to proto aby byla zabezpečena dostatečná elektrická vodivost a z toho vyplývající nízké hodnoty polarizačních odporů. [12] [13]



Obr.č.13: Potenciodynamická křivka železa [12]

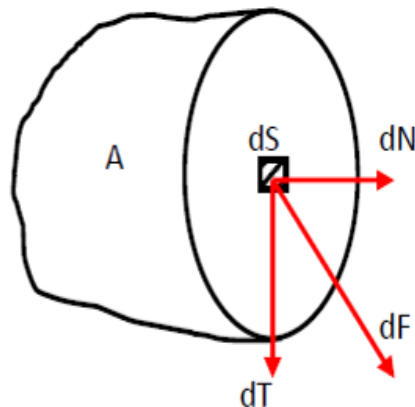
## 4 Zbytková napětí a jejich měření

### 4.1 Napětí mechanická

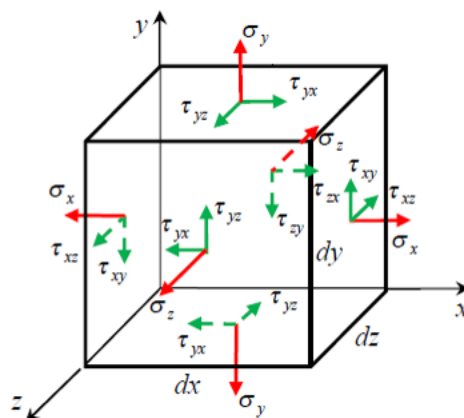
Vznik mechanického napětí je stavem tělesa, kdy na něj působí nějaké vnější síly anebo je to míra rozložení vnitřních sil v tělese, způsobená působením vnějších sil na elementární plošku tělesa. Výsledkem působením těchto sil může být vznik deformace, zdeformování, změna tvaru tělesa. Mechanickým napětím rozumíme fyzikální veličinu pomocí, které popisujeme namáhání těles působením vnějších sil.

### 4.2 Typy napjatosti

Rozeznáváme tři typy napjatosti: prostorovou napjatost, rovinnou napjatost a jednoosou napjatost. Obecně je působení vnitřních sil vyjádřeno namáháním elementární plošky  $dS$  tělesa vnitřní silou  $dF$ , Obr. č. 14. Tuto sílu  $dF$  na elementární plošce můžeme rozložit do směru normály  $dN$  a do směru tečny  $dT$ . V kolmém směru působí normálová síla  $dN$ , které vyvolává normálové napětí  $\sigma$  a v tečném směru působí smyková síly  $dT$ , které vyvolávají smyková napětí  $\tau$ . Prostorovou napjatost znázorňujeme pomocí tzv. tenzoru napětí, který vychází z tzv. elementární krychle, Obr. č. 15, a je popsán v souřadnicové soustavě  $xyz$  9-ti orientovanými složkami napětí, Obr.č.15, které je možné uspořádat do tvaru matice, Obr.č.16. Na hlavní diagonále matice se nacházejí prvky normálových složek napětí a ostatní prvky v matici reprezentují smykové složky napětí, Obr. č. 16. [15]



Obr.č.14: Rozložení síly  $dF$  do normálového  $dN$  a tečného  $dT$  směru [15]



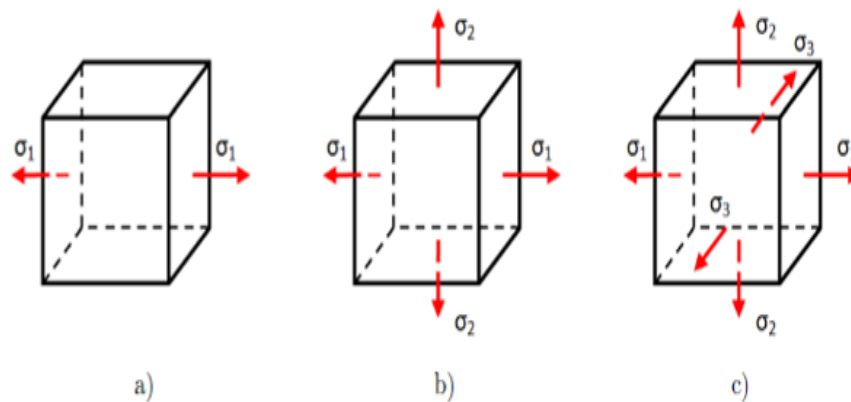
Obr.č.15: Elementární krychle s orientovanými složkami napětí [15]

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Obr.č.16: Tenzor napjatosti [15]

Pro smykové složky platí tzv. zákon sdužených smykových sil, který říká, že „složky smykových napětí působící ve dvou navzájem kolmých řezech kolmo k průsečnici těchto řezů jsou co do velikosti stejné a mají takový smysl, že obě směřují buď k průsečnici rovin, v nichž působí, nebo obě směřují od ní“ [16] a pak tedy platí, že :  $\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau_z$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx} = \tau_y$ ,  $\tau_{zy} = \tau_{yz} = \tau_x$ . Tento zákon tudíž upravuje působení původních 9-ti složek napětí na 6 složek napětí tzn. 3 normálové složky napětí a 3 smykové složky napětí.

Prostorovou napjatost můžeme vyjádřit také pomocí tzv. hlavních napětí  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , Obr.č.17c). Hlavní napětí jsou normálová napětí působící v hlavních rovinách. Hlavní roviny jsou takové roviny v tělese, kde smykové složky napětí jsou rovna nule a je vyjádřena podmínkou, že žádné z hlavních napětí není rovno nule. Tenzor napjatosti hlavních napětí, pak píšeme ve tvaru, viz. Obr. č.18. [17] [16]



Obr.č.17: Tyty napjatosti: a) jednoosá napjatost, b) rovinná, dvouosá napjatost, c) prostorová, trojosá napjatost [15]

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

Obr.č.18: Tenzor napjatosti hlavních napětí [15]

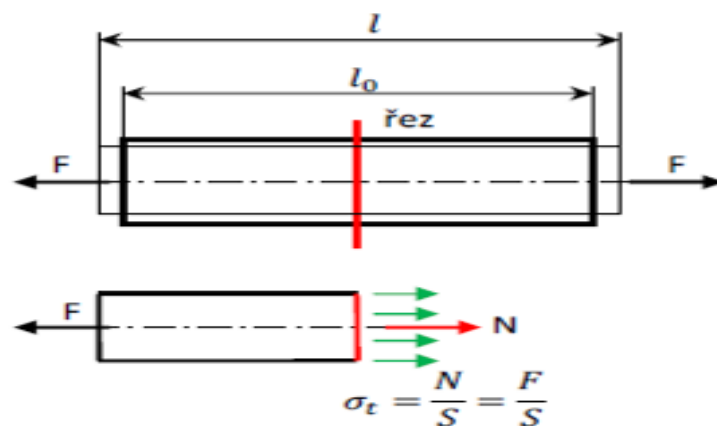
Rovinná napjatost, Obr. č. 17b), je definována tak, že všechny nenulové složky napětí leží jen v jedné rovině a všechny ostatní složky jsou nulové tzn., že jedno z hlavních napětí je rovno nule a ostatní hlavní napětí jsou nenulová,  $\sigma_1 \neq 0$ ,  $\sigma_2 \neq 0$ ,  $\sigma_3 = 0$ . Tento případ napjatosti se často vyskytuje při kombinovaném namáhání. [17] [16]

Jednoosá napjatost, Obr. č. 17a), je definována tak, že jen jedna normálová složka napětí je nenulová a ostatní jsou rovny nule tzn., že dvě z hlavních napětí jsou rovny nule a jedno hlavní napětí je nenulové,  $\sigma_1 \neq 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_3 = 0$ . Tento stav napjatosti je tzv. prostým tahem či tlakem. [17] [16]

## 4.3 Základní druhy namáhání

### 4.3.1. Tah, Tlak

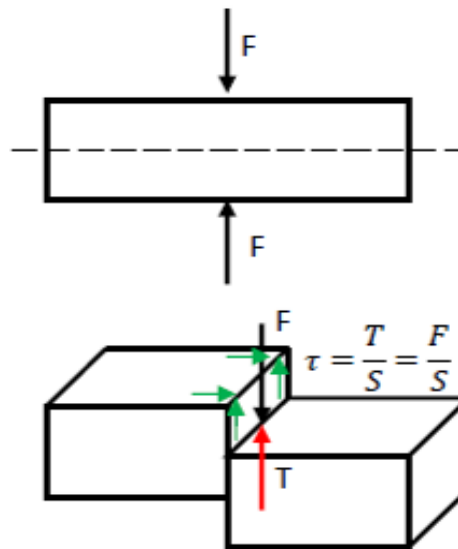
Namáhání tahem nebo tlakem je způsobeno dvěma silami, které jsou stejně velké, ale opačně orientované. Tyto dvě síly leží na shodné nositelce sil. Nositelka sil je osa procházející těžištěm daného profilu a nazývá se střednice, Obr.č.19. Při tahu působí síly ven z průřezu. Při tlaku působí síly do průřezu. Při početních operacích předpokládáme, že materiál průřezu je homogenní, že vnitřní síly jsou od obou konců dostatečně vzdáleny, jsou stejně velké a napětí jimi vyvozené je rovnoměrně po průřezu rozložené. Výpočetní vztah pro tah je,  $\sigma_t = \mathbf{F} / \mathbf{S} = \mathbf{N} / \mathbf{S}$ , výpočetní vztah pro tlak je  $\sigma_d = - \mathbf{F} / \mathbf{S} = \mathbf{N} / \mathbf{S}$ . Speciálním případem namáhání na tah, tlak je vzpěr, kterým jsou namáhány dlouhé štíhlé pruty. [15]



Obr.č.19: Namáhání prutu na tah [15]

### 4.3.2. Smyk, Střih

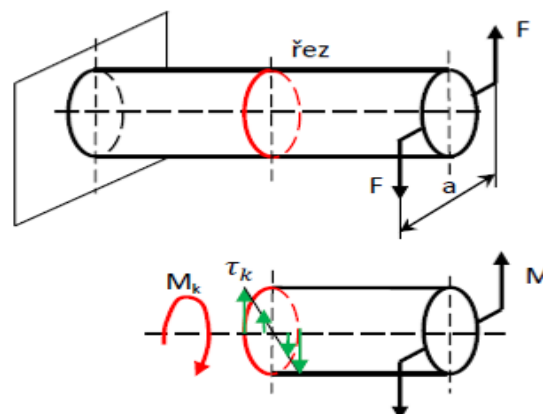
Namáhání smykem je způsobeno dvěma stejně velkými silami, ležícími na jedné nositelce v rovině řezu. Tyto dvě síly jsou orientovány proti sobě tzn. jsou to síly s opačným znaménkem, Obr. č. 20. Napětí vyvozené smykovými silami je v rovině kolmé k rovině řezu rozloženo rovnoměrně, stejně veliké, ale s opačnými znaménky. Výpočetní vztah pro smyk je,  $\tau = F / S = T / S$ . [15]



Obr.č.20: Namáhání na smyk [15]

### 4.3.3 Kрут

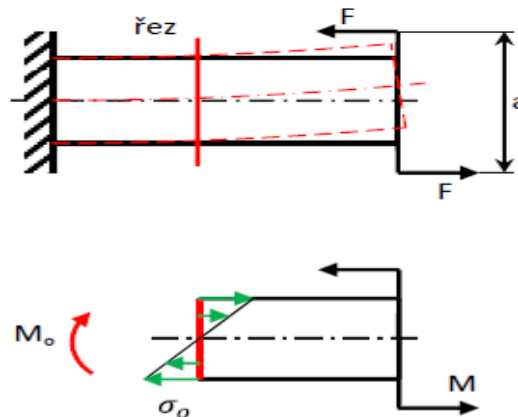
Namáhání krutem je dané tzv. silovou dvojicí (kroučícím momentem), která leží v rovině řezu. Při zatížení silovou dvojicí vzniká v průřezu smykové napětí, které je rozloženo okolo přímky s nulovou hodnotou v ose prutu, Obr. č. 21. Maximální hodnota smykového napětí je na vnější straně obvodu daného průřezu. Výpočetní vztah pro kрут je,  $\tau_k = M_k / W_k$ , kde  $M_k$  je kroučící moment a  $W_k$  je průřezový modul v krotu. [15]



Obr.č.21: Namáhání na kрут [15]

#### 4.3.4 Ohyb

Namáhání ohybem je dané tzv. silovou dvojicí (ohybovým momentem), která leží v rovině kolmé na rovinu řezu. Při zatížení silovou dvojicí vzniká v průřezu normálové napětí, které je po průřezu rozloženo nerovnoměrně, Obr. č. 22. Při zatížení průřezu ohybovým momentem se horní krajní vlákna prodlužují, tah, a spodní krajní vlákna zkracují, tlak. Těžištěm prochází neutrální osa, kde je napětí nulové. Maximální ohybové napětí je v krajních vláknech. Výpočetní vztah pro ohyb je,  $\sigma_o = M_o / W_o$ , kde  $M_o$  je ohybový moment a  $W_o$  je průřezový modul odporu v ohybu.[15]



Obr.č.22: Namáhání ohybem [15]

Pro všechna výše uvedená napětí platí výpočtová podmínka, že musí být menší či maximálně rovna dovoleným napětím pro daná namáhání a dané materiály! (dovolená napětí jsou taková, kdy nedojde k plastické deformaci materiálu a tím nedojde k porušení materiálu).

#### 4.4 Druhy zatížení

Zatížení je jakýkoliv jev, který vyvolá změnu napjatosti v průřezu. Podle časového průběhu zatížení rozeznáváme zatížení statická a dynamická. Dynamická zatížení dále dělíme na pulsující či tepavé zatížení, míjivé zatížení a cyklické či střídavé zatížení souměrné či nesouměrné. Tyto druhy zatížení se zpravidla simulují v laboratořích a to prováděním tzv. statických zkoušek a dynamických zkoušek.[18]

Mezi základní statické zkoušky, kdy působí statické zatížení, které je stálé a nemění svou hodnotu, patří zkouška pevnosti tahem, zkouška tvrdosti, zkouška tlakem, zkouška ohybem, zkouška stříhem, zkouška krutem. Mezi základní dynamické zkoušky, kdy působí proměnlivé zatížení (tah / tlak), patří zkouška rázem v ohybu.[18]

Těmito zkouškami se zjišťuje odolnost materiálu vůči výše uvedeným druhům namáhání a v praxi spíše se vyskytující kombinacím těchto druhů namáhání tzv. kombinovaná namáhání (např. tah – ohyb tj. sourodé namáhání, ohyb – krut tj. nesourodé namáhání, aj.). Na vlastnosti materiálů má značný vliv také teplota, kdy se při určitých teplotách mění krystalická struktura materiálů a tím se mění i vlastnosti těchto materiálů. Všechny výše uvedené zkoušky statické i zkoušky dynamické jsou normovány a jsou podrobněji popsány v odkazech [18][19] této práce.



## 4.5 Vložená a zbytková napětí

*Vložená napětí* vznikají působením vnějších sil a momentů na těleso tzn., že vznikají silovým působením na těleso. Toto silové působení je obvykle ohraničeno i časem působení vnějších sil na těleso. Jestliže je silové působení na těleso tak velké, že vyvolá pružnou deformaci tělesa, tak stav napjatosti, těmito silami vyvolaný, odezní až po úplném odlehčení tělesa. Jestliže je silové působení na těleso tak velké, že způsobí plastickou deformaci tělesa, tak po odlehčení od těchto sil, vznikají v tělese, kromě deformace krystalické mřížky v podobě např. prodloužení tělesa, i tzv. zbytková napětí. [22]

*Zbytková napětí* jsou charakteristická vnitřním napětím, které v tělese zůstává i po odstranění silového působení vnějších sil působících na těleso.[22] Podle tzv. Genkova teorému jsou *zbytková napětí*, „rovna rozdílu mezi skutečnými napětími v pružně plastickém tělese a fiktivními napětími, které by v něm vznikly za předpokladu ideálně pružného materiálu“. [23] Vložená napětí vznikají působením vnějších sil na povrch tělesa (obrábění, kuličkování, atd.), anebo jinými mechanismy, např. přítomností nehomogenního teplotního pole v tělese. Zbytková napětí dělíme podle objemu, v kterém dosahují rovnováhy na napětí 1. druhu, 2. druhu a 3. druhu. [22]

### 4.5.1 Zbytková napětí 1. druhu, makroskopická

Makroskopická napětí vznikají při zatížení tělesa vnějšími silami, jehož důsledkem je ovlivnění makroskopických pevnostních vlastností materiálu, jsou přibližně homogenní ve velkých objemech, řádově větších než je velikost zrn, jsou konstantní co do směru a v celém svém objemu jsou v rovnováze, Obr. č. 30. [22] [23]

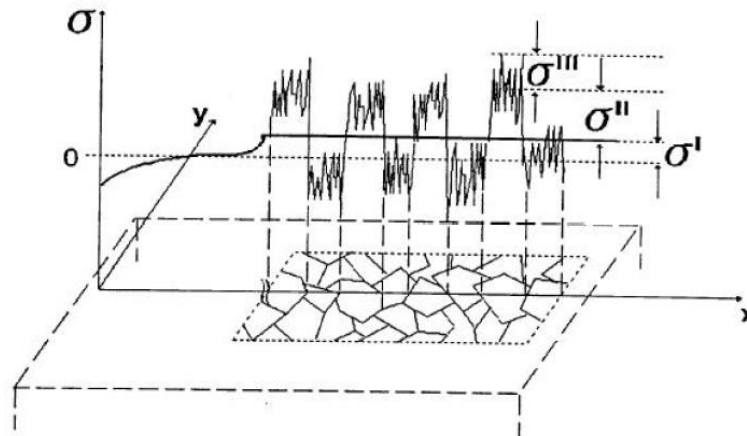
### 4.5.2 Zbytková napětí 2. druhu, mikroskopická

Mikroskopická napětí vznikají v objemech velikosti zrn, v těchto objemech jsou homogenní a v rovnováze. Jsou propojeny anizotropií jednotlivých zrn, orientací krystalografických rovin, výskytem různých fází materiálu, atd. Jsou popsána jako průměrná odchylka od makroskopického napětí v daném místě, Obr. č. 30. [23]

### 4.5.3 Zbytková napětí 3. druhu, submikroskopická

Submikroskopická napětí jsou nehomogenní a to řádově v meziatomových vzdálenostech. Projevují se jako mřížové poruchy v reálných krystalech např. výskytem dislokací. Jsou popsána jako průměrná odchylka od mikroskopického napětí v daném místě, Obr. č. 30. [22] [23]

Zbytková napětí se obvykle v praxi vyskytují současně a jsou daná vztahem,  $\sigma = \sigma^I + \sigma^{II} + \sigma^{III}$ . Pod pojmem zbytková napětí obvykle rozumíme napětí 1. druhu, jehož přítomnost se projeví např. rozměrovými či tvarovými změnami tělesa, tzn., že napětí 1. druhu má vliv na pevnost a deformační schopnosti tělesa. Napětí 2. druhu a napětí 3. druhu mají vliv na např. korozní odolnost materiálu. [22] [23]



Obr.č.30: Druhy zbytkových napětí –  $\sigma^I$  - makroskopické napětí,  $\sigma^{II}$  - mikroskopické napětí,  $\sigma^{III}$  - submikroskopické napětí [22]

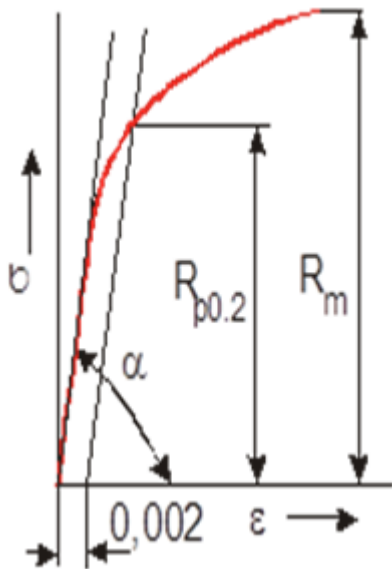
## 4.6 Příčiny vzniku zbytkových napětí

### 4.6.1 Nerovnoměrné plastické deformace

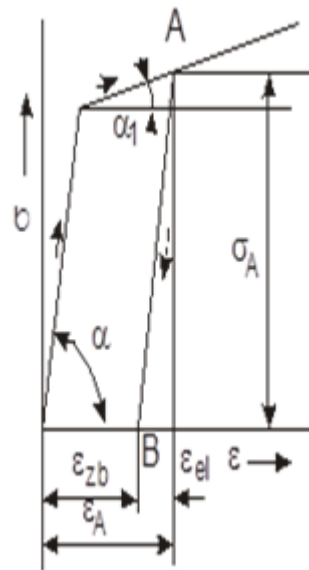
Nerovnoměrné plastické deformace vznikají působením silových účinků mechanických sil a momenty těmito silami vyvozenými a při takových technologických procesech, kdy nedochází k velkému zvýšení teploty při tváření součástí. V tvářené součásti v povrchové vrstvě materiálu vzniká plastická deformace, doprovázená tlakovými napětími a zároveň v jádře namáhané součásti probíhá elastická deformace součásti, doprovázená tahovými napětími. Velikost a rozložení těchto napětí v hloubce materiálu je závislé na stupni přetvoření povrchové vrstvy materiálu součásti, které je závislé na průběhu a podmínkách vnějšího zatěžování a na vlastnostech materiálu. [22]

Vznik zbytkových napětí, zapříčiněných plastickou deformací, lze popsat i na pracovním diagramu, který platí pro většinu konstrukčních ocelí, Obr. č. 31. Zjednodušená podoba tohoto pracovního diagramu je patrná z Obr. č. 31. Na Obr. č. 31 pozorujeme, že po překročení meze kluzu materiálu a následném odlehčení od zatížení se materiál vrací do původní polohy v grafu, ale ne již po původní napěťové křivce, ale po, s touto křivkou rovnoběžnou, nové křivce, která je trvale deformovaná o hodnotu poměrného prodloužení

$\epsilon_{zb} = \epsilon_A - \epsilon_{el}$ . Pro vznik zbytkových napětí je nutné zabránit rozměrovým změnám zdeformované vrstvy materiálu tzn., že navodíme situaci, kdy dojde k plastické deformaci povrchu součásti, tlakové napětí, a zároveň situaci, kdy dojde k elastické deformaci v jádře zatěžované součásti, tahové napětí. Příkladem pro tuto situaci je namáhání nosníku v ohybu, kdy povrch nosníku, jeho krajní vlákna jsou plasticky, tlakově, namáhána a jádro nosníku jeho vnitřní vlákna jsou elasticky, tahově, namáhána. Po odlehčení nosníku dojde ke vzniku trvalých zbytkových napětí. Obdobným způsobem vznikají zbytková napětí při obráběcích a tvářecích procesech, kde již nebyla vhodně aplikována následná tepelná zpracování pro odstranění zbytkových pnutí v materiálu. [22]



Obr.č.30: Pracovní diagram [22]



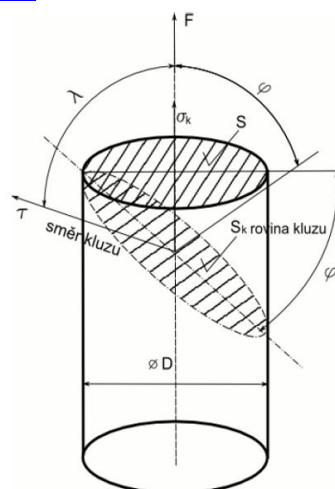
Obr.č.31: Zjednodušený pracovní diagram [22]

Plastická deformace materiálu je způsobena posunem atomů o vzdálenost větší než je mřížková konstanta a je způsobena smykovými napětími  $\tau$ . Dochází k trvalému posunu atomů z jejich rovnovážných poloh, kdy tyto nové polohy atomů jsou zachovány i po odlehčení od působení vnějších sil, které tuto nerovnovážnou polohu atomů způsobili. K trvalému posunutí dochází po překročení tzv. kritického smykového napětí  $\tau_{kr}$ . K plastické deformaci dochází prostým skluzem – translací anebo dvojčatěním. V případě prostého skluzu – translace se vlivem velkého množství mřížkových poruch v krystalech kovu, dislokací, a vlivem působení  $\tau_{kr}$  se uvede část dislokací do pohybu kluzem po kluzné rovině. [29]

Vztah pro výpočet smykových napětí v rovině kluzu pro příklad tahové zkoušky je popsán rovnicí (5).

$$(5) \quad \sigma_K = F / S_K = F \cos \varphi / S_K, [29]$$

kde  $\sigma_K$  je mez kluzu a úhel  $\varphi$  je úhel mezi rovinnou skluzu a osou zkoumaného vzorku. V rovinně skluzu působí i smykové napětí  $\tau$ , které svírá s osou vzorku a tedy i s normálovým napětím  $\sigma_K$  úhel  $\lambda$ , Obr. č.31.1. [29]



Obr.č.31.1:Vztah mezi smykovým a normálovým napětím při jednoosém tahovém namáhání zkušební vzorku [29]

Vztah mezi normálovým a smykovým napětím je popsán vztahem (6).

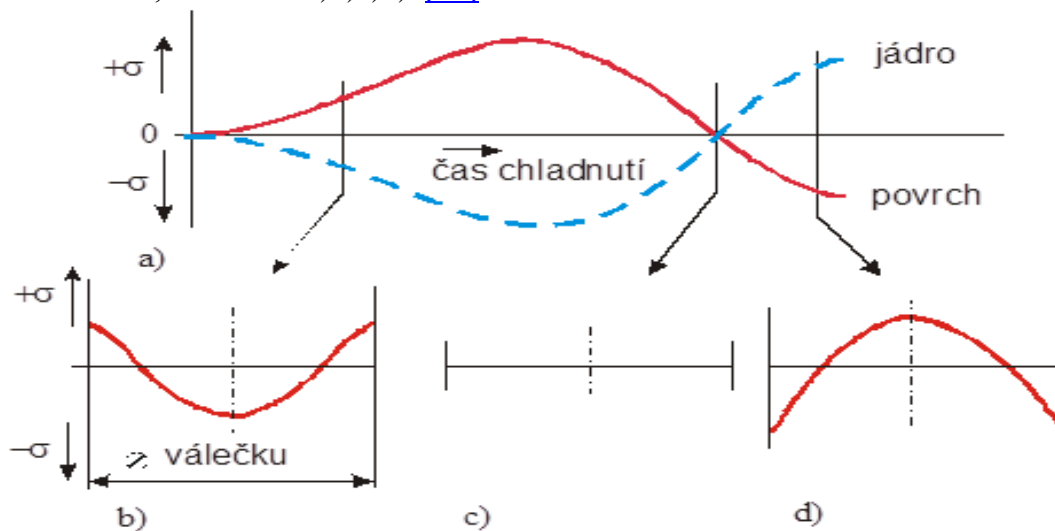
$$(6) \quad \tau / \sigma_K = \cos \lambda \quad [29]$$

Po dosazení vztahu (6) do vztahu (5), úpravou dostaneme vztah (7).

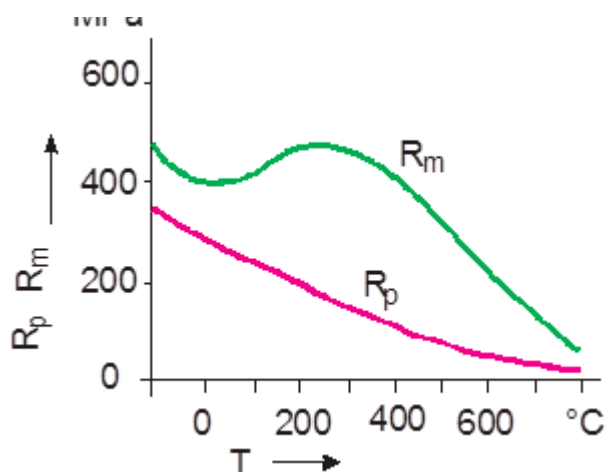
$$(7) \quad \tau = \frac{F}{S} \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda = \tau_{kr} \quad [29]$$

#### 4.6.2 Nerovnoměrný ohřev a ochlazování

Nerovnoměrný ohřev a ochlazení je další příčinou vzniku zbytkových napětí v materiálu, kdy největší vliv na vznik zbytkových napětí má rychlost ohřevu či ochlazení materiálu. Mechanismus vzniku těchto zbytkových napětí můžeme sledovat na válečku zkušebního vzorku, Obr. č. 32 a)b)c)d). [22]



Obr.č.32: Průběh napětí během chladnutí válečku [22]



Obr.č.33: Závislost Rp, Rm na teplotě [22]

Ohřejeme-li vzorek válečku pod teplotu A1 a poté prudce ochladíme, projeví se čistě tepelná napětí, Obr. č. 32 a). Celý proces ochlazení můžeme rozdělit do třech fází.

První fázi je smrštění povrchové vrstvy materiálu vlivem ochlazení, ale tomuto smrštění brání stále ještě horké jádro válečku materiálu. Tato první fáze je charakterizována existencí tlakového napětí v povrchové vrstvě materiálu válečku a zároveň existencí tahového napětí v jádře válečku, Obr. č. 32 b). Velikost těchto napětí může dosáhnout pouze meze kluzu materiálu válečku. S prodlužující se dobou ochlazování stoupá mez kluzu a mez pevnosti materiálu, Obr. č. 33. [22]

Druhá fáze je charakteristická postupným vyrovnáním teplot na povrchu válečku a v jádru válečku. Tím dojde k tomu, že se tahová napětí v jádře válečku a tlaková napětí na povrchu válečku vyrovnají, Obr. č. 32 c). [22]

Třetí fáze je charakteristická tím, že povrch válečku má již konečnou teplotu a tím i konečný rozměr, ale jádro válečku se stále ochlazuje a smršťuje se. Tomuto smršťování brání teplotně i rozměrově stabilizovaná povrchová vrstva válečku. Po úplném vyrovnání teplot povrchu válečku a jádra válečku, vznikají na povrchu válečku tlaková napětí a v jádře válečku tahová napětí, Obr. č. 32 d). [22]

#### 4.6.3 Nerovnoměrné změny struktury

V důsledku nerovnoměrné změny struktury dochází ke vzniku napětí, která označujeme jako napětí strukturní či napětí transformační. Tato napětí vznikají zpravidla při vyšších teplotách, kdy dochází ke změně objemu fází a ke změně tytu krystalické mřížky než měl původní materiál. [22]

*Příkladem je ohřev povrchové vrstvy materiálu kalené oceli, kdy může dojít k rozpadu zbytkového austenitu, k přeměně krystalické mřížky tetragonálního martenzitu na krystalickou mřížku kubického martenzitu a k vytvoření ferito-karbidické směsi troostitu a sorbitu. Při teplotě 400 – 500 °C se vytváří troostit, při teplotě 500 – 600 °C sorbit a při teplotě 600 – 700 °C perlit.*

*Tyto fázové přeměny a nové strukturní složky mají nejen rozdílné mechanické vlastnosti, ale také rozdílné měrné objemy. Vytvoření různých struktur v povrchové vrstvě materiálu samo o sobě vede ke vzniku zbytkových strukturních napětí.*

*Mechanismus vzniku zbytkových napětí při změně struktury úzce souvisí především s teplotou. Při ohřevu nad teplotu  $A_3$  (Teplota  $A_3$  pro čisté železo = 911 °C. Při této teplotě dochází překrystalizaci  $\gamma \rightarrow \alpha$ ). Probíhají při ochlazování tři základní procesy ovlivňující tvorbu zbytkových napětí:*

- a) první tepelné smršťování (před strukturní změnou),
- b) zvětšování objemu v průběhu strukturní změny (většinou),
- c) druhé tepelné smršťování (po strukturní změně).

*Průběh zbytkových napětí závisí na rychlosti a způsobu ochlazování [29], což ovlivňuje probíhající změnu struktury a to jak kvalitativně (například stupeň rozpadu martenzitu), tak kvantitativně (dokončení změny v celém objemu, množství zbytkového austenitu). Dále závisí na chemickém složení, na tepelných vodivostech, teplotní roztažnosti materiálu, na mezi kluzu a na mezi pevnosti v rozhodujících fázích procesu. Například dokončování přeměny struktury až v konečné fázi chladnutí má za následek vznik tahových napětí v povrchové vrstvě, na rozdíl od tlakových napětí vznikajících při normálním průběhu tepelného zpracování. [22]*

V praxi se příčiny vzniku zbytkových napětí mohou různě kombinovat a vzájemně doplňovat ještě například o působení různých chemických pochodů, která generují rovněž zbytková napětí, jako jsou oxidace, koroze a galvanická pokovení.

## 4.7 Vybrané metody měření zbytkových napětí

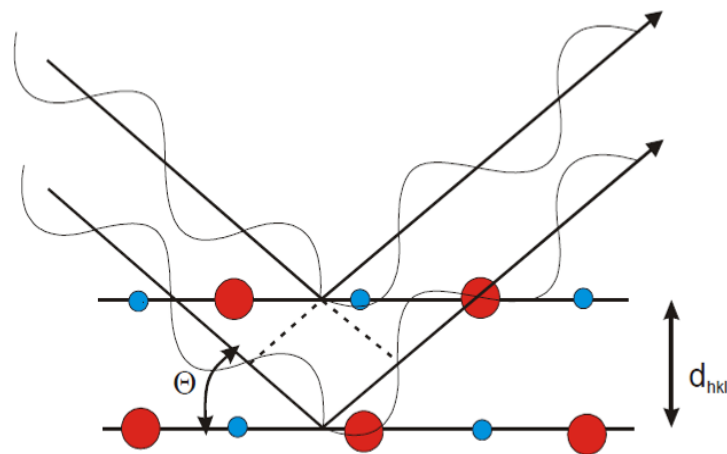
### 4.7.1 Nedestruktivní metody měření zbytkových napětí

#### 4.7.1.1 Rentgenová difrakce

Principem rentgenové difrakce je rozptyl rentgenových paprsků na krystalové mřížce materiálu. Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou  $\lambda \cong 10$  až  $0,01$  nm, které vzniká po dopadu termálně emitovaných a urychlených elektronů na kovový materiál, jako jsou měď, molybden nebo kobalt. Rentgenové záření, které je po filtraci monochromatické, se částečně absorbuje do materiálu a částečně se pod určitým úhlem od materiálu odrazí, čímž dojde k rozptylu záření tzv. difrakci. [4]

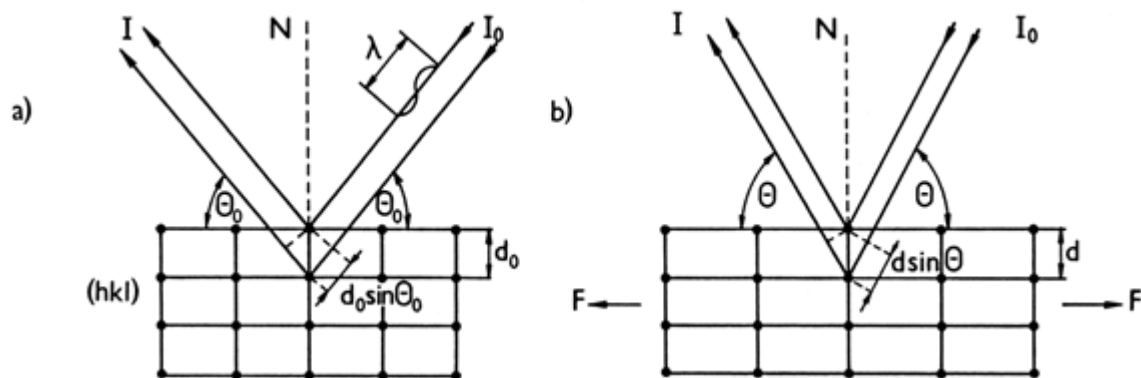
Rozptylem záření na sousedních mřížkových rovinách vyniká tzv. interferenční maximum ve směru difrakčního úhlu  $\theta$ . Tento difrakční úhel  $\theta$  je dán tzv. Braggovým vztahem,  $n\lambda = 2d \sin\theta$ . Odvození Braggova vztahu je patrné z Obr. č. 34, kde  $d$  je vzdálenost mezi sousedními rovinami v krystalické mřížce a indexy  $k, h, l$  jsou Millerovi indexy. [4]

Podmínkou pro vznik difrakce, tedy pro vznik Braggova vztahu je, že „každá rovina v krystalu rozptýlí určité množství záření, ale výsledný rozptyl od velkého počtu rovin bude mít dostatečnou intenzitu pro pozorování, pokud se vlny vycházející od všech rovin navzájem zesílí“. [4]



Obr.č.34: Odvození Braggova vztahu [4]

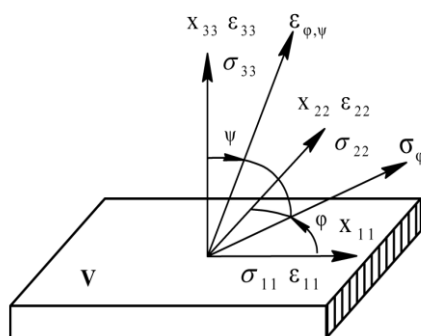
Podstatou rentgenové tenzometrie, pro měření zbytkových napětí, je tedy rozptyl, difrakce, rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností atomových mřížkových rovin vyvolaných napětím, Obr. č. 35 [22], tzn., že změna mezirovinné vzdálenosti se projeví změnou Braggova úhlu. [28]



Obr. č.35: Deformace vzdáleností mřížkových rovin ( $hkl$ ) a změny úhlové polohy interferenčního maxima;  $I_0$  a  $I$  jsou intenzity dopadajícího a difraktovaného svazku rentgenového záření; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou  $F$  [22]

Z Obr. č. 35 je patrné, že porovnáváme změnu vzdáleností  $d$  mezi sousedními rovinami v krystalické mřížce, když je tato mřížka v nezdeformovaném stavu a když je tato mřížka v zdeformovaném stavu.

Tyto hodnoty dosadíme do vztahu, popisující mřížkovou deformaci  $\varepsilon = d - d_0 / d_0$ , kdy  $d$  je vzdálenost sousedních silou zdeformovaných mřížkových rovin a  $d_0$  je vzdálenost sousedních nezdeformovaných mřížkových rovin. [22]



Obr.č.36: Systém souřadnic spojených se vzorkem V [22]

Podle Obr. č. 36, při splnění podmínky lineární teorie elasticity, lze mřížkovou deformaci  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  v libovolném směru  $\varphi\psi$  vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{\nu+1}{E} (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi + \frac{\nu+1}{E} (\sigma_{13} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi) \sin 2\psi + \frac{1}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22})$$

Úhel  $\varphi$  je směr napětí  $\sigma_\varphi$  vzhledem k ose  $x_{11}$ , úhel  $\psi$  je mezi osou  $x_{33}$  a směrem deformace  $\varepsilon_{\varphi\psi}$ , je normálou k povrchu.

Pro dvouosou napjatost, při ztotožnění mřížkové deformace  $\varepsilon$  s mřížkovou deformací  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  v libovolném směru  $\varphi\psi$  dostaneme základní rovnici rentgenografického měření napětí podle tzv. metody „ $\sin^2\psi$ “ ve tvaru:

$$\varepsilon_{\varphi\psi}^{hkl} = \frac{1}{2} s_2^{hkl} \sigma_\varphi \cdot \sin^2 \psi + s_1^{hkl} (\sigma_1 + \sigma_2)$$

, kdy

$$\sigma_\varphi = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi$$

Pro jednoosou ( izotropní ) napjatost dostaneme rovnici ve tvaru:

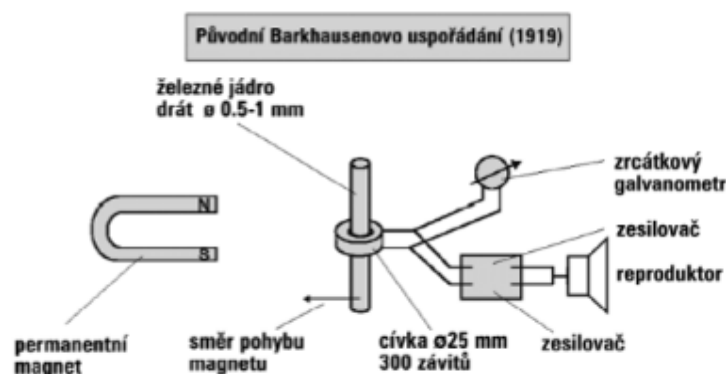
$$\varepsilon_{\varphi\psi}^{hkl} = \frac{1}{2} s_2^{hkl} \sigma \cdot \sin^2 \psi + 2s_1^{hkl} \sigma$$

$$\frac{1}{2} s_2^{hkl} = \left( \frac{\nu + 1}{E} \right)_{rtg}, \quad s_1^{hkl} = \left( -\frac{\nu}{E} \right)_{rtg}$$

$s_1, s_2$  - rentgenografické elastické konstanty pro reflektující systém rovin ( $hkl$ ).

#### 4.7.1.2 Barkhausenův šum

Jev známý jako Barkhausenův šum se využívá od konce sedmdesátých let, ke zjišťování strukturních a napěťových změn uvnitř feromagnetických materiálů. Objev tohoto jevu byl uskutečněn v roce 1919 profesorem H. G. Barkhausenem. Jeho experiment spočíval v přibližování a oddalování magnetu od jádra, kdy reproduktor, napojený přes cívku okolo jádra a přes zesilovač, generoval šum, Obr. č. 36. Tento šum souvisí s nespojitostmi v procesu magnetizace feromagnetika. Pokusy bylo zjištěno, že intenzita tohoto šumu souvisí s tvrdostí ocelového jádra v cívice, kdy s větší tvrdostí jádra šum, praskání, klesalo a naopak. Dále bylo zjištěno, že tahová napětí ve směru magnetizace šum zvyšují a tlaková napětí ve směru magnetizace šum snižují. [27]



Obr.č.36: Původní Barkhausenovo uspořádání [27]

Feromagnetický materiál můžeme popsat jako složeninu z malých magnetických oblastí podobných tyčovému magnetu. Těmito oblastem se říká domény. Tyto domény jsou navzájem odděleny tzv. doménovými stěnami. Domény se magnetizují podle krystalograficky významných směrů. Působíme-li na feromagnetický materiál vnějším magnetickým polem, domény se pohybují a to za předpokladu, že doména na jedné straně stěny se zvětší a doména na druhé straně stěny se zmenší. Výsledkem je změna v celkové magnetizaci vzorku materiálu. V případě, že je cívka z vodivého materiálu v blízkosti vzorku, pak změna magnetizace vzorku generuje v cívice elektrický puls. [27]

Signál, takto vzniklý, proniká do měřicí hloubky 0,1mm až 1,5mm a to z důvodu tlumení signálu tzv. vířivými proudy, které vznikají z důvodu pohybu domén. Regulace hloubky měření je závislá na frekvenčním rozsahu generovaného signálu a na vodivosti a na permeabilitě materiálu. [27]

Na intenzitu Barkhausenova šumu má vliv rozložení pružných napětí, které ovlivňují cestu, po které se domény ubírají směrem ke snadné magnetické orientaci. Tomuto jevu se



říká tzv. magnetoelastická interakce, tzn., že elastické vlastnosti materiálu ovlivňují doménovou strukturu materiálu a magnetické vlastnosti materiálu. Z důvodu magnetoelastické interakce u materiálů s pozitivní magnetostrikcí je u tahových napětí Backhausenův šum zvyšován a u tlakových napětí je Backhausenův šum snižován. Tento jev se využívá ke stanovení zbytkových napětí a k určení směru základních napětí. [27]

Dalšími významnými oblastmi, kde lze jev Backhausenova šumu s výhodou využít je zjišťování metalurgické struktury, kdy s rostoucí tvrdostí materiálu šum spojitě klesá a naopak a zkoušení vad, které mohou vyvolat změny v mikrostruktuře a napětí materiálu. [27]

#### 4.7.1.4 Magnetické metody

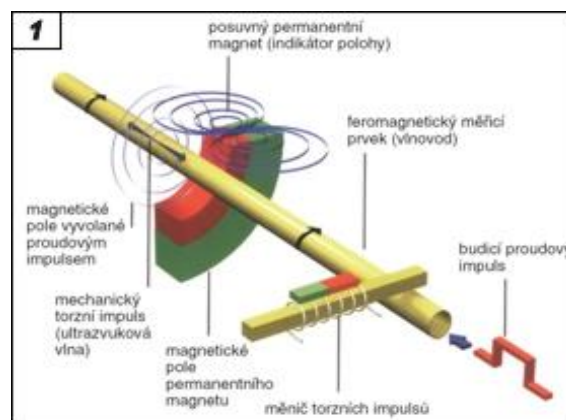
Magnetické metody jsou využitelná pouze pro měření feromagnetických materiálů a využívají pro měření zbytkových napětí reakci materiálu na působení střídavého magnetického pole.

Magnetoelastická metoda je založena na principu tzv. Barkhausenova jevu či šumu. Velikost tohoto šumu je jednak funkcí napětí v materiálu, ale i funkcí tvrdosti materiálu a funkcí jeho mikrostruktury. Na základě tohoto jevu je magnetoelastická metoda využitelná pro měření zbytkových napětí v materiálu, ale i pro kontrolu povrchových defektů materiálu. Měřená hloubka materiálu touto metodou se pohybuje od 0,1mm do 3mm. [25]

Magnetostrikční metoda je metoda, jejímž principem je změna rozměrů feromagnetického materiálu v magnetickém poli, tzv. Joulův jev. Pomocí bezdotykových magnetostrikčních snímačů je tudíž možné zaznamenat změnu vzdálenosti. Magnetostrikční snímače jsou sestaveny na základě magnetostrikčního Wiedemannova a Villariho jevu, Obr. č. 37.

*Wiedemannův jev spočívá v tom, že prochází-li dlouhou a tenkou tyčí z feromagnetického materiálu umístěnou v podélném magnetickém poli proud, namáhá se tyč krutem. Za Villariho jev se označuje změna magnetických vlastností, např. permeability, materiálu feromagnetické tyče, která je vyvolána její deformací v podélném směru.*

Principem magnetostrikční metody je tudíž měření zbytkových napětí pomocí změny vzdáleností v materiálu. Pomocí magnetostrikční metody při kmitočtu 50 Hz je ekvivalentní měřená hloubka 1mm až 2 mm, při 5 kHz je to 0,1 mm až 0,2 mm. [26]



Obr.č.37: Princip magnetostrikčního měření vzdáleností [26]

#### 4.7.1.5 Ultrazvukové metody

Ultrazvukové metody jsou založeny na vztahu mezi rychlostí šíření vlny a elastických konstant materiálu. Pro měření se používají podélné nebo příčně polarizované vlny a lze realizovat měření integrální přes celý průřez vzorku nebo měření povrchových napětí povrchovými vlnami. Využitím akustoelastického dvojlomu při měření příčně polarizovanými vlnami ve dvou na sobě kolmých rovinách je možno určit rozdíl hlavních napětí. Při současném měření podélnými a příčnými vlnami je možno eliminovat některé vstupní hodnoty, potřebné pro výpočet, protože obě vlny se šíří různou rychlostí.

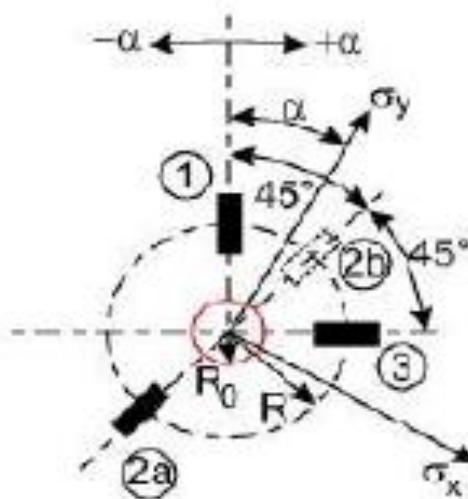
Měření zbytkového napětí je tedy integrální přes celý průřez materiálu. Rychlost šíření vlny se měří na základě měření echa odražené vlny a ze známé tloušťky materiálu. [25]

#### 4.7.2 Semidestruktivní a destruktivní metody měření zbytkových napětí

Principem měření zbytkových napětí semidestruktivní a destruktivní metodou je mechanické působení na zkoumanou součást. Zkoumání semidestruktivní metodou se provádí odběrem části vzorku ze součásti v místě tělesa, které nemá vliv na funkčnost součásti. Při této metodě dojde k částečnému poškození tělesa. Zkoumání destruktivní metodou je metoda, kdy dojde k nevratnému poškození součásti.

##### 4.7.2.1 Odvrtávací metody

Odvrtávací metody jsou metody semidestruktivní, kdy principem této metody je odebrání materiálu měřené součásti ve vhodném místě součásti a následné měření deformací okolního materiálu součásti. Postupuje se tak, že ve zvoleném místě vyvrtáme otvor okolo, kterého jsou rozmístěny senzory, tenzometry, ve tvaru růžice, Obr. č. 38. Tyto tenzometry následně po odvrtání materiálu změní deformaci, které vznikla porušením vnitřní silové a momentové rovnováhy v materiálu součásti. Změřené uvolněné deformace se vyhodnotí a pomocí odvozených teorií se určí průběh a velikost zbytkových napětí. Odvrtávací metoda vyžaduje vyvrtání otvoru o průměru 1 – 4mm do maximální hloubky rovné průměru vrtaného otvoru. [24]



Obr.č.38: Schéma tenzometrické růžice [24]

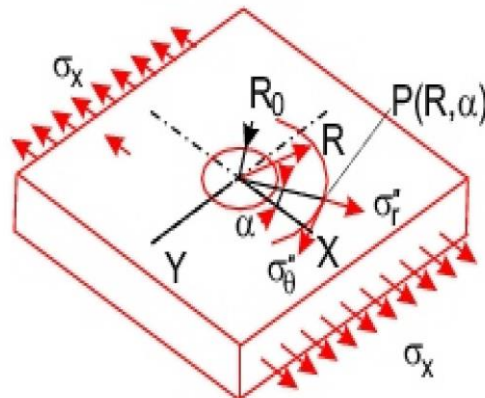
Nejjednodušší aplikované teorie je teorie použitá na tzv. rozlehlé desce s provrtaným otvorem, která je zatížena jednoosou napjatostí, Obr. č. 39. Velikost uvolněné deformace se zjistí porovnáním deformace před vyvrtáním otvoru v desce a po vyvrtání otvoru v desce. Za předpokladu, že deska je izotropní a homogenní získáme aplikací do Hookova zákona radiální deformace  $\epsilon_r$  a tangenciální deformace  $\epsilon_\theta$  ve vztazích podle rovnic (1). [22][24]

$$(1) \quad \begin{aligned} \epsilon_r &= A + B/r^2 + C/r^4 \\ \epsilon_\theta &= A - B/r^2 + C/r^4 \end{aligned}$$

Pro konstanty úměrnosti  $A, B, C$  platí vztahy podle rovnic (2).

$$(2) \quad \begin{aligned} A &= \frac{1}{2} (\epsilon_r + \epsilon_\theta) \\ B &= -r^2 (\epsilon_r - \epsilon_\theta) \\ C &= \frac{1}{2} (r^4 \epsilon_r + r^4 \epsilon_\theta) \end{aligned}$$

V případě jednoosé napjatosti se měří radiální deformace  $\epsilon_r$ , protože je téměř třikrát větší než tangenciální deformace. [22]



Obr.č.39: Tenká deska s jednoosým namáháním [24]

Pro dvojosou napjatost, kdy materiál je lineárně elastický a izotropní, získáme obdobné vztahy metodou tzv. superpozice. [24][22]

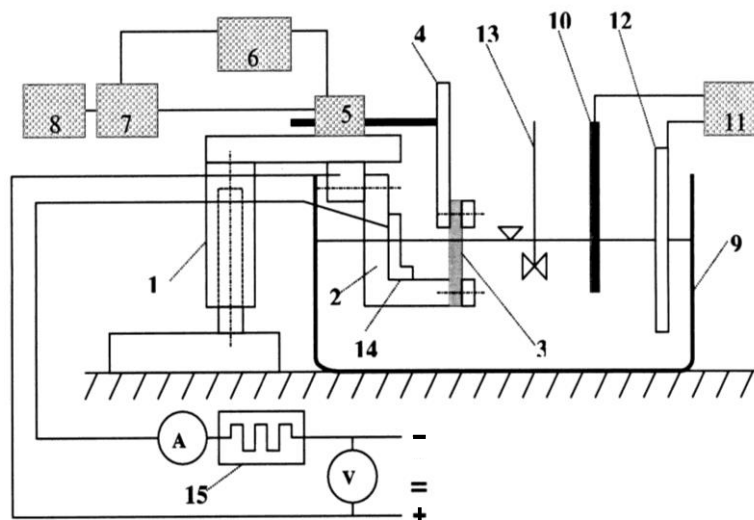
#### 4.7.2.2 Odstraňování vrstev

Metoda odstraňování vrstev je destruktivní metoda zjišťování průběhů podpovrchových zbytkových napětí. Principem této metody je postupné odebírání tenkých povrchových vrstev materiálu. Tyto vrstvy se odebírají mechanickými způsoby, chemickými způsoby anebo efektivněji elektrolytickým, anodovým, rozpouštěním.

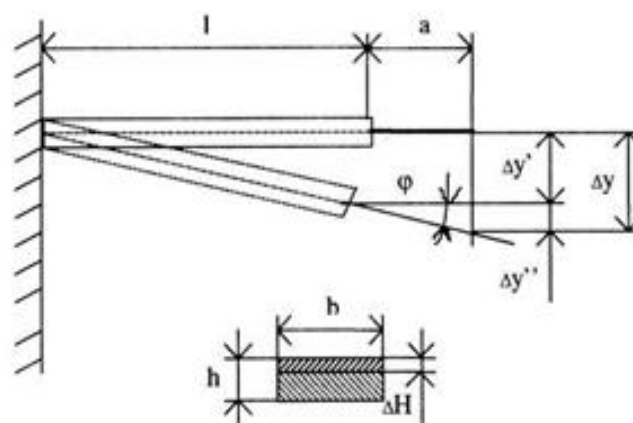
Při elektrolytickém způsobu odstraňování povrchových vrstev materiálu je zkušební vzorek jedním koncem upnut v upínacím třmenu zkušebního zařízení a u druhého konce zkušební vzorku je monitorován pohyb pomocí měřicího třmenu zkušebního zařízení, Obr. č. 40. Vzorek je před samotným experimentem zvážen a proměřen. Část vzorku, kde bude odstraňována povrchová vrstva materiálu, je očištěna a odmaštěna. Elektrolytická lázeň je udržována při konstantní teplotě a promíchávána a to za účelem zajištění rovnoměrného časového úběru materiálu. Na základě způsobu upnutí a z něho vycházející metodě měření se této metodě říká také metoda vetknutého nosníku.

Deformace vzorku  $\mathcal{E}$ , které vznikla odstraňováním jednotlivých vrstev, jsou snímačem přenášeny na zapisovač. Získaný časový průběh deformace  $\mathcal{E}(t)$  lze převést na závislost deformace vůči vzdálenosti od povrchu  $\mathcal{E}(z)$ . Za předpokladu rovnoměrného časového úběru můžeme rozpuštěnou hloubku určit z úbytku rozpuštěné váhy materiálu zkušební vzorku a takto rozpuštěnou hloubku materiálu můžeme v závislosti na čase považovat za lineární.

Výpočet zbytkových napětí v jednotlivých vrstvách plochého vzorku obdélníkového průřezu vychází ze vztahů aplikovaných v pružnosti a pevnosti. Podstatou výpočtu je předpoklad, že v rozpuštěné vrstvičce o tloušťce  $\Delta H$  je zbytkové napětí  $\sigma = \text{konst.}$  Odebráním vrstvičky  $\Delta H$  u obdélníkového vzorku způsobí zbytkové napětí stejnou deformaci, jako by na něj působila vnější síla. [22]



Obr. č.40: Schéma zařízení pro měření zbytkových napětí ; 1 – stojan, 2 – upínací třmen, 3 – zkušební vzorek, 4 – měřicí třmen, 5 – indukční snímač, 6 – napájecí obvody, 7 – obvod pro el. nastavení polohy snímače, 8 – registrační počítač, 9 – nádoba s elektrolytem, 10 – kontaktní teploměr, 11 - automatické spínací relé, 12 – topné tělísko, 13 – michadlo, 14 – katoda, 15 – variátor [22]



Obr.č.41: Znázornění měřených hodnot na zkušební vzorku, kde  $a$  – je délka pomocného třmenu,  $\varphi$  - úhel pootočení koncového průřezu,  $\Delta y$  - měřená hodnota deformace,  $y'$  - průhyb nosníku,  $y''$  - pootočení měřícího třmenu v rovině měření [22]

Vztahy, které jsou aplikovány z teorie pružnosti a pevnosti jsou naznačeny v Obr.č.41, kdy po úpravách a dosazeních do těchto vztahů, a po nutné korekci měřítky v osách  $x$  a  $y$ , dostaneme výsledný vztah pro zbytková napětí v první rozpuštěné vrstvičce materiálu ve tvaru (3). Pro  $n$ -tou rozpuštěnou vrstvičku materiálu pro zbytková napětí dostaneme ve tvaru (4).

$$(3) \quad \sigma_n = \frac{E \Delta y_n}{l} \cdot \frac{H}{h_0} \cdot M_y \cdot L \quad [22]$$

, kde  $\Delta y_n$  - přírůstek deformace,  
 $l$  - délka rozpouštění,  
 $E$  - modul pružnosti,  
 $H$  - celková odleptaná hloubka,  
 $\Delta H_y$  - přírůstek tloušťky vrstvy (rozpuštěné),  
 $h_0$  - původní tloušťka vzorku,  
 $M_y$  - měřítko zesílení –  $M = \text{konst.} = 0,00045$ ,  
 $M_y$  - měřítko délek, vypočtené ze vztahu,  
 $L$  - délka záznamu v mm,

$$(4) \quad \sigma_n = \frac{E \Delta y_n}{l} \cdot \frac{H}{h_0} \cdot M_y \cdot L \quad [22]$$

## 5 Návrh experimentu a vhodného korozního testu

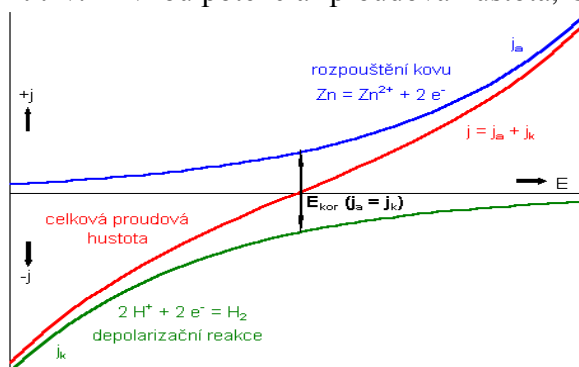
Účelem experimentů bude zjistit, zda-li existují vzájemné vztahy, vazby, mezi vloženými či zbytkovými napětími ve vzorcích materiálů a korozí vzorků materiálu vystaveného koroznímu prostředí. Dále se experimenty budou zabývat vývojem korozního potenciálu, korozní rychlosti a polarizačního odporu ve vztahu k vloženým a zbytkovým napětím vyskytujícími se ve zkoumaných vzorcích materiálu. Materiálem vybraným pro účel experimentů bude ocel obvyklé jakosti S235.

### 5.1. Teoretický základ experimentů pro napětí a zbytková napětí

#### 5.1.1. Stanovení korozní rychlosti, korozního potenciálu a polarizačního odporu elektrochemickými metodami

Principem stanovení korozních rychlostí je průběh elektrochemických reakcí kovů ve vodivém prostředí, viz. kapitola [3.1.2 Elektrochemická koroze](#) této bakalářské práce, je princip galvanického článku.

V případě ponoření kovové zinkové elektrody (anody) do kyseliny chlorovodíkové dochází k jejímu postupnému rozpouštění tzn. dochází ke korozní reakci a zároveň probíhá redukční tzv. depolarizační reakce v kyselině vývojem vodíku. Oba děje, které probíhají při korozi současně lze znázornit tzv. křivkou potenciál-proudová hustota, Obr. č. 42.1.



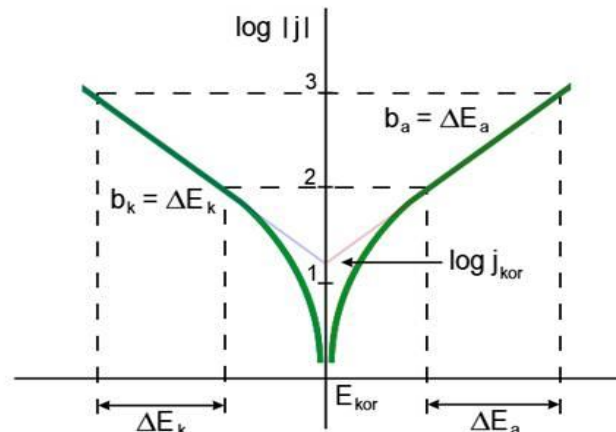
Obr.č.42.1: Polarizační diagram pro korozi zinku s vodíkovou depolarizací

Z Obr.č.42.1 je patrné, že v kladné části diagramu, kde dochází k rozpouštění zinku, se se zvyšujícím se potenciálem  $E$  ( mírou oxidační schopnosti korozního prostředí ) exponenciálně roste i rychlost koroze. V záporné části diagramu naopak se zvětšujícím se potenciálem  $E$  rychlost koroze klesá. Potenciál se v laboratorních podmínkách mění přístrojem zvaným potenciostat. Jiným způsobem se změna potenciálu mění přidáváním látky, která snadno snižuje svůj oxidační stav do elektrolytu. Přímě měřitelná je celková proudová hustota  $j$  [ A/mm<sup>2</sup>], ( $j = I / S$ , kdy  $I$ - proud [A],  $S$  je průřez kolmý na plochu [mm<sup>2</sup>] ), jako součet dílčích proudových hustot , dle polarizační křivky, rozpustného kovu  $j_a$  a depolarizační reakce  $j_k$  ve vztahu  $j = j_a + j_k$ . V případě rovnosti proudových hustot  $j_a = j_k$  se na povrchu zinku ustavuje tzv. samovolný korozní potenciál  $E_{kor}$ , kdy při  $E_{kor}$  je proudová hustota  $j = 0$ . Vychýlením potenciálu (polarizací) z hodnoty  $E_{kor}$  kladným směrem se rychlost anodického rozpouštění zinku exponenciálně zvyšuje. Polarizací záporným směrem se korozní rychlost snižuje.

**Při elektrochemické reakci probíhají na povrchu kovu anodická oxidace kovu a katodická redukce korozního prostředí stejnou rychlostí a tato rychlost je rovna**

**hodnotě korozního proudu tzn. je rovna korozní rychlosti.** Metody, které sledují závislost mezi elektrolytickým potenciálem kovu a procházejícím proudem se nazývají elektrochemické metody. Mezi tyto metody patří metoda extrapolace lineárních částí polarizačních křivek – Tafelových závislostí a metoda měření polarizovaného odporu (viz. [3.4.2.2.1 Metoda polarizačního odporu](#), této bakalářské práce). [4]

**Metoda extrapolace lineárních částí polarizačních křivek – Tafelových závislostí**



Obr.č.42.2: Extrapolace korozní proudové hustoty za závislosti mezi potenciálem a proudovou hustotou v souřadnicích  $E - \log j$

Pro korozní děj obecně platí vztah (8).

$$(8) \quad j = j_{kor} \left[ \exp\left(\frac{2,3}{b_a} \Delta E\right) - \exp\left(\frac{2,3}{b_k} \Delta E\right) \right] \quad [4]$$

$j$  - proudová hustota,

$j_{kor}$  - korozní proudová hustota při korozním potenciálu  $E_k$ , kdy  $j=0$ ; ukazatel korozní rychlosti,

$\Delta E$  - změna potenciálu, polarizace ( $E - E_{kor}$ ),

$E$  - potenciál,

$E_{kor}$  - korozní potenciál,

$b_a, b_k$  - směrnice anodické resp. katodické větve polarizační křivky (změna potenciálu při změně proudu o jeden řád)

Při stanovení korozní rychlosti extrapolací lineárních částí polarizačních křivek je třeba elektrodu polarizovat do oblasti, kde na povrchu elektrody probíhá pouze katodická resp. anodická reakce (tj. minimálně  $\pm 100$  mV od korozního potenciálu). V případě těsné blízkosti korozního potenciálu  $E_{kor}$  je možno rovnici (8) upravit na tvar rovnice (9) i bez výraznější polarizace. [4]

$$(9) \quad j = j_{kor} \left( \frac{2,3}{b_a} + \frac{2,3}{b_k} \right) \Delta E \quad [4]$$

V těsné blízkosti korozního potenciálu  $E_{kor}$  (max.  $\pm 20$  mV) je předpoklad, že závislost mezi změnou potenciálu  $\Delta E$  a procházejícím proudem  $j$  má lineární průběh a proto je možno určit polarizační odpor ze vztahu (10). [4]

$$(10) \quad R_p = \frac{\Delta E}{j} \quad [4]$$

Ze vzorce (10) vyjádříme  $j$  proudovou hustotu a tuto dosadíme do vzorce (9) po úpravách dostaneme vztah (11) potažmo vztah (12), z kterých vyplývá, že korozní proudová hustota je nepřímo úměrná polarizačnímu odporu  $R_p$ , dále viz. [3.4.2.2.1 Metoda polarizačního odporu](#), této bakalářské práce.

$$(11) \quad j_{kor} = \frac{B}{R_p} \quad [4]$$

$$(12) \quad B = \frac{b_a \cdot b_k}{2,3(b_a + b_k)} \quad [4]$$

$B$  – konstanta úměrnosti; určována experimentálně.

Konstanta  $B$  je tabelována a její hodnota je v mezích 10 až 30 mV. Nejčastější hodnota je přibližně 20 mV. [\[4\]](#)

Korozní rychlost  $a$  [mmpy] se vypočítá z Faradayova zákona pro hmotnost vyloučené látky ( rozpuštěné látky na anodě )  $m$ . Korozní rychlost udává úbytek materiálu v mm za rok. Faradayův zákon (13) :

$$(13) \quad m = A \times I \times t = \frac{Mm}{F \times z} \times Q$$

$A$  – elektrochemický ekvivalent [kg.C<sup>-1</sup>]

$I$  – proud [A]

$t$  – čas [s]

$Mm$  – molární hmotnost [kg/mol]

$F$  – Faradayova konstanta [9,6485×10<sup>4</sup> C.mol<sup>-1</sup>]

$z$  – počet elektronů potřebných k vyloučení jedné molekuly

$Q$  – elektrický náboj prošlý elektrolytem [A/s]

Tzn., že hmotnost rozpuštěné látky  $m$  dosadíme do vzorce pro výpočet objemu  $V$  (14) a vypočteme výšku úbytku materiálu  $h$  za čas, kdy materiálem procházel elektrický proud  $I$ .

$$(14) \quad m \times \rho = V = S \times h \rightarrow h = \frac{S}{m \times \rho}$$

$m$  – hmotnost materiálu [kg]

$\rho$  – hustota materiálu [m<sup>3</sup>/kg]

$V$  – objem materiálu [m<sup>3</sup>]

$S$  – plocha materiálu [m<sup>2</sup>]

$h$  – výška úbytku materiálu [m]

Protože se korozní rychlost  $a$  udává v úbytku materiálu v mm za rok [mmpy], tak výšku úbytku materiálu  $h$  za čas, kterým jím procházel náboj (= doba testu) přepočteme na úbytek materiálu za rok a dostaneme korozní rychlost  $a$ .

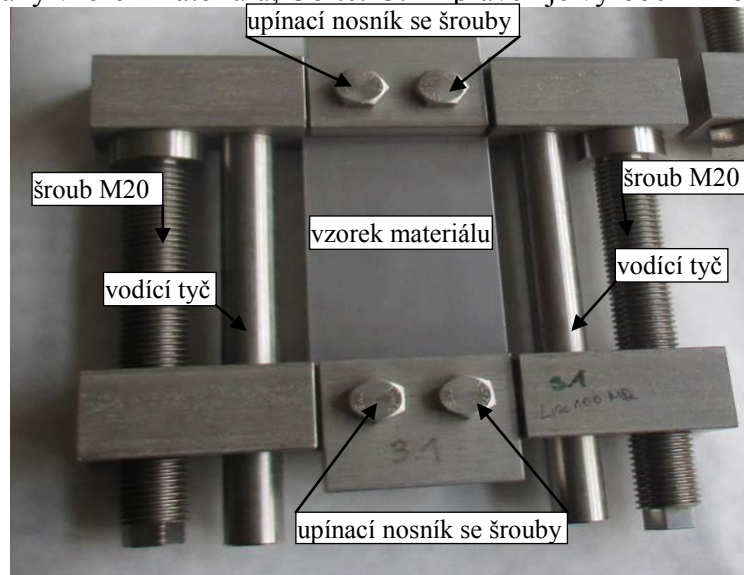


## 5.2. Návrhy experimentů

### 5.2.1. Experiment č.1 \_upínací přípravek, korozní komora, rentgenový difraktometr

Pro účel experimentu byl sestrojen přípravek pomocí, kterého bylo na část vzorků působeno vnějšími tahovými/tlakovými silami a tímto působením přípravku bylo do vzorků materiálů vloženo napětí.

Přípravek se konstrukčně skládá z dvou vodících trnů, dvou šroubů pomocí, kterých je aplikováno do materiálu napětí, dvou upínacích protilehlých nosníků se šrouby, do kterých je připevněn zkoumaný vzorek materiálu, Obr.č.43. Přípravek je vyroben z korozivzdorné oceli.

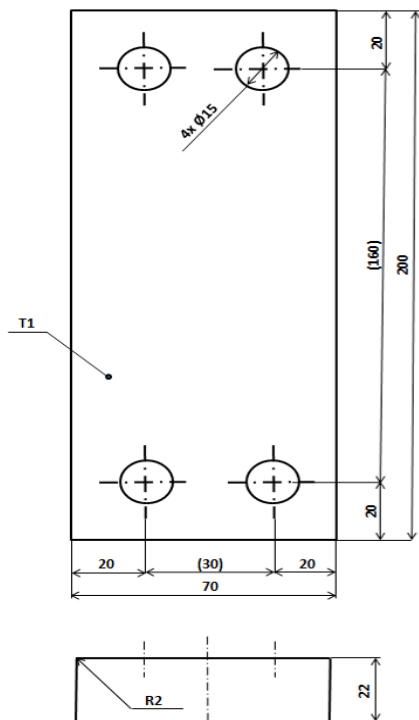


Obr.č.43: Upínací přípravek se vzorkem

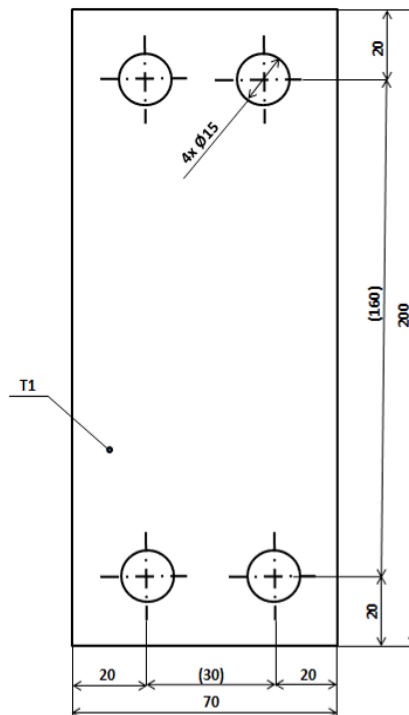
#### 5.2.1.1. Vzorky materiálu experimentu č. 1

Bylo připraveno celkem 8 kusů vzorků materiálu z konstrukční oceli, obvyklé jakosti, z oceli S235 (dle ČSN 411375). Tato ocel je vhodná ke svařování, dá se i cementovat. Její chemické složení bylo ověřeno měřením a je v souladu s normou. Chemické složení materiálu vzorku bylo ověřeno spektrometrem, viz Tabulka č. 3. Ocel je součástí konstrukcí a strojů středních tlouštěk, které jsou tavně svařované, namáhané staticky i dynamicky. Dále pro součásti vyráběné z plechů, podélně svařovaných dutých profilů a součásti kované pro tepelná energetická zařízení a tlakové nádoby pracující s omezeným přetlakem a teplotou do 300 °C, pro vtokové objekty vodních turbín, spirální skříně vodních turbín, vrata plavidlových komor, klapky uzávěrů, svařované kulové uzávěry a pro spojky a podvozky vagónů. [\[20\]](#) [\[21\]](#)

Vzorky byly označeny jako vzorek č. 1.1, vzorek č. 2.1 až vzorek č. 8.1. Vzorek č. 6.1, vzorek č. 7.1. a vzorek č. 8.1. byly prostorově tvarovány do tvaru U, o rozvinutém rozměru 70mm x 200mm, Obr.č.45. Tyto vzorky byly takto tvarovány z důvodu zamezení zborcení při tlakovém namáhání na vzpěr. Vzorek č. 1.1, vzorek č. 2.1., vzorek č. 3.1., vzorek č. 4.1. a vzorek č. 5.1. zůstaly v rovinném tvaru, o rozměrech 70mm x 200mm ,Obr. č. 46.



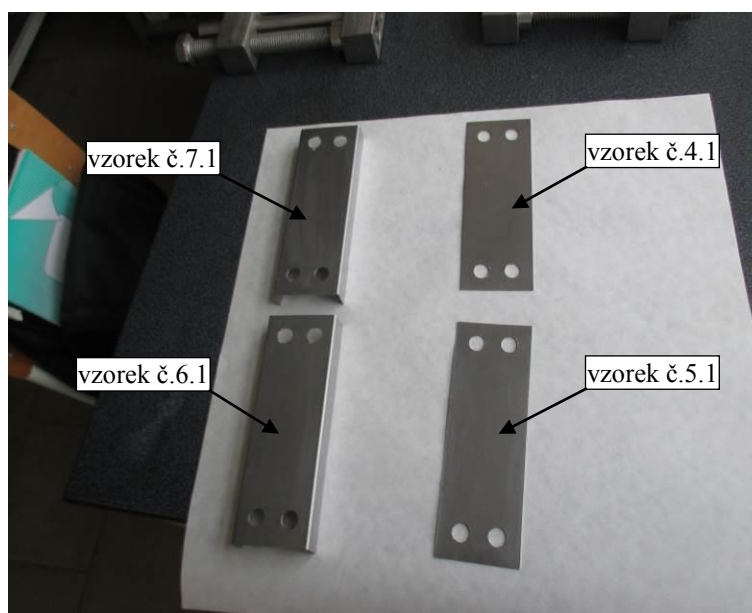
Obr.č.45: Náčrt tvaru vzorků č.6.1, č.7.1,  
č.8.1\_experiment č.1



Obr.č.46: Náčrt tvaru vzorků č.1.1, č.2.1,  
č.3.1, č.4.1 a č.5.1\_experiment č.1

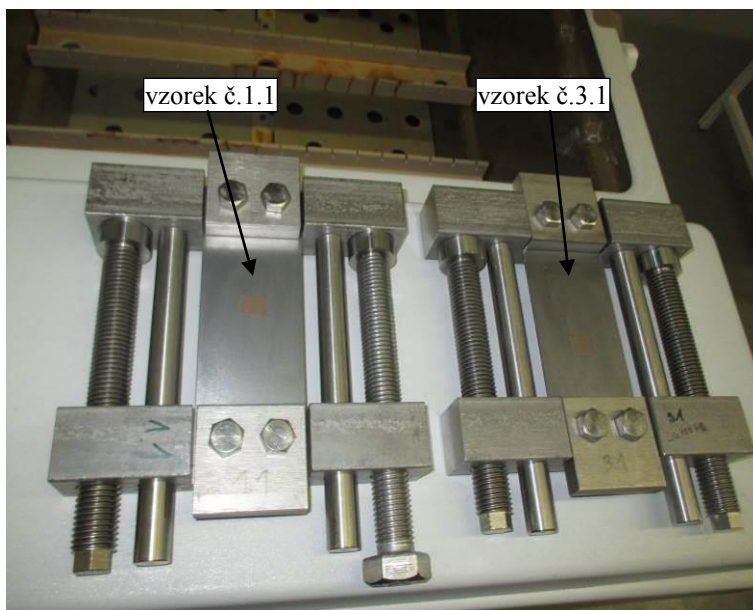
### 5.2.1.2. Zatěžování a měření napětí a zbytkových napětí ve vzorcích materiálu před korozním testem

Všechny vzorky, tzn. vzorek č. 1 až vzorek č. 8, byly změřeny na přítomnost zbytkových napětí v počátečním stavu tzn. bez zatížení. Vzorek č. 4.1, vzorek č. 5.1, vzorek č. 6.1 a vzorek č. 7.1 nebyly namáhány, Obr. č. 47.

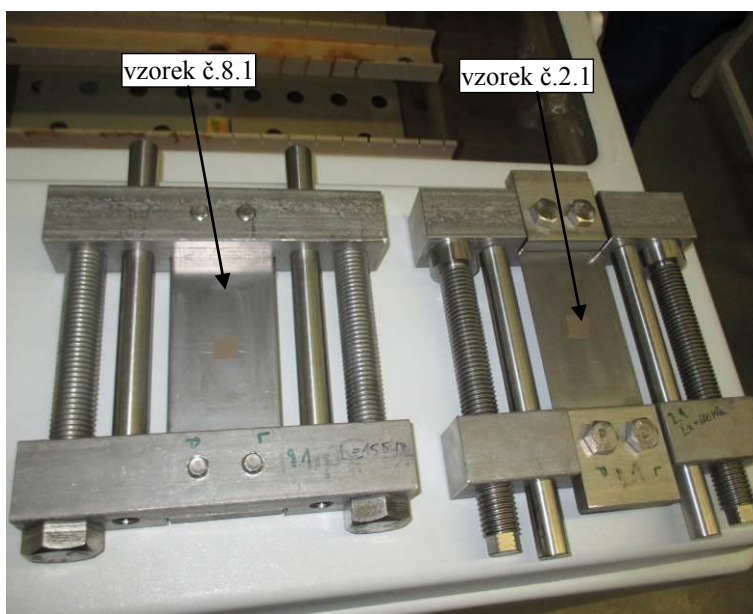


Obr.č.47: Vzorky č.4.1, č.5.1, č.6.1 a č.7.1

Vzorek č. 1.1, vzorek č. 2.1, vzorek č. 3.1 byly namáhány, působením šroubů, tahem a vzorek č. 8.1 byl namáhán, působením šroubů, tlakem, Obr. č. 48, Obr. č. 49.



Obr.č.48: Vzorky č.1.1 a č.3.1 \_ v přípravku



Obr.č.49: Vzorky č.8.1 a č.2.1 \_ v přípravku

Měření zbytkových napětí ve vzorcích bylo provedeno, externě, na rentgenovém difraktometru Panalytical X'Pert Pro MPD, Obr. č. 64, na ČVÚT v Praze, Katedra inženýrství pevných látek, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, s výsledky, které jsou patrné z Tabulky č. 1.

<b>Tabulka č. 1: měření napětí a zbytkových napětí v počátečním stavu vzorku materiálu a po zatížení vzorku materiálu_ před korozním testem</b>										
Vzorek materiálu	Druh namáhání	Měř. zbytk. napětí-počáteční stav [ MPa ]				Měření vloženého napětí-po zatížení [ MPa ]				Poznámka
		Podélný směr měření	Toler. měření	Příčný směr měření	Toler. měření	Podélný směr měření	Toler. měření	Příčný směr měření	Toler. měření	
1.1	Tahové	-40	±3	-17	±8	+226	±16	-66	±3	Vzorek upnutý v přípravku
2.1	Tahové	+8	±5	-47	±5	+190	±20	-72	±2	
3.1	Tahové	-11	±16	-47	±8	+101	±2	-61	±3	
4.1	Nezatěžované	+5	±13	-61	±4	0	0	0	0	Vzorek neupnutý v přípravku
5.1	Nezatěžované	+7	±11	-48	±3	0	0	0	0	
6.1	Nezatěžované	-75	±11	-63	±5	0	0	0	0	
7.1	Nezatěžované	-26	±13	-46	±4	0	0	0	0	
8.1	Tlakové	-22	±2	+57	±5	-142	±14	-76	±10	Vzorek upnutý v přípravku

**Tabulka č.1: Měření zbytkových napětí v počátečním stavu vzorku materiálu a po zatížení vzorku materiálu\_ před korozním testem**

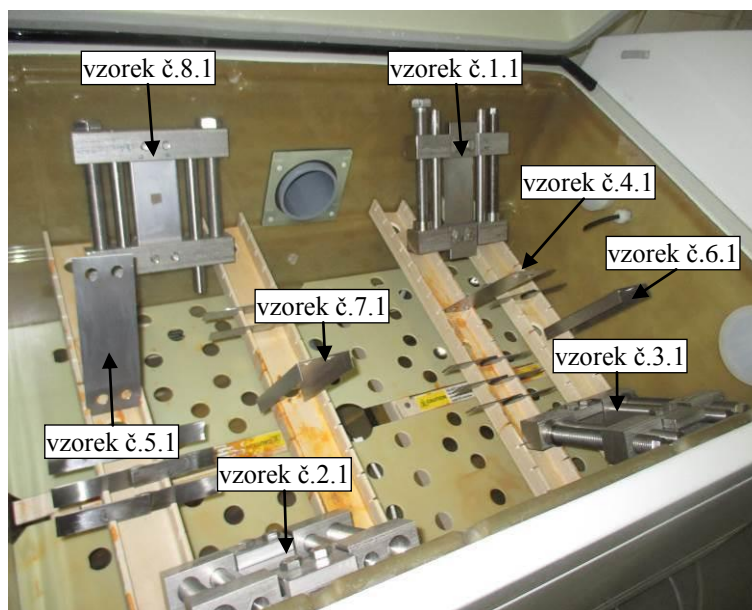
Po naměření výsledných hodnot zbytkových napětí v počátečním stavu vzorků materiálu, tzn. před zatížením, a výsledných hodnot po zatížení vzorků materiálů bylo rozhodnuto, že z důvodu malých změn vložených napětí v příčném směru (viz. Tabulka č. 1), nebudeme tento směr měření dále uvažovat a to z toho důvodu, že nemají podstatný vliv na konečné výsledky experimentu.

### 5.2.1.3. Kondenzační korozní test experimentu č. 1

Korozní kondenzační test byl prováděn v korozní komoře typu Q-FOG, model CCT, Obr. č. 50 a to s přihlédnutím k normě ČSN EN ČSN 34 5791-2-11, která upravuje průběh kondenzačního testu. V kondenzační komoře byly vzorky vhodně rozmístěny, Obr. č. 51 a vystaven působení kondenzace vodních par o 100% relativní vlhkosti, za zvýšené teploty 40 °C. Korozní test se opakoval celkem třikrát a to po 2hodinách, po 28hodinách a po 96hodinách. Stanovení korozního napadení bylo hodnoceno s přihlédnutím k normě ČSN EN ISO 10289 (Metody korozních zkoušek kovových a jiných anorganických povlaků na kovových podkladech-Hodnocení vzorků a výrobků podrobených korozním zkouškám), kdy se vzorek materiálu od korozních produktů mechanicky očistil lihem a ještě ethanolem. Poté se vizuálně vyhodnotilo procentuální napadení povrchu vzorku materiálu korozí, Obr. č. 54 až Obr. č. 57 a Tabulka č. 2. Toto hodnocení se provádělo cca 10mm od okraje vzorku a to pro vyloučení vlivu mechanického dělení vzorků materiálu z polotovaru plechové tabule.



Obr.č.50: Korozní komora Q-FOG, model CCT



Obr.č.51: Rozmístění zkušebních vzorků č.1.1, č.2.1, č.3.1, č.4.1, č.5.1, č.6.1, č.7.1 a č.8.1 v korozní komoře



Obr.č.54: Rozsah koroze vzorků č.1.1, č.2.1, č.3.1, č.8.1 po očištění od korozních zplodin\_hodnocení č.2



Obr.č.55: Rozsah koroze vzorků č.4.1, č.5.1, č.6.1, č.7.1 po očištění od korozních zplodin\_hodnocení č.2



Obr.č.56: Rozsah koroze vzorků č.1.1, č.2.1, č.3.1, č.8.1 po očištění od korozních zplodin\_hodnocení č.3



Obr.č.57: Rozsah koroze vzorků č.4.1, č.5.1, č.6.1, č.7.1 po očištění od korozních zplodin\_hodnocení č.3

<b>Tabulka č. 2:</b> vizuální zhodnocení rozsahu koroze vzorků materiálu v závislosti na čase, při kondenzačním testu					
Parametry kondenzačního testu					
<b>Vlhkost [%]</b>	100				
<b>Teplota [°C]</b>	40				
<b>Tlak [Pa]</b>	100000				
<b>Hodnocení č....:</b>	1.	2.	3.	<b>Ø rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]</b>	
<b>Doba v korozní komoře [h : min]</b>	2:00	28:00	96:00		
<b>Vzorek materiálu</b>	<b>Druh namáhání</b>	<b>Rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]</b>	<b>Rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]</b>		
1.1	Tahové	2,5	5	5	4,2
2.1	Tahové	1	5	5	3,7
3.1	Tahové	0,5	10	10	6,8
4.1	Nezatěžované	1	7	15	7,7
5.1	Nezatěžované	1	8	10	6,3
6.1	Nezatěžované	1	25	10	12,0
7.1	Nezatěžované	1	20	20	13,7
8.1	Tlakové	0,1	15	20	11,7

**Tabulka č.2:** Vizuální zhodnocení rozsahu koroze vzorků materiálu v závislosti na čase působení vlhkosti v kondenzační komoře

#### 5.2.1.4. Chemické složení vzorků materiálu pro experimenty č. 1 až č. 3

Chemické složení vzorků materiálu bylo prověřeno na spektrometru GDOES Leco SDP - 500A s výsledky uvedenými v Tabulce č. 3.

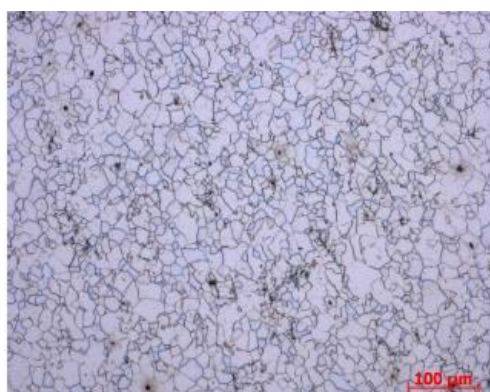
<b>Tabulka č. 3:</b> Chemické složení vzorku materiálu																
Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Nb	W	Co	Fe
Obsah [%]	0,12	0,043	0,225	0,0093	0,0148	0,176	0,114	0,0886	0,0071	0,0096	0,0108	0,0747	0,08	0,0235	0,0492	99,1

#### 5.2.1.5. Velikost zrna vzorků materiálu pro experimenty č. 1 až č. 3

Velikost zrna materiálu byla stanovena podle normy ČSN EN ISO 643 : 2003 Ocel - Mikrografické stanovení velikosti zrn. Velikost zrna byla změřena světelným mikroskopem Zeiss Z1m a vyhodnocena softwarem. Výsledky měření jsou uvedeny v Tabulce č. 3. 1.



<b>Tabulka č. 3. 1:</b> Velikost zrna vzorků materiálu					
	Naměřené číslo velikosti zrna	Zaokrouhlené číslo velikosti zrna	Výňatek z Tabulky C. 1 z normy ČSN EN ISO 643		
			Číslo velikosti zrna	Střední průměr zrna [mm]	Střední plocha zrna [mm <sup>2</sup> ]
Příčný průřez materiálem	10,08	10	10	0,011	0,000122
Podélný průřez materiálem	9,59	10			



Obr č.57.1: Ocel S235\_100x\_podélný průřez

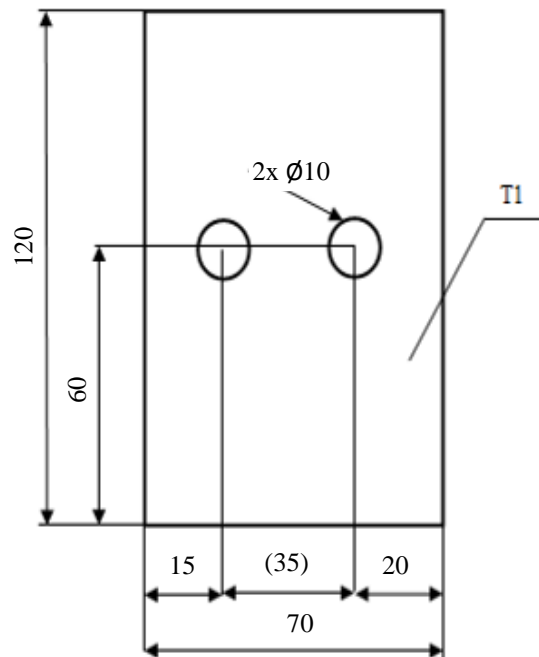


Obr č.57.2: Ocel S235\_100x\_příčný průřez

## 5.2.2. Experiment č. 2 – trhací stroj, potenciostat, rentgenový difraktometr

### 5.2.2.1. Vzorky materiálu experimentu č. 2

Byly připraveny celkem 4 kusy vzorků a to ze stejného materiálu jako v případě [experimentu č. 1 odstavec 5.2.1.1](#) této bakalářské práce. Vzorky měly rovinný tvar o šířce 70mm, výšce 120mm a tloušťce 1mm. V příčné ose vzorků byly vyvrtány 2 otvory o průměru 10mm, které usměrňovaly průběh zatížení trhacím strojem, Obr. č. 58. Vzorky materiálu byly označeny jako vzorek č. 1 až č. 4.



Obr č.58: Náčrt tvaru vzorků materiálu\_experiment č.2, č.3

### 5.2.2.2. Zatěžování vzorků materiálu trhacím strojem před měřením na potenciostatu

Vzorky byly postupně upnuty do „trhacího“ stroje tzn. stroje pro zkoušení materiálů tahem (výrobní značka DENISON s maximálním zatížením 50tun, Obr. č. 59 a postupně tahově namáhány rozdílným zatížením od 5kN až do 15kN. Po uvolnění zatížení byly vzorky ze stroje vyjmuty a připraveny k měření korozního potenciálu  $E_{kor}$ , korozní rychlosti  $a$  a polarizačního odporu  $R_d$  na potenciostatu, očištěním lihem.



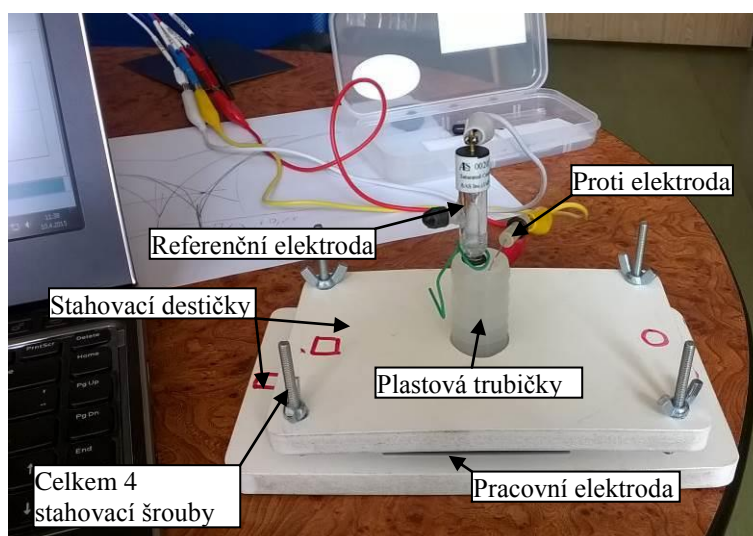
Obr. č.59: Trhací stroj DENISON

### 5.2.2.3. Popis měření korozního potenciálu $E_{kor}$ , korozní rychlosti a polarizačního odporu $R_d$ na potenciostatu

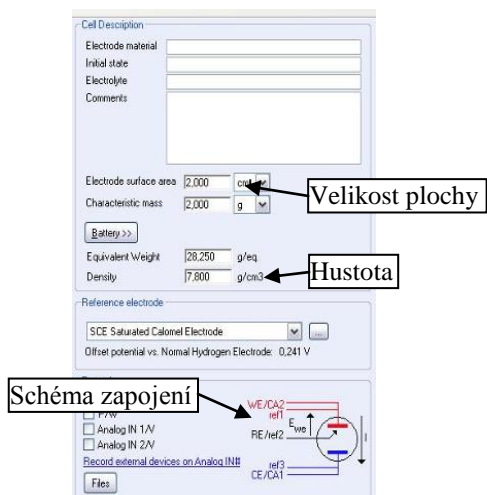
Měření probíhalo v, k tomuto účelu zhotoveném, přípravku z elektricky nevodivého materiálu, kdy mezi dvě destičky se položil zkoumaný vzorek materiálu, na vzorek se položil gumový kroužek, který sloužil jako těsnění mezi vzorkem zkoumaného materiálu a na něj navlečenou plastovou trubičkou s osazením. Tímto byla definována plocha měření vzorku a plocha působení elektrického proudu při elektrochemické reakci. Dále byla na trubičku navlečena horní destička, která přitážením čtyřmi šrouby posloužila ke stažení celé sestavy a tím k utěsnění mezer mezi vzorkem, těsněním a plastovou trubičkou. Do platové trubičky se nalil 3,5% roztok NaCl elektrolytu. V trubičce byly dále referenční, kalamelová (rtuť pokrytá vrstvou  $Hg_2Cl_2$  v roztoku KCl), elektroda tzn. elektroda s konstantním potenciálem, dále tzv. proti elektroda z platinového drátku a pracovní elektroda. Pracovní elektroda byl materiál zkoumaného vzorku. Tyto elektrody se připojily k potenciostatu BioLogic SP-150, Obr.č.63 a pomocí PC se softwarově nastavily hlavní parametry testu, Obr. č. 62, Obr. č. 63. Obr. č. 63. 1 a Obr. č. 63. 2 ilustrují naměřené hodnoty z potenciostatu.



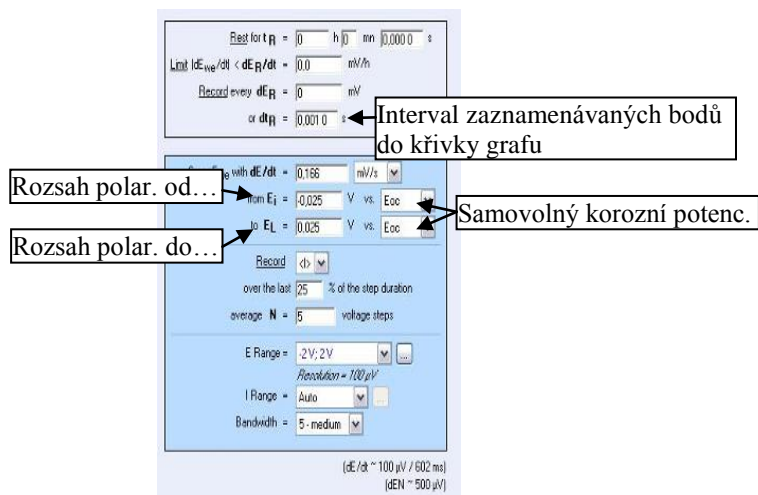
Obr.č.60: Potenciostat BioLogic SP-150



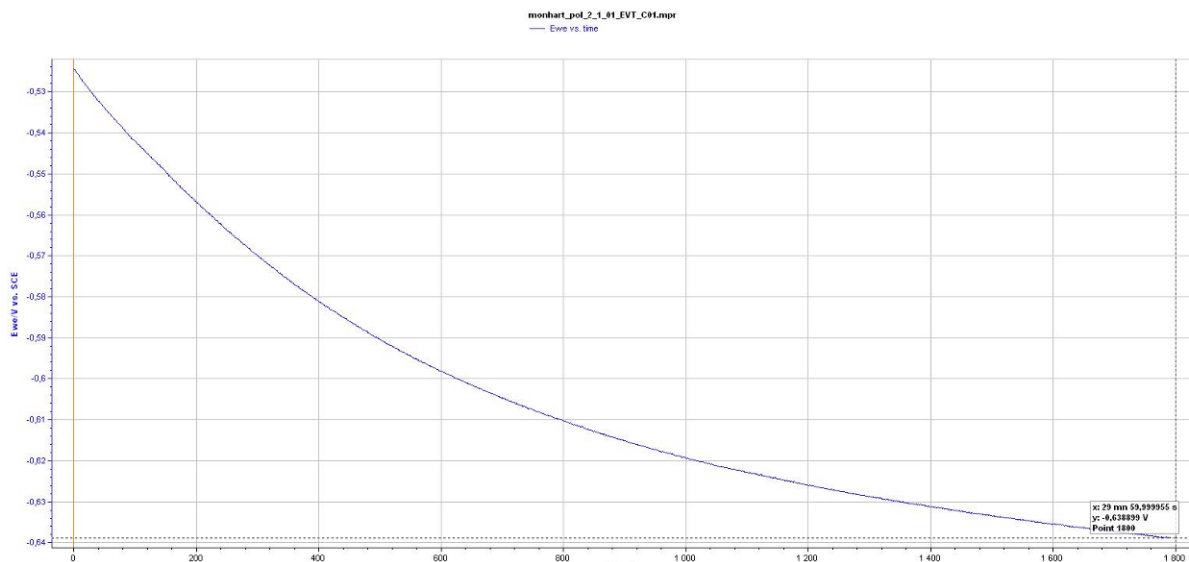
Obr.č.61: Popis měření korozního potenciálu  $E_{kor}$ , korozní rychlosti  $j$  a polarizačního odporu  $R_d$  na potenciostatu v 3,5% rozt. NaCl



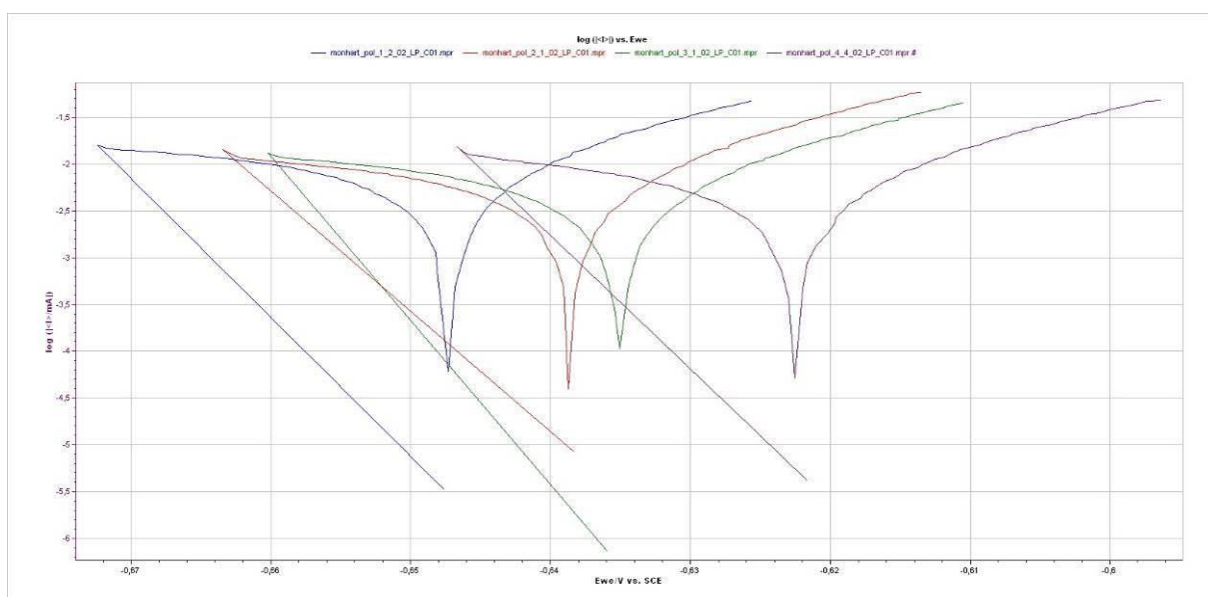
Obr.č.62: Nastavení parametrů potenciostatu



Obr.č.63: Nastavení parametrů potenciostatu



Obr.č.63.1: Tvar křivky ustálení korozního potenciálu  $E_{kor}$  na potenciostatu



Obr.č.63.2: Souhrnný výstup z potenciostatu v podobě polarizačních křivek zobrazených v logaritmických souřadnicích; platný pro všechny zkoumané vzorky materiálu

**Tabulka č. 4:** Hodnoty naměřené na potenciostatu v závislosti na zatížení z trhacího stroje

Vzorek č.1	Plánované zatížení [kN]	Skutečné zatížení [kN]	Korozní proudová hustota $j_{kor}$ [mA]	Korozní potenciál $E_{kor}$ [V]	Korozní rychlost a [mmpy]	Polarizační odpor $R_d$ [ $\Omega$ ]
4	0	0	37	-0,622	0,013	695
3	5,0	5,02	32	-0,635	0,008	804
2	8,0	8,12	43	-0,647	0,012	594
1	11,5	11,67	38	-0,647	0,012	681

**Tabulka č.4:** Hodnoty naměřené na potenciostatu v závislosti na zatížení z trhacího stroje

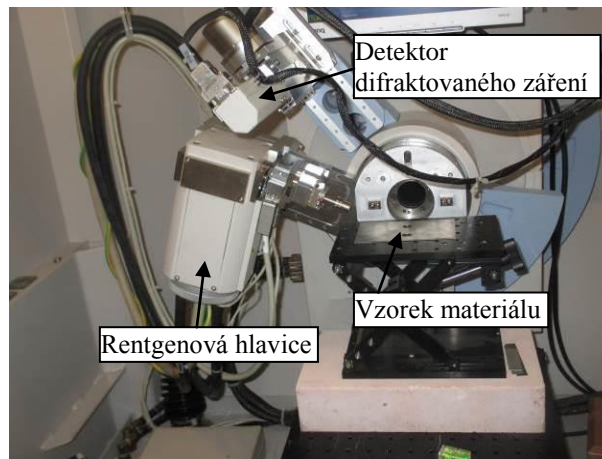
#### 5.2.3.4. Měření zbytkových napětí ve vzorku po zatížení na trhacím stroji na rentgenovém difraktometru

Měření zbytkových napětí ve vzorcích bylo provedeno na rentgenovém difraktometru Panalytical X'Pert Pro MPD, Obr. č. 64.



**Obr.č.64:** Rentgenový difraktometr Panalytical X'Pert Pro MPD

Hlavními komponenty difraktometru jsou rentgenová hlavice a detektor difraktovaného záření. Princip měření je popsán v odstavci [4. 7. 1. 1.](#) této bakalářské práce.



Obr.č.65: Rentgenový difraktometr Panalytical X'Pert Pro MPD

### Parametry nastavení rentgenové hlavice:

#### Primární svazek

chromová rentgenka (cca 0,229 nm), 40 kV, 30 mA, hloubka vnikání 5  $\mu$ m, pinhole/křížové clony 2 $\times$ 4 mm

### Parametry nastavení detektoru difraktovaného záření:

#### Difraktovaný svazek

beta filtr z vanadové folie, programovatelné clony (2 mm), Sollerovy clony 0,04 rad, proporcionalni Xe detektor

### Parametry měření

7 náklonů - kladné i záporné hodnoty úhlu  $\psi$ : 0; 0,2; ...; 0,6, určení difrakčního úhlu metodou PVII (Pearson VII)

Měření bylo provedeno externě na ČVÚT v Praze, Katedra inženýrství pevných látek, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.

**Tabulka č. 5:** Měření zbytkových napětí ve vzorku po zatížení na trhacím stroji

Vzorek č.	Plánované zatížení [kN]	Skutečné zatížení [kN]	Zbytkové napětí ve vzorku [MPa]	Tolerance výpočtu [MPa]
4	0	0	-20	$\pm 7$
3	5,0	5,02	-43	$\pm 7$
2	8,0	8,12	22	$\pm 9$
1	11,5	11,67	35	$\pm 9$

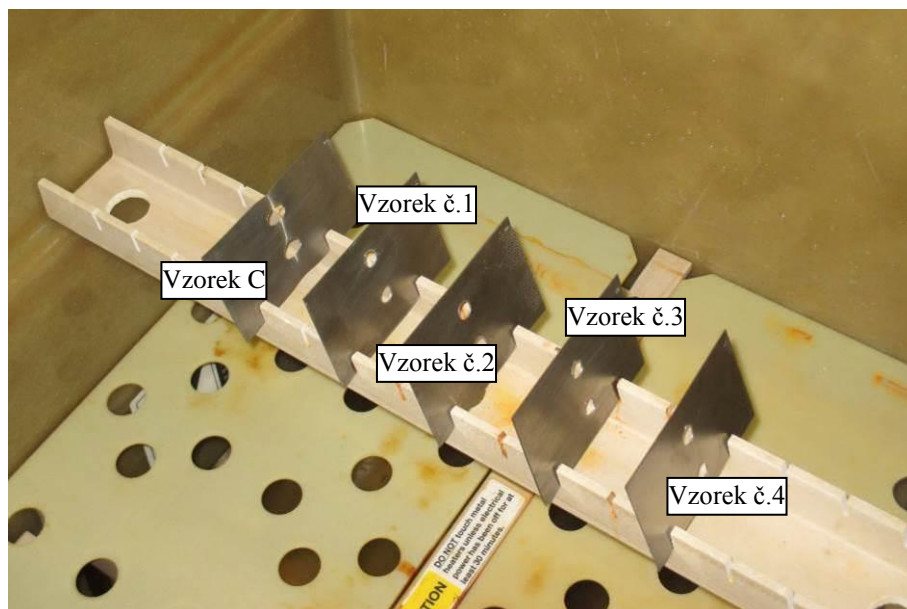
**Tabulka č.5:** Měření zbytkových napětí ve vzorku po zatížení na trhacím stroji

### 5.2.3. Experiment č. 3 – rentgenový difraktometr, korozní komora

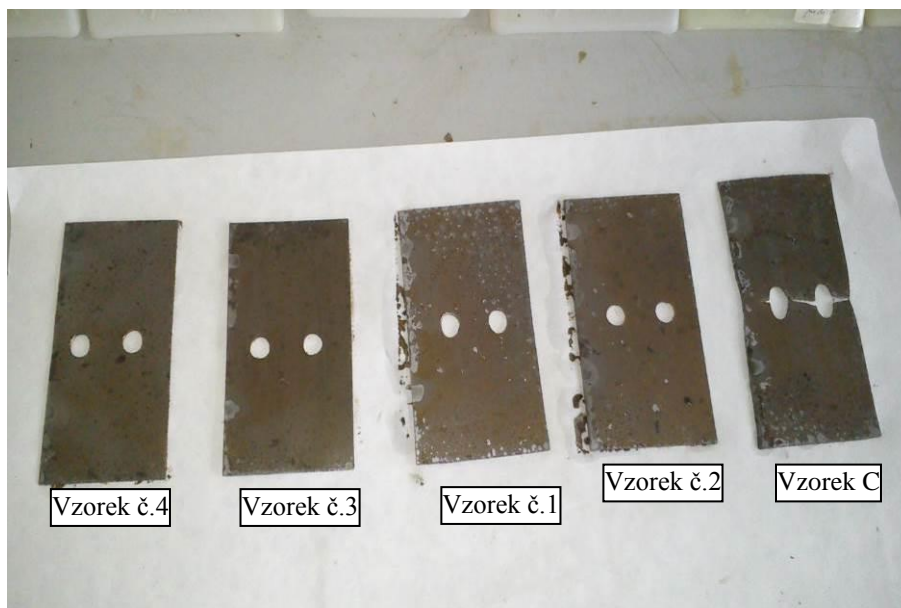
Vzorky materiálů, způsob zatěžování i samotné naměřené hodnoty zbytkových napětí pocházejí, (byly využity), z experimentu č. 2.

#### 5.2.3.1. Kondenzační korozní test experimentu č. 3

Korozní kondenzační test byl prováděn ve stejném zařízení a s přihlédnutím k totožné normě jako při experimentu č. 1. V kondenzační komoře byly vzorky vhodně rozmístěny, Obr. č. 66 a vystaven působení kondenzace vodních par o 100% relativní vlhkosti, za zvýšené teploty 40 °C. Korozní test byl ukončen po 118 hodinách. Stanovení korozního napadení bylo hodnoceno s přihlédnutím k normě ČSN EN ISO 10289, kdy se vzorek materiálu od korozních produktů mechanicky očistil lihem a ještě ethanolem. Poté se vizuálně vyhodnotilo procentuální napadení povrchu vzorku materiálu korozí, Obr. č. 67. Toto hodnocení se provádělo cca 10mm od okraje vzorku a to pro vyloučení vlivu mechanického dělení vzorků materiálu z polotovaru plechové tabule. V Tabulce č. 6 jsou souhrnně uvedeny parametry zatěžování a výsledky hodnocení korozního testu.



Obr. č.66: Rozmístění vzorků materiálů v kondenzační komoře



Obr. č.67: Rozsah koroze vzorků materiálů po očištění od korozních zplodin

Tabulka č. 6: Závislost mezi zbytkovým zatížením ve vzorku a rozsahem zkorodované plochy ve vzorku materiálu

Vzorek č.	Zbytkové napětí [MPa]	Toletance výpočtu [MPa]	Rozsah zkorod. plochy vzorku mat. [%]
4	-20	±7	25
3	-43	±7	2,5
2	22	±9	1
1	35	±9	10

Tabulka č.6: Závislost mezi zbytkovým zatížením ve vzorku a rozsahem zkorodované plochy ve vzorku materiálu



## 6 Vyhodnocení experimentů

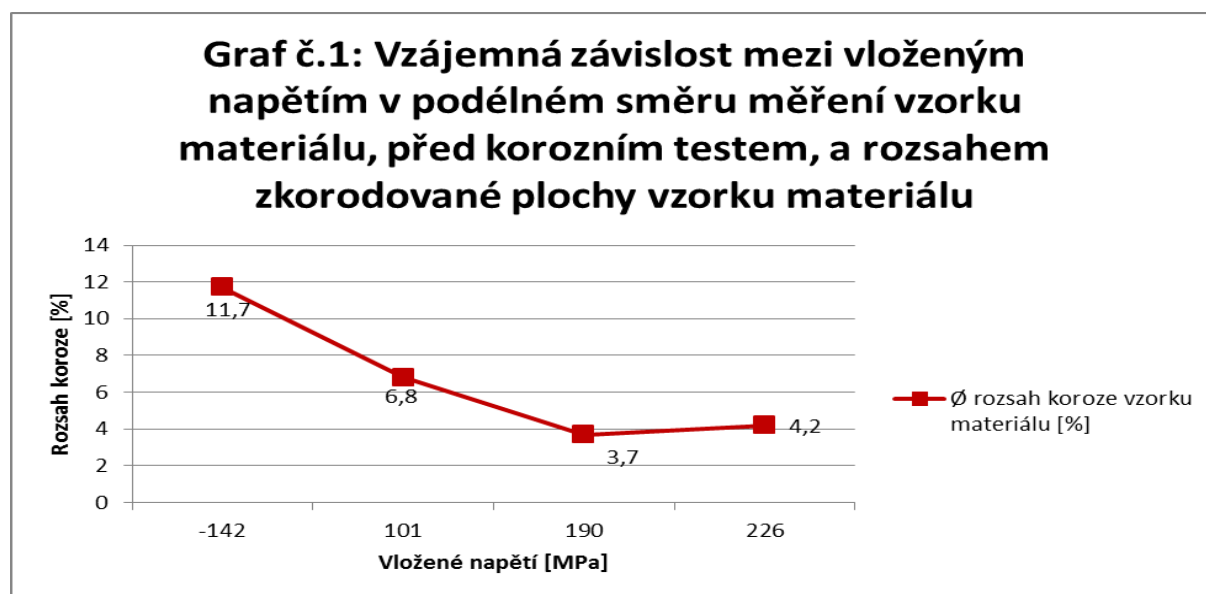
### 6.1. Experiment č. 1

#### 6.1.1. Závislost mezi vloženým napětím a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu

**Tabulka č. 7:** Vzájemná závislost mezi vloženým napětím v podélném směru měření vzorku materiálu, před korozním testem, a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu

Vzorek materiálu	Druh namáhání	Měření napětí-po zatížení; před korozním testem [ MPa ]		Vizuální zhodnocení rozsahu koroze vzorků materiálu v závislosti na čase, při kondenzačním testu			
		Podélný směr měření	Toler. měření	Hodnocení č. 1	Hodnocení č. 2	Hodnocení č. 3	Ø rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]
				Rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]	Rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]	Rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]	
1.1	Tah	+226	±16	2,5	5	5	4,2
2.1	Tah	+190	±20	1	5	5	3,7
3.1	Tah	+101	±2	0,5	10	10	6,8
8.1	Tlak	-142	±14	0,1	15	20	11,7

Tabulka č.7: Vzájemná závislost mezi vloženým napětím v podélném směru měření vzorku materiálu, před korozním testem, a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu

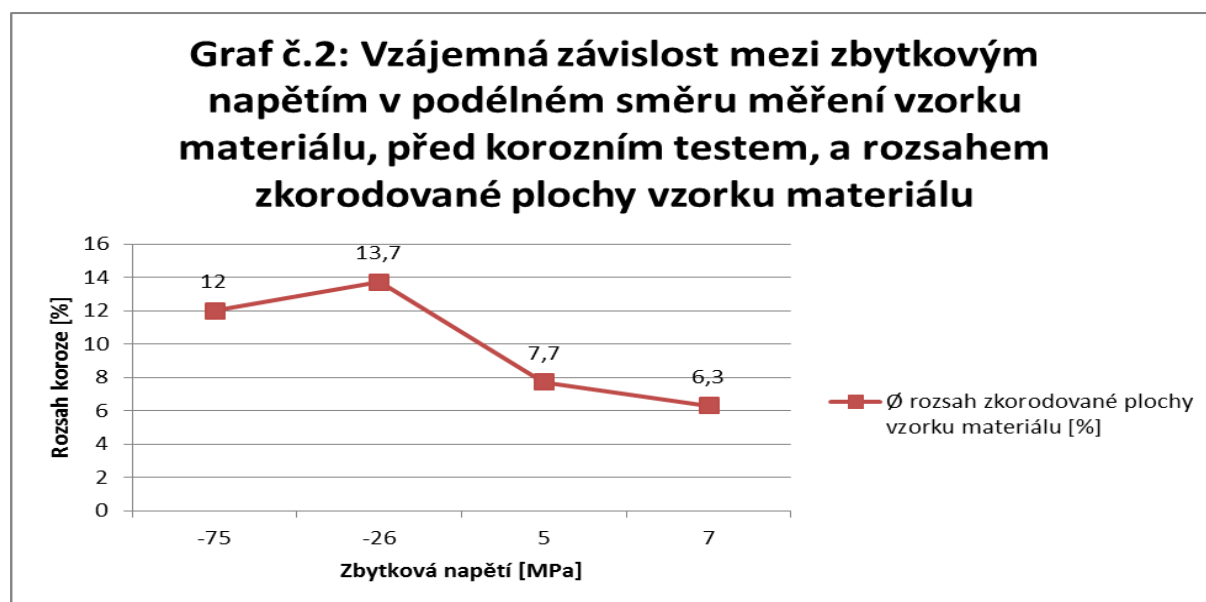


### 6.1.2. Závislost mezi zbytkovým napětím a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu

**Tabulka č. 8:** Vzájemná závislost mezi zbytkovým napětím v podélném směru měření vzorku materiálu, před korozním testem, a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu

Vzorek materiálu	Druh namáhání	Měření zbytkového o napětí-počáteční stav; před korozním testem [ MPa ]		Vizuální zhodnocení rozsahu koroze vzorků materiálu v závislosti na čase, při kondenzačním testu			
		Podélný směr měření	Toler. měření	Hodnocení č. 1	Hodnocení č. 2	Hodnocení č. 3	Ø rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]
				Rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]	Rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]	Rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]	
5.1	Nezatěžované	+7	±11	1	8	10	6,3
4.1	Nezatěžované	+5	±13	1	7	15	7,7
7.1	Nezatěžované	-26	±13	1	20	20	13,7
6.1	Nezatěžované	-75	±11	1	25	10	12,0

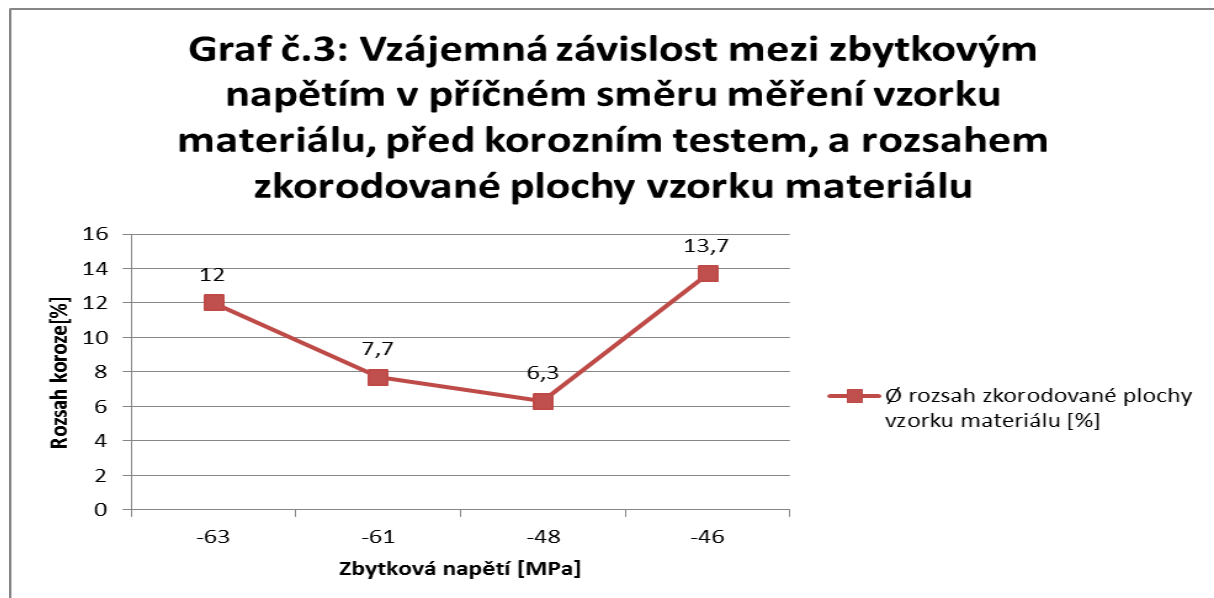
**Tabulka č.8:** Vzájemná závislost mezi zbytkovým napětím v podélném směru měření vzorku materiálu, před korozním testem, a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu



**Tabulka č. 9:** Vzájemná závislost mezi zbytkovým napětím v příčném směru měření vzorku materiálu, před korozním testem, a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu

Vzorek materiálu	Druh namáhání	Měření zbytkového napětí-počáteční stav; před korozním testem [ MPa ]		Vizuální zhodnocení rozsahu koroze vzorků materiálu v závislosti na čase, při kondenzačním testu			
		Příčný směr měření	Toler. měření	Hodnocení č. 1	Hodnocení č. 2	Hodnocení č. 3	Ø rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]
				Rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]	Rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]	Rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu [%]	
7.1	Nezatěžované	-46	±4	1	20	20	13,7
5.1	Nezatěžované	-48	±3	1	8	10	6,3
4.1	Nezatěžované	-61	±4	1	7	15	7,7
6.1	Nezatěžované	-63	±5	1	25	10	12,0

**Tabulka č.9:** Vzájemná závislost mezi zbytkovým napětím v příčném směru měření vzorku materiálu, před korozním testem, a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu



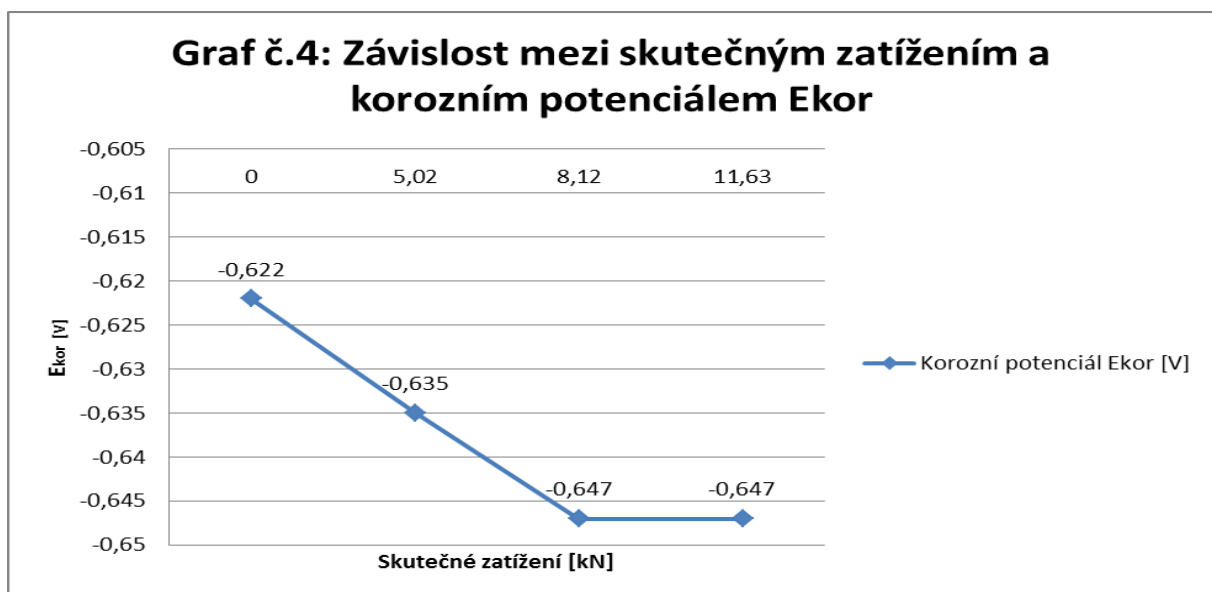
## 6.3. Experiment č. 2

### 6.2.1. Závislost mezi skutečným zatížením z trhacího stroje, ev. zbytkovým napětím ve vzorku a korozním potenciálem $E_{kor}$ , korozní rychlostí $j$ a polarizačním odporem $R_d$ měřeným na potenciostatu ve vzorku materiálu

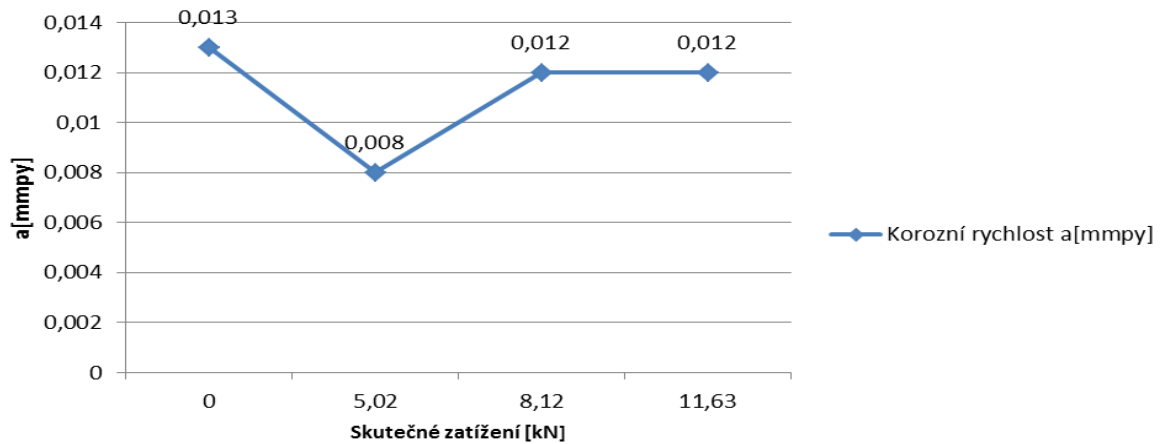
**Tabulka č. 10:** Závislost mezi skutečným zatížením z trhacího stroje, ev. zbytkovým napětím a korozním potenciálem  $E_{kor}$ , korozní rychlostí  $j$  a polarizačním odporem  $R_d$  měřeným na potenciostatu ve vzorku materiálu

Vzorek č.1	Skutečné zatížení [kN]	Zbytkové napětí [MPa]	Toletance výpočtu [MPa]	Korozní proudová hustota $j_{kor}$ [mA]	Korozní potenciál $E_{kor}$ [V]	Korozní rychlost $a$ [mmpy]	Polarizační odpor $R_d$ [ $\Omega$ ]
4	0	-20	$\pm 7$	37	-0,622	0,013	695
3	5,02	-43	$\pm 7$	32	-0,635	0,008	804
2	8,12	22	$\pm 9$	43	-0,647	0,012	594
1	11,67	35	$\pm 9$	38	-0,647	0,012	681

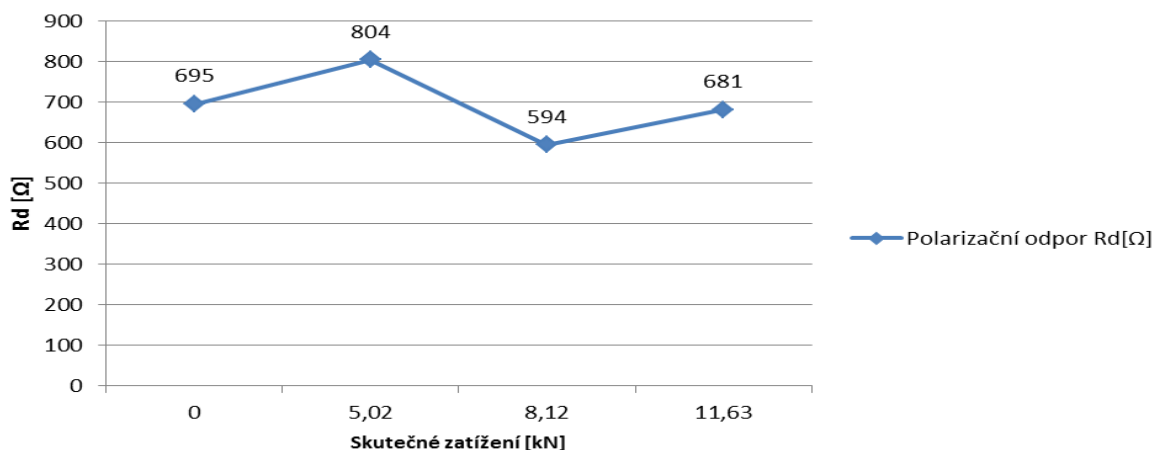
**Tabulka č.10:** Závislost mezi skutečným zatížením z trhacího stroje, ev. zbytkovým napětím a korozním potenciálem  $E_{kor}$ , korozní rychlostí  $j$  a polarizačním odporem  $R_d$  měřeným na potenciostatu ve vzorku materiálu



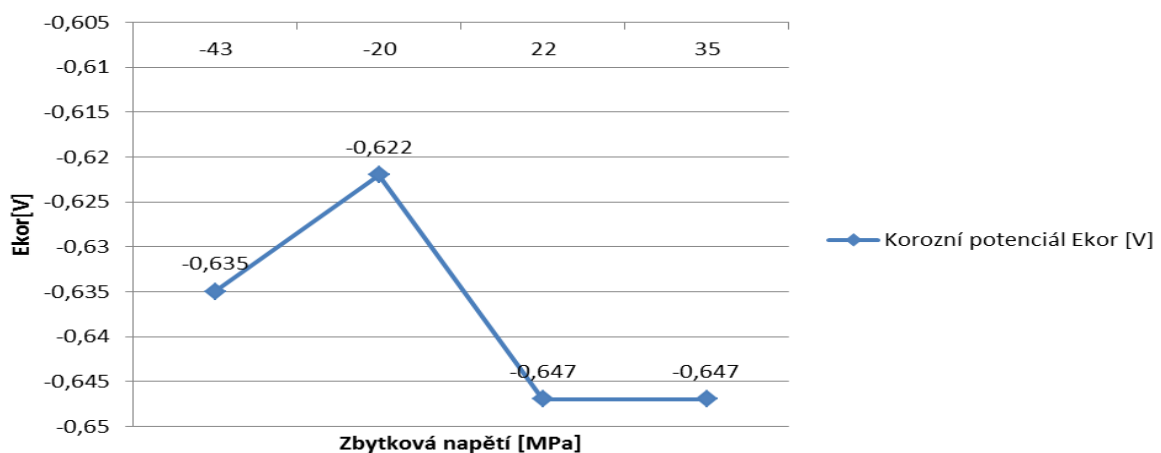
**Graf č.5: Závislost mezi skutečným zatížením a korozní rychlostí a**

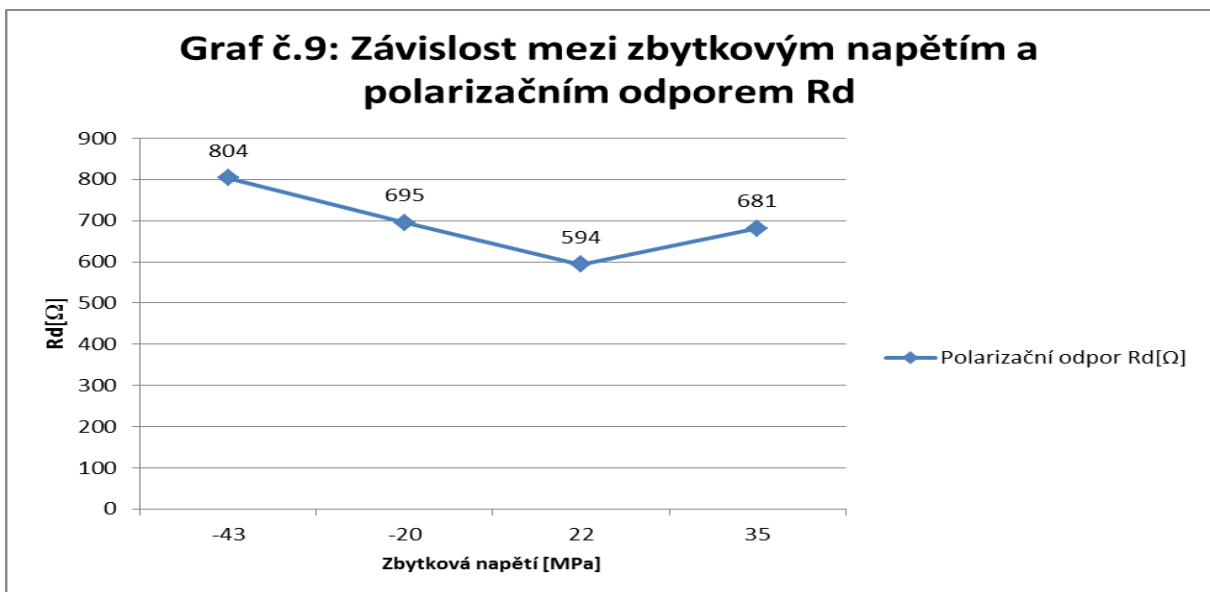
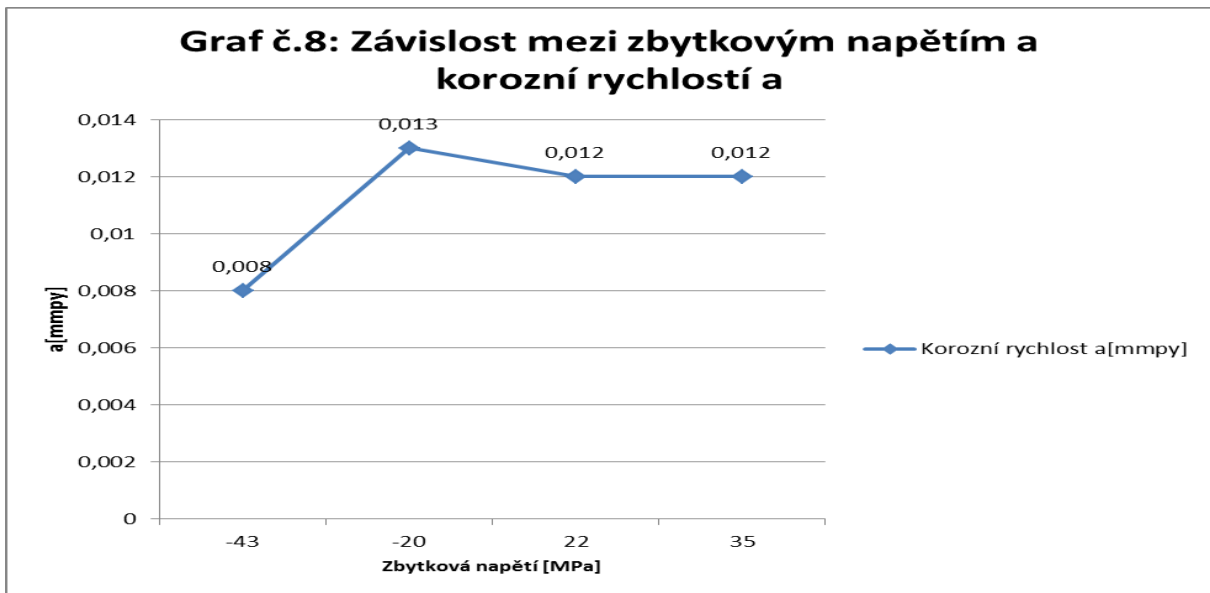


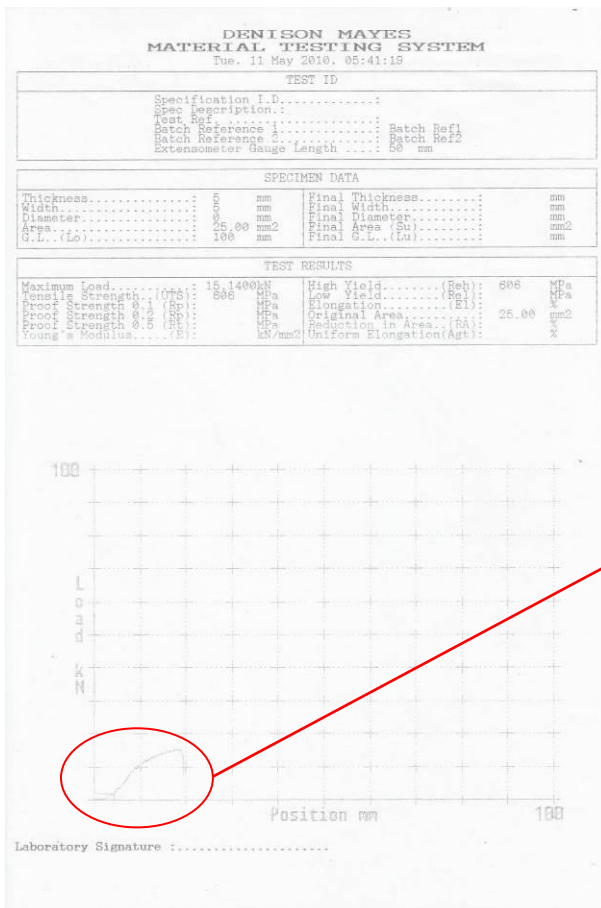
**Graf č.6: Závislost mezi skutečným zatížením a polarizačním odporem Rd**



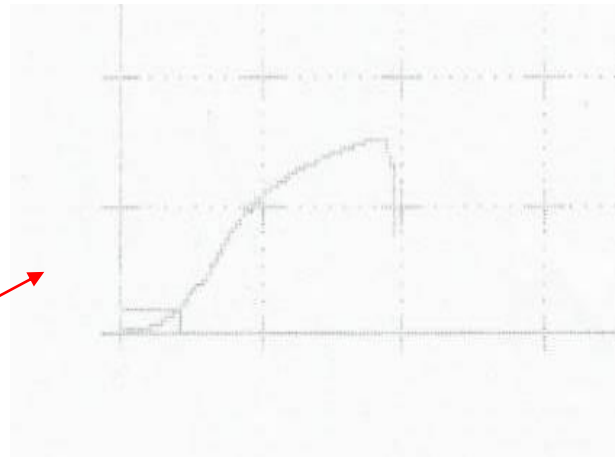
**Graf č.7: Závislost mezi zbytkovým napětím a korozním potenciálem Ekor**







Obr.č.66: Graf trhacího diagramu vzorku C



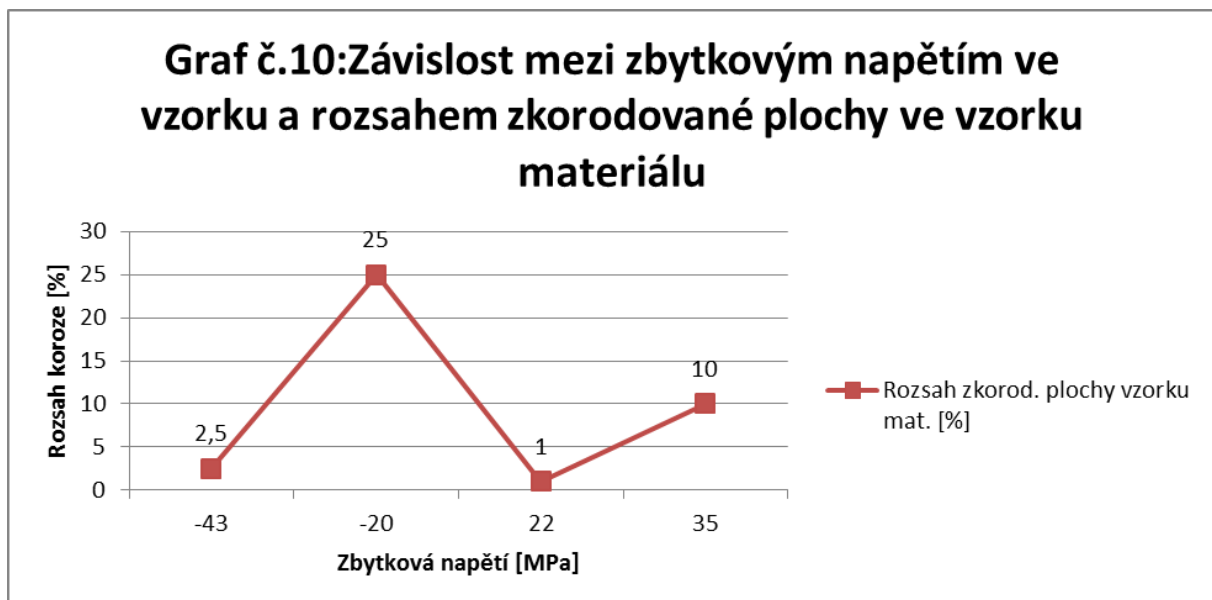
Obr.č.67: Graf trhacího diagramu \_zvětšený

### 6.3. Experiment č. 3

#### 6.3.1. Závislost mezi zbytkovým napětím ve vzorku a rozsahem zkorodované plochy ve vzorku materiálu

**Tabulka č. 6:** Závislost mezi zbytkovým napětím ve vzorku a rozsahem zkorodované plochy ve vzorku materiálu

Vzorek č.	Zbytkové napětí [MPa]	Toletance výpočtu [MPa]	Rozsah zkorod. plochy vzorku mat. [%]
4	-20	±7	25
3	-43	±7	2,5
2	22	±9	1
1	35	±9	10





## 7 Diskuze výsledků

### 7.1 Experiment č. 1

Účelem experimentu č. 1 bylo ověřit, zda-li existuje vzájemný vztah mezi napětím, které bylo do vzorku materiálu vloženo pomocí přípravku a mezi korozi tohoto vzorku materiálu, kterou jsme simulovali v korozní komoře. Podle toho samého principu se postupovalo i v případě naměřeného zbytkového napětí a simulace koroze. Původ zbytkového napětí ve vzorku materiálu je pravděpodobně z výrobních procesů, které byly použity při výrobě polotovaru vzorku materiálů, ev. mohou pocházet z přípravy samotných vzorků mechanickým dělením z polotovaru.

#### 7.1.1. Závislost mezi vloženým napětím a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu

Z tabulky č. 7, která se vztahuje k této části experimentu č. 1, jsou patrné naměřené hodnoty vložených napětí vzorků seřazené od největší hodnoty po nejnižší hodnotu. Byla provedena celkem tři vizuální hodnocení vzorků materiálů na rozsah zkorodované plochy. Z výsledků pozorování (s přihlédnutím k normě ČSN EN ISO 10289) je patrné, že hodnocení č. 2 a č. 3 jsou téměř identické. Z tohoto důvodu a z důvodu větší přehlednosti v Grafu č. 1 se hodnocení č. 1, č. 2 a č. 3 zprůměrovalo do výsledné hodnoty, s kterou bylo dále pracováno. Identický postup byl zvolen i v případě odstavce 7.1.2 platný pro Tabulku č. 8 a Graf č. 2 tohoto experimentu a této bakalářské práce.

Naměřené hodnoty jsou v Grafu č. 1 seřazené na vodorovné ose grafu od nejmenších hodnot vložených napětí po nejvyšší hodnoty a křivka grafu vykresluje vzájemnou závislost mezi těmito hodnotami a hodnotami průměrných zkorodovaných ploch vzorků vyneseny na svislé ose grafu. Z Grafu č. 1 je vidět, že se vzrůstajícím napětím klesá rozsah zkorodované plochy vzorku materiálu, s výjimkou u vzorku materiálu č. 1. 1, kde rozsah koroze nepatrně vzrostl. Tento vzrůst si vysvětlujeme nepřesnostmi ve vizuálním vyhodnocování ploch koroze, ale celkový klesající trend je zřejmý. Očekávání vývoje trendu byla opačná, tzn., že se vzrůstajícím napětím se bude rozsah koroze zvětšovat. Pro vysvětlení tohoto jevu je třeba provést více měření na vícero vzorcích materiálů a zvážit, zda-li je zvolená metoda posuzování rozsahu koroze dostatečně objektivní.

#### 7.1.2. Závislost mezi zbytkovým napětím a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu

Obdobný vývoj jako v případě 7.1.1. byl pozorován i z naměřených hodnot zbytkových napětí v Tabulce č. 8 a vyneseny v Grafu č. 2. Opět je patrná, v Tabulce č. 8, značná „rozkolísanost“ v hodnoceních č. 1 až č. 3 zkorodovaných ploch vzorků materiálů a proto tyto hodnoty byly opět zprůměrovány a takto vyneseny do Grafu č. 2. V Grafu č. 2 jsou na vodorovné ose vyneseny hodnoty zbytkových napětí a na svislé ose jsou vyneseny hodnoty průměrné zkorodované plochy vzorků. Křivka, která je těmito hodnotami proložena vyjadřuje jejich vzájemnou závislost. Z Grafu č. 2 je patrný klesající trend s výjimkou vzorku č. 7.1, kde rozsah koroze vzrostl. Tento vzrůst si vysvětlujeme opět nepřesnostmi ve vizuálním vyhodnocování ploch koroze, ale celkový klesající trend je opět jasný. Pro vysvětlení tohoto jevu je třeba provést více měření na vícero vzorcích materiálů a zvážit, zda-li je zvolená metoda posuzování rozsahu koroze dostatečně objektivní.

## 7.2 Experiment č. 2

Experiment č. 2 byl realizován jednak jako náhrada vyhodnocování zkorodované plochy vzorků materiálu jinými metodami, tzn. měřením korozního potenciálu, korozní rychlosti a polarizačního odporu pomocí potenciostatu, a dále byl v tomto experimentu použit trhací stroj. Tento stroj byl použit z toho důvodu, že při měření zbytkových napětí byla v materiálu dosti často pozorována zbytková tlaková napětí, avšak experiment jsme chtěli zaměřit spíše na výzkum zbytkových tahových napětí. Bylo předpokládáno, že v plastické oblasti deformace materiálu, by bylo možné jednoosým tahovým namáháním, vyvozeným trhacím strojem, za určitých předpokladů změnit tato tlaková zbytková napětí na tahová zbytková napětí. Je nám zároveň známo, že materiál použitý na experimenty tzn. ocel S235 není monokrystalickým materiálem (viz. 4.6.1.), ale polykrystalickým materiálem (konglomerát složený z drobných monokrystalů, zrn), kde v plastické oblasti deformace materiálů ovlivňuje vznik zbytkových napětí, velikost zbytkových napětí a i změnu velikosti zbytkových napětí celá řada významných faktorů jako jsou například:

1. Rozdílné vlastnosti jednotlivých různě orientovaných zrn a současně i různě orientovaných hranic těchto zrn, tvořících přechod mezi jednotlivými zrny ve struktuře materiálu, kdy skluzová napětí (smyková napětí, kdy se atomy v krystalické mřížce oproti sobě vzájemně posunují; translace, dvojčatění), díky kterým vzniká plastická deformace materiálu, jsou mnohem větší než u monokrystalu.

2. Strukturální poruchy materiálu (bodové, čárové - dislokace, plošné, objemové-trhliny, vměstky neboli precipitáty, které jsou značnou překážkou pro pohyb dislokací).

3. Anizotropické vlastnosti (rozdílné vlastnosti krystalů v různém směru) polykrystalu vzniklé v důsledku tváření materiálů, kdy dochází k deformaci krystalu v jednom směru, směru tváření.

4. a další.[30]

Z těchto důvodů nebylo příliš pravděpodobné, že se zvyšujícím se zatížením na trhacím stroji bude i úměrně stoupat hodnota zbytkového napětí, avšak v Tabulce č. 5, ev. v Tabulce č. 10 vidíme, že, pravděpodobně i přes to, tento jev nastat mohl viz. vzorky č. 1 a č. 2 (plastická oblast deformace). Nicméně je z výše popsaných faktorů zřejmé, že u většího množství zkoumaných vzorků materiálů, by se tento trend v plastické oblasti deformace pravděpodobně neprojevil!

V Tabulce č. 10 je vidět zatížení, které bylo skutečně aplikováno do vzorků materiálu (čtyři vzorky) a zbytková napětí, která byla změřena na rentgenovém difraktometru. Při vzájemném porovnání těchto hodnot je patrné, že hodnota zbytkového napětí u vzorku č. 4 je větší než u vzorku č. 3. Tento jev si je možné pravděpodobně vysvětlit tím, že při zatížení 5,0kN u vzorku č. 3, jsme se stále nacházeli v elastické oblasti deformace materiálu. Toto je možné odhadovat z grafu trhací diagramu vzorku C, Obr. č. 66 a Obr. č. 67. Tato skutečnost tudíž znamená, že u vzorku č. 3 se projevilo zbytkové napětí z tvářecích procesů při výrobě polotovaru vzorku materiálu. Vzorek č. 4, který nebyl vůbec, zatěžován vykazuje taktéž hodnoty zbytkového napětí z tvářecích procesů při výrobě polotovaru vzorku materiálu. U vzorků č. 2 a č. 1 se pravděpodobně pohybujeme v oblasti hranice meze kluzu materiálu a hodnoty změřených zbytkových napětí jsou kladné hodnoty, které byly ovlivněny s největší pravděpodobností zatížením vyvolaným na trhacím stroji. V Grafech č. 4, č. 5 a č. 6 je patrný průběh a vývoj jednotlivých zkoumaných veličin v závislosti na skutečném zatížení vzorků materiálu, ale jelikož za skutečně hledané hodnoty lze považovat hodnoty změřených zbytkových napětí, budeme porovnávat tyto hodnoty se změřenými hodnotami, tzv. korozního potenciálu, korozní rychlosti a polarizačního odporu, na potenciostatu v Grafech č. 7, č. 8 a č. 9.

### 7.2.1. Závislost mezi zbytkovým napětím ve vzorku materiálu a korozním potenciálem $E_{kor}$ , korozní rychlostí $j$ a polarizačním odporem $R_d$

Ve všech grafech tohoto experimentu je na vodorovné ose vynesena vždy jako první nejnižší hodnota a to z důvodu zachování interpretačních schopností jednotlivých vzájemných závislostí.

Graf č. 7 vyjadřuje závislost mezi zbytkovým napětím a korozním potenciálem. Na vodorovné ose jsou vyneseny hodnoty změřených zbytkových napětí a na svislé ose jsou hodnoty změřeného korozního potenciálu. Křivka proložená jejich společnými průsečíky nám udává závislost mezi těmito hodnotami, případně z ní bylo usuzováno na trend této vzájemné závislosti. Z grafu je patrný klesající trend závislosti mezi zbytkovým napětím a korozním potenciálem s výjimkou vzorku č. 4, kde je trend opačný. Klesajícím potenciálem znamená, že materiál koroduje lépe a naopak. Z Grafu č. 7 je tedy zřejmý trend, že materiál se zvyšujícím se napětím koroduje více.

Graf č. 8 vyjadřuje závislost mezi zbytkovým napětím a korozní rychlostí. Na vodorovné ose jsou vyneseny hodnoty změřených zbytkových napětí a na svislé ose jsou hodnoty změřené korozní rychlosti. Křivka proložená jejich společnými průsečíky nám udává závislost mezi těmito hodnotami, případně z ní můžeme usuzovat na trend této vzájemné závislosti. Z grafu je patrný rostoucí trend závislosti mezi zbytkovým napětím a korozní rychlostí opět s nepatrnou výjimkou vzorku č. 4, kde je trend opačný. Graf ukazuje, že se zvyšujícím se napětím se zvyšuje i korozní rychlost a tím roste i úbytek materiálu vzorků.

Graf č. 9 vyjadřuje závislost mezi zbytkovým napětím a polarizačním odporem. Na vodorovné ose jsou vyneseny hodnoty změřených zbytkových napětí a na svislé ose jsou hodnoty změřeného polarizačního odporu. Křivka proložená jejich společnými průsečíky nám udává závislost mezi těmito hodnotami, případně z ní bylo usuzováno na trend této vzájemné závislosti. Graf ukazuje, že se zvyšujícím se napětím se zmenšuje i hodnota polarizačního odporu s výjimkou u vzorku č. 1. To znamená, že se zvyšujícím se zbytkovým napětím klesá polarizační odpor a koroze se zvyšuje. Tento trend je v souladu s trendy zjištěnými i u Grafu č. 7 a Grafu č. 8.

Výchylku u vzorku č. 4 v Grafech č. 7 a č. 8 a výchylku u vzorku č. 1 v Grafu č. 9 lze vysvětlit nepřesností v měření tohoto vzorku a to pravděpodobně z důvodu relativně malých vzájemných rozdílů zbytkových napětí u jednotlivých zkoumaných vzorků materiálu. Pro objektivnější posouzení měření by bylo vhodné provést měření na větším množství zkoumaných vzorků materiálu.

### 7.3 Experiment č. 3

Účelem experimentu č. 3 bylo znovu ověření metody vyhodnocování rozsahu zkorodované plochy vzorku s přihlédnutím k normě ČSN EN ISO 10289. Pro tento experiment jsme použili výsledky měření vzorků materiálu z experimentu č. 2.

#### 7.3.1. Závislost mezi zbytkovým napětím a rozsahem zkorodované plochy vzorku materiálu

Velikost zbytkových napětí je patrná z Tabulky č. 6. Z této tabulky je dále vidět i rozsah koroze vzorků v závislosti na těchto zbytkových napětích. Bylo provedeno pouze jedno hodnocení rozsahu koroze a to proto, že vzniklo podezření na neúmyslnou pasivaci vzorků materiálu při experimentu č. 1, pasivace mohla nastat při odstraňování korozních produktů z povrchů vzorků (čištění lihem a poté ethanolem), čímž mohlo dojít k nepřesnostem při vyhodnocování rozsahu koroze při experimentu č. 1. Doba působení korozního prostředí při experimentu č. 2 byla zvýšena na 118 hodin, při teplotě 40°C a při vystavení působení kondenzace vodních par o 100% relativní vlhkosti. Při bližším pohledu na hodnocení rozsahu zkorodované plochy v závislosti na zbytkovém napětí je z Tabulky č. 6 patrné, že vyhodnocené hodnoty rozsahu zkorodované plochy vzorků materiálu jsou velmi rozdílné a to bez ohledu na velikost zbytkových napětí, které se v jednotlivých vzorcích vyskytují.

V Grafu č. 10 jsou na vodorovné ose vyneseny hodnoty zbytkového napětí od nejmenší po největší hodnotu a na svislé ose jsou vyneseny hodnoty rozsahu zkorodované plochy vzorků. Těmito hodnotami je na jejich průsečnicích vedena křivka, která by měla vyjadřovat jejich vzájemnou závislost. Při pohledu na graf č. 10 je patrné, že z průběhu křivky se nedá jednoznačně určit rostoucí ani klesající trend křivky. Je velmi pravděpodobné, že důvodem tohoto „trendu“ křivky je zcela neobjektivní vyhodnocování rozsahu zkorodované plochy vzorků a to i s přihlédnutím ke zkušenostem s vyhodnocováním rozsahu zkorodovaných ploch v experimentu č. 1.

## 8 Závěr

Z celkem třech provedených experimentů se domníváme, že se povedlo nastínit další vývoj či doporučení pro další zkoumání vlivu zbytkových napětí či vložených napětí na korozní vlastnosti materiálu/lů.

1. Z použitých metod, použitých v této bakalářské práci, pro zkoumání vložených napětí lze pravděpodobně doporučit přípravek, použitý v této bakalářské práci, pro natažení zkoumaného vzorku materiálu a v tomto nataženém stavu změřit jednotlivá vložená napětí na rentgenovém difraktoměru a dále změřit jeho korozní potenciál, korozní rychlost a polarizační odpor na potenciostatu a tyto měření graficky porovnat pro zjištění vzájemných závislostí.

2. Z použitých metod, použitých v této bakalářské práci, pro zkoumání zbytkových napětí lze pravděpodobně doporučit změření zbytkových napětí bez zatěžování na trhacím stroji a spoléhat se na zbytková napětí do vzorků materiálů zanesených při výrobě polotovaru vzorku materiálu, případně do vzorků zanesených zbytkových napětí při jejich výrobě z polotovaru. Dále by se provedla měření korozního potenciálu, korozní rychlosti a polarizačního odporu na potenciostatu a měření by se graficky porovнала pro posouzení vzájemných závislostí.

Nalezení metody pomocí, které by bylo možné aplikovat do materiálu konkrétní velikosti zbytkových napětí považujeme za velice obtížnou a to z důvodů uvedených v odstavci [7. 2](#). Nalezení metody pomocí, které by bylo možné aplikovat do materiálu „nějaké“ velikosti zbytkových napětí považujeme za lépe proveditelnou, avšak s respektováním teorie v odstavci [4. 5](#) a v odstavci [4. 6. 1](#) této bakalářské práce.

3. Jako nevhodná se pro účely těchto experimentů naopak jeví metoda vyhodnocování rozsahu koroze podle normy ČSN EN ISO 10289 a to z důvodu zanesení příliš velké chyby ve vizuálním posouzení rozsahu koroze vzorků materiálu.

4. Pro potvrzení teorie, že se vzrůstajícím napětím roste i rozsah koroze materiálů je zcela jednoznačně nutné tyto experimenty provést na větším množství měřených zkušebních vzorků a to i pro možnost statistického vyloučení chybných měření u jednotlivých vzorků materiálu.

5. Jako další doporučení bylo uvedeno, že by pravděpodobně bylo vhodné rozdělit zkoumání vzorků zvlášť na vzorky, které byly vystaveny tahovému namáhání a na vzorky, které byly vystaveny tlakovému namáhání.

V této bakalářské práci se povedlo nastínit cesty, způsoby a možná i doporučení, k dalšímu výzkumu vlivu vložených a zbytkových napětí na korozní vlastnosti materiálů, ale nepodařilo se zcela jednoznačně ve všech uskutečněných experimentech prokázat to, že se vzrůstajícím napětím vzrůstá i korozní poškození materiálů.

### Seznam použité literatury:

- [1] [LUDEK PTACEK a kolektiv: Nauka o materiálu II](#)
- [2] [PACAL, Bohumil. VUT FSI ÚMVI. Korozní zkoušení kovových materiálů \[online\]. Brno, 2010 \[cit. 2012-05-19\]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/oporakoroze4/index.html>](#)
- [3] [NOVÁK, Pavel. Multimediální výukový projekt: Korozní inženýrství \[online\]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická \[cit. 2012-03-16\]. Dostupné z: \[http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni\\\_inzenyrstvi\\\_se/koroze/uvod.htm\]\(http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni\_inzenyrstvi\_se/koroze/uvod.htm\)](#)
- [4] [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni\\_inzenyrstvi\\_se/koroze/s\\_iproje.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/s_iproje.htm)
- [5] [https://www.google.cz/search?q=galvanick%C3%BD+%C4%8D1%C3%A1nek&biw=1920&bih=969&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=9pU2VN7\\_LobBPK7dgOgF&sqi=2&ved=0CCoQsAQ#facrc=&imgdii=&imgrc=rQaWpW830NWFQM%253A%3B2JxBZUMbzEsXqM%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.zschemie.euweb.cz%252Fredox%252Fgalvanicky\\_clanek.gif%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.zschemie.euweb.cz%252Fredox%252Fredox13.html%3B400%3B270](https://www.google.cz/search?q=galvanick%C3%BD+%C4%8D1%C3%A1nek&biw=1920&bih=969&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=9pU2VN7_LobBPK7dgOgF&sqi=2&ved=0CCoQsAQ#facrc=&imgdii=&imgrc=rQaWpW830NWFQM%253A%3B2JxBZUMbzEsXqM%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.zschemie.euweb.cz%252Fredox%252Fgalvanicky_clanek.gif%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.zschemie.euweb.cz%252Fredox%252Fredox13.html%3B400%3B270)
- [6] [http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/339/.content/files/VZM11\\_korozeAopotrebeni.pdf](http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/339/.content/files/VZM11_korozeAopotrebeni.pdf)
- [7] [http://martin.feld.cvut.cz/~kudlacek/EKP/09\\_koroze.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/~kudlacek/EKP/09_koroze.pdf)
- [8] [http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich\\_procesu/Lasek\\_Zaklady\\_degradacnich\\_procesu.pdf](http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich_procesu/Lasek_Zaklady_degradacnich_procesu.pdf)
- [9] [R. WINSTON REVIE, HERBERT H. UHLIG: CORROSION AND CORROSION CONTROL An Introduction to corrosion science and Engineering](#)
- [10] [ČSN EN ISO 8044 Koroze kovů a slitin – Základní termíny a definice](#)
- [11] [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze\\_materialu/koroze\\_materialu\\_doplnek\\_prednasek.pdf](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu/koroze_materialu_doplnek_prednasek.pdf)
- [12] <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/oporakoroze4/k3.html>
- [13] [ONDŘEJ CHOCHOLATÝ: Zkoušení korozních vlastností\\_prezentace](#)
- [14] <http://www.corrosionpedia.com/definition/885/pitting-resistance-equivalent-number-pren>
- [15] [R. HALAMA, L. ADÁMKOVÁ, F. FOJTÍK, K. FRYDRÝŠEK, M. ŠOFER, J. ROJÍČEK, M. FUSEK: Pružnost a pevnost; Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava a Západočeská univerzita v Plzni](#)
- [16] [http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources\\_old/pp1/teor31.htm](http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources_old/pp1/teor31.htm)

- [17] [F.PLÁNIČKA, M.ZAJÍČEK, V.ADÁMEK : NAPJATOST A HYPOTÉZY PEVNOSTI](#)
- [18] [ING. MIROSLAV HLUCHÝ A KOLEKTIV: NAUKA O MATERIÁLU 1976](#)
- [19] [http://www.ateam.zcu.cz/zkousky\\_mat.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/zkousky_mat.pdf)
- [20] <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-11375.pdf>
- [21] [http://www.feromat.cz/jakosti\\_oceli](http://www.feromat.cz/jakosti_oceli)
- [22] [ING. KAMIL KOLAŘÍK: Difrakční studium fyzikálních technologií obrábění oceli 2010](#)
- [23] <http://msvantne.webnode.cz/news/co-jsou-zbytkova-napeti/>
- [24] [KAREL DOUBRAVA: PRINCIPY ODVRTÁVACÍ METODY, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze](#)
- [25] [JAROSLAV VÁCLAVÍK, ZBYNĚK BUNDA, PETR BOHDAN, OTAKAR WEINBERG: APLIKACE VYBRANÝCH METOD PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ](#)
- [26] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=34229](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34229)
- [27] [http://www.pcs.sk/pcssro\\_cz\\_analytika\\_cs/download/integrita-povrchu.pdf](http://www.pcs.sk/pcssro_cz_analytika_cs/download/integrita-povrchu.pdf)
- [28] [http://www.xray.cz/xray/csca/kol2002/doc/nikolaj\\_ganev2.htm](http://www.xray.cz/xray/csca/kol2002/doc/nikolaj_ganev2.htm)
- [29] [home.zcu.cz/~sbenesov/Skriptatvareni.pdf](http://home.zcu.cz/~sbenesov/Skriptatvareni.pdf)
- [30] <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>